



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN
DEPARTAMENTO DE ELECTRICA**

**Tesis Monográfica para optar al Título de
Ingeniero Eléctrico**

Título

**“ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELECTRICA EN LA FABRICA DE
PLASTICOS MODERNOS DOLORES-CARAZO”.**

Autores:

- Br. Oliver Enoc Castro Rodríguez 2012-42317 EI
- Br. Morena Guadalupe López 2015-0393U Eo

Tutor:

Ing. Juan González Mena

Managua, noviembre 2021

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. Introducción	1
II. Antecedentes	3
III. Justificación	4
IV. Objetivos del Estudio.....	5
4.1 Objetivo General	5
4.2 Objetivo Especifico	5
V. Marco Teórico	6
5.1 ¿Qué es un problema de calidad de la energía?	6
5.2 Calidad de la energía	6
5.3 Fenómenos electromagnéticos.....	6
5.4 Continuidad en el servicio	21
5.4.1 Interrupciones imprevistas de energía eléctrica.....	22
5.4.2 Interrupciones programadas de energía eléctrica.....	22
5.4.3 Interrupciones breves de energía	22
5.4.4 Interrupciones largas de energía.....	23
VI. Hipótesis y Variable	38
VII. Metodología de Trabajo.....	39
VIII. Análisis de mediciones y resultados.....	41
8.1 Metodología para el análisis de parámetros.....	41
8.2 Gráficos de parámetros eléctricos y sus análisis.....	43
8.3 Resumen de Parámetros de Calidad de la Energía	49
IX. Conclusiones.....	53
X. Bibliografía	54

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación de la fábrica plásticos modernos	2
Figura 2: Perturbaciones de tensión	8
Figura 3: Estándares internacionales en las perturbaciones	9
Figura 4: Señal de un transitorio impulso	4
Figura 5: Señal de un transitorio oscilatorio	10
Figura 6: Señal de las depresiones	11
Figura 7: Señal de las depresiones	12
Figura 8: Tolerancias de tensiones	13
Figura 9: Señal de sobretensión	14
Figura 10: Señal de baja tensión	15
Figura 11: Muestras de tensión	20
Figura 12: Señal ideal de corriente y tensión eléctrica en función del tiempo.	25
Figura 13: Onda fundamental de la segunda y tercera armónica	25
Figura 14: Esquema básico de distorsión de tensión	26
Figura 15: Triángulo de potencia	34
Figura 16: Tablero y Balance de carga	42
Figura 17: Mediciones de Voltaje máximo de línea	43
Figura 18: Mediciones de eventos transitorios de voltaje	44
Figura 19: Medición de forma de onda	44
Figura 20: Medición THDv	45
Figura 21: Forma de Onda de corriente	45
Figura 22: Grafica del espectro de armónico	46
Figura 23: Grafica perfil de Distorsión en voltaje	46
Figura 24: Grafica perfil de corriente	47
Figura 25: Grafica demanda máxima de potencia	47
Figura 26: Grafica de potencia reactiva	48
Figura 27: Grafica de potencia aparente	48
Figura 28: Grafica del factor de potencia	49

I. Introducción

El presente estudio de la calidad de la energía se realizará en la fábrica plásticos Modernos la cual se ubica en la ciudad de Dolores, Carazo con la finalidad de conocer el comportamiento actual del sistema eléctrico y recomendar soluciones a los problemas de calidad de energía.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar los problemas de calidad eléctrica: transitorios, armónicas, regulación de voltaje, consumo, factor de potencia, balaceo de fases, revisión del sistema de tierras y fluctuaciones dinámicas de voltaje, de la instalación eléctrica de plásticos modernos, al mismo tiempo, poder determinar la afectación que tiene sobre el sistema y equipos finales y verificar que cumplan con la norma provisional "perturbaciones permisibles en la forma de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica.

Por tanto, se pretende analizar el consumo eléctrico de la agencia y dar soluciones que permitan el ahorro mediante medidas correctivas, persiguiendo con ello:

- Un menor costo en el consumo de energía eléctrica.
- Tiempo improductivo
- Pérdida de ingresos por interrupción del servicio
- Paros inesperados en el área de producción
- Penalizaciones y multas por parte de distribuidora
- Equipos que operan de manera irregular

La calidad de la energía eléctrica puede definirse como una ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje RMS suministrado al usuario; esto referido a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico.

Las perturbaciones en la calidad del suministro definidas por el estándar del IEEE han sido organizadas en siete categorías, según la forma de la onda:

- Transitorios
- Interrupciones
- Bajada de tensión / subtensión
- Aumento de tensión / sobretensión
- Distorsión de la forma de onda
- Fluctuaciones de tensión
- Variaciones de frecuencia

Los estudios de calidad de la energía eléctrica nos permiten detectar las desviaciones que se presenten para poder así establecer medidas correctivas.

Ubicación de la fábrica objeto de estudio

Plásticos Modernos

Municipio de Dolores – Carazo.

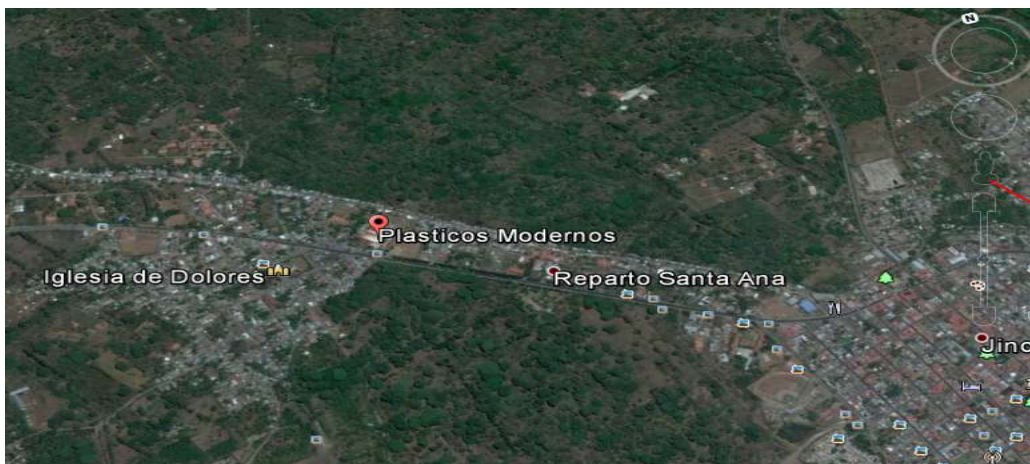


Figura 1: Ubicación de la fábrica plásticos modernos.

II. Antecedentes

A nivel de cargas eléctricas inductivas como los son los motores operan con un sistema arranque estrella–Delta, es un sistema de accionamiento eléctrico sencillo y se busca reducir la corriente en el momento del arranque al alimentar a una tensión menor $U_n/\sqrt{3}$. Con ello se consigue que la intensidad baje a una tercera parte de la intensidad que se produciría en un arranque directo. También el par de arranque se reduce a menos de la mitad, lo que hace imposible este sistema en motores de media potencia que arranquen con carga. Otro inconveniente es el corte de tensión que se produce al pasar de estrella–Delta.

Por otro lado, el uso de Variadores de frecuencia en máquinas extrusoras ha permitido la disminución del consumo eléctrico. Otros detalles relevantes que se pueden conseguir con el variador de frecuencia son los siguientes: disminución del ruido de la maquinaria, menor calentamiento del aceite porque únicamente se desplaza el aceite necesario para cada movimiento; reducción de sobrecargas en motor eléctrico; mejora de la vida útil del aceite y disminución de consumo en los equipos de enfriamiento de máquinas

Actualmente las instalaciones eléctricas de la fábrica disparan las protecciones (Breaker) de algunos circuitos de derivación, la consecuencia más notable de esto es que al estar desbalanceadas las cargas esto provoca exagerado consumo energético y por lo tanto consumo monetario, sin contar apagado de los equipos de climatización en oficinas.

Además, la fábrica también ha agregado nuevas cargas al sistema eléctrico lo que ha ocasionado un desbalance considerablemente en el sistema trifásico, ya que una de la línea tenía más corriente que las otras dos líneas, y esto ocasiona calentamiento en las líneas de suministro.

III. Justificación

Actualmente, el estudio de la calidad de la energía eléctrica ha adquirido mucha importancia y tal vez la razón más importante es la búsqueda del aumento de productividad y competitividad de las empresas. Asimismo, porque existe una interrelación entre calidad de la energía eléctrica, la eficiencia y la productividad.

Para aumentar la competitividad las empresas requieren optimizar su proceso productivo mediante:

- Uso de equipos de alta eficiencia como motores eléctricos, bombas, etc.
- Automatizar sus procesos mediante dispositivos electrónicos y de computación (microcontroladores, computadores, PLC, etc.).
- Reducir los costos vinculados con la continuidad del servicio y la calidad de la energía.
- Reducir las pérdidas de energía.
- Evitar los costos por sobredimensionamiento.
- Evitar el envejecimiento prematuro de los equipos.

Los equipos electrónicos son una fuente de perturbaciones para la calidad de la energía eléctrica pues distorsionan las ondas de tensión y corriente. Por otro lado, los equipos de control y automatización son muy sensibles a distorsión de la onda de tensión por lo que una variación en la calidad de la energía eléctrica puede ocasionar fallas que paralicen la producción ocasionando tiempo perdido y costos de producción inesperados.

Es importante destacar que esta experiencia impactara positivamente tanto en los estudiantes como en los docentes que desearan conocer y profundizar en el estudio de la calidad de la energía eléctrica.

IV. Objetivos del Estudio

4.1 Objetivo General

- Realizar un estudio de la calidad de energía eléctrica en la fábrica de plásticos modernos Dolores-Carazo mediante el uso de equipos de medición para determinar el buen funcionamiento del sistema eléctrico

4.2 Objetivo Especifico

- Realizar mediciones con el Fluke438-II sobre los parámetros electromagnéticos, Transitorios Interrupciones, Bajada de tensión (subtensión), aumento de tensión (sobretensión), Distorsión de la forma de onda, Fluctuaciones de tensión, Variaciones de frecuencia para determinar su correcto funcionamiento.
- Evaluar las mediciones realizadas sobre calidad de la energía para el desarrollo del estudio e incluir resultado de las mediciones efectuadas donde se presentarán tablas y gráficos.
- Contribuir un informe sobre el análisis de calidad de la energía eléctrica en la empresa que permita determinar si la instalación eléctrica cumple con normas eléctricas nacionales e internacionales

V. Marco Teórico

5.1 ¿Qué es un problema de calidad de la energía?

Podemos decir que existe un problema de calidad de la energía eléctrica cuando ocurre cualquier desviación de la tensión, la corriente o la frecuencia que provoque la mala operación de los equipos de uso final y deteriore la economía o el bienestar de los usuarios; asimismo cuando ocurre alguna interrupción del flujo de energía eléctrica.

Los efectos asociados a problemas de calidad de la energía son:

- Incremento en las pérdidas de energía.
- Daños a la producción, a la economía y la competitividad empresarial
- Incremento del costo, deterioro de la confiabilidad, de la disponibilidad y del confort.

5.2 Calidad de la energía

La calidad de energía se define como la variación permitida de tensión, corriente y frecuencia en el sistema eléctrico.

Ventajas de una buena calidad de energía:

- Mayor confiabilidad
- Aumenta eficiencia y vida útil
- Disminución de riesgos de multas

5.3 Fenómenos electromagnéticos

A continuación, se presentan algunos elementos importantes a tomarse en cuenta en el estudio de la calidad de la energía.

Algunos de los disturbios más frecuentes que afectan la calidad de la energía son:

- Interrupciones en el suministro.
- Variaciones de tensión eléctrica (RMS).
- Variación de la frecuencia eléctrica.
- Distorsión armónica.
- Factor de potencia bajo.

La IEEE, clasifica los disturbios eléctricos en diferentes categorías, en función de sus características y tiempo de duración; la clasificación es:

- Depresiones de tensión temporales (sags).
- Sobretensiones temporales (swells).
- Armónicas (formas de onda amplificadas por la frecuencia) de corriente y tensión.

Características de las ondas de tensión y corriente

Las ondas de tensión y corriente están definidas por las siguientes características principales:

- Número de Fases. La fase indica la situación instantánea en el ciclo, de una magnitud que varía cíclicamente.
- Amplitud de la onda: la amplitud de una onda es el valor máximo, tanto positivo como negativo, que puede llegar a adquirir la onda sinusoidal.
- Frecuencia de la onda: La frecuencia (f) del movimiento ondulatorio se define como el número de oscilaciones completas o ciclos por segundo ($f=1/T$).
- Forma de la onda.

Si tan sólo ayer se prestaba atención a un grupo relativamente limitado de fenómenos, hoy es necesario tomar en consideración un conjunto más amplio de indicadores de calidad, debido a sus efectos sobre el confort, la confiabilidad, el costo, el consumo, la demanda y el diseño de los sistemas de suministro eléctrico.

Paradójicamente, hay más problemas y son escasas o no existen personas preparadas o dedicadas a enfrentarlos. Según la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995 los fenómenos electromagnéticos pueden ser de tres tipos:

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

a) Perturbaciones de tensión según la IEEE 1159

Tipo de variación	Duración	Magnitud
Variaciones de corta duración		
Huecos de tensión [sag o dip]		
Instantáneos	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u.
Momentáneos	30 ciclos – 3	0,1 – 0,9 p.u.
Temporales	3 s – 1 min	0,1 – 0,9 p.u.
Elevaciones de tensión [swell]		
Instantáneos	0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u.
Momentáneos	30 ciclos – 3	1,1 – 1,8 p.u.
Temporales	3 s – 1 min	1,1 – 1,8 p.u.
Variaciones de larga duración		
Subtensión	> 1 min	0,8 – 1,0 p.u.
Sobretensión	> 1 min	1,0 – 1,2 p.u.
Interrupciones		
Momentáneos	< 3 s	0 p.u.
Temporales	3 s – 1 min	0 p.u.
Colapso	> 1 min	0 p.u.

Figura 2: Perturbaciones de tensión

b) Estándares Internacionales

Perturbación	Categoría de normalización	Estándares IEEE	Estándares IEC
Huecos de tensión	Ambiente/compatibilidad	IEEE 1250	IEC 61000-2-4
	Emisión/Límites de inmunidad	IEEE P 1346	IEC 61000-3-3/5 (555)
	Pruebas y Medidas	Ninguna	IEC 61000-4-1/11
	Instalación/Mitigación	IEEE 446, 1100, 1159	IEC 61000-5-X
	Apertura del fusible	IEEE 242(Protección)	IEC 364
Transitorios y sobretensiones	Ambiente/Compatibilidad	IEEE/ANSI C62.41	IEC 61000-2-5
	Emisión/Límites de inmunidad	Ninguna	IEC 61000-3-X
	Pruebas y Medidas	IEEE/ANSI C62.45	IEC 61000-4-1/2/4/5/12
	Instalación/Mitigación	C62 series, 1100	IEC 61000-5-X
	Ruptura de aislamiento	Ninguna	IEC 664

Figura 3: Estándares internacionales en las perturbaciones

1. Características típicas de los fenómenos electromagnéticos

A. Transitorio impulsivo

Es un cambio súbito y unidireccional (positivo o negativo) en la condición de estado estable de la tensión, la corriente o ambos y de frecuencia diferente a la frecuencia del sistema de potencia.

Son de moderada y elevada magnitud pero de corta duración medida en microsegundos. Normalmente están caracterizados por sus tiempos de ascenso (1 a 10 μsec) y descenso (20 a 150 μsec) y por su contenido espectral.

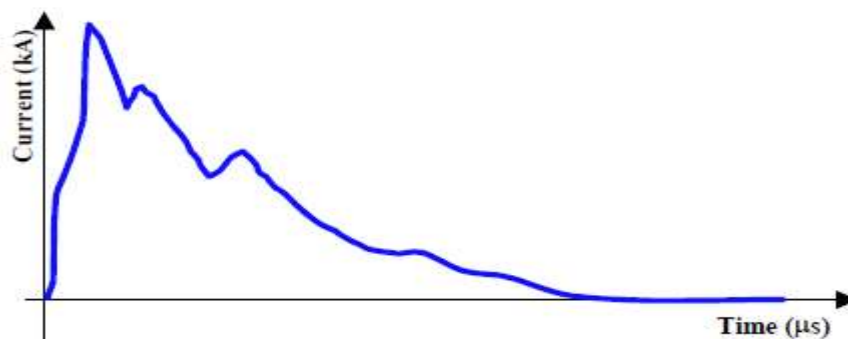


Figura 4: Señal de un transitorio impulsivo

B. Transitorios oscilatorios

Son un cambio súbito en la condición de estado estable de la tensión, la corriente o ambos, con polaridades positivas y negativas y de frecuencia diferente a la frecuencia de operación del sistema.

Este tipo de transitorio se describe por su contenido espectral, duración y magnitud. Por su frecuencia se clasifican en: transitorios de alta, media y baja frecuencia.

- Los transitorios oscilatorios con una frecuencia mayor de 500 kHz y una duración típica medida en microsegundos (o varios ciclos de la frecuencia fundamental) son considerados transitorios oscilatorios de alta frecuencia.
- Cuando la frecuencia se encuentra entre 5 y 500 kHz se considera un transitorio de frecuencia media.
- Un transitorio con una frecuencia inferior a 5 kHz, y una duración de 0,3 ms a 50 ms, se considera un transitorio de **baja frecuencia**.

Sucede en los niveles de subtransmisión y distribución y en los sistemas industriales y es causado por diversos tipos de eventos.

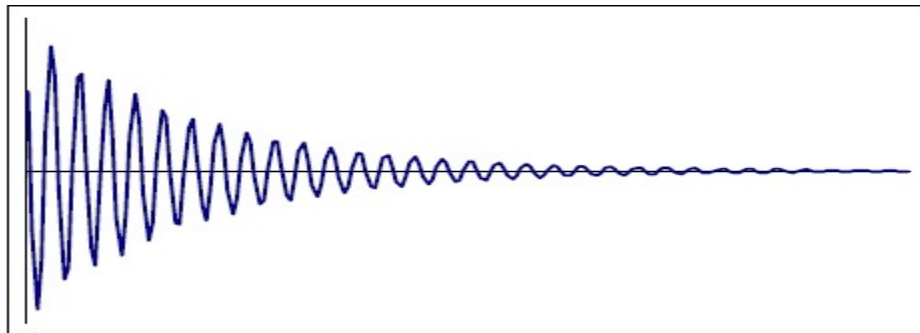


Figura 5: Señal de un transitorio oscilatorio

Son señales de voltaje o corriente cuyos valores instantáneos cambian de polaridad rápidamente.

Alta frecuencia: $f > 500$ kHz y duración [microseg].

Media frecuencia: $5 < f < 500$ kHz y duración [décadas de microseg]

Baja frecuencia: $f < 5$ kHz y duración [0.3 a 50 ms]

C. Variaciones de tensión de corta duración

i. Depresiones

Las depresiones (Sag o Dip), también conocidas como valles o huecos consisten en una reducción entre 0,1 y 0,9 p.u. en el valor R.M.S. de la tensión o corriente con una duración de 0,5 ciclo a un minuto.

Las depresiones de tensión son normalmente asociadas a fallas del sistema, a la energización de grandes cargas, al arranque de motores de elevada potencia y a la energización de transformadores de potencia.

Los efectos nocivos de las depresiones de tensión dependen de su duración y de su profundidad, estando relacionados con la desconexión de equipos de cómputo, PLC y contactores entre otros dispositivos. También presenta efectos sobre la velocidad de los motores.

Diferentes posibilidades existen para mitigar los efectos de los sags. La primera consiste en estabilizar la señal de tensión a través de acondicionadores de red, los cuales existen con diferentes principios y tecnologías.

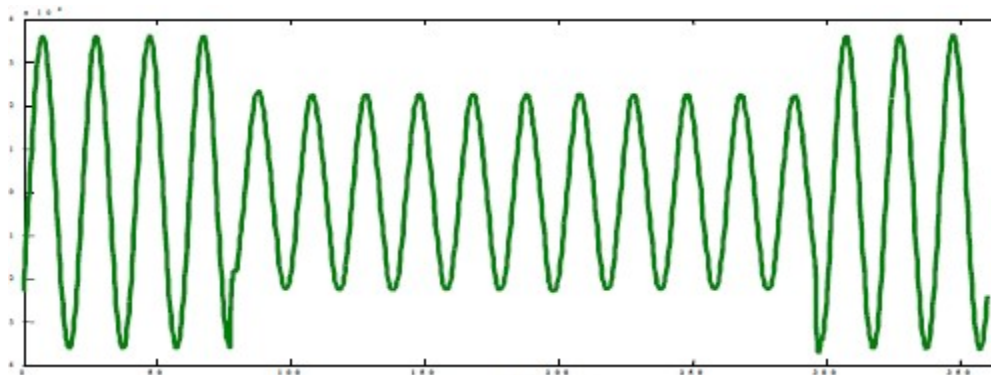


Figura 6: Señal de las depresiones

Disminución del valor eficaz de la tensión entre el 0,9 y el 0,1 p.u. de la tensión de funcionamiento normal y con una duración desde medio ciclo (8 ms o 10 ms) hasta algunos segundos.

ii. Crestas

Una cresta (Swell) se define como un incremento del valor R.M.S. de la tensión o la corriente entre 1,1 y 1,8 p.u. con una duración desde 0,5 ciclo a un minuto.

Como en el caso de las depresiones, las crestas son asociadas a fallas en el sistema aunque no son tan comunes como las depresiones.

Un caso típico es la elevación temporal de la tensión en las fases no falladas durante una falla línea a tierra.

También pueden ser causadas por la desconexión de grandes cargas o la energización de grandes bancos de capacitores.

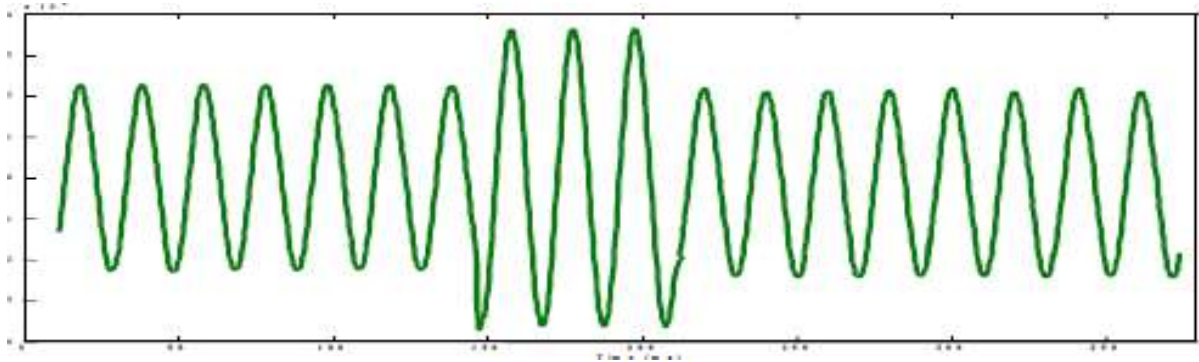


Figura 7: Señal de las depresiones

Incremento del valor eficaz de la tensión entre el 1,1 y el 1,8 p.u. de la tensión de funcionamiento normal, con una duración de entre medio ciclo (8 ms o 10 ms) y algunos segundos.

iii. Interrupciones

Una interrupción ocurre cuando la tensión o la corriente de la carga disminuyen a menos de 0,1 p.u. por un período de tiempo que no excede un minuto.

Las interrupciones pueden ser el resultado de fallas en el sistema, equipos averiados o debidas al mal funcionamiento de los sistemas de control.

El recierre instantáneo generalmente limita la interrupción causada por una falla no permanente a menos de 30 ciclos. La duración de una interrupción motivada por el funcionamiento indebido de equipos o pérdidas de conexión es irregular.

D. Variaciones de tensión de larga duración

Son aquellas desviaciones del valor R.M.S. de la tensión que ocurren con una duración superior a un minuto. La norma ANSI C84.1 especifica las tolerancias en la tensión de estado estable en un sistema de potencia.

Una variación de voltaje se considera de larga duración cuando excede el límite de la ANSI por más de un minuto. Debe prestarse atención a los valores fuera de estos rangos.

En Nicaragua los límites están definidos por la norma retie entre +10% y -10% de la tensión nominal.

Tabla 1: Tolerancia para las Tensiones de acuerdo a la Norma ANSI

VALOR NOMINAL	RANGO DESEABLE	RANGO ACEPTABLE
120	126 - 114	127 - 110
208	218 - 197	220 - 191
240	252 - 228	254 - 220
277	291 - 263	293 - 254
480	504 - 456	508 - 440
2.400	2.525 - 2.340	2.540 - 2.280
4.160	4.370 - 4.050	4.400 - 3.950
4.800	5.040 - 4.680	5.080 - 4.560
13.800	14.490 - 13.460	14.520 - 13.110
34.500	36.230 - 33.640	36.510 - 32.780

Figura 8: Tolerancias de tensiones **Fuente: Norma ANSI C84.1.**

E. Clasificación de las Variaciones de Tensión de Larga Duración

Sobretensión es el incremento de la tensión a un nivel superior al 110% del valor nominal por una duración mayor de un minuto.

Las sobretensiones son usualmente el resultado de la desconexión de grandes cargas o debido a la conexión de bancos de capacitores. Generalmente se observa cuando el sistema es muy débil para mantener la regulación de la tensión o cuando el control de la tensión es inadecuado.

La incorrecta selección del TAP en los transformadores ocasiona sobretensión en el sistema.

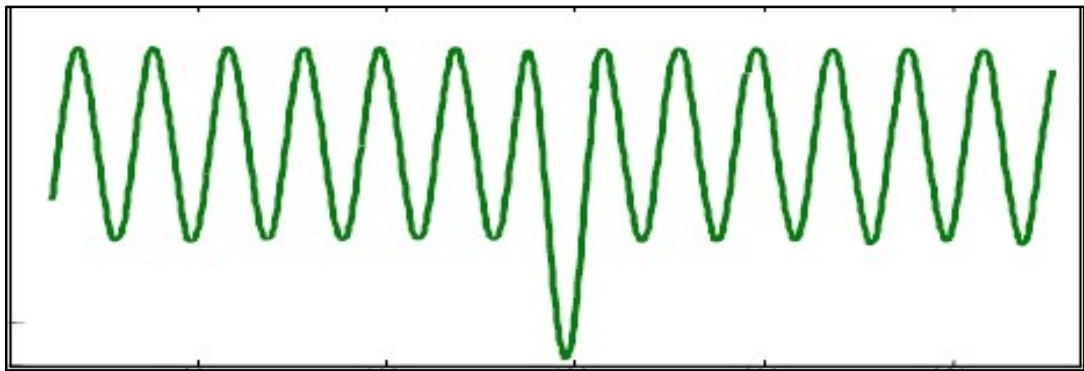


Figura 9: Señal de sobretensión

Incremento repentino de la tensión de corta duración (menor a medio ciclo) y unidireccional.

Se entiende por **baja tensión** la reducción en el valor R.M.S. de la tensión a menos del 90% del valor nominal por una duración mayor de un minuto.

La conexión de una carga o la desconexión de un banco de capacitores pueden causar una baja tensión hasta que los equipos de regulación actúen correctamente para restablecerlo. Los circuitos sobrecargados pueden producir baja tensión en los terminales de la carga.

La sobretensión y la baja tensión generalmente no se deben a fallas en el sistema. Estas son causadas comúnmente por variaciones de la carga u operaciones de conexión y desconexión. Estas variaciones se registran cuando se monitorea el valor R.M.S. de la tensión contra el tiempo.

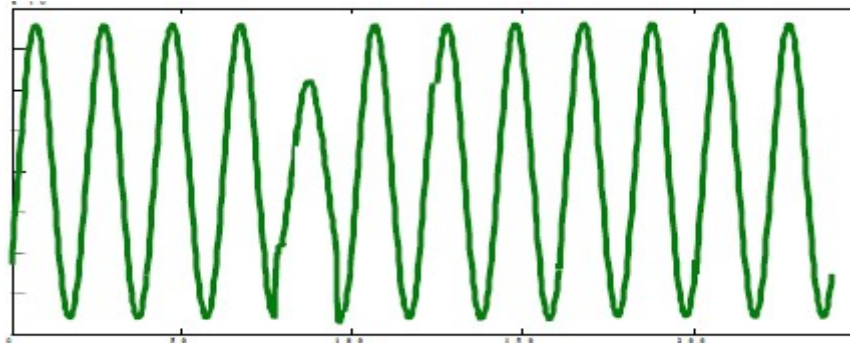


Figura 10: Señal de baja tensión

Decremento repentino de la tensión de corta duración (menor a medio ciclo) y unidireccional

- a. Se considera una **interrupción sostenida** cuando la ausencia de tensión se manifiesta por un período superior a un minuto. Este tipo de interrupciones frecuentemente son permanentes y requieren la intervención del hombre para restablecer el sistema.

F. Desequilibrio de tensiones

El desequilibrio de Tensiones en un sistema eléctrico ocurre cuando las tensiones entre las tres líneas no son iguales y puede ser definido como la desviación máxima respecto al valor promedio de las tensiones de línea, dividida entre el promedio de las tensiones de línea, expresado en porcentaje.

El desbalance también puede ser definido usando componentes simétricas como la relación de la componente de secuencia cero o la componente de secuencia negativa entre la componente de secuencia positiva, expresada en porcentaje.

Las fuentes más comunes del desequilibrio de tensiones son las cargas monofásicas conectadas en circuitos trifásicos, los transformadores conectados en delta abierto, fallas de aislamiento en conductores no detectadas.

Se recomienda que el desequilibrio de tensiones sea menor al 2%.

Magnitud del desbalance:

La máxima desviación de la magnitud de tensión de cada una de las tres fases con respecto a la magnitud promedio del sistema trifásico, dividida por la magnitud promedio.

Ángulo de fase del desbalance:

La máxima desviación de la diferencia de ángulos de fases entre las tres tensiones del sistema, dividida entre $2\pi/3$ radianes.

Relación de desbalance de secuencia negativa:

Es la relación entre las tensiones de la secuencia negativa y la secuencia positiva, multiplicada por 100%.

Relación de desbalance de secuencia cero:

Es la relación entre las tensiones de la secuencia cero y la secuencia positiva, multiplicada por 100%.

G. Distorsión de la forma de onda

La distorsión de la forma de onda es una desviación estable del comportamiento idealmente sinusoidal de la tensión o la corriente a la frecuencia fundamental del sistema de potencia. Se caracteriza, principalmente, por el contenido espectral de la desviación.

Existen cinco formas primarias de distorsión de la forma de onda:

- Corrimiento DC
- Armónicos
- Interarmónicos
- Hendiduras
- Ruido

i. Corriente DC

La presencia de una tensión o corriente directa (DC) en un sistema de corriente alterna (AC) de potencia se denomina corrimiento DC (DC offset). Esto puede ocurrir debido al efecto de la rectificación de media onda, extensores de vida o controladores de luces incandescentes. Este tipo de controlador, por ejemplo, puede consistir en diodos que reducen el valor R.M.S. de la tensión de alimentación por rectificación de media onda.

Efectos de la presencia de DC en redes de AC:

La corriente directa en redes de corriente alterna produce efectos perjudiciales al polarizar los núcleos de los transformadores de forma que se saturan en operación normal causando el calentamiento y la pérdida de vida útil en estos equipos.

La corriente directa es una causa potencial del aumento de la corrosión en los electrodos de puesta a tierra y en otros conductores y conectores.

ii. Armónicos

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales cuya frecuencia es un múltiplo integral de la frecuencia fundamental del sistema la cual, para el caso de nuestro país es 60 Hz.

Las formas de onda distorsionadas son descompuestas, de acuerdo con Fourier, en la suma de una componente fundamental más las componentes armónicas. La distorsión armónica se origina, fundamentalmente, por la característica no lineal de las cargas en los sistemas de potencia.

El nivel de distorsión armónica se describe por el espectro total armónico mediante las magnitudes y el ángulo de fase de cada componente individual. Es común, además, utilizar un criterio denominado distorsión total armónica (THD) como una medida de la distorsión.

Dentro de los efectos nocivos que presentan los armónicos, se pueden citar los siguientes:

- Pueden causar errores adicionales en las lecturas de los medidores de electricidad, tipo disco de inducción.
- Las fuerzas electrodinámicas producidas por las corrientes instantáneas, asociadas con las diferentes corrientes armónicas, causan vibraciones y ruido acústico en transformadores, reactores y máquinas rotativas.
- Son la causa de interferencias en las comunicaciones y en los circuitos de control.
- Provocan la disminución del factor de potencia.
- Están asociados con el calentamiento de condensadores.
- Pueden provocar ferresonancia.
- Provocan calentamiento adicional debido al incremento de las pérdidas en transformadores y máquinas.
- Al incrementarse la corriente debido a los armónicos, se aumentan el calentamiento y de las pérdidas en los cables. Como caso específico, se puede mencionar la presencia de mayor corriente en los neutros de los sistemas de baja tensión.

- Causan sobrecargas en transformadores, máquinas y cables de los sistemas eléctricos.
- Los armónicos de tensión pueden provocar disturbios en los sistemas electrónicos. Por ejemplo, afectan el normal desempeño de los tiristores.

iii. Interarmónicos

Se llaman Interarmónicos a las tensiones o corrientes con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual trabaja el sistema.

Los Interarmónicos se pueden encontrar en redes de todas las clases de tensiones. Las principales fuentes de Interarmónicos son los convertidores estáticos de frecuencia, los ciclos convertidores, los motores asincrónicos y los dispositivos de arco.

Efectos de calentamientos, similares a los producidos por los armónicos, son causados por los Interarmónicos. Debido a que los Interarmónicos son fuentes de son fuentes de las fluctuaciones de tensión, se presenta alto riesgo de la generación de flicker.

La mitigación de los efectos de los Interarmónicos se realiza con base en filtros pasivos

iv. Muecas de Tensión (Notching)

Conocidas también como hendiduras, las muecas son perturbaciones periódicas en la forma de onda de tensión, causadas por la operación normal de los dispositivos de electrónica de potencia, cuando la corriente es conmutada de una fase a otra.

Como ocurren continuamente, son caracterizadas por el espectro armónico de la tensión afectada.

Generalmente son tratadas como un caso especial ya que los componentes de frecuencia asociados a ellas pueden ser tan altos que no son fácilmente detectados por los equipos de medición normalmente utilizados para el análisis armónico.

Las muecas de tensión causan fallas en las CPU, impresoras láser y mal funcionamiento de algunos equipos electrónicos.

La eliminación de las muescas de tensión implica el aislamiento, de los equipos sensibles, de la fuente que las está produciendo. La inserción de inserción de reactancias inductivas también puede servir como solución, para mitigar el efecto de las muescas.

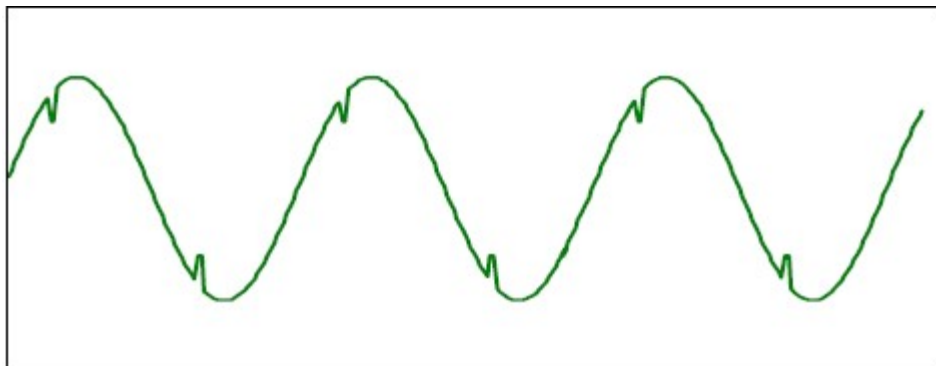


Figura 11: Muecas de tensión

v. Ruido

El ruido es una señal eléctrica indeseable con un contenido espectral inferior a 200 kHz superpuesto a la tensión o a la corriente del sistema en los conductores de las fases o en los conductores neutros o líneas de señales.

H. Fluctuaciones de tensión

Las fluctuaciones de tensión son variaciones sistemáticas de la envolvente de la tensión o una serie de cambios aleatorios de la tensión cuya magnitud no excede normalmente los rangos de tensión especificados por la norma ANSI C84.1.

Las cargas que muestran variaciones rápidas y continuas de la magnitud de la corriente pueden causar variaciones de tensión que son frecuentemente denominadas “flicker”.

El término flicker se deriva del impacto de las fluctuaciones de tensión en las lámparas al ser percibidas por el ojo humano como titilaciones.

Una de las causas más comunes de las fluctuaciones de tensión en los sistemas de transmisión y distribución son los hornos de arco.

En otros sistemas más débiles las fluctuaciones se pueden deber a la presencia de equipos de soldadura por arco y cargas similares.

La señal de flicker se define por su magnitud R.M.S. expresada como por ciento de la tensión nominal.

Típicamente magnitudes tan bajas como 0,5% de la tensión del sistema pueden producir un titileo perceptible en las lámparas si la frecuencia está en el rango de 6 a 8 Hz. El flicker de tensión se mide con respecto a la sensibilidad del ojo humano.

I. Variaciones de frecuencia en el sistema de potencia

La variación de frecuencia es la desviación de la frecuencia fundamental del sistema de su valor nominal especificado (60 Hz en el caso de Nicaragua).

La frecuencia está directamente relacionada con la velocidad de rotación de los generadores que componen el sistema. Normalmente existen ligeras variaciones de frecuencia debido a la fluctuación del balance entre la generación y la demanda de potencia de un sistema.

5.4 Continuidad en el servicio

La continuidad del suministro es el aspecto de calidad más inmediato y evidente, generalmente se le llama confiabilidad del suministro. Hasta no hace demasiado tiempo, era el único aspecto relevante de la calidad del servicio. A medida que los países se han ido desarrollando, se han alcanzado mayores niveles de continuidad del suministro cada vez más aceptados por los clientes, sobre todo en zonas urbanas o de gran consumo.

Pero también han aparecido equipos que están suministrando cada vez más perturbaciones en la red (computadoras, convertidores, etc.) y que además son más sensibles a esas mismas perturbaciones u otras ya existentes en la red.

La IEEE considera una interrupción como la pérdida de alimentación en corriente alterna durante medio ciclo de la frecuencia del sistema NEMA (para el caso del sistema eléctrico de México 8.34 ms) En el caso de Nicaragua ha adoptado en NEMA como referencia de norma eléctrica.

Sin embargo, el concepto de interrupción de energía eléctrica va más allá de esa definición, se interpreta como una interrupción perceptible ya que basta con que se interrumpa la energía por algunos ciclos o milisegundos para que se pueda afectar a ciertos tipos de cargas sensibles.

5.4.1 Interrupciones imprevistas de energía eléctrica

Este tipo de interrupciones son las que más afectan a los clientes, puesto que no han podido tomar medidas para contrarrestar sus efectos. Pueden mencionarse las siguientes causas de este tipo de interrupciones: de fuerza mayor, climática, fallas en componentes, causas desconocidas, etc. Estas interrupciones pueden durar tiempos prolongados debido a que no se tiene control sobre ellas.

5.4.2 Interrupciones programadas de energía eléctrica

Este tipo de interrupciones están previstas y por tanto los clientes afectados están avisados. De hecho, para ser consideradas previstas, deben ser avisadas con un tiempo mínimo de antelación a los clientes afectados, para que estos puedan tomar las medidas oportunas para minimizar el impacto de las mismas. Suelen producirse por un motivo de nuevas instalaciones, mantenimiento de las líneas, etc.

5.4.3 Interrupciones breves de energía

Se considera como una interrupción breve cuando la tensión en los puntos de suministro es inferior al 1% del valor de tensión acordado y dura menos de 1 minuto.

Estas interrupciones son provocadas por fallas despejadas por los sistemas de protección con reposición del suministro, todo ello de manera automática como todas las perturbaciones debidas a fallas con alto componente de aleatoriedad.

5.4.4 Interrupciones largas de energía

Las interrupciones largas pueden ser debidas a una falta de generación, lo que supone dejar sin alimentación una parte de la demanda. La línea de transmisión también puede provocar interrupciones largas, es poco probable ya que se ha invertido mucho en su protección y en el estudio de la confiabilidad de la línea de transmisión frente a fallas.

La razón es que una falla en la línea de transmisión puede afectar a una zona muy amplia de suministro, siendo muy grande el daño causado. En las redes de distribución es donde se genera la mayoría de las interrupciones del suministro, este tipo de interrupciones tienen un efecto local, lo que les resta importancia en comparación de las ocurridas en las líneas de transmisión.

A. Distorsión armónica

El matemático francés Jean Baptiste Fourier formuló que una función periódica no sinusoidal de una frecuencia fundamental f puede ser expresada como la suma de funciones sinusoidales de frecuencia que son múltiplos de la frecuencia fundamental.

A esto se le conoce como armónicos, que son componentes sinusoidales en múltiplos de la frecuencia fundamental, cuya amplitud de onda va decreciendo conforme aumenta el múltiplo. Una función sinusoidal de tensión o de corriente depende del tiempo t y puede ser representada por las siguientes expresiones.

$$v(t) = V_p \text{sen}(\omega t)$$

$$i(t) = I_p \text{sen}(\omega t \pm \Phi)$$

$$\omega = 2\pi f$$

Dónde:

$v(t)$ = Tensión eléctrica en función del tiempo, en V.

$i(t)$ = Intensidad de corriente en función del tiempo, en A.

V_p = Tensión eléctrica, en valor pico.

I_p = Intensidad de corriente, en valor pico.

ω = Velocidad angular del periodo de la forma de onda.

Φ = Ángulo de desfasamiento, en grados.

f = Frecuencia del sistema, en Hz.

t = Tiempo, en s.

Fourier explicó por primera vez la distorsión existente con respecto a la forma de onda fundamental expresada por las ecuaciones anteriores. Asimismo, las formas de onda no senoidales fueron expresadas en series de Fourier cuya expresión describe la forma que describe la onda:

$$v(t) = v_0 + v_1 \text{sen}(\omega t) + v_2 \text{sen}(2\omega t) + \dots + v_n \text{sen}(n\omega t) + v_{n+1} \text{sen}((n+1)\omega t)$$

La ecuación anterior de Fourier es una serie infinita. En esta ecuación, V_0 representa la constante o la componente de corriente directa de la forma de onda. v_1, v_2, \dots, v_n , son los valores pico de los términos de las series sucesivas. Los términos son conocidos como armónicos de forma de onda. Los armónicos de la frecuencia fundamental están dados por la ecuación

$$f_h = h \times \text{frecuencia fundamental}$$

El número del armónico es representado por h que es un entero que representa el número de veces de la frecuencia fundamental. El primer armónico está dado para la frecuencia fundamental, así como el 0 representa la constante o la componente de corriente directa de la forma de onda. La Frecuencia fundamental es la frecuencia a la cual el sistema opera, en México es de 60 Hz.

Usualmente los armónicos son representados y observados como múltiplos enteros, pero existen aplicaciones que producen armónicos de tensión y corriente que no son enteros. Los hornos de arco eléctrico son ejemplo de cargas que generan armónicos que no son enteros.

Idealmente una fuente de tensión eléctrica debe mostrar invariablemente una señal de tensión y corriente con una forma de onda sinusoidal pura, para cualquier carga. Debido a la inserción en el sistema de cargas no lineales el sistema se ha visto mermado debido a una fuerte distorsión armónica cuyos efectos son tangibles en las formas de onda de tensión y corriente como se muestra en la figura:

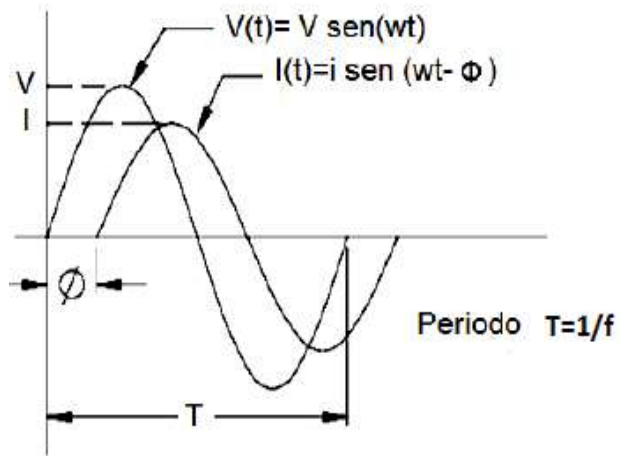


Figura 12: Señal ideal intensidad de corriente y tensión eléctrica en función del tiempo.

En la siguiente figura se muestran las ondas de tensión para la primera, segunda y tercera armónica

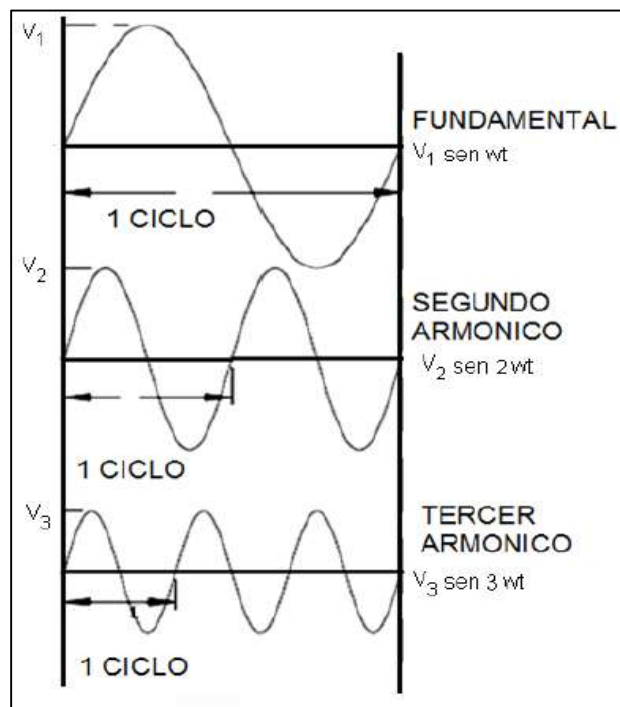


Figura 13: Onda fundamental de la segunda y tercera armónica

a. Origen del problema de los armónicos

Los sistemas eléctricos actualmente cuentan con una gran cantidad de elementos llamados no lineales. Las cargas no lineales son aquellas en las que la forma de onda de tensión y de corriente aplicadas no se parece a las que la fuente suministra, es decir las formas de onda en las cargas presentan distorsión. La distorsión armónica en su mayor parte es causada por las cargas no lineales.

En la figura siguiente se presenta el esquema del origen de los armónicos

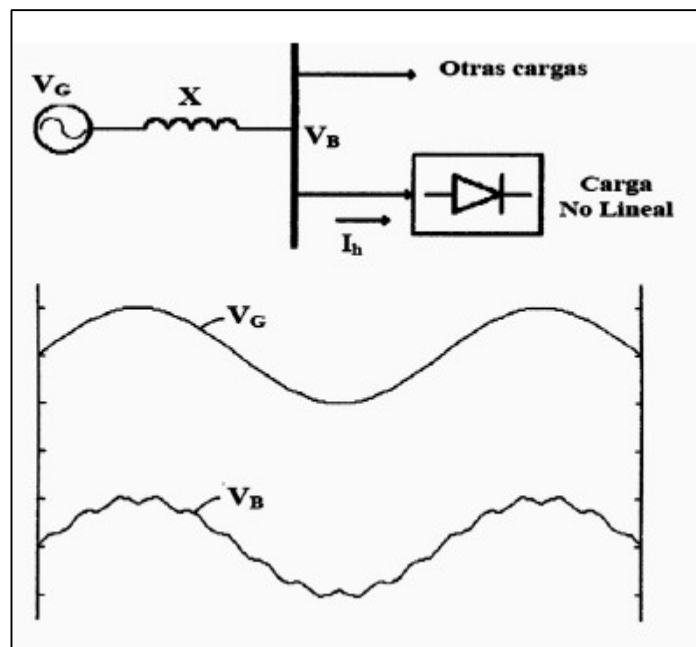


Figura 14: Esquema básico de distorsión de tensión

Las corrientes de diferente frecuencia provocan caídas de tensión de frecuencia distinta de 60 Hz, en la reactancia de corto circuito X . Esto origina, en definitiva, que la tensión en la barra (V_B) se distorsione como se observa en la figura 2.9, afectando a otros consumidores y a la misma carga no lineal.

Diferentes cargas no lineales producen espectros armónicos diferentes, pero identificables.

Esto hace que la tarea de identificar posibles causas de distorsión armónica más tangibles, es decir, cada carga no lineal produce una cierta forma de onda armónica que la hace identificable y por tal manera se puede eliminar el armónico producido bajo diferentes técnicas de mitigación de armónicos.

En la actualidad los controladores de velocidad ajustables que funcionan eficientemente son generadores de grandes corrientes de armónicos.

Las lámparas fluorescentes trabajan con tecnologías que coadyuvan a tener un menor consumo de energía eléctrica, en su proceso este tipo de lámparas son grandes fuentes de armónicos de corriente.

De igual manera el gran creciente del uso de computadoras personales es la causa de la proliferación de grandes cantidades de armónicos en edificios comerciales.

Los armónicos son un fenómeno que genera problemas tanto para los usuarios como para la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica ocasionando diversos efectos negativos en los equipos de la red. Muchas de las cargas instaladas en el sistema eléctrico son grandes generadoras de armónicos que combinados con la impedancia del sistema eléctrico, producen armónicos de tensión.

b. Modelado matemático del contenido armónico

Los indicadores de armónicos permiten evaluar la cantidad de armónicos presentes en una instalación eléctrica, estos indicadores pueden ser de forma individual, es decir, el indicador de cada armónica y de forma total respecto a la fundamental. En la actualidad existen equipos de medición de los indicadores de armónicos, tales como los analizadores de redes.

La distorsión armónica individual (CI) es la relación entre la media cuadrática (RMS) del valor del armónico individual y el valor eficaz de la fundamental. Es decir:

$$IHD_n = \frac{I_n}{I_1}$$

La distorsión armónica individual sirve para cuantificar la distorsión con base a la frecuencia fundamental este cálculo es el ocupado por la IEEE, el valor de la distorsión armónica es siempre del 100%.

La distorsión armónica individual indica la contribución de cada armónico a la distorsión de la forma de onda, y la distorsión total armónica describe la desviación neta de toda la distorsión sobre la fundamental. La distorsión armónica individual sirve para efectuar procesos de eliminación de armónicos, debido a que es un parámetro individual el cual muestra el comportamiento de una forma de onda armónica que afecta a cierto sistema eléctrico, basado en IHD se pueden proponer métodos de mitigación de armónicos.

La distorsión armónica total es un término usado para describir la desviación neta de los armónicos, los porcentajes de distorsión son diferentes con respecto a la distorsión armónica individual. La distorsión armónica total es la relación entre el valor RMS de los armónicos y el valor RMS de la fundamental. Por ejemplo si una corriente no lineal tiene una componente fundamental I_1 y componentes armónicas $I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, \dots$, en términos del valor RMS se tiene que el valor total del armónico es :

$$I_H = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + I_7^2 + \dots)}$$

$$THD = \frac{I_H}{I_1} \times 100\%$$

Siendo para la distorsión armónica de tensión las siguientes ecuaciones

$$E_H = \sqrt{(E_2^2 + E_3^2 + E_4^2 + E_5^2 + E_6^2 + E_7^2 + \dots)}$$

$$THD = \frac{E_H}{E_1} \times 100\%$$

La distorsión armónica total no proporciona parámetros particulares de las componentes de la distorsión armónica, pero los parámetros arrojados por la distorsión armónica total son de utilidad para el conocimiento de la forma de onda, así como la frecuencia armónica característica. Esto es una referencia para el monitoreo de los armónicos.

c. Efectos de los armónicos

El grado al cual los armónicos pueden ser tolerados es determinado por la susceptibilidad de la carga (o fuente de potencia) hacia ellos.

El mínimo tipo de susceptibilidad de equipos es aquel en el cual la función principal es un calentador, tal como un horno u caldera. Es este caso, la energía armónica generalmente es utilizada y es completamente tolerable.

El mayor tipo de susceptibilidad de los equipos es aquel cuyo diseño o constitución asume una entrada fundamental sinusoidal casi perfecta. Este equipo esta frecuentemente en las categorías de comunicación o equipo de procesamiento de datos.

Un tipo de carga que normalmente se encuentra entre los dos extremos de susceptibilidad mencionados es la carga del motor. Muchas cargas de motores son relativamente tolerantes de armónicos.

Incluso en el caso de los equipos menos susceptibles, los armónicos pueden ser dañinos. En el caso de un horno, por ejemplo, ellos pueden causar calentamiento en el dieléctrico o esfuerzo eléctrico, el cual ocasiona envejecimiento prematuro del aislamiento eléctrico.

En motores y generadores: la presencia de armónicas de tensión y corriente en las máquinas rotativas incrementan el calentamiento debido a las pérdidas en el cobre y en el hierro a frecuencias armónicas. De este modo los componentes armónicos afectan la eficiencia de la máquina, y por lo tanto puede afectar el par desarrollado por el motor.

Las corrientes armónicas en un motor pueden dar aumento a una alta emisión de ruido audible al compararlas con una excitación sinusoidal. Los armónicos además producen una distribución del flujo resultante en el entrehierro, el cual puede causar o intensificar el fenómeno llamado muesca (negándose a arrancar fácilmente) o un deslizamiento muy alto en motores de inducción.

En transformadores: con la excepción de aquellos armónicos aplicados a transformadores que pueden resultar en incrementos del ruido audible, los efectos en estos componentes usualmente son aquellos de calentamiento. El efecto de los armónicos en transformadores es doble:

- Las corrientes armónicas causan un incremento de pérdidas en el cobre y pérdidas de flujos dispersos.
- Las tensiones armónicas causan un incremento de pérdidas en el hierro.

El efecto total es un incremento en el calentamiento del transformador, al ser comparado con una operación puramente sinusoidal (fundamental). La IEEE proporciona un límite de armónicos para el transformador de corriente. El límite superior del factor de distorsión de corrientes es el 5% de la cantidad de corriente.

Puede notarse que las pérdidas del transformador causadas por corrientes y tensiones armónicas dependen de la frecuencia. El incremento de pérdidas con el incremento de frecuencia y, por lo tanto, los componentes armónicos de alta frecuencia pueden ser más importantes que los componentes armónicos de baja frecuencia causando calentamiento en el transformador.

En equipo electrónico: El equipo electrónico de potencia es susceptible a mal funcionamiento causado por las distorsiones armónicas. Este equipo a menudo depende de la determinación exacta del cruce por tensión en cero o de otros aspectos de la forma de onda de tensión.

La distorsión armónica puede resultar en un cambio en el cruce por cero de la onda de tensión en el punto al cual una tensión eléctrica de fase a fase se vuelve mayor.

Estos son los dos puntos críticos para muchos tipos de controles de circuitos electrónicos, y estos cambios pueden llevar al mal funcionamiento del equipo.

Las computadoras y equipos asociados tal como los controladores programables frecuentemente requieren fuentes de corriente alterna con un factor de distorsión de tensión armónico menor al **5%**, con el mayor armónico solo siendo menor al **3% de la fundamental de tensión.**

Los altos niveles armónicos resultan en irregularidades, algunas veces sutiles, mal funcionamiento de los equipos que pueden, en algunos casos, tener serias consecuencias. Los instrumentos pueden ser afectados similarmente, dando datos erróneos o de otra manera puede resultar su funcionamiento impredecible.

En mediciones: Los equipos e instrumentos de medición son afectados por componentes armónicas. Los dispositivos con disco de inducción, normalmente registran solo la corriente fundamental; sin embargo, el desbalance de fase ocasionado por las distorsiones armónicas puede causar operaciones erróneas en estos dispositivos, estos errores pueden ser tanto positivos como negativos sobre el valor real, dependiendo del equipo de medición

Mecanismos de control: En los sistemas de control las corrientes armónicas pueden incrementar el calentamiento y las pérdidas en mecanismos de control, por lo tanto, reducen la capacidad de carga de la corriente y acortan la vida de algunos componentes.

Los fusibles sufren una reducción en su capacidad nominal debido al calentamiento generado por los armónicos.

Actualmente no hay una norma para los niveles de corrientes armónicas requeridas por los dispositivos de maniobra o fusibles para la interrupción, debido a que todas las pruebas son realizadas en intervalos de frecuencias de alimentación.

En forma muy resumida se presentan en este punto algunos de los efectos negativos más importantes de las armónicas.

- Mayores solicitaciones térmicas.
 - Pérdidas adicionales en conductores.
 - Pérdidas adicionales en núcleos de las máquinas.
- Mayor exigencia del sistema dieléctrico.
 - Conductores.
 - Condensadores.
- Operaciones anormales y fallas de equipos.
 - Pares pulsantes en máquinas.
 - Operaciones falsas en protecciones.
 - Señales de referencias falsas.
 - Interferencia en comunicaciones.
 - Errores de medición.
 - Interferencia electrónica de aparatos de control.
 - Corrientes importantes en neutros.
- Excitación de resonancias en la red.
 - Explosión de filtros o bancos de condensadores.
 - Destrucción de transformadores.
 - Operación de fusibles.

En las últimas décadas, las empresas eléctricas y los usuarios se han visto enfrentados a la necesidad de optimizar sus procesos para mejorar la eficiencia en el uso de la energía eléctrica.

El aumento en la eficiencia se ha conseguido mediante la incorporación masiva de convertidores estáticos, para controlar y transformar la energía eléctrica. Los convertidores estáticos han sido en gran medida responsables de los grandes avances en la automatización de los procesos industriales.

Sin embargo, estos equipos se caracterizan porque demandan corrientes no sinusoidales de la red, originando distorsiones en las tensiones y corrientes. En la actualidad, se observa que el uso industrial de los convertidores estáticos sigue aumentando y con ello incrementan los problemas asociados a las corrientes no sinusoidales. Esta es la razón de porqué se ha producido un gran interés en el problema de las armónicas en redes eléctricas.

B. Factor de potencia

Se puede definir como el coseno del ángulo de desplazamiento de las ondas de corriente y tensión, referidas a un eje de referencia. De igual forma es la relación existente entre la potencia real y la potencia aparente. En otras palabras, se puede entender como un indicador del aprovechamiento de la energía que se recibe, en la instalación.

El bajo factor de potencia es un problema común que se presenta en las instalaciones eléctricas, el cual afecta directamente al consumidor, asimismo está en sus manos corregirlo para obtener un beneficio.

El fundamento de este problema se encuentra en los principios básicos de los circuitos de corriente alterna, con hincapié en las potencias activa, reactiva y aparente.

➤ **Modelo matemático**

Potencia activa: es la cantidad de potencia realmente consumida por una carga, su unidad de medida son los watts, se puede medir directamente con un wattímetro. Se representa con la letra "P", para su cálculo se tiene

Dónde:

$$P = VI \cos \phi = S \cos \phi = S (F.P.)$$

P= Potencia activa, en W.

V= Tensión eléctrica, en V.

I= Intensidad de corriente en A.

ϕ = Es el ángulo de desfasamiento entre la tensión y la intensidad de corriente eléctrica.

S= Potencia aparente, en VA.

Q= Potencia reactiva, en Var

Potencia reactiva: los dispositivos eléctricos que hacen uso del efecto de un campo electromagnético, utilizan la potencia activa para efectuar su trabajo útil, asimismo utiliza la potencia reactiva para poder generar el campo magnético.

Esta potencia está dada en volt-Amper reactivos (VAR), se representa por la letra Q, y para su cálculo se tiene:

$$Q = S \text{ sen}\phi = V I \text{ sen}\phi$$

Potencia aparente: la suma fasorial de la potencia reactiva y activa da la potencia aparente, es decir, es la potencia total que consume una determinada carga eléctrica para realizar su función de manera completa. Está dada en Volt-Amper, y se representa con la letra "S", se calcula de la manera siguiente

$$S = V * I$$

Las ecuaciones de potencias están dadas en su forma general, las cuales dependerán del arreglo del sistema al cual se esté estudiando.

Representación gráfica: Las potencias antes mencionadas se relacionan gráficamente, por medio del triángulo de potencias, como se muestra en la figura

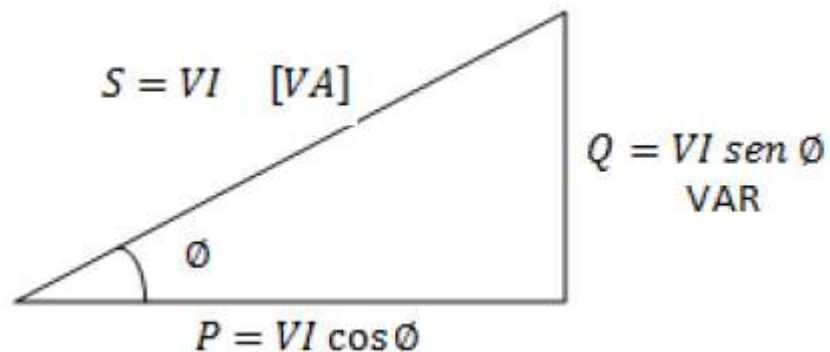


Figura 15: Triángulo de potencia

Las cargas eléctricas pueden estar compuestas por elementos inductivos, capacitivos y resistivos. La componente reactiva está compuesta por cargas capacitivas e inductivas, donde tienen efectos opuestos, por lo cual la potencia reactiva se determina por su diferencia.

Si en la carga eléctrica predomina el elemento inductivo corresponde al triángulo de potencia de la figura, si predomina la carga capacitiva corresponde el de la figura. Es de resaltar que las cargas predominantes en las instalaciones eléctricas son las del tipo resistivo e inductivo.

El factor de potencia se define teóricamente como la razón de la potencia activa a la potencia aparente, como se muestra a continuación:

$$F.P. = \frac{\text{Potencia activa}}{\text{potencia aparente}} = \frac{P}{S}$$

Aplicando el teorema de Pitágoras al triángulo de potencias se tiene

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Sustituyendo la ecuación en la, se obtiene:

$$F.P. = \frac{P}{P^2+Q^2}$$

Así mismo aplicando las ecuaciones de la potencia activa y aparente, se obtiene

$$F.P. = \frac{P}{S} = \frac{VI \cos \phi}{VI} = \cos \phi$$

La variable ϕ corresponde al ángulo de desfase entre el vector de tensión y el vector de intensidad de corriente eléctrica. A partir de las ecuaciones anteriores se puede deducir que cuanto menor sea este ángulo mejor se estará aprovechando la energía eléctrica.

Para mejorar el factor de potencia en una instalación eléctrica es necesario compensar los efectos inductivos con su elemento contrario, el capacitor, una carga que consuma mayor potencia reactiva el F.P. será más bajo, y por lo consiguientes será mayor la cantidad de corriente en la red.

Por ejemplo, para un factor de potencia igual a 0.5 la cantidad de la corriente por la carga será dos veces la corriente útil, es decir, se puede reducir un 50% la corriente demandada sin sacrificar parte de la carga. De igual manera dada una potencia, la cantidad de corriente que demanda una carga se incrementa a medida que el factor de potencia disminuya.

Las cargas industriales en su naturaleza eléctrica son de carácter reactivo a causa de la presencia principalmente de equipos de refrigeración, motores, etc. Este carácter reactivo obliga que junto al consumo de potencia activa (kW) se sume la potencia reactiva (kvar), las cuales en su conjunto determinan el comportamiento operacional de dichos equipos y motores. Esta potencia reactiva ha sido tradicionalmente suministrada por la empresa suministradora, aunque puede ser suministrada por las propias industrias.

Al ser suministradas por las empresas de electricidad deberá ser producida y transportada por las redes, ocasionando necesidades de inversión en capacidades mayores de los equipos y redes de transmisión y distribución. Todas las cargas industriales necesitan de corrientes reactivas para su operación.

➤ **Origen del factor de potencia bajo**

La potencia reactiva, la cual no produce un trabajo físico directo en los equipos, es necesaria para producir el flujo electromagnético que pone en funcionamiento elementos tales como: motores, transformadores, lámparas fluorescentes, equipos de refrigeración y otros similares. Cuando la cantidad de estos equipos es apreciable los requerimientos de potencia reactiva también se hacen significativos, lo cual produce una disminución del factor de potencia. Un alto consumo de energía reactiva puede producirse como consecuencia principalmente de un gran número de motores.

- Presencia de equipos de refrigeración y aire acondicionado.
- Sobre-utilización de la capacidad instalada en equipos electromecánicos, por una mala planificación y operación en el sistema eléctrico de la industria.
- Mal estado físico de la red eléctrica y de los equipos de la industria.
- Las cargas puramente resistivas, tales como alumbrado incandescente, resistencias de calentamiento, etc. No causan este tipo de problema ya que no necesitan de la corriente reactiva.

Mejorar el factor de potencia resulta práctico y económico, por medio de la instalación de bancos de capacitores eléctricos estáticos, o utilizando motores sincrónicos disponibles en la industria (algo menos económico si no se dispone de ellos).

➤ **Problemas debidos a un factor de potencia bajo.**

El factor de potencia está ligado directamente con la corriente del sistema, y a su vez con el aprovechamiento de la energía que se consume. Por lo cual si se aumenta la corriente la cual es innecesaria se ocasionan grandes problemas, como son:

- Aumentan las pérdidas por efecto Joule en: conductores, embobinados de transformadores, etc.
- Al aumentar la corriente, aumenta la caída de tensión que puede afectar a los sistemas de protección y control.
- Las instalaciones eléctricas no pueden ser usadas a toda su capacidad, lo cual toma importancia en los transformadores de distribución.
- Existen penalizaciones al usuario, haciendo que pague más por consumo de electricidad.

VI. Hipótesis y Variable

Hipótesis

Con la realización del estudio de calidad de la energía en cualquier sistema eléctrico se puede determinar la afectación que tiene sobre el sistema y equipos finales y verificar que cumplan con la norma provisional "perturbaciones permisibles en la forma de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica.

Variables

1. Pertinencia de la Información.
2. Funcionalidad de la Información.
3. Adecuación de la Información.
4. Parámetros eléctricos de Interés Tratados (Voltaje, Corriente, Factor de Potencia, armónicos, transitorios).

VII. Metodología de Trabajo

En esta metodología exponemos un estudio de calidad de la energía eléctrica , para determinar el buen funcionamiento de la instalación eléctrica , a partir de mediciones desde el panel principal o general , además para detectar posibles disturbios.

El análisis de calidad eléctrica deberá estar enfocado a cumplir con las normas nacionales e internacionales principales a este respecto. El análisis cumplirá los siguientes puntos:

A. Análisis previo

Se discutirá con los usuarios los antecedentes que se han detectado referentes a todos y cada uno de los problemas que se atribuyen a una mala calidad de energía eléctrica.

B. Inspección visual y recopilar datos

Se llevará a cabo una inspección visual y levantamiento de información al respecto a la instalación eléctrica, carga conectada y equipos afectados.

El objetivo de este paso es el de reunir datos de todo aquello relacionado con el uso de la energía de la empresa, tales como: historial de consumo de energéticos, información recopilada como resultado de una inspección visual a toda la planta y las mediciones.

C. Medición de Parámetros Eléctricos

Se considera un total de 24 horas para la medición del equipo especialista en calidad de la energía eléctrica, se podrán realizar las mediciones necesarias para evaluar los sistemas y diagnosticar los problemas con sus posibles soluciones.

Para la realización del presente estudio, se utilizará el equipo trifásico marca Fluke 438-II (POWER QUALITY ANALYZER).

D. Analizar los datos

Una vez que la información ha sido recopilada en los pasos anteriores, la información deberá ser capturada y ordenada para proceder a su análisis, con la finalidad de identificar las áreas de afectaciones en la instalación.

Con la finalidad de identificar a los equipos y sistemas más intensivos en el consumo de Energía, la primera actividad a realizar en esta etapa de la calidad de la energía, es la realización de las mediciones de la energía.

Por otra parte, con la finalidad de asegurar que se están evaluando todas las medidas posibles, es muy importante el contar con una lista de verificación de áreas de oportunidad de mejora.

E. Elaborar el informe final del estudio

El paso final es el de preparar un informe que contenga las observaciones y conclusiones del estudio, haciendo énfasis en el análisis de los parámetros medidos y su cumplimiento en base a las normas eléctricas y el plan de acción para implantarlas.

VIII. Análisis de mediciones y resultados

Se realizó el presente estudio de calidad de la energía eléctrica en la empresa Plástico Modernos, con la finalidad de conocer el comportamiento actual del sistema eléctrico y recomendar soluciones a los problemas en el sistema eléctrico actual.

Se realizan y analizan monitoreo de parámetros de estado estable (perfil de voltaje, corriente, potencia, factor de potencia, distorsión armónica en voltaje y distorsión armónica en corriente), encontrándose comportamientos diferentes para las mediciones consideradas, debido principalmente al tipo de carga instalada.

El reporte muestra las conclusiones sobre violaciones a la norma, instalación eléctrica, y sobre cada uno de los disturbios de calidad de energía registrados, recomendando el sistema de protección más adecuado para la solución de los problemas.

Los puntos considerados para el monitoreo, los cuales forman una parte del total de la carga instalada en el panel principal

8.1 Metodología para el análisis de parámetros

Para la realización del presente estudio, se hizo uso de un equipo trifásico marca Fluke 438-II (POWER QUALITY ANALYZER) con sensores de corriente de una capacidad de 6,000 amperes.

El equipo fue conectado en las terminales de entrada del Tablero eléctrico principal PG, tomando así el total de la carga conectada durante el período de medición

El período de medición fue de 24 horas continuas en el panel principal, tomado muestras cada 10 segundos. Esto representa un muestreo total de 8,640 muestras para cada parámetro eléctrico registrado.

Las 8,640 muestras registradas se almacenan en memoria y se procesan para obtener los perfiles de operación de cada parámetro eléctrico.

De estos parámetros eléctricos se obtienen los valores máximos, mínimos y promedios para establecer los límites de operación del sistema eléctrico y son comparados con lo que recomiendan los estándares internacionales.

Además, se programó el equipo para detectar eventos de tipo transitorio en voltaje con variaciones por encima del 20% de voltaje pico, esto con la finalidad de evaluar si los arranques de cargas internas impactan en el voltaje de suministro, o en su defecto registrar los eventos que son generados externamente y son reflejados hacia este nodo.

Diagrama de Carga de la instalación eléctrica

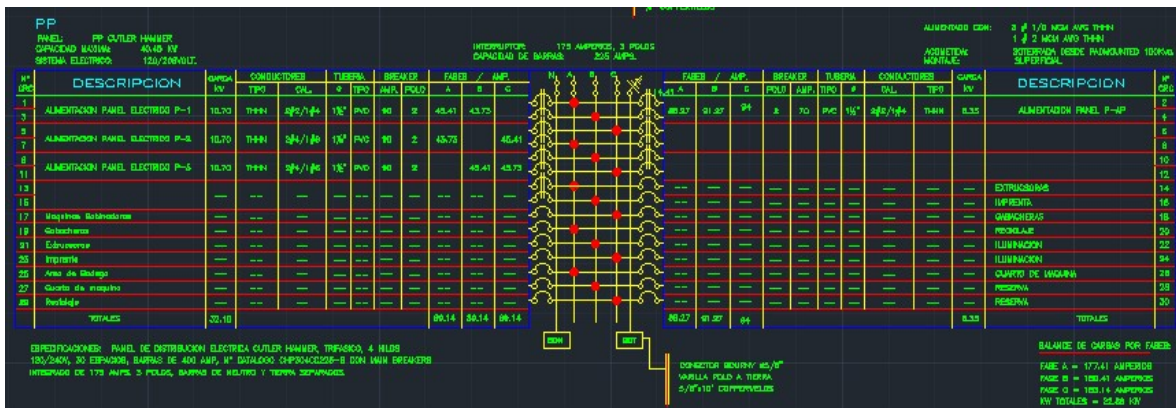
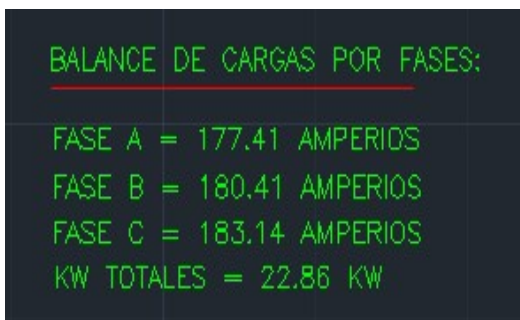


Figura 16: Tablero y Balance de carga



8.2 Gráficos de parámetros eléctricos y sus análisis

A. Voltaje máximo de línea

En la gráfica se muestra el perfil del voltaje en un período de 24 hrs. El comportamiento del voltaje promedio es de 220.26 Volts, valor que se encuentra 0.12% arriba del valor nominal de 220 Volts del Tablero.

La ventana de variación presenta un máximo de 228 Volts (4.32% arriba del valor nominal) y un mínimo de 213.82 Volts (2.81% abajo del valor nominal).

Los valores máximos se presentaron de manera instantánea y se encuentran DENTRO del rango recomendado por el Std. IEEE 1100-1999 tabla 4-3 (variación no mayor al 5% del valor nominal), el cual está enfocado a la operación de equipo electrónico crítico.

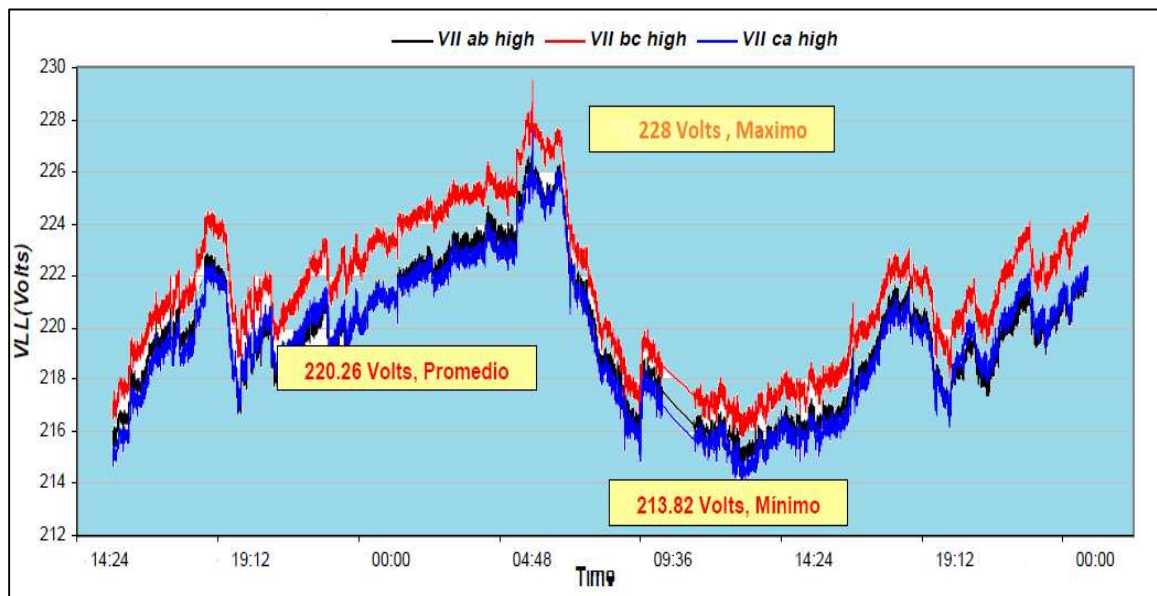


Figura 17: Mediciones de Voltaje máximo de línea

B. Eventos Transitorios de Voltaje

En los gráficos se muestran los eventos transitorios más altos registrados. La máxima magnitud fue de 372.5 Volts, con una duración de 39 mseg., lo cual representa un 69% arriba del valor nominal de 220 Volts. Este tipo de evento se clasifica como “IMPULSO” y es generado de manera externa, o interna por cargas instaladas en la planta

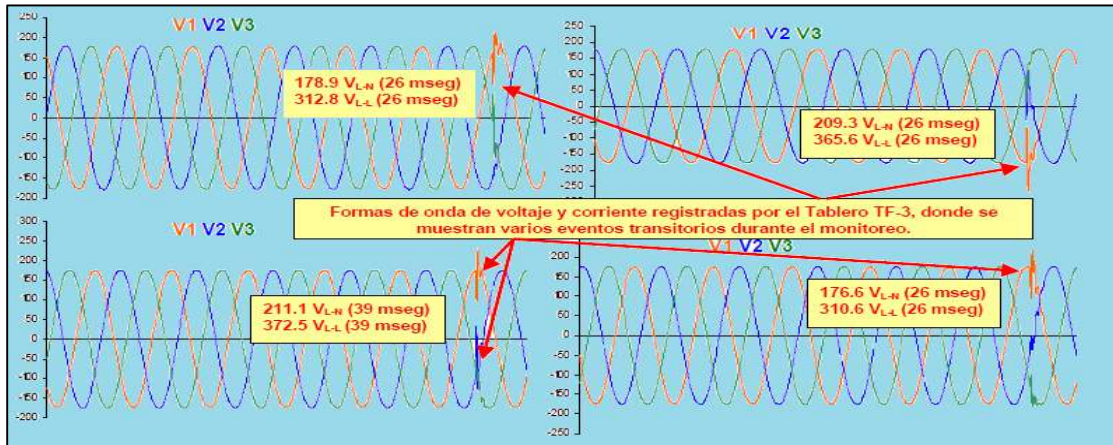


Figura 18: Mediciones de eventos transitorios de voltaje

C. Formas de Onda Voltaje y Corriente

En los gráficos se muestran las formas de onda individuales (por fase), donde se observa una ALTA distorsión armónica en la señal de corriente. Este efecto en la corriente puede causar problemas de operación en cargas electrónicas sensibles.

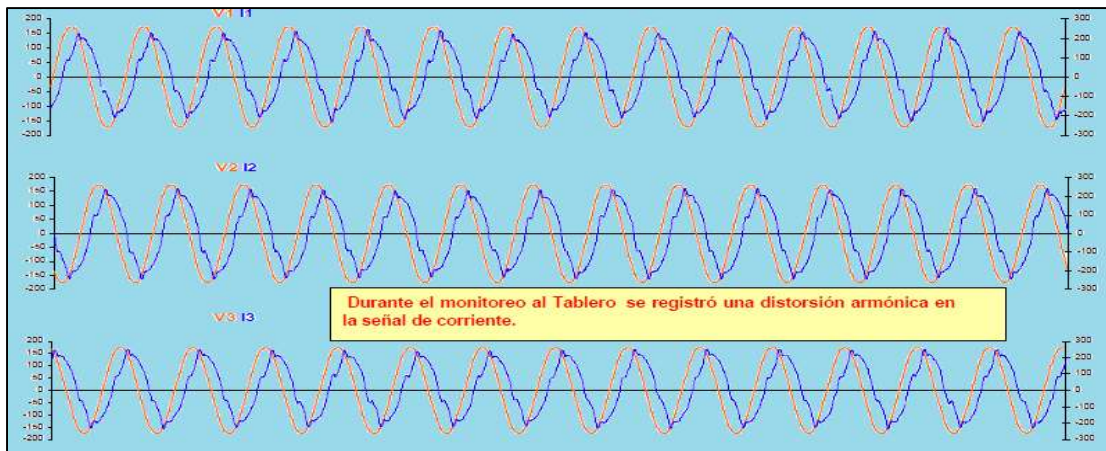


Figura 19: Medición de forma de onda

D. Espectro Armónico en la Señal de Voltaje (THDv)

En la gráfica se muestra el espectro armónico de la señal en voltaje (THDv) en el Tablero. Se presenta el porcentaje por componente individual armónica con la finalidad de observar las componentes más significativas del sistema, y validar que sus porcentajes individuales se encuentren dentro de los niveles recomendados por el STD. 519-1992. El valor total de THDv es de 1.11%, con una contribución individual principalmente de 5ª y 7ª armónicas. (Ver en el resumen el análisis armónico).

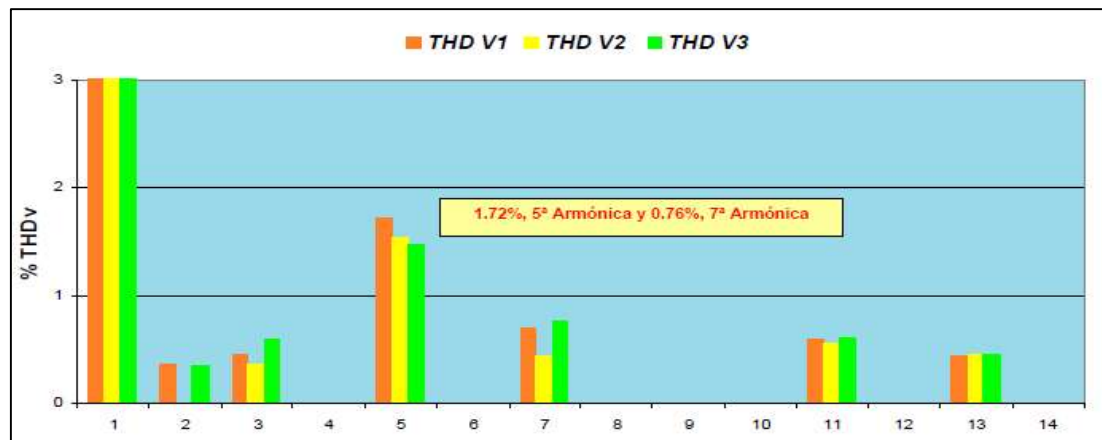


Figura 20: Medición THDv

E. Forma de Onda de Corriente en Barra de Tierras

En la gráfica se observa una señal de corriente por la barra de tierra en el Tablero, con un valor de hasta 3.6 Amp. Se recomienda revisar el cableado e identificar cada una de las cargas.

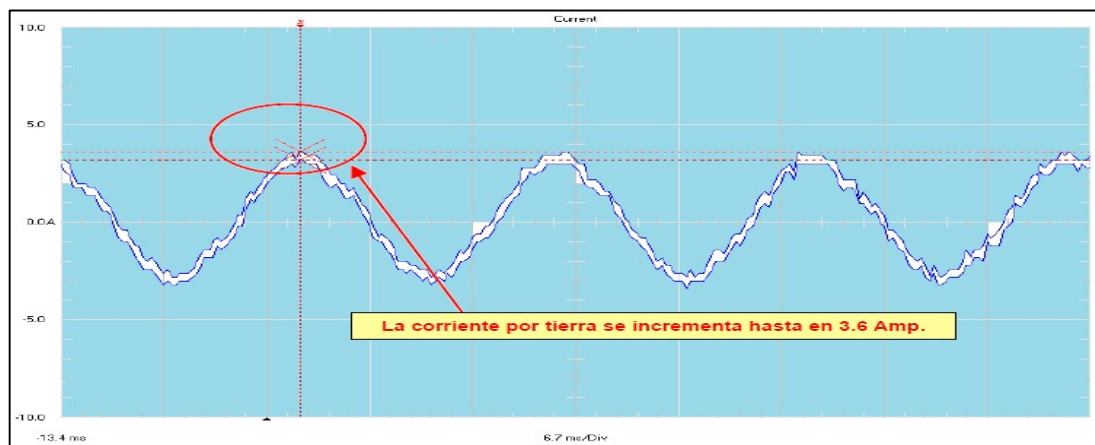


Figura 21: Forma de Onda de corriente

F. Espectro Armónico en la Señal de Corriente (THDi)

En la gráfica se muestra el espectro armónico de la señal en corriente (THDi) en el Tablero. Se presenta el porcentaje por componente individual armónica con la finalidad de observar las más significativas del sistema, y validar que sus porcentajes individuales se encuentren dentro de los niveles recomendados por el STD. 519-1992. El valor total de THDi es de 14.25%, con una contribución individual principalmente de 3^a, 5^a y 7^a armónicas.

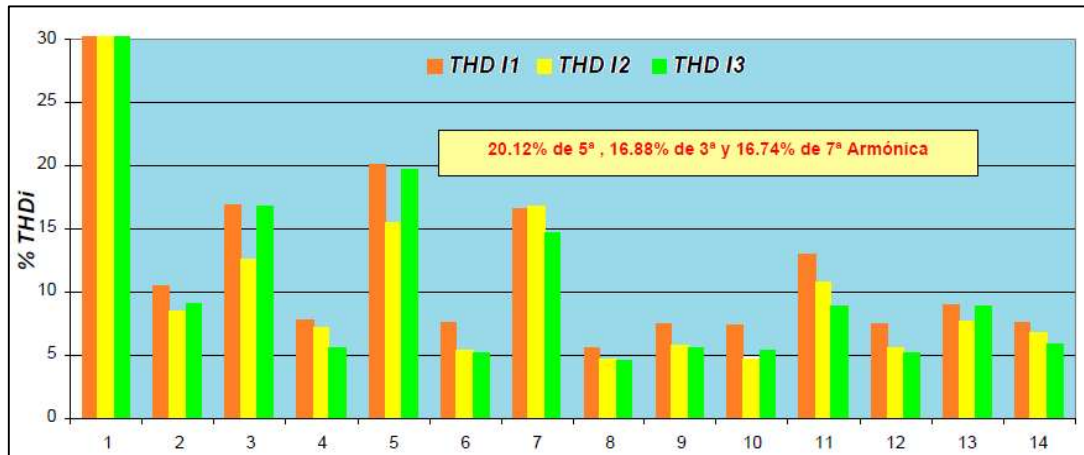


Figura 22: Grafica del espectro de armónico

G. Perfil de Distorsión Armónica en Voltaje (THDv)

En la gráfica se muestra el perfil de distorsión armónica en voltaje (THDv) en un período de 39 hrs. Se registró un porcentaje promedio de 1.11% y un valor máximo de 1.8 %, lo cual se encuentra DENTRO del porcentaje recomendado por el STD IEEE 519-1992.

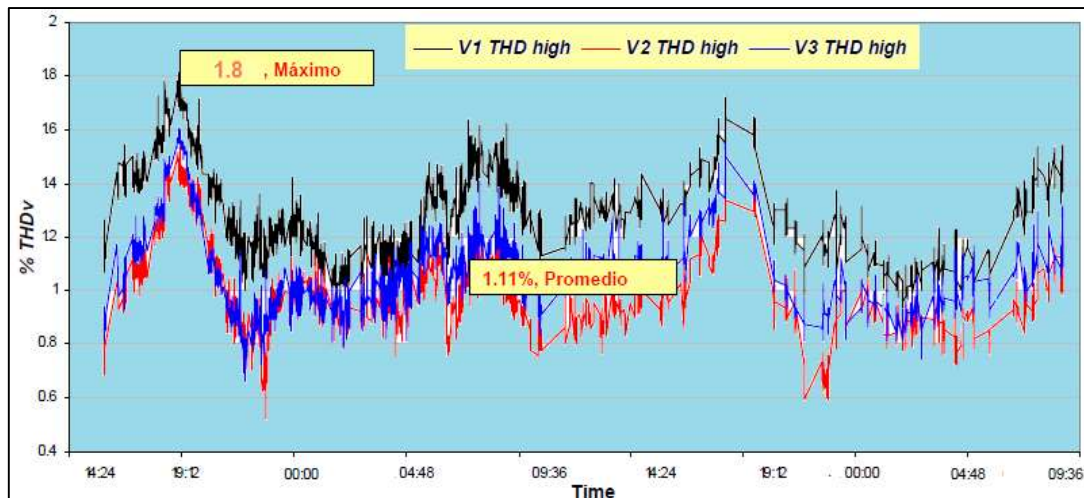


Figura 23: Grafica perfil de Distorsión en voltaje

H. Perfil de Corriente Máxima de Línea

En la gráfica se muestra el perfil de corriente en un período de 24 hrs. El valor de corriente promedio durante el período normal de operación fue de 97.74 Amp., registrando un valor máximo instantáneo en corriente de 177.21 Amp. En el período completo de monitoreo se registró una corriente mínima de 24.36 Amp.

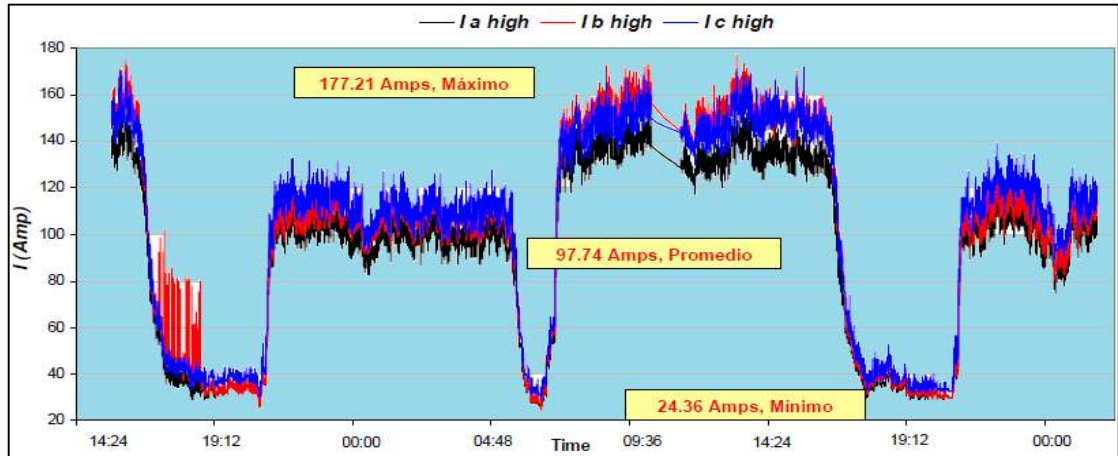


Figura 24: Grafica perfil de corriente

I. Perfil de Potencia Real (kW)

En la gráfica se puede observar la demanda de potencia real en kW durante el período de monitoreo de 24 hrs. El valor de potencia real promedio durante el período de operación normal fue de 22.86 kW, registrando un valor máximo instantáneo de 39.49 kW. En el ciclo completo de operación se registró una potencia real mínima instantánea de 9.00 kW.

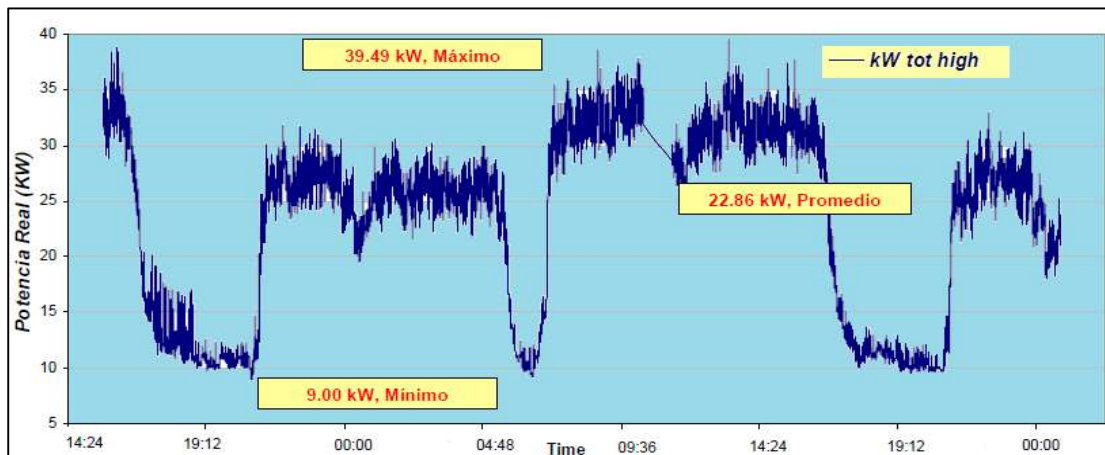


Figura 25: Grafica demanda máxima de potencia

J. Perfil de Potencia Reactiva (kVAR)

En la gráfica se puede observar la demanda de potencia reactiva en kVAR durante el período de monitoreo de 24 hrs. El valor de potencia reactiva promedio durante el período de operación normal fue de 28.1 kVAR, registrando un valor máximo de 48 kVAR. En el ciclo completo de operación se registró una potencia reactiva mínima de 4 kVAR.

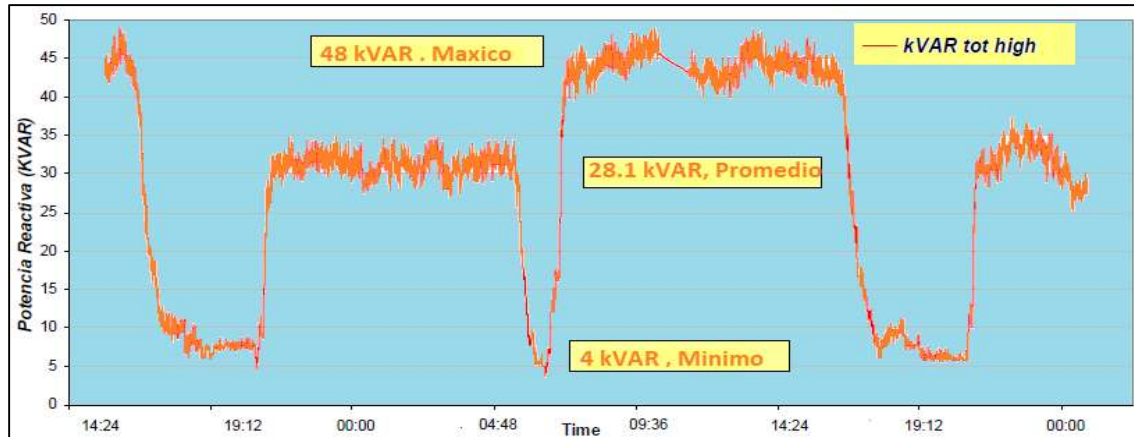


Figura 26: Grafica de potencia reactiva

K. Perfil de Potencia Aparente (kVA)

En la gráfica se puede observar la demanda de potencia aparente en kVA durante el período de monitoreo de 24 hrs. El valor de potencia aparente promedio durante el período de operación normal fue de 36.44 kVA, registrando un valor máximo de 62.32 kVA. En el ciclo completo de operación se registró una potencia aparente mínima de 9.94 kVA.

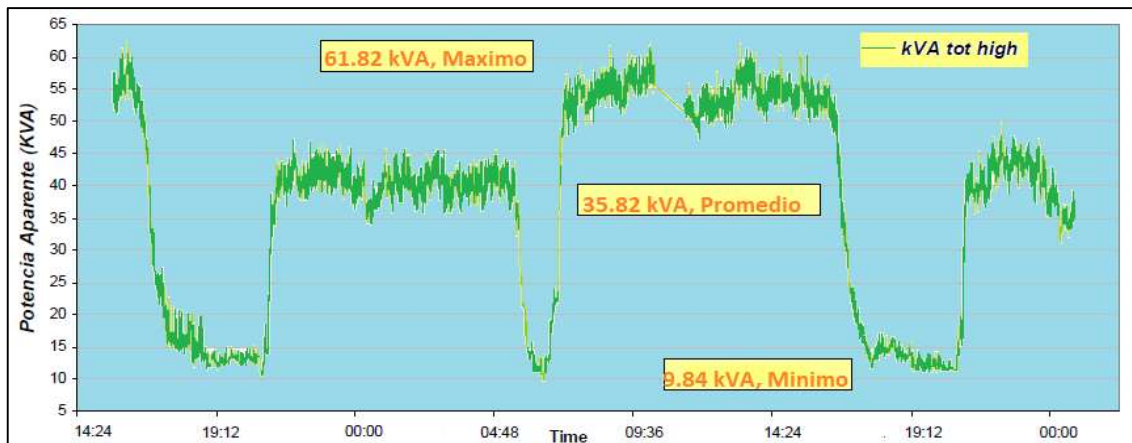


Figura 27: Grafica de potencia aparente

L. Factor de Potencia (%)

En la gráfica se muestra el comportamiento del factor de potencia durante el período de monitoreo de 24 hrs. El valor del factor de potencia promedio durante el período de operación normal fue de 66.52% (inductivo), registrando un valor máximo instantáneo de 93.04% (inductivo). En el ciclo completo de operación se registró un factor de potencia mínimo de 51.78%.

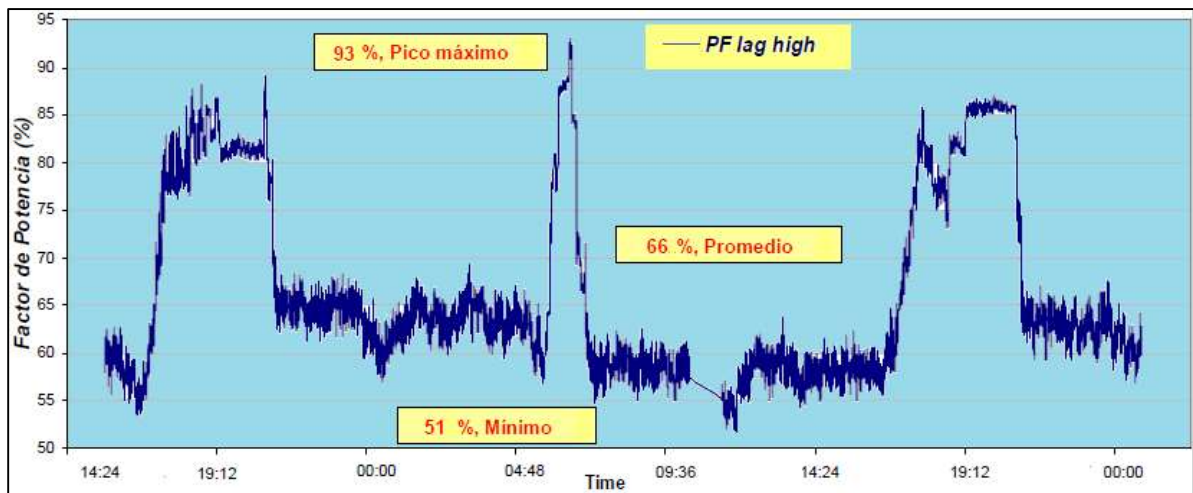


Figura 28: Grafica del factor de potencia

8.3 Resumen de Parámetros de Calidad de la Energía

Se realizó el monitoreo en el Tablero durante un período de 24 hrs., con el objetivo de analizar los parámetros de calidad de energía provenientes de la compañía suministradora:

Voltaje nominal: 220 Volts (Valores Máximos)

Voltaje	Máximo	Promedio	Mínimo	% de variación		Std. IEEE 1100-1999
				Máximo	Mínimo	
V _{A-B}	227.61	219.75	214.62	3.46	-2.44	Si cumple
V _{B-C}	229.50	221.45	215.85	4.32	-1.89	Si cumple
V _{C-A}	227.51	219.56	213.82	3.41	-2.81	Si cumple

Se puede observar que el voltaje promedio es de un valor de 220.26 Volts, el cual se encuentra 0.12% arriba del valor nominal de 220 Volts de la subestación. La ventana de variación presenta un máximo de 229.50 Volts (4.32% arriba del valor nominal) y un mínimo de 213.82 Volts (2.81% abajo del valor nominal), quedando DENTRO del rango recomendado por el estándar IEEE 1100-1999 tabla 4-3 (variación no mayor al 5% del valor nominal). Este estándar está enfocado a la operación de equipo electrónico crítico.

Sin embargo, el voltaje de alimentación debe ser de 208 Volts, por lo que la variación máxima de voltaje es realmente de **10.33% arriba** del valor especificado para algunas máquinas, lo cual está **FUERA** del rango recomendado por el estándar **IEEE 1100-1999 tabla 4-3**. Se recomienda la instalación de un acondicionador de voltaje de 75 kVA, 220 - 208/120 Volts, en configuración delta-estrella, con una tolerancia de variación a la entrada de + 10%, - 20%, y una variación a la salida de $\pm 2.5\%$, con el beneficio adicional de generación de un nuevo neutro al convertirse en un circuito derivado separado.

Parámetros de Calidad de la Energía

La demanda en corriente promedio fue de 97.74 Amp. durante el período del monitoreo realizado, registrando un valor en demanda máxima de corriente de 177.21 Amp. (Fase B), de forma instantánea. Este comportamiento se presentó en el monitoreo, registrándose una diferencia máxima entre fases de 24.36 Amp. (Fase A).

La demanda en Potencia Real promedio fue de 22.86 kW. durante el período del monitoreo realizado, registrando un valor en demanda máxima de 39.49 kW, de forma instantánea. La demanda en Potencia Reactiva promedio fue de 28.15 kVAR. durante el período del monitoreo realizado, registrando un valor en demanda máxima de 49.05 kVAR, de forma instantánea.

La demanda en Potencia Aparente promedio fue de 36.44 kVA en condiciones normales de operación, registrando un valor en demanda máxima promedio de 62.32 kVA, de forma instantánea. Durante el monitoreo se detectaron varios eventos transitorios, con un valor máximo de 372.5 Volts de línea-línea.

Efecto:

Errores de operación hasta dañar los componentes electrónicos de las tarjetas de control o, en su defecto, reducción de la vida útil de los componentes al encontrarse constantemente expuestos a dichos eventos.

Solución: Ya que este tablero es de distribución, se recomendará la instalación de un supresor de transitorios CLASE B.

A continuación, se muestran los valores obtenidos de Distorsión Armónica THD de las señales de voltaje y corriente en sus porcentajes en forma individual y total, reflejo del tipo de carga instalada en el TABLERO.

En las dos tablas siguientes se muestran los porcentajes de THD en Voltaje como Corriente, mostrando sus componentes individuales, así como el promedio total, y la comparación con los valores de operación recomendados por el Std. IEEE 519-1992 sobre Prácticas y Requerimientos.

Establecidos para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Distribución. Las formas de onda y espectro armónico característico de voltaje corresponden a:

THD Voltaje					
Armónicas			% THD VOLTAJE TOTAL		Std. IEEE
5 th	7 th	11 th	Máximo	Promedio	519-1992
1.72%	0.76%	0.61%	1.81%	1.11%	Si cumple

La armónica de voltaje de mayor importancia es la QUINTA con un valor del 1.72%, la cual se encuentra DENTRO de lo recomendado por el estándar de límite máximo de distorsión por componente armónica individual de voltaje (5% para este nivel de voltaje sobre la base de la tabla 11.1 Std IEEE 519-1992), y registrando un THDV total de 1.81%, lo cual se encuentra DENTRO del porcentaje recomendado, de límite máximo de distorsión total de voltaje (5% para este nivel de voltaje).

Análisis Armónico

Las formas de onda y espectro armónico característico de corriente corresponden a:

THD Corriente				Std. IEEE 519-1992	% THD CORRIENTE TOTAL		Std. IEEE 519-1992
h<11					Máximo	Promedio	
5 th	7 th	11 th	13 th				
20.12%	16.8%	16.7%	12.9%	No cumple	31.81%	14.25%	No cumple

La corriente armónica de mayor contribución es la QUINTA, con un valor del 20.12%, con respecto a la componente fundamental, la cual se encuentra FUERA de lo recomendado por el estándar de límite máximos de distorsión por componente armónica individual de corriente en referencia al Std IEEE 519-1992, y registrando un THDI total de 31.81%, lo cual se encuentra FUERA del 10% recomendado por el estándar de límite máximos de distorsión Total de corriente.

Factor de Potencia

Se registró un valor promedio de 66.52%, con un valor mínimo de 51.78%. Se requieren 28 kVAR para compensar reactivamente hasta llegar al factor de potencia unitario.

IX. Conclusiones

El presente trabajo de analices de calidad de la energía ha logrado cumplir con los alcances propuestos en el inicio del mismo. Debido a las pruebas realizadas, ha sido posible comprobar y verificar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico, basado en mediciones vs los estándares comparados.

Las diferentes mediciones de parámetros eléctricos y distorsiones electromagnéticas fueron monitoreadas en el sistema eléctrico en estudio con el objetivo de recomendar mejoras en el mismo.

Se logro realizar mediciones con el Fluke438-II sobre los parámetros electromagnéticos, Transitorios Interrupciones, Bajada de tensión (subtensión), aumento de tensión (sobretensión), Distorsión de la forma de onda, Fluctuaciones de tensión, Variaciones de frecuencia para determinar su correcto funcionamiento.

Se evaluaron las mediciones realizadas sobre calidad de la energía para el desarrollo del estudio y se incluyeron resultados de las mediciones efectuadas donde se presentan tablas y gráficos.

Como producto final un documento o informe sobre el análisis de calidad de la energía eléctrica en la empresa que permitió determinar si la instalación eléctrica cumple o no con las normas eléctricas nacionales e internacionales a partir de estándares.

X. Bibliografía

1. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std. 519-1992). Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 1-55937-239-7. Estados Unidos, 1993.
2. Compendio de opciones de eficiencia energética, elaborado por CPmL-N. Managua, Nicaragua 2010
3. NEMA Standards Publication ANSI/NEMA MG 1-2003, "Motors and Generators". National Electrical Manufacturers Association. Estados Unidos, 2004.
4. Electrical Power Systems Quality. Roger C. Dugan, Mark F. Mc Granaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty. Ed. Mc Graw -Hill. Estados Unidos, 1996.
5. Nassir Sapag Chain . Preparación y Evaluación de Proyectos 2da Edición.
6. Roberto Hernández Sampieri. Metodología de la Investigación. Editorial, MCGRAW HILL.
7. Effect of power factor on equipment size. Bulletin D-412C. Square company
8. Guía para la corrección del factor de potencia para el ingeniero de planta. manual SPRAGUE Electric Com