

**UNIVERSIDAD CÁTOLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

TEMA:

Estudio y análisis de la calidad de la energía eléctrica de un banco de transformadores en media tensión a la empresa Hidalgo & Hidalgo en la ciudad de Guayaquil

AUTOR:

Adriano Amaguaya, Wilson Alcívar

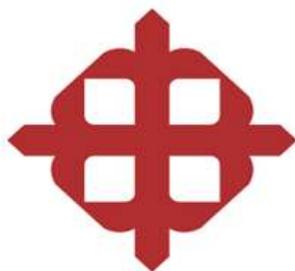
Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de
Ingeniero en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial

TUTOR:

Msc. Echeverría Parra, Ricardo Xavier

Guayaquil – Ecuador

2019



**UNIVERSIDAD CÁTOLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

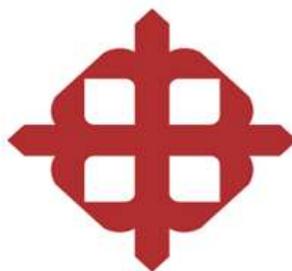
Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por
Adriano Amaguaya, Wilson Alcívar como requerimiento para la obtención del
título de **Ingeniero en Eléctrico–Mecánica con Mención en Gestión
Empresarial Industrial**

TUTOR:

Msc. Echeverría Parra, Ricardo Xavier

DIRECTOR DE CARRERA

Ing. Heras Sánchez, Miguel Armando



**UNIVERSIDAD CÁTOLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Adriano Amaguaya, Wilson Alcívar**

DECLARO QUE:

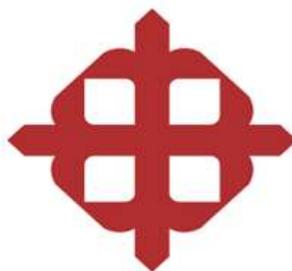
El trabajo de titulación **“Estudio y análisis de la calidad de la energía eléctrica de un banco de transformadores en media tensión a la empresa Hidalgo & Hidalgo en la ciudad de Guayaquil”** previo a la obtención del título **de Ingeniero en Eléctrico–Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del trabajo de titulación.

Guayaquil, a los 13 días del mes de marzo del 2019.

AUTOR:

Adriano Amaguaya, Wilson Alcívar



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Adriano Amaguaya, Wilson Alcívar**

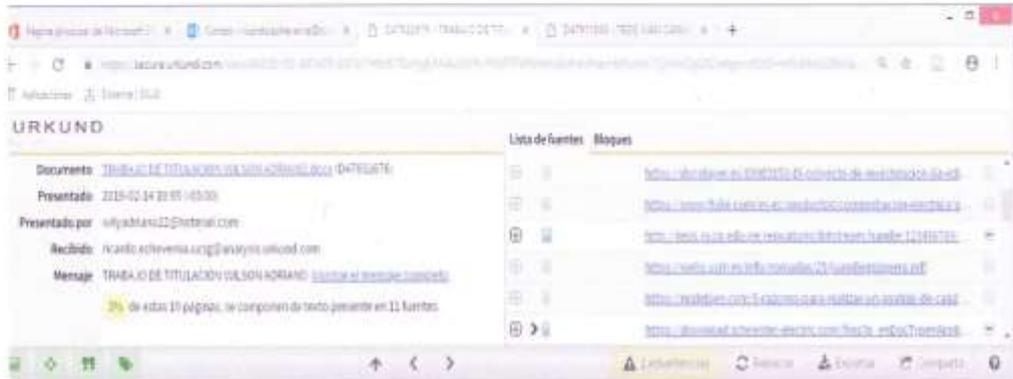
Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación en la biblioteca de la institución del trabajo de titulación, “**Estudio y análisis de la calidad de la energía eléctrica de un banco de transformadores en media tensión a la empresa Hidalgo & Hidalgo en la ciudad de Guayaquil**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 13 días del mes de marzo del 2019

AUTOR:

Adriano Amaguaya, Wilson Alcívar

REPORTE URKUND



FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRICO-MECANICO

TEMA: " ESTUDIO Y ANALISIS DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA ELECTRICA DE UN BANCO DE TRANSFORMADORES EN MEDIA TENSION A LA EMPRESA HIDALGO E HIDALGO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL "

AUTOR: Wilson Alcivar Adriano Amaguaya

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de INGENIERO ELECTRICO-MECANICO

TUTOR: Echeverria Parra, Ricardo Xavier

Guayaquil, Ecuador 15 de febrero del 2019

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRICO-MECANICO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por Adriano Amaguaya, Wilson Alcívar, como requerimiento para la obtención del Título de INGENIERO EN ELECTRICO-MECANICO

TUTOR:


Ing. Echeverría Parra, Ricardo Xavier

Agradecimiento

A la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, en especial a los directivos y docentes de la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, a mis profesores que tuve a lo largo de mi trayectoria estudiantil universitaria y formación profesional al Ing. Ricardo Echeverría Parra, por la dirección acertada como tutor para la culminación del presente trabajo de titulación.

Mi agradecimiento también para el Ing. Raúl Montenegro Tejada, por su guía en la formación académica y demás docentes en general.

A mis amigos y amigas por brindarme su amistad muestras de cariño y afecto y sobre todo su confianza

El Autor

Wilson Alcívar, Adriano Amaguaya

Dedicatoria

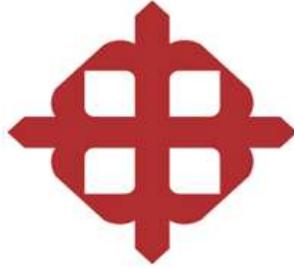
A mi madre María Isolina.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que este trabajo se realice con éxito, en especial para aquellos que compartieron sus conocimientos en las aulas día a día durante mi trayectoria universitaria.

El Autor

Wilson Alcívar, Adriano Amaguaya



**UNIVERSIDAD CÁTOLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____
ING. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESUS
DECANO

f. _____
ING. PHILCO ASQUI, LUIS ORLANDO
COORDINADOR DE TITULACIÓN

f. _____
ING. MONTENEGRO TEJADA, RAÚL
OPONENTE

Índice General

Índice General	IX
Indice de Figuras	XII
Indice de tablas	XIV
Resumen.....	XV
Abstract	XVI
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del Problema	2
1.3 Justificación del problema	2
1.4 Objetivos	2
1.4.1 Objetivo general	2
1.4.2 Objetivos específicos.....	2
1.5 Hipótesis	2
1.6 Metodología de Investigación.	3
Capítulo 2.....	4
2.1 Definción de corriente alterna	4
2.2 Niveles de tensión	6
2.2.1 Baja tensión.....	7
2.2.2 Media tensión.....	8
2.2.3 Alta tensión	8
2.3 Potencia Eléctrica.....	9
2.3.1 Potencia activa	10
2.3.2 Potencia reactiva.....	11
2.3.3 Potencia aparente	12
2.3.4 Triangulo de potencia.....	13
2.4 Factor de potencia	14
2.5 Cargas lineales.....	17
2.6 Cargas no lineales	18

2.7	Perturbaciones en los sistemas eléctricos	21
2.7.1	Perturbaciones transitoria.....	23
2.7.1.1	Perturbaciones transitorias impulsivas	23
2.7.1.2	Perturbaciones transitorias oscilatorios	24
2.8	Variaciones de corta duración.....	25
2.8.1	Depresión de tensión (SAG).....	26
2.8.2	Salto de tensión (SWELL).....	26
2.9	Variaciones de larga duración	26
2.9.1	Interrupción sostenida	27
2.9.2	Subtensión	28
2.9.3	Sobretensión.....	29
2.9.4	Tensiones trifásicas (tensión equilibrada, desequilibrio de tensión).....	31
2.9.5	Armónicos, distorsión de la forma de onda	32
2.10	Normativa de los armónicos.....	36
2.10.1	IEEE standard 519-1992.....	39
2.10.2	Norma EN 50160.....	40
2.10.3	Norma IEC 6100032	41
2.10.4	Norma IEEE 519.....	42
2.10.5	Normas de CONECEL – 004/01	43
2.11	Calidad de la energía	44
2.11.1	Importancia de la calidad de la energía.....	45
2.11.2	Monitoreo y medición de la calidad de energía	45
2.11.3	Analizadores de calidad eléctrica.....	46
2.11.4	Registrador trifásico de consumo eléctrico 1730.....	48
2.11.5	Conexiones del analizador de redes	49
Capítulo 3:	Análisis de la calidad de la energía	51
3.1	Descripción del método del análisis de calidad de la energía.....	51
3.2	Estudio realizado en la planta de asfalto.....	51
3.2.1	Análisis de cargabilidad	53
3.2.2	Análisis del factor de potencia.....	54
3.2.3	Análisis de tensiones	55
3.2.4	Análisis de armónicos	56
CAPÍTULO 4.....	59

4.1 Conclusiones	59
4.2 Recomendaciones	60
Anexos	69

Índice de Figuras

FIGURA 2. 1: CARACTERÍSTICAS DE UNA ONDA SENOIDAL DE CORRIENTE ALTERNA .	4
FIGURA 2. 2: REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES NIVELES DE TENSIÓN	6
FIGURA 2. 3: DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE LA DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE C.A.....	7
FIGURA 2. 4: LÍNEAS AÉREAS DE ALTA TENSIÓN.....	9
FIGURA 2. 5: ENTRADA DE POTENCIA INSTANTÁNEA P (T) A UN CIRCUITO	11
FIGURA 2. 6: TRIANGULO DE POTENCIA (A), TRIANGULO DE IMPEDANCIA (B).....	14
FIGURA 2. 7: ELEMENTO QUE CONFORMAN EL TRIÁNGULO DE POTENCIA.....	15
FIGURA 2. 8: DIAGRAMA FASORIAL QUE MUESTRA EL EFECTO DE AÑADIR UN CAPACITOR EN PARALELO CON UNA CARGA INDUCTIVA.....	16
FIGURA 2. 9: TRIANGULO DE POTENCIA QUE ILUSTRA LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA	16
FIGURA 2. 10: ONDAS DE VOLTAJES Y CORRIENTE DE UNA CARGA LINEAL.....	17
FIGURA 2. 11: ONDA CARACTERÍSTICA SIN DISTORSIÓN EN UNA CARGA LINEAL.....	17
FIGURA 2. 12: GRAFICA DE UNA ONDA TÍPICA DE UNA CARGA LINEAL	18
FIGURA 2. 13: CARGA NO LINEAL EN LA QUE LA CORRIENTE Y EL VOLTAJE NO SON PROPORCIONALES.....	20
FIGURA 2. 14: EJEMPLOS DE DISTRIBUCIÓN DE NIVELES DE ARMÓNICOS.....	20
FIGURA 2. 15: TIPOS Y CATEGORÍAS DE PERTURBACIONES QUE AFECTAN A LA CALIDAD DE LAS ONDAS SEGÚN IEEE STD. 1159-1995	22
FIGURA 2. 16: TRANSITORIO IMPULSIVO	23
FIGURA 2. 17: DEFINICIÓN DE LA DURACIÓN DE UN TRANSITORIO IMPULSIVO.....	24
FIGURA 2. 18: TRANSITORIO OSCILATORIO AMORTIGUADO	25
FIGURA 2. 19: REDUCCIÓN MOMENTÁNEA DEL VALOR EFICAZ DE TENSIÓN.	26
FIGURA 2. 20: INTERRUPCIÓN SOSTENIDA DEBIDA A UNA FALLA	27
FIGURA 2. 21: BAJADA DE TENSIÓN EN INTERVALOS CORTOS DE TIEMPO	28
FIGURA 2. 22: BAJADA DE TENSIÓN DE LARGA DURACIÓN EN EL TIEMPO.....	29
FIGURA 2. 23: GRAFICA DE LA ONDA CUANDO SUFRE INCREMENTOS DE TENSIÓN MOMENTÁNEOS.....	29
FIGURA 2. 24: AUMENTO DE TENSIÓN DURANTE INTERVALOS CORTOS DE TIEMPO .	30
FIGURA 2. 25: AUMENTO DE TENSIÓN DURANTE INTERVALOS LARGOS DE TIEMPO..	30
FIGURA 2. 26: SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN GENERADOR TRIFÁSICO.....	31
FIGURA 2. 27: TENSIÓN TRIFÁSICA EQUILIBRADA Y SECUENCIA DE FASE POSITIVA .	31
FIGURA 2. 28: TENSIONES DESEQUILIBRADAS	32
FIGURA 2. 29: DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL	33
FIGURA 2. 30: ONDA SINUSOIDAL CON OFFSET DE CD	34
FIGURA 2. 31: CORRIENTE A 60 HZ SEVERAMENTE DISTORSIONADA EN UN MANDO ELECTRÓNICO.....	34
FIGURA 2. 32: EJEMPLO DE APARICIÓN DE MUESCAS EN EL VOLTAJE (NOTCHING) ORIGINADAS POR UN CONVERTIDOR TRIFÁSICO	36
FIGURA 2. 33: ONDA CON CONTENIDO ARMÓNICO.....	37

FIGURA 2. 34: ARMÓNICOS DE LAS ONDAS MÁS COMUNES.....	38
FIGURA 2. 35: BASE PARA LOS LÍMITES DE CORRIENTES ARMÓNICAS.....	40
FIGURA 2. 36: LIMITES SEGÚN NORMA EN50160	41
FIGURA 2. 37: LIMITES PARA EQUIPOS DE CLASE A	42
FIGURA 2. 38: LIMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN CORRIENTE SEGÚN NORMA IEEE 519.....	43
FIGURA 2. 39: REGULACIÓN NO. CONELEC - 004/01	44
FIGURA 2. 40: PUNTO DE MEDICIÓN DEL NIVEL DE ARMÓNICAS	46
FIGURA 2. 41: ANALIZADORES TRIFÁSICOS DE CALIDAD ELÉCTRICA.....	47
FIGURA 2. 42: ANALIZADOR DE CALIDAD DE LA ENERGÍA FLUKE 345.....	47
FIGURA 2. 43: ANALIZADOR DE REDES FLUKE 1730.....	48
FIGURA 2. 44: CONEXIÓN DEL ANALIZADOR A UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN TRIFÁSICO	49
FIGURA 2. 45: DIAGRAMA DE VECTORES CORRESPONDIENTE AL ANALIZADOR CORRECTAMENTE CONECTADO.....	50
FIGURA 3. 1: DETALLE GRAFICO DE LA POTENCIA APARENTE (kVA).....	54
FIGURA 3. 2: ANÁLISIS DEL FACTOR DE POTENCIA	55
FIGURA 3. 3: ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL	57
FIGURA 3. 4: ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE CORRIENTE	58

Índice de tablas

TABLA 3. 1: PARÁMETROS DE TENSIONES Y CORRIENTES	51
TABLA 3. 2: RANGOS DE POTENCIA ACTIVA KW Y POTENCIA REACTIVA KVAR.....	52
TABLA 3. 3: RANGOS DE POTENCIA APARENTE Y FACTOR DE POTENCIA	52
TABLA 3. 4: PORCENTAJE DE CARGABILIDAD DEL BANCO DE TRANSFORMADORES.	52
TABLA 3. 5: VALORES DE TENSIONES Y CORRIENTES	52
TABLA 3. 6: VALORES DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA.....	53
TABLA 3. 7: VALORES DE POTENCIA APARENTE Y FACTOR DE POTENCIA	53
TABLA 3. 8: PORCENTAJE DE CARGABILIDAD AL BANCO DE TRANSFORMADORES...	53
TABLA 3. 9: VALORES DE TENSIONES	55
TABLA 3. 10: VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE TENSIÓN RESPECTO AL NOMINAL, EN POR CIENTO.....	55
TABLA 3. 11: PORCENTAJE DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN TENSIÓN Y CORRIENTE THD	56
TABLA 3. 12: VALORES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE TENSIÓN Y CORRIENTE THD	57

Resumen

El presente trabajo de titulación analiza la calidad de la energía eléctrica a la empresa Hidalgo & Hidalgo que presenta problemas de averías en los equipos eléctricos de las plantas. La petición de la empresa fue realizar una medición de la calidad de la energía eléctrica para conocer falencias en las instalaciones eléctricas como las variaciones de tensión, corriente, factor de potencia, frecuencia y nivel de armónicos. En este trabajo de titulación se usó el método de investigación documental, investigación de campo, investigación analítica. Con la ayuda de instrumentos de precisión obtendremos resultados los mismos que después del análisis determinaran fallas. En el análisis se revelaron que los valores de los parámetros eléctricos de la calidad de la energía se encontraban dentro de los rangos normados. Como conclusión después de haber hecho el análisis las fallas no eran debido a la calidad de la energía sino más bien debido a que no hay un plan de mantenimiento a los equipos e instalaciones eléctricas, corrigiendo este problema se logrará optimizar y garantizar un máximo rendimiento para alcanzar funcionalidad de las plantas y consecuentemente incrementar su productividad.

PALABRAS CLAVES: CALIDAD DE LA ENERGIA; FLUCTUACIONES; FACTOR DE POTENCIA; ENERGIA ELECTRICA; ARMONICOS; BANCO DE TRANSFORMADORES.

Abstract

The present titration work analyzes the quality of the electric power to the company Hidalgo & Hidalgo that presents the problem of the breakdowns in the electrical equipment. The company's request was to carry out a measurement of the quality of the electrical energy in order to know deficiencies in the electrical installations such as variations in voltage, current, power factor, frequency and harmonic level. In this degree work, the method of documentary research, field research, and analytical research was used. With the help of precision instruments, we will obtain results, which, after the analysis, will determine faults. In the analysis, it was revealed that the values of the electrical parameters of the energy quality were within the normed ranges. As a conclusion after having made the analysis the failures were not due to the quality of the energy but rather because there is no maintenance plan for the electrical equipment and installations, correcting this problem will optimize and guarantee maximum performance for achieve the functionality of the plants and consequently increase their productivity.

KEY WORDS: QUALITY OF ENERGY; FLUCTUATIONS; POWER FACTOR; ELECTRIC POWER; HARMONICS; BANK OF TRANSFORMERS.

Capítulo 1

1.1 Introducción

La energía eléctrica se genera en grandes centrales por la acción de la inducción electromagnética utilizando maquinas síncronas rotatorias cuyo campo magnético es excitado por un voltaje en corriente directa (CD) a las terminales del devanado del rotor para crear un gran electroimán, el rotor del generador gira mediante la acción mecánica de una turbina, y produce un campo magnético giratorio dentro de la máquina. Este campo magnético giratorio induce un conjunto de voltajes trifásicos dentro de los devanados del estator del generador creando una forma de onda (senoide) que es una señal que tiene la forma de la función trigonométrica seno o coseno, una corriente senoidal se conoce usualmente como corriente alterna (CA), en un circuito lineal se aplica voltaje, la caída de tensión y las corrientes que fluyen también son senoidales.

Durante los últimos años los avances tecnológicos en el área de la electrónica de control y potencia ha traído consigo desarrollo en la productividad crecimiento económico en el sector industrial y comercial, pero, así como tiene aspectos positivos también podemos citar aspectos negativos y es que estos dispositivos electrónicos distorsionan la forma de onda, son considerados como cargas no lineales entre ellas tenemos: variadores de frecuencia , arrancadores suaves, maquinas inductivas, las cuales producen una gran cantidad de perturbaciones en tensión, corriente, frecuencia, denominados fenómenos electromagnéticos estos afectan a la red eléctrica de distribución.

En la actualidad la importancia del análisis de la calidad d la energía es indispensable considerando que la calidad eléctrica es un indicador del nivel de adecuación de la instalación para soportar y garantizar un funcionamiento fiable de sus cargas. En general, cuando la energía eléctrica es suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes. Por lo tanto, cuando se habla de power

quality o calidad de la energía eléctrica, se está haciendo referencia tanto a la calidad de las señales de tensión y corriente, como a la continuidad o confiabilidad del servicio de energía eléctrica.

1.2 Planteamiento del Problema

La falta de un análisis de calidad de la energía eléctrica que determinan los factores que provocan averías en los equipos eléctricos en la empresa Hidalgo e Hidalgo S.A ubicada en la ciudad de Guayaquil

1.3 Justificación del problema

Con este diagnóstico de la calidad de la energía se pretende determinar el origen de fallas eléctricas, ahorro energético, por ende, lograr mayor rendimiento de la producción de la empresa, menor facturación por parte de la distribuidora de electricidad.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Realizar el análisis de la calidad de la energía eléctrica entregada por un banco de transformadores en media tensión a la empresa Hidalgo e Hidalgo S.A.

1.4.2 Objetivos específicos

- Estudiar normativa para realzar el análisis de la calidad de la energía eléctrica.
- Caracterizar mediante análisis gráfico la distorsión armónica total de voltajes y corrientes de las plantas de la empresa Hidalgo e Hidalgo S.A.
- Evaluar los parámetros la calidad de la energía entregada por el banco de transformadores.

1.5 Hipótesis

El estudio de la calidad de la energía eléctrica permitirá determinar las falencias en la instalación de la planta. Con la ayuda de instrumentos de

medición de precisión nos darán resultados mediante el método de análisis con lo cual podemos definir conclusiones y recomendaciones.

1.6 Metodología de Investigación.

Investigación documental

La investigación documental es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos. (Arias, 2012, p. 27)

Investigación de campo

La investigación de campo es aquella que consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos (datos primarios), sin manipular o controlar variable alguna, es decir, el investigador obtiene la información, pero no altera las condiciones existentes. De allí su carácter de investigación no experimental. (Arias, 2012, p. 31)

Investigación analítica

El método analítico es un camino para llegar a un resultado mediante la descomposición de un fenómeno en sus elementos constitutivos. Al referirnos a diversos saberes en los que la aplicación del método analítico es posible, vemos una gradación que va desde las aplicaciones más empíricas y concretas hasta las más abstractas y simbólicas. Las diferentes ciencias aplican usualmente ambas maneras del método. (Lopera, Ramírez, Zuluaga, & Ortiz, 2010, p. 14)

Capítulo 2

2.1 Definición de corriente alterna

“La corriente alterna es la que varía senoidalmente con el tiempo, para uno de los sentidos de circulación se considera positivo, hacia el otro negativo. Una corriente que varía con el tiempo se representa con el símbolo i , se conoce también como corriente senoidal o corriente alterna (C.A), en la figura 2.1 se muestra las características de una onda senoidal de corriente alterna.”(Borgetto, 2010, p. 3).

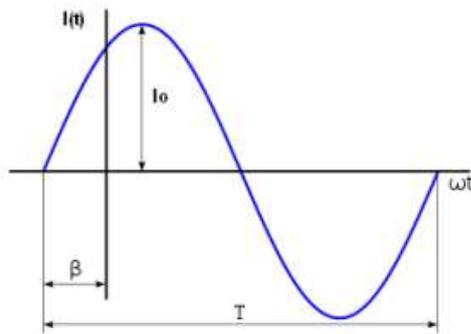


Figura 2. 1: Características de una onda senoidal de corriente alterna

Fuente: (Moreno Arequipa, 2011, p. 19)

“La energía eléctrica se genera y transporta habitualmente como corriente alterna, llegando a nuestras casas o zonas industriales para su consumo. Siendo generada por los alternadores de las centrales eléctricas”. (Redondo Gallardo, 2010, p. 49).

En los generadores de potencia, una bobina alimentada por corriente continua y ensamblada en un núcleo de material ferromagnético giratorio, crea el campo magnético que induce la fem (fuerza electro motriz) alterna en el bobinado del estator, el que posee mayores dimensiones que la parte giratoria por la potencia que maneja, lo que justifica que no sea la parte móvil. (Borgetto, 2010, p. 3).

Se ha definido los distintos elementos de la expresión instantánea de la señal, pero aún falta definir parámetros muy importantes:

- Periodo T - Es el tiempo en segundos que dura un ciclo de la señal.
- Frecuencia f - Es el número de ciclos de la señal en un segundo, se mide en Hertzios (Hz). La frecuencia industrial es 50Hz en Europa.
- Valor pico a pico - distancia entre el pico positivo y negativo de la señal. $A_{pp} = 2A_o$.
- Valor eficaz - En una señal alterna los valores de las magnitudes varían constantemente. Es necesario tener un valor intermedio que represente los cálculos y las medidas con instrumentos.
- Se define valor eficaz como aquel valor que llevado a corriente continua ocasiona los mismos efectos caloríficos. (Redondo Gallardo, 2010, p. 50)

$$\text{Valor Eficaz} = \frac{\text{Valor máximo}}{\sqrt{2}}$$

Las ventajas que justifican el empleo de la corriente alterna en lugar de corriente continua son las siguientes:

- Los alternadores son máquinas eléctricas en las que se puede prescindir del sistemas de anillos rozantes, colectores y escobillas para su funcionamiento, lo que reduce ampliamente los costes de mantenimiento y permite la utilización de tensiones e intensidades de corriente mas alta que las dinamos en C.C.
- Para elevar la tension durante el transporte de la energia electrica se emplean transformadores, los cuales, solo funcionan en C.A.
- Cuando la corriente alterna se suministra a voltajes elevados en una transmisión a larga distancia, las pérdidas de línea son menores si las comparamos a una transmisión de corriente continua.
- Los motores de inducción de C.A. son constructivamente mas sencillos que los de C.D. Además consiguen trabajar con un mejor rendimiento y una velocidad más estable. (Molina Martínez, Cánovas Rodríguez, & Ruz Vila, 2013, pp. 10-11)

2.2 Niveles de tensión

La actividad de distribución de energía eléctrica requiere de las redes de distribución para llevar potencia y energía a los clientes finales. Las redes son conformadas por líneas de distribución las cuales pueden ser aéreas o subterráneas. Las redes son clasificadas según su nivel de tensión sustentadas en dos factores: en primer lugar, las necesidades de potencia que contrata un cliente y, segundo, la distancia que debe recorrer la electricidad por la línea de distribución, ya que está sujeta a pérdida natural la cual se minimiza mientras más alta sea la tensión transferida, como muestra la figura 2.2. (Salas Chamochumbi, 2013, p. 16)

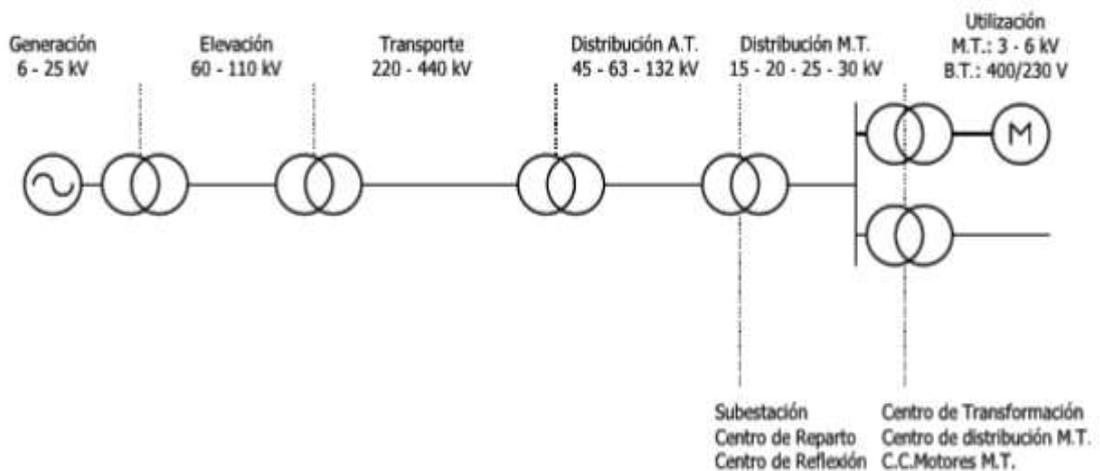


Figura 2. 2: Representación de los diferentes niveles de tensión

Fuente: (Carrasco Sánchez, 2008, p. 29)

El servicio eléctrico se suministrará en forma de corriente alterna, monofásico o trifásico sólidamente aterrizado, con una frecuencia nominal de 60 ciclos por segundo. Los voltajes de servicio están disponibles dependiendo de la localización del consumidor y la naturaleza de la carga. Las tensiones se clasifican en: baja, media y alta ver figura 2.3. El Distribuidor en condiciones normales mantendrá la regulación de la tensión dentro de los límites establecidos por el CONELEC.

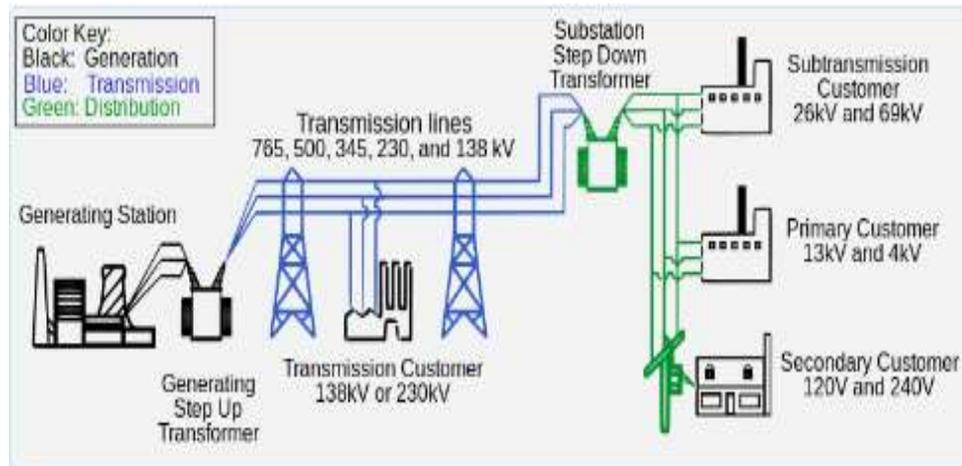


Figura 2. 3: Diagrama simplificado de la distribución eléctrica de C.A.

Fuente: (Sectorelectricidad, 2014)

2.2.1 Baja tensión

Las redes de distribución aéreas son cada vez menos frecuentes, hoy día están siendo remplazadas por redes subterráneas, si bien en pequeños núcleos de población en que las cargas no son muy importantes se siguen manteniendo, debido al coste que supone el cambio. La tensión normalizada para este tipo de líneas o redes de Baja Tensión es de 230/400 V. La distribución puede hacerse de dos formas, mediante: (Carrasco Sánchez, 2008, p. 37)

- Líneas aéreas.
- Líneas subterráneas.

Es el sistema normalmente utilizado para distribución eléctrica en ciudades, con él se consigue eliminar los dos problemas fundamentales que tienen las redes aéreas: la seguridad y la estética. Las canalizaciones se dispondrán, en general, por terrenos de dominio público, y en zonas perfectamente delimitadas, preferentemente bajo las aceras. El trazado será lo más rectilíneo posible y a poder ser paralelo a referencias fijas como líneas en fachada y bordillos. (Carrasco Sánchez, 2008, p. 38)

Los esquemas de distribución en B.T. representan cómo se encuentra conectada con respecto a tierra la red de alimentación o distribución y también la situación de las masas de la instalación eléctrica receptora respecto a tierra. Estos esquemas definirán, en gran medida, los

sistemas de protección a adoptar frente a los contactos indirectos y contra sobreintensidades. (Luna Sánchez, García Fernández, & Adrados Blaise-Ombrecht, 2008, p. 68)

El servicio trifásico será suministrado después de que la empresa haya evaluado el costo beneficio del suministro para determinar la contribución por parte del consumidor cuando se encuentre localizado fuera de la franja de servicio se requiere una carga trifásica mínima de 4 kilovatios. El servicio estrella será suministrado en los sectores donde ya exista, de lo contrario será necesario instalar un banco de transformadores suministrado por el consumidor. (Eléctrica de Guayaquil, 2012, p. 10)

2.2.2 Media tensión

Estas líneas alimentan a centros de transformación. Según la (Eléctrica de Guayaquil, 2012, p. 10) “La empresa suministrará el servicio eléctrico a nivel de media tensión en los siguientes casos, independientemente si la medición se encuentra en el lado primario o secundario “. Cuando un abonado requiera un servicio con medición en baja tensión y con voltaje diferente a: 120/208V, 127/220V o 120/240V, consultará con el Distribuidor la factibilidad del suministro.

a. Sistema monofásico a 7.620 voltios.

“Este servicio se suministrará el voltaje indicado, cuando la demanda del predio sea mayor a 30 KW y menor a 90 KW y su capacidad instalada no exceda de 100 KVA monofásicos” (Eléctrica de Guayaquil, 2012, p. 11).

b. Sistema trifásico a 13.200 voltios.

“Este servicio se suministrará al voltaje indicado, cuando la demanda trifásica del predio sea mayor a 30 KW y menor a 1.000 KW” (Eléctrica de Guayaquil, 2012, p. 11).

2.2.3 Alta tensión

Sistema Trifásico a 69.000 voltios

“Este servicio se suministrará al voltaje indicado, cuando la demanda del consumidor sea mayor a 1.000 KW, para cuyo efecto el interesado deberá

instalar una subestación de su propiedad” (Eléctrica de Guayaquil, 2012, p. 11)

Las líneas de transporte en su mayoría son líneas aéreas de tensiones nominales superiores a 220 Kv. El objeto principal de dichas líneas es transportar la energía generada en las centrales eléctricas hasta los diferentes puntos de consumo, tales como grandes ciudades, polígonos industriales, etc. El conductor está soportado por grandes torretas metálicas provisto de varias crucetas, estas líneas suelen estar constituidas por varios circuitos eléctricos independientes, la cantidad de crucetas instaladas en la torreta será igual al número de circuitos existente en la línea de transmisión, figura 2.4. (Entrena González, 2012, p. 21)



Figura 2. 4: Líneas aéreas de alta tensión

Fuente: (Entrena González, 2012, p. 31)

2.3 Potencia Eléctrica

Los sistemas electricos, ya sea una simple batería que opera un timbre, o una compleja instalación industrial que alimenta a un gran número de lámparas y motores eléctricos y que tiene el propósito de producir alumbrado y hacer girar los motores para accionar bombas, ventiladores, transportadores, etc., o bien producir calor, tienen como proposito final desarrollar una potencia o producir un trabajo. (Harper, 1985, p. 27)

“En física se define la potencia eléctrica como la cantidad de trabajo en la unidad de tiempo. El trabajo se produce gracias a la energía. Trabajo y energía son dos conceptos que dicen lo mismo” (Baisón Santiago, 2010, p. 62):

Donde:

$$Potencia = \frac{Trabajo}{Tiempo} \quad \text{ó} \quad Potencia = \frac{Energía}{Tiempo}$$

P = potencia en vatios Trabajo

E = energía en julios

T = tiempo en segundos.

La fuerza que mueve un móvil es similar a la tensión que impulsa a moverse a los electrones por un circuito eléctrico y la velocidad con que se mueve un móvil se puede comparar con la cantidad de electrones que fluyen en un circuito eléctrico en la unidad de tiempo, o lo que es lo mismo, de la intensidad de corriente eléctrica. Por eso en un circuito eléctrico decimos que la potencia eléctrica es el producto de la tensión por la intensidad de corriente (Baisón Santiago, 2010, p. 62):

La medida de la capacidad para desarrollar un trabajo eléctrico, el kilowatt es igual a 1000 watts y cuando se habla de la “potencia eléctrica”, se hace referencia por lo general a watts o kilowatts de la carga de un circuito. La potencia eléctrica se puede expresar como (Harper, 1985, p. 28):

$$P = V * I \text{ (WATTS)}$$

2.3.1 Potencia activa

Se dice que la potencia activa, es la potencia útil, la que se convierte en trabajo, la que se aprovecha toda la energía y en donde la curva de la potencia activa es siempre positiva. Esta potencia, constituye la capacidad que tiene un circuito para realizar un proceso de transformación de la energía eléctrica en energía mecánica la cual se traduce en trabajo. (Gómez Cabanilla, 2016, p. 17)

“Su unidad es el KW y es representada por la letra P. Para medir la energía activa se mide en KW-h. Para calcular la potencia activa en un sistema trifásico se emplea la siguiente fórmula” (Gómez Cabanilla, 2016, p. 17).

$$P = \sqrt{3} * V * I * \text{Cos } \phi$$

Donde:

$P = \text{Potencia Activa (KW)}$

$V = \text{Tensión (V)}$

$I = \text{Corriente (I)}$

En la figura 2.5, muestra $p(t)$, donde $T = 2\pi/\omega$ es el periodo de la tensión o la corriente. Obsérvese que $p(t)$ es periódica $p(t) = p(t + T_o)$, y que tiene un periodo de $T_o = T/2$, ya que su frecuencia es dos veces la de la tensión o la corriente, $p(t)$ es positiva en cierta parte de cada ciclo y negativa en el resto del ciclo. Cuando $p(t)$ es positiva, el circuito absorbe potencia. Cuando $p(t)$ es negativa, la fuente absorbe potencia, se transfiere potencia del circuito a la fuente. Esto a causa de los elementos capacitores e inductores en el circuito. (Alexander, Sadiku, Cordero Pedraza, & López Caudana, 2018, p. 459)

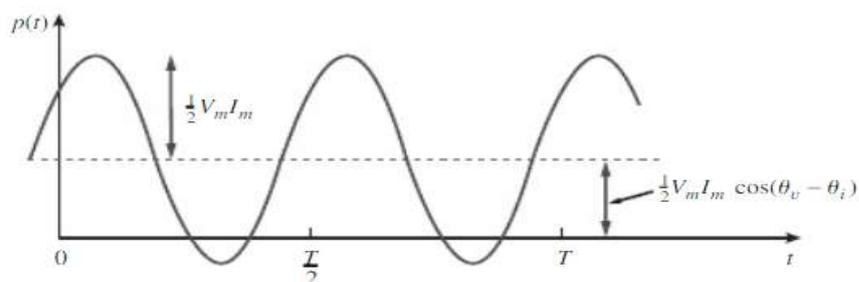


Figura 2. 5: Entrada de potencia instantánea $p(t)$ a un circuito

Fuente: (Alexander, Sadiku, Cordero Pedraza, & López Caudana, 2018, p. 459)

2.3.2 Potencia reactiva

“Aparece en una instalación eléctrica en la que existen bobinas o condensadores, denominadas cargas reactivas y son necesarias para crear campos magnéticos y eléctricos en dichos componentes. No produce trabajo

útil, por lo que es necesario neutralizarlo o compensarlo” (Gómez Cabanilla, 2016, p. 17).

Los elementos reactivos (capacitores y bobinas) no disipan potencia. Se cargan y se descargan constantemente siendo la potencia consumida cero (P es cero). Pero por estos componentes circula una corriente que se debe tener en cuenta para saber la intensidad total del circuito y por tanto dimensionarlo. Para tener en cuenta este fenómeno se crea una potencia ficticia Q denominada potencia reactiva, se mide en voltio amperios reactivos, siendo su expresión (Redondo Gallardo, 2010, p. 61):

$$Q = \frac{1}{2} V_o * I_o * \text{sen}\varphi \text{ (VAr)} * \text{ó} Q = \frac{V_o}{\sqrt{2}} * \frac{I_o}{\sqrt{2}} * \text{sen}\varphi = V_d * I_{ef} * \text{sen}\varphi \text{ (VAr)}$$

Según lo citado por Urrego, Arboleda & Rodríguez (Urrego, Arboleda, & Rodríguez, 2015, p. 53) se resalta el impacto de la potencia reactiva a nivel industrial, ya que a falta de la compensación de reactivos en la industria se presentan efectos negativos como la pérdida de potencia dentro de las instalaciones, caídas de tensión bajo operaciones pico y una de las más importantes, elevados costos a nivel de facturación.

La compañía eléctrica mide la energía reactiva en kvar y si, se superan ciertos valores (30% de la energía activa), incluye un término de penalización. Su unidad es el KVAR y se representa con la letra Q. La Fórmula empleada se expresa de la siguiente manera (Gómez Cabanilla, 2016, p. 17).

$$Q = \sqrt{3} * V * I * \text{Sen } \emptyset$$

Donde:

$Q = \text{Potencia Reactiva (KVAR)}$

$V = \text{Tensión (V)}$

$I = \text{Corriente (I)}$

2.3.3 Potencia aparente

A la potencia aparente se le denomina como la potencia total, es la potencia en donde no existe ninguna carga eléctrica conectada a la salida del generador o transformador. La potencia aparente será igual a la potencia útil cuando su factor de potencia sea igual a 1. También se podría representar como la suma vectorial de la potencia activa y la reactiva. (Gómez Cabanilla, 2016, p. 18)

La potencia aparente (S) es una magnitud muy importante en los circuitos eléctricos. Su valor es utilizado para el diseño de los generadores y transformadores eléctricos, así como de las líneas eléctricas y de otros muchos dispositivos eléctricos. Así mismo, la potencia aparente determina el valor del factor de potencia (FP) parámetro que se define como el cociente entre los valores de la potencia activa y la potencia aparente y que mide la eficiencia en las distintas partes de los circuitos eléctricos. Este coeficiente guarda cierta semejanza formal con el rendimiento, aunque no puede ser considerado como tal, ya que relaciona a potencias que miden fenómenos energéticos diferentes. (Martínez et al., 2017, p. 270)

“Se representa con la letra “S” y su unidad de medida KVA. La fórmula matemática para hallar el valor de este tipo de potencia en un sistema trifásico es la siguiente” (Gómez Cabanilla, 2016, p. 18).

$$S = \sqrt{3} * V * I$$

Donde:

$S = Potencia\ Aparente\ (KVA)$

$V = Tensión\ (V)$

$I = Corriente\ (I)$

2.3.4 Triángulo de potencia

Es práctica común representar S , P y Q , con un triángulo llamado triángulo de potencia. Este triángulo es similar al triángulo de impedancia, que exhibe la relación entre Z , R y X . El triángulo de potencia contiene cuatro elementos: la potencia aparente/compleja, la potencia real,

la potencia reactiva y el ángulo de potencia. Dados dos de estos elementos, los otros dos pueden obtenerse fácilmente del triángulo. Cuando S se sitúa en el primer cuadrante, se tiene una carga inductiva y un f.p. atrasado. Cuando S se sitúa en el cuarto cuadrante, la carga es capacitiva y el f.p. está adelantado. También es posible que la potencia compleja se ubique en el segundo o tercer cuadrante. Esto requiere que la impedancia de carga tenga una resistencia negativa, lo cual sólo es posible con circuitos activos, figura 2.6. (Alexander et al., 2018, p. 408)

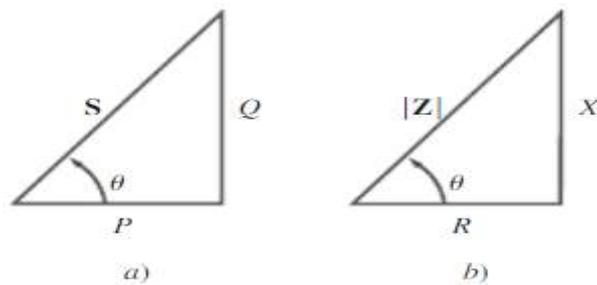


Figura 2. 6: Triángulo de potencia (a), Triángulo de impedancia (b).

Fuente: (Alexander et al., 2018, p. 475)

2.4 Factor de potencia

Se define como el coseno del ángulo φ que forma la corriente activa I_A con la corriente total resultante I , ya que representa la relación existente entre la potencia real consumida o potencia activa, con la potencia aparente que llega a la planta. (Barros Saldañas, 1981, p. 8)

Las potencias eléctricas y factor de potencia (FP) son variables eléctricas que inciden a nivel industrial en el cálculo del costo de la energía eléctrica consumida; para su obtención generalmente se utilizan medidores digitales o analizadores de calidad (PQA) que emplean diferentes algoritmos o metodologías para el cálculo de la energía eléctrica, encontrándose diferencias importantes al comparar los registros obtenidos para cada una de las variables medidas (Urrego et al., 2015, p. 41).

“El factor de potencia es adimensional, ya que es la proporción entre la potencia activa KW y la potencia aparente KVA, es una relación que indica la

cantidad de potencia que se convierte en trabajo” (Gómez Cabanilla, 2016, p. 18).

$$F.P = \frac{P}{S}$$

Donde:

F.P : Factor de potencia

P : Potencia Activa (KW)

S : Potencia Aparente (KVA)

“El factor de potencia es el coseno de la diferencia de fase entre la tensión (voltaje) y la corriente. También es igual al coseno del ángulo de la impedancia de la carga, El Fp es el parámetro que mide el desfase entre la tensión y la corriente e indica el correcto uso de la energía eléctrica” (Redondo Gallardo, 2010, p. 61).

$$Fp = \cos\varphi = \cos(\varphi_V - \varphi_I)$$

A continuación se muestra el desfase entre el voltaje y la corriente, figura 2.7, que dan lugar a la formación del ángulo de factor de potencia, así como el resto de elementos que conforman un triángulo de potencia.

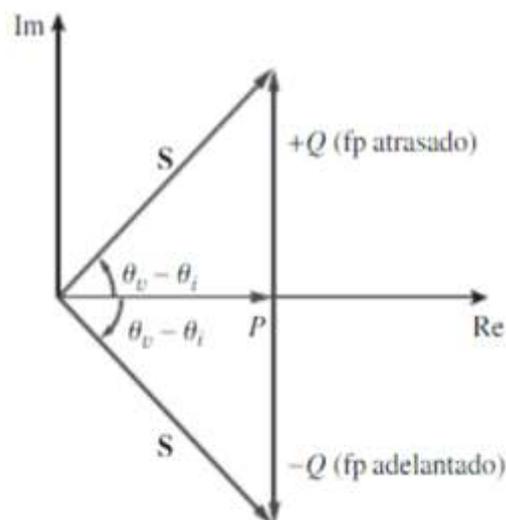


Figura 2. 7: Elemento que conforman el triángulo de potencia

Fuente: (Alexander et al., 2018, p. 475)

Las causas que producen el bajo factor de potencia:

- Equipos eléctricos (lámparas) que requieren para su funcionamiento la inductancia o de un transformador.
- Motores de inducción de pequeña y gran capacidad por disponer de un circuito electromagnético.
- Soldadoras eléctricas debido a su reactancia con las que están formadas (Barros Saldañas, 1981, pp. 12-13)

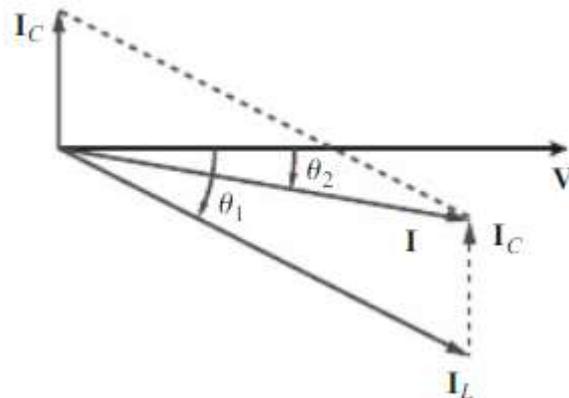


Figura 2. 8: Diagrama fasorial que muestra el efecto de añadir un capacitor en paralelo con una carga inductiva

Fuente: (Alexander et al., 2018, p. 414)

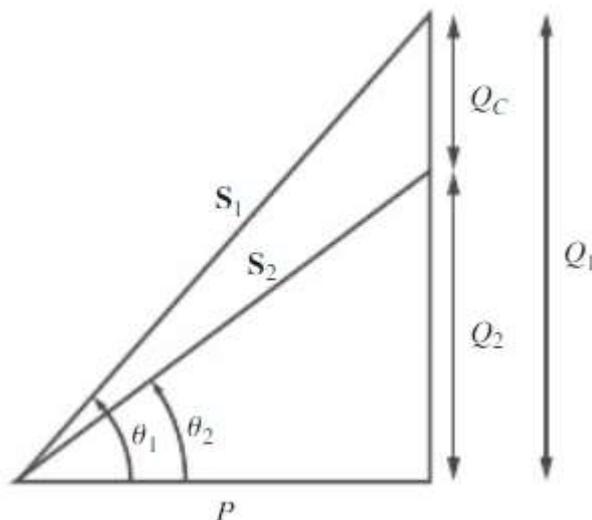


Figura 2. 9: Triángulo de potencia que ilustra la corrección del factor de potencia

Fuente: (Alexander et al., 2018, p. 414)

2.5 Cargas lineales

“Cuando se aplica un voltaje senoidal directamente a cargas tales como resistencias, inductancias, capacitores o una combinación de ellos, se produce una corriente proporcional que también es senoidal, por lo que se les denominan cargas lineales”, en la figura 2.10 muestra un ejemplo típico de la onda de una carga lineal. (Téllez Ramírez, s. f., p. 7).

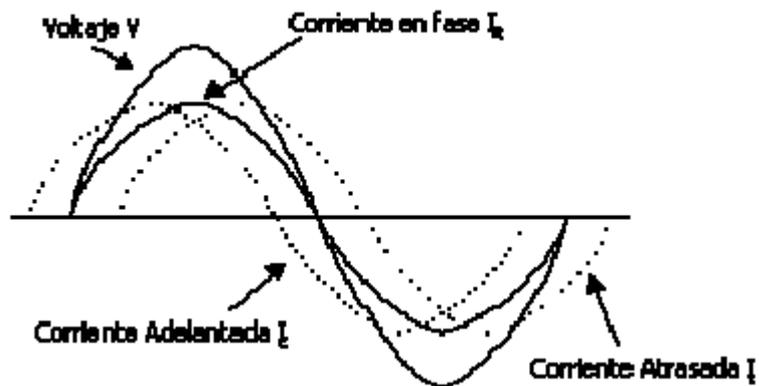


Figura 2. 10: Ondas de voltajes y corriente de una carga lineal

Fuente: (Castañeda Ordóñez, 2009, p. 10)

“Las cargas lineales son aquellas que no cambian su magnitud de impedancia durante el ciclo de voltaje, si tenemos una onda sinusoidal de corriente y voltaje y realizamos el cálculo para cualquier punto de la onda obtendremos el mismo valor de resistencia durante todo el periodo de tiempo medido, como muestra la figura 2.11. (Carreño, Plata, Wandurraga, & Gualdrón, 2010, p. 82).

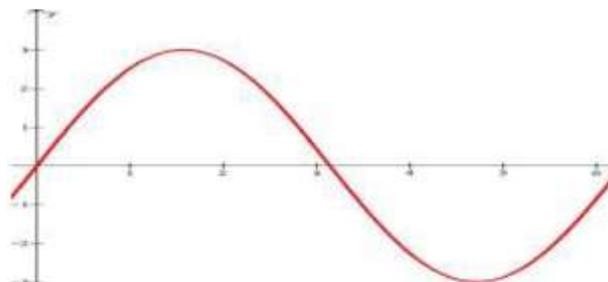


Figura 2. 11: Onda característica sin distorsión en una carga lineal

Fuente: (Castañeda Ordóñez, 2009, p. 10)

Con estas características en el sistema se tiene un voltaje sinusoidal, una corriente también sinusoidal, y por lo general existe un desfase entre ellos. Una resistencia pura, una inductancia y una capacitancia son todas lineales como muestra la figura 2.12. Lo que eso significa es que, si una onda senoidal de voltaje de una cierta magnitud es puesta en un circuito que contiene una resistencia pura, por ejemplo, la corriente en el valor circuito obedece a la ley de ohm $I=V/R$. Para un valor específico de ohmios, la relación entre voltios y los amperios es una línea recta. (Castañeda Ordóñez, 2009, pp. 9-10)

Entre los ejemplos están los siguientes:

- Resistivas (Hornos eléctricos (resistencia), iluminación, incandescente, etc.)
- Inductiva (Motores, transformadores, etc.)
- Capacitivas (Capacitivas para corrección de F.P.) (Chávez Negrete, 2010, p. 5).

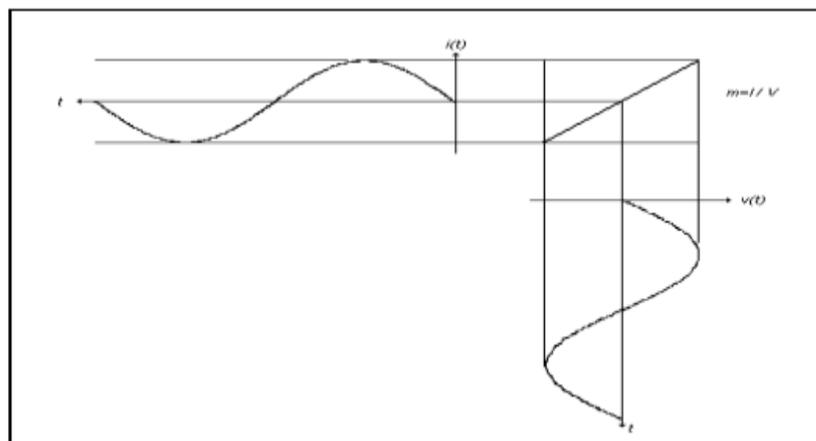


Figura 2. 12: Grafica de una onda típica de una carga lineal

Fuente: (Téllez Ramírez, s. f., p. 7)

2.6 Cargas no lineales

“En las redes eléctricas los sistemas no lineales generalmente están representados por los semiconductores de potencia y la saturación de los núcleos de los transformadores” (Carreño et al., 2010, p. 79).

“En una red trifásica con uno o más sistemas no lineales, estos sistemas toman de la red corrientes no sinusoidales. Bajo este esquema de funcionamiento las tensiones en los nodos están distorsionadas y es - conveniente representarlas por medio de su espectro” (Carreño, Plata, Wandurraga, & Gualdrón, 2010, p. 82).

Los sistemas eléctricos de corriente alternan son diseñados para operar con tensiones y corrientes sinusoidales. Sin embargo, las cargas no lineales y/o variantes con el tiempo distorsionan las formas de onda de tensión y corriente en estado estable provocando la aparición de las componentes armónicas. El análisis de la generación y propagación de tales componentes a través del sistema eléctrico se denomina flujo de potencia armónica. (Carreño et al., 2010, p. 77)

En los circuitos en los que su curva corriente – voltaje no es lineal, el voltaje aplicado no es proporcional a la corriente, resultando una señal distorsionada con respecto a la senoidal. La distorsión armónica en los sistemas eléctricos es provocada por las cargas no lineales, contaminando la red y pudiendo afectar incluso a otros usuarios que únicamente posean cargas lineales. Los mayores generadores de este tipo de cargas son aquellos grupos de cargas electrónicas monofásicas (ordenadores, impresoras, fotocopiadoras, etc.), que son conectadas entre la fase y el neutro de un sistema Delta-Estrella en 440/220 VCA. (Téllez Ramírez, s. f., p. 7).

Las cargas no lineales son aquellas que su impedancia varía durante el ciclo de voltaje, es decir, la onda sinusoidal de corriente no es de igual magnitud o forma que la onda sinusoidal de voltaje, durante el periodo de tiempo medido, así como se muestra en la figura 2.13 la forma de onda distorsionada típica de una carga no lineal.

Ejemplos:

- De arco (Soldadura, Hornos de arco, iluminación, fluorescente)
- Saturables (Transformadores y reactores)

- Electrónicas (Fuentes de poder) (Sector electricidad, 2014, p. 6)

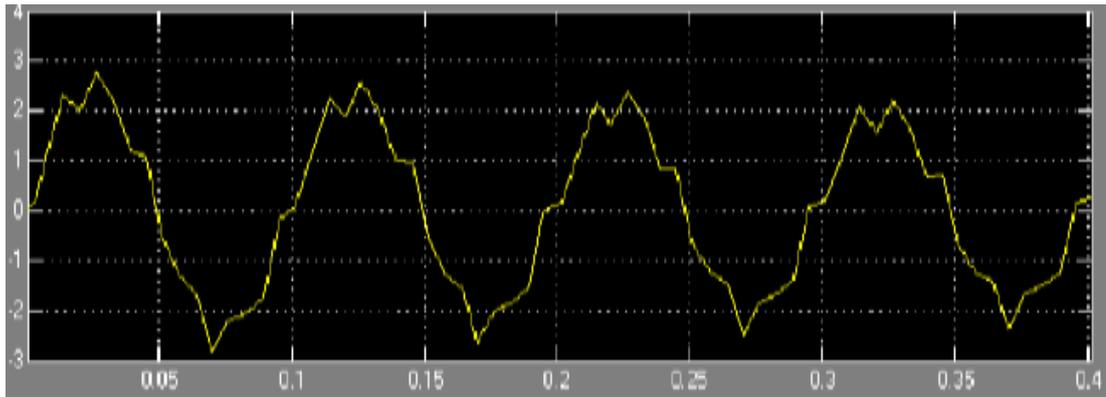


Figura 2. 13: Carga no lineal en la que la corriente y el voltaje no son proporcionales

Fuente: (Téllez Ramírez, s. f., p. 7)

Adicionalmente los sistemas eléctricos reales cuentan con cargas no lineales que a pesar de ser alimentadas con un voltaje sinusoidal absorben una corriente no sinusoidal originando distorsiones armónicas que tienen efectos en la vida útil de los equipos industriales, y que también pueden afectar las mediciones arrojadas por los equipos de medida, en la siguiente figura 2.14, se presenta las diferentes formas de onda en función de la carga (Urrego et al., 2015, p. 42).

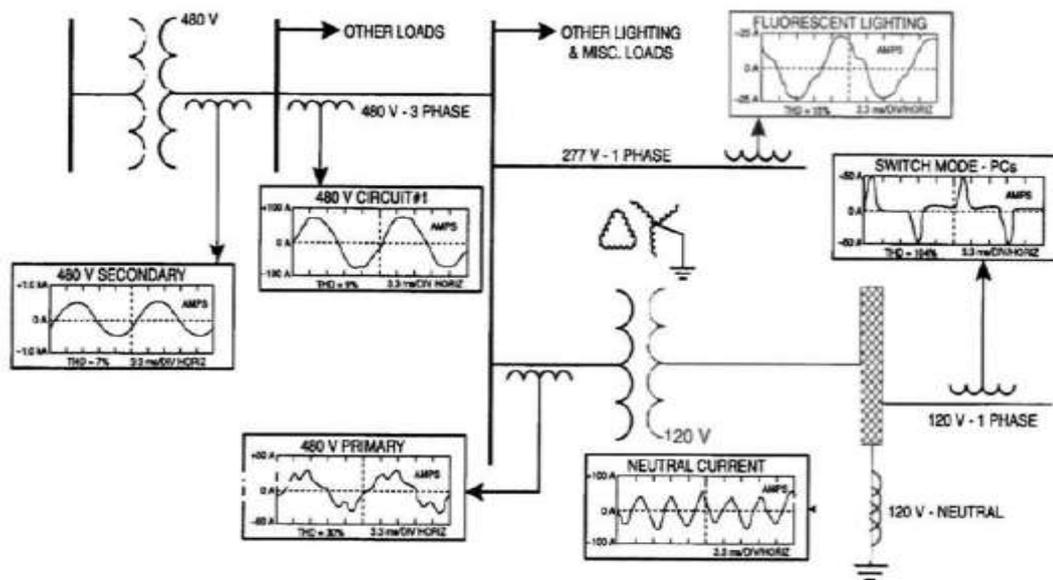


Figura 2. 14: Ejemplos de distribución de niveles de armónicos

Fuente: (Sector electricidad, 2014, p. 8)

Los efectos nocivos producidos por el flujo de armónicos son cada día más significativos en los sistemas eléctricos, dependiendo de la intensidad relativa de las fuentes emisoras y se resumen en:

- Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos de regulación, tanto de potencia como de control.
- Mal funcionamiento en dispositivos electrónicos de protección y medición.
- Interferencias en sistemas de comunicación y telemando.
- Sobre calentamiento de los equipos eléctricos (motores, transformadores, generadores, etc.) y el cableado de potencia con la disminución consecuente de la vida útil de los mismos, e incremento considerable de pérdidas de energía.
- Fallo de capacitores de potencia.
- Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar accidentes eléctricos, fallas destructivas de equipos de potencia o mal funcionamiento. (Esparza González, Mata Guerrero, & Castañeda Ramos, 2006)

2.7 Perturbaciones en los sistemas eléctricos

Los diferentes tipos de perturbaciones que afectan la calidad de la onda eléctrica tienen una gran importancia en la industria actual. Definir con exactitud las causas u orígenes de las perturbaciones que se propagan por la red es un apartado complejo que necesita siempre de un correcto monitoreo y análisis con el propósito de proponer acciones correctoras. Los efectos nocivos de una de una deficiente calidad de la onda pueden manifestarse de muchas formas, unas más perceptibles físicamente que otras. (Meléndez Frigola, Herraiz Jaramillo, & Colomer Llinás, 2005, p. 92)

Las perturbaciones electromagnéticas se han clasificado en tres tipos, según la norma IEEE Estándar 1159 de 1995: variaciones en el valor RMS de la tensión o la corriente, perturbaciones de carácter transitorio

y deformaciones de la forma de onda. Dentro de estos tipos, las perturbaciones han sido categorizadas en: transitorios, variaciones de corta duración, variaciones de larga duración, desbalances de tensión o corriente, distorsión en la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de la frecuencia. (Jaramillo Matta, 2015, p. 41)

La siguiente gráfica 2.15, muestra los tipos y categorías de las perturbaciones que afectan la calidad de onda senoidal, los rangos de espectro de frecuencia, el tiempo de duración y la magnitud de la tensión.

Categoría	Espectro de frecuencia (típico)	Duración (típico)	Magnitud de la tensión (típica)
1. Transitorios			
1.1. Impulsivos			
1.1.1. Nanosegundos	tr = 5 ns	< 50 ns	
1.1.2. Microsegundos	tr = 1 µs	50 ns – 1 ms	
1.1.3. Milisegundos	tr = 0,1 ms	> 1 ms	
1.2. Oscilatorios			
1.2.1. Frecuencia baja	< 5 kHz	0,3 – 50 ms	0 – 4 p.u.
1.2.2. Frecuencia media	5 – 500 kHz	20 ms	0- 8 p.u.
1.2.3. Frecuencia alta	0,5 – 5 MHz	5 ms	0 – 4 p.u.
2. Variaciones de corta duración			
2.1. Instantáneas			
2.1.1. Sag (Dip)		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u.
2.1.2. Swell		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u.
2.2. Momentáneas			
2.2.1. Interrupción		0,5 ciclos – 3 s	< 0,1 p.u.
2.2.2. Sag (Dip)		30 ciclos – 3 s	0,1 – 0,9 p.u.
2.2.3. Swell		30 ciclos – 3 s	1,1 – 1,8 p.u.
2.3. Temporales			
2.3.1. Interrupción		3 s – 1 min	< 0,1 p.u.
2.3.2. Sag (Dip)		3 s – 1 min	0,1 – 0,9 p.u.
2.3.3. Swell		3 s – 1 min	1,1 – 1,8 p.u.
3. Variaciones de larga duración			
3.1. Interrupción sostenida		> 1 min	0,0 p.u.
3.2. Subtensión		> 1 min	0,8 – 0,9 p.u.
3.3. Sobretensión		> 1 min	1,1 – 1,2 p.u.
4. Desequilibrio de tensión			
		Estado estacionario	0,5 – 2%
5. Distorsión de onda			
5.1. Componente D.C.		Estado estacionario	0 – 0,1%
5.2. Armónicos	0 – 100 armónicos	Estado estacionario	0 – 20%
5.3. Interarmónicos	0 – 6 kHz	Estado estacionario	0 – 2%
5.4. Notch	> 10 kHz	Estado estacionario	
5.5. Ruido	Banda ancha	Estado estacionario	0 – 1%
6. Fluctuaciones de tensión < 25 Hz (Parpadeo-Flicker)			
		Intermitente	0,1 – 7%
7. Variaciones de la frecuencia del sistema			
		< 10 s	

Figura 2. 15: Tipos y categorías de perturbaciones que afectan a la calidad de las ondas según IEEE Std. 1159-1995

Fuente: (Meléndez Frigola et al., 2005, p. 93)

2.7.1 Perturbaciones transitoria

El estándar IEC 6100-4-30 (1) define una perturbación transitoria como “un fenómeno o una magnitud que varia ente dos regimenes permanentes consecutivos durante un intervalo de tiempo relativamente corto comparado con la escala de tiempos considerada” Una perturbación transitoria es por tanto una desviación de corta duración, normalmente inferior a un ciclo de la frecuencia fundamental, de la forma de onda normal de la tensión o de la corriente. (Matilde de Apráiz, 2013, p. 15)

Los huecos de tensión son perturbaciones de corta duración, no repetitivas o transitorias, se caracterizan por una tensión residual referida a la tensión inicial, denominada profundidad, y una duración temporal.(Jaramillo Matta, 2015, p. 41)

2.7.1.1 Perturbaciones transitorias impulsivas

Un transitorio impulsivo no provova alteraciones en las condiciones de estado estable de tension o corriente, su polaridad es unidireccional, esto es, positiva o negativa como muestra la figura 2.16. Debido a la falta de frecuencia un transitorio impulsivo es atenuado rápidamente al recorrer la resistencia presente de los componentes del sistema y no se propagan muy lejos del lugar donde fueron generados. Son considerados transitorios de origen atmosfericos y son tambien llamados impulsos atmosféricos. Como principal efecto de este disturbio tenemos que puede causar una falla inmediata en aislamiento de los equipos y fuentes electrónicas Figura 2.16.(Castañeda Ordóñez, 2009, p. 15)

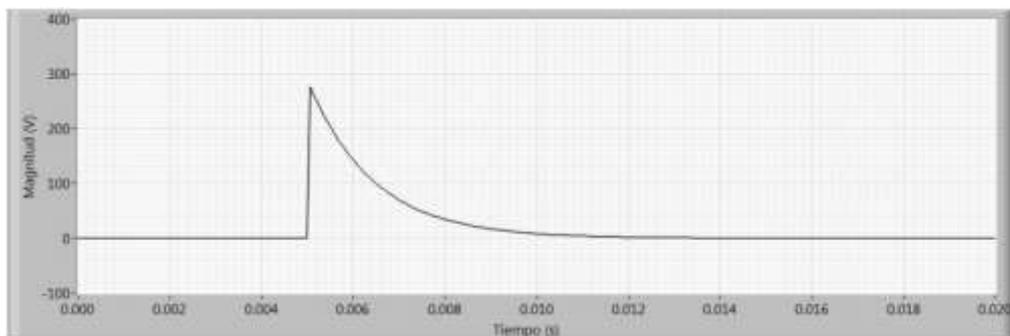


Figura 2. 16: Transitorio impulsivo

Fuente: (Matilde de Apráiz, 2013, p. 16)

Los transitorios impulsivos se caracterizan normalmente por su tiempo de subida y su duración, tal como se definen en el estándar IEEE C62,41-1991 (3), y se indica en la figura 2.17. En el tiempo de subida es el tiempo entre el 30% y el 90% del valor pico, ($t_{90}-t_{30}$). La duración se define como el tiempo entre el origen virtual el punto donde corta la recta que pasa por los puntos de 30% y 90% en la subida, con la línea de $V=0$. (Matilde de Apráiz, 2013, p. 16)

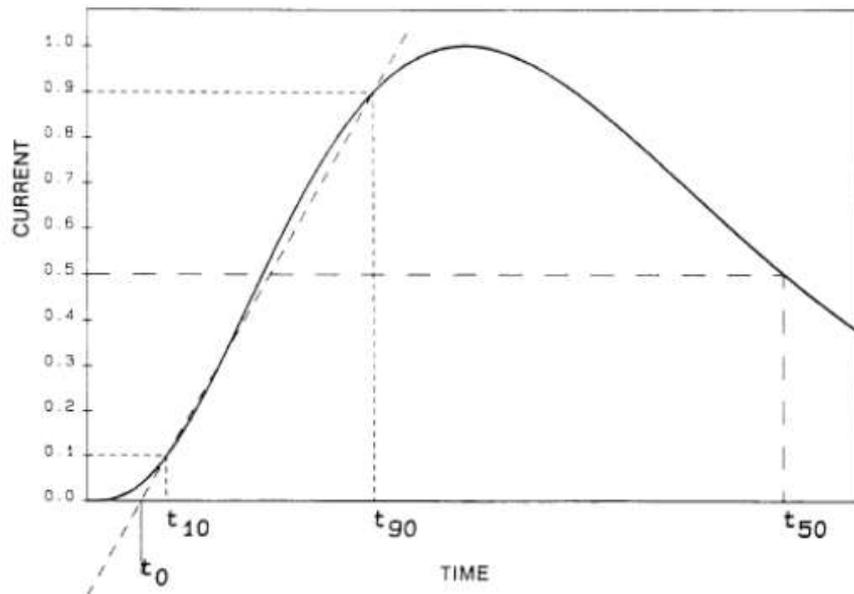


Figura 2. 17: Definición de la duración de un transitorio impulsivo.

Fuente: (Matilde de Apráiz, 2013, p. 16)

2.7.1.2 Perturbaciones transitorias oscilatorias

Un transitorio oscilatorio consiste de variaciones de tensión y corriente cuyos valores instantáneos cambian de polaridad rápidamente. Normalmente son resultado de modificaciones de la configuración de un sistema como por ejemplo, maniobras en líneas de transmisión, enclavamiento de banco de capacitores. Como el transitorio impulsivo el transitorio oscilatorio puede causar la quema o daños en los equipos eléctricos y electrónicos. (Castañeda Ordóñez, 2009, p. 16)

Los transitorios oscilatorios de alta frecuencia se deben casi siempre a algún tipo de switching y pueden ser el resultado de la respuesta local del sistema a un transitorio impulsivo. Los transitorios oscilatorios de media frecuencia tienen unas duraciones de algunas decenas de microsegundos y son normalmente el resultado de la energización de condensadores. También se puede producir como respuesta a un transitorio impulsivo. Por último los transitorios de baja frecuencia son aquellos con componentes de frecuencia inferiores a 5kHz y con duraciones entre 0.3 ms y 50 ms. Este tipo de transitorio se produce normalmente en los sistemas de distribución por la conexión de banco de condensadores, figura 2.18. Estos producen tensiones oscilatorias típicamente en el rango de 300Hz a 900Hz, con magnitudes típicas en el rango de 1.3 p.u a 1.5 p.u, pudiendo alcanzar valores de hasta 2 pu. (Matilde de Apráiz, 2013, p. 18)

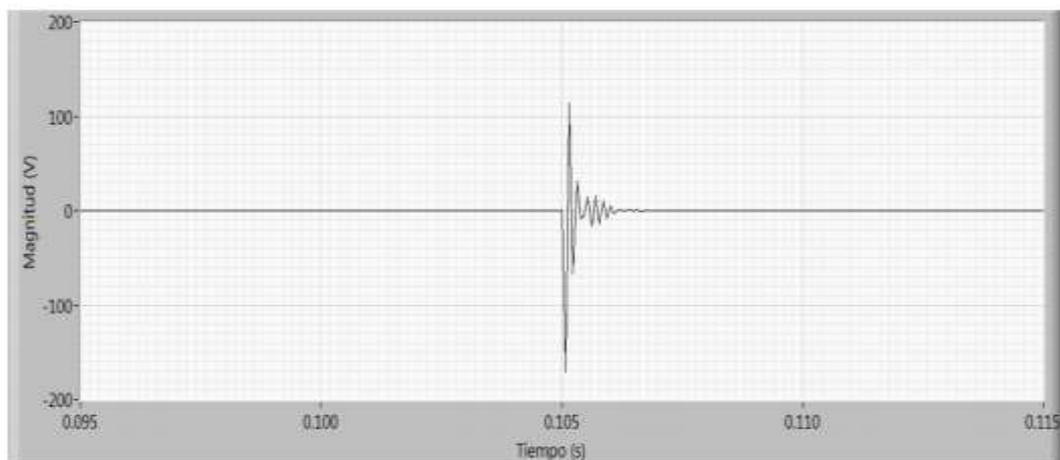


Figura 2. 18: Transitorio oscilatorio amortiguado

Fuente: (Matilde de Apráiz, 2013, p. 17)

2.8 Variaciones de corta duración

Las variaciones de tensión de corta duración generalmente se originan por las fallas de un sistema eléctrico, energización de grandes bloques de carga. Dependiendo de la localización de la falla y de las condiciones de operación del sistema, la falla puede ocasionar elevación de tensión (Swell), depresión de tensión (Sag) o una interrupción. (Holguín & Gómez Coello, 2010, p. 27)

2.8.1 Depresión de tensión (SAG)

La depresión de tensión es una reducción momentánea del valor eficaz de la tensión al orden de 0,1 a 0,9 (p.u), con una duración entre 0,5 ciclos a 1 minuto, ver figura 2.19 .Generalmente está falla es producida por arranque de grandes motores, por lo que pueden provocar la interrupción de procesos productivos dentro de la industria.(Holguín & Gómez Coello, 2010, p. 28)

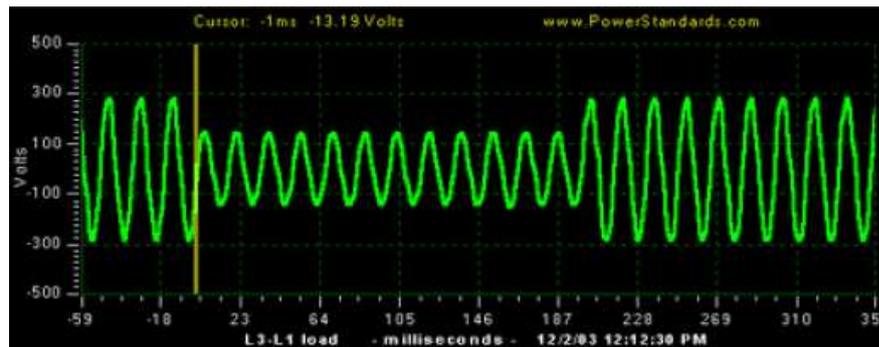


Figura 2. 19: Reducción momentánea del valor eficaz de tensión.

Fuente: (Holguín & Gómez Coello, 2010, p. 28)

2.8.2 Salto de tensión (SWELL)

El salto de tensión es caracterizado por el incremento del valor eficaz de la tensión en el orden de 1,1 p.u a 1,8 (p.u), del voltaje nominal ver figura con una duración entre 0,5 a 1 minuto. El salto de tensión es generalmente asociado a condiciones de falla desequilibrada en un sistema eléctrico. El Voltaje SWELL puede causar degradación y falla inmediata de aislamiento de los equipos eléctricos y fuentes electrónicas.(Holguín & Gómez Coello, 2010, p. 29)

2.9 Variaciones de larga duración

Las variaciones de larga duración comprenden desviaciones del valor RMS a frecuencia de potencia (60 Hz) por un tiempo mayor a 1 minuto. El estándar ANSI C84.1, por ejemplo, especifica las tolerancias esperadas para voltajes en estado estacionario, las cuales son de 0.9 p.u mínimo y 1.1 p.u máximo. Una variación de voltaje es así considerada como de larga duración cuando los límites ANSI son excedidos por más de un minuto. Las variaciones de voltaje de corta duración son originadas por

condiciones de falla, usualmente cortocircuitos en el sistema. Cada tipo de variación puede ser designada como instantánea, momentánea o temporal, dependiendo de la duración de la variación. (Sánchez, 2009, p. 40)

2.9.1 Interrupción sostenida

Una interrupción ocurre cuando el voltaje de alimentación o la corriente de carga disminuyen a menos de 0.1 p.u (10% del voltaje nominal). Las interrupciones pueden deberse a fallas en el sistema de potencia, fallas en el equipo, o a mal funcionamiento de los controles, figura 2.20. Las interrupciones son medidas por su duración (IEEE, 1999) y pueden ser instantáneas (entre 0.5 ciclos y 30 ciclos), momentáneas (entre 30 ciclos y 3 segundos), temporales (entre 3 segundos y 1 minuto) o sostenidas (mayores a 1 minuto). (Sánchez, 2009, p. 44)

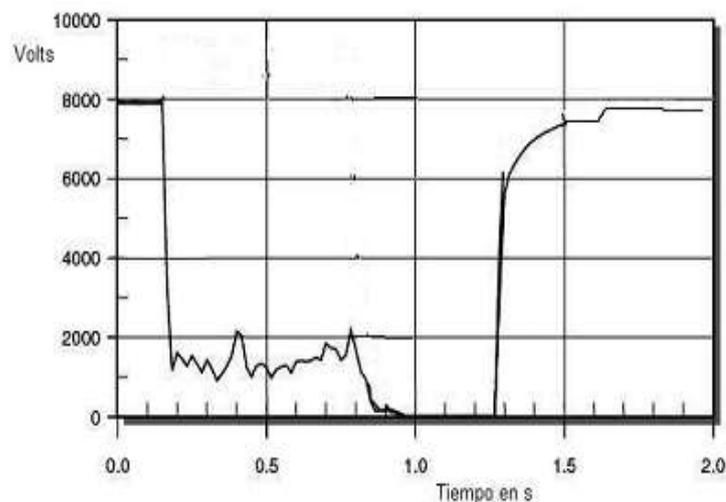


Figura 2. 20: Interrupción sostenida debida a una falla

Fuente:(Sánchez, 2009, p. 45)

“Se considera una interrupción sostenida a la reducción de la tensión de alimentación al valor de cero por un tiempo superior a un minuto. Son de naturaleza permanente y requieren intervención manual para restablecimiento de la energía eléctrica del sistema” (Castañeda, 2009, p. 20).

“Una interrupción, ya sea instantánea, momentánea, temporal o sostenida, puede causar trastornos, daños y tiempo de inactividad, desde el usuario residencial hasta el usuario industrial” (Seymour & Horsley, 2010, p. 9).

2.9.2 Subtensión

Subtensión o también conocido como voltaje sag que es una reducción en la magnitud del voltaje de alimentación seguida por una recuperación después de un corto período de tiempo Véase la figura 2.21. Cuando en realidad se habla de una reducción en la magnitud del voltaje de duración finita (o voltaje dip en terminología IEC) se mantiene un punto de debate, aunque la definición oficial es clara respecto a esto. De acuerdo a la IEC, un hueco de tensión (voltaje dip) es una reducción súbita en el voltaje de alimentación a un valor entre 90% y 1% del voltaje nominal, seguida por una recuperación entre 10 ms y 1 minuto después. (Vargas, 2005, p. 17)

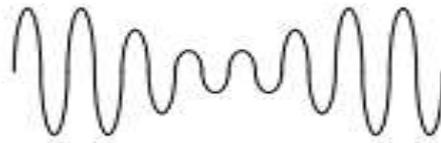


Figura 2. 21: Bajada de tensión en intervalos cortos de tiempo

Fuente:(Seymour & Horsley, 2010, p. 10)

Las subtensiones son el resultado de problemas de larga duración que crean bajadas de tensión. La expresión “bajada de tensión” ha sido utilizada comúnmente para describir este problema, y ha sido reemplazada por el término subtensión. La bajada de tensión es ambigua porque también se refiere a la estrategia de suministro eléctrico comercial durante periodos de alta demanda prolongada. En la figura 2.22 se muestra la característica típica de la onda de voltaje que presenta una bajada de tensión la cual es considerada como de larga duración en el tiempo. Las subtensiones pueden crear el sobrecalentamiento de motores y pueden conducir a la falla de cargas no lineales. (Seymour & Horsley, 2010, p. 11)



Figura 2. 22: Bajada de tensión de larga duración en el tiempo

Fuente: (Seymour & Horsley, 2010, p. 11)

Para la IEEE una caída de voltaje es únicamente una depresión (SAG) si el voltaje de duración del sag está entre 10% y 90% del voltaje nominal. Los voltajes sags son causados mayormente por fallas de cortocircuitos en el sistema y por el arranque de grandes motores. (Vargas, 2005, p. 16)

2.9.3 Sobretensión

“Estos tipos de sobretensiones que se muestra en la figura 2. 23, pueden afectar a las cargas y a las instalaciones eléctricas” (Schneider Electric, 2010, p. 304)

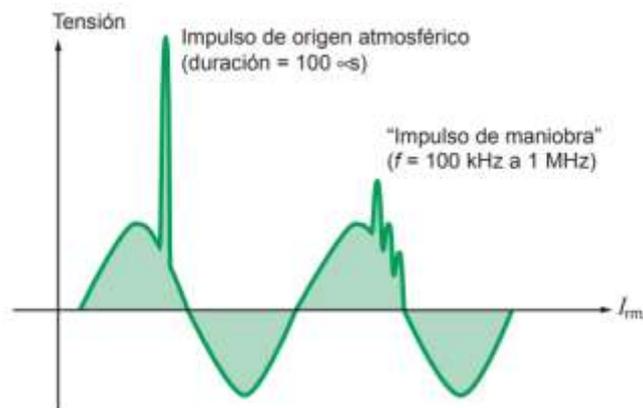


Figura 2. 23: Grafica de la onda cuando sufre incrementos de tensión momentáneos

Fuente:(Schneider Electric, 2010, p. 304)

Una oleada de tensión es la forma inversa de una bajada de tensión, y tiene un aumento en la tensión de C.A, con una duración de 0,5 ciclos a 1 minuto. En el caso de los aumentos de tensión, son causas

comunes de conexiones neutras de alta impedancia, las reducciones repentinas de carga (especialmente de cargas grandes) y una falla monofásica sobre un sistema trifásico, la siguiente figura 2.24, muestra un ejemplo típico de sobretensión (Seymour & Horsley, 2010, p. 11)

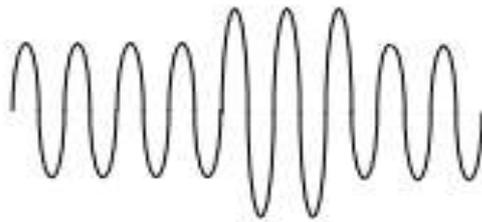


Figura 2. 24: Aumento de tensión durante intervalos cortos de tiempo

Fuente:(Seymour & Horsley, 2010, p. 11)

Las sobretensiones pueden ser el resultado de problemas de larga duración que crean aumentos de tensión. Una sobretensión puede considerarse un aumento de tensión prolongado. Las sobretensiones también son comunes en áreas donde los valores de referencia de los taps del transformador de suministro están mal configurados y se han reducido las cargas, como muestra la figura 2.25, en la que durante periodos largos de tiempo el voltaje se mantiene en incremento respecto al voltaje inicial nominal. Esto es común en regiones estacionales donde las comunidades reducen el uso de energía fuera de temporada y aún se está suministrando la capacidad de energía para la parte de la estación de alto uso, aun cuando la necesidad de suministro es mucho más pequeña. (Seymour & Horsley, 2010, p. 12)

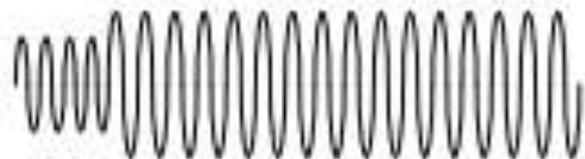


Figura 2. 25: Aumento de tensión durante intervalos largos de tiempo

Fuente: (Seymour & Horsley, 2010, p. 12)

2.9.4 Tensiones trifásicas (tensión equilibrada, desequilibrio de tensión)

Tensión equilibrada: Las tensiones trifásicas se producen con un generador (o alternador) trifásico de C.A, la apariencia de cuya sección transversal se muestra en la figura 2.26. Este generador consta básicamente de un imán giratorio (llamado *rotor*) rodeado por un devanado estacionario (llamado *estator*). Tres de vanados o bobinas independientes con terminales $a-a'$, $b-b'$, y $c-c'$, se disponen físicamente alrededor del estator a 120° de distancia entre sí. (Alexander & Sadiku O., 2019, p. 508)

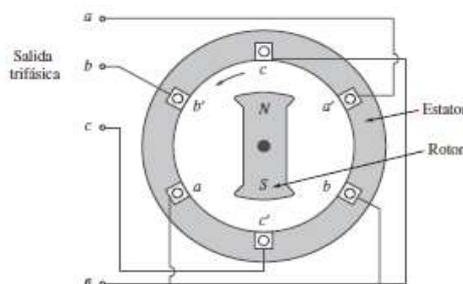


Figura 2. 26: Sección transversal de un generador trifásico.

Fuente: (Alexander & Sadiku O., 2019, p. 508)

Las tensiones de fase balanceadas son de igual magnitud y están desfasadas 120° entre sí, la figura 2.27 muestra las tres fases balanceadas y la secuencia de fase positiva.

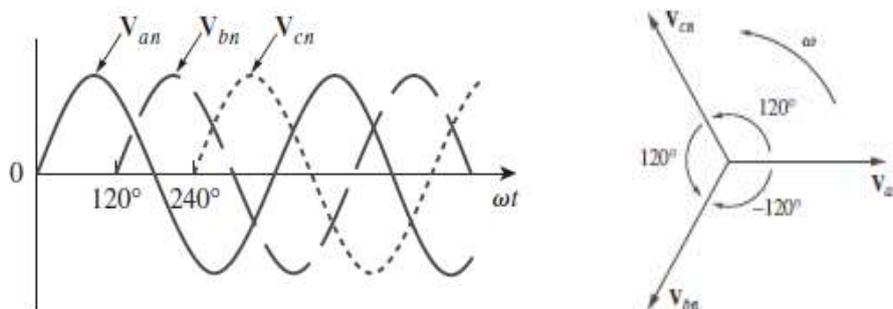


Figura 2. 27: Tensión trifásica equilibrada y secuencia de fase positiva

Fuente: (Murillo, 2011, p. 50)

Un sistema trifásico ideal, libre de desequilibrios, considerando a fase A como referencia en secuencia de fases positiva, es dado por: (Murillo, 2011, p. 50)

$$V_a = 1.0 \angle 0^\circ$$

$$V_b = 1.0 \angle 120^\circ$$

$$V_c = 1.0 \angle -120^\circ$$

Desequilibrio de tensión: El desequilibrio en un sistema eléctrico trifásico en condiciones donde las tres fases presentan diferentes valores de tensión en módulo y desfasaje angular entre fases diferentes de 120° eléctricos.

El desequilibrio es definido como la razón entre la componente de secuencia negativa en los sistemas de potencia es el resultado del desequilibrio de carga lo cual causa un flujo de corriente de secuencia negativa. Un desequilibrio de tensión puede ser estimado como el máximo desvío de la medida de las tensiones de las tres fases dividido por la media de las tensiones expresado en formas porcentaje como muestra la figura 2.28. La principal fuente de desequilibrio de tensión es la conexión de cargas monofásicas en circuitos trifásicos; anomalías en bancos de capacitores. (Castañeda, 2009, p. 22)

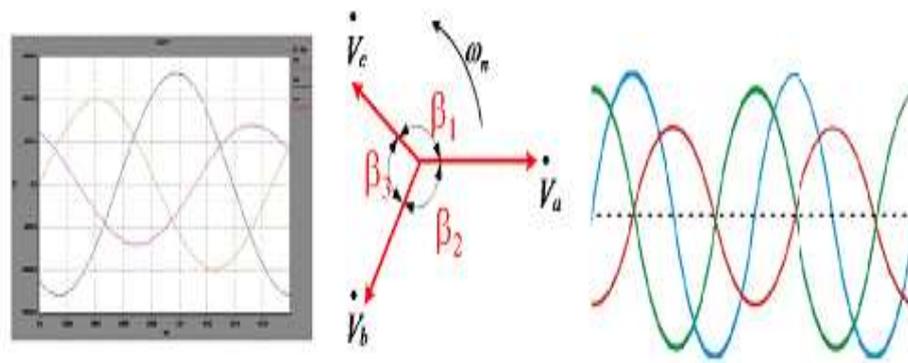


Figura 2. 28: Tensiones desequilibradas

Fuente(Murillo, 2011, p. 51)

2.9.5 Armónicos, distorsión de la forma de onda

$$Distorsion\ armonica\ total\ (THD) = \frac{I_H}{I_F}$$

$$Distorsion\ armonica\ total\ (THD) = \frac{E_H}{E_F}$$

Donde:

I_H = Corriente armónica

I_F = Corriente fundamental

E_H = Voltaje armónico

E_F = Voltaje fundamental

“En estas expresiones matemáticas vemos que los voltajes y corrientes sinusoidales tienen una distorsión armónica total (THD) de cero” como muestra la figura 2.29. (Wildi, 2007a, p. 849)

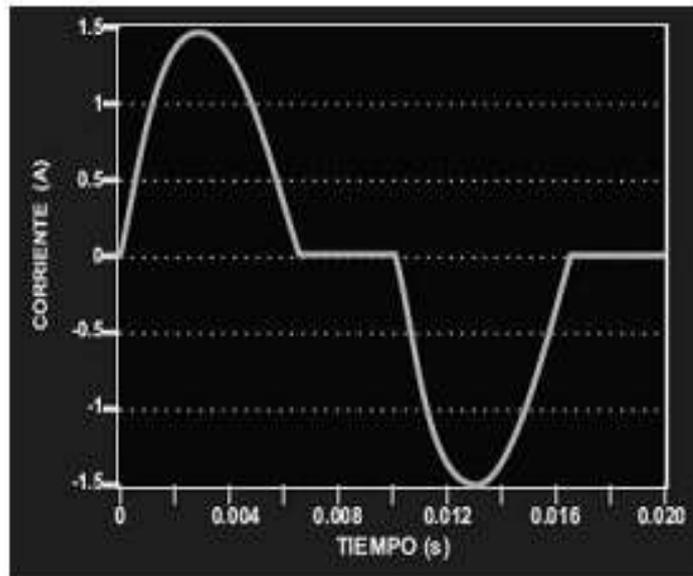


Figura 2. 29: Distorsión armónica total

Fuente: (Sánchez, 2009, p. 46)

Offset de Corriente Directa: La presencia de un voltaje de CD o de una corriente de CD en un sistema de CA es llamado offset de CD. Esto puede ocurrir por disturbios geomagnéticos o por asimetría de convertidores electrónicos de potencia. La corriente directa en redes de CA puede tener un efecto indeseable al polarizar núcleos de transformadores de manera que se saturan en operación normal, figura 2.30. Lo anterior origina mayor calentamiento y disminución de la vida del transformador. La corriente

directa también puede originar erosión electrolítica de los electrodos de tierra y otros conectores. (Sánchez, 2009, p. 47)

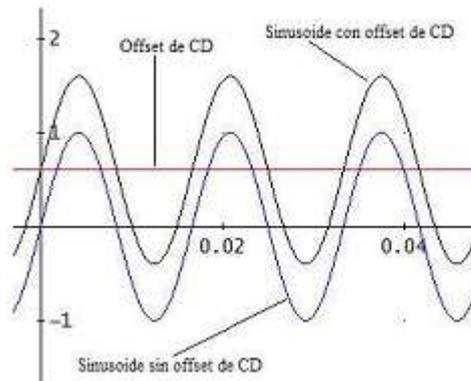


Figura 2. 30: Onda sinusoidal con offset de CD

Fuente: (Sánchez, 2009, p. 47)

La distorsión de un voltaje o corriente puede atribuirse a los armónicos que contiene. Un armónico es cualquier voltaje o corriente cuya frecuencia es un múltiplo entero de (2,3, 4,6, etc., veces) la frecuencia de línea. Considere un conjunto de ondas senoidales en el que la frecuencia más baja es f y todas las demás son múltiplos enteros de f . Por definición, la onda seno que tiene la frecuencia más baja recibe el nombre de fundamental y las otras el de armónicos, figura 2.31.(Wildi, 2007b, p. 24)

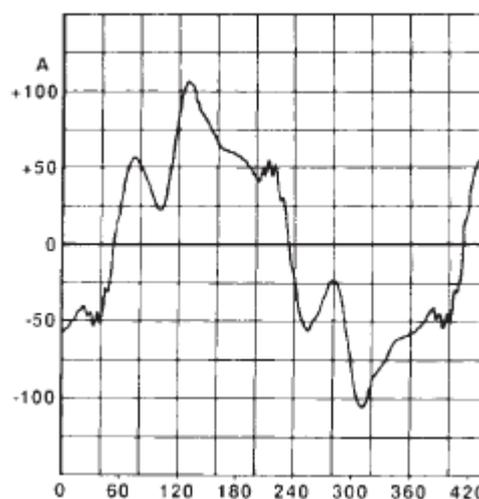


Figura 2. 31: Corriente a 60 Hz severamente distorsionada en un mando electrónico

Fuente: (Wildi, 2007b, p. 24)

Las formas de onda periódicamente distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de componentes armónicas. La distorsión armónica se origina por las características no lineales de dispositivos y cargas en el sistema de potencia. El voltaje de la carga $V_a(t)$ puede ser reemplazado por las tres componentes derivadas de la transformación de Fourier: (Sánchez, 2009, p. 47)

$$V_a(t) = V_{al}(t) + V_{ah}(t) + V_{a0}$$

Donde la componente fundamental es igual a:

$$V_{al}(t) = \sqrt{2} V_{al} \text{sen}(\omega t + \theta_l)$$

El contenido armónico se calcula como:

$$V_{ah}(t) = \sum_{h=2}^n \sqrt{2} V_{ah} \text{sen}(h\omega t + \theta_h)$$

Y la componente de CD (offset de CD):

$$V_{a0} = V_{CD} = \frac{1}{T} \int_0^T V_a(t) dt$$

La aparición de muescas (notching) es un disturbio periódico de voltaje originado por la operación normal de dispositivos de electrónica de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra. Dado que este fenómeno ocurre de manera continua, puede ser caracterizado a través del espectro armónico del voltaje afectado. Un ejemplo de aparición de muescas en el voltaje se tiene en un convertidor trifásico que produce corriente de CD continua figura 2.32. Las muescas ocurren cuando la corriente conmuta de una fase a otra. Durante este periodo, existe un

cortocircuito momentáneo entre dos fases, llevando al voltaje tan cerca de cero como lo permitan las impedancias del sistema. (Sánchez, 2009, p. 48)

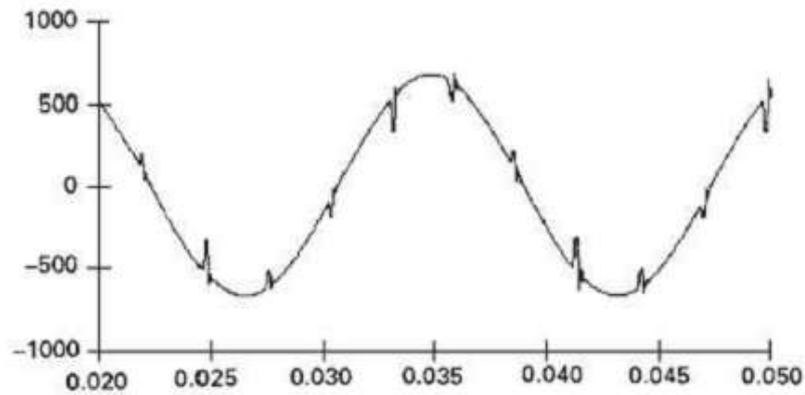


Figura 2. 32: Ejemplo de aparición de muescas en el voltaje (notching) originadas por un convertidor trifásico

Fuente: (Sánchez, 2009, p. 48)

El ruido en los sistemas de potencia puede ser causado por dispositivos de electrónica de potencia, circuitos de control, equipos de arco, cargas con rectificadores de estado sólido y fuentes de alimentación conmutadas (switcheadas). Los problemas de ruido son frecuentemente incrementados por la puesta a tierra inadecuada. Básicamente, el ruido consiste de cualquier distorsión no deseada de la señal de potencia que no puede ser clasificada como distorsión armónica o como transitorio. (Sánchez, 2009, p. 49)

2.10 Normativa de los armónicos

Una de las formas de reducción de armónicos es limitar las emisiones de las contaminaciones, estas no son iguales para los países y por lo general no se miden con los mismos parámetros. Las normas establecen límites como la distorsión individual de voltaje IHD, distorsión individual de corriente IHDI, distorsión total de voltaje THDV, distorsión total de corriente THDI. El objetivo de las normas es controlar los niveles de distorsión de los voltajes y corrientes a niveles que los equipos conectados al sistema puedan soportar, garantizar que los clientes tengan una forma de

onda adecuada a sus necesidades, limitar el nivel de distorsión que un cliente puede introducir a la red, figura 2.33. (Guachamin & Naranjo, 2011, p. 26)

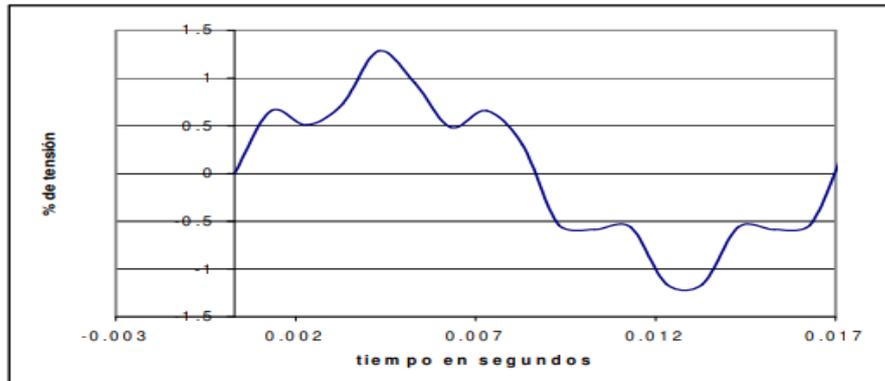


Figura 2. 33: Onda con contenido armónico.

Fuente: (Arcila, 2016, p. 2)

El teorema de Fourier dice que toda onda periódica no sinusoidal puede ser descompuesta como la suma de ondas sinusoidales, mediante la aplicación de la serie de Fourier, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones

- Que la integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- Que la función posea un número finito de discontinuidades en un periodo.
- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

Cualquier función $F(x)$ con periodo 2π tiene su representación en series de Fourier de acuerdo con la siguiente expresión: (Arcila, 2016, p. 2)

$$Y = F(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \text{sen}(nx) + B_n \text{cos}(nx)]$$

En donde:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x) dx$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \text{sen}(nx) dx$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \text{cos}(nx) dx$$

$$[A_n \text{sen}(nx) + B_n \text{cos}(nx)] = R_n \text{sen}(nx + \phi_n)$$

$$R_n = \sqrt{[A_n^2 + B_n^2]}$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{B_n}{A_n} \right)$$

Con el uso de estas ecuaciones se pueden encontrar los armónicos de las ondas más comunes en los sistemas de potencia, de distribución o industriales. En la siguiente figura 2. 34 se muestra la clase de onda y su respectiva descomposición armónica. (Arcila, 2016, p. 2)

CLASE DE ONDA	DESCOMPOSICIÓN ARMÓNICA
Onda seno	$Y = a \text{sen } \theta$
Rectificación de media onda	$Y = a/\pi + 0.5 \text{sen } \theta - (2/1.3) \text{cos } 2\theta - (2/3.5\pi) \text{cos } 4\theta \dots$
Rectificación de onda completa	$Y = 2a/\pi + (2/1.3) \text{cos } 2\theta - (2/3.5\pi) \text{cos } 4\theta - (2/5.7) \text{cos } 6\theta \dots$
Rectificación de M fases	$Y = (am/\pi) \text{sen } \pi\theta/m + (2/(m^2-1)) \text{cos } m\theta - (2/(4m^2-1)) \text{cos } 2\theta + (2/(9m^2-1)) \text{cos } 3m\theta \dots$
Onda triangular	$Y = 8a/\pi^2 [\text{sen } \theta - (1/9) \text{sen } 3\theta + (1/25) \text{sen } 5\theta + (1/49) \text{sen } 7\theta \dots$
Onda rectangular	$Y = 4a/\pi [\text{sen } \theta - (1/3) \text{sen } 3\theta + (1/5) \text{sen } 5\theta + (1/7) \text{sen } 7\theta \dots$
Onda de tres niveles	$Y = 3.4641a/\pi [\text{cos } \theta - (1/5) \text{cos } 5\theta + (1/7) \text{cos } 7\theta + (1/11) \text{sen } 11\theta \dots$

Figura 2. 34: Armónicos de las ondas más comunes

Fuente: (Arcila, 2016, p. 3)

“A continuación el análisis de las principales normas que gobiernan los límites de armónicos, entre las cuales se tiene” (Garduño, 2015, p. 1).

- IEEE 519-1992
- EN 50160
- IEC 6100032
- IEE 519
- CONELEC 004/01

2.10.1 IEEE standard 519-1992

La filosofía detrás de esta norma busca limitar la inyección armónicos de los clientes individuales de manera que no creen voltajes inaceptables de distorsión bajo las características normales del sistema y limitar la distorsión armónica total del voltaje proporcionado por el proveedor. Los límites de distorsión de voltaje y corriente deben usarse como valores de diseño de los sistemas eléctricos para “el peor de los casos” en condiciones de operación normales que duran más que 1 hora. Para periodos más cortos, como los arranques, los límites pueden ser excedidos en un 50%. Este estándar divide la responsabilidad de limitar las armónicas entre los usuarios finales y las empresas de distribución. Los usuarios finales serán responsables de limitar las inyecciones de corrientes armónicas, mientras que los proveedores serán principalmente responsables de limitar la distorsión de voltaje en la red de distribución. Los límites de corriente y voltaje armónicos para este estándar son analizados en el PCC1. Este es el punto donde otros clientes comparten la misma red o donde pueden conectarse nuevos clientes en el futuro. La norma busca un acercamiento justo de asignación de cuota de límite de armónicos para cada cliente. La norma asigna límites de la inyección de corriente basados en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia, el mismo que está definido por su capacidad de cortocircuito. La relación de cortocircuito está definida como la proporción de corriente de cortocircuito máximo en el PCC

para la máxima demanda de corriente de carga (componente de frecuencia fundamental) en el PCC. La base para limitar las inyecciones armónicas de los clientes individuales es evitar niveles inaceptables de distorsiones de voltaje. Por eso los límites de corriente se establecen de tal manera que las inyecciones armónicas totales para cada cliente individual no excedan la distorsión de voltaje máxima mostrada en la siguiente figura 2.35. (Garduño, 2015, p. 1)

Relación de cortocircuito en el PCC	Voltaje máximo individual de frecuencia armónica (%)	Caso supuesto
10	2.5 -3.0	Sistema dedicado
20	2.0 – 2.5	1 – 2 Clientes grandes
50	1.0 – 1.5	Pocos clientes relativamente grandes
100	0.5 – 1.0	5 - 20 Clientes medianos
1000	0.05 – 0.10	Muchos clientes pequeños

Figura 2. 35: Base para los límites de corrientes armónicas

Fuente:(Garduño, 2015, p. 2)

2.10.2 Norma EN 50160

Esta norma describe las condiciones del suministro de energía desde el punto de entrega al cliente, las características principales de la tensión suministrada por una red de baja y media tensión en condiciones normales de operación. En su documento original dice “esta norma da los límites o los valores de las características de la tensión que todo cliente tiene derecho a esperar, y no los valores típicos en la red general de distribución. Esta norma establece los límites para la amplitud de tensión, frecuencias nominales de tensión, variaciones rápidas de tensión, huecos de tensión, las interrupciones de corta y larga duración, las sobretensiones temporales y

transitorias, desequilibrio de tensión, transmisión de señales por la red, y también los protocolos de medida, para mejor comprensión podemos ayudarnos de la figura 2.36, donde detalla el evento en la tensión de suministro su magnitud y duración. Cabe destacar que la norma EN50160, solo se aplica en condiciones normales de operación e incluye una lista de operaciones en las que los límites no son aplicables debido a eventos externos al sistema eléctrico. (Hiler & Lozada, 2018, p. 19)

Evento en la tensión de suministro	Magnitud	Duración
SAG	90% < 1%	10 ms < 1 minuto
Baja de tensión	90% < 1%	> 1 minuto
Interrupción de suministro	< 1%	< 3 minutos (breve) > 3 minutos (larga)
Sobretensión temporal	> 110%	Relativamente larga
Sobretensión transitoria	> 110%	Algunos milisegundos

Figura 2. 36: Límites según norma EN50160

Fuente:(Hiler & Lozada, 2018, p. 19)

2.10.3 Norma IEC 6100032

En la figura 2. 37, correspondiente a la norma IEC 6100032 nos explica el orden armónico y su categoría clasificándolos en pares e impares todo ello en función de la corriente. Esta norma indica los límites que deben tener las corrientes armónicas, para equipo que sean menor o igual a 16 amperios de

entrada por cada fase. Para los equipos de clase B se utiliza los valores de la tabla multiplicado por un factor de 1.5. (Hiler & Lozada, 2018, p. 19)

Orden armónico	Corriente (A)
Armónicos Impares	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq h \leq 39$	0.25/h
Armónicos Pares	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq h \leq 40$	1.84/h

Figura 2. 37: Límites para equipos de clase A

Fuente:(Hiler & Lozada, 2018, p. 20)

2.10.4 Norma IEEE 519

Se debe asegurar que, en la acometida, la generación de armónicas en corriente se ubique dentro de los límites establecidos, tanto para componentes armónicas individuales como para la Distorsión de Demanda Total TDD, especificándose dichos límites como porcentaje de la demanda promedio de corriente del usuario en lugar de la corriente fundamental instantánea, con el fin de proporcionar una base común de evaluación a lo largo del tiempo. Esta norma hace referencia no solo el nivel

total de armónicos causados por la fuente sino también a su magnitud con respecto a la red de abastecimiento, figura 2.38. El obligatorio resolver este tipo de problemas con lo que respecta a los armónicos ya que por tal motivo se evita fallos transitorios en los equipos... (Téllez Ramírez, 2019)

IEEE 519
Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida

I_{cc}/I_L	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69 \text{ kV}$						
<20	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
20-50	8.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
50-100	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
100-1000	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
>1000	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
<20*	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
20-50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
50-100	6.0%	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%
100-1000	7.5%	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%
>1000	10.0%	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%
$V_n > 161 \text{ kV}$						
<50	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
≥ 50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%

Figura 2. 38: Límites de distorsión armónica en corriente según norma IEEE 519

Fuente:(Téllez Ramírez, 2019)

2.10.5 Normas de CONECEL – 004/01

Mediante la resolución (CONELEC, 2001), se establece que los valores eficaces de los voltajes armónicos individuales y los THD, expresados como porcentaje del voltaje nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límites señalados a continuación. Para efectos de esta regulación se consideran los armónicos comprendidos entre la segunda y la cuadragésima, ambas inclusive, en la ilustración de la figura 2.39, el orden (n) de la armónica y la distorsión armónica total THD

múltiplos de tres con los datos de tolerancias de voltaje o THD en porcentaje respecto al voltaje nominal del punto de medición. (Varela & Alvarado, 2015, p. 25)

ORDEN (n) DE LA ARMONICA Y THD	TOLERANCIA V o THD (% respecto al voltaje nominal del punto de medición)	
	V > 40 KV (otros puntos)	V ≤ 40 KV (trafos de distribución)
Impares no múltiplos de 3		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
> 25	$0.1 + 0.6*25/n$	$0.2 + 1.3*25/n$
Impares múltiplos de tres		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
Pares		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores a 12	0.2	0.5
THD	3	8

Figura 2. 39: Regulación No. CONELEC - 004/01

Fuente: (Varela & Alvarado, 2015, p. 26)

2.11 Calidad de la energía

La definición de calidad de la energía de alguna manera resulta algo indeterminada. Por ejemplo, para el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) define que la calidad de la energía es la

alimentación y puesta de tierra de equipos electrónicos sensibles en una manera que sea adecuado para su operación. Por otra parte, hay quien comenta que la calidad de la energía se entiende cuando la energía eléctrica es suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita asegurar continuidad del servicio sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes. La calidad de la energía es un conjunto de límites eléctricos que permiten que una pieza de un equipo pueda funcionar de la manera prevista sin la pérdida significativa en su rendimiento o en su esperanza de vida. Según los autores, Arellano, Mireles y Samayoa, manifiestan la siguiente definición de calidad de la energía: “Es la ausencia de problemas en la energía, ya que se pueden manifestar en el voltaje, corriente o en la frecuencia desviando los resultados de operación produciendo fallas o mal funcionamiento del equipo del cliente”. (Arellano, Samayoa, & Mireles, 2012, p. 34)

2.11.1 Importancia de la calidad de la energía

Mejorar la calidad de la energía eléctrica no es sinónimo de reducción en la facturación por energía eléctrica, sino, se trata de evitar paros inesperados en la maquinaria que ocasionan retrasos en la producción, desperdicio de la materia prima y avería de los equipos electrónicos que al final representan costos superiores a los de pérdidas en potencia por armónicos y bajo factor de potencia. (Guachamin & Naranjo, 2011, p. 109)

2.11.2 Monitoreo y medición de la calidad de energía

Un sistema básico de calidad de energía debe monitorear los voltajes y corrientes de cada fase. Puede monitorear también los voltajes y corrientes de la línea neutral si se sospecha de cargas o armónicas no balanceadas. Un sistema básico de medición de energía monitoreará el factor de potencia. El monitoreo de calidad de energía y medición de energía permite a las plantas realizar mantenimiento predictivo, manejo de energía,

manejo de costos y control de calidad. Con las mediciones de la calidad de energía se cuantifica las pérdidas de energía asociadas a los armónicos y los desequilibrios, permitiéndole al usuario determinar el origen de las pérdidas de energía en su instalación. (National Instruments, 2019, p. 1)

Los límites establecidos en la norma IEEE 519-1992 deben aplicarse en la acometida, es decir en el punto donde el suministrador entrega la energía al usuario en cuestión y a partir de ahí puede alimentar a otro usuario. La norma puede aplicarse usando el mismo procedimiento por los usuarios para evaluar otros puntos dentro de su instalación, pero diferentes límites de distorsión podrían aplicarse en estos casos ya que aunque en un punto dado los límites se excedan, la interacción de diversas cargas puede producir cancelaciones de armónicas que arrojen valores dentro de los límites en la acometida, figura 2.40.(Téllez Ramírez, 2019)

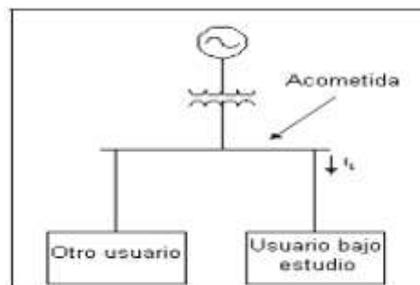


Figura 2. 40: Punto de medición del nivel de armónicas

Fuente: (Téllez Ramírez, 2019)

2.11.3 Analizadores de calidad eléctrica

El analizador Fluke 435 es un modelo capaz de mostrar datos de formas de ondas de las señales eléctricas de voltajes, corrientes, potencias, armónicos, en forma de histogramas, graficas fasoriales formas de onda espectros de armónicos, estos son parámetros principales. Cada modelo está diseñado para cubrir las necesidades de la tarea de medida prevista. Los accesorios disponibles garantizan una conexión fiable y segura. El software de aplicación de cada producto facilita la descarga, el análisis y la presentación de datos de la calidad eléctrica con la mayor eficiencia

posible, En la figura 2.41 se muestra el analizador de calidad de la energía (Fluke Corporation, 2019a, p. 1)



Figura 2. 41: Analizadores trifásicos de calidad eléctrica

Fuente: (Fluke Corporations, 2019a, p. 1)

El Fluke 345 es ideal para mediciones en cargas de conmutación tales como frecuencia variable. Accionamientos, iluminación electrónica y sistemas UPS. Además, el sistema de medición de efecto Hall realiza la medición de C.D, posible sin la necesidad de romper el circuito, y la memoria interna permite el registro a largo plazo para el análisis de Tendencias o problemas intermitentes como muestra la figura 2.42.



Figura 2. 42: Analizador de calidad de la energía FLUKE 345

Fuente: (Fluke Corporations, 2019a, p. 1)

2.11.4 Registrador trifásico de consumo eléctrico 1730



Figura 2. 43: Analizador de redes Fluke 1730

Fuente: (Fluke Corporations, 2019b, p. 6)

Se puede observar en la figura 2.43 el analizador de la calidad de la energía de la marca Fluke serie 1730, y se detalla las funciones que contiene el equipo:

- Describir medidas básicas: tensión, corriente, potencia, factor de potencia y valores asociados que facilitan la implantación de estrategias de ahorro energético.
- Software completamente nuevo Energy Analyze, permite notificar de manera automatizada, descargar y analizar una imagen completa del potencial ahorro energético.
- Realiza el registro integral, todas las lecturas se registran automáticamente y pueden revisarse durante el registro y antes de descargarlas para realizar análisis sobre la marcha. Se puede guardar más de 20 sesiones de registro independientes.
- Configuración completa “en campo” mediante el panel delantero, no es necesario regresar al taller para descargar nada ni tener que llevar un PC al cuadro eléctrico.
- Contiene dos puertos USB, uno para conectarse a la PC y otro para grabar de manera rápida y simple en memorias u otros dispositivos USB.
- Accesorios optimizados: cable plano de tensión y sondas de corrientes flexibles y finas que pueden instalarse fácilmente en espacios muy reducidos. (Fluke Corporation, 2019b, p. 6)

2.11.5 Conexiones del analizador de redes

Ponga las pinzas amperimétricas alrededor de los conductores de fase A (L1), B (L2), C (L3) y N(eutro). Las pinzas están marcadas con una flecha que indica la polaridad de señal correcta. Conexiones de entrada, realice las conexiones de tensión: comience por la conexión a tierra y, después, en sucesión N, A (L1), B (L2) y C (L3). Para obtener resultados de medida correctos, conecte siempre la entrada de conexión a tierra. Compruebe que las pinzas amperimétricas están firmemente fijadas y completamente cerradas alrededor de los conductores. Para medidas monofásicas, utilice la entrada de corriente A (L1) y las entradas de tensión de conexión a tierra, N(eutro) y fase A (L1). A (L1) es la fase de referencia para todas las medidas, configure el analizador según la tensión de línea, la frecuencia y la configuración del cableado del sistema de alimentación que desee medir, Las pantallas de osciloscopio y fasor son útiles para comprobar si los cables de tensión y las pinzas amperimétricas están conectados correctamente., la figura 2.44 ilustra la conexión del analizador.(FLUKE, 2012, pp. 6-2,6-3)

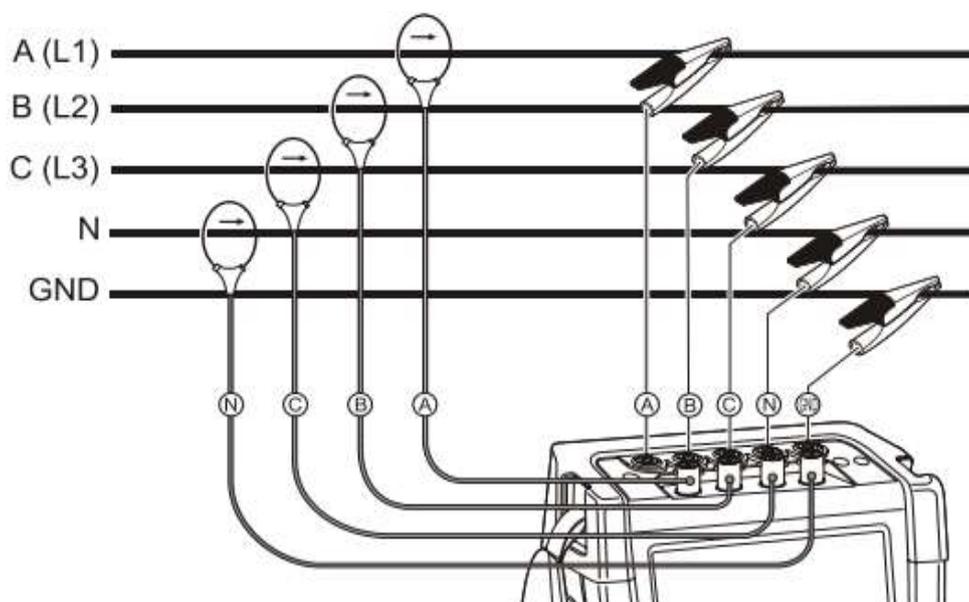


Figura 2. 44: Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico

Fuente:(FLUKE, 2012, pp. 6-2)

Osciloscopio Fasorial.- La pantalla de fasor muestra la relación de fase entre tensiones y corrientes en un diagrama de vectores, como muestra la figura 2.45. El vector del canal de referencia A (L1) se orienta en la dirección horizontal positiva. Los valores numéricos adicionales corresponden a la tensión y corriente de fase fundamental, frecuencia y ángulos de fase. El encabezado de la pantalla muestra los valores rms de tensión y corriente.

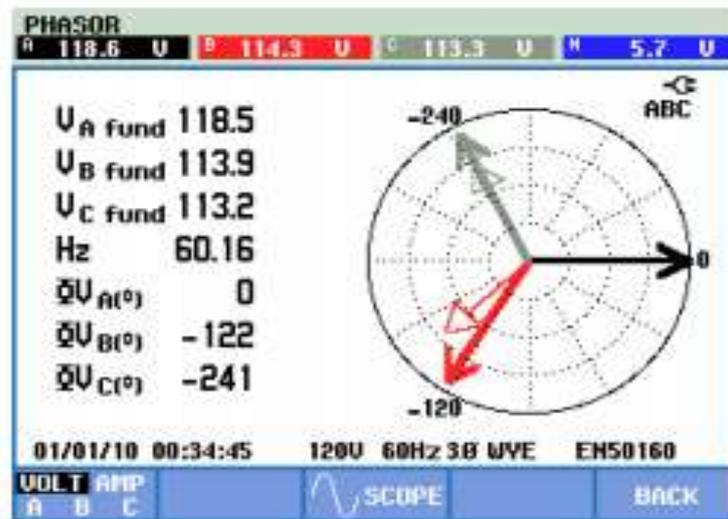


Figura 2. 45: Diagrama de vectores correspondiente al analizador correctamente conectado

Fuente: (FLUKE, 2012, pp. 6-3)

Recomendaciones.-Las formas de onda de tensión en particular deben ser uniformes y sinusoidales. Si aprecia distorsión de tensión, se recomienda comprobar la pantalla de armónicos. Las tensiones rms y la frecuencia deben estar próximas a sus valores nominales. Las pantallas de osciloscopio y fasor son útiles también para comprobar si los cables de tensión y las pinzas amperimétricas están conectados correctamente. En el diagrama de vectores, las tensiones de fase A (L1), B (L2) y C (L3) deben aparecer en secuencia a la misma distancia (120 grados). Los vectores de corriente deben tener la misma dirección que el vector de tensión con un cambio de fase inferior a 30 grados normalmente. (FLUKE, 2012, pp. 6-3)

Capítulo 3: Análisis de la calidad de la energía

3.1 Descripción del método del análisis de calidad de la energía

El Análisis de la calidad de energía eléctrica se realizó en los tableros de distribución, que alimentan la planta de asfalto. El análisis se realizó durante las 24 horas del día, por 7 días.

Para la medición se instaló un analizador de redes marca Fluke 1730 el cual mide los parámetros eléctricos de: tensión, corriente, potencia activa, reactiva y aparente, factor de potencia, distorsión armónica total THD entre otros.

Consideraciones:

- En la planta de Asfalto se conectó el analizador días en los que la demanda de la planta es menor, por lo que se tomará como periodo de análisis una semana, de jueves a jueves con el fin de que los valores promedios se acerquen más a la realidad de la demanda.
- Se mostrarán los datos obtenidos en las 24 horas, pero para efectos de promedios se utilizará el horario de consumo normal de la planta de 6h.00 a 12h.00 para la planta de asfalto; Ya que en los horarios no laborables la demanda baja considerablemente afectando por defecto los valores promedios

3.2 Estudio realizado en la planta de asfalto

En la tabla 3.1 podemos observar los valores de la tensión de línea y corriente de línea.

Tabla 3. 1: Parámetros de tensiones y corrientes

	Uan(V)	Ubn(V)	Ucn(V)	Uab(V)	Ubc(V)	Uca(V)	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)
VALOR MEDIO	267,61	279,66	274,37	472,19	471,27	487,71	259,98	243,17	240,13
VALOR MAX	275,44	273,10	273,49	482,44	479,65	483,82	584,12	571,33	542,22
VALOR MIN	262,50	258,21	257,21	461,34	472,80	468,80	32,17	20,53	22,92

Fuente: El autor

En la tabla 3.2 se detalla valores registrados de potencia activa y reactiva.

Tabla 3. 2: Rangos de potencia activa Kw y potencia reactiva Kvar

	Pa(Kw)	Pb(Kw)	Pc(Kw)	P3Ø(Kw)	Qa(kvar)	Qb(kvar)	Qc(kvar)	Q3Ø(kvar)
VALOR MEDIO	50,56	60,00	60,88	179,99	39,56	39,66	37,88	106,33
VALOR MAX	137,09	120,00	121,00	390,83	84,42	85,07	75,33	248,65
VALOR MIN	9,72	6,99	9,96	20,23	4,44	4,89	9,91	10,11

Fuente: El autor

En la tabla 3.3 se aprecia valores potencia aparente y factor de potencia.

Tabla 3. 3: Rangos de potencia aparente y factor de potencia

	Sa(kVA)	Sb(kVA)	Sc(kVA)	S3Ø(kVA)	CosØ
VALOR MEDIO	67,15	65,82	67,95	200,34	0,83
VALOR MAX	158,41	158,36	146,84	457,06	0,97
VALOR MIN	8,44	8,24	9,13	27,53	0,67

Fuente: El autor

En la tabla 3.4 se expresa el porcentaje de cargabilidad.

Tabla 3. 4: Porcentaje de cargabilidad del banco de transformadores

	750 KVA
MEDIA	30%
MAX	80%
MIN	5%

Fuente: El autor

En la tabla 3.5 se dan a conocer los resultados de tensiones y corrientes registrados.

Tabla 3. 5: Valores de tensiones y corrientes

	Uan(V)	Ubn(V)	Ucn(V)	Uab(V)	Ubc(V)	Uca(V)	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)
VALOR MEDIO	257,41	265,19	265,44	489,51	471,57	473,14	377,20	344,46	348,76
VALOR MAX	293,71	271,77	262,70	479,79	478,80	491,38	571,22	570,93	552,62
VALOR MIN	271,50	260,21	259,21	462,24	459,20	463,10	45,20	39,94	31,52

Fuente: El autor

Tabla 3.6 se dan a conocer los resultados planta de asfalto. Potencia activa y Reactiva.

Tabla 3. 6: Valores de potencia activa y reactiva

	Pa(kW)	Pb(kW)	Pc(kW)	P3Ø(kW)	Qa(kvar)	Qb(kvar)	Qc(kvar)	Q3Ø(kvar)
VALOR MEDIO	89,80	88,64	88,63	256,37	43,13	47,20	39,19	151,22
VALOR MAX	143,54	135,21	133,25	390,23	83,12	90,97	79,83	267,25
VALOR MIN	7,57	4,76	8,46	22,77	5,14	9,10	1,51	22,94

Fuente: El autor

Tabla 3.7 se muestran los resultados planta de asfalto. Potencia aparente y factor de potencia.

Tabla 3. 7: Valores de potencia aparente y factor de potencia

	Sa(kVA)	Sb(kVA)	Sc(kVA)	S3Ø(kVA)	CosØ
VALOR MEDIO	111,71	97,70	94,79	293,89	0,85
VALOR MAX	161,11	162,36	155,74	468,96	0,98
VALOR MIN	9,45	7,73	6,98	32,80	0,69

Fuente: El autor

Tabla 3.8. Cargabilidad del banco de transformadores.

Tabla 3. 8: Porcentaje de cargabilidad al banco de transformadores

	750 KVA
MEDIA	45%
MAXIMA	85%
MINIMA	2%

Fuente: El autor

3.2.1 Análisis de cargabilidad

Como se puede apreciar en las Tabla 3.8, el banco de transformadores presenta en el periodo, una cargabilidad media del 45%, llegando a valores máximos de 85 %. En la figura 3.1 se puede apreciar que los momentos de máxima cargabilidad, son picos ocurridos cada día.

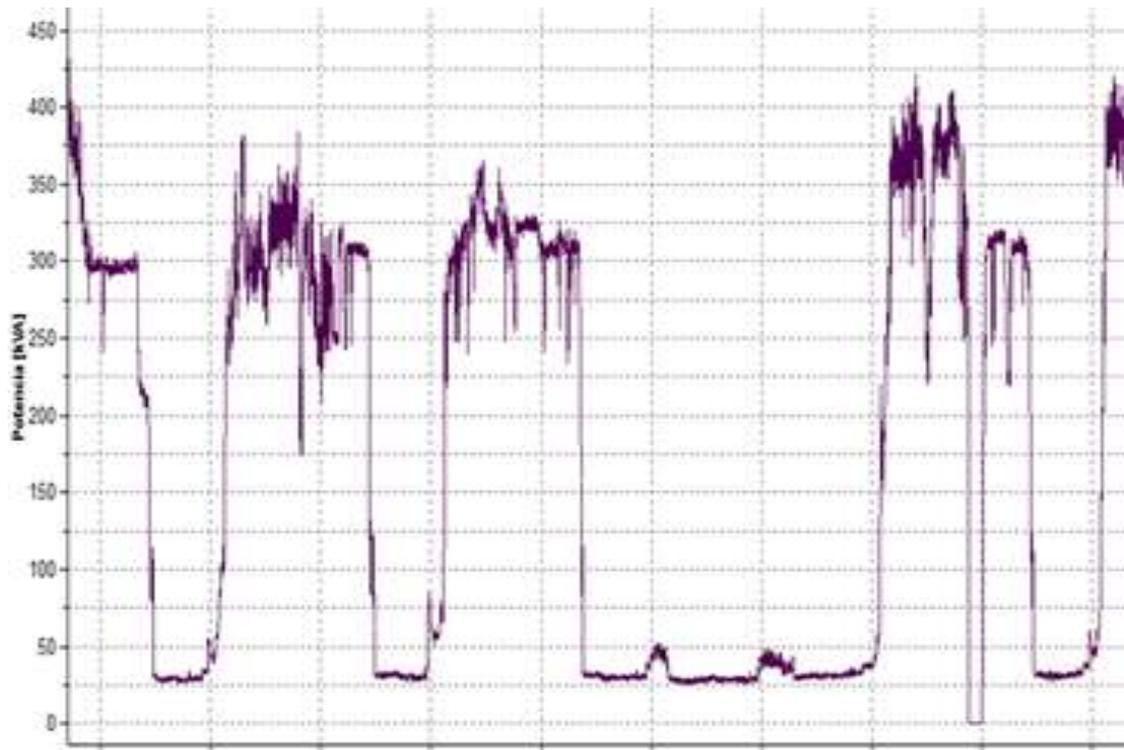


Figura 3. 1: Detalle grafico de la potencia aparente (KVA)

Fuente: El Autor

3.2.2 Análisis del factor de potencia

Como se puede apreciar en la Tabla 3.7 antes mostrada, la figura 3.2 muestra que el factor de potencia se mantiene inductivo en todo el periodo, en rangos de 0.67 a 0.96 siendo el valor medio de 0.83. Estos valores no son buenos, pero la planta presenta corrección de factor de potencia.

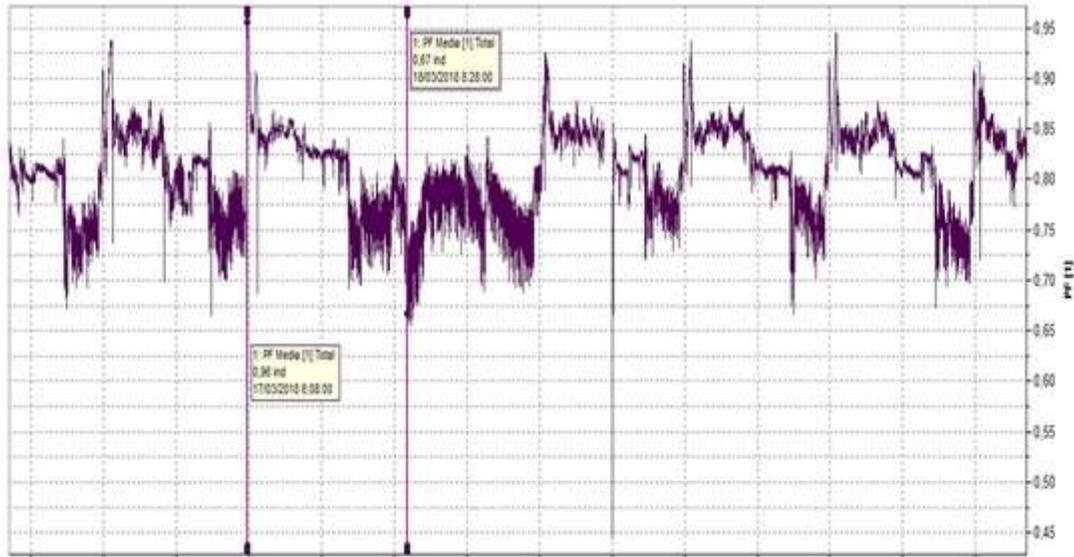


Figura 3. 2: Análisis del factor de potencia

Fuente: El Autor

3.2.3 Análisis de tensiones

Utilizando los valores de la Tabla 3.1 antes mostrada, para conocer el rango de las tensiones mínimo y máximo en el periodo, respecto a los valores nominales se obtiene lo siguiente:

Tabla 3. 9: Valores de Tensiones

	Uan(V)	Ubn(V)	Ucn(V)	Uab(V)	Ubc(V)	Uca(V)	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)
VALOR MEDIO	262,10	266,22	268,56	475,89	479,87	479,11	249,8	230,4	244,2
VALOR MAX	283,23	284,16	286,45	493,14	482,25	490,00	570,0	558,7	520,22
VALOR MIN	265,44	263,35	265,39	456,94	450,00	454,70	33,55	22,03	20,92

Fuente: El autor

Tabla 3. 10: Valores máximos y mínimos de tensión respecto al nominal, en por ciento

	267 V			480 V		
	Uan(V)	Ubn(V)	Ucn(V)	Uab(V)	Ubc(V)	Uca(V)
MAX	2%	2%	2%	2%	2%	2%
MIN	-3%	-3%	-3%	-4%	-4%	-4%

Fuente: El Autor

Como se puede apreciar las tensiones por fase se encuentran en un rango de -3% a 2% del nominal lo que se encuentra dentro del rango establecido y permitido por las normas de $\pm 10\%$

3.2.4 Análisis de armónicos

En las normas eléctricas se especifican ciertos umbrales porcentuales para los valores totales de distorsión armónica (THD) de tensión y corriente, enlistados a continuación junto con los fenómenos correspondientes a su presencia:

THD para tensión

- Menor al 5%: situación normal, sin riesgos de funcionamiento incorrecto.
- Entre 5 y 8%: contaminación armónica, puede que se produzca algún funcionamiento incorrecto.
- Mayor al 8%: contaminación armónica importante, es probable que se produzca algún funcionamiento incorrecto. Es necesario un análisis profundo y la instalación de dispositivos de atenuación.

THD para corriente

- Menor al 10%: situación normal, sin riesgos de funcionamiento incorrecto.
- Entre 10 y 50%: contaminación armónica con riesgo de aumento de temperatura, y la necesidad consiguiente de sobredimensionar cables y fuentes.
- Mayor al 50%: contaminación armónica importante, es probable que se produzca algún funcionamiento incorrecto. Es necesario un análisis profundo y la instalación de dispositivos de atenuación.

La tabla 3.11 muestra los resultados planta de asfalto. Armónicos de tensión y corriente.

Tabla 3. 11: Porcentaje de distorsión armónica en tensión y corriente THD

	THD Ua %	THD Ub %	THD Uc %	THD Ia %	THD Ib %	THD Ic %
MAX	3,41	3,56	3,41	18,55	18,22	20,00
MEDIO	1,45	2,69	2,75	7,50	9,68	9,00

Fuente: El Autor

En la tabla 3.12 Resultados planta. Armónicos de tensión y corriente.

Tabla 3. 12: Valores de distorsión armónica de tensión y corriente THD

	THD Ua %	THD Ub %	THD Uc %	THD Ia%	THD Ib %	THD Ic %
MAXIMO	2,15	2,56	2,43	13,08	14,46	18,57
PROMEDIO	2,18	2,14	1,63	5,92	8,07	7,75

Fuente: El Autor

Se puede observar en las tablas 3.11 y 3.12 y la figura 3.3 que los índices de distorsión armónica total THD para tensión son similares si se toma el período completo o el horario laboral y en ambos casos menores al 5%, tal como indican las normas.

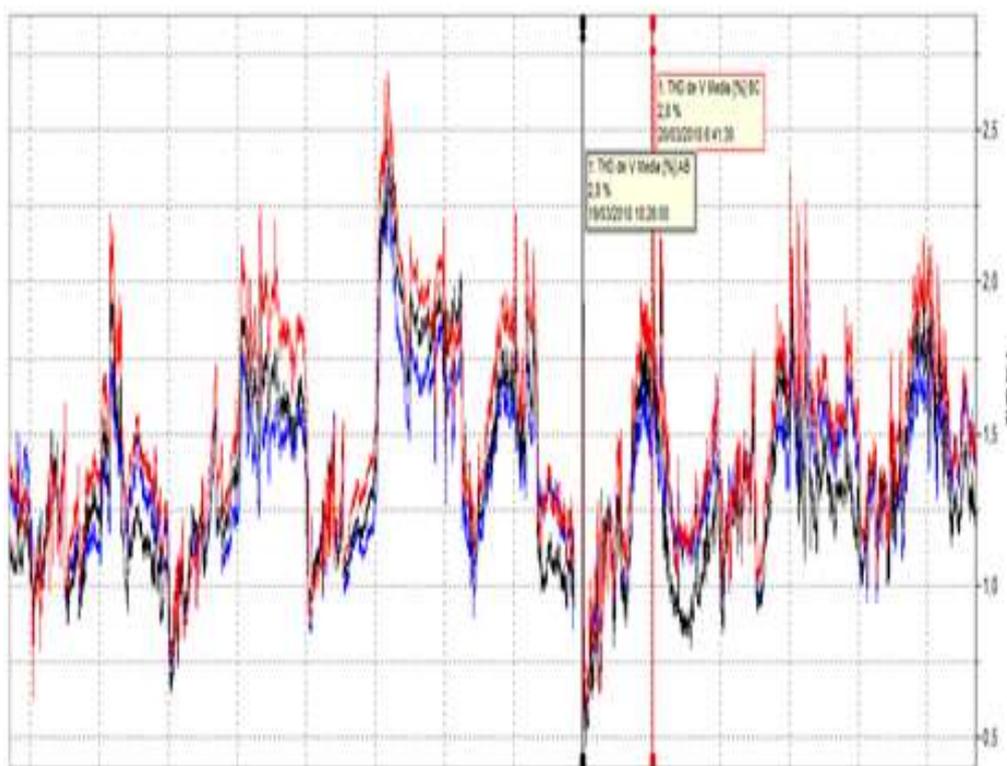


Figura 3. 3: Índices de distorsión armónica total

Fuente: El Autor

En cambio, los valores de THD de corriente aumentan cuando se consideran mediciones de todo el día y no sólo del período de labores, en ambos casos el valor medio se mantiene por debajo del 10 % no perjudicial, pero se tienen picos y mayores al 10%,

Observando la figura 3.4, se puede ver que los índices de distorsión armónica de corriente se elevan durante los períodos donde las planta no labora; o posee una menor demanda, y aunque estos porcentajes superan en promedio el 10% recomendado, estos se producen durante horas de poca demanda de carga y de baja corriente, además de que están por debajo del umbral de 50% indicado anteriormente, estas distorsiones, aunque aparentemente elevadas, no representan motivo de preocupación en los proceso de producción de la empresa, cada intervalo de tiempo que se dan estas perturbaciones son cuando las cargas no lineales entran en funcionamiento como los variadores de frecuencia allí es don estos picos se puede apreciar como más altos, por ende la distorsión va a ser mayor, se sujere utilizar filtros armónicos para corregir dicha distorsión .

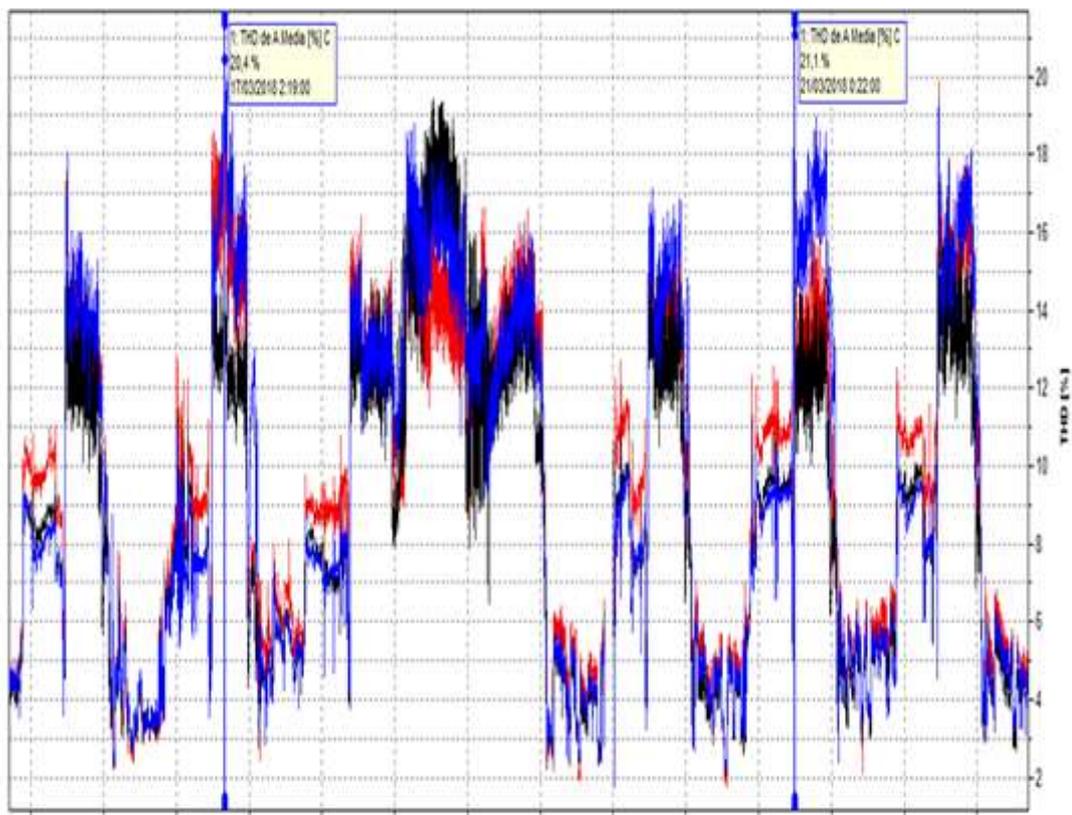


Figura 3. 4: Índices de distorsión armónica total de corriente

Fuente: El Autor

CAPÍTULO 4

4.1 Conclusiones.

En el análisis se determinó:

- Los rangos de Tensión de ambas plantas se encuentran dentro de los valores normados por lo tanto las averías de las máquinas eléctricas obedece a otros factores.
- La planta de asfalto presenta una cargabilidad media en el período laboral del 45% con picos máximos del 85% por lo que presenta reservas suficientes para asumir el trabajo de la totalidad de las cargas.

4.2 Recomendaciones

El estudio y análisis de calidad de la energía es indispensable a nivel industrial y comercial, se deben hacer estudios periódicos sobre calidad de energía eléctrica, para cumplir con la normativa vigente, consumos correctos, funcionamientos estables de máquinas y ahorro económico para el desarrollo de nuevos proyectos.

Después de realizar el análisis se detectó que el problema de averías en los equipos eléctricos no era debido al suministro eléctrico (calidad de la energía) en la empresa, sino que se recomienda un buen programa estructurado de mantenimiento predictivo y correctivo. Los daños también pueden darse debido a factores mecánicos y eléctricos como: incorrecta selección en las protecciones eléctricas, mala elección de los conductores, incorrecta selección de motores, sobrecarga mecánica, conductores que rebasaron la vida útil, rodamientos en mal estado.

Ejecutar un plan de mantenimiento predictivo y correctivo a las diferentes máquinas en la empresa, como: alineación y balanceo de eje de rotores de motores de inducción, cambio de rodamientos que cumplan las normas de calidad

Se recomienda cambio urgente de conductores de alimentación a los tableros de distribución, cambio de elementos de control y protección que se encuentran en mal estado

Implementar un sistema de filtros armónicos entre la fuente de alimentación y la carga este método ayudara a minimizar las componentes armónicas y reducir problemas en las dos plantas.

BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, C. K., Sadiku, M. N. O., Cordero Pedraza, C. R., & López Caudana, E. O. (2018). *Fundamentos de circuitos eléctricos*. Recuperado de https://www.academia.edu/37249185/Alexander_C._and_Sadiku_M._-_Fundamentos_de_circuitos_electricos
- Arcila, J. (2016). ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS. Recuperado de http://ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos.pdf
- Arellano, A., Samayoa, R., & Mireles, D. (2012). Mejora de la confiabilidad en el edificio Valdés Vallejo de la UNAM. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/288/5/A5.pdf>
- Arias, F. (2012). *EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN 6a EDICIÓN*. Recuperado de <https://docplayer.es/69983158-El-proyecto-de-investigacion-6a-edicion.html>
- Baisón Santiago, L. Á. (2010). *Manual de electricidad industrial: formación para el empleo*. Recuperado de <http://site.ebrary.com/id/10646774>
- Barros Saldañas, W. (1981). *CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN SISTEMAS INDUSTRIAL*. Escuela Pólitecnica Nacional. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6822/1/T897.pdf>

Borgetto, I. M. (2010, octubre 20). Corriente Alterna Fasores. Recuperado de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/corriente_alterna.pdf

Carrasco Sánchez, E. (2008). *Instalaciones eléctricas de baja tensión en edificios de viviendas*. Madrid: Editorial Tébar. Recuperado de <http://www.digitaliapublishing.com/a/12865/>

Carreño, W. C., Plata, G. O., Wandurraga, A. L. M., & Gualdrón, C. A. D. (2010). Simulación de sistemas eléctricos con cargas no lineales y variantes en el tiempo/Simulation of electric systems with non-linear and time-variant loads. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería; Arica*, 19(1), 76-92.

Castañeda, O. (2009). Análisis de calidad de energía acerca de la calidad de producto de la zona urbana de Milagro del área de concesión de la empresa Eléctrica Milagro usando la regulación de conelec N° - 004/01. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/5302/1/D-38726.pdf>

Castañeda Ordóñez, O. S. (2009). *Análisis de calidad de energía acerca de la calidad de producto de la zona urbana de milagro del area de concesion de la empresa eléctrica milagro usando la regulación del conelec N°.- 004/01*. Escuela Superior Politecnica del Litoral, Guayaquil. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/5302/1/D-38726.pdf>

- Chávez Negrete, S. (2010, noviembre). *Armónicas de la red eléctrica - Casos Prácticos*. Tecnología. Recuperado de <https://es.slideshare.net/fnuno/curso-de-armonicas-casos-practicos-161110>
- Eléctrica de Guayaquil. (2012). NORMAS DE ACOMETIDAS CUARTOS DE TRANSFORMADORES Y SISTEMAS DE MEDICIÓN PARA EL SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD. Recuperado de <https://es.slideshare.net/albertama/natsim-2012-13326343>
- Entrena González, F. J. (2012). *Montaje de redes eléctricas aéreas de alta tensión*. Antequera, Málaga: Innovación y Cualificación. Recuperado de <http://public.ebib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3212343>
- Esparza González, M. S., Mata Guerrero, J. A., & Castañeda Ramos, L. A. (2006). Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones. *Conciencia Tecnológica*, (32). Recuperado de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=94403211>
- FLUKE. (2012). F430-II. Recuperado 14 de febrero de 2019, de http://assets.fluke.com/manuals/F430-II_umspa0100.pdf
- Fluke Corporations. (2019a). Analizadores de calidad eléctrica. Recuperado de <https://www.fluke.com/es-ec/productos/comprobacion-electrica/analizadores-de-calidad-electrica>
- Fluke Corporations. (2019b). Analizadores de Calidad Eléctrica de la Red y Analizadores de Potencia para aplicaciones de alto ancho de banda.

Recuperado de <http://www.distron.es/pdf/cat/fluke/11-calidad-de-la-energia-el%C3%A9ctrica/D-13365-spa.pdf>

Garduño, F. (2015). Norma de armónicas eléctricas. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/287147645/ESTANDARES-EN-ARMONICOS-docx>

Gómez Cabanilla, E. (2016). *Análisis técnico y económico de corrección del factor de potencia del sistema eléctrico trifásico en 220V, del hospital IV Víctor Lazarte Echegaray - Trujillo*. Universidad César Vallejo, Peru. Recuperado de http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/9565/gomez_ce.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Guachamin, & Naranjo. (2011). *Analisis y estudio de la calidad de la energia electrica en la planta industrial de Quito imprenta Mariscal*. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4293/1/CD-3915.pdf>

Harper, G. E. (1985). *El ABC de las instalaciones eléctricas industriales*. Editorial Limusa.

Hiler, K., & Lozada, D. (2018). Análisis de la calidad de energía en la industria alimenticia Agrovanic S.A. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15474/1/UPS-GT002094.pdf>

Holguin, M., & Gomez Coello, D. (2010). *ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL «NUEVO CAMPUS» DE LA*

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA. Universidad Politecnica Salesiana, Guayaquil. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2110/13/UPS-GT000145.pdf>

Jaramillo Matta, A. A. (2015, octubre 15). Efecto de las perturbaciones: huecos de tensión, desequilibrios de tensión y armónicos, en los motores de inducción con rotor Jaula de Ardilla. Recuperado de <http://csifesvr.uan.edu.co/index.php/ingean/article/download/256/200>

Lopera, J. D., Ramírez, C., Zuluaga, M., & Ortiz, J. (2010). EL MÉTODO ANALÍTICO. Recuperado de <https://webs.ucm.es/info/nomadas/25/juandiegolopera.pdf>

Luna Sánchez, L., García Fernández, J. L., & Adrados Blaise-Ombrecht, C. (2008). *Instalaciones eléctricas de baja tensión en el sector agrario y agroalimentario*. Madrid: Mundi-Prensa. Recuperado de <http://site.ebrary.com/id/10234588>

Martínez, L., León Martínez, V., & Cazorla Navarro, A. (2017). *Circuitos conductivos lineales*. Valencia: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de <http://public.ebib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=5349758>

Matilde de Apráiz, C. (2013). *Método de detección en tiempo real de perturbaciones transitorias en redes de suministro eléctrico* (Ph.D. Thesis). Universidad de Cantabria. Recuperado de <http://www.tdx.cat/handle/10803/126033>

- Meléndez Frigola, J., Herraiz Jaramillo, S., & Colomer Llinás, J. (2005). Causas y efectos de las perturbaciones. Calidad de onda en el servicio eléctrico, 7.
- Molina Martínez, J. M., Cánovas Rodríguez, F. J., & Ruz Vila, F. A. (2013). *Corriente alterna monofásica y trifásica Fundamentos de electrotecnia para ingenieros*. México: Alfaomega.
- Moreno Arequipa, W. (2011). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE ALTERNA Y LAS OSCILACIONES ELECTROMAGNÉTICAS EN CIRCUITOS EXPERIMENTALES*. Universidad Técnica de Cotopaxi. Recuperado de <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/872/1/T-UTC-0624.pdf>
- Murillo, M. (2011). Desequilibrio de Tensiones. Recuperado de https://unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/Agosto_2011/MURILLO%20MANRIQUE_FIEE/De%20sequilibrios%20de%20tensiones.pdf
- National Instruments, C. (2019). Monitoreo y Medición de la Calidad de Energía - National Instruments. Recuperado de <http://www.ni.com/white-paper/4714/es/>
- Redondo Gallardo, J. M. (2010). *Análisis práctico de circuitos eléctricos: corriente continua y alterna. Formación para el empleo*. Recuperado de <http://site.ebrary.com/id/10647174>
- Salas Chamocho, D. D. (2013). *DIAGNÓSTICO, ANÁLISIS Y PROPUESTA DE MEJORA AL PROCESO DE GESTIÓN DE*

INTERRUPCIONES IMPREVISTAS EN EL SUMINISTRO ELÉCTRICO DE BAJA TENSIÓN. CASO: EMPRESA DISTRIBUIDORA DE ELECTRICIDAD EN LIMA. Universidad Pontificia Católica de Peru. Recuperado de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/4791/SALAS_CHAMOCHUMBI_DANIEL_DIAGNOSTICO_ELECTRICIDAD.pdf?sequence=1

Sánchez, M. (2009). *Calidad de la Energía.* Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/40188303/Libro-Calidad-de-Energia>

Schneider Electric. (2010). *Guía de diseño de instalaciones eléctricas.* Recuperado de https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Application+solutions&p_File_Name=020511_E10-guia-diseno-instalaciones.pdf&p_Doc_Ref=020511E10

Sectorelectricidad. (2014, julio 24). *Distribución de energía eléctrica.* Recuperado 9 de febrero de 2019, de <http://www.sectorelectricidad.com/9602/distribucion-de-energia-electrica/>

Seymour, J., & Horsley, T. (2010). *Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico.* Recuperado de https://www.apc.com/salestools/VAVR-5WKLPK/VAVR-5WKLPK_R0_LS.pdf

Téllez Ramírez. (2019, febrero 9). Distorsión Armonica.pdf. Recuperado 9 de febrero de 2019, de <http://www.waterymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Distorsion%20Armonica.pdf>

Urrego, A. D., Arboleda, C. I. B., & Rodríguez, Y. G. (2015). Estudio experimental de potencias, factor de potencia y energía eléctrica en cargas industriales tomando como referencia la norma IEEE Std 1459-2010. *Tecnura; Bogota, 19*, 41-54. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.S E1.a03>

Varela, J., & Alvarado, F. (2015). Banco de pruebas para filtrado de armónicos en las redes eléctricas. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10278/1/UPS-GT001364.pdf>

Vargas, A. (2005). SUBTENSIONES (SAGs & DIPs) Y SU IMPACTO ECONÓMICO EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA E INDUSTRIA GUATEMALTECA. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0565_EA.pdf

Wildi, T. (2007a). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. Pearson Educación.

Anexos

ANEXO 1.1: Conexión del equipo de medición.



ANEXO 1.2 Conexión del banco de transformadores de 750 KVA



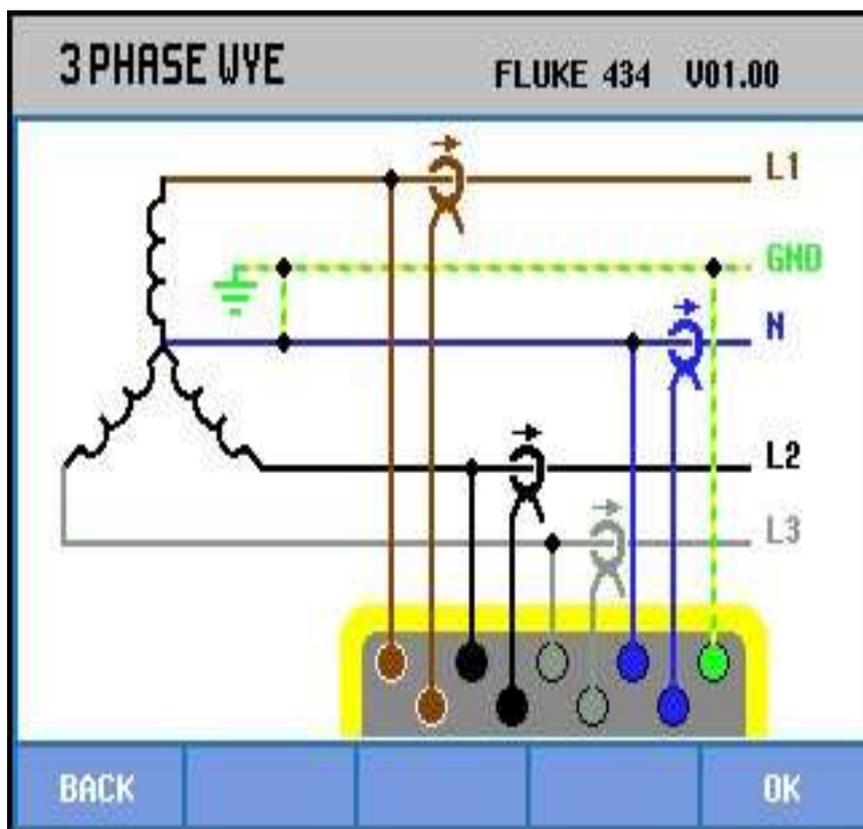
ANEXO 1.3: Forma de conectar un analizador de la marca Fluke.



ANEXO 1.3: Analizador de la marca Fluke 1735.



ANEXO 1.3: Conexión del analizador de la marca Fluke 434.





DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Adriano Amaguaya, Wilson Alcívar** con C.C: 0604265652 autor del Trabajo de Titulación: **Estudio y análisis de la calidad de la energía eléctrica de un banco de transformadores en media tensión a la empresa Hidalgo & Hidalgo en la ciudad de Guayaquil**, previo a la obtención del título de **Ingeniero en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 13 de marzo de 2019.

Adriano Amaguaya, Wilson Alcívar

C.C: 0604265652



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	"Estudio y análisis de la calidad de la energía eléctrica de un banco de transformadores en media tensión a la empresa Hidalgo & Hidalgo en la ciudad de Guayaquil"		
AUTOR:	Adriano Amaguaya, Wilson Alcívar		
REVISOR/TUTOR:	Msc. Echeverría Parra, Xavier Ricardo		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Eléctrico – Mecánica		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Eléctrico–Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	13 de Marzo de 2019	No. DE PÁGINAS:	71
ÁREAS TEMÁTICAS:	Eficiencia energética, Mediciones eléctricas, Corriente Alterna, Niveles de tensión.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Calidad de la energía; armónicos, fluctuaciones; factor de potencia; energía eléctrica; banco de transformadores.		

El presente trabajo de titulación analiza la calidad de la energía eléctrica a la empresa Hidalgo & Hidalgo que presenta el problema las averías en los equipos eléctricos. La petición de la empresa fue realizar una medición de la calidad de la energía eléctrica para conocer falencias en las instalaciones eléctricas como las variaciones de tensión, corriente, factor de potencia, frecuencia y nivel de armónicos. En este trabajo de titulación se usó el método de investigación documental, investigación de campo, investigación analítica. Con la ayuda de instrumentos de precisión obtendremos resultados los mismos que después del análisis determinarían fallas. En el análisis se revelaron que los valores de los parámetros eléctricos de la calidad de la energía se encontraban dentro de los rangos normados. Como conclusión después de haber hecho el análisis las fallas no era debido a la calidad de la energía sino más bien debido a que no hay un plan de mantenimiento a los equipos e instalaciones eléctricas, corrigiendo este problema se lograra optimizar y garantizar un máximo rendimiento para alcanzar funcionalidad de las plantas y consecuentemente incrementar su productividad.

ADJUNTO PDF: SI NO

CONTACTO CON AUTOR:	Teléfono: +593 996999077	Email: wilyadriano22@hotmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Ing. Luis Orlando Philco Asqui	
	Teléfono: +593-9-980960875	
	E-mail: luis.philco@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		