



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**CAUSAS Y EFECTOS DE LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN PLANTAS
INDUSTRIALES Y MÉTODO DE PROTECCIÓN PARA DISIPAR LA PERTURBACIÓN
ELÉCTRICA OCASIONADA POR ESTE EVENTO**

Eduardo Osberto Cifuentes Ramos

Asesorado por el Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez

Guatemala, abril de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CAUSAS Y EFECTOS DE LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN PLANTAS
INDUSTRIALES Y MÉTODO DE PROTECCIÓN PARA DISIPAR LA PERTURBACIÓN
ELÉCTRICA OCASIONADA POR ESTE EVENTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

EDUARDO OSBERTO CIFUENTES RAMOS
ASESORADO POR EL ING. GUSTAVO BENIGNO OROZCO GODÍNEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ABRIL DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Óscar Humberto Galicia Núñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

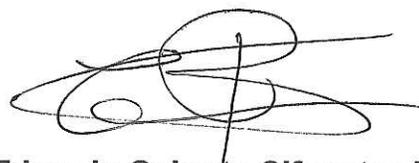
DECANO a.i.	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. Byron Armando Cuyán Culajay
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CAUSAS Y EFECTOS DE LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN PLANTAS INDUSTRIALES Y MÉTODO DE PROTECCIÓN PARA DISIPAR LA PERTURBACIÓN ELÉCTRICA OCACIONADA POR ESTE EVENTO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha marzo de 2016.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a vertical line extending downwards from the center.

Eduardo Osberto Cifuentes Ramos

Guatemala, 6 de septiembre de 2017.

Ingeniero Saúl Cabezas
Coordinador Área de Potencia
Escuela Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
USAC.

Estimado Ingeniero:

De acuerdo con la designación efectuada por la Dirección de Escuela, me permito informarle que he procedido a asesorar el Trabajo de Graduación titulado: **CAUSAS Y EFECTOS DE LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN PLANTAS INDUSTRIALES Y METODO DE PROTECCION PARA DISIPAR LA PERTURBACION ELECTRICA OCASIONADA POR ESTE EVENTO** desarrollado por el estudiante EDUARDO OSBERTO CIFUENTES RAMOS, carne 2006-41335 y, encontrándolo satisfactorio en su contenido y resultados, me permito dar aprobación al mismo, remitiéndolo a esa Coordinación para el tramite pertinente, en el entendido que el Autor y este Asesor somos responsables del contenido y conclusiones del Trabajo.

Agradeciendo la atención a la presente, me es grato suscribirme, deseándole éxitos en sus labores cotidianas.

Atentamente,



Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez.
Colegiado 1,879
ASESOR

ING. GUSTAVO B. OROZCO
COLEGIADO 1879



REF. EIME 06. 2018.

29 DE ENERO 2018.

FACULTAD DE INGENIERIA

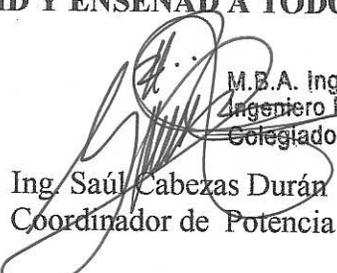
Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**CAUSAS Y EFECTOS DE LAS SOBRETENSIONES
TRANSITORIAS EN PLANTAS INDUSTRIALES Y
MÉTODO DE PROTECCIÓN PARA DISIPAR LA
PERTURBACIÓN ELÉCTRICA OCASIONADA POR ESTE
EVENTO,** del estudiante Eduardo Osberto Cifuentes
Ramos, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
DIRECCIÓN DE
ID Y ENSEÑANZA A TODOS


Ing. Saúl Cabezas Durán
Coordinador de Potencia

M.B.A. Ing. Saul Cabezas Durán
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 4648



sro



REF. EIME 06. 2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **EDUARDO OSBERTO CIFUENTES RAMOS** titulado: **CAUSAS Y EFECTOS DE LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN PLANTAS INDUSTRIALES Y MÉTODO DE PROTECCIÓN PARA DISIPAR LA PERTURBACIÓN ELÉCTRICA OCASIONADA POR ESTE EVENTO,** procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Fernando Andrino González



GUATEMALA, 1 DE MARZO 2018.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 126 .2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **CAUSAS Y EFECTOS DE LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN PLANTAS INDUSTRIALES Y MÉTODO DE PROTECCIÓN PARA DISIPAR LA PERTURBACIÓN ELÉCTRICA OCASIONADA POR ESTE EVENTO**, presentado por el estudiante universitario: **Eduardo Osberto Cifuentes Ramos**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, abril de 2018

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Quien ha estado en mi vida en todo momento.
Mis padres	Osberto Cifuentes y Magnolia Ramos, por darme la vida, por su amor y los valores inculcados.
Mi esposa	Aldy Carolina González, por su amor y compañía en toda mi carrera universitaria.
Mi hijo	Santiago, por ser mi inspiración y motivación para seguir adelante.
Mis hermanas	Andrea y Diana, por su cariño y apoyo incondicional.
Toda mi familia	Por ser especial y un pilar importante en mi vida.
Mis abuelos	Arnoldo Cifuentes (q.e.p.d.), Sheile León, Nicolás Ramos, Petrona Godínez (q.e.p.d.), por su ejemplo y cariño.
Mis amigos	Gracias por brindarme su amistad y compartir conmigo en diferentes etapas de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudio.

Facultad de Ingeniería

Por haberme brindado los conocimientos para desarrollarme profesionalmente y ayudar a la sociedad.

Familia Ramos Morales

Por recibirme en su hogar y compartir conmigo en diferentes etapas de mi vida; en especial a mi tío Waldemar Ramos y mis primos Luis, Christian y Marcely.

**Mis amigos de la
Facultad**

Por compartir conocimientos y ser un equipo en mi formación académica.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ASPECTOS TEÓRICOS DE LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS.....	1
1.1. Sobretensión transitoria.....	1
1.2. Tipos de transitorios de sobretensión.....	3
1.2.1. Sobretensión transitoria de tipo impulsivo	3
1.2.2. Sobretensión transitoria de tipo oscilatorio	5
1.3. Sistemas eléctricos y electrónicos de una planta industrial vulnerables a las sobretensiones transitorias	6
1.4. Áreas afectadas debido a las fallas en equipos en una planta industrial	7
1.4.1. Mantenimiento	7
1.4.2. Producción.....	8
1.4.3. Informática o sistemas.....	9
1.4.4. Proyectos.....	9
1.4.5. Compras	10
1.4.6. Gerencia	10
1.5. Origen de las sobretensiones transitorias.....	10
1.5.1. Fuentes externas	11
1.5.2. Fuentes internas	12

1.6.	El fenómeno de la descarga atmosférica	13
1.6.1.	Teoría de Simpson	13
1.6.2.	Teoría de Elster y Geitel.....	14
1.6.3.	Teoría de Wilson	15
1.6.4.	Teoría de Schonland	16
1.6.5.	Descarga atmosférica denominada rayo.....	18
1.6.5.1.	Protección contra la caída de rayos	21
1.7.	Efectos de las sobretensiones transitorias, en sistemas eléctricos y electrónicos típicos de una planta industrial.....	22
1.7.1.	Efecto de las sobretensiones transitorias en sistemas eléctricos	22
1.7.2.	Efecto de las sobretensiones transitorias en sistemas electrónicos	22
1.7.3.	Equipos más afectados en plantas industriales y su impacto económico.....	23
1.8.	Sobretensiones transitorias en sistemas de potencia	24
1.9.	Tecnología de protección para disipar las sobretensiones transitorias en instalaciones eléctricas industriales.....	33
1.9.1.	Varistor	34
1.9.2.	Supresor de sobretensiones transitorias	37
1.9.2.1.	Seguimiento de onda	41
1.9.2.2.	Resina disipadora.....	42
2.	EVALUACIÓN DEL FENÓMENO ELÉCTRICO EN UNA PLANTA INDUSTRIAL EN OPERACIÓN	45
2.1.	Instalación de un contador de eventos para medir la cantidad de sobretensiones transitorias en un punto crítico de planta	45
2.1.1.	El contador de eventos de sobretensiones transitorias.....	45

2.1.2.	Instalación de un contador de eventos en una planta industrial.....	47
2.1.3.	Mediciones tomadas con el contador de eventos ...	49
2.2.	Analizador de energía y calidad de potencia	50
2.3.	Levantamiento eléctrico de las cargas críticas y especiales de la planta	81
2.3.1.	Levantamiento eléctrico	81
2.3.2.	Levantamiento eléctrico en una planta industrial de textiles.....	83
2.3.2.1.	Datos adquiridos del levantamiento eléctrico	84
2.4.	Diagramas unifilares de la instalación eléctrica de la planta....	91
2.5.	Análisis de la distorsión de la onda senoidal de voltaje ocasionada por las sobretensiones transitorias.....	95
2.5.1.	Distorsión de la onda por una sobretensión transitoria de tipo impulsivo	96
2.5.2.	Distorsión de la onda por una sobretensión transitoria de tipo oscilatorio	97
3.	DISEÑO DE PROTECCIÓN PARA DISIPAR LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA INDUSTRIAL	103
3.1.	Categoría de supresores de sobretensiones transitorias según norma ANSI/IEEE C62.41-1991.....	103
3.1.1.	Clasificación.....	104
3.1.2.	Nivel de exposición.....	105
3.1.3.	Tensión y conexión.....	107
3.1.4.	Clamping.....	107
3.1.5.	Corriente de corto circuito de la instalación eléctrica	108

3.2.	Método de protección en cascada con supresores, bajo la norma IEEE 1100-1999.....	110
3.3.	Diseño de protección contra sobretensiones transitorias de la planta industrial evaluada.....	114
3.3.1.	Coordinación de protección.....	114
3.3.2.	Diagrama unifilar con supresores de sobretensiones transitorias para la protección de la instalación eléctrica	126
3.4.	Características, categoría y capacidad de descarga de los supresores de sobretensiones transitorias del sistema de protección de la planta industrial.....	131
3.5.	Instalación de supresores de sobretensiones transitorias.....	134
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	137
4.1.	Equipos eléctricos y electrónicos afectados.....	137
4.2.	Consecuencias de las sobretensiones transitorias en plantas industriales.....	139
4.3.	Costo de reposición y reparación por los equipos afectados por el evento eléctrico	140
4.4.	Medidas tomadas para disipar la perturbación eléctrica ocasionada por las sobretensiones transitorias	141
	CONCLUSIONES.....	145
	RECOMENDACIONES	149
	BIBLIOGRAFÍA.....	151

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Gráfica de una sobretensión transitoria.....	2
2.	Sobretensión transitoria de tipo impulsivo	4
3.	Sobretensión transitoria de tipo oscilatoria.....	5
4.	Evolución de la descarga atmosférica.....	20
5.	Diagrama esquemático de una sección elemental de una línea de transmisión.....	28
6.	Onda de voltaje	30
7.	Símbolo eléctrico del varistor	34
8.	El varistor	35
9.	Comportamiento del varistor frente a la tensión	35
10.	Modos de protección, configuración monofásica	38
11.	Modos de protección, configuración estrella	39
12.	Modos de protección, configuración delta	40
13.	Resina disipadora de calor de un supresor	43
14.	Contador de eventos.....	46
15.	Contador de eventos en un banco de capacitores	47
16.	Contador de eventos en una máquina textil.....	48
17.	Analizador de energía y calidad de potencia marca Fluke 435 serie II.....	51
18.	Mediciones de voltaje trifásico en la acometida de la planta industrial.....	54
19.	Medición de corriente trifásica RMS en la acometida de la planta industrial.....	55

20.	Pantalla de eventos registrados.....	56
21.	Interruptor principal.....	57
22.	Gráfica de valores RMS de voltaje y corriente de las 3 fases y neutro	58
23.	Gráfica de valores pico de voltaje y corriente de las 3 fases y neutro ..	59
24.	Gráfica de valores pico de voltaje de las 3 fases y neutro	60
25.	Gráfica de valores pico de voltaje y corriente de una fase.....	61
26.	Gráfica de valores pico de corriente de las 3 fases y neutro	62
27.	Gráfica de valores pico de corriente de 1 fase.....	63
28.	Pantalla de eventos registrados.....	64
29.	Banco de capacitores	65
30.	Gráfica de valores RMS de voltaje y corriente de las 3 fases y neutro	66
31.	Gráfica de valores pico de voltaje y corriente de las 3 fases y neutro ..	67
32.	Gráfica de valores pico de voltaje de las 3 fases y neutro	68
33.	Gráfica de valores pico de voltaje de una fase	69
34.	Gráfica de valores pico de corriente de las 3 fases y neutro	70
35.	Gráfica de valores pico de corriente de una fase.....	71
36.	Instalación del analizador de energía y calidad de potencia en una bomba de agua de 15 HP	73
37.	Gráfica de valores RMS de voltaje y corriente de las 3 fases y neutro	74
38.	Gráfica de valores pico de voltaje y corriente de las 3 fases	75
39.	Gráfica de valores pico de voltaje de las 3 fases	76
40.	Gráfica de valores pico de voltaje de una fase	77
41.	Gráfica de valores pico de corriente de las 3 fases	78
42.	Gráfica de valores pico de corriente de una fase.....	79
43.	Configuración estrella de un banco de transformación trifásico.....	85
44.	Capacitores de regulación de F.P.....	86

45.	Bomba para petróleo.....	88
46.	Circuito de control de la bomba.....	88
47.	Tarjetas electrónicas de una máquina textil	89
48.	Máquina textil	90
49.	Diagrama unifilar de la acometida y tableros de distribución	92
50.	Diagrama unifilar de una máquina textil	93
51.	Diagrama unifilar de tableros y máquinas textiles	94
52.	Transitorio de tipo impulsivo.....	97
53.	Transitorio de tipo oscilatorio	98
54.	Transitorio de baja frecuencia	99
55.	Niveles isoceraunicos de Guatemala	106
56.	Coordinación de protección en cascada, con supresores de sobretensiones transitorias	113
57.	Curva típica de disparo de un interruptor termomagnético.....	115
58.	Ampacidad de conductores.....	122
59.	Factores de corrección, temperaturas ambientes	123
60.	Máxima corriente de corto circuito	126
61.	Diagrama unifilar de la acometida y tableros de distribución con protección.....	128
62.	Diagrama unifilar de una máquina textil con protección	129
63.	Diagrama unifilar de tableros y máquinas textiles con protección	130

TABLAS

I.	Mediciones tomadas, interruptor principal.....	56
II.	Mediciones tomadas, banco de capacitores	64
III.	Mediciones tomadas, bomba de agua.....	72
IV.	Características de fenómenos electromagnéticos.....	100

V.	Capacidad de descarga del supresor según la capacidad del interruptor termomagnético.....	108
VI.	Capacidad de descarga del supresor según la potencia del motor a proteger	109
VII.	Descripción de las cargas instaladas.....	117

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
	Capacitor
	Conexión de tierra
I	Corriente
	Fuente de corriente alterna
	Interruptor termomagnético
kVA	Kilo voltiamperios
kV	Kilo voltio
	Luminaria
	Máquina giratoria o motor
μs	Microsegundo
ms	Milisegundos
ns	Nanosegundos
	Transformador monofásico
	Transformador trifásico
VF	Variador de frecuencia
	Varistor
W	Watt

GLOSARIO

Acometida	Punto de conexión eléctrica entre la distribución de energía eléctrica y la instalación eléctrica.
Aparta rayos	Dispositivo de protección para elementos de media y alta tensión, desvía las sobretensiones a tierra cuando estas superan su valor nominal y se comporta como un corto circuito.
ANSI	Siglas de <i>American National Standards Institute</i> , organización que supervisa el desarrollo de estándares para productos, servicios, procesos y sistemas en los Estados Unidos.
Balastro	Reactancia inductiva que está constituida por una bobina de alambre de cobre esmaltado, enrollada sobre un núcleo de chapas de hierro o de acero eléctrico, que mantiene estable y limita el flujo de corriente par una lámpara.
CA	Corriente alterna.
Capacitor	Dispositivo que tiene la capacidad de almacenar energía en forma de campo eléctrico.
CD	Corriente directa.

Contactor	Interruptor electromagnético que sirve para desconectar y conectar el paso de la corriente en circuitos eléctricos de control y potencia.
CT	Transformador de corriente.
Devanado	Conductor de cobre aislado, arrollado de forma conveniente, dependiendo de su uso.
DPS	Siglas de <i>Surge Protective Device</i> , es un dispositivo de protección contra sobretensiones.
Fusible	Elemento de protección compuesto por un conductor que se funde cuando la magnitud de la corriente supera su resistencia térmica.
HP	Siglas de <i>Horse Power</i> , que significa caballos de fuerza.
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica por sus siglas en inglés.
LED	Diodo emisor de luz.
Multímetro	Instrumento de medición eléctrica, tiene la capacidad de tomar magnitudes de voltaje, corriente y resistencia.
PLC	Controlador lógico programable.

PT	Transformador de potencial.
Reconectador	Dispositivo de interrupción de carga eléctrica, con posibilidad de recierre automático e interruptor de media tensión; también se le conoce como <i>recloser</i> .
UPS	Sistema de alimentación ininterrumpida.
Varistor	Resistencia variable en función del voltaje.
Watt	Unidad de potencia del sistema internacional de unidades que equivale a un Joules por segundo.

RESUMEN

El presente trabajo consiste en mostrar las causas y efectos de las sobretensiones transitorias en plantas industriales, así como el alcance que puede tener su impacto en una línea de producción, administración, logística, seguridad y todas las áreas que conforman una planta industrial, que dependen de la energía eléctrica para su operación.

Se presenta un estudio teórico y práctico en una planta industrial de textiles, la cual cumple con una instalación eléctrica típica industrial, para poder tomar como modelo de análisis y estudios, teóricos y en campo, para la investigación de los eventos de sobretensiones transitorias que existen en una planta industrial. Para ampliar la información se visitaron diversas plantas industriales, con procesos de producción distintos dependiendo del producto final, pero todas dependientes de sistemas de control y de potencia.

Con la información aportada por coordinadores de mantenimiento, inspecciones en plantas industriales, mediciones con un analizador de potencia, calidad de energía y un contador de eventos, se describe la causa y efectos de las sobretensiones transitorias, así como un método de protecciones coordinadas, para poder mitigar el efecto de la energía generada por las sobretensiones transitorias en los distintos dispositivos eléctricos y electrónicos que forman el equipamiento de una línea de producción.

Se describe el dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias DPS, o supresor de sobretensiones transitorias, y se muestra paso a paso la elaboración de un diseño de protección en cascada y la selectividad de los

dispositivos de protección. Con este método se muestra la ubicación y característica de cada dispositivo o elemento de protección, para que opere de la forma más eficiente, reduciendo costos en la producción por paradas no programadas y costos de reparación y reposición de equipos eléctricos y electrónicos de los sistemas de potencia y control.

Por último, se resaltan los equipos y dispositivos más afectados o vulnerables a este evento eléctrico, así como su impacto económico, al igual que las medidas a tomar para la reducción de su efecto y generación de las sobretensiones transitorias, de tal manera que se presenta la forma de adecuación e instalación de los elementos que componen una instalación eléctrica industrial.

OBJETIVOS

General

Realizar un análisis de las causas y efectos de las sobretensiones transitorias en instalaciones eléctricas de plantas industriales, para determinar el impacto técnico y económico que ocasiona este evento eléctrico, y poder conocer el método de protección más eficiente para disipar este tipo de falla, para que sea considerado en nuevos proyectos o expansiones de instalaciones eléctricas industriales.

Específicos

1. Analizar las sobretensiones transitorias, desde su origen y sus consecuencias en una instalación eléctrica industrial.
2. Conocer los sistemas, equipos y dispositivos eléctricos y electrónicos más sensibles, vulnerables y que son afectados por la perturbación eléctrica de sobretensión transitoria.
3. Visitar tres plantas industriales para conocer sus experiencias en el tema.
4. Realizar una estimación de pérdidas económicas ocasionadas por las sobretensiones transitorias.

5. Conocer y seleccionar las tecnologías que existen para disipar estas perturbaciones eléctricas bajo las normas UL 1445, ANSI/IEEE C62.41, ANSI/IEEE C62.45 y del libro esmeralda, norma IEEE 1100-1999, para saber cómo aplicarlas y cómo diseñar la coordinación de protección en una instalación eléctrica industrial.

INTRODUCCIÓN

Las instalaciones eléctricas de plantas industriales cuentan con sistemas de potencia, control, automatización, bases de datos y comunicación. Una producción eficiente de una planta industrial depende del insumo más importante, que es la energía eléctrica, el cual es suministrado por distintas redes de distribución de energía eléctrica en niveles de voltajes de media y baja tensión, y transportado en niveles de alta tensión. Esta señal eléctrica idealmente tiene una forma de onda senoidal, con una amplitud constante y una frecuencia de 60 Hz.

Todo dispositivo eléctrico y electrónico está diseñado para operar bajo condiciones de voltaje y corriente nominales, es necesario que se cumplan los parámetros de amplitud, frecuencia y forma de onda, para que la instalación eléctrica cuente con los estándares de calidad deseados para el funcionamiento de los sistemas que dependen de la energía eléctrica para su operación.

En sistemas de potencia de alta, media y baja tensión es difícil cumplir con los parámetros nominales de voltaje y corriente, ya que existe una diversidad de eventos eléctricos internos y externos que perturban los parámetros y características de la energía eléctrica, afectando la operación de los distintos equipos que se encuentran conectados a la red eléctrica y que dependen en su totalidad de la energía de este tipo. Por lo tanto, es importante conocer sobre estas perturbaciones y las tecnologías que existen para disiparlas.

En la presente investigación se tratan específicamente las sobretensiones transitorias, eventos eléctricos no deseados en las plantas de producción,

debido a la tecnología con la que cuentan hoy en día los procesos industriales, que en su mayoría es electrónica, la cual es más vulnerable a este evento por su complejidad y las pequeñas tensiones y corrientes que maneja.

El transitorio de sobretensión es un evento eléctrico que tiene la característica de tener una tensión con una amplitud grande, en un tiempo muy corto y con valores de nanosegundos, el cual provoca daños de grandes proporciones en equipos con control electrónico y de potencia, por la característica de generar un cambio brusco de tensión.

1. ASPECTOS TEÓRICOS DE LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS

Estos aspectos teóricos se presentan para ampliar los conocimientos respecto al evento de las sobretensiones transitorias, fundamentando el desarrollo de la investigación.

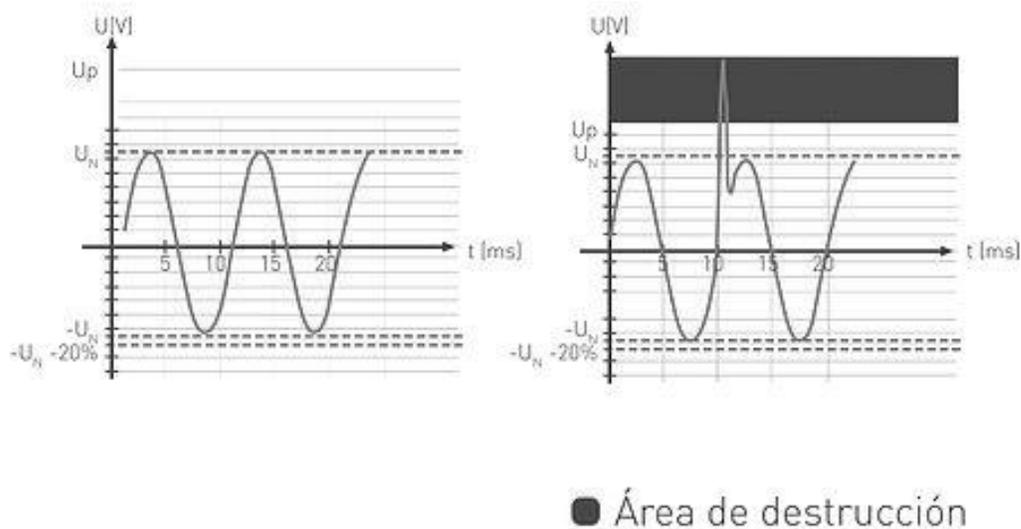
1.1. Sobretensión transitoria

La sobretensión transitoria es un voltaje de gran amplitud con magnitudes hasta de 20 000 voltios o más según el IEEE, en una o más fases de un sistema eléctrico, con la característica que, a diferencia de las sobretensiones permanentes, esta sobretensión tiene un tiempo de duración muy corto, en el rango de los milisegundos hasta los nanosegundos, por eso este tipo de sobretensiones son llamadas transitorios o comúnmente picos de voltaje, ya que vistas gráficamente en una onda senoidal, se pueden apreciar como grandes picos que sobresalen de la forma de onda de voltaje ideal.

Este evento eléctrico es muy común en cualquier instalación eléctrica, ya sea industrial, domiciliar o en sistemas de media y alta tensión, por lo general, solamente se pueden apreciar sus efectos, que son devastadores en la industria, debido a que son los causantes de grandes pérdidas de equipos de control, potencia y automatización. Causan retrasos en la productividad de una planta industrial, ya que generan fallas en los sistemas eléctricos y electrónicos, que obligan a un sistema de producción a detener parte o la totalidad del proceso industrial.

Este evento eléctrico, por su rapidez y repentina aparición, es difícil de medir con equipos comunes de medición, como un multímetro. Se necesita de equipos especiales que tengan la capacidad de analizar la calidad de la energía de una instalación eléctrica, tomando parámetros de corriente y voltaje en un período de tiempo determinado, para poder establecer magnitudes y el tipo de sobretensión transitoria que se midió, realizando un análisis de la distorsión de la onda generada por la sobretensión transitoria.

Figura 1. **Gráfica de una sobretensión transitoria**



Fuente: *Sobretensión transitoria*. <http://www.cirprotec.com/es/Soporte/Area-de-conocimiento/Proteccion-contrasobretensiones/DPS/Sobretensiones-Transitorias-DPS>.

Consulta: octubre de 2016.

1.2. Tipos de transitorios de sobretensión

Existen diferentes tipos de sobretensiones transitorias, ya que pueden ser originados por distintos fenómenos eléctricos. Conforme a lo anterior se pueden dividir en dos tipos:

- Sobretensión transitoria de tipo impulsivo
- Sobretensión transitoria de tipo oscilatorio

Estos tipos de sobretensión son distintos en su forma y comportamiento en la onda senoidal de voltaje. Cada uno de estos es descrito y abordado ampliamente a continuación.

1.2.1. Sobretensión transitoria de tipo impulsivo

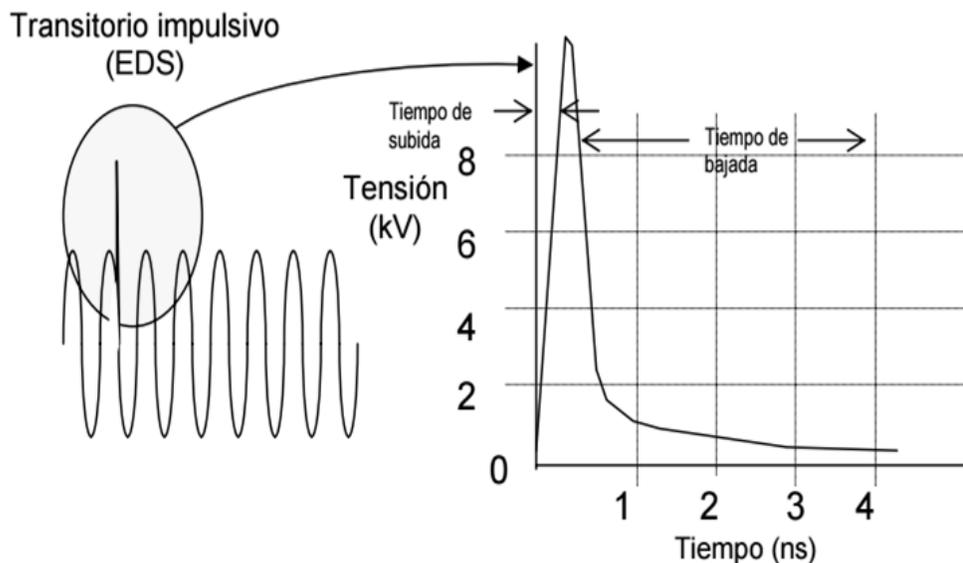
Las sobretensiones de tipo impulsivo son eventos eléctricos en los cuales la magnitud de la tensión aumenta significativamente en tiempos muy cortos y decrece en un tiempo mayor. Por ejemplo, una onda de impulso de $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ y 2 Kv, es decir, aumenta de cero a 2 kV en $1,2 \mu\text{s}$, y luego decae a la mitad de su valor pico en $50 \mu\text{s}$. Este impulso puede ser positivo o negativo.

Las causas de los transitorios impulsivos incluyen puesta a tierra deficiente, encendido de cargas inductivas, liberación de fallas de la red eléctrica, reenganches de reconectores en la red de distribución y, el más común de este tipo, que es la descarga eléctrica atmosférica comúnmente llamada rayo.

La descarga eléctrica atmosférica es la que causa más daños en un sistema eléctrico de potencia, ya que genera sobretensiones transitorias de tipo

impulsivo con niveles de voltaje y corriente bastante significativos, con magnitudes que superan los 20 kV. Cuando una descarga eléctrica atmosférica ingresa por el lado de alto voltaje de un transformador a la instalación eléctrica, es más dañina para los equipos de la instalación, ya que, si bien el transformador bajaría el voltaje proporcionalmente según la relación de transformación, siendo el voltaje de salida aún dañino, el nivel de corriente se elevaría también proporcionalmente a la relación de transformación, siendo esta mucho más grande que la corriente original generada por la descarga eléctrica atmosférica.

Figura 2. **Sobretensión transitoria de tipo impulsivo**



Fuente: *Sobretensión de tipo impulsivo*. <http://es.slideshare.net/karloz/los-siete-tipos-de-problemas-en-el-suministro-electrico>. Consulta: octubre de 2016.

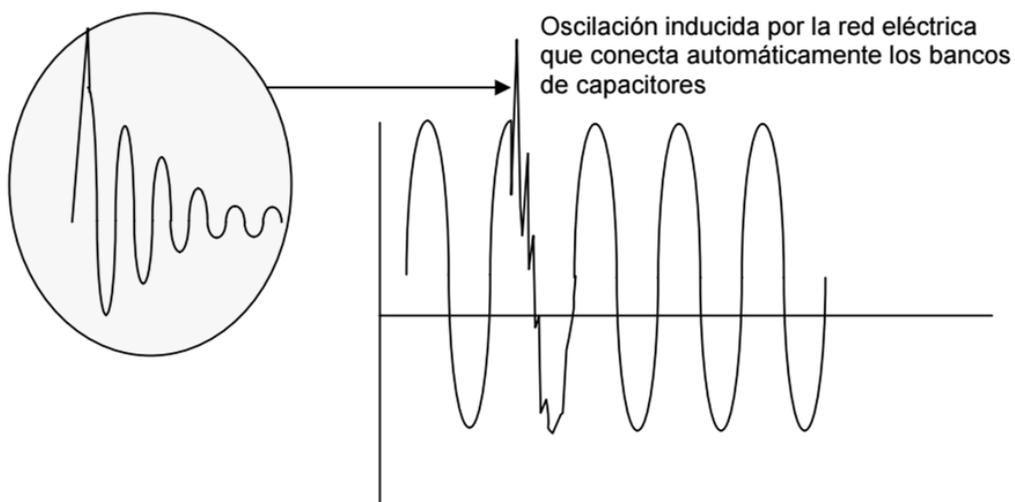
En la gráfica se puede apreciar su comportamiento. Tiene una subida de voltaje rápida y una bajada más lenta.

1.2.2. Sobretensión transitoria de tipo oscilatorio

Una sobretensión oscilatoria tiene la característica de tener cambios repentinos en la onda de voltaje y corriente, ya sea cambios negativos o positivos en la forma de onda senoidal. Este tipo de sobretensión transitoria provoca subidas y bajadas de voltaje de forma alterna en tiempos muy rápidos, teniendo frecuencias altas, medias y bajas. Esta sobretensión baja a cero en forma de una oscilación descendente.

Este evento eléctrico ocurre con la conmutación de carga inductiva o capacitiva, como por ejemplo el arranque de un motor y su parada o la operación de conexión y desconexión de los bancos de capacitores de una instalación eléctrica. La oscilación de la sobretensión transitoria se debe a la oposición de las cargas al cambio repentino de la tensión aplicada en sus terminales.

Figura 3. **Sobretensión transitoria de tipo oscilatoria**



Fuente: *Sobretensión oscilatoria*. <http://es.slideshare.net/karloz/los-siete-tipos-de-problemas-en-el-suministro-electrico>. Consulta: octubre de 2016.

En la gráfica anterior se puede apreciar cómo la sobretensión tiene un aumento rápido de tensión y disminuye de forma oscilatoria.

Un ejemplo de este tipo de sobretensión se puede apreciar cuando un motor está trabajando, ya que en las terminales de conexión se le aplica un voltaje y frecuencia con magnitudes preestablecidas que hacen que el motor trabaje de acuerdo a lo requerido para su aplicación; pero cuando se deja de aplicar tensión en sus terminales, el motor, en un tiempo muy corto, funciona como un generador, ya que el campo magnético variable en su rotor induce una tensión con un valor de frecuencia proporcional a los giros que da el motor antes de detenerse por completo. Esta energía es inyectada al sistema eléctrico de la planta industrial, o incluso a la red de distribución de energía eléctrica.

1.3. Sistemas eléctricos y electrónicos de una planta industrial vulnerables a las sobretensiones transitorias

La energía de las sobretensiones transitorias afecta tanto a sistemas eléctricos de potencia como a sistemas electrónicos y de comunicación. Según la ley de Ohm, la corriente busca el camino donde hay menos resistencia para circular, por lo tanto los sistemas que manejan pequeñas corrientes y que cuentan con pequeñas impedancias son los más vulnerables a este evento eléctrico, teniendo un impacto perjudicial instantáneo.

Los equipos electrónicos son los que cuentan con las características que favorecen a que la energía de una sobretensión transitoria cause daños en sus elementos, ya que cuentan con dispositivos sensibles a las variaciones bruscas de voltaje. Al hablar de sistemas electrónicos, se hace referencia a un sinnúmero de equipos formados por dispositivos electrónicos, como PLC's, variadores de velocidad, tarjetas electrónicas, relés inteligentes, etc., que generalmente son

usados para la automatización de procesos. Quiere esto decir que un proceso industrial automatizado es vulnerable a este evento eléctrico.

En los sistemas eléctricos de potencia el impacto de este evento eléctrico se aprecia con la disminución de la vida útil de los equipos, sin dejar a un lado que también pueden tener impactos instantáneos en equipos como transformadores y motores. El aislamiento es el más vulnerable, ya que está diseñado para trabajar bajo niveles específicos de voltaje que, en baja tensión, por lo general no superan los 600 voltios. Al perderse el aislamiento de una bobina se puede generar una falla interna, ya sea en un transformador o un motor, generando la pérdida completa del equipo.

1.4. Áreas afectadas debido a las fallas en equipos en una planta industrial

En una planta industrial las áreas que pueden ser afectadas por las fallas en equipo son: mantenimiento, producción, informática o sistemas, proyectos, compras y gerencia en general.

1.4.1. Mantenimiento

En el área de mantenimiento de una planta industrial, las sobretensiones transitorias son las responsables de generar fallas en equipos que llevan a requerir mantenimiento correctivo o de emergencia.

En el caso de las tarjetas electrónicas, transformadores, motores, iluminación, etc., se debe tener un *stock* con repuestos para las reparaciones correspondientes, así mismo, personal técnico capacitado para la reparación

rápida de los equipos y proveedores con la capacidad de reponer los equipos y repuestos en tiempos muy cortos, ya que este evento es impredecible.

El área de mantenimiento debe estar preparada para solucionar cualquier eventualidad en la instalación eléctrica y debe darle solución a los problemas eléctricos en el menor tiempo posible, ya que al darse una falla de gran magnitud, que provoque la parada no programada de una planta industrial, en el personal de mantenimiento recaerán todas las responsabilidades de los índices bajos de producción y de la pérdida de materia prima, bases de datos, seguridad de la instalación, etc., de la planta industrial.

1.4.2. Producción

En todos los procesos productivos se cumple la teoría de las restricciones, y los famosos cuellos de botella, que son inherentes a ellos. La electrónica está generando, hoy en día, los cuellos de botella. Esto se debe al impacto en la mala calidad de la energía y, al mismo tiempo, a que todos los procesos industrializados son automatizados, requiriendo de la electrónica para su operación y control.

La electrónica no permite mantenimiento preventivo, como se efectúa en áreas de mecánica, eléctrica o neumática. En electrónica, comúnmente se utiliza mantenimiento correctivo de emergencia y mantenimiento proactivo.

El 88 % de las fallas en electrónica son a consecuencia de las sobretensiones transitorias. La falla en una tarjeta electrónica de una máquina especial en una línea de producción genera paradas de producción no programadas, que afectan significativamente a un proceso, proporcionalmente al tiempo que se detiene la producción, generando lucro cesante.

1.4.3. Informática o sistemas

En informática es de mucha importancia la disponibilidad de datos. Actualmente se manejan distintos tipos de software, tanto para el proceso industrial como en la logística o administración, que tienen respaldo normalmente por cualquier corte de energía con un UPS, que ofrecen solo un 98,8 % de disponibilidad, eléctricamente hablando, y como un UPS no es protección sino que solamente un respaldo, se reduce la seguridad para el UPS y para las cargas que alimenta o respalda. Es por eso que se debe analizar la mejor forma de proteger un circuito y sus equipos críticos, porque al proteger como mínimo el UPS, se protegerá la carga. El riesgo de perder información es algo que no puede tener un centro de informática, además, tampoco resulta favorable la pérdida de equipos tan valiosos como los servidores y el mismo UPS.

1.4.4. Proyectos

La gestión de proyectos es lograr mejorar la productividad a través de la automatización, que se consigue principalmente con elementos electrónicos tales como los variadores y PLC's. Esto se cumple mientras esté operando el sistema de forma normal, porque cuando este falla inesperadamente y por causas de perturbaciones eléctricas, como las sobretensiones transitorias, al no tener conocimiento de estos eventos eléctricos, se diseñan y desarrollan proyectos sin sistemas de protección que, a corto y largo plazo, traerán consigo problemas técnicos y económicos significativos para una planta industrial.

Lo que se entrega como un proyecto de gran solución se vuelve un gran problema técnico y económico, ya que es difícil contar siempre con un *stock* de repuestos o con la programación de software inmediata y con un tiempo de

respuesta del proveedor, en la mayoría de casos, lento, debido a que la mayoría de equipos y repuestos son importados. Esto ocurre cuando no se toma en cuenta el diseño y equipos de protección para potencia y electrónica.

1.4.5. Compras

Compras cumple una gestión de suma importancia para una organización, ya que es el proveedor de todos los insumos, equipos y materiales de una planta industrial. Las sobretensiones transitorias pueden ser responsables de la pérdida de estos equipos adquiridos, de los cuales pueden ser críticos en su proceso de producción y generar más gastos en la organización con la reposición de equipos eléctricos y electrónicos, afectando significativamente los presupuestos.

1.4.6. Gerencia

La productividad y la optimización de los recursos es lo que asegura la rentabilidad de una organización, pero los tiempos muertos afectan la productividad. Las sobretensiones transitorias afectan estos procesos con el deterioro y las fallas en los equipos que son esenciales en una planta de producción, provocando las paradas inesperadas de la planta y generando gastos de reposición y mantenimiento en el aspecto eléctrico y electrónico, generando también grandes pérdidas de producción.

1.5. Origen de las sobretensiones transitorias

Existen dos tipos de fuentes de generación de sobretensiones transitorias en una instalación eléctrica industrial: las fuentes externas, que generalmente son el 20 % de las sobretensiones transitorias en una instalación eléctrica, y las

fuentes internas, que corresponden al otro 80 %. Cada una de estas es analizada individualmente.

1.5.1. Fuentes externas

Las sobretensiones transitorias generadas por fuentes externas en una planta industrial son las más perjudiciales para una instalación eléctrica, ya que generalmente son de magnitudes muy grandes. La más conocida y que causa más daño es la sobretensión transitoria originada por una descarga atmosférica con magnitudes de miles de voltios. Las descargas atmosféricas pueden inducir miles de voltios en los conductores de una instalación eléctrica.

Otras causas son las maniobras en subestaciones, reenganche de reconectores de media línea y de cabecera en redes de distribución en media tensión, actuación de interruptores de potencia en líneas de transmisión, fallas en el transporte y distribución de electricidad, como por ejemplo el flameo de aisladores, líneas rotas que generan desbalance de fases y fase a tierra, vegetación en contacto con las líneas y contaminación industrial.

Las plantas industriales cuentan con bancos de transformadores instalados, ya sea en un poste ubicado fuera de la planta y conectado de forma aérea a la red de distribución de media tensión, o en el interior de la planta industrial tomando la energía de la red de distribución de media tensión por medio de acometidas subterráneas. Quiere decir que el punto de conexión externo es entre los bancos de transformadores y la media tensión, que es por donde ingresará la mayoría de sobretensiones transitorias externas.

Según las normas técnicas de distribución, NTDS, las empresas distribuidoras deben contar con equipos de protección para mejorar la calidad

del suministro de energía, como por ejemplo la instalación de aparta rayos en puntos donde los niveles de descargas atmosféricas son grandes, hilo de guarda para el blindaje de las líneas, cortacircuitos y fusibles para aislar fallas de forma selectiva, y los reconectaroes en cabecera y en media línea de la red.

Cuando ocurre una falla en la red de distribución, en algunas ocasiones opera el reconector, realizando aperturas y cierres de forma instantánea. Cuando un fusible opera por una falla y este se repone, en ocasiones se realiza la maniobra del cierre del cortacircuito en derivaciones con bastante carga. Al hacer esta maniobra de forma manual, no con la precisión ni la rapidez de un reconector, se genera una sobretensión transitoria que llega a incidir en todas las instalaciones eléctricas conectadas a la derivación, y en algunos casos el fusible vuelve a accionar por la sobrecorriente generada. Estas son maniobras que comúnmente se realizan en la operación de una red de distribución y que diariamente repercuten en las instalaciones eléctricas, no solo industriales, sino residenciales también.

1.5.2. Fuentes internas

La mayoría de sobretensiones transitorias son generadas en el interior de la instalación eléctrica industrial, debido a la cantidad de equipos eléctricos y electrónicos que realizan conmutaciones. Ya sea equipo para mejorar la calidad de energía, como los bancos de capacitores que generan sobretensiones transitorias al momento de la conexión de entrada y salida de los grupos de capacitores, para mejorar el factor de potencia de la instalación, o equipos de automatización industrial como los contactores, arrancadores de motores, variadores de velocidad, arco de soldaduras, compresores de aire, la simple conmutación de encender un grupo de luminarias genera sobretensiones transitorias.

En una instalación eléctrica industrial se cuenta con infinidad de equipos eléctricos que generan distintos fenómenos eléctricos que por las características de su funcionamiento producen perturbaciones en el voltaje.

Un proceso industrial automatizado y una planta industrial, por el tipo de servicios que requieren, cuentan con equipos que, por su forma de operar, son grandes generadores de sobretensiones transitorias, por lo tanto, todas las plantas industriales cuentan con instalaciones eléctricas con baja calidad de energía, ya que la operación de sus mismos equipos contamina la energía que consume, generando perturbaciones en el voltaje y corriente. Las sobretensiones transitorias internas son de amplitud más baja que las sobretensiones transitorias externas, pero tienen magnitudes de voltaje que son suficientes para dañar o degradar los elementos y equipos que componen la instalación eléctrica industrial.

1.6. El fenómeno de la descarga atmosférica

Este fenómeno se puede explicar a través de diferentes teorías, tales como la teoría de Simpson, Elster y Geitel, Wilson y Schonland, entre otras.

1.6.1. Teoría de Simpson

Esta teoría indica que las descargas atmosféricas son generadas por corrientes de aire que se encuentran en actividad en el interior de las nubes. Existen corrientes de aire ascendente que transportan vapor húmedo del mar desde la superficie de la tierra; el vapor, al llegar a determinada altura y temperatura, se condensa transformándose en gotas de agua, las cuales contienen carga positiva; al precipitarse se desintegran formándose gotas de agua más pequeñas. Las corrientes de viento llevan carga negativa a las nubes,

en donde la parte inferior se mantiene a una temperatura más alta que la parte superior.

En su caída las gotas se encuentran con las corrientes de aire ascendentes que provocan el rompimiento de las gotas en fracciones más pequeñas. Estas gotas repiten el proceso con las constantes corrientes de viento, de esta forma se generan las cargas eléctricas al ocurrir el rompimiento de las gotas de lluvia, desprendiendo iones negativos que se dispersan en la atmósfera, y cuando las nuevas gotas quedan cargadas positivamente continúan su descenso hacia la parte inferior de las nubes, en este caso, la tierra.

1.6.2. Teoría de Elster y Geitel

Esta teoría también es conocida como la teoría de la influencia eléctrica. En las nubes existen gotas de agua de distintos tamaños, las gotas grandes se precipitan a la tierra y las más pequeñas son llevadas hacia la parte superior por las corrientes de viento que existen en el interior de la nube. Este proceso conduce a la formación de cargas positivas en la parte inferior de la gota y cargas negativas en la parte superior de la misma. Cuando las gotas caen se genera un roce entre gotas grandes y pequeñas, teniendo como consecuencia un intercambio de cargas.

En la gota pequeña predomina la carga positiva y en la gota grande la carga negativa, estas gotas se desplazan en sentido opuesto, creando un campo eléctrico por la acumulación de cargas positivas en la parte superior y cargas negativas en la parte inferior de la nube. El campo eléctrico que se forma en la nube contribuye a la separación de cargas por influencia. En investigaciones recientes se dice que el roce y la unión de gotas de agua

solamente generan la formación de la lluvia, más no la distribución espacial de las cargas eléctricas

1.6.3. Teoría de Wilson

Conocida también como la ionización de la gota de lluvia. Esta teoría asume, al igual que la teoría de Elster y Geitel, una influencia del campo eléctrico en la formación de la gota. Wilson reemplaza a la acción de la gota pequeña de la teoría anterior por la acción de los iones, simplificándose así el fenómeno de intercambio de cargas entre las gotas.

En la gota que cae se separan las cargas eléctricas por la acción del campo eléctrico. La parte superior de la gota está cargada con carga negativa y la inferior con carga positiva.

El viento, a su vez, arrastra los iones hacia la nube, donde los negativos son atraídos por la carga positiva de la parte inferior de la gota. Los iones positivos son repelidos al mismo tiempo y transportados por el aire hacia la parte superior de la nube, escapando así a la acción de la mitad superior de la gota, la cual continúa su caída, por consiguiente, solo con carga negativa. La nube denota entonces una carga positiva en su mitad superior y una negativa en la mitad inferior. La gota que cae únicamente se va con carga negativa, quedando la nube cargada positivamente en su mitad superior y negativamente en su mitad inferior.

1.6.4. Teoría de Schonland

El ciclo de la nube y la consiguiente descarga denominada rayo se puede resumir de la siguiente manera:

Las descargas eléctricas en la nube se encuentran distribuidas en forma no homogénea, existiendo por consiguiente concentraciones desiguales de carga en el seno de la misma. Mientras el gradiente eléctrico de la tierra permanece casi invariable, 100v/cm, el gradiente eléctrico en la nube se aproxima al valor crítico que es 5 kV/cm, de allí que la descarga provenga de la nube y no de la tierra.

El gradiente eléctrico sobrepasa el valor crítico, comenzando a ocurrir pequeñas descargas en el seno de la nube. Estas, en virtud de la ionización por choque descrita anteriormente, van degenerando en una especie de avalancha, denominada descarga piloto, la cual avanza con una velocidad promedio de 150 km/s. La parte superior de la nube se encuentra a una temperatura promedio de - 30°C, acusando la presión, por lo tanto, un valor mucho más bajo que la parte inferior de la misma, a la cual le corresponde una temperatura de aproximadamente 0°C. La rama de la descarga orientada hacia la tierra tiene entonces las mejores condiciones para su propagación.

La rama de la descarga piloto orientada hacia la tierra logra imponerse en su crecimiento, viéndose acompañada de pequeños puntos luminosos, característicos de las descargas escalonadas, cuyo tiempo de duración es relativamente corto, recorriendo un trayecto aproximado de sólo 50 m a una velocidad de 50 000 km/s. Las descargas escalonadas parecen tener su origen en la acción del viento, llegando raras veces a la tierra. Esto se debe a que la intermitencia de la descarga piloto de 30 a 90 μ s le sustrae la energía necesaria

para tales fines. El incremento del gradiente eléctrico, al aproximarse la descarga a la tierra, favorece la formación de un canal de recepción.

El canal de recepción sale al encuentro de la descarga piloto, la cual trae gran cantidad de cargas negativas, formándose así un canal plasmático. Para neutralizar la carga de la nube, una gran cantidad de cargas eléctricas positivas abandona entonces la tierra, utilizando el mismo canal o sendero previamente ionizado, a través del cual ocurrirán todas las descargas sucesivas, la primera de las cuales se denomina descarga de retorno. La velocidad de propagación de esta descarga es de aproximadamente 30 000 km/s, siendo apreciable el valor de la intensidad de corriente que las caracteriza. Mientras la descarga principal requiere de un tiempo aproximado de 20 000 μ s en llegar a la tierra, la descarga de retorno acusa un tiempo promedio de 100 μ seg en lograr su cometido.

El impacto provocado por las cargas eléctricas, que la descarga de retorno introduce en el seno de la nube, es tan fuerte que puede originar una segunda descarga orientada hacia la tierra, llamada descarga secundaria, con una velocidad promedio de 3 000 km/s. Este dúo puede repetirse un número de veces apreciable. Las cargas positivas procedentes de la nube se observan solo en estados avanzados de la tormenta, cuando la descarga secundaria las trae a la tierra.

Debe tomarse en cuenta que la velocidad más lenta de todas las descargas mencionadas es la correspondiente a la descarga piloto, la cual, al penetrar en el aire virgen, no excede de los 150 km/s. Esta descarga, en

consecuencia, necesita, según el caso, un tiempo promedio de 20 000 μ seg para llegar a la tierra¹.

1.6.5. Descarga atmosférica denominada rayo

Entre los fenómenos naturales que se producen cotidianamente, uno de los más frecuentes es el rayo. A las diferentes descargas eléctricas naturales que acontecen dentro de una misma nube, entre más de una nube o entre una nube y el suelo, se las denomina rayos. Sus características son las mismas de todo fenómeno climático, es frecuente e inevitable como una nevada, la lluvia o el viento. Sin embargo, existen mayores probabilidades de que ocurran en un momento determinado del año, porque juegan otros componentes que guardan relación con la temperatura, nivel de humedad, etc.

Los fenómenos más extremos de una tormenta son los rayos, que constituyen la principal causa de muerte de personas por fuerzas naturales. Las estadísticas muestran que mueren y son afectados por este fenómeno un promedio anual de mil personas. Aproximadamente, el 80 % de las personas alcanzadas por los rayos sobreviven al impacto y 25 % de ellas quedan sufriendo daños severos y efectos secundarios.

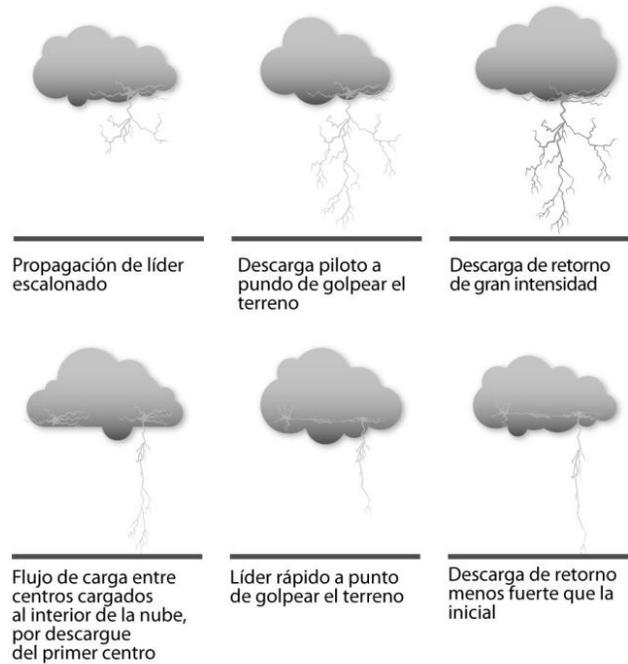
Para comprender cómo se da la formación del rayo, se presenta la siguiente explicación: la nube que se carga eléctricamente para originar el rayo es el *cumulus nimbus*, que tiene forma reconocible vista a la distancia. Es detectable por los radares meteorológicos y muestra un color gris muy oscuro, casi negro en su parte baja que impide el paso de la luz solar, oscureciendo llamativamente en pleno día toda la región bajo su influencia.

¹ GARCÍA GARCÍA, Miguel. *Curso de Doctorado. Coordinación de Aislamiento*. DPTO. Ingeniería Eléctrica. U. Zaragoza.

Generalmente, los rayos son producidos por partículas positivas, por la tierra y negativas a partir de las nubes *cumulos nimbus*. Se cree que el hielo es el elemento clave en el desarrollo, propiciando una separación de las cargas positivas y negativas dentro de la nube. Un rayo puede generar una potencia instantánea de mil millones de vatios, pudiendo ser comparable a la de una explosión nuclear.

Las cargas eléctricas que provocan las tormentas o la sombra eléctrica de la nube son de polaridad contraria a la base de la nube y condicionan las posibles zonas de polaridad contraria a la base de esta, así como las posibles zonas de impacto del rayo. Por este motivo, los objetos que sobresalen del suelo, debajo de la trayectoria de la tormenta, modifican las características eléctricas de la zona, acercando el potencial del suelo a la nube, por lo que los rayos golpean con frecuencia los objetos o árboles altos, e inclusive al ganado que pasta en las llanuras y al propio hombre que camina o está a la intemperie durante una tormenta.

Figura 4. **Evolución de la descarga atmosférica**



EVOLUCIÓN DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Fuente: *Evolución de la descarga atmosférica*. <http://www.gamma.co/caracteristicas-las-descargas-atmosfericas-efecto-las-lineas-de-transmision/>. Consulta: 15 de noviembre de 2016.

El rayo suele dirigir un camino sinuoso hasta llegar al suelo, buscando la menor resistencia. El vapor de agua en la atmósfera facilita el tránsito de la descarga, en su camino calienta el aire a elevadas temperaturas, haciéndole estallar y produciendo el sonido que se conoce como trueno. Puede que la descarga ocurra en dos sentidos, nube a suelo o suelo a nube, y que la carga migrante pueda ser positiva o negativa. Se considera que solo el 10 % de los rayos son del tipo carga eléctrica positiva.

1.6.5.1. Protección contra la caída de rayos

Este es un tema bastante complejo que va más allá de la simple instalación de un pararrayos o de un circuito de protección. Tradicionalmente, la protección contra rayos ha pretendido atraer y desviar la energía de una descarga eléctrica atmosférica hacia la tierra física. Ninguno de los sistemas tradicionales son 100 % efectivos y todos ellos son afectados por los efectos secundarios en relación a la proximidad con los campos electrostáticos y campos electromagnéticos.

Estos son peligrosos, especialmente en áreas donde se manejan productos inflamables o explosivos y equipos electrónicos. Las condiciones eléctricas del terreno resultan fundamentales. En aquellas zonas en las que la conductividad de la tierra es mala, por ejemplo en montaña, la corriente del rayo puede seguir los cursos del agua, los rieles del ferrocarril y los cables eléctricos. Técnicamente se puede establecer una clasificación de tres niveles de protección contra los efectos de los rayos, tanto directos como secundarios:

- Protección primaria: el nivel primario está constituido por los sistemas de pararrayos, apartarrayos, hilo de guarda, blindajes y puestas a tierra.
- Protección secundaria: este nivel de protección es el necesario a nivel de la alimentación del equipo o sistema.
- Protección terciaria: este es a nivel de líneas de datos y transmisión, tarjetas de circuito impreso y componentes electrónicos; también se le denomina protección fina.

1.7. Efectos de las sobretensiones transitorias, en sistemas eléctricos y electrónicos típicos de una planta industrial

Dependiendo del tipo de sistema que utilice cada planta industrial, así serán los efectos que pueden generar las sobretensiones transitorias, afectando diferentes equipos y por tanto la economía de las empresas.

1.7.1. Efecto de las sobretensiones transitorias en sistemas eléctricos

Los efectos de las sobretensiones transitorias en una instalación eléctrica industrial y en sus equipos se pueden apreciar de forma instantánea o con el envejecimiento prematuro de los componentes de un equipo. En elementos como los conductores, equipos de potencia, transformadores y motores, la sobretensión transitoria genera daños en el aislamiento, el cual, al estar expuesto a tensiones que se encuentran sobre el rango de sus niveles de operación normal, llega a perder sus propiedades dieléctricas, generando fallas de cortocircuitos en conductores y bobinas, lo que produce severos daños en los equipos, haciendo necesario el cambio de conductores y el rebobinado de los devanados de motores y transformadores.

1.7.2. Efecto de las sobretensiones transitorias en sistemas electrónicos

En sistemas electrónicos el efecto de las sobretensiones transitorias es mucho más significativo que en los sistemas eléctricos, debido a que por trabajar con voltajes de pequeña magnitud, se vuelven más sensibles a las variaciones de voltajes.

Entre los efectos es posible mencionar fallas definitivas en tarjetas electrónicas, servoamplificadores, variadores de velocidad, fuentes de voltaje DC, dispositivos de iluminación, como las luminarias tipo LED, incandescentes, de arco, etc., pérdida de datos, desprogramación de PLC's, datos erróneos de sensores y muchos más.

Un efecto importante es la desprogramación de equipos, ya sea en el área productiva o administrativa, ya que esto saca de línea al dispositivo, en donde se debe cargar nuevamente la programación o, en algunos casos, se requiere de una nueva programación iniciando desde cero para que se cumpla con los parámetros de operación requeridos. Es común que pase este efecto, pero no se investiga la causa de la desprogramación, ya que la sobretensión transitoria es repentina y de poca duración; por lo general se desconoce este evento eléctrico.

1.7.3. Equipos más afectados en plantas industriales y su impacto económico

Los equipos más afectados por las sobretensiones transitorias son los equipos que manejan pequeñas corrientes debido a su baja impedancia eléctrica. En la actualidad, la mayoría de equipos eléctricos cuentan con una tarjeta electrónica de control, ya que todo funciona con electrónica digital, como por ejemplo los PLC's, servos, amplificadores, variadores de velocidad, control de bancos de capacitores, etc. Estos dispositivos manejan grandes potencias que son controladas por pequeñas corrientes, y al verse afectada la electrónica, se pierde el control de la potencia y, por lo tanto, se da la falla en las máquinas de una planta industrial.

La tecnología para la automatización de los sistemas mecánicos y eléctricos de una planta industrial es importante, ya que en la producción se logra tener mayor estándar de calidad, mejores tiempos de producción, producción en masa, etc. Cuando una sobretensión transitoria causa una falla en un dispositivo de estos, genera paradas no programadas de la producción y pérdidas económicas por los tiempos perdidos; no se produce nada y sí hay costos por reparación y reposición del elemento fallado.

Aproximadamente, cuando una tarjeta electrónica se quema, los gastos de reparación y reposición son de \$ 3 000, y la pérdida más significativa de una línea de producción en una planta industrial es el lucro cesante que genera la parada no programada. En el tiempo que se deja de producir, se pierde tiempo eficiente de todo el personal, se retrasan pedidos y, en algunos casos, se pierde la materia prima por ser perecedera. El impacto económico es grande, ya que la industria debe invertir en la prevención y corrección de las fallas ocasionadas por los eventos eléctricos que son perjudiciales para sus instalaciones eléctricas.

1.8. Sobretensiones transitorias en sistemas de potencia

Las sobretensiones transitorias que ocurren en un sistema de potencia son de origen externo (por ejemplo, las descargas atmosféricas o rayos), o bien, se generan internamente por las operaciones de maniobra. En general, las sobretensiones transitorias en los sistemas de transmisión se originan debido a cualquier cambio repentino en las condiciones de operación o configuración de los sistemas. Los rayos son siempre un potencial de peligro para los equipos de los sistemas de potencia, pero las operaciones de maniobra pueden causar también su daño.

Para voltajes de hasta 230 kV, el nivel de aislamiento de las líneas y del equipo está determinado por la necesidad de protegerlos de los rayos. En los sistemas con voltaje de más de 230 kV, pero con menos de 700 kV, las operaciones por maniobra y los rayos son los que potencialmente dañan los aislamientos. Para voltajes superiores a 700 kV, los sobrevoltajes por maniobra son el factor determinante del nivel de aislamiento.

Los cables subterráneos son, por supuesto, inmunes a las descargas atmosféricas directas y se pueden proteger de los transitorios que se originan en las líneas aéreas. Sin embargo, por razones económicas y técnicas, prevalecen las líneas aéreas de transmisión con la excepción de algunas circunstancias no usuales y para cortas distancias (por ejemplo para cruzar un río).

En la mayoría de los casos, las líneas aéreas se pueden proteger de las descargas atmosféricas directas a través de uno o más conductores que estén al potencial de tierra y extendidos por arriba de los conductores de la línea de potencia. Estos conductores protectores, llamados hilos de guarda o de blindaje, se conectan a la tierra a través de torres de transmisión que sostienen la línea.

Generalmente, la zona de protección es de tres conductores en posición vertical de cada lado de la torre por abajo del hilo de guarda; esto es, en la línea de potencia que está protegida dentro del sector de seis conductores, en la mayoría de los casos, los hilos de guarda y no los conductores de potencia son los que reciben las descargas atmosféricas.

Las descargas atmosféricas que inciden en los hilos de guarda o en los conductores de potencia originan una inyección de corriente que se divide en

dos, una mitad fluye en la dirección de la línea y la otra mitad en sentido contrario. El valor cresta de la corriente a lo largo del conductor que ha sido afectado varía ampliamente por la alta variabilidad en la intensidad de los rayos: los valores típicos son de 10 000 A y superiores.

Cuando una línea de potencia recibe una descarga atmosférica directa, se origina un daño al equipo en las terminales de la línea por los voltajes línea a tierra, que resultan de las cargas que se inyectan y que viajan a lo largo de la línea como corriente. Típicamente, estos voltajes están por arriba de un millón de voltios. Las descargas sobre los hilos de guarda también pueden causar transitorios de alto voltaje sobre las líneas de potencia debido a la inducción electromagnética².

- Análisis transitorio, onda viajera

Sin importar su origen, el estudio de los transitorios en líneas de transmisión es muy complejo y solamente se considera el caso de la línea sin pérdidas. Una línea sin pérdidas es una buena representación para las líneas de alta frecuencia, donde ωL y ωC son muy grandes comparados con R y G. Para sobrevoltajes por rayos en una línea de transmisión de potencia, el estudio de la línea sin pérdidas es una simplificación que permite entender algunos de los fenómenos sin que se esté muy involucrado en la complicada teoría. Para el análisis correspondiente, se tiene lo siguiente:

- L = inductancia de la línea
- C = capacitancia de la línea
- R = resistencia de la línea
- G = reluctancia de la línea

² GRAINGER, J.; STEVENSON, W. *Análisis de sistemas de potencia*. P. 358-361.

- $V = \text{voltaje}$
- $\omega = 2 \pi f$

La solución del problema es similar al usado para derivar las relaciones de voltaje y de corriente en estado estable para líneas largas con parámetros distribuidos. Ahora se puede medir la distancia x a lo largo de la línea desde el extremo generador, en lugar de ser el extremo receptor, hasta el elemento diferencial de longitud Δx .

El voltaje v y la corriente i son funciones de ambas x y t , así que se requiere usar derivadas parciales. La caída de voltaje serie, a lo largo del elemento longitudinal de la línea, es el siguiente:

$$i(R\Delta x) + (L\Delta x) \frac{\partial i}{\partial t}$$

Y se puede escribir entonces que:

$$\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x = - \left(Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \right) \Delta x$$

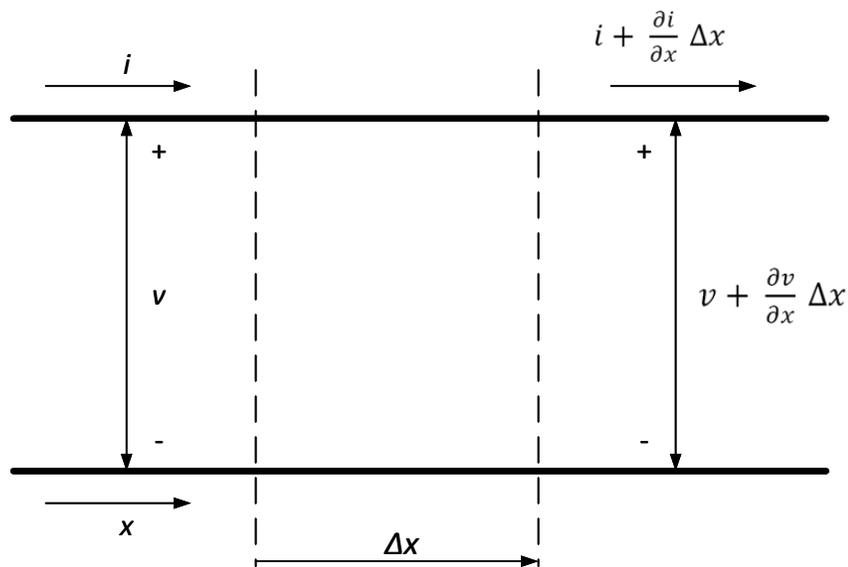
El signo negativo es necesario porque $v + (\partial v / \partial x) \Delta x$ debe ser menor que v para valores positivos de i y de $(\partial i / \partial t)$. Similarmente se tiene:

$$\frac{\partial i}{\partial t} \Delta x = - \left(Gi + C \frac{\partial v}{\partial t} \right) \Delta x$$

En la siguiente figura se muestra un diagrama esquemático de una sección elemental de una línea de transmisión, en la cual se observa una fase y

el neutro de retorno. El voltaje v y la corriente i , son funciones de x y de t . La distancia x se mide desde el extremo generador de la línea.

Figura 5. **Diagrama esquemático de una sección elemental de una línea de transmisión**



Fuente: GRAINGER, J.; STEVENSON, W. *Análisis de sistemas de potencia*. P. 210.

Se pueden dividir las dos ecuaciones entre Δx y como se está considerando el caso de la línea sin pérdidas, R y G deben ser cero para que quede lo siguiente:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t}$$

Equivalentemente se tiene que:

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial v}{\partial t}$$

Se puede eliminar i calculando la derivada parcial de ambos términos de la ecuación con respecto a x y la derivada parcial de ambos términos de la ecuación con respecto a t . Este procedimiento da como resultado que se tengan términos $\partial^2 i / \partial x \partial t$ en las ecuaciones y, si se elimina a esta segunda derivada parcial de i por medio de las dos ecuaciones, se llega a:

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

La ecuación es la llamada ecuación de la onda viajera de una línea de transmisión sin pérdidas. Una solución de la ecuación es una función de la forma $(x - vt)$, y el voltaje se expresa por:

$$v = f(x - vt)$$

La función está indefinida, pero debe ser univaluada. La constante v debe tener las dimensiones de metros por segundo si x está en metros y t en segundos. Se puede verificar esta solución al sustituir esta expresión para v en la ecuación siguiente, con el fin de determinar v :

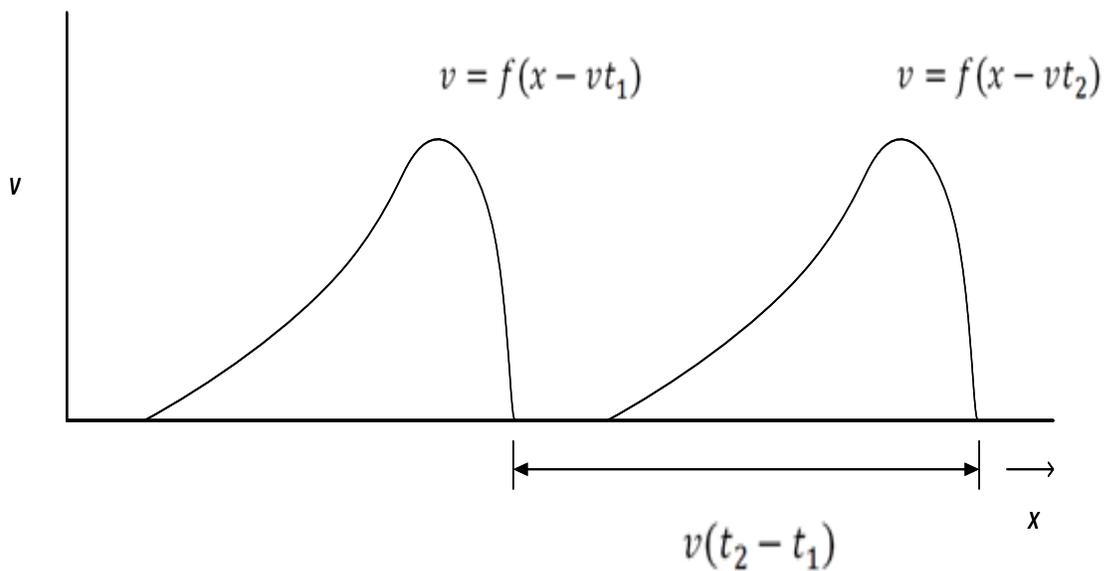
$$u(x, t) = f(u)$$

Donde u se obtiene al hacer el cambio de variable:

$$u = x - vt$$

En la siguiente figura se muestra una onda de voltaje que es una función de $(x - vt)$ para valores de t iguales a t_1 y a t_2 .

Figura 6. Onda de voltaje



Fuente: GRAINGER, J.; STEVENSON, W. *Análisis de sistemas de potencia*. P. 210.

Entonces:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial f(u)}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} = -v \frac{\partial f(u)}{\partial u}$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2}$$

Se sustituyen estas segundas derivadas parciales de v en la ecuación siguiente, y se obtiene:

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2}$$

Y se observa que la ecuación presentada anteriormente es una solución de la ecuación que se presenta a continuación si:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

El voltaje expresado en la ecuación anterior es una onda viajera en la dirección positiva de x . En la figura 6 se muestra una función de $(x - vt)$ que es similar a la forma de una onda de voltaje que viaja a lo largo de una línea que ha tenido una descarga atmosférica. La función se muestra para dos valores de tiempo t_1 y t_2 donde $t_2 > t_1$. Un observador que viaje con la onda y permanezca en el mismo punto de la onda no observa ningún cambio en el voltaje en ese punto. Para el observador se tiene:

$$x - vt = \text{una constante}$$

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ m/s}$$

Para L y C en *henrys* por metro y *farads* por metro, respectivamente. Así, la onda de voltaje viaja en la dirección positiva de x con la velocidad v .

Una función de $(x + vt)$ puede también ser una solución de la ecuación y mediante un razonamiento similar se puede interpretar apropiadamente como una onda viajera en la dirección negativa de x . La solución general de la ecuación anterior es:

$$v = f_1(x - vt) + f_2(x + vt)$$

Que es una solución para la ocurrencia simultánea de uno y otro lado de la línea. Las condiciones iniciales y en la frontera o terminales determinan los valores particulares para cada componente. Si se expresa la onda viajera hacia el lado positivo de las x , también llamada onda incidente, queda como sigue:

$$v^+ = f_1(x - vt)$$

Se obtiene una onda de corriente de las cargas en movimiento que se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$i^+ = \frac{1}{\sqrt{LC}} f_1(x - vt)$$

Que puede verificarse por la sustitución de estos valores de voltaje y de corriente en la ecuación anterior y por el hecho de que v es igual a $1/\sqrt{LC}$. De igual forma para una onda de voltaje que se mueve en el sentido negativo de las x , donde:

$$v^- = f_2(x + vt)$$

La corriente correspondiente es:

$$i^- = -\frac{1}{\sqrt{LC}} f_2(x + vt)$$

De las ecuaciones de v^+ y también i^+ se observa que:

$$\frac{v^+}{i^+} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Del mismo modo de v^- y también i^- se puede obtener:

$$\frac{v^-}{i^-} = -\sqrt{\frac{L}{C}}$$

Si se decide suponer la dirección positiva de la corriente para i^- como la dirección en que viaja la onda hacia el lado negativo de las x , se debe cambiar el signo menos por el más en las ecuaciones anteriores. Sin embargo, se selecciona como dirección positiva de x la dirección positiva de la corriente para las ondas viajeras.

A la relación entre v^+ y v^- se le conoce como impedancia característica Z_c de la línea. Previamente se ha encontrado la impedancia característica en la solución del estado estable en donde se define Z_c como $\sqrt{z/y}$, que es igual a $\sqrt{L/C}$ cuando R y G son cero.

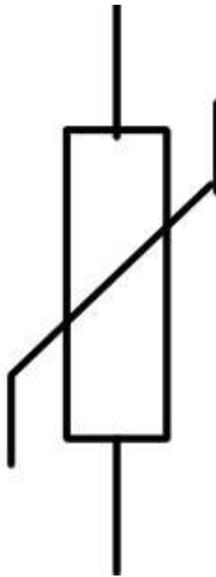
1.9. Tecnología de protección para disipar las sobretensiones transitorias en instalaciones eléctricas industriales.

La tecnología que se utiliza para la protección de los elementos y equipos que conforman una instalación eléctrica industrial tiene la función de disipar o desviar a tierra la energía de una sobretensión transitoria, que pueda generar efectos no deseados en una planta industrial.

1.9.1. Varistor

Es una resistencia variable que depende de la tensión que se le aplica en sus terminales, debido a que la magnitud de su resistencia es variable dependiendo del voltaje que se le aplique en sus terminales.

Figura 7. Símbolo eléctrico del varistor



Fuente: *Símbolo eléctrico del varistor*. <http://www.cusiritati.com/jkmVpegBd/>. Consulta: 20 de noviembre de 2016.

Cuando el voltaje en el varistor está bajo el nivel de operación se comporta como un circuito abierto, ya que el valor de su resistencia es elevado. El valor de su resistencia disminuye cuando el voltaje que se le aplica aumenta, por lo tanto, cuando en las terminales del varistor se tiene una sobretensión transitoria, este se comportará como un corto circuito, desviando la corriente de falla a tierra y disipando su energía en forma de calor.

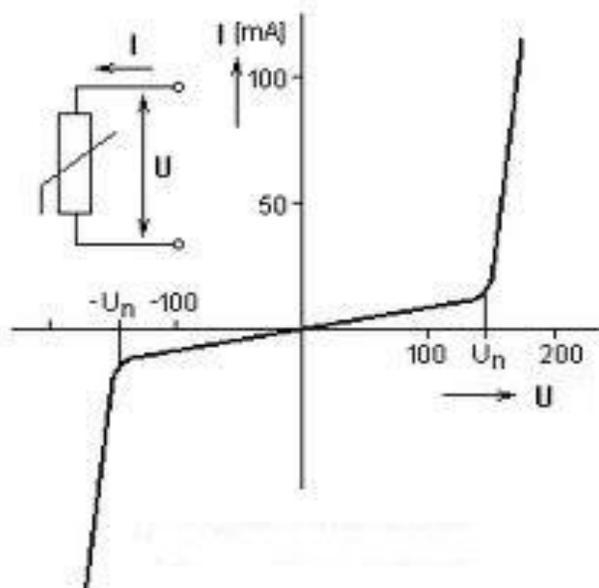
Figura 8. **El varistor**



Fuente: *El varistor*. <http://www.electronicshub.org/varistor/>. Consulta: 20 de noviembre de 2016.

Estos dispositivos son construidos para que operen con distintas magnitudes de voltaje, que van de 14 V a 600 V RMS, que son valores de voltaje de ruptura.

Figura 9. **Comportamiento del varistor frente a la tensión**



Fuente: *Varistor frente a tensión*. <https://electronica-electronics.com/info/DVR-Varistor-MOV.html>. Consulta: 20 de noviembre de 2016.

Entre las características principales de un varistor se tienen las siguientes:

- Alto grado de aislamiento.
- Rango amplio de voltajes, desde 15 V a 600 V.
- Gran capacidad de absorción de energía respecto a las dimensiones del componente.
- Bajo consumo de corrientes en reposo.
- Absorción del transitorio en el instante que ocurre con un tiempo de respuesta de menos de 20 ns.
- Valores bajos de capacidad, lo que lo hace apropiado para la protección de circuitos en conmutación digital.
- El costo del dispositivo es bajo comparado con otros como los diodos supresores de avalancha de silicio.

Los varistores tienen diferentes aplicaciones, debido a sus características son utilizados como estabilizadores de tensión, supresores de sobretensiones transitorias o picos de voltajes. Estos se conectan en paralelo con los dispositivos a proteger para que las sobretensiones se conduzcan en el elemento donde se ofrezca menos resistencia, en este caso, sería el varistor el cual se comporta como un cortocircuito cuando existen altos voltajes en sus terminales.

En electrónica, el varistor es utilizado para proteger los componentes sensibles de un circuito contra variaciones bruscas de voltaje, generados por descargas atmosféricas o conmutaciones. Solamente soporta sobretensiones transitorias, ya que una sobretensión sostenida llevaría al dispositivo a fallar.

Algunos técnicos, encargados del mantenimiento eléctrico en plantas industriales, instalan varistores en los interruptores termomagnéticos de los equipos de automatización, conectando las terminales del varistor en paralelo a la salida del interruptor.

1.9.2. Supresor de sobretensiones transitorias

El supresor de sobretensiones transitorias (SPD por sus siglas en inglés, de Surge Protective Device), según la norma NTC 4552, es un dispositivo destinado a limitar las sobretensiones transitorias, evacuando las corrientes asociadas a dichas sobretensiones. Los SPD están conceptualizados por las normas internacionales como equipos eléctricos de protección en instalaciones eléctricas, contra tensiones generadas por fenómenos transitorios. Estos eventos eléctricos traen consigo consecuencias dañinas en las instalaciones eléctricas y cargas especiales o sensibles. Hoy en día son dispositivos importantes dentro de un sistema de protección en plantas industriales.

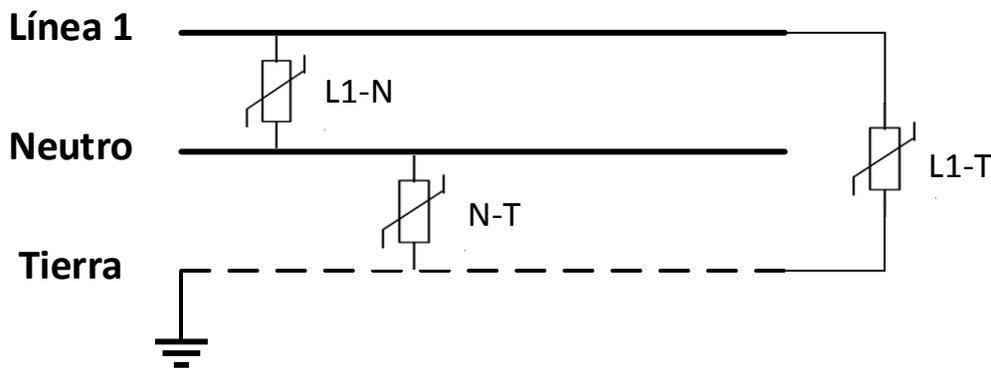
El dispositivo fundamental de un supresor de sobretensiones transitorias es el varistor, ya que por sus características permite que la energía de las sobretensiones transitorias sea disipada por estos dispositivos, variando su resistencia tendiendo a cero en presencia de una sobretensión, provocando que las corrientes busquen el camino más fácil para circular, y aislando los equipos a proteger de estas sobretensiones, que son perjudiciales para su funcionamiento y vida útil.

Los supresores cuentan con modos de protección, ya que las sobretensiones transitorias pueden venir de la fase A, B o C, del neutro y de la tierra. Los modos de protección cubren todas las posibles fuentes o vías por donde la sobretensión transitoria puede circular, como por ejemplo, fallas entre fases, fallas fase a neutro, incluso las fallas pueden ingresar por medio de la tierra física de un sistema eléctrico.

Conforme a lo expuesto anteriormente, se tiene que los modos de protección en configuración monofásica son:

- Línea-Neutro
- Línea-Tierra
- Neutro-Tierra

Figura 10. **Modos de protección, configuración monofásica**



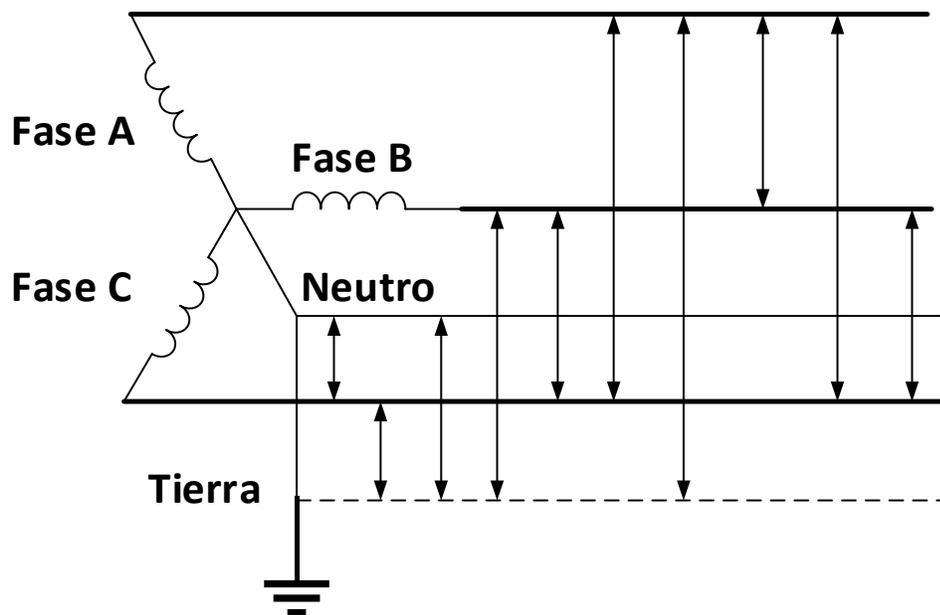
Fuente: elaboración propia.

Entre los modos de protección en configuración estrella se tienen los siguientes:

- Fase A-B

- Fase B-C
- Fase A-Neutro
- Fase B-Neutro
- Fase C-Neutro
- Fase A-Tierra
- Fase B-Tierra
- Fase C-Tierra
- Fase N-Tierra

Figura 11. **Modos de protección, configuración estrella**

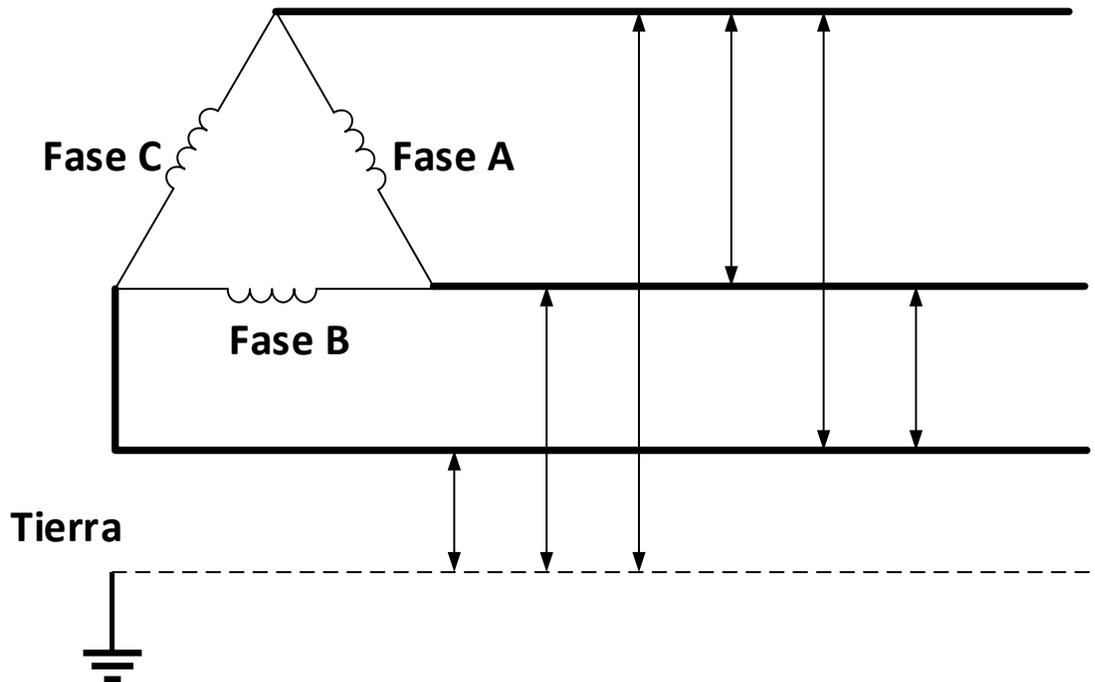


Fuente: elaboración propia.

Entre los modos de protección en configuración delta se tienen los siguientes:

- Fase A-B
- Fase A-C
- Fase B-C
- Fase A-Tierra
- Fase B-Tierra
- Fase C-Tierra

Figura 12. **Modos de protección, configuración delta**



Fuente: elaboración propia.

Significa que los varistores están estratégicamente instalados en el SPD o supresor de sobretensiones transitorias, de tal forma que estos protejan cualquier vía donde pueda circular un transitorio, disipando la energía que pueda ocasionar daños en el sistema eléctrico en los equipos a proteger.

Los supresores de sobretensiones transitorias son dispositivos de protección simples en construcción, pero complejos en su forma de operar, ya que disipan la energía de una sobretensión transitoria en tiempos demasiado cortos, evitando que llegue a los circuitos del sistema eléctrico que cuentan con menor impedancia, como los electrónicos. También cuentan con tecnologías para poder limpiar la onda de voltaje en todo su recorrido, como el seguimiento de onda, y elementos químicos para disipar de mejor forma la energía de las sobretensiones transitorias, haciéndolos más independientes de los sistemas de puesta a tierra.

1.9.2.1. Seguimiento de onda

El seguimiento o rastreo de onda es una característica de algunos supresores de sobretensiones transitorias, que les permite hacer un recorrido en toda la onda senoidal de voltaje y hacer un barrido para que la onda quede libre de cualquier ruido o pico de voltaje en sus 360 grados eléctricos. Los supresores de sobretensiones transitorias que no cuentan con esta tecnología solamente pueden eliminar las perturbaciones de las sobretensiones transitorias cuando ocurren en los 90 y 270 grados eléctricos de la onda del voltaje.

Esta tecnología, a base de capacitores, funciona como un filtro que elimina cualquier variación de voltaje que pueda ocurrir en toda la onda senoidal. Con esta tecnología se elimina el ruido en la señal eléctrica de voltaje y en electrónica digital se eliminan los 1 y 0 falsos.

Es importante que los supresores de sobretensiones transitorias, que son instalados para proteger tarjetas electrónicas, PLC, equipos de informática, etc., cuenten con este sistema de filtrado de la onda, ya que comúnmente en la actualidad se trabaja con electrónica digital, unos y ceros, en donde el uno

representa señales de 3 a 5 voltios o de 0 a 20 mili amperios, por lo que los voltajes que maneja la electrónica deben ser casi exactos para tener fiabilidad en los equipos. Una sobretensión transitoria puede generar voltajes que los equipos pueden percibir como unos o ceros, los cuales son falsos, generando así reseteo de equipos, desprogramación de tarjetas, circuitos integrados, software, pérdida de datos, etc.

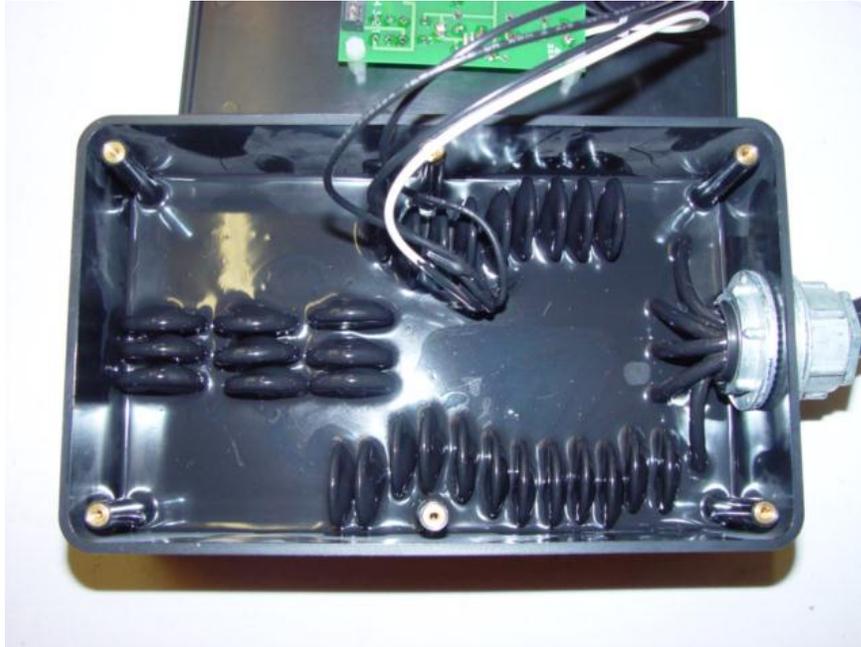
1.9.2.2. Resina disipadora

El varistor, como cualquier elemento electrónico, es sensible al calor. La energía de una sobretensión transitoria genera calor. El varistor debe tener la capacidad de disipar esa energía sin sufrir daños, por eso los fabricantes de supresores de sobretensiones transitorias han desarrollado resinas disipadoras, que ayudan al varistor a disipar el calor de la energía generada por la sobretensión, y así mismo le brinda a los dispositivos del supresor un aislamiento eléctrico, mecánico y térmico, debido a que todos los elementos que lo componen se encuentran sumergidos en la resina.

Esta resina tiene la capacidad de disipar las altas temperaturas generadas por las sobretensiones. Le da aislamiento térmico al supresor, si este se encuentra instalado en plantas industriales en donde trabajen a altas temperaturas; y aislamiento mecánico, si el supresor se encuentra instalado en lugares donde existan vibraciones, manteniendo los dispositivos en su lugar.

También proporciona aislamiento eléctrico, evitando que se generen pequeños arcos eléctricos dentro del supresor, debido a las altas tensiones que recibirá y que lo mantendrán aislado de la contaminación ambiental, como la humedad, gases, etc.

Figura 13. **Resina disipadora de calor de un supresor**



Fuente: Sinetamer.

Con esta tecnología, el supresor no dependerá de una buena instalación de puesta a tierra para disipar la energía de la sobretensión, sino dependerá de la calidad de la resina en la que se encuentren sumergidos sus dispositivos de operación.

2. EVALUACIÓN DEL FENÓMENO ELÉCTRICO EN UNA PLANTA INDUSTRIAL EN OPERACIÓN

Como parte de la evaluación del fenómeno eléctrico en una planta industrial en operación, se toma en cuenta la instalación de un contador de eventos y de un analizador de energía y calidad de potencia, el levantamiento eléctrico de las cargas, la elaboración de diagramas unifilares de la instalación y un análisis de la distorsión de la onda senoidal de voltaje.

2.1. Instalación de un contador de eventos para medir la cantidad de sobretensiones transitorias en un punto crítico de planta

Son tres los factores importantes a tratar en este punto. Primero, las características del contador de eventos de sobretensiones transitorias a utilizar; segundo, la forma correcta de instalar dicho contador; y tercero, las mediciones que se tomarán cuando ya esté instalado.

2.1.1. El contador de eventos de sobretensiones transitorias

Es un dispositivo que mide la cantidad de sobretensiones transitorias en un circuito eléctrico o punto crítico de una instalación eléctrica. Este dispositivo se conecta en paralelo al circuito o carga deseada, ya sea en las barras del tablero principal, en las barras de los tableros de distribución, o en cualquier equipo o punto estratégico de la instalación eléctrica, en donde se desee medir la cantidad de sobretensiones transitorias en un determinado tiempo.

Figura 14. **Contador de eventos**



Fuente: elaboración propia.

En una instalación eléctrica industrial es importante instalar contadores de eventos de sobretensiones transitorias en todos los circuitos eléctricos de la instalación. Con esta acción se puede medir la cantidad de sobretensiones transitorias en un determinado tiempo y en un punto específico, con la finalidad de determinar qué circuitos se encuentran con mayor perturbación eléctrica ocasionada por las sobretensiones transitorias.

Estas mediciones ayudan a definir las condiciones en las que operan las cargas críticas o especiales de la instalación eléctrica y cada uno de sus circuitos. Con estos datos se realizan análisis para determinar si es necesario tomar medidas técnicas y de inversión, para el mejoramiento de la calidad de la energía de la instalación eléctrica. Con la toma de decisiones se pueden realizar las gestiones para el diseño y la instalación de sistemas de protección, para mejorar la calidad de la energía en esos puntos donde se cuenta con

grandes cantidades de perturbaciones eléctricas y así evitar las fallas en los equipos eléctricos y electrónicos que llegan a producir grandes pérdidas en las distintas áreas de una planta industrial.

2.1.2. Instalación de un contador de eventos en una planta industrial

Se visitó e inspeccionó una planta industrial de textiles, con una capacidad de 300 KVA de potencia. Se inspeccionó y se determinaron sus cargas críticas o esenciales y se procedió a instalar el contador de eventos en los distintos circuitos de la instalación eléctrica seleccionados.

Figura 15. **Contador de eventos en un banco de capacitores**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Contador de eventos en una máquina textil**



Fuente: elaboración propia.

Para las mediciones correspondientes se seleccionaron los siguientes circuitos de la instalación:

- Equipos o dispositivos que son fuentes generadoras de sobretensiones transitorias, como contactores, bancos de capacitores, arrancadores de motores, etc.
- Cargas críticas o especiales.
- Circuitos de iluminación.

2.1.3. Mediciones tomadas con el contador de eventos

En la acometida principal, se cuenta con un banco de capacitores de 6 etapas, de 25 KVAR cada etapa, para la corrección del factor de potencia.

Se instaló el contador de eventos en el panel del corrector del factor de potencia, se realizaron maniobras conectando, de forma manual, dos etapas del banco de capacitores. La conexión de la primera etapa generó una sobretensión transitoria y la conexión de la segunda etapa generó dos sobretensiones transitorias. Al momento de realizar la desconexión de estas cargas reactivas capacitivas no se generó ninguna sobretensión transitoria, solamente en la conexión de las cargas capacitivas.

La planta industrial cuenta con 28 telares automatizados, cada telar posee dos tarjetas electrónicas para el control de la potencia de los actuadores. Las máquinas textiles cuentan con dos transformadores que alimentan a las tarjetas electrónicas y a los contactores. Se instaló el contador de eventos antes de los transformadores durante 5 minutos; el dispositivo contabilizó 22 sobretensiones transitorias. Es importante mencionar que estas sobretensiones se producían exactamente en el momento del accionamiento de los contactores, estos, al accionar, generan un ruido por el golpe de los contactos, y exactamente cuando se percibía el sonido del golpe de los contactos el contador de eventos contabilizaba una sobretensión transitoria.

La iluminación de la planta cuenta con dos circuitos de iluminación con lámparas fluorescentes, en las cuales se instaló el contador de eventos, registrando sobretensiones transitorias solamente en el momento de encendido de las luminarias. En ambos circuitos se verificó que al momento de desconectar las luminarias no se generó ninguna sobretensión transitoria, cabe

mencionar que en el encendido de las luminarias se generó una sobretensión transitoria a pesar de contar con luminarias con balastro electrónico.

La planta industrial cuenta con una caldera, la cual tiene una bomba para petróleo de 3 HP. Esta tiene un arranque directo cuando el nivel del petróleo es bajo. Se instaló el contador de eventos registrando una sobretensión transitoria en el momento del arranque de la bomba.

Con estas mediciones se pueden tomar las acciones correspondientes para mitigar las fallas eléctricas en la planta industrial, generadas por las sobretensiones transitorias, instalando equipos de protección o equipos que mejoren la operación de las cargas instaladas, como supresores de sobretensiones transitorias, arrancadores de motores, reubicación de las cargas críticas en los circuitos, etc, ya que cuentan con datos reales que ayudan a determinar las zonas de la instalación con más perturbaciones eléctricas.

2.2. Analizador de energía y calidad de potencia

El analizador de energía y calidad de potencia es un instrumento de medición eléctrica que tiene la capacidad de medir los parámetros y calidad de la potencia en un suministro o instalación eléctrica. El equipo cuenta con un hardware y un software para su funcionamiento y adquisición de datos. El analizador de potencia cuenta con una pantalla para la visualización de las medidas tomadas y los parámetros programados a medir, como por ejemplo oscilografías y datos importantes de la medición en tiempo real.

El equipo tiene cables con conectores tipo pinza para la medición de los voltajes, y cables con medidores flexibles para la medición de corriente, estos elementos se conectan en cada fase del voltaje, en el neutro y la tierra.

Figura 17. **Analizador de energía y calidad de potencia marca Fluke 435 serie II**



Fuente: elaboración propia.

El equipo tiene la capacidad de realizar mediciones en tiempo real y también puede almacenar la información de las mediciones en una memoria SD, para poder descargar los eventos y realizar un análisis gráfico y estadístico de la potencia en una computadora. Para realizar un análisis completo de la energía se recomienda instalar el equipo de 4 a 7 días en la instalación eléctrica, para que pueda tomar medidas en horas pico y días en que la instalación está a plena carga y en bajo consumo.

Las mediciones pueden ser capturadas en tiempos cortos en el rango de mili segundos, según sea el requerimiento de la medición. Los parámetros que se pueden medir son los siguientes:

- Tensión y corriente
- Potencia
- Energía
- Pérdidas de energía
- Flicker
- Armónicos de potencia
- THD de armónicos en voltaje y corriente
- Frecuencia/desequilibrio
- Valores máximos, medios y mínimos
- Estadísticas, tablas y resumen de las mediciones

En el resumen de las mediciones, se puede contar con los siguientes registros y eventos:

- Resumen de registros
 - RMS
 - DC
 - De frecuencia
 - De desequilibrio
 - De armónicos
 - De armónicos de potencia
 - De potencia
 - De desequilibrio de potencia
 - De energía
 - De pérdidas de energía

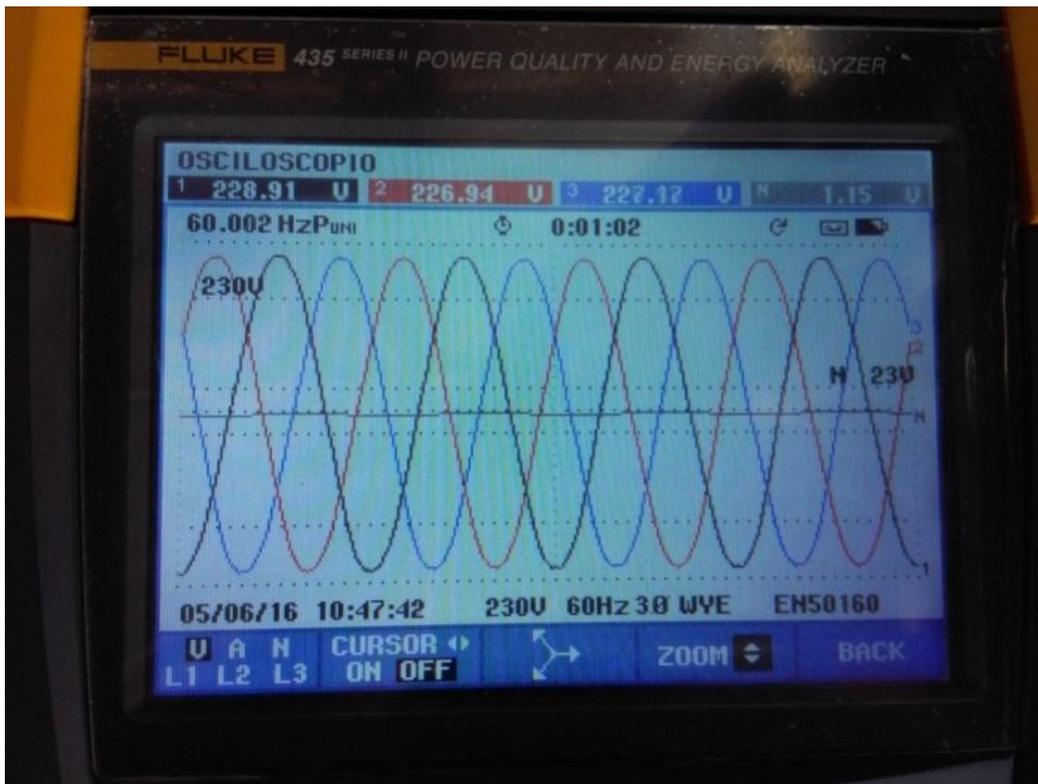
- De parpadeos
- De señalización de la red principal
- Resumen de eventos
 - Caídas de tensión
 - Subidas de tensión
 - Transitorios
 - Interrupciones
 - Perfiles de tensión
 - Variaciones rápidas de tensión
 - Pantallas
 - Formas de onda
 - Intervalos sin mediciones
 - Gráficos de corriente de arranque
 - Eventos de onda
 - Eventos RMS

Para las mediciones de sobretensiones transitorias en la planta industrial de textiles se utilizó un analizador de energía y calidad de potencia marca Fluke 435 serie II. El equipo se instaló en los puntos críticos de la instalación eléctrica, en donde el contador de eventos registró sobretensiones transitorias. Estos puntos fueron: el interruptor principal, banco de capacitores y una bomba de agua de 15 HP.

Se procedió a conectar el equipo en los puntos de medición seleccionados, se realizaron las conexiones correspondientes para la medición de voltaje y corriente y se programó el equipo para que tomara registros en tiempos de 50 mili segundos, para tomar la mayor cantidad de medidas posibles en un intervalo de tiempo de 20 minutos aproximadamente. El voltaje nominal

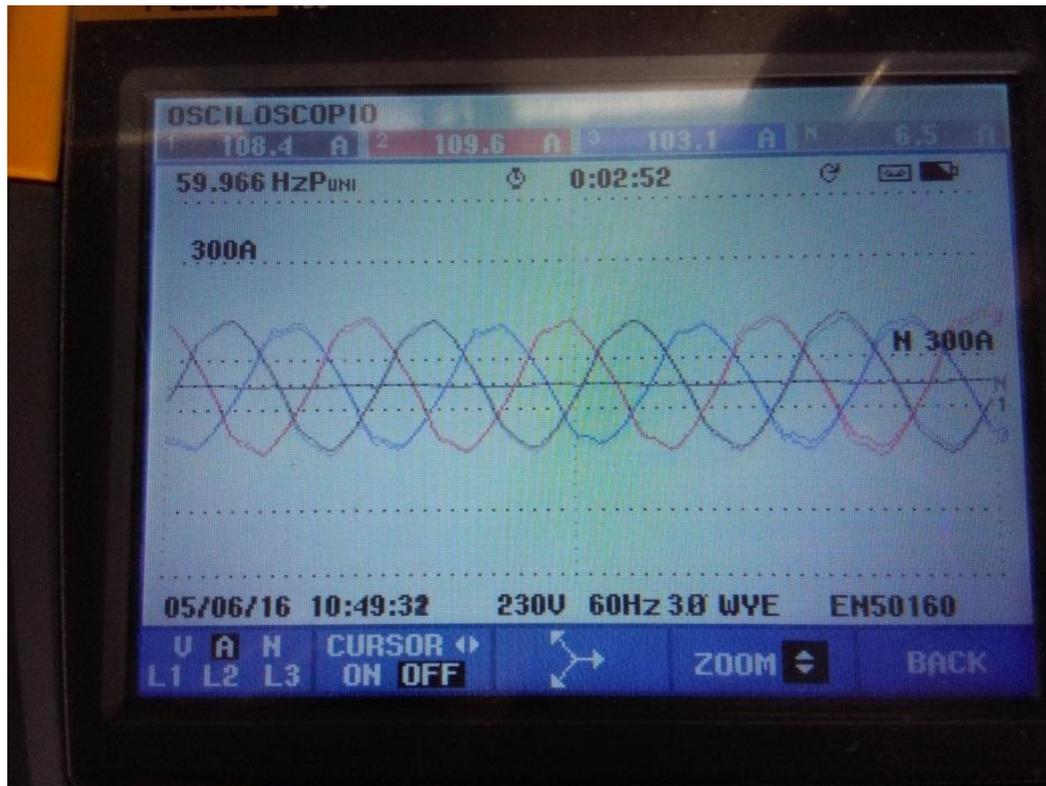
de la instalación es de 200 V de la línea a neutro y de 380 V de línea a línea, conexión estrella.

Figura 18. **Mediciones de voltaje trifásico en la acometida de la planta industrial**



Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Medición de corriente trifásica RMS en la acometida de la planta industrial**



Fuente: elaboración propia.

Se tomaron mediciones con el equipo en tres áreas importantes: el interruptor principal o acometida, el banco de capacitores y la bomba de agua. Para cada una de ellas se elabora una tabla con los datos de las mediciones, se presentan las fotografías del lugar de medición y de los datos que registra el equipo, así como las gráficas de valores correspondientes.

En primer lugar se presentan los datos de mediciones tomadas en el interruptor principal o acometida.

Tabla I. **Mediciones tomadas, interruptor principal**

INTERRUPTOR PRINCIPAL					
Voltaje RMS	L1-N	L2-N	L3-N	N-G	N
Valor máximo	232.94 V	230.94	231.36	1.52 V	
Valor mínimo	225.58 V	223.47	223.77	0.62 V	
Corriente RMS	L1-N	L2-N	L3-N	N-G	N
Valor máximo	133.4 A	134.7 A	128.6 A		9.1 A
Valor mínimo	103.8 A	101.6 A	95.4 A		5.9 A
Tensión de pico	L1-N	L2-N	L3-N	N-G	N
Valor máximo	425 V	442.0 V	398.9 V	23.7 V	
Valor mínimo	314.8 V	312.6 V	312.9 V	1.5 V	
Corriente de pico	L1-N	L2-N	L3-N	N-G	N
Valor máximo	395.6 A	434.6 A	390 A		177.8 A
Valor mínimo	150.2 A	153.8 A	141.2 A		12.0 A

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Pantalla de eventos registrados**



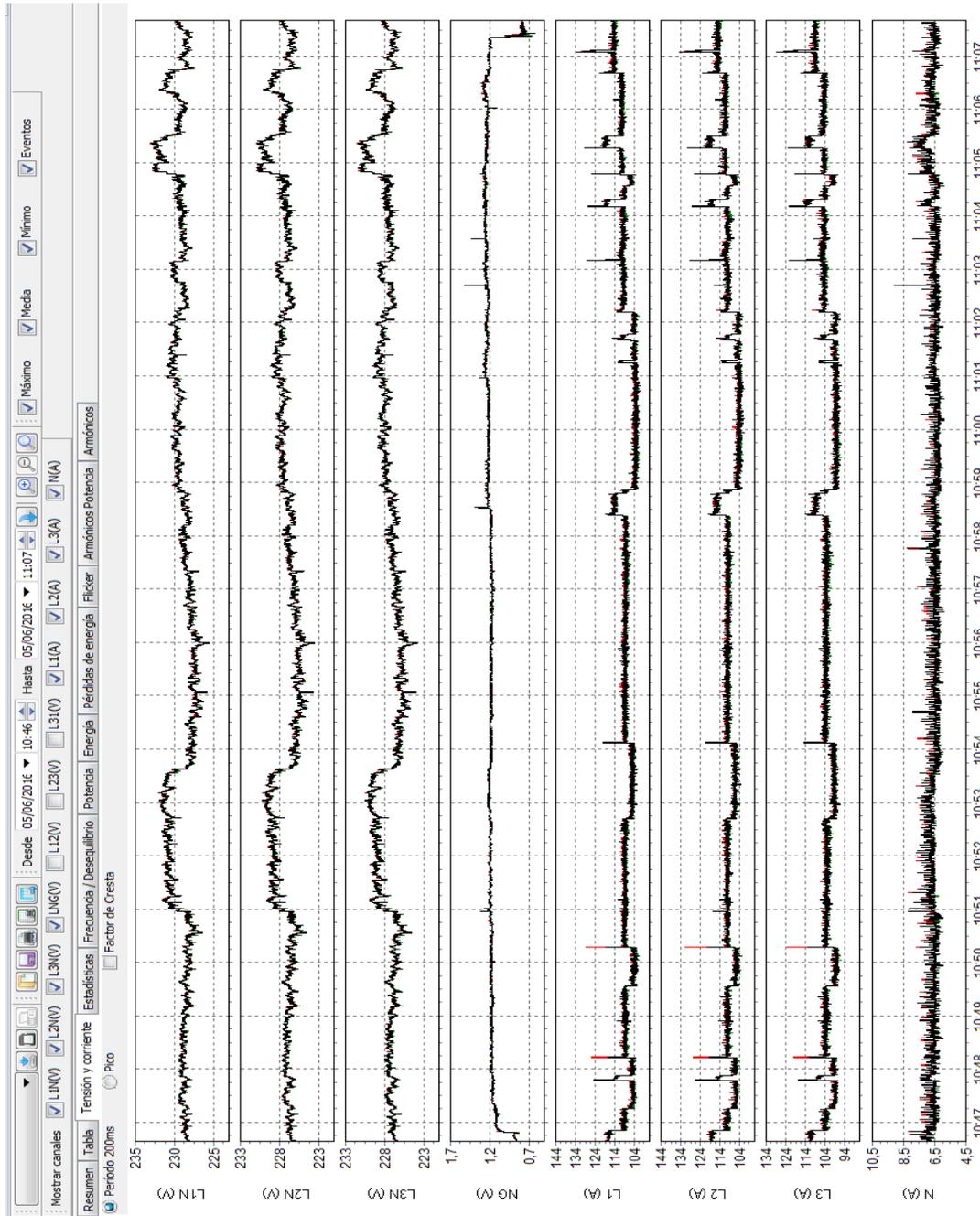
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Interruptor principal**



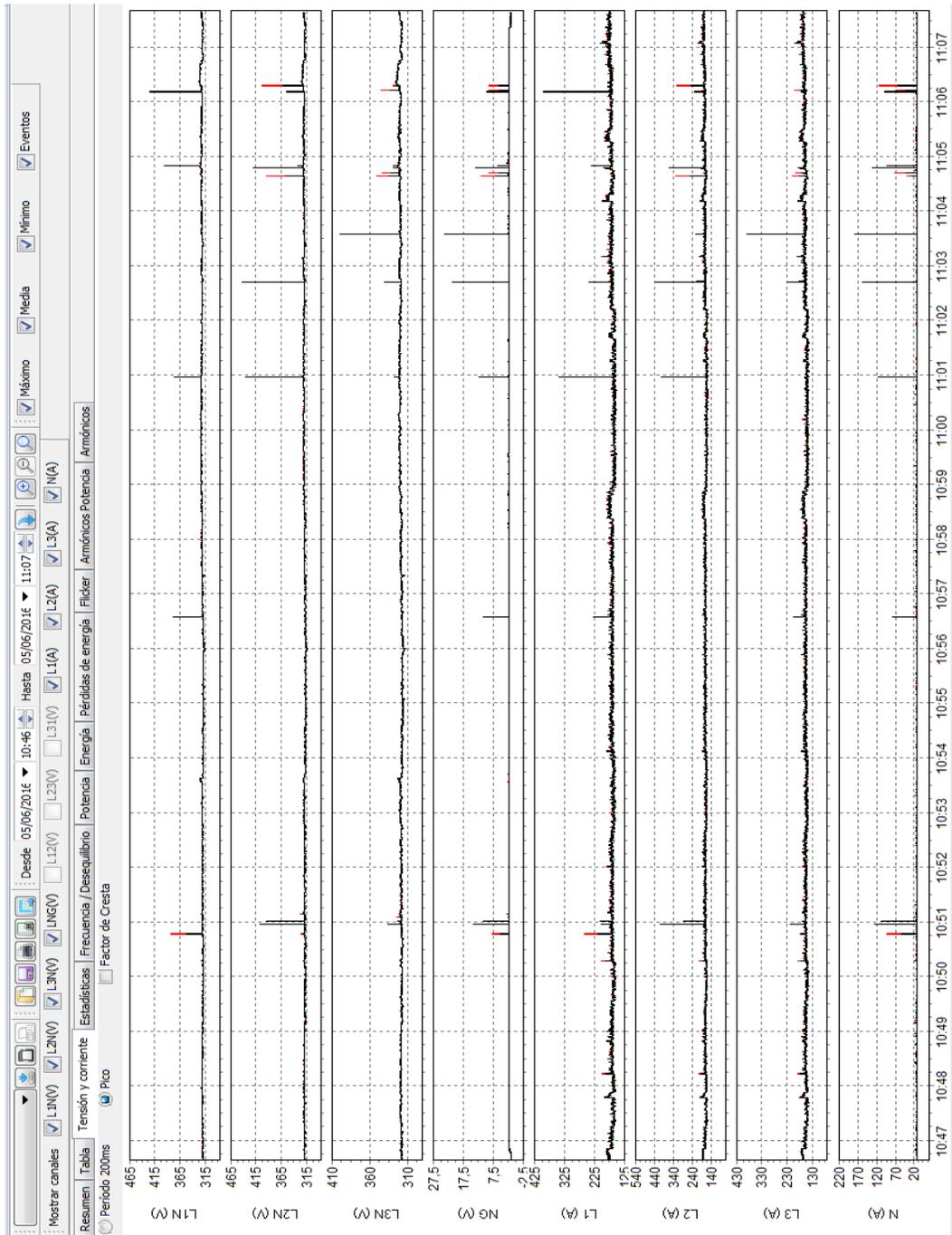
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Gráfica de valores RMS de voltaje y corriente de las 3 fases y neutro



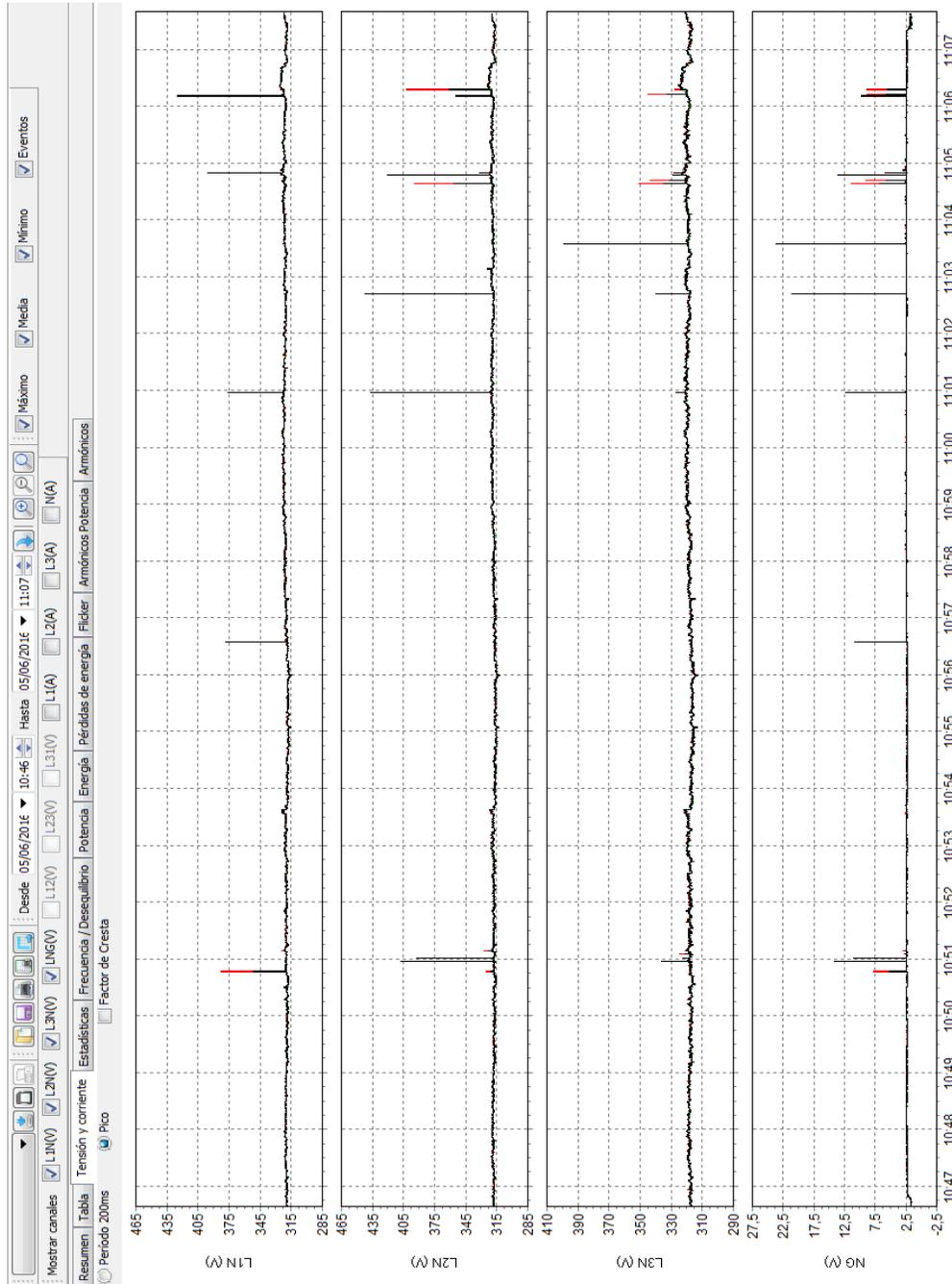
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 23. Gráfica de valores pico de voltaje y corriente de las 3 fases y neutro



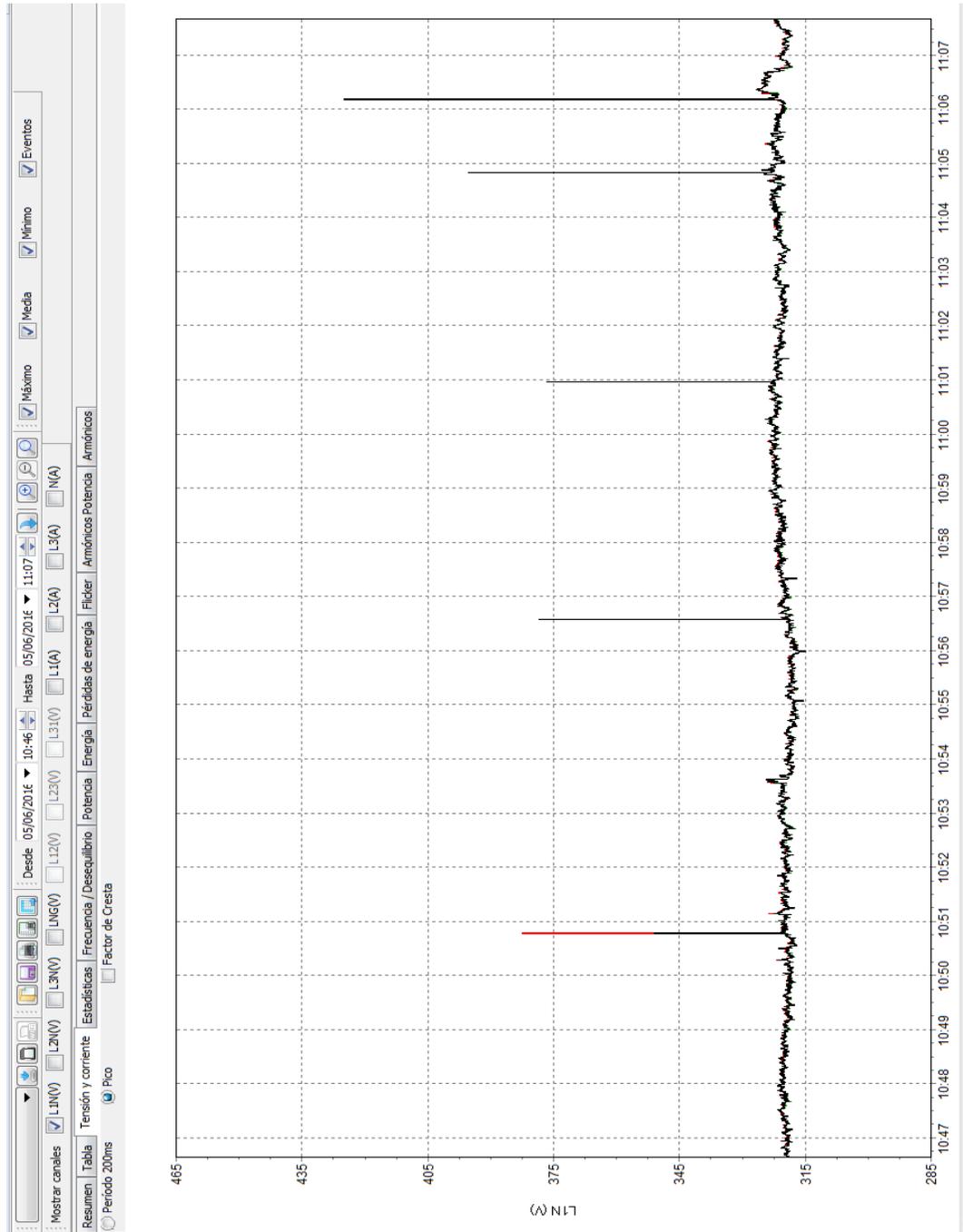
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 24. Gráfica de valores pico de voltaje de las 3 fases y neutro



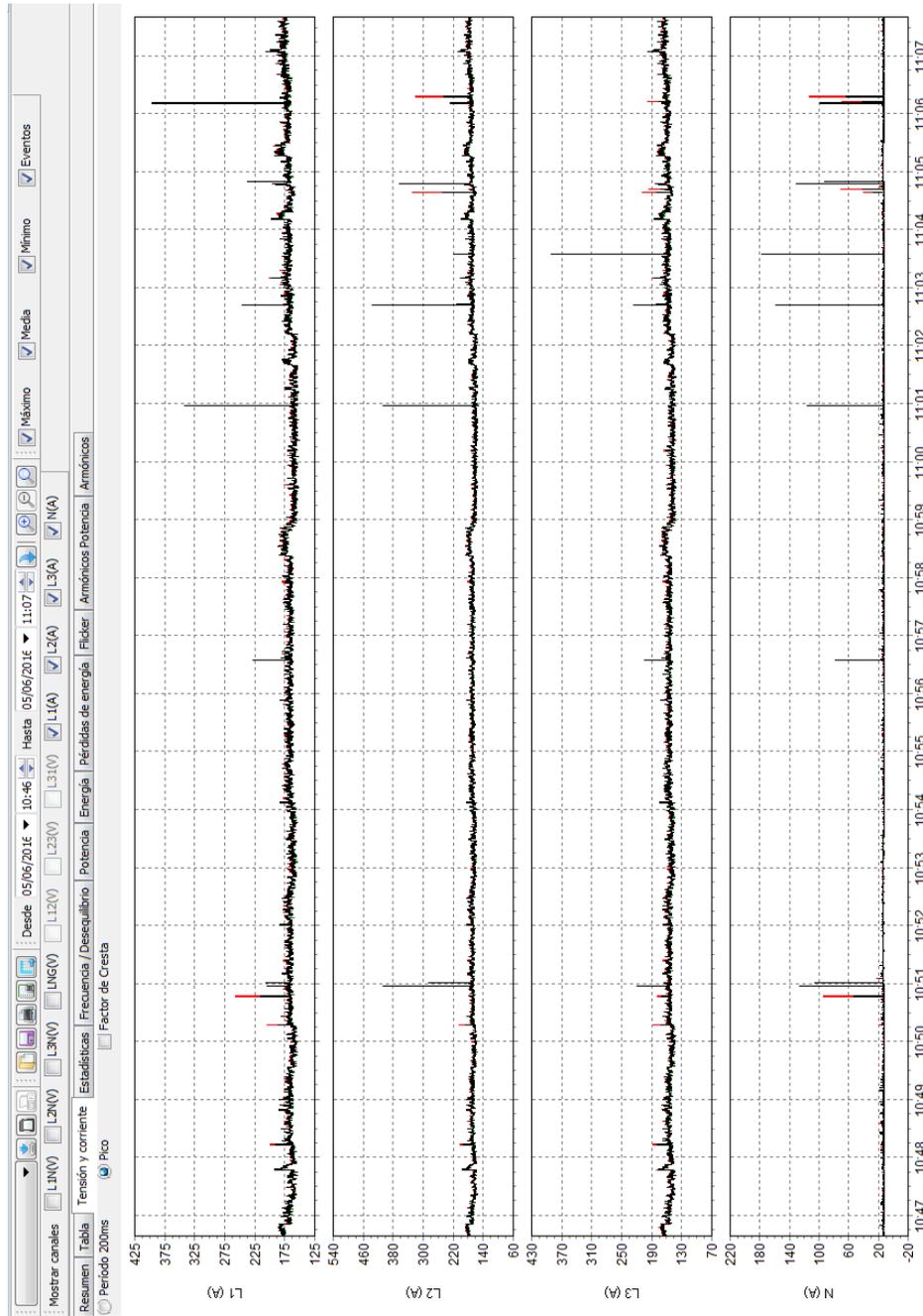
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 25. Gráfica de valores pico de voltaje y corriente de una fase



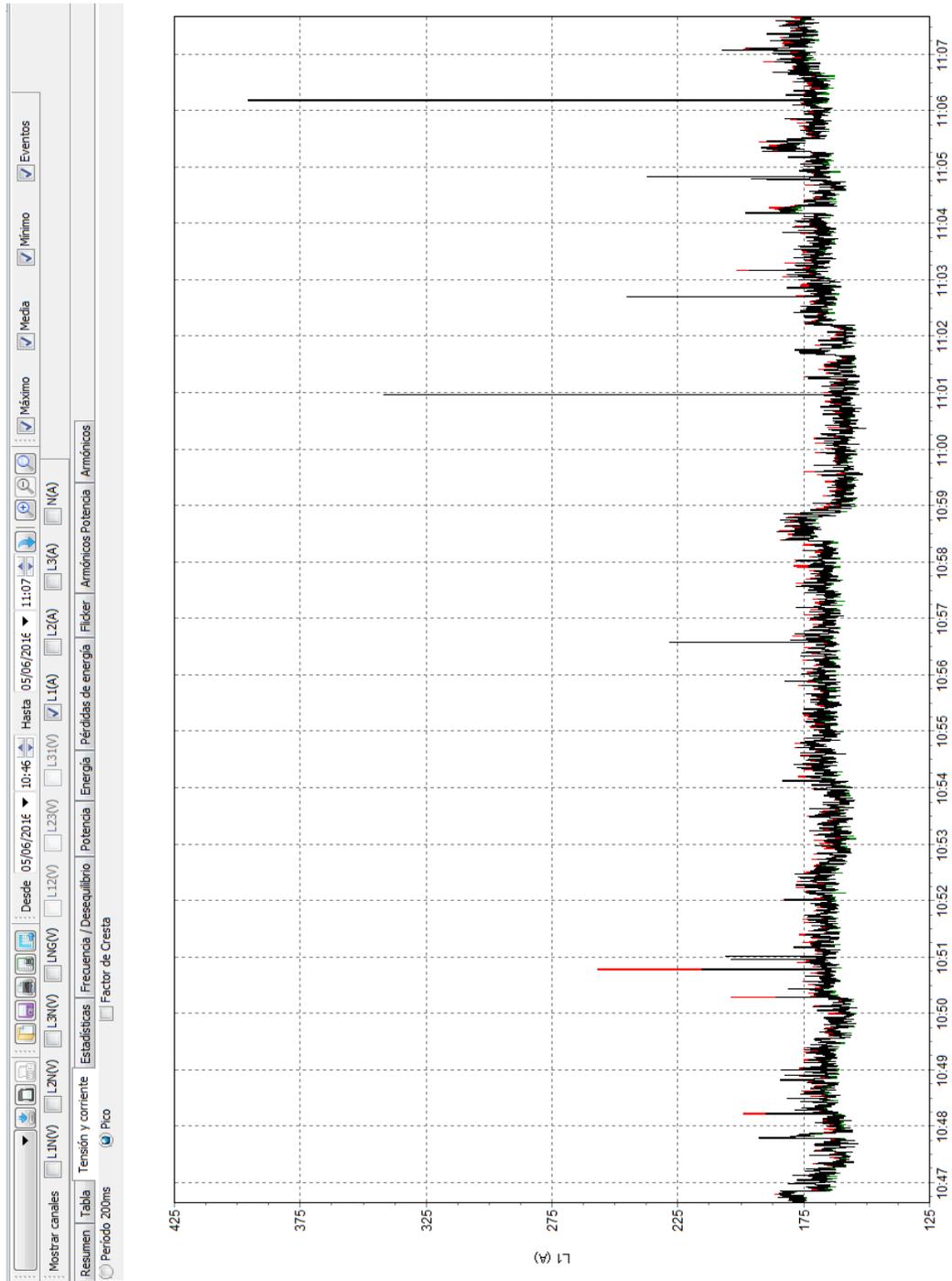
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 26. Gráfica de valores pico de corriente de las 3 fases y neutro



Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 27. Gráfica de valores pico de corriente de 1 fase



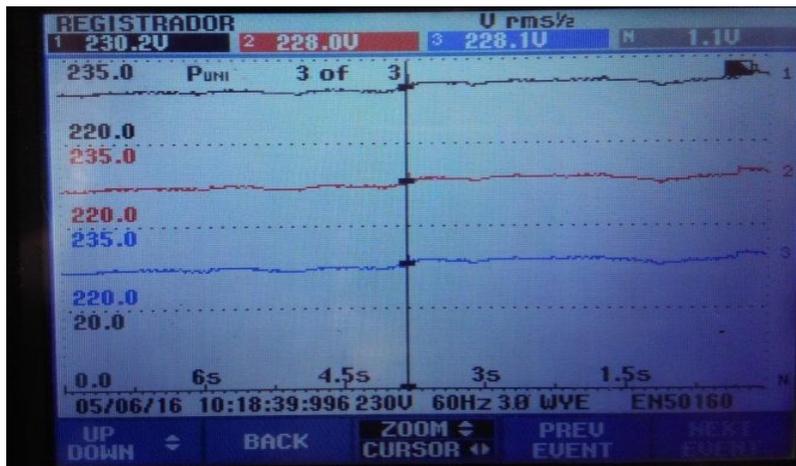
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Tabla II. Mediciones tomadas, banco de capacitores

BANCO DE CAPACITORES					
Voltaje RMS	L1-N	L2-N	L3-N	N-G	N
Valor máximo	233.31 V	231.03 V	231.38 V	0.75 V	
Valor mínimo	223.66 V	224.56 V	224.7 V	0.47 V	
Corriente RMS	L1-N	L2-N	L3-N	N-G	N
Valor máximo	194.3 A	192.8 A	192.3 A		1.0 A
Valor mínimo	12.4 A	12.2 A	12.3 A		0.0 A
Tensión de pico	L1-N	L2-N	L3-N	N-G	N
Valor máximo	402.0 V	442.2 V	370.8 V	15.3 V	
Valor mínimo	316.5 V	314.1 V	314.0 V	1.1 V	
Corriente de pico	L1-N	L2-N	L3-N	N-G	N
Valor máximo	513.8 A	567.0 A	486.4 A		2.0 A
Valor mínimo	20.0 A	19.4 A	20.0 A		0.0 A

Fuente elaboración propia.

Figura 28. Pantalla de eventos registrados



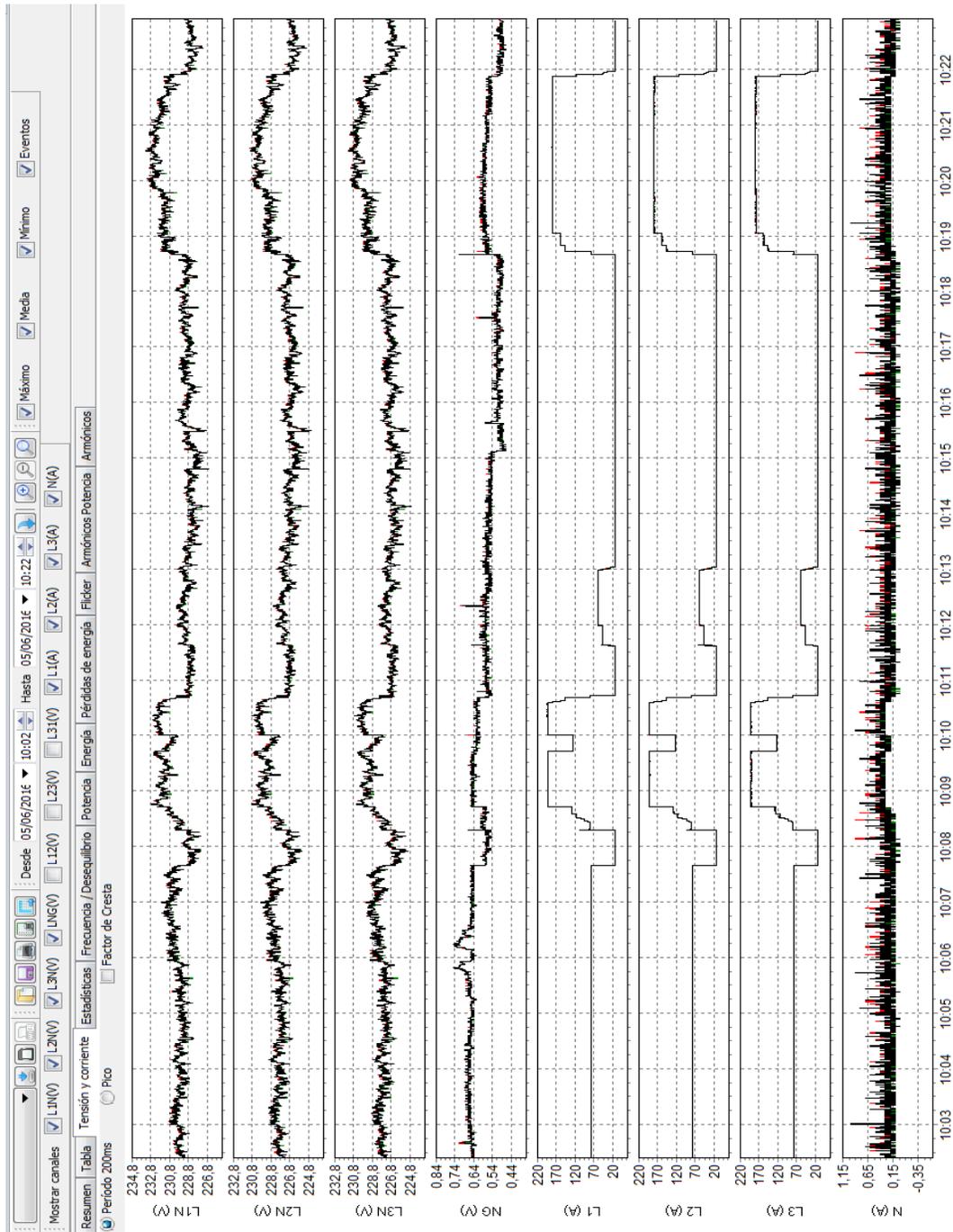
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Banco de capacitores**



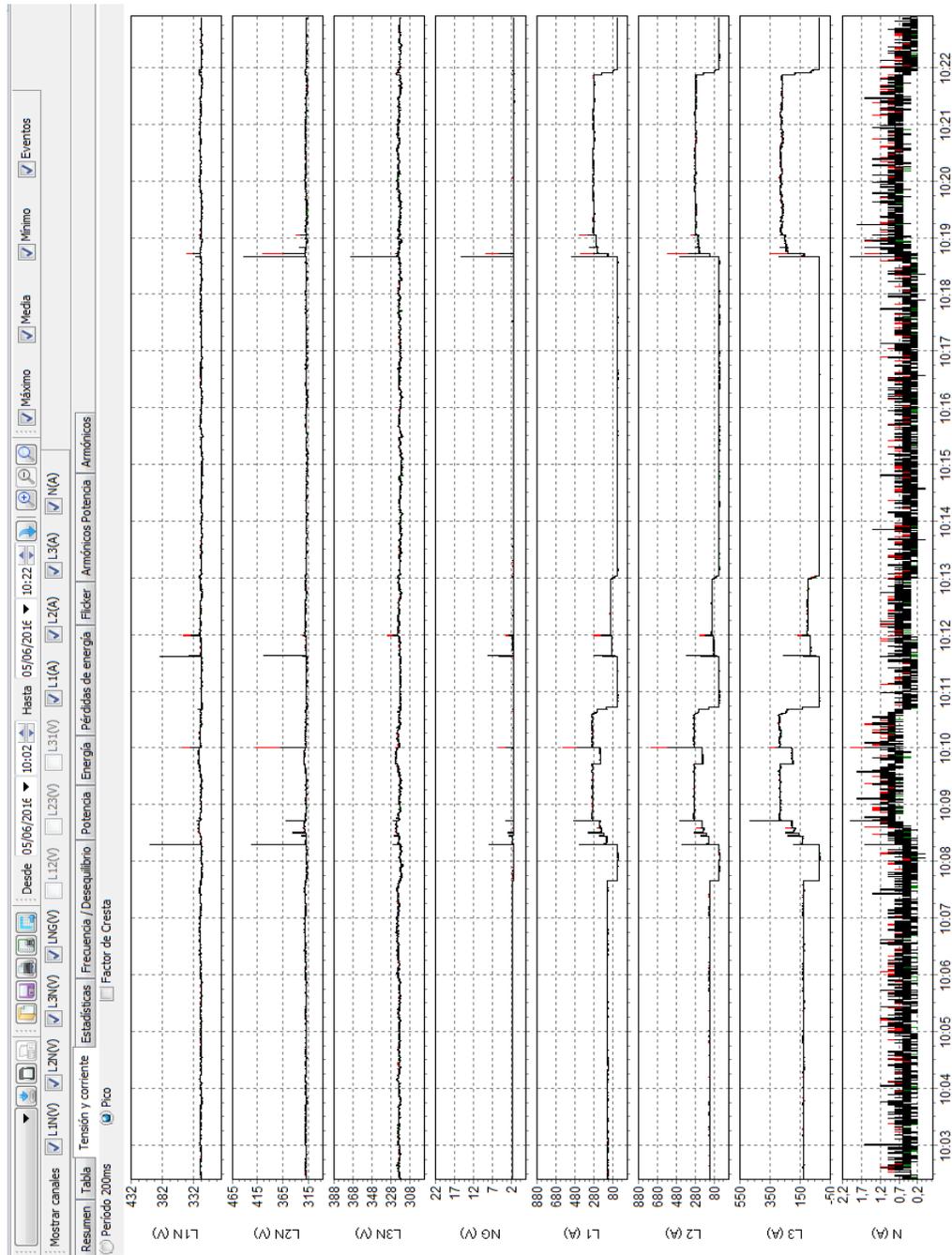
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Gráfica de valores RMS de voltaje y corriente de las 3 fases y neutro



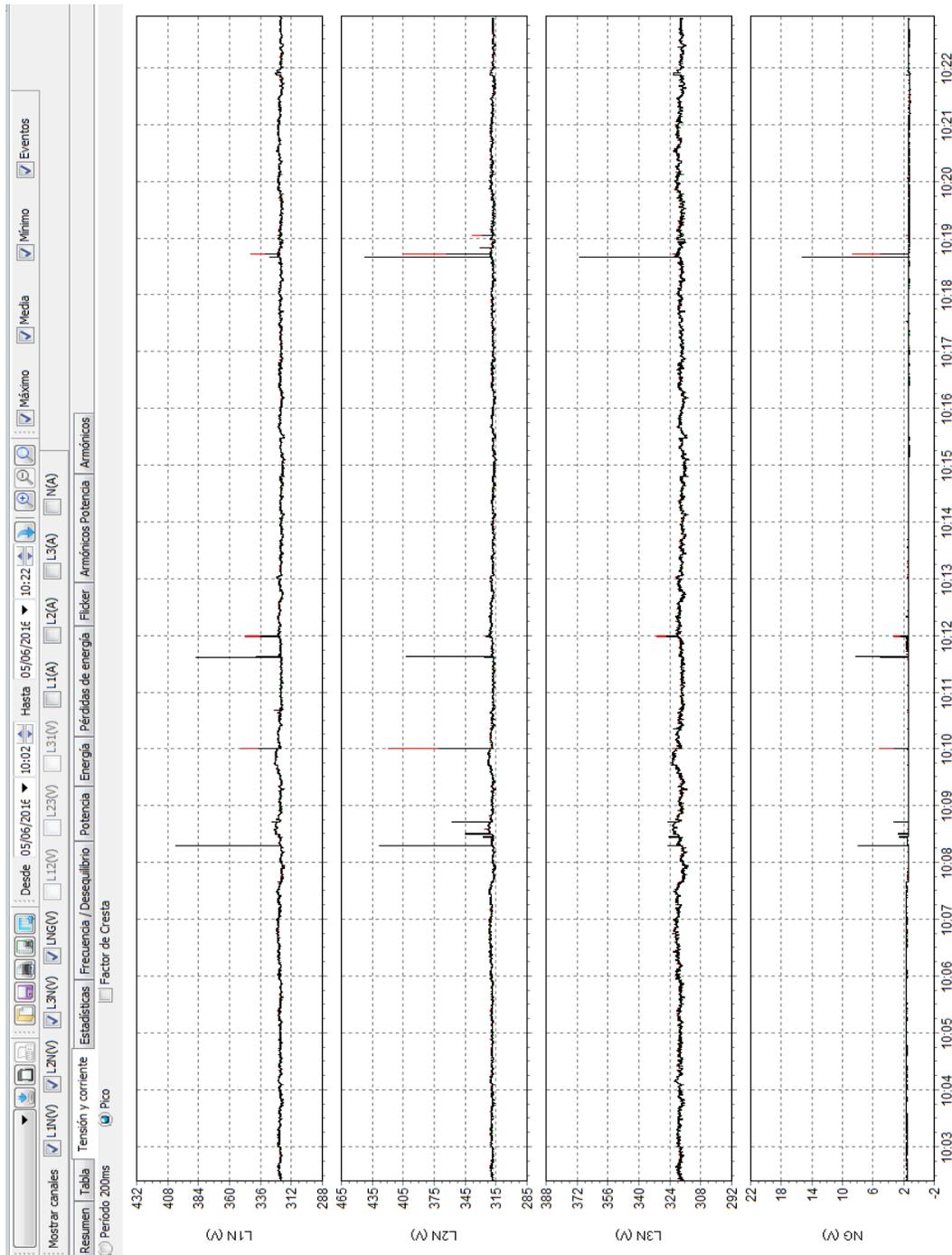
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 31. Gráfica de valores pico de voltaje y corriente de las 3 fases y neutro



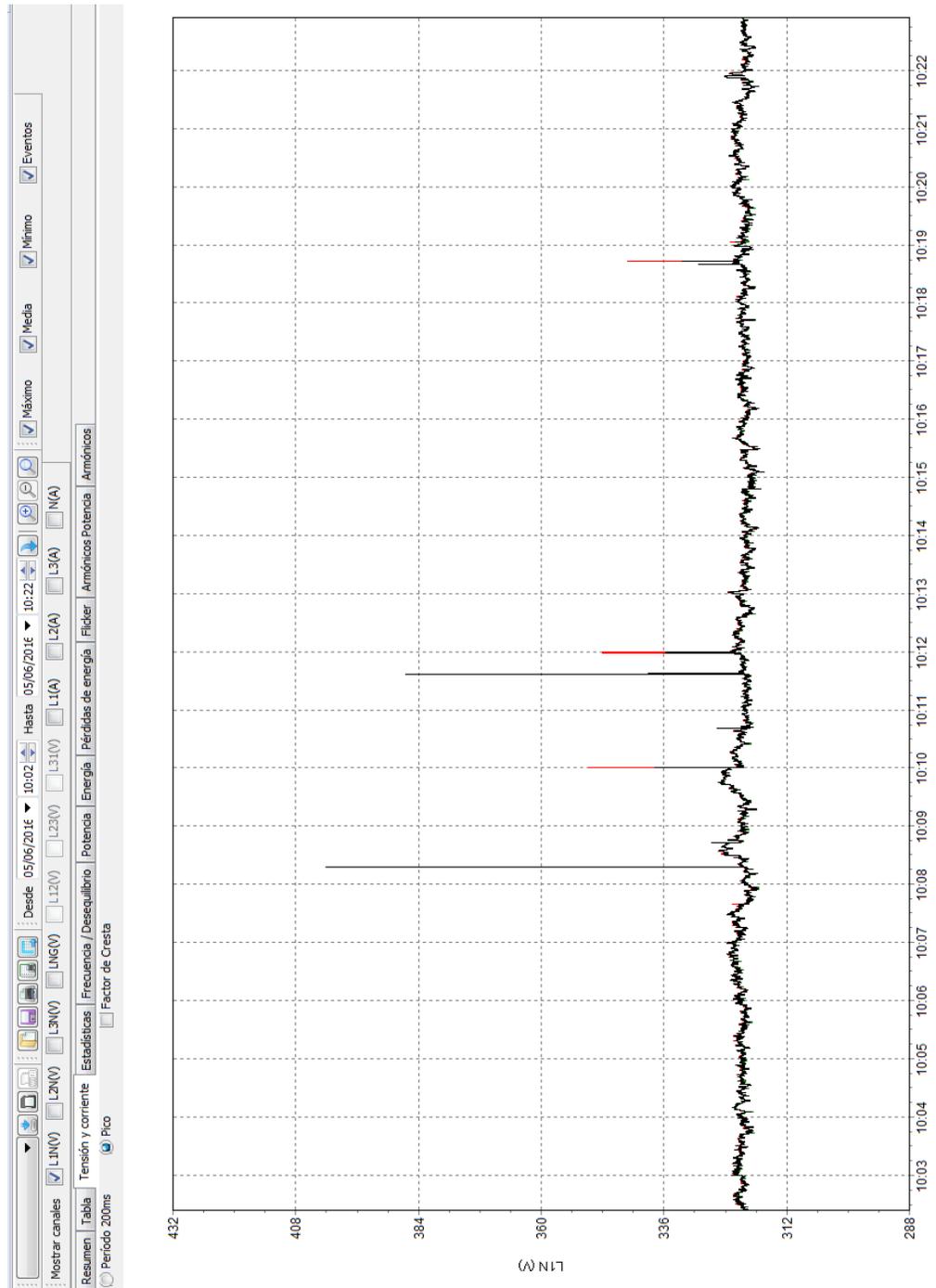
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 32. Gráfica de valores pico de voltaje de las 3 fases y neutro



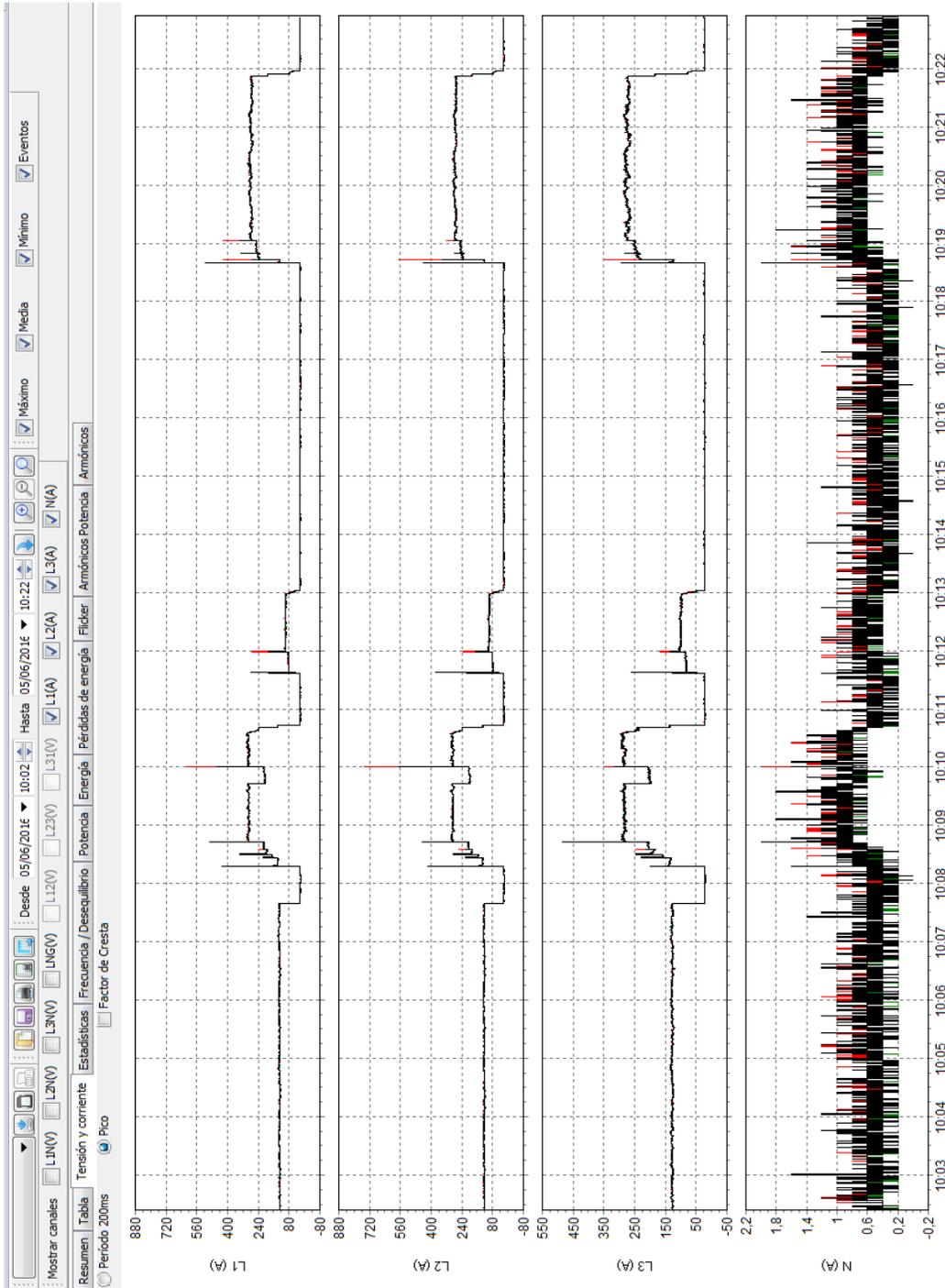
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 33. Gráfica de valores pico de voltaje de una fase



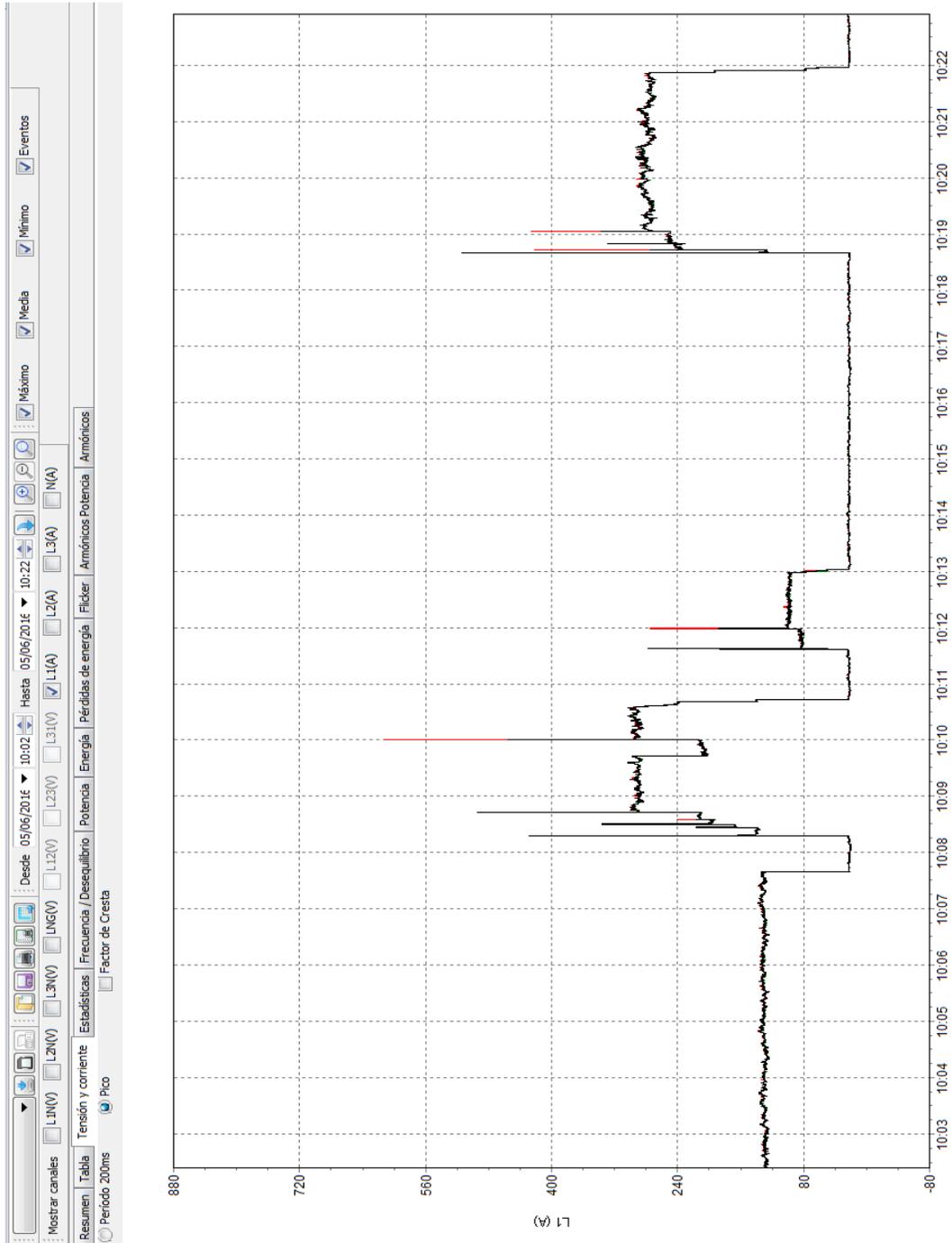
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 34. Gráfica de valores pico de corriente de las 3 fases y neutro



Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 35. Gráfica de valores pico de corriente de una fase



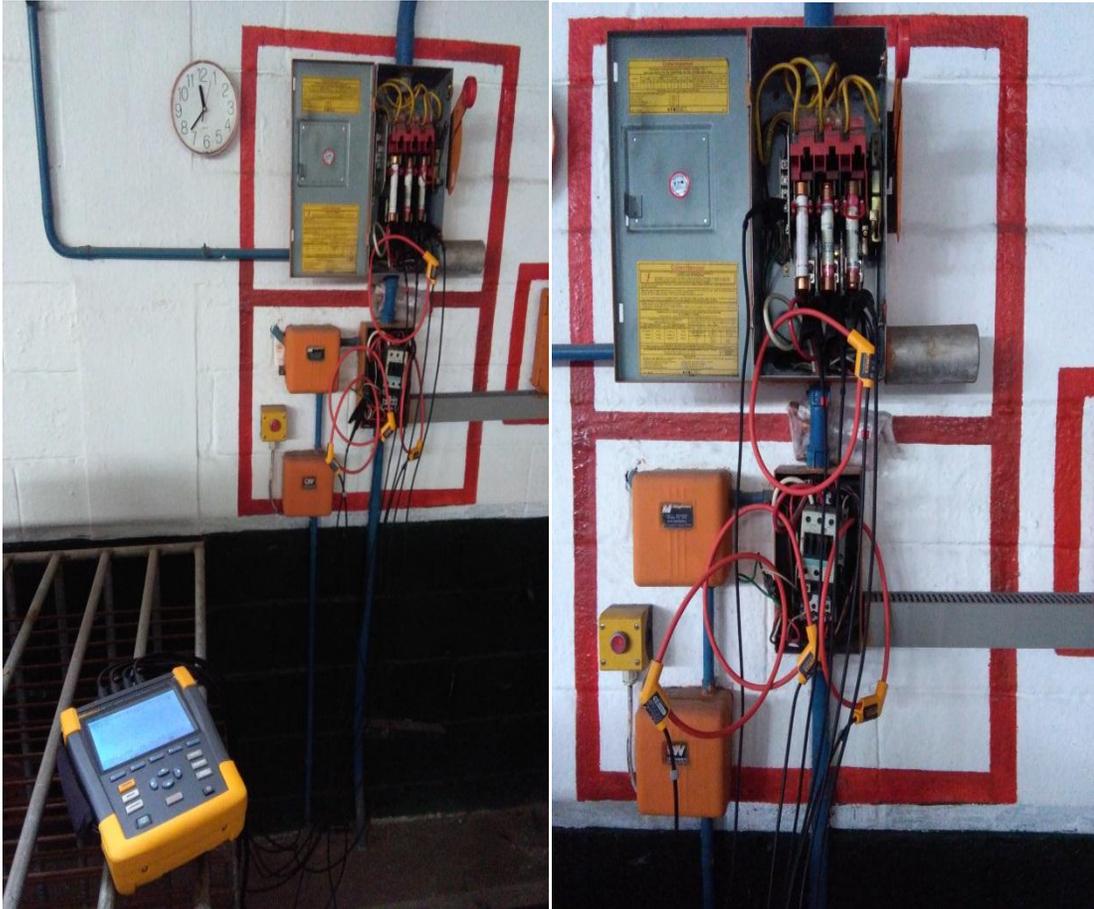
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Tabla III. **Mediciones tomadas, bomba de agua**

BOMBA DE AGUA					
Voltaje RMS	L1-N	L2-N	L3-N	N-G	N
Valor máximo	251.7 V	423.86 V	239.0 V	35.92 V	
Valor mínimo	247.0 V	416.3 V	233.58 V	35.0 V	
Corriente RMS	L1-N	L2-N	L3-N	N-G	N
Valor máximo	41.4 V	41.3 A	41.1 A		
Valor mínimo	2.0 V	0.1 A	0.1 A		
Tensión de pico	L1-N	L2-N	L3-N	N-G	N
Valor máximo	691.2 V	691.6 V	694.3 V	50.6 V	
Valor mínimo	677.4 V	677.7 V	680.4 V	42.3 V	
Corriente de pico	L1-N	L2-N	L3-N	N-G	N
Valor máximo	101.6 A	100.2 A	101.8 A		
Valor mínimo	0.8 A	0.2 A	0.4 A		

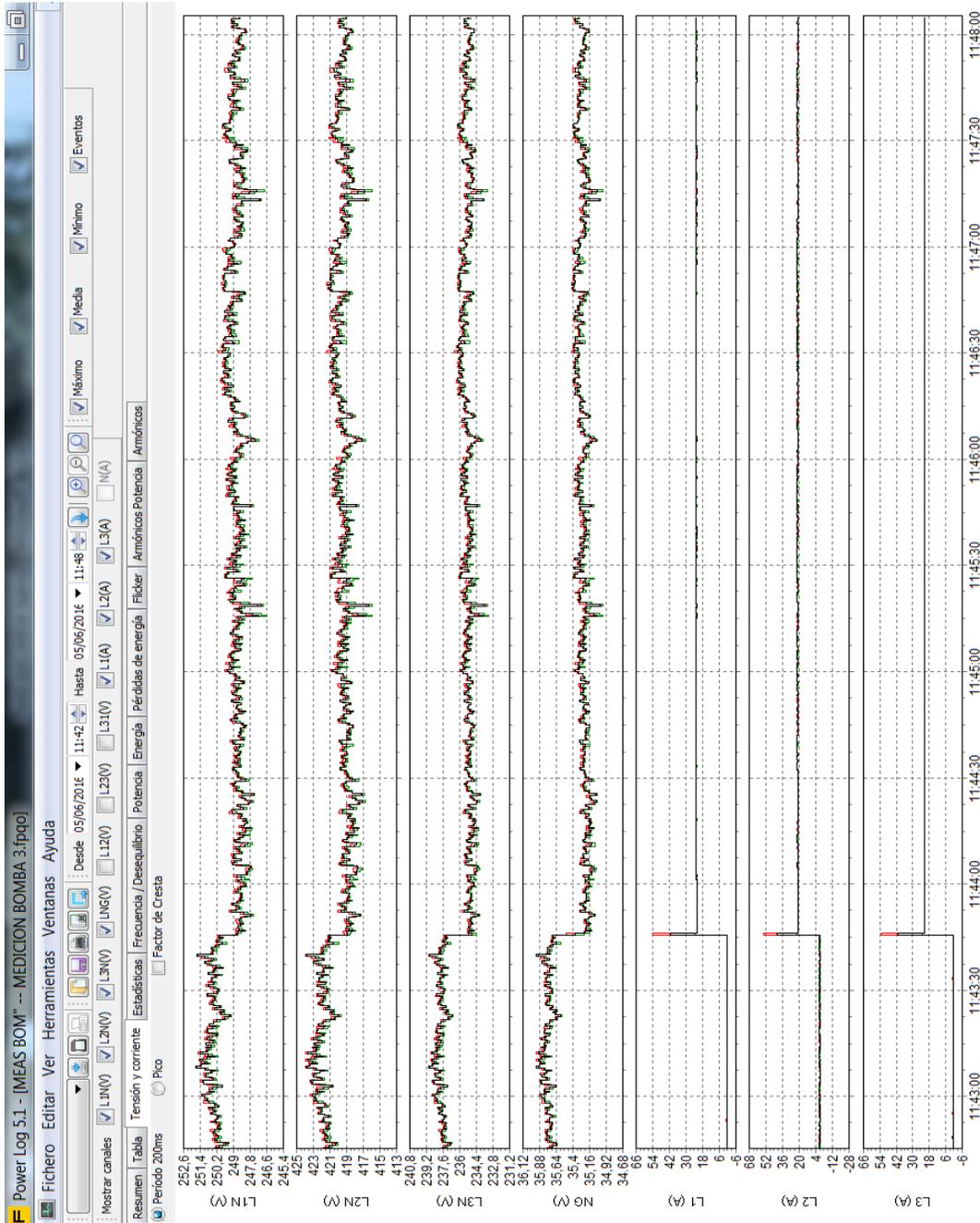
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Instalación del analizador de energía y calidad de potencia en una bomba de agua de 15 HP**



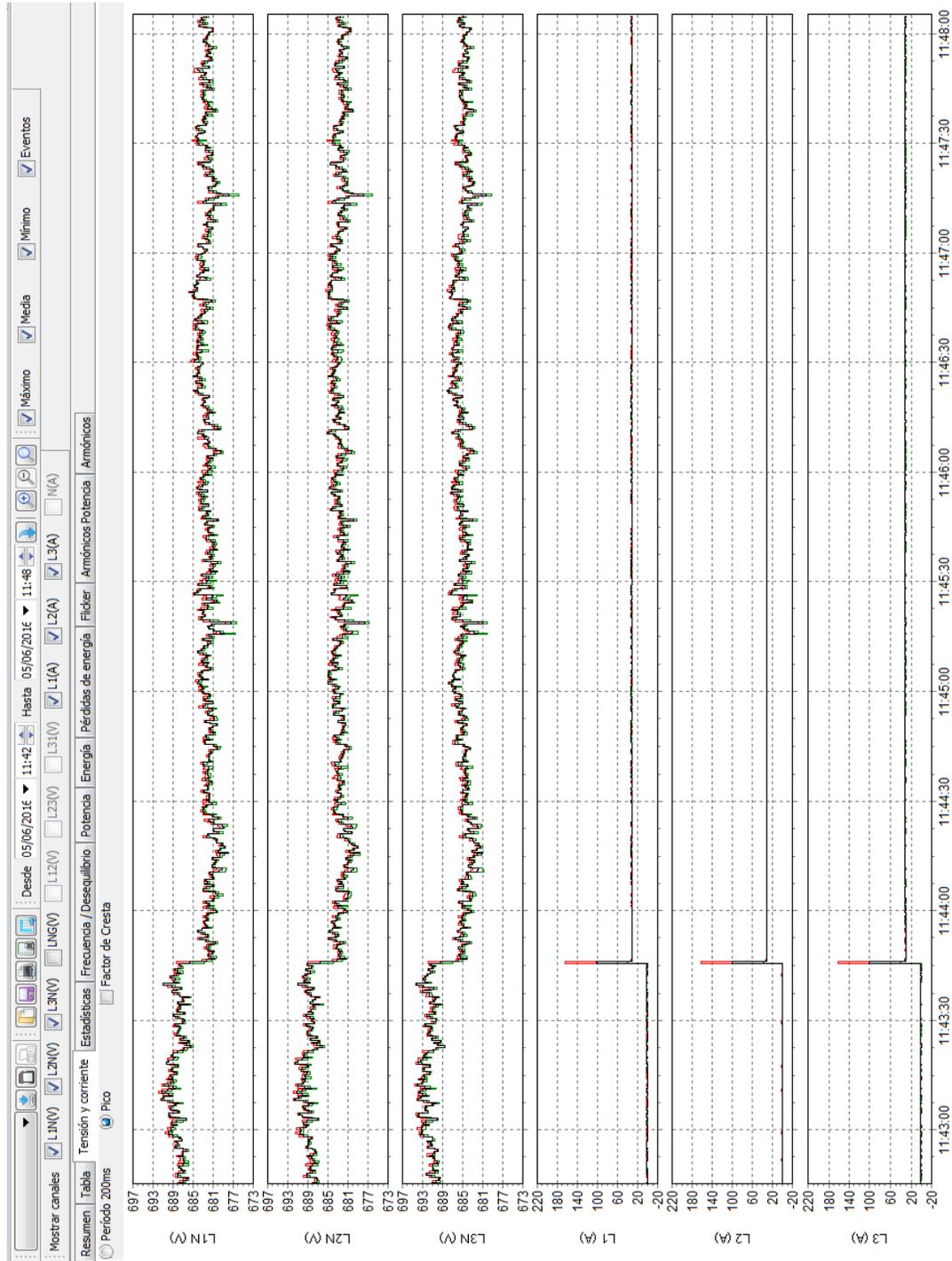
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Gráfica de valores RMS de voltaje y corriente de las 3 fases y neutro



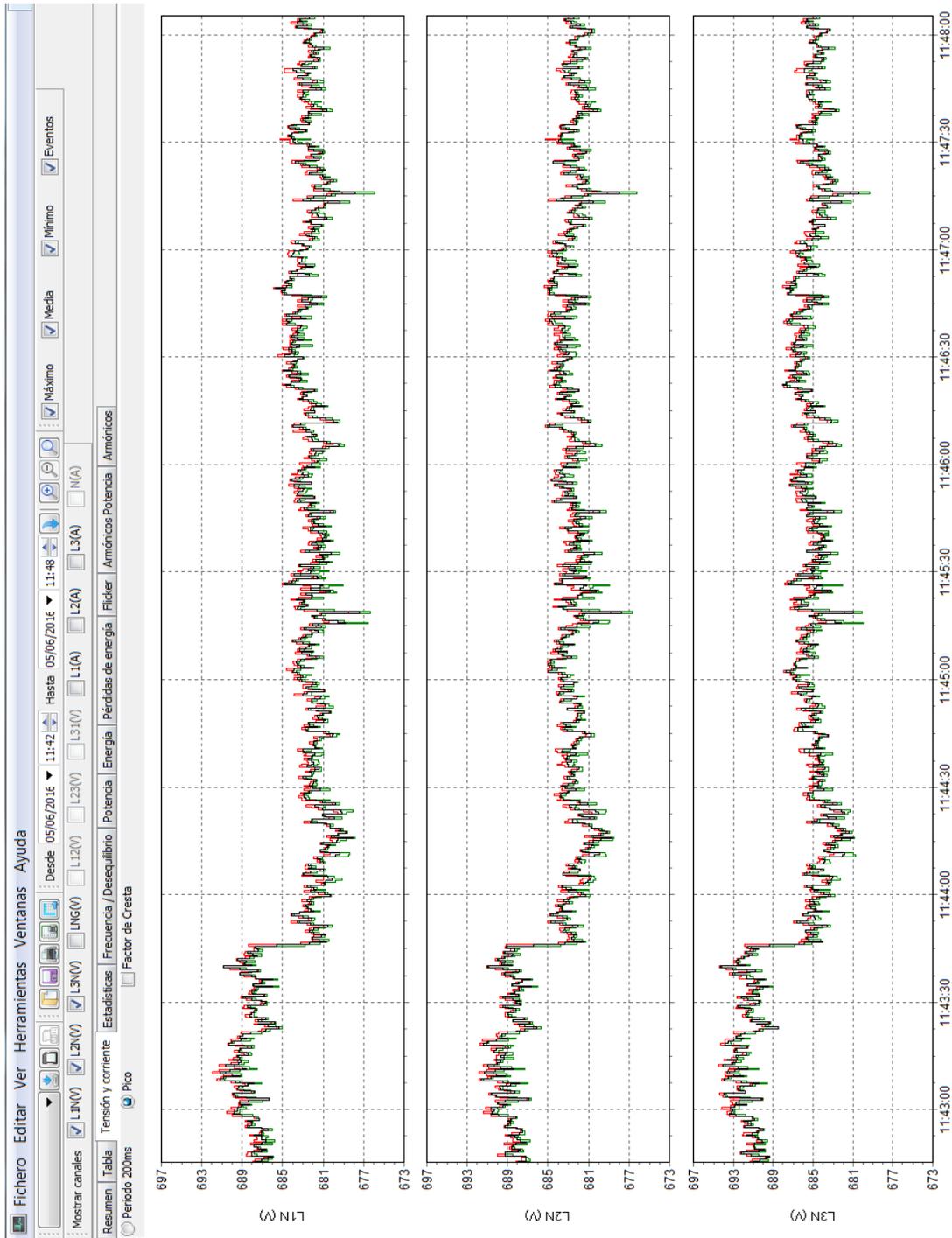
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 38. Gráfica de valores pico de voltaje y corriente de las 3 fases



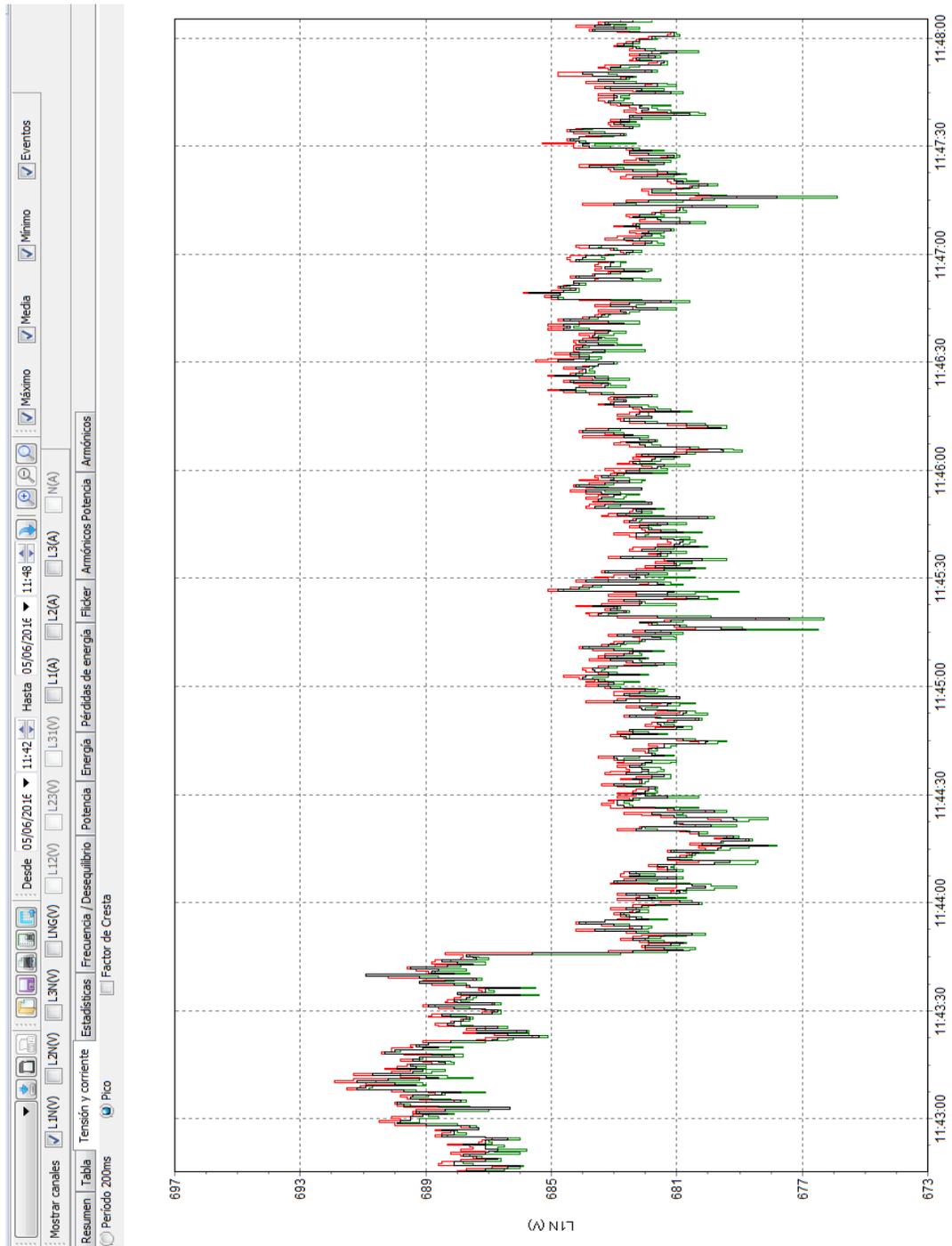
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 39. Gráfica de valores pico de voltaje de las 3 fases



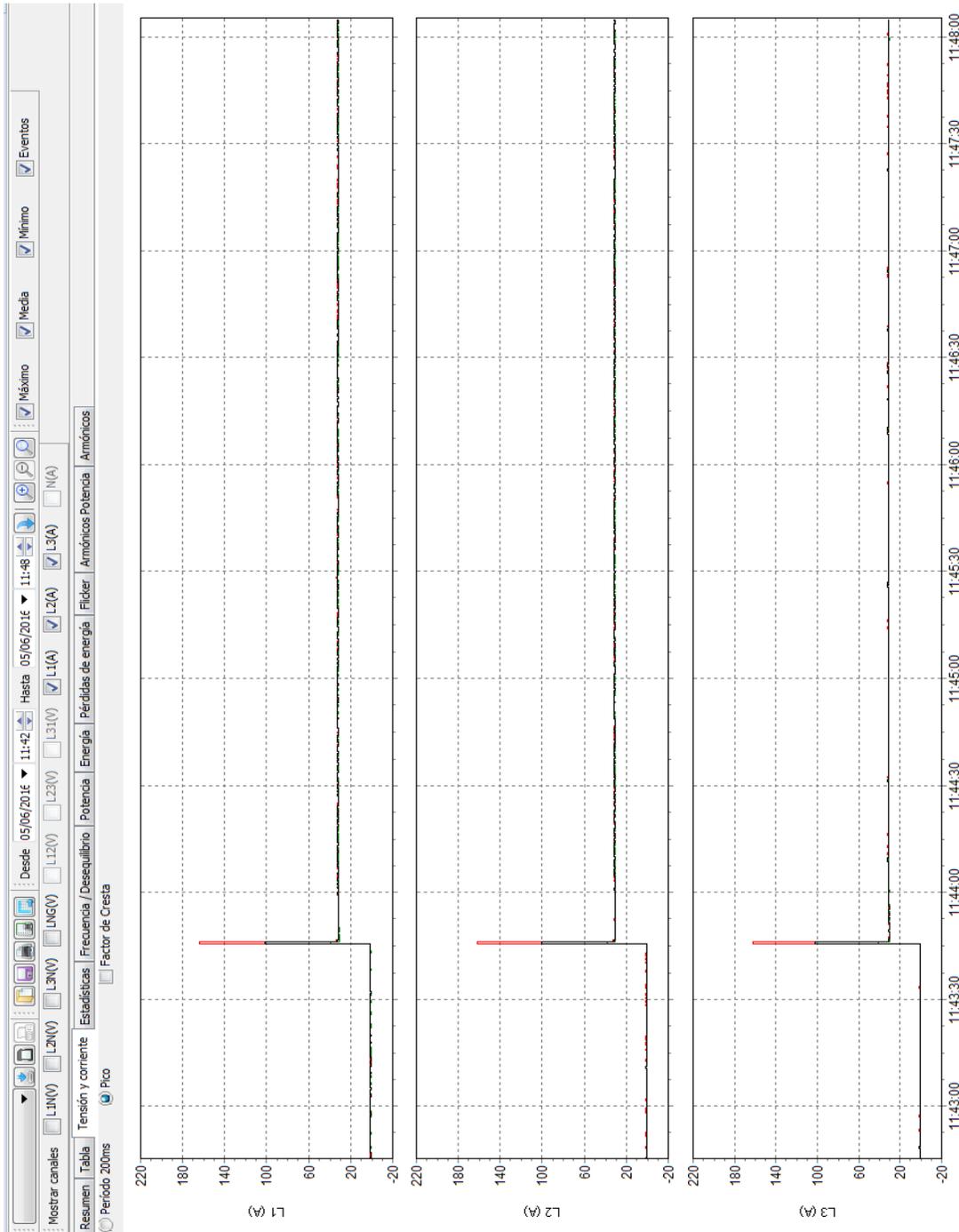
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 40. Gráfica de valores pico de voltaje de una fase



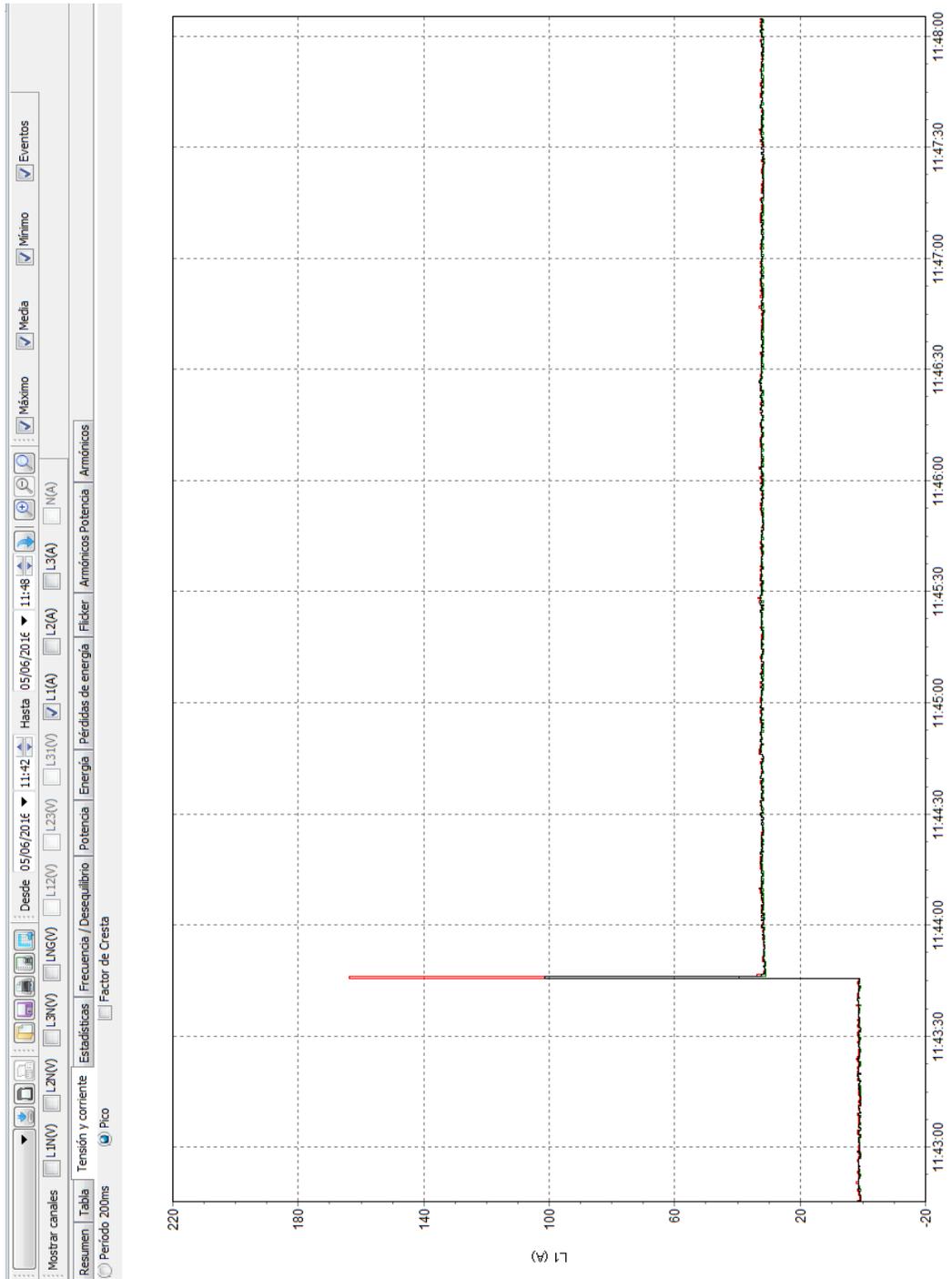
Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 41. Gráfica de valores pico de corriente de las 3 fases



Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

Figura 42. Gráfica de valores pico de corriente de una fase



Fuente: elaboración propia, empleando un analizador Fluke 435 serie II.

En los datos registrados por las mediciones realizadas con el analizador de energía y calidad de potencia Fluke 435 serie II, se lograron capturar eventos de sobretensiones y sobrecorrientes transitorias, los cuales eran eventos generados en el interior de la instalación eléctrica de la planta industrial.

En el caso del interruptor principal, se registraron los eventos generados por las máquinas industriales de textiles, las cuales realizan conmutación para su funcionamiento. En el banco de capacitores se realizaron maniobras, conectando y desconectando las 5 etapas de potencia reactiva, con la intención de generar perturbaciones eléctricas en el sistema para registrar su comportamiento.

En la bomba de agua se realizó un arranque de la misma, con un sistema directo con un contactor, generando una sobrecorriente transitoria en el arranque. Los registros de las mediciones tomadas indican la presencia de sobretensiones transitorias en la operación de la planta industrial, la que estaba operando a plena carga, por lo cual las mediciones fueron tomadas en un régimen de operación normal de la planta industrial.

Se pudieron capturar sobretensiones transitorias que superan el 100 % del voltaje nominal de la instalación eléctrica. Para poder obtener una sobretensión transitoria del rango de los miles de voltios, era necesario que ingresara una falla de gran magnitud por la acometida de 13,8 kV al sistema, como una descarga electroatmosférica, o maniobras por fallas en subestaciones y redes de distribución.

2.3. Levantamiento eléctrico de las cargas críticas y especiales de la planta

Complementando la investigación, se considera importante incluir el levantamiento eléctrico de las cargas críticas y especiales que se encuentran en la planta industrial evaluada.

2.3.1. Levantamiento eléctrico

El levantamiento eléctrico es una inspección en campo, donde se evalúa cada elemento de la instalación eléctrica industrial. En un levantamiento eléctrico se puede verificar el estado de los elementos que componen la instalación eléctrica y sus parámetros eléctricos, como por ejemplo:

- Niveles de voltaje que se manejan en la instalación
- Corrientes que circulan en los circuitos
- Tipos de conexiones
- Potencia instalada
- Potencia máxima
- Factor de potencia
- Nivel de iluminación

También es posible evaluar el estado y dimensionamiento de los elementos que componen la instalación, tales como:

- Estado de los conductores respecto a la oxidación, desgaste del aislamiento, empalmes en mal estado, etc.
- Calibres de conductores y tipos de aislamientos.

- Sistema de puesta a tierra verificando corrosión, estado de las uniones, calibre del conductor, partes metálicas mal aterrizadas, etc.
- Dispositivos de protección, capacidad de interruptores termomagnéticos, valores de fusibles, protecciones para motores, etc.
- Tipos de cargas, ya sea inductivas, capacitivas, resistivas y electrónicas, entre otras.
- Sistemas para la mejora de la calidad de energía, como bancos capacitores, filtros de armónicos, supresores de sobretensiones transitorias, reguladores y UPS's.
- Eficiencia, tipo y nivel de iluminación.

La evaluación también se utiliza para realizar diagramas unifilares o planos eléctricos de la instalación, ya que varias plantas industriales no cuentan con estos. Con los datos adquiridos en un levantamiento eléctrico, se pueden elaborar informes detallados del estado de la instalación y con esto se determina si la instalación eléctrica debe ser intervenida, como por ejemplo:

- Instalación de equipos de protección y para mejora de calidad de energía
- Reacondicionamiento de tableros
- Cambios de conductores mal dimensionados o degradados
- Protecciones especiales para equipos críticos o especiales
- Nuevos sistemas de puesta a tierra
- Instalación de pararrayos
- Equipos para mejorar la eficiencia de la energía
- Instalación de nuevos tipos de luminaria

Esta información es importante para el diseño y selección de distintos sistemas de protección, para eliminar la perturbación eléctrica provocada por las sobretensiones transitorias, ya que con estos datos se dimensiona y se determinan las ubicaciones de los dispositivos de protección contra este evento eléctrico.

2.3.2. Levantamiento eléctrico en una planta industrial de textiles

Se realizó un levantamiento eléctrico en una planta industrial de textiles, la misma en donde se instaló un contador de eventos y un analizador de energía y calidad de potencia, con los cuales se recolectaron datos importantes para la determinación de los puntos críticos de la instalación eléctrica, los cuales son:

- Banco de capacitores
- Máquinas textiles
- Bomba de petróleo
- Iluminación

Se procedió a ejecutar la evaluación de la instalación eléctrica, desde la acometida principal hasta la alimentación de las tarjetas electrónicas de las máquinas textiles y cada circuito de la instalación.

Específicamente se evaluaron los puntos críticos de la instalación eléctrica y se tomaron los datos que se quieren para el diseño, dimensionamiento y ubicación de un sistema de protección para disipar la perturbación eléctrica que ocasionan las sobretensiones transitorias.

Para el levantamiento eléctrico se contó con el apoyo del jefe de mantenimiento de la planta industrial, para que proporcionara datos técnicos y ubicación de cada circuito o tablero, conductores, máquinas, equipos críticos y especiales. Para su evaluación se utilizó un multímetro en las mediciones de voltaje y corriente en distintos puntos de la instalación eléctrica. También se solicitó un registro o historial de fallas ocurridas en la planta industrial para complementar la información.

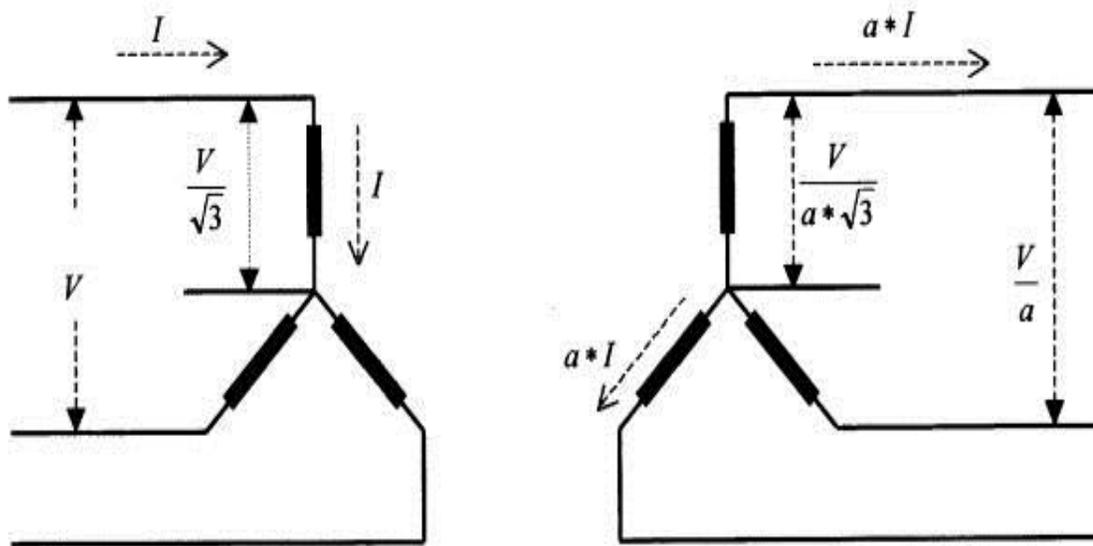
2.3.2.1. Datos adquiridos del levantamiento eléctrico

La información adquirida del levantamiento eléctrico se centra en ocho puntos importantes:

- **Acometida:** la planta industrial cuenta con una acometida subterránea de 30m desde el poste de la empresa de distribución, en donde se encuentra ubicado el medidor y los transformadores de medición (CT's y PT's), hasta el banco de transformadores que suministra la potencia a toda la instalación eléctrica, el nivel de tensión de la acometida es de 13,8 kV.
- **Banco de transformadores:** cuenta con tres transformadores convencionales de 100 KVA de potencia cada uno, para sumar 300 KVA de potencia disponible en la planta industrial, cada transformador cuenta con un fusible y corta circuito de protección contra cortocircuitos y sobrecarga, un apartarayos de protección contra sobretensiones externas y seccionadores para realizar maniobras de mantenimiento. La conexión del banco de transformadores es en estrella-estrella. Transforma niveles de voltaje de 13,8 kV a 380 V, voltaje fase-fase y 220 V voltaje fase-neutro, que son los voltajes que se manejan en la instalación.

Dependiendo del tipo de carga, también existen transformadores para voltajes más bajos.

Figura 43. **Configuración estrella de un banco de transformación trifásico**



Fuente: *Configuración estrella.*

<http://patricioconcha.ubb.cl/410113/accionamientos/razón%20trifa.htm>.

Consulta: 10 de noviembre de 2016.

- Interruptor principal: es termomagnético y tiene capacidad de 3 X 500 A, el cual alimenta un banco de capacitores para la corrección del factor de potencia, tres tableros de distribución para las máquinas textiles, un tablero de distribución para la iluminación, un tablero de distribución para circuitos de fuerza y un tablero para una bomba de petróleo.
- Banco de capacitores: para la corrección del factor de potencia de la instalación eléctrica, la planta industrial cuenta con un banco de

capacitores automatizado de 6 etapas, cada etapa con una potencia reactiva de 25 KVAR, el panel del corrector del factor de potencia está alimentado por un interruptor termomagnético de 3 X 300 A, conectado después del interruptor principal a una tensión de 380 V trifásico.

Figura 44. **Capacitores de regulación de F.P.**



Fuente: elaboración propia.

- Tableros de distribución para las máquinas textiles: para la alimentación de máquinas se cuenta con 2 interruptores termomagnéticos de 3 X 125A, que alimentan 11 máquinas cada uno y un interruptor termomagnético de

3 X 70 A que alimenta 6 máquinas. Estos interruptores alimentan barras conductoras, las cuales pasan sobre la línea de producción, alimentando cada máquina textil y su iluminación, con voltajes de 380 V y 220 V.

- Circuito de iluminación: la iluminación general de la planta industrial está alimentada por un interruptor termo magnético de 20 A y 220 V, cuenta con 20 lámparas fluorescentes con balastro electrónico y un interruptor por cada 10 lámparas.
- Circuito de fuerza: este circuito por lo general no tiene cargas conectadas, es para tomacorrientes de uso general, solamente es para algunos servicios que se puedan requerir, por lo tanto no genera sobretensiones transitorias y no cuenta con cargas críticas, la capacidad del interruptor de este circuito es de 20 A.
- Bomba de petróleo: en el proceso de la elaboración de textiles, se necesita vapor para que no se rompa el hilo en el proceso. La planta cuenta con una caldera, la cual genera vapor con petróleo como combustible, el petróleo es bombeado con una bomba de 3 HP, 380 V trifásico. Esta bomba cuenta con un arranque directo, la caldera por medio de un sensor de nivel envía una señal a un contactor, realizando el arranque directo de la bomba. La bomba solamente cuenta con un interruptor termomagnético de 25 A y un guarda motor como protección.

Figura 45. **Bomba para petróleo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Circuito de control de la bomba**



Fuente: elaboración propia.

Las máquinas textiles son alimentadas con un voltaje de 380 voltios trifásico, tienen un interruptor termomagnético de 3 X 32 A como protección general, la máquina cuenta con su propia iluminación compuesta por dos lámparas de neón de 400 watt cada una, que se alimentan en la misma barra conductora con un voltaje de 220V monofásico, protegidas por un interruptor termomagnético de 10 A.

Figura 47. **Tarjetas electrónicas de una máquina textil**



Fuente: elaboración propia.

El panel de control de la máquina cuenta con 3 transformadores, en el lado de alta, alimentados por 380 voltios monofásicos, y en el lado de baja, voltajes desde 5 voltios hasta 120 voltios, para abastecer las fuentes de voltaje que alimentan toda la electrónica y potencia de la máquina. Las máquinas cuentan con seis motores cada una:

- 1 motor de 7 HP, 380 V, 3fases
- 1 motor de 1 HP, 380 V, 3fases
- 1 motor de ½ HP, 380 V, 3fases
- 3 motores de 1/3 HP, 220 V, 1 fase

El control de la máquina está compuesto por dos tarjetas electrónicas con memorias EPROM, que almacenan la programación de la máquina. Estas tarjetas son el mando de los motores, los cuales son accionados por contactores.

Figura 48. **Máquina textil**



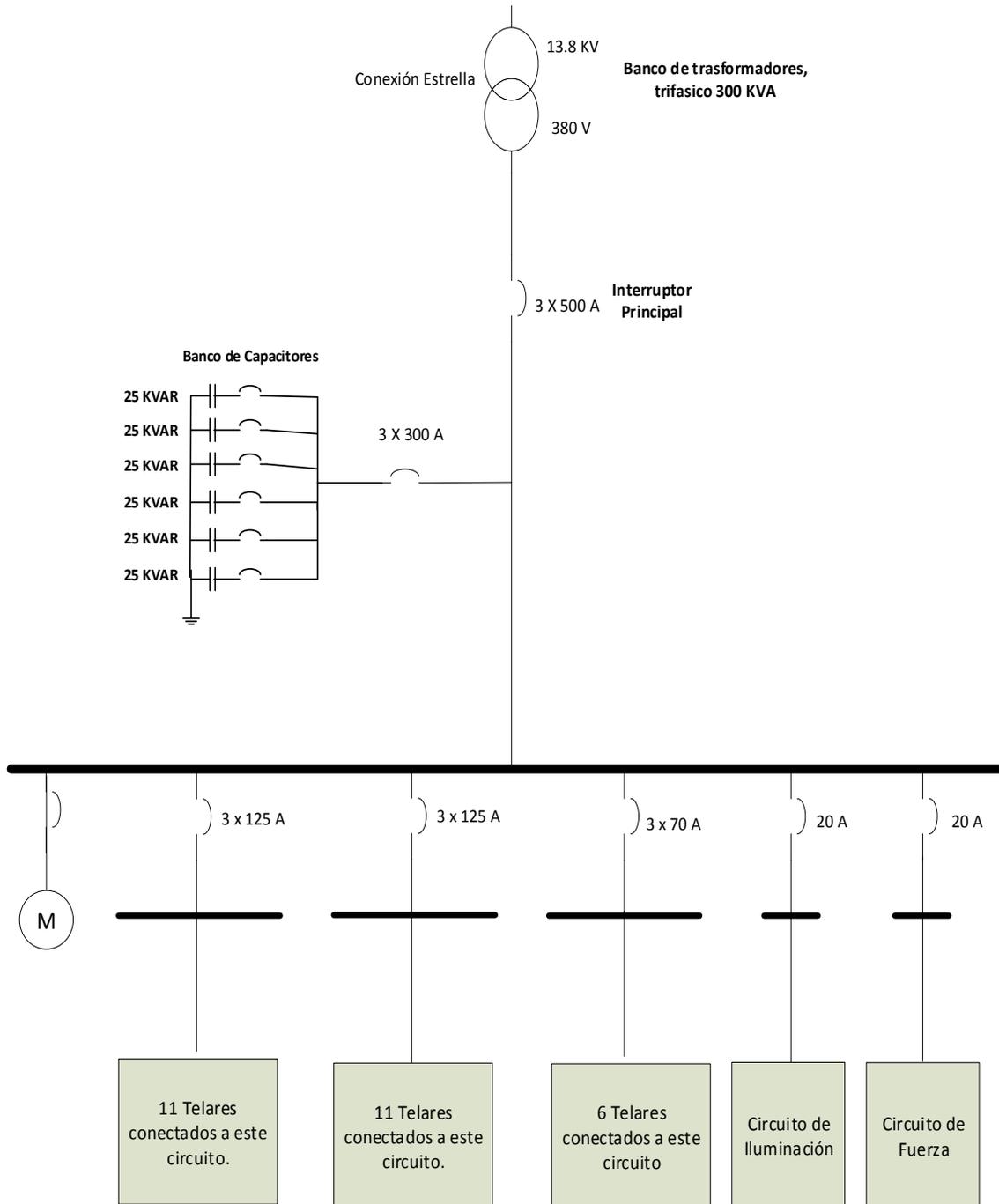
Fuente: elaboración propia.

2.4. Diagramas unifilares de la instalación eléctrica de la planta

Los datos adquiridos en el levantamiento eléctrico son importantes para la elaboración de diagramas unifilares de las cargas críticas y de la instalación eléctrica. Se tomaron los datos más importantes para el dimensionamiento del sistema de protección contra sobretensiones transitorias adecuado para la planta.

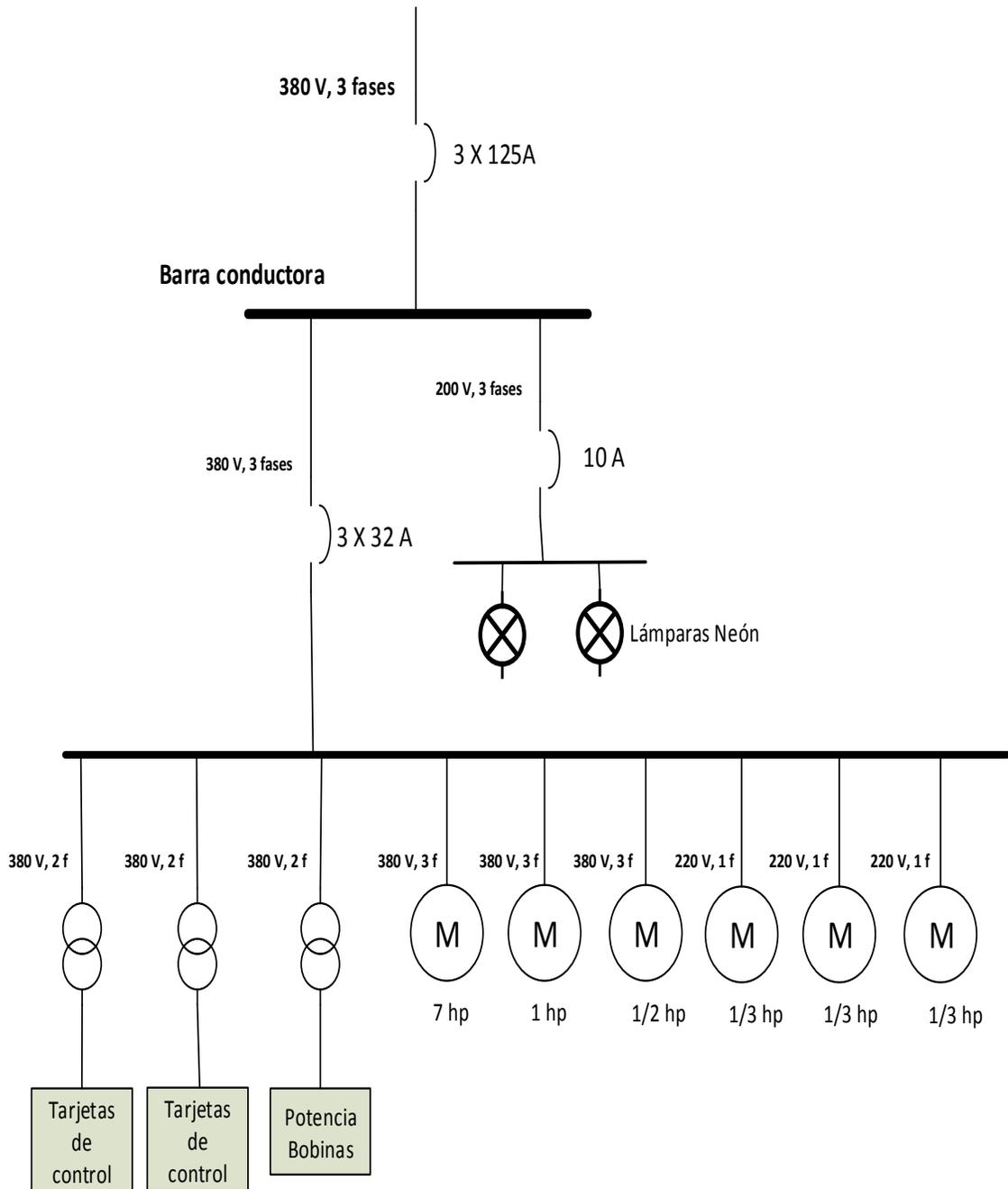
Los diagramas unifilares permiten ampliar el panorama y aportan una mejor visión de la instalación, para poder determinar los puntos vulnerables a las perturbaciones eléctricas, y así poder ubicar gráficamente los circuitos y equipos a proteger. El diagrama unifilar es un esquema simple en que se representa, por medio de una sola línea, los conductores que alimentan una instalación eléctrica, independientemente del número de conductores o fases que sean, y se elabora el diagrama unifilar de toda la instalación eléctrica de una máquina textil.

Figura 49. Diagrama unifilar de la acometida y tableros de distribución



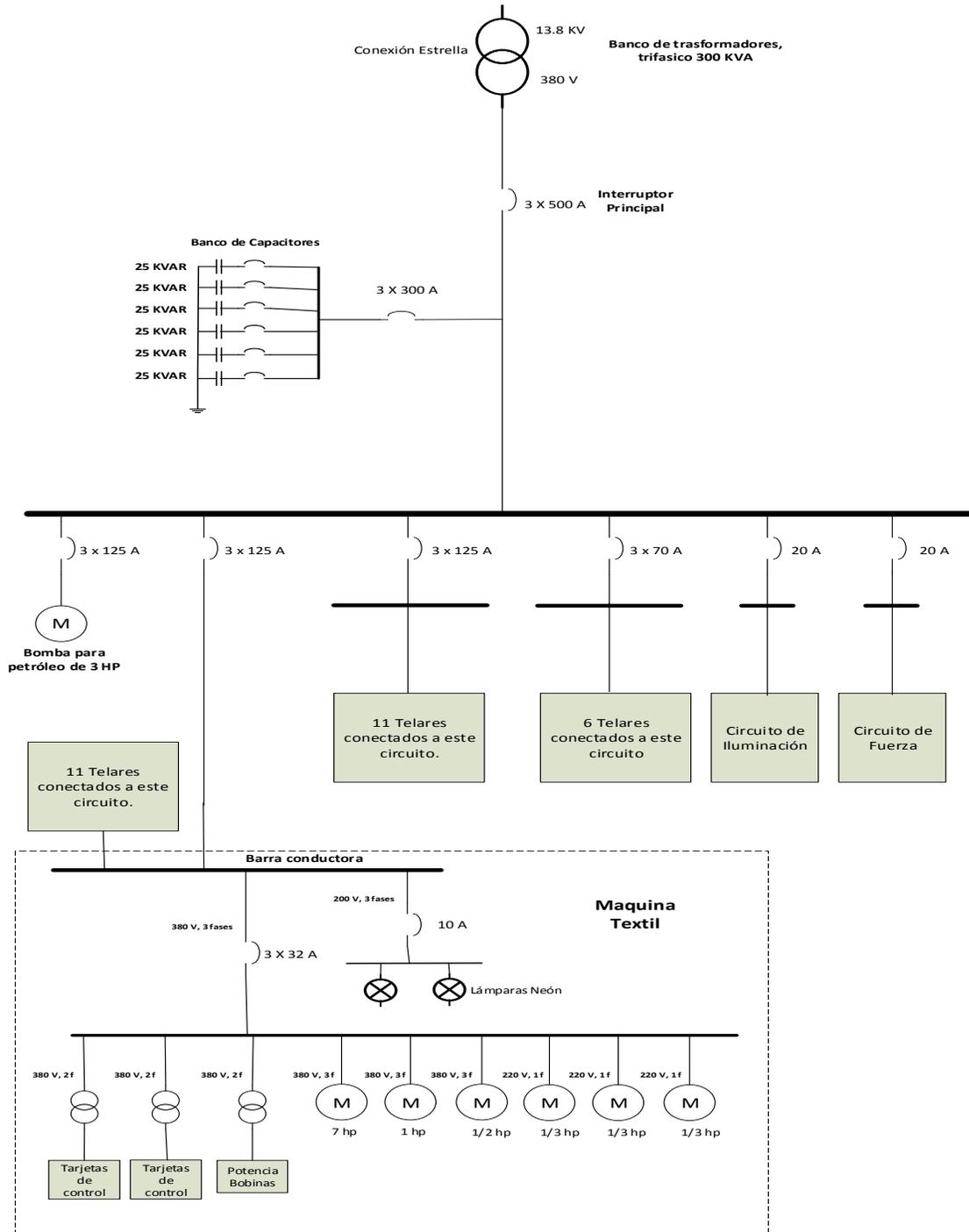
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. Diagrama unifilar de una máquina textil



Fuente: elaboración propia.

Figura 51. Diagrama unifilar de tableros y máquinas textiles



Fuente: elaboración propia.

2.5. Análisis de la distorsión de la onda senoidal de voltaje ocasionada por las sobretensiones transitorias

La potencia suministrada por las redes de distribución eléctrica de un sistema interconectado proviene de una matriz energética diversificada, en donde las máquinas eléctricas giratorias convierten la potencia mecánica de una turbina o primotor en potencia eléctrica, la cual es entregada en las terminales del estator de las máquinas o generadores. El voltaje que entregan a la red eléctrica es variable en el tiempo, por las variaciones del campo electromagnético que existe entre el rotor y el estator, según la posición de sus ejes.

Gráficamente el voltaje varía con valores máximos positivos y máximos negativos, pasando por el eje cero con una forma de onda senoidal. Esta variación de voltaje genera campos magnéticos variables, que son importantes para que los devanados de los transformadores de potencia y distribución puedan transformar los niveles de tensión según su aplicación o necesidad, para el transporte, distribución y consumo de la energía eléctrica.

La onda senoidal de voltaje tiene un período de 2π , una frecuencia de 60 Hz y una amplitud de voltaje que varía desde 120 voltios hasta más de 500 000 voltios, según su aplicación y configuración del sistema eléctrico.

En condiciones ideales o normales, el voltaje de un sistema debe ser siempre el mismo con la forma de onda senoidal y con el nivel o amplitud constante según su requerimiento, ya que todos los materiales, equipos y dispositivos que conforman un sistema eléctrico operan de forma eficiente y normal con estas características de tensión.

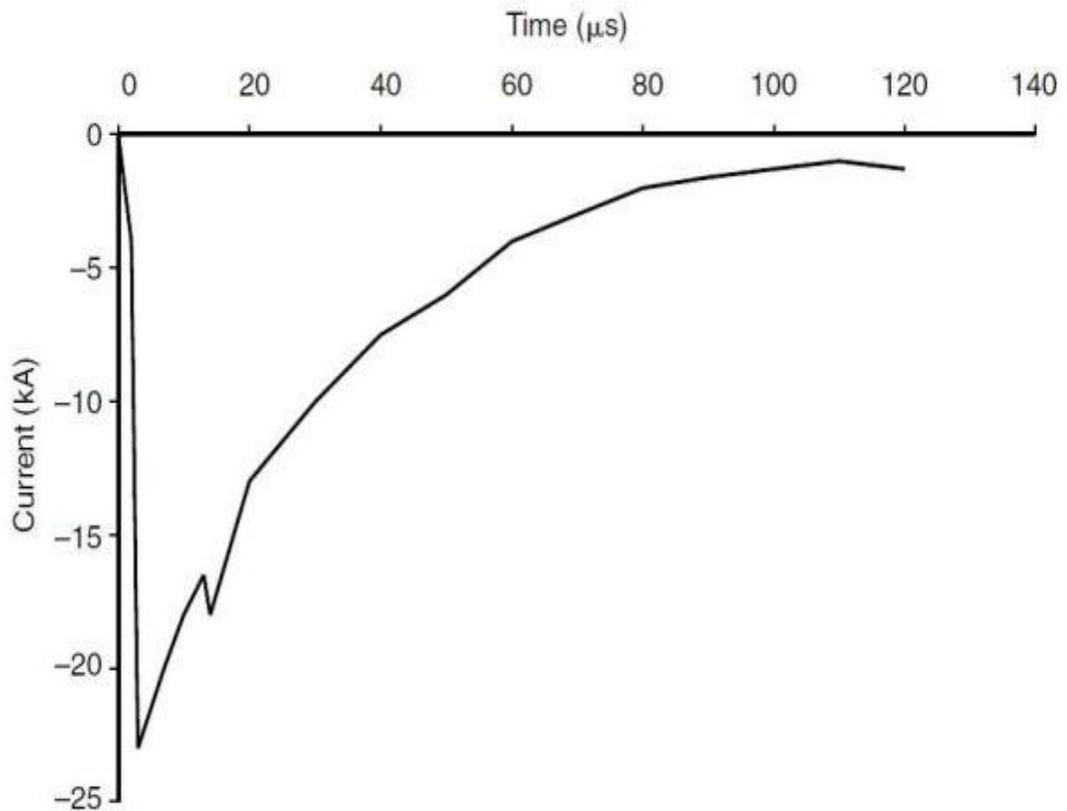
Cuando en un sistema eléctrico se origina una sobretensión transitoria, esta genera una distorsión en la forma de onda senoidal del voltaje. Las características de la distorsión en el voltaje dependen del tipo de sobretensión transitoria que se genere.

2.5.1. Distorsión de la onda por una sobretensión transitoria de tipo impulsivo

La sobretensión transitoria de tipo impulsivo genera en la forma de onda senoidal una subida repentina de voltaje en la onda, con valores grandes de amplitud de voltaje, ya sean positivos o negativos, en el rango de miles de voltios en forma de pulso. Cuando llega a su valor máximo, la energía de la sobretensión transitoria decrece en un tiempo mayor al de subida, hasta llegar a su valor normal, estabilizándose la onda y variando de forma normal.

Esta sobretensión transitoria es de muy corta duración medida en microsegundos, normalmente está caracterizada por sus tiempos de ascenso de 1 a 10 μ seg y descenso de 20 a 150 μ seg, y por su contenido espectral.

Figura 52. **Transitorio de tipo impulsivo**



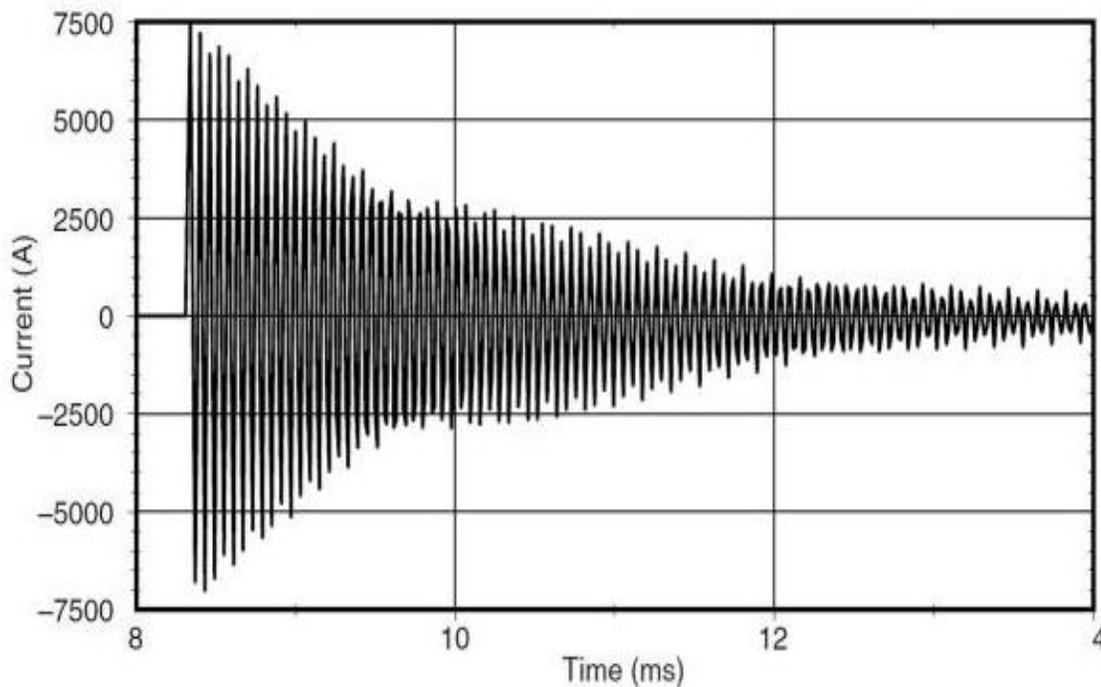
Fuente: Universidad del Atlántico. *Calidad de la energía eléctrica*. P. 7.

2.5.2. **Distorsión de la onda por una sobretensión transitoria de tipo oscilatorio**

La sobretensión transitoria de tipo oscilatorio genera en la forma de onda senoidal una variación de sobretensiones, el voltaje sube y baja con frecuencias bajas, medias y rápidas, amortiguándose hasta llegar a su forma y valor normal. Este comportamiento es llamado oscilatorio y puede presentar los siguientes patrones:

- Los transitorios oscilatorios con frecuencias mayores a 500 kHz y duraciones típicas, medidas en microsegundos, o varios ciclos de la frecuencia fundamental, son considerados transitorios oscilatorios de frecuencia rápida o alta frecuencia.
- Cuando la frecuencia se encuentra entre 5 y 500 kHz, el transitorio oscilatorio es considerado de frecuencia media.
- Una sobretensión transitoria con una frecuencia inferior a 5 kHz, a una duración de 0,3 ms a 50 ms, es considerado como transitorio de baja frecuencia

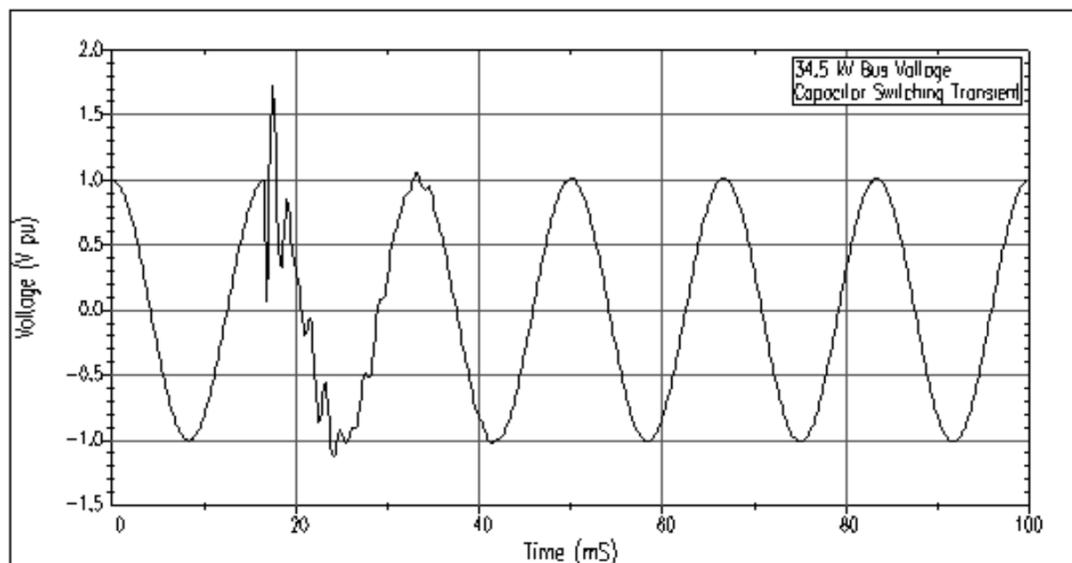
Figura 53. **Transitorio de tipo oscilatorio**



Fuente: Universidad del Atlántico. *Calidad de la energía eléctrica*. P. 8.

Esta distorsión de tensión se presenta en los niveles de subtransmisión y distribución y en los sistemas industriales, y es causada por diversos tipos de eventos eléctricos en el sistema. El más frecuente es la energización de bancos de capacitores que hacen oscilar la tensión con frecuencia primaria entre 300 y 900 Hz. La magnitud pico se observa en la siguiente figura, normalmente es de 1,3 a 1,5 p.u. con una duración entre 0,5 y 3 ciclos, dependiendo del amortiguamiento del sistema.

Figura 54. **Transitorio de baja frecuencia**



Fuente: Universidad del Atlántico. *Calidad de la energía eléctrica*. P. 9.

Según la norma IEEE estándar 1159 de 1995, existen fenómenos electromagnéticos que pueden ser de tres tipos:

- Variaciones en el valor RMS de la tensión o la corriente
- Perturbaciones de carácter transitorio
- Deformaciones en la forma de onda

En la tabla IV se muestra un resumen de las características típicas de los fenómenos electromagnéticos y su clasificación.

Tabla IV. **Características de fenómenos electromagnéticos**

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL	DURACIÓN	MAGNITUD DE VOLTAJE
SOBRETENSIONES TRANSITORIAS			
Impulsivos			
Nanosegundos	5 ns rise	< 50 na	
Microsegundos	1 μ s rise	50 ns - 1 ms	
Milisegundos	0.1 ms rise	> 1ms	
Oscilatorios			
Baja frecuencia	< 5KHz	0,3 - 50 ms	0 - 4 pu
Media frecuencia	5 - 500 KHz	20 μ s	0 - 8 pu
Alta frecuencia	0.5 - 5 MHz	5 μ s	0 - 4 pu
VARIACIONES DE CORTA DURACIÓN			
Instantáneas			
Sag (Valles)		0.5 - 30 ciclos	0.1 - 0.9 pu
Swell (Crestas)		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
Momentáneas			
Interrupciones		0.5 ciclos - 3 s	< 0.1 pu
Sag (Valles)		30 ciclos - 3 s	0.1 - 0.9 pu
Swell (Crestas)		30 ciclos - 3 s	1.1 - 1.4 pu
Temporales			
Interrupciones		3 s - 1 min	< 0.1 pu
Sag (Valles)		3 s - 1 min	0.1 - 0.9 pu

Continuación de la tabla IV:

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL	DURACIÓN	MAGNITUD DE VOLTAJE
Temporales			
Swell (Crestas)		3 s - 1 min	1.1 - 1.2 pu
VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN			
Interrupciones sostenidas		> 1 min	0.0 pu
Bajo Voltaje		> 1 min	0.8 - 0.9 pu
Sobrevoltajes		> 1 min	1.1 - 1.2 pu
Desbalance de Voltaje		Estado Estable	0.5 - 2%
DISTORSIÓN DE FORMA DE ONDA			
Desplazamiento de C.D.		Estado Estable	0 - 0.1%
Armónicos	0 - 100th H	Estado Estable	0 - 20%
Inter armónicos	0 - 6 KHz	Estado Estable	0 - 2%
Hendiduras		Estado Estable	
Ruidos	Banda - ancha	Estado Estable	0 - 1%
FLUCTUACIONES	< 25 Hz	Intermitente	0.1 - 7%
VARIACIONES DE FRECUENCIA		< 10 s	

Fuente: Universidad del Atlántico. *Calidad de la energía eléctrica*. P. 5-6.

3. DISEÑO DE PROTECCIÓN PARA DISIPAR LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA INDUSTRIAL

Este diseño se realizó con base en la selección por categorías de supresores de sobretensiones transitorias y los métodos de protección en cascada con supresores. Toda la información que se presenta en este capítulo está complementada con diferentes diagramas unifilares y un análisis de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación de la temática abordada.

3.1. Categoría de supresores de sobretensiones transitorias según norma ANSI/IEEE C62.41-1991

En el diseño de un sistema de protección para sobretensiones transitorias se deben seleccionar los dispositivos de protección SPD, según las características y condiciones que establece la norma ANSI/IEEE C 62.41-1991.

En el mercado existe una gran cantidad de supresores de sobretensiones transitorias, diseñados para cubrir y satisfacer las necesidades de los distintos tipos de instalaciones eléctricas y de sus cargas conectadas a la misma.

La norma ANSI/IEEE C 62.41 es una guía que permite seleccionar el supresor de sobretensión transitoria, adecuado para distintos tipos de carga o circuito, dependiendo de los parámetros eléctricos y factores externos e internos que puedan influir o afectar una instalación eléctrica.

Para la selección de un supresor de sobretensiones transitorias, la norma ANSI/IEEE C 62.41, desde un punto práctico, establece varias características y parámetros que debe tener la instalación eléctrica y el supresor de sobretensión transitoria:

- Clasificación
- Nivel de exposición
- Tensión y conexión
- *Clamping*
- Corriente de corto circuito de la instalación eléctrica
- Otros

3.1.1. Clasificación

La norma ANSI/IEEE C 62.41-1991 clasifica los supresores de sobretensiones transitorias en tres categorías para su utilización. Estas categorías dependen de la ubicación de la instalación eléctrica y del lugar donde serán instalados. Los supresores de sobretensiones transitorias se pueden conectar en puntos de la instalación eléctrica en donde se requiere de este tipo de protección, según un estudio y análisis ya efectuado, desde la acometida principal, pasando por los tableros de distribución, hasta las cargas más sensibles o críticas. Las categorías a tomar en cuenta son:

- Categoría A: en esta categoría se encuentran los que se utilizarán como protección directa de las cargas, como por ejemplo las salidas de los tomacorrientes, fuentes de voltaje AC o DC para tarjetas electrónicas, PLC's, servoamplificadores, variadores de velocidad, o se podrían definir como aquellos que se conectan directamente a las cargas y tableros secundarios. Para esta categoría existen supresores de sobretensiones

transitorias que cuentan con características especiales para que se conecten a cargas que manejan voltajes pequeños, ya sea AC o DC, en distintos tipos de configuraciones.

- Categoría B: en esta categoría se encuentran los supresores de sobretensiones transitorias que se utilizan para protección de tableros de distribución, alimentadores de gran potencia y circuitos cortos.
- Categoría C: en esta categoría se encuentran los que tienen mayor resistencia y capacidad de disipación de la energía de las sobretensiones transitorias, ya que son utilizados como protección de cabecera, en el primer punto de desconexión después del transformador, o en el interruptor principal de la instalación eléctrica. En este punto es donde se reciben las sobretensiones transitorias de mayor magnitud, ya que son las de origen externo como el rayo.

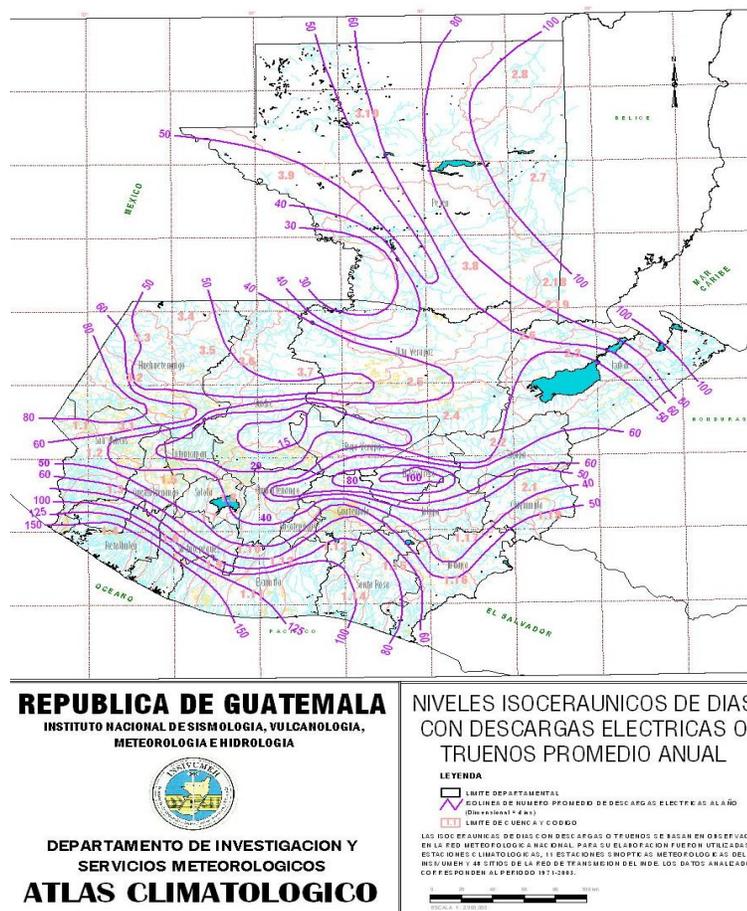
3.1.2. Nivel de exposición

El nivel de exposición se refiere a la probabilidad o riesgo con que cuenta una instalación eléctrica de sufrir impactos de descargas atmosféricas, comúnmente llamados rayos.

El nivel de riesgo de descargas atmosféricas es distinto en todo el territorio de Guatemala, dependiendo de la región geográfica del país, esto se puede determinar con el nivel ceráunico del territorio, en que se cuantifica la cantidad de impactos de rayo por año y por km², siendo este el nivel isoseraunico. Para determinar la actividad atmosférica de forma regionalizada, se determina la densidad de rayos que incide en una zona geográfica.

Cuando incide un rayo en la tierra, su corriente genera una sobretensión de tipo impulso, que se propaga en un radio de varios km y su dispersión en la tierra eleva su potencial, generando fuertes sobretensiones por inducción en los cables subterráneos de un sistema eléctrico, aumentando la tensión en los sistemas de tierra, acometidas subterráneas, etc.

Figura 55. Niveles isoceraunicos de Guatemala



Fuente: *Niveles isoceraunicos de Guatemala.*

http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Climatologico/des-electr.jpg. Consulta: 12 de diciembre de 2016.

3.1.3. Tensión y conexión

Es importante determinar el nivel de tensión y el grupo de conexión de la instalación eléctrica en cada uno de sus circuitos y cargas, así mismo si la instalación es monofásica o trifásica. Verificando el nivel de tensión es fundamental determinar si la conexión es estrellada o delta. Cada supresor de sobretensiones transitorias cuenta con diferentes tipos de configuración del circuito de varistores, ya que dependiendo de los parámetros de la instalación eléctrica o carga, así será la configuración de los modos de protección, características del varistor y de los puntos de conexión del supresor.

3.1.4. Clamping

El supresor de sobretensiones transitorias desvía a tierra una tensión remanente de la sobretensión transitoria, la cual se denomina *clamping* o residual. Cuando el supresor está derivado o disipando la intensidad generada por una sobretensión, en sus extremos aparece una tensión debida a su propia impedancia, y este residual se deriva a tierra o es absorbido por la misma carga que protege.

Hay diferentes niveles de voltajes remanentes o residuales, bajo condiciones normales de utilización, que el supresor deja pasar a la instalación eléctrica. Mientras más bajo sea el voltaje remanente que deja pasar el supresor, será mejor para la instalación a proteger.

El voltaje remanente será proporcional a la sobretensión transitoria, mientras más grande la magnitud, más alto será el valor del voltaje remanente o *clamping*. Es importante determinar que la carga a proteger soporte los valores

de voltaje remanente del supresor, o bien diseñar una coordinación de protección con dos o más supresores de sobretensiones transitorias.

3.1.5. Corriente de corto circuito de la instalación eléctrica

Para el dimensionamiento de la capacidad de descarga del supresor de sobretensiones transitorias se debe determinar la capacidad interruptiva de las protecciones térmicas de los circuitos y cargas especiales a proteger, esto se hace con el fin de coordinar la protección entre el supresor y la protección magnetotérmica. Por ejemplo: para la protección de interruptores principales, se debe dimensionar de la siguiente forma:

Tabla V. **Capacidad de descarga del supresor según la capacidad del interruptor termomagnético**

Capacidad del interruptor	Capacidad de descarga del DPS
≤ 250 A	40 KA
≤ 600 A	60 KA
≤ 800 A	80 KA
$\leq 1\ 200$ A	120 KA
$\leq 1\ 800$ A	180 KA
$\leq 2\ 400$ A	240 KA
$\leq 3\ 000$ A	300 KA
$\leq 3\ 600$ A	360 KA
$\leq 4\ 800$ A	480 KA

Fuente: Sinetamer. *Capacitación sobre dimensionamiento de supresores*, 21 de junio de 2014.

Si en la zona geográfica el nivel de rayos es alto, se debe subir un nivel más a la capacidad de descarga del supresor y, en el caso de una subestación

eléctrica, se debe subir un nivel o dos niveles. Para la protección de motores o variadores de velocidad se debe tomar en cuenta los HP de potencia de la máquina y se dimensiona de la siguiente manera:

Tabla VI. **Capacidad de descarga del supresor según la potencia del motor a proteger**

HP del V/F o Motor	Capacidad de descarga de DPS
≤ 40 HP	40 KA
≤ 100 HP	120 KA
≤ 600 HP	180 KA
>600 HP	240 KA o más

Fuente: Sinetamer. *Capacitación sobre dimensionamiento de supresores*, 21 de junio de 2014.

Características generales del supresor de sobretensión transitoria

Existen varias características generales que deben cumplir los supresores de sobretensión transitoria, para la selección y especificación de la misma. Entre estas se pueden mencionar:

- Tiempo de respuesta inferior a 15 ns.
- La energía en Joules asociada con la forma de onda y el valor pico de la onda.
- Los modos de protección dependiendo del tipo de configuración de conexión del sistema.

- Modularidad en todos los modos de protección para la clase C.
- Listado UL 1449, tercera edición, que avala el cumplimiento de la norma ANSI/IEEE C62.41-1991.
- Corriente máxima de descarga: valor de la corriente en kA que puede pasar por el supresor al menos una vez.
- Corriente nominal de descarga: corriente de descarga en kA que el supresor debe soportar como mínimo en 20 impactos, sin deteriorarse.

Los supresores limitan o filtran la potencia inducida por las ondas de tensión a través de un sistema de varistores, que absorben los impulsos de energía de la sobretensión. Los varistores son elementos de resistencia variable o de comportamiento no lineal, por lo cual los supresores se comportan como un corto circuito, ante una sobretensión de gran magnitud, haciendo generalmente que supere su valor de tensión ajustado el umbral de disparo, disipando esa energía en forma de calor y a tierra y evitando que pase por los equipos sensibles. Después de varios impactos la varistancia envejece y debe reemplazarse, para lo cual las especificaciones de tensión de los MOV's resultan bastante importantes

3.2. Método de protección en cascada con supresores, bajo la norma IEEE 1100-1999

En la clasificación de los supresores se determinó que existen tres categorías: A, B y C, según la ubicación y la capacidad del circuito que se protegerá. También se determinó una característica importante y significativa del supresor cuando está disipando la energía de una sobretensión transitoria.

El voltaje remanente o residual que el supresor de sobretensiones transitorias deja pasar a la carga o circuito a proteger es proporcional a la capacidad de descarga del supresor. Mientras más grande sea la capacidad de descarga, como los supresores que se encuentran en la categoría C, el voltaje remanente será mayor.

Es importante tomar en cuenta estos datos para el diseño de un sistema de protección contra sobretensiones transitorias, ya que por el voltaje remanente o residual que el supresor deja pasar, debido a su propia impedancia, no es suficiente la instalación de un solo supresor, como mínimo deben instalarse dos supresores antes de la carga o circuito a proteger. Este sistema tiene el nombre de protección en cascada.

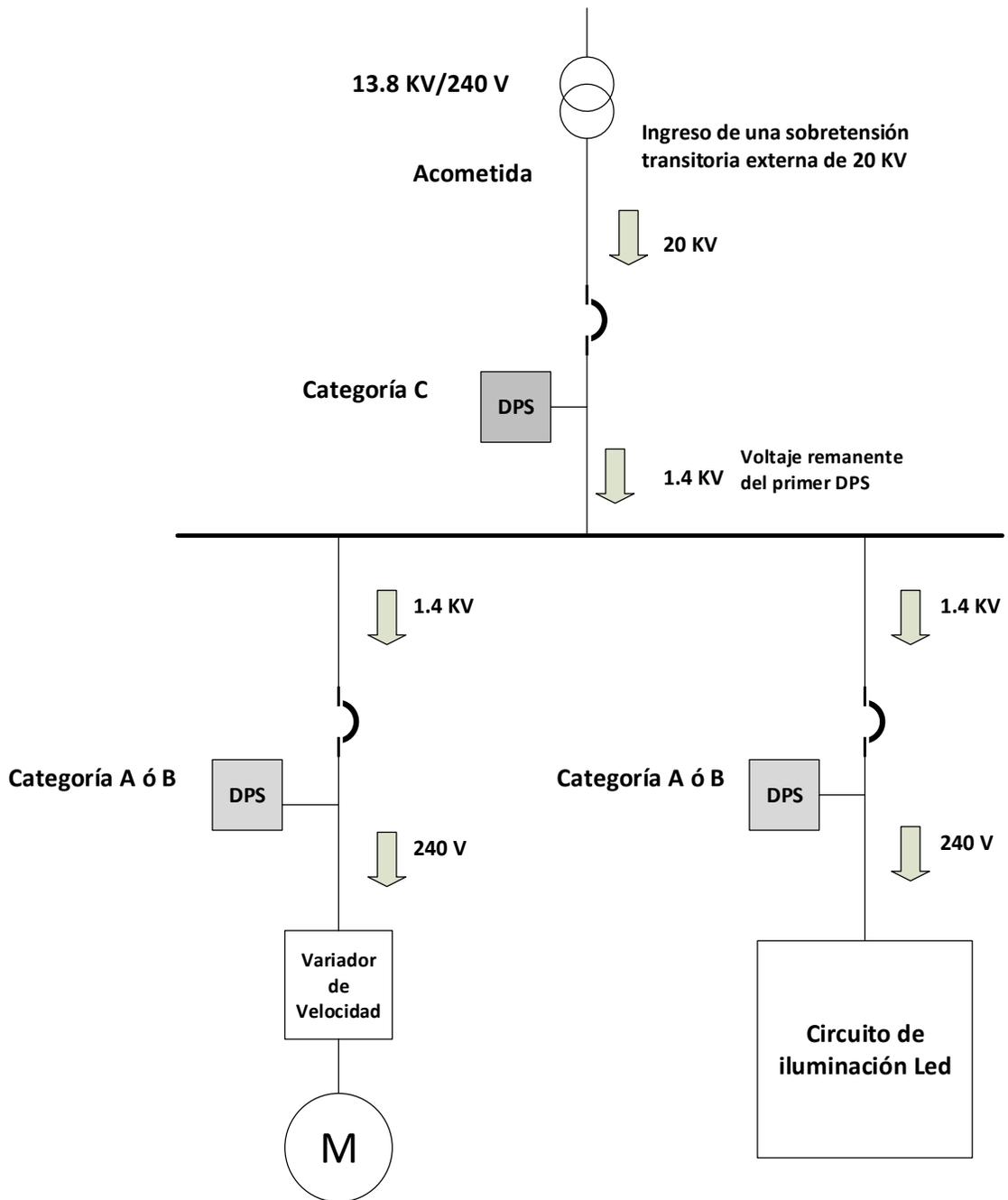
La protección en cascada consiste en la instalación de dos o más supresores de distinta categoría o capacidad de descarga, de tal forma que el voltaje remanente del primer supresor sea disipado por el segundo supresor y el voltaje remanente del segundo supresor sea disipado por un tercer supresor, y así sucesivamente, con el objetivo de que la carga o circuito especial a proteger solamente perciba un voltaje que sí pueda soportar.

También es importante la instalación de dos o más supresores de sobretensiones transitorias en distintas categorías o niveles, debido a que las sobretensiones transitorias tienen muchos puntos de origen y causas, ya sean externas o internas. Por ejemplo, si se origina una sobretensión transitoria ocasionada por el arranque de un motor alimentado por la misma barra que alimenta otros circuitos y estos son sensibles, la protección instalada en la acometida no percibirá esa sobretensión, quedando esa barra desprotegida. Lo ideal es instalar un supresor en la acometida y otro en la barra del tablero que alimenta el motor y las cargas sensibles, de esta forma se tiene una protección

de sobretensiones generadas por agentes externos de la instalación con un supresor de mayor capacidad, y se tiene protección interna con un supresor de menor capacidad.

Es importante que en el diseño de protección de una planta industrial se clasifiquen y se ubiquen las tres categorías, desde la acometida principal hasta la carga más sensible de la instalación. Con esto se puede garantizar una completa protección, sin dejar áreas vulnerables a las fuentes internas y externas de las sobretensiones transitorias, disipando lo más que se pueda la energía de las sobretensiones transitorias y los voltajes remanentes de los mismos equipos de protección. Se debe tomar en cuenta esta coordinación de protección, ya que si bien el voltaje remanente tal vez no dañe los equipos de forma instantánea, el voltaje remanente sí genera un desgaste o envejecimiento en los elementos que componen los equipos eléctricos y electrónicos.

Figura 56. **Coordinación de protección en cascada, con supresores de sobretensiones transitorias**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Diseño de protección contra sobretensiones transitorias de la planta industrial evaluada

Con los datos técnicos y generales adquiridos en el levantamiento eléctrico de la instalación eléctrica de la planta industrial de textiles, y con los diagramas unifilares realizados de la misma, se evalúa y analiza la información histórica adquirida que se utiliza para determinar los circuitos y las cargas críticas o especiales que se deben proteger, debido a la vulnerabilidad que se tiene de ser afectados por una sobretensión transitoria.

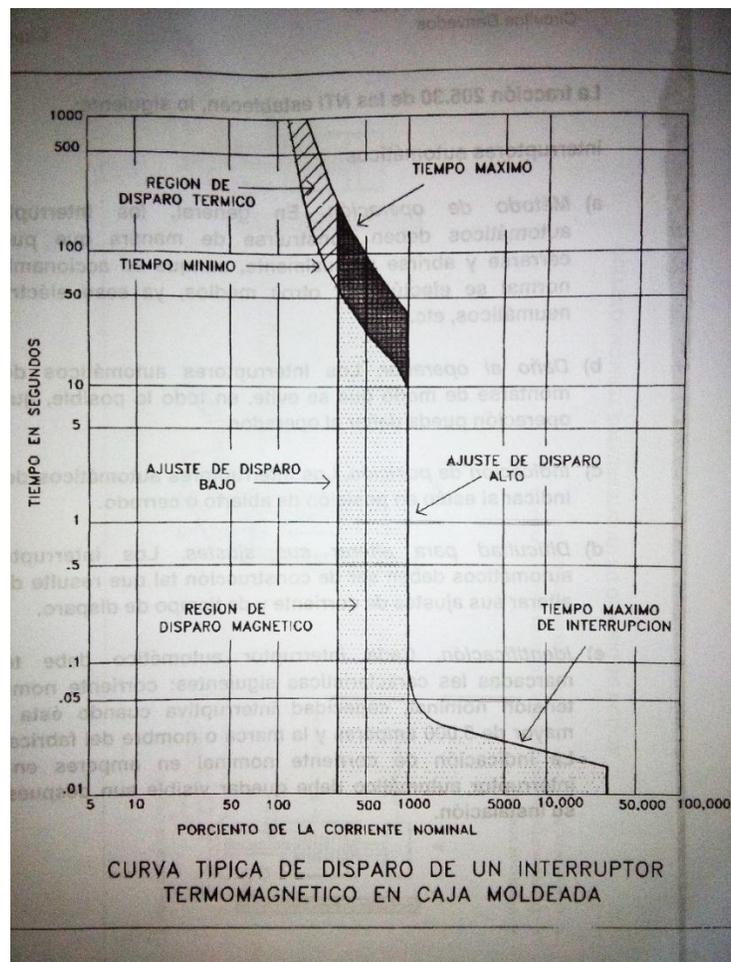
Los supresores de sobretensiones transitorias son seleccionados con base en las características de la carga y de su alimentación eléctrica. Con estos datos se determina la categoría del supresor, sus características y capacidades de descarga, para cada punto de la instalación, y siempre aplicando el método de protección en cascada por el voltaje remanente y otras posibles fuentes de sobretensiones transitorias que se encuentren en el mismo nodo de conexión de la carga o circuito a proteger.

3.3.1. Coordinación de protección

En un sistema eléctrico existen elementos que están permanentemente conectados a la instalación, como es el caso de los fusibles y los interruptores, sin estos dispositivos la instalación eléctrica estrictamente no podría operar, ya que son parte integral de los sistemas eléctricos. En las instalaciones eléctricas se pueden presentar corrientes mayores a los valores nominales o máximos de operación de los conductores y equipos, las sobrecorrientes se pueden presentar por distintas causas, tales como las sobretensiones transitorias, sobrecarga en los circuitos y fallas de cortos circuitos. Para proteger a los equipos y los elementos de la instalación eléctrica se usan dispositivos de

protección que detectan y operan en un determinado tiempo, tal es el caso de los supresores de sobretensión transitoria, fusibles e interruptores termomagnéticos, los cuales son usados en instalaciones residenciales, industriales o comerciales.

Figura 57. **Curva típica de disparo de un interruptor termomagnético**



Fuente: ENRÍQUEZ HARPER. *Guía práctica para el cálculo de instalaciones eléctricas.*

Consulta: 2017.

La protección contra sobrecorriente, originada por fallas de corto circuitos de fase a tierra o entre fases, está destinada para la prevención de daños a conductores y aislamientos, por la excesiva corriente que pueda circular debido a la falla. En la instalación eléctrica evaluada, con base en los datos y características tomados en el levantamiento eléctrico, se realiza una coordinación de protección en la que se coordinan elementos de protección como supresores, interruptores termomagnéticos y fusibles.

- Cálculo de la protección primaria del banco trifásico de transformación de 300 kVA

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} = \frac{300 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 13.8 \text{ kV}} = 12.55 \text{ A}$$

$$12.55 \text{ A} \times 2.5 = 31.37 \text{ A}$$

Para el banco de transformadores se recomiendan fusibles de 30 A tipo K (rápido), por fase.

- Cálculo de los interruptores termomagnéticos

Tabla VII. Descripción de las cargas instaladas

Unidades	Descripción	Fases	Voltaje (V)	Potencia (VA)
27	Maquina textil	3	380	7,500
54	Lámpara Neón	1	220	400
1	Bomba de 3HP	3	380	2,238
40	Lámpara fluorescente	1	220	40
5	Toma corriente doble	1	220	350
6	Grupo de capacitores	3	380	25,000

Fuente: elaboración propia.

La suma de las cargas da un total de 229,688 VA.

- Cálculo de la capacidad del interruptor principal

$$I_{\text{Nom}} = \frac{\text{Carga (VA)}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{229,688}{\sqrt{3} \times 380} = 348,97 \text{ A}$$

$$I_{\text{Int}} = 348.97 \times 1.25 = 436,21 \text{ A}$$

Capacidad del interruptor principal = 3 x 500 A, $I_{CU}/I_{CS} = 25/13$ (kA).

- Cálculo del interruptor para el circuito de 11 máquinas textiles

$$I_{\text{Nom}} = \frac{\text{Carga (VA)}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{91,300}{\sqrt{3} \times 380} = 138.71 \text{ A}$$

$$I_{\text{Int}} = 138.71 \times 1.25 = 173.39 \text{ A}$$

Capacidad del interruptor = 3 x 175 A, $I_{CU}/I_{CS} = 25/13$ (kA)

- Cálculo del interruptor para el circuito de 6 máquinas textiles

$$I_{Nom} = \frac{\text{Carga (VA)}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{49,800}{\sqrt{3} \times 380} = 75.66 \text{ A}$$

$$I_{Int} = 75.66 \times 1.25 = 94.57 \text{ A}$$

Capacidad del interruptor = 3 x 100 A, $I_{CU}/I_{CS} = 18/9$ (kA)

- Cálculo de la capacidad del interruptor para el circuito de iluminación

$$I_{Nom} = \frac{\text{Carga (VA)}}{V} = \frac{1600}{220} = 7.27 \text{ A}$$

$$I_{Int} = 7.27 \times 1.25 = 9.09 \text{ A}$$

Capacidad del interruptor = 15 A, $I_{CU}/I_{CS} = 10/10$ (kA)

- Cálculo del interruptor de la bomba para petróleo

3 HP, 380 V, 3 fases.

Potencia nominal aparente del motor:

$$S = \frac{\text{HP} \times 746}{\eta \times \text{f.p.}} = \frac{3 \times 746}{0.83 \times 0.86} = 3,135.33 \text{ VA}$$

Los valores de la eficiencia y el factor de potencia se obtienen de la placa de datos del motor.

Para calcular la corriente del interruptor se debe tomar un factor de 2, ya que es el utilizado en motores de 0 -10 HP

$$I_{NOM} = \frac{HP \times 746}{\sqrt{3} \times V \times \eta \times f.p.} = \frac{3 \times 746}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.83 \times 0.86} = 4.76 \text{ A}$$

$$I_{Int} = 2 \times 4.76 = 9.52 \text{ A}$$

Capacidad del interruptor = 3 x 15 A, $I_{CU}/I_{CS} = 10/10$ (kA)

Para los valores de los interruptores se tomaron referencias de fabricantes de acuerdo al cálculo obtenido. La I_{CU} es la intensidad de corto circuito última en el ensayo de apertura – cierre – apertura, y la I_{CS} es la intensidad de corto circuito en servicio.

- Aislamiento

La función del aislamiento en una instalación eléctrica industrial es evitar que la energía eléctrica tenga contacto con personas, objetos y entre sus mismos elementos, como por ejemplo los ductos y conductores, en los cuales circulan distintas magnitudes de corriente y voltaje. El aislamiento en los conductores es fundamental, ya que estos son los que transportan y distribuyen la energía a cada circuito y equipo de la instalación eléctrica. Un conductor mal aislado puede generar fallas de corto circuito entre fases y fase a tierra, y electrocución al personal que tenga contacto con éste.

Existe una amplia variedad de aislamientos para conductores, que están diseñados para cubrir las necesidades y requerimientos de las distintas aplicaciones que se puedan tener en una instalación eléctrica industrial. Estos

tipos de aislamiento están diseñados sobre una forma estándar y todos los cables están marcados con información sobre su tamaño, ya sea en AWG o KCMIL, su voltaje y su tipo de aislamiento. El aislamiento de los cables se designa por letras, de la siguiente manera:

A = Aislamiento de asbesto

MI = Aislamiento mineral

R = Aislamiento de hule

SA = Aislamiento de silicio-asbesto

T = Aislamiento termoplástico

V = Aislamiento de cambray barnizado

X = Aislamiento de polímero sintético barnizado

Los cables también se designan por su medio de operación, de la siguiente manera:

H = Resistente al calor hasta 75°C

HH = Resistente al calor hasta 90°C

Si no existe designación, significa 60°C

W = Resistente a la humedad

UF = Para uso subterráneo

Los conductores están diseñados y certificados para ser utilizados en condiciones ambientales diferentes, tales conductores son multiuso y están marcados. Por ejemplo, un cable TW indica 60°C, con aislamiento termoplástico capaz de ser usado en ambientes húmedos.

El tipo XHHW representa un cable con aislamiento sintético de polímero trenzado para operar hasta 90°C. Para instalaciones eléctricas, el menor calibre de conductor recomendado es el No. 14 AWG y la máxima protección contra sobrecorriente para los calibres No14, No12 y No. 10 AWG es: 15 A, 20 A y 30 A respectivamente.

La capacidad de conducción de corriente de los cables se basa en una temperatura ambiente de 30°C, por lo que se dan factores de corrección para temperaturas diferentes a 30°C. En la instalación eléctrica industrial evaluada se recomienda el uso de conductores con aislamiento THW con resistencia al calor de 75°C, con aislamiento termoplástico para uso en ambientes húmedos.

Figura 58. Ampacidad de conductores

AMPACIDAD DE CONDUCTORES AISLADOS DE COBRE DE 1 A 3 CONDUCTORES
EN CONDUIT (BASADO EN UNA TEMPERATURA AMBIENTE DE 30 °C)
RANGO DE TEMPERATURA DEL CONDUCTOR (VER TABLA C)

°C	60 °C	75 °C	90 °C	110 °C	125 °C	200 °C	250 °C
	140 °F	167 °F	194 °F	230 °F	257 °F	392 °F	482 °F
T I P O S							
CALIBRE DEL CONDUCTOR AWG MCM	T TW UF	RH RHW RUH THW THWN	TA TBS RHH RHHN	AVA AVL	AIA	A AA	TFE
18			21				
16			22				
14	15	15	25	30	30	30	40
12	20	20	30	35	40	40	55
10	30	30	40	45	50	55	75
8	40	45	50	60	65	75	95
6	55	65	70	80	85	95	120
4	70	85	90	105	115	120	145
3	80	100	105	120	130	145	170
2	95	115	120	135	145	165	195
1	110	130	140	160	170	190	220
1/0	125	150	155	190	200	225	250
2/0	145	175	185	215	230	250	280
3/0	165	200	210	245	265	285	315
4/0	195	230	235	275	310	340	370
250	215	255	270	315	335		
300	240	285	300	345	380		
350	260	310	325	390	420		
400	280	335	360	420	450		
500	320	380	405	470	500		
600	355	420	455	525	545		
700	385	460	490	560	600		
750	400	475	500	580	620		
800	410	490	515	600	640		
900	435	520	555	---	---		
1000	455	545	585	680	730		
1250	495	590	645	---	---		
1500	520	625	700	785	---		
2000	560	665	775	840	---		

1.- PARA TEMPERATURAS MAYORES VER TABLA C DE FACTORES DE CORRECCION.
2.- AMPACIDAD PARA LOS TIPOS DE CONDUCTORES RRH, THHN CALIBRE 14, 12 Y 10 DEBE SER EL MISMO PARA CONDUCTORES DE 75 °C EN ESTA TABLA.

Fuente: ENRÍQUEZ HARPER. *Guía práctica para el cálculo de instalaciones eléctricas*. P. 73.

Figura 59. Factores de corrección, temperaturas ambientes

FACTORES DE CORRECCION - TEMPERATURAS AMBIENTES ARRIBA DE 30 °C (86 °F)								
°C	°F	60 °C	75 °C	90 °C	110 °C	125 °C	200 °C	250 °C
		140 °F	167 °F	194 °F	230 °F	257 °F	392 °F	482 °F
40	104	0.82	0.88	0.91	0.94	0.95		
45	113	0.71	0.82	0.87	0.90	0.92		
50	122	0.58	0.75	0.82	0.87	0.89		
55	131	0.41	0.67	0.76	0.83	0.86		
60	140	--	0.58	0.71	0.79	0.83	0.91	0.95
70	158	--	0.35	0.58	0.71	0.76	0.87	0.91
75	167	--	--	0.50	0.66	0.72	0.86	0.89
80	176	--	--	0.41	0.71	0.69	0.84	0.87
90	194	--	--	--	0.50	0.61	0.80	0.83
100	212	--	--	--	--	0.51	0.77	0.80
120	248	--	--	--	--	--	0.69	0.72
140	284	--	--	--	--	--	0.59	0.59
160	320	--	--	--	--	--	--	0.54
180	356	--	--	--	--	--	--	0.50
200	392	--	--	--	--	--	--	0.43
225	437	--	--	--	--	--	--	0.30

Fuente: ENRÍQUEZ HARPER. *Guía práctica para el cálculo de instalaciones eléctricas*. P. 74.

- Consideraciones para las corrientes de corto circuito en los conductores

Las corrientes de corto circuito tienen un efecto de deterioro en los conductores aislados y en cualquier componente eléctrico de la instalación. En la operación normal de una instalación eléctrica, la corriente que fluye en los conductores está limitada por la impedancia del sistema, así como la impedancia de la propia carga. Las pérdidas eléctricas que se transforman en calor están dadas por RI^2 . En el diseño es importante reducir al mínimo estas pérdidas y también la caída de voltaje en los conductores, por lo tanto la impedancia de los conductores es pequeña comparada con la impedancia total del sistema.

Durante las condiciones de corto circuito la corriente puede alcanzar un valor de varias veces el valor de la corriente de carga. La corriente de corto circuito genera efectos térmicos severos en los aislamientos de los conductores.

Para la protección de los conductores y los componentes eléctricos del sistema, se emplean dispositivos de protección contra sobrecorrientes, como por ejemplo: los interruptores, fusibles y supresores. Estos dispositivos reducen el tiempo de la falla de corto circuito a unos cuatro ciclos de la frecuencia, y si la frecuencia es de 60 Hz y el dispositivo de sobrecorriente opera en 6 ciclos, el tiempo de falla es de $6/60 = 0.1$ seg.

Las corrientes de corto circuito en áreas comerciales e industriales son asimétricas, especialmente en los primeros ciclos. Este factor debe ser considerado por medio del factor de asimetría para la corriente de corto circuito, se han desarrollado algunas técnicas para determinar la capacidad de soporte de corto circuito de los cables aislados. Estas técnicas se basan en las limitaciones térmicas de aislamiento, el tiempo de duración de la corriente y las

características del material de conductor, ya sea cobre o aluminio. En las siguientes ecuaciones se dan las relaciones entre el valor máximo de corriente asimétrica de corto circuito y la temperatura máxima de corto circuito de los conductores de cobre y aluminio.

Para conductores de cobre:

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 = 0.0297 \log\left(\frac{234+T_2}{234+T_1}\right)$$

Para conductores de aluminio:

$$\left(\frac{I}{A}\right)^2 = 0.0125 \log\left(\frac{228+T_2}{228+T_1}\right)$$

Donde:

I = Máxima corriente de corto circuito asimétrica permisible

A = Sección transversal del conductor en Circular Mils (cm)

t = Tiempo de duración de la corriente de corto circuito

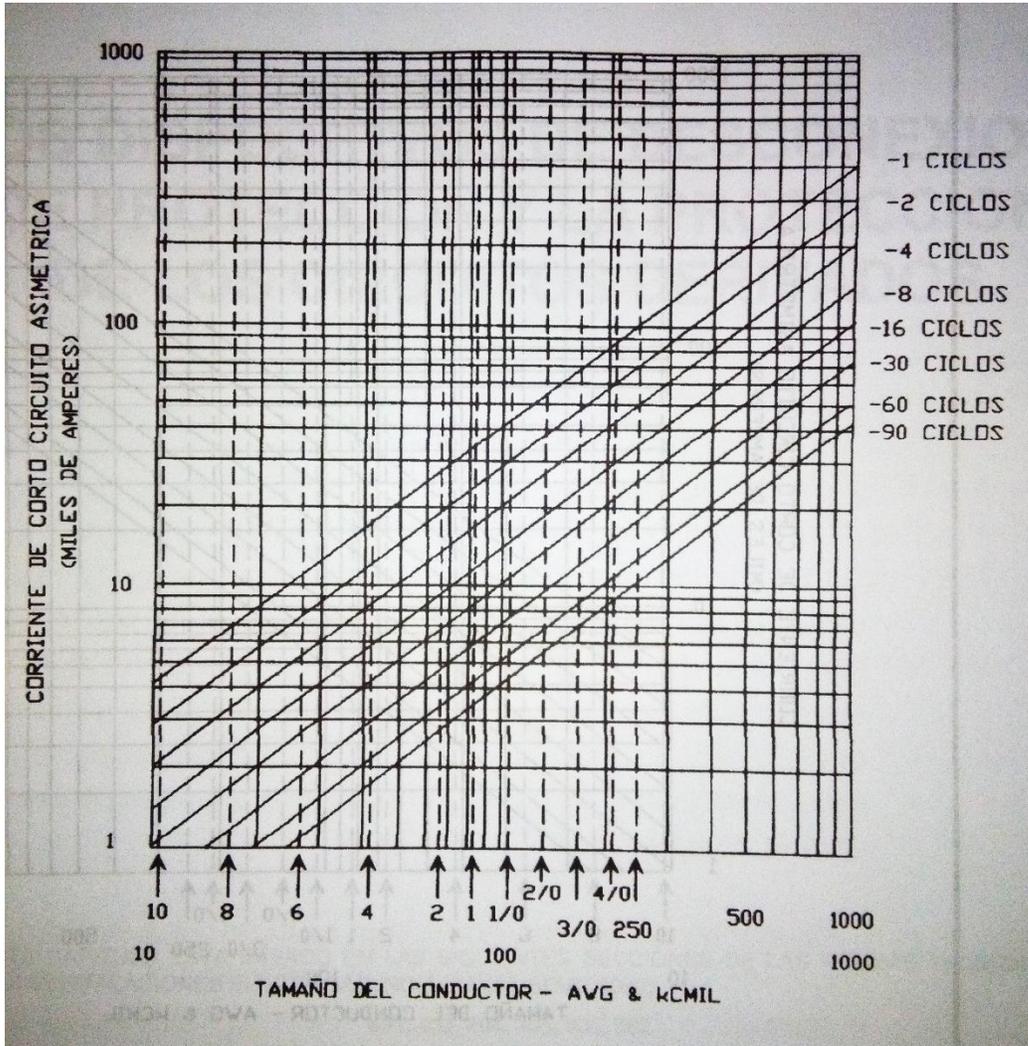
T1 = Máxima temperatura normal

T2 = Máxima temperatura permisible del conductor bajo corto circuito

Para sistemas que operan con niveles de tensión menores a 1000 V se puede disponer de interruptores que operen alrededor de 2 ciclos (1/30 seg) y fusibles limitadores de corriente que operen en menos de 1 ciclo.

En la siguiente gráfica se muestran las curvas de máxima corriente de corto circuito permitidas para conductores THW, los cuales fueron recomendados para la instalación eléctrica industrial evaluada.

Figura 60. **Máxima corriente de corto circuito**



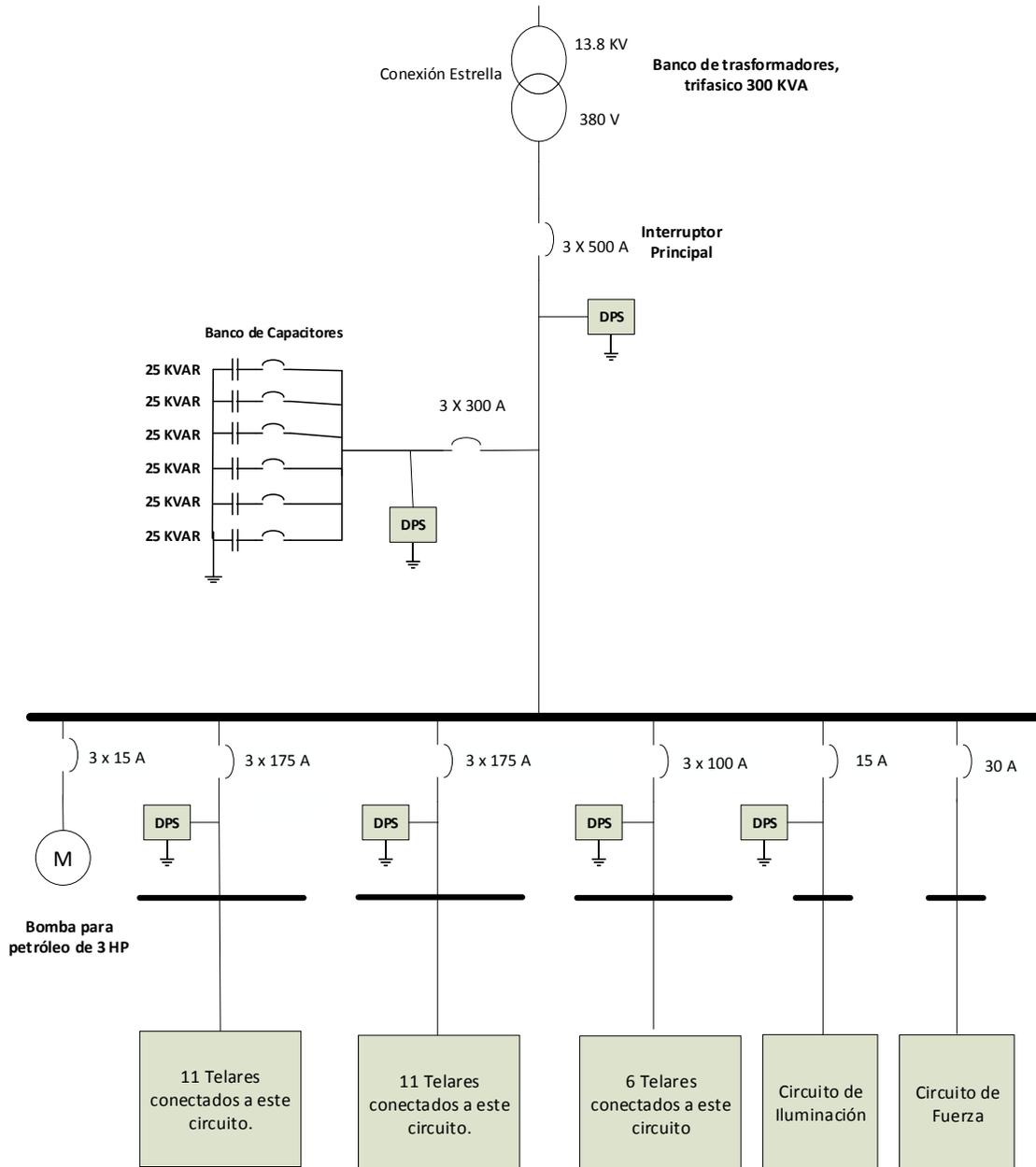
Fuente: ENRÍQUEZ HARPER. *Guía práctica para el cálculo de instalaciones eléctricas*. P. 118.

3.3.2. Diagrama unifilar con supresores de sobretensiones transitorias para la protección de la instalación eléctrica

En el levantamiento eléctrico se realiza un diagrama unifilar de la instalación eléctrica, el cual es importante para determinar la ubicación de los

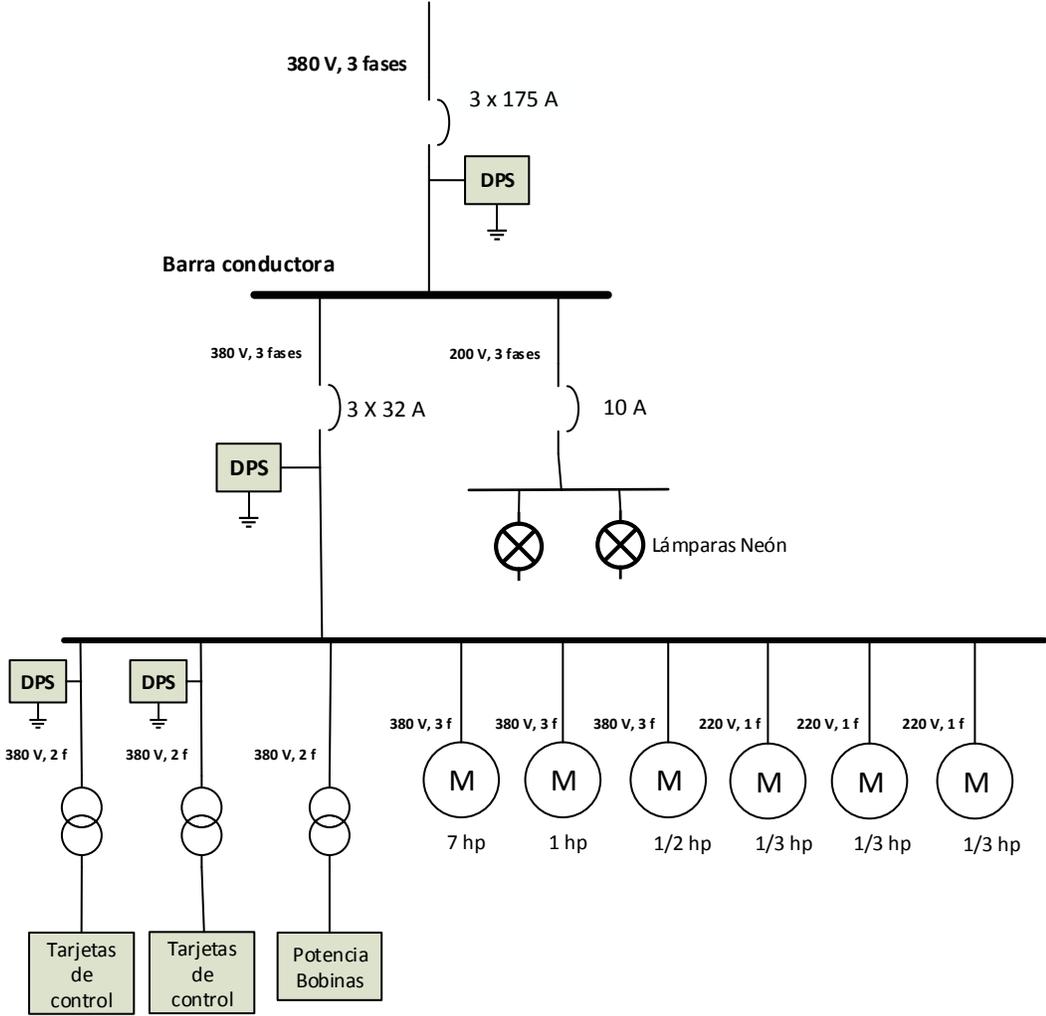
supresores de sobretensión transitoria, también ofrece una mejor visualización de la instalación eléctrica para realizar una buena coordinación de protección en cascada. En los diagramas unifilares se coloca el supresor de sobretensión transitoria, para que se tenga registro de dónde se debe o se tiene instalado un dispositivo de protección de este tipo.

Figura 61. **Diagrama unifilar de la acometida y tableros de distribución con protección**



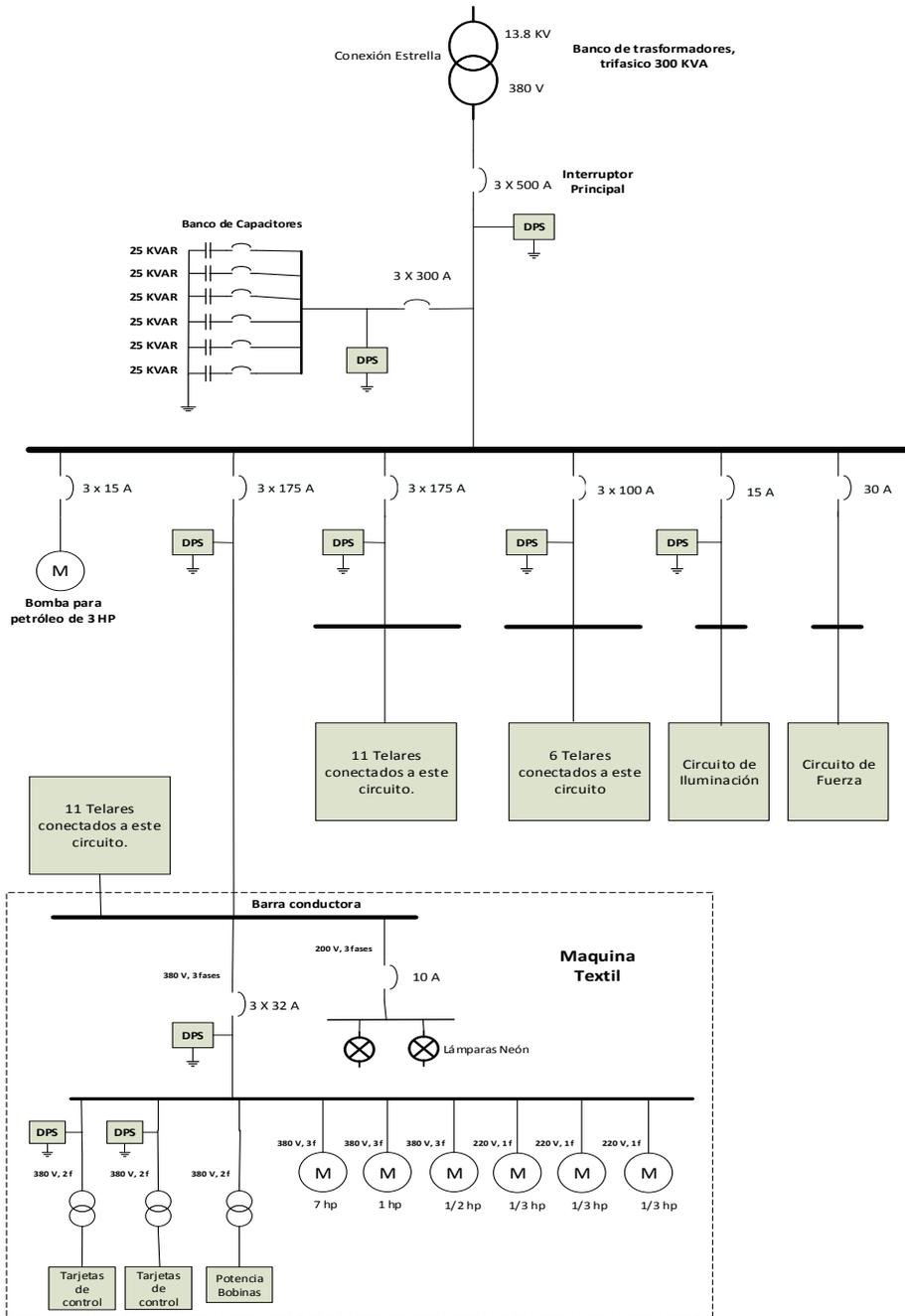
Fuente: elaboración propia.

Figura 62. Diagrama unifilar de una máquina textil con protección



Fuente: elaboración propia.

Figura 63. Diagrama unifilar de tableros y máquinas textiles con protección



Fuente: elaboración propia.

3.4. Características, categoría y capacidad de descarga de los supresores de sobretensiones transitorias del sistema de protección de la planta industrial

Para cada punto seleccionado de la instalación eléctrica de la planta industrial, en donde se debe instalar un dispositivo de protección, existe un supresor de sobretensiones transitorias diseñado con características especiales para operar de la forma más eficiente, disipando la mayor cantidad de energía de una sobretensión transitoria y dejando pasar el voltaje remanente con magnitudes relativamente pequeñas, para que pueda ser eliminado por completo por el supresor de sobretensión de respaldo. A continuación se presentan las características de los supresores de sobretensiones transitorias a utilizar en cada elemento del sistema estudiado:

- Para el interruptor termo magnético principal:
 - Tensión: 380 V/ 220 V
 - Fases: 3 fases, neutro y tierra
 - Conexión: estrella
 - Capacidad de descarga: 180 kA por fase y 60 kA por nodo
 - Frecuencia: 60 HZ
 - Modos de protección: L-L, L-N, L-T, N-T
 - Categoría: C, para paneles industriales
 - Certificación: Nema 4, ISO 9001, UL 1449, UL 1282, ANSI/IEEE
 - Seguimiento de onda: no
 - Varistores con fusibles térmicos: sí
 - Elementos sumergidos en resina de disipación: sí
 - Indicadores de operación: tipo luminoso

- Para el banco de capacitores:
 - Tensión: 380 V/ 220 V
 - Fases: 3 fases, neutro y tierra
 - Conexión: estrella
 - Capacidad de descarga: 60 kA por fase y 20 kA por modo
 - Frecuencia: 60 HZ
 - Modos de protección: L-L, L-N, L-T, N-T
 - Categoría: C, para paneles industriales
 - Certificación: Nema 4, ISO 9001, UL 1449, UL 1282, ANSI/IEEE
 - Seguimiento de onda: no
 - Varistores con fusibles térmicos: sí
 - Elementos sumergidos en resina de disipación: sí
 - Indicadores de operación: tipo luminoso

- Para los tableros de distribución para las máquinas textiles:
 - Tensión: 380 V/ 220 V
 - Fases: 3 fases, neutro y tierra
 - Conexión: estrella
 - Capacidad de descarga: 40 kA por fase
 - Frecuencia: 60 HZ
 - Modos de protección: L-L, L-N, L-T, N-T
 - Categoría: B, para tableros de distribución
 - Certificación: Nema 4, ISO 9001, UL 1449, UL 1282, ANSI/IEEE
 - Seguimiento de onda: sí
 - Varistores con fusibles térmicos: sí
 - Elementos sumergidos en resina de disipación: sí
 - Indicadores de operación: tipo luminoso

- Para el circuito de iluminación:
 - Tensión: 220 V
 - Fases: 1 fases, neutro y tierra
 - Capacidad de descarga: 40 kA por fase
 - Frecuencia: 60 HZ
 - Modos de protección: L-N, L-T, N-T
 - Categoría: B, para tableros de distribución
 - Certificación: Nema 4, ISO 9001, UL 1449, UL 1282, ANSI/IEEE
 - Seguimiento de onda: no
 - Varistores con fusibles térmicos: sí
 - Elementos sumergidos en resina de disipación: sí
 - Indicadores de operación: tipo luminoso

- Para el interruptor termomagnético de cada máquina textil:
 - Tensión: 3080 V/220 V
 - Fases: 3 fases, neutro y tierra
 - Conexión: estrella
 - Capacidad de descarga: 40 kA por fase
 - Frecuencia: 60 HZ
 - Modos de protección: L-L,L-N, L-T, N-T
 - Categoría: B, para cargas críticas
 - Certificación: Nema 4, ISO 9001, UL 1449, UL 1282, ANSI/IEEE
 - Seguimiento de onda: sí
 - Varistores con fusibles térmicos: sí
 - Elementos sumergidos en resina de disipación: sí
 - Indicadores de operación: tipo luminoso

- Para los transformadores de la alimentación de las tarjetas de control:
 - Tensión: 380 V
 - Fases: 2 fases, neutro y tierra
 - Capacidad de descarga: 40 kA por fase
 - Frecuencia: 60 HZ
 - Modos de protección: L-L, L-N, L-T, N-T
 - Categoría: A, para cargas especiales de bajo voltaje
 - Certificación: Nema 4, ISO 9001, UL 1449, UL 1282, ANSI/IEEE
 - Seguimiento de onda: sí
 - Varistores con fusibles térmicos: sí
 - Elementos sumergidos en resina de disipación: sí
 - Indicadores de operación: tipo luminoso

3.5. Instalación de supresores de sobretensiones transitorias

La instalación de los supresores de sobretensiones transitorias, en una instalación eléctrica industrial, no tiene un nivel alto de complejidad, ya que estos dispositivos van conectados en paralelo a los circuitos o cargas especiales, y en algunos casos se conectan en serie, generalmente los de categoría A, en donde sus cargas manejan pequeñas corrientes.

Es importante que exista una protección magnetotérmica aguas abajo del supresor de sobretensiones transitorias, para que exista una coordinación de protección entre el supresor y el interruptor magnetotérmico, de tal forma que esta pueda manejar el voltaje remanente del supresor instalado. El supresor se puede conectar en distintos lugares y equipos de la instalación eléctrica, por ejemplo en tomacorrientes, en entrada o salida de fuentes de voltaje, en interruptores magnetotérmicos, variadores de velocidad o servoamplificadores.

Cuando el supresor se conecta en una acometida o tablero de distribución, el supresor se debe conectar después o en la salida del interruptor magnetotérmico, conectándolo lo más cerca posible al punto de conexión, no más de 9 pulgadas, con el fin de disminuir la impedancia de los conductores y así ofrecer menor resistencia a las sobretensiones transitorias y disminuir el voltaje remanente.

Los supresores se pueden conectar en el interior de las instalaciones de la planta industrial y también se pueden conectar a la intemperie, ya que los fabricantes diseñan el dispositivo para que puedan soportar las condiciones climáticas que se presentan, como la humedad, el viento, el agua, contaminación ambiental, etc.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Todas las acciones con probabilidad de prevenir paros en la producción deben ser analizadas, no solo desde el punto de vista de inversión a corto plazo, sino de funcionalidad a largo plazo. Los resultados del estudio realizado se presentan en este último capítulo, enfatizando en las acciones tomadas y el impacto en la industria.

4.1. Equipos eléctricos y electrónicos afectados

Los procesos de manufactura, logística, informática, seguridad, control de calidad, etc., de las plantas industriales, cuentan con equipos de potencia y equipos electrónicos capaces de realizar cualquier trabajo o proceso automáticamente, lo que se conoce como automatización industrial.

Con las visitas realizadas a plantas industriales de textiles, plásticos, serigrafía y aceros, entre otros, se pudo determinar que los motores eléctricos son fundamentales en cualquier proceso, ya que pueden realizar movimientos giratorios o lineales por medio de dispositivos mecánicos. Para que los motores realicen este tipo de movimientos de forma precisa, tienen que estar gobernados por un PLC, tarjetas electrónicas, servoamplificadores o variadores de velocidad, los cuales están programados de tal forma que cumplan con las condiciones requeridas.

Los sistemas de control y mando necesitan de sensores para tener una retroalimentación del estado del proceso, los sensores pueden ser capacitivos, inductivos, térmicos y de movimiento, estos envían señales al control para que

este le ordene a los actuadores que realicen una acción, de tal forma que los parámetros deseados se cumplan.

Para que el proceso industrial automatizado funcione necesita energía eléctrica con estándares de calidad alta, es decir, con la menor cantidad de perturbaciones eléctricas posibles, como los armónicos, *flickers*, desbalances de voltaje y las sobretensiones transitorias, siendo estas las más importantes, ya que son las que más daños causan en los sistemas eléctricos y electrónicos.

Algunos de los equipos eléctricos de potencia afectados por las sobretensiones transitorias son:

- Devanados de transformadores
- Devanados de motores
- Aislamiento de conductores
- Luminarias

Entre los equipos electrónicos que pueden verse afectados por las sobretensiones transitorias están:

- PLC
- Variadores de velocidad
- Tarjetas electrónicas
- Servoamplificadores
- Fuentes de voltaje DC
- Circuitos integrados
- Balastos electrónicos
- Iluminación led
- Sensores

- Ordenadores
- UPS

Se puede determinar que la electrónica es la más vulnerable a las sobretensiones transitorias, esto se debe a que trabaja con pequeñas magnitudes de voltajes y corrientes, en el rango de 0 a 5 voltios y milésimas de amperios, ya sea en las entradas o salidas de los dispositivos de control. Quiere decir que una variación de voltaje muy alta es significativamente perjudicial para su funcionamiento y programación, ya que se pueden tener señales falsas, desprogramación de los circuitos y daños permanentes en la electrónica.

4.2. Consecuencias de las sobretensiones transitorias en plantas industriales

La mayoría de plantas industriales tiene horarios de producción de 24 horas, debido a la demanda de sus productos y al aprovechamiento de las maquinarias autónomas, en las cuales solamente es necesario un operador.

Con la automatización de los procesos industriales es posible producir en un tiempo corto grandes cantidades de productos, convirtiendo más rápido su materia prima en el producto final y ofreciendo al mercado tiempos de entrega menores. Con el avance de la informática se logra tener una mejor logística de inventarios, registro y ventas, por mencionar algunas ventajas. Teniendo estos datos, se puede identificar que el insumo más importante de una planta industrial es la energía eléctrica, ya que todos los dispositivos de control y máquinas, en su mayoría, funcionan con electricidad y basta con un corte del servicio o perturbación en el sistema para que ocasione problemas en la productividad de la planta.

La sobretensión transitoria trae como consecuencia que el sistema eléctrico y electrónico de la instalación eléctrica de la planta industrial deje de operar con normalidad, ya que ocasiona pérdidas de equipos, degradación o envejecimiento prematuro de los elementos eléctricos y electrónicos, desprogramación de computadoras, PLC, memorias, circuitos integrados, software, etc.

La pérdida o falla de estos equipos, ocasionada por una sobretensión transitoria, puede llegar a causar paradas no programadas de la línea de producción y la pérdida de equipos y materia prima, así como las consecuencias comerciales por la entrega de producto impuntuales.

4.3. Costo de reposición y reparación por los equipos afectados por el evento eléctrico

Cuando una sobretensión transitoria llega a dañar o desprogramar un equipo, genera gastos a la planta industrial. Con el fin de parar la menor cantidad posible de producción, algunas empresas cuentan con un *stock* de repuestos, los cuales históricamente son los más vulnerables a fallar y también cuentan con personal técnico y de ingeniería capacitados en el tema.

Contar con un *stock* de repuestos y personal técnico capacitado eleva los costos de operación mensuales de la empresa, pero se tiene la disponibilidad de resolver el problema en un menor tiempo, para disminuir los tiempos muertos o de improductividad de la planta industrial. En otros casos, la empresa no cuenta con *stock* de repuestos ni personal capacitado para resolver problemas causados por las sobretensiones transitorias, por lo que los tiempos de las paradas no programadas llegan a alcanzar semanas de improductividad, ya que por lo general los repuestos no están disponibles en el país, deben

importarse, y también se debe contratar el personal capacitado para la reparación o la instalación del equipo.

Visitando varias plantas industriales los jefes de mantenimiento indican que las tarjetas electrónicas son las que más fallan, debido a las sobretensiones transitorias, y la reposición, programación e instalación de una tarjeta electrónica oscila entre 2 000 a 3 000 dólares. Pero el costo o pérdida más grande que sufre una planta industrial, por este evento eléctrico, es el lucro cesante o la productividad que no se logra recuperar por un tiempo indefinido de la planta industrial parada, que en algunas empresas está en el rango de miles de dólares por hora.

4.4. Medidas tomadas para disipar la perturbación eléctrica ocasionada por las sobretensiones transitorias

Para disipar la energía de las sobretensiones transitorias y reducir sus efectos de tal forma que no sea perjudicial para los equipos eléctricos y electrónicos, reduciendo la cantidad de perturbaciones generadas internamente por las conmutaciones de cargas inductivas, capacitivas y resistivas, como por ejemplo motores, banco de capacitores, grupos de luminarias de gran potencia, contactores de máquinas, soldadoras de arco eléctrico, compresores y muchos más, se deben tomar las siguientes medidas:

- Evaluación o levantamiento eléctrico de la instalación industrial, con el fin de ubicar las fuentes generadoras internas y externas de sobretensiones transitorias y los equipos o circuitos críticos o especiales.
- Reubicación o adecuación de tableros principales, de distribución y de cargas críticas o especiales, de tal forma que queden separadas por

circuito las fuentes generadoras de sobretensiones transitorias, de las cargas sensibles a la perturbación eléctrica.

- Diseño de un sistema de protección en cascada bajo la norma IEEE 1100-1999 y la selección de supresores de sobretensiones transitorias según la norma ANSI/IEEE C62.41-1991.
- Instalación de supresores de sobretensiones transitorias, según el diseño de protección.
- Eliminar o mejorar las partes de la instalación eléctrica que contribuyan a la eliminación de las sobretensiones transitorias internas y externas como la instalación de pararrayos, mejora de la resistividad del sistema de puesta a tierra y equipos electrónicos para el arranque de motores, entre otros

También es responsabilidad de las empresas de transporte y distribución de la energía eléctrica, entregar a sus usuarios energía eléctrica con altos estándares de calidad, ya que la mayoría de sobretensiones transitorias externas se pueden eliminar antes de que pasen por el transformador de distribución o los bancos trifásicos de transformación. Para mejorar los estándares de calidad de la energía, las redes de distribución deben contar con dispositivos de protección como apartarrayos, sistemas de puesta a tierra de sus estructuras en buen estado, hilos de guarda en tramos de las líneas más vulnerables a descargas eléctricas atmosféricas, un buen diseño de las curvas de protección de los fusibles y reconectores para tener una buena coordinación de protección, limpieza y cambio de aisladores, para eliminar el flameo en las líneas, el cual genera perturbación eléctrica; también es útil la realización de poda en lugares críticos para evitar fallas de fase a tierra por el

contacto de las líneas con la vegetación, y reducir el número de maniobras por fallas, las cuales, por la apertura y cierre de circuitos, generan sobretensiones transitorias.

CONCLUSIONES

1. Las sobretensiones transitorias son eventos eléctricos que se presentan eventualmente en instalaciones eléctricas industriales. Es importante conocer este evento eléctrico, para poder actuar y mejorar los factores que puedan ayudar a la reducción de las perturbaciones eléctricas ocasionadas por el evento, empezando desde el diseño de la instalación eléctrica, la readecuación de circuitos eléctricos y la instalación de los equipos de protección en los sistemas de control y potencia que componen el proceso industrial y operación de la planta.
2. En un proceso industrial se requiere de conmutaciones en los equipos, para parar y arrancar distintos tipos de procesos, de los cuales la mayoría son arranques y paradas de motores. Estos tipos de maniobras ejecutadas por contactores son los máximos generadores de sobretensiones transitorias en una planta industrial, así mismo, de forma externa a la instalación, el rayo o descarga atmosférica es la sobretensión transitoria más dañina y perjudicial para una instalación eléctrica industrial, cuando no cuenta con equipos de protección adecuados para controlar estos eventos.
3. En la actualidad, la mayoría de procesos industriales son automatizados o semiautomatizados. El control de la potencia de motores, soldadoras, iluminación, bombas de agua, válvulas, etc., son controlados por electrónica digital, los cuales manejan valores de voltajes y corrientes bajos, en el rango de los miliamperios en corriente y de 0 a 5 V en voltaje, siendo sensibles a las variaciones bruscas de voltaje y corriente.

Por lo tanto, todo dispositivo que cuente con electrónica es vulnerable a este evento eléctrico, así mismo al aislamiento de los devanados de motores y transformadores, ya que las sobretensiones transitorias superan su nivel de aislamiento, degradando los materiales y provocando fallas entre fases y fase a tierra.

4. Se visitaron plantas industriales de diferentes tipos de producción y potencia instalada, determinando conjuntamente con los coordinadores de mantenimiento, cuáles eran los problemas más comunes ocasionados por las sobretensiones transitorias. Se determinaron los siguientes: pérdida de tarjetas electrónicas, desprogramación de PLC's y variadores de frecuencia, pérdida de datos en oficinas, pérdida de luminarias, en especial las luminarias tipo LED y luminarias de balastro electrónico. El 90 % de las instalaciones eléctricas industriales no cuenta con sistemas de protección contra sobretensiones transitorias, pues se trata de un sistema que no se incluye en los proyectos de electrificación, siendo este una parte muy importante para la optimización del recurso.

5. En plantas industriales se tienen pérdidas económicas considerables, debido a las fallas de dispositivos y equipos ocasionadas por las sobretensiones transitorias, ya que solamente la pérdida o daño de una tarjeta electrónica o su desprogramación tiene un costo alto que afecta el presupuesto destinado al mantenimiento de la planta. Un equipo de potencia como un motor o transformador puede detener un proceso industrial, la pérdida más grande se ve reflejada en el lucro cesante que genera la parada no programada de la línea de producción, debido a un equipo que falla y deja fuera la línea productiva por horas o hasta días.

6. El diseño de un sistema de protección contra sobretensiones transitorias en cascada y la buena selectividad de los supresores aseguran una protección óptima en cada punto crítico o especial de la instalación eléctrica, ya que, con la adecuación de los circuitos y las corrientes de descarga de cada supresor seleccionado, con base en las características de la carga, se elimina en su totalidad la energía de la sobretensión transitoria y el voltaje remanente que el supresor genera por su impedancia, dejando pasar solamente voltajes que pueda manejar el dispositivo, equipo o circuito a proteger.

RECOMENDACIONES

1. Es importante la capacitación y actualización constante sobre el tema de la calidad de la energía, para así conocer el impacto negativo que se tiene en la planta industrial debido a la perturbación del voltaje y corriente, que a su vez es ocasionada por los distintos fenómenos eléctricos, que se pueden eliminar o disminuir si se toman en cuenta en los nuevos proyectos y mantenimiento de la instalación.
2. Determinar los puntos críticos y circuitos especiales para adecuar los tableros de alimentación, apartando los circuitos con elementos que generan sobretensiones transitorias, para evitar que estas se propaguen en los circuitos más vulnerables a fallar debido a una variación brusca de voltaje.
3. Para los coordinadores de mantenimiento de una planta industrial es importante tener claro qué circuitos y qué equipos pueden generar paradas no programadas debido a fallas causadas por las sobretensiones transitorias, y qué equipos o elementos de la instalación eléctrica generan sobretensiones transitorias, para poder programar mantenimientos y así poder anticiparse a las fallas o también eliminar su origen con el diseño e instalación de sistemas de protección.
4. Para nuevos proyectos se deben tomar en cuenta los sistemas de protección en las instalaciones eléctricas, ya que estos sistemas pueden evitar grandes pérdidas económicas para una planta de producción, ya que, en algunos casos, solamente con evitar una parada

no programada se estaría cubriendo el costo de los supresores de sobretensiones transitorias.

5. Los supresores de sobretensiones transitorias se deben instalar en cascada, como mínimo dos supresores en la misma línea, para eliminar el voltaje remanente del primer supresor que recibe la descarga, ya que solamente un supresor no es capaz de garantizar una protección eficiente. También es necesario seguir las normas para realizar una selección correcta de la ubicación y capacidad de descarga de cada dispositivo, tomando en cuenta las características eléctricas de cada instalación y sus equipos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Fundación Iberoamericana de Seguridad y Salud Ocupacional. *Descargas atmosféricas: el rayo*. Iberoamérica: FISO, 2014. 4 p.
2. GARCÍA GARCÍA, Miguel. *Curso de Doctorado. Coordinación de Aislamiento*. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Zaragoza, España, 2016. 3 p.
3. GRAINGER, J.; STEVENSON, W. *Análisis de sistemas de potencia*. 1a ed. México: McGraw-Hill, 2001. 574 p.
4. Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Recommended practice for monitoring electric power quality, Std 1159*. New York: IEEE, 1995. 76 p.
5. LÓPEZ ESCAMILLA, Adolfo. *Protección de equipo sensible contra sobretensiones*. Tesis de Postgrado en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en potencia. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2001. 100 p.
6. Universidad del Atlántico. *Calidad de la energía eléctrica*. Colombia: UPME, 2014. 25 p.

