



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

## **Metodología para Estudio de la Calidad de la Energía en Máquina Dobladora de Lámina.**

### **MEMORIAS DE ACTIVIDAD PROFESIONAL**

Que para obtener el grado de:

**Maestra en Sistemas Eléctricos de Potencia**

Presenta:

**Miroslaba Ramírez de la Torre**

Asesor:

**Dr. Francisco Eduardo Martínez Pérez**

San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero 2020





## **Agradecimientos.**

A los doctores Nancy Visairo Cruz, Ciro Alberto Nuñez Gutierrez, Francisco Eduardo Martínez Pérez y al Maestro Rey David González Barrios por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.



## Resumen.

La exigencia de hoy en día en el sector industrial consiste en producir en el menor tiempo, a menor costo y con el óptimo uso de los recursos para ser más competente en una economía globalizada. En este sentido, la energía eléctrica es un recurso ampliamente usado en el sector industrial, el empleo eficiente de este se traduce en ahorros. Además, contar con energía eléctrica de calidad asegura el óptimo funcionamiento de los equipos de producción, con lo que se aumenta la eficiencia del proceso productivo de la compañía. Si no se cuenta con un suministro de energía eléctrica de calidad se producen pérdidas económicas por equipo dañado, costos de reparación, procesos detenidos, pagos de horas extras, atrasos en el plan de producción, pago de multas por embarques tardíos, etc.

Ante esto, el reto de las empresas es asegurarse de que el suministro de energía eléctrica que reciben cuente con las características adecuadas para el óptimo funcionamiento de sus máquinas de producción. De esta manera, el tema de la calidad de la energía eléctrica se convierte en un tema relevante en el sector industrial.

En este trabajo se abordan de manera breve los fenómenos electromagnéticos que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia y que afectan la calidad de la energía eléctrica, más adelante se presenta una metodología para realizar un estudio de la calidad de la energía seguido de un caso de estudio llevado a cabo en la empresa Schweitzer Engineering Laboratories S.A. de C.V.



# Índice.

Glosario de Términos. ....	13
Introducción. ....	17
A. El problema de la calidad de la energía eléctrica. ....	18
B. Características de las formas de onda de voltaje y corriente. ....	20
C. Estándares sobre calidad de la energía. ....	21
D. Importancia de la calidad de la energía eléctrica. ....	24
E. Planteamiento del problema. ....	25
F. Preguntas de investigación. ....	26
G. Objetivos. ....	27
H. Alcance. ....	28
Capítulo 1 Fenómenos electromagnéticos de los sistemas eléctricos de potencia. ...	29
1.1 Definición de la calidad de la energía. ....	29
1.2 Clasificación de los fenómenos electromagnéticos. ....	31
1.3 Definición de los fenómenos electromagnéticos. ....	34
1.3.1 Transitorios. ....	35
1.3.1.1 Transitorio impulsivo. ....	36
1.3.1.2 Transitorios oscilatorios. ....	36
1.3.2 Variaciones del valor RMS de corta duración. ....	37
1.3.2.1 Interrupciones. ....	37
1.3.2.2 Sag (depresión). ....	38
1.3.2.3 Swell (elevación). ....	38
1.3.3 Variaciones del valor RMS de larga duración. ....	39
1.3.3.1 Interrupciones sostenidas. ....	39
1.3.3.2 Bajo voltaje. ....	40
1.3.3.3 Sobre voltaje. ....	40
1.3.4 Desbalances de voltaje y corriente. ....	40
1.3.5 Distorsión de la forma de onda. ....	41
1.3.5.1 Componente de corriente directa. ....	42
1.3.5.2 Armónicos. ....	42
1.3.5.3 Interarmónicos. ....	44
1.3.5.4 Muecas. ....	45

1.3.5.5 Ruido.....	45
1.3.6 Fluctuaciones de voltaje.....	46
1.3.7 Variaciones de frecuencia.....	46
Capítulo 2 Metodología para identificar la causa raíz de fenómenos electromagnéticos.....	47
2.1 Conocer el problema.....	47
2.1.1 Documentar las fallas de los equipos.....	48
2.1.2 Validación de los requerimientos físicos de la instalación.....	49
2.2 Definir punto de medición.....	49
2.3 Realizar mediciones.....	50
2.4 Analizar los datos y emitir un diagnóstico.....	50
2.5 Presentar posibles soluciones.....	52
2.6 Implementar solución.....	52
2.7 Evaluar efectividad de la solución.....	52
Capítulo 3 Estudio de caso: máquina dobladora de lámina.....	55
3.1 Descripción del estudio de caso.....	55
3.2 Conocer el problema.....	56
3.2.1 Documentar las fallas del equipo.....	56
3.2.2 Validación de los requerimientos físicos de la instalación.....	57
3.3 Realizar mediciones.....	61
3.4 Análisis de datos.....	63
Conclusiones.....	73
Bibliografía.....	75
Anexo 1 Cuestionario.....	77
Anexo 2 Registro de eventos.....	79
Anexo 3 Plan de implementación.....	81



## Índice de figuras.

<b>Figura 1.</b> Problemas de calidad de energía.....	30
<b>Figura 2.</b> Diagrama de flujo de metodología propuesta para realizar un estudio de calidad de energía eléctrica. ....	54
<b>Figura 3.</b> Placa de datos de máquina TruBend 5130 (TRUMPF, 2007). ....	57
<b>Figura 4.</b> Alimentación de máquina TruBend 5130 (TRUMPF, 2007). ....	58
<b>Figura 5.</b> Alimentación de variadores de velocidad (TRUMPF, 2007). ....	59
<b>Figura 6.</b> Requerimientos eléctricos de variadores de velocidad (STÖBER, 2015). ....	60
<b>Figura 7.</b> Instalación de equipo de medición. ....	61
<b>Figura 8.</b> Diagrama unifilar de conexión de medidor de la calidad de la energía. ....	62
<b>Figura 9.</b> Voltaje eficaz máximo. ....	64
<b>Figura 10.</b> Voltaje eficaz promedio. ....	65
<b>Figura 11.</b> Voltaje eficaz mínimo. ....	66
<b>Figura 12.</b> THD máxima voltaje. ....	67
<b>Figura 13.</b> THD promedio voltaje.....	67
<b>Figura 14.</b> THD mínimo voltaje.....	68
<b>Figura 15.</b> Desbalance de voltaje. ....	68
<b>Figura 16.</b> Corriente eficaz promedio. ....	69
<b>Figura 17.</b> Corriente residual promedio. ....	70
<b>Figura 18.</b> Voltaje en terminales de alimentación de variador de velocidad. ....	71



## Índice de tablas.

<b>Tabla 1.</b> Estándares IEEE relevantes para la calidad de la energía por campos de cobertura. ....	23
<b>Tabla 2.</b> Estándares IEC relevantes para la calidad de la energía por campo de cobertura. ....	23
<b>Tabla 3.</b> Costos de reparación de la máquina dobladora TruBend 5130. ....	26
<b>Tabla 4.</b> Fenómenos principales que causan perturbaciones electromagnéticas de acuerdo con la clasificación de la IEC 6100-2-5:1995. ....	31
<b>Tabla 5.</b> Categorías y características típicas de los fenómenos electromagnéticos de los sistemas de potencia de acuerdo a Estándar IEEE 1159-2009 <i>Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality</i> . ....	33
<b>Tabla 6.</b> Requerimientos eléctricos de dobladora TruBend 5130. ....	58
<b>Tabla 7.</b> Condiciones ambientales de operación (TRUMPF, 2007). ....	60
<b>Tabla 8.</b> Voltajes de alimentación para dobladora y variadores de velocidad. ....	71



5 de diciembre de 2019

**ING. MIROSLABA RAMÍREZ DE LA TORRE  
P R E S E N T E**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Francisco Eduardo Martínez Pérez**, Asesor del trabajo de Memorias de Actividad Profesional que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Sistemas Eléctricos de Potencia**, me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 5 de diciembre del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"Metodología para Estudio de la Calidad de la Energía en Máquina Dobladora de Lámina"**

Introducción.

1. Fenómenos electromagnéticos de los sistemas eléctricos de potencia.
2. Metodología para identificar la causa raíz de fenómenos electromagnéticos.
3. Estudio de caso: máquina dobladora de lámina.

Conclusiones.

Bibliografía.

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**A T E N T A M E N T E**

**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ**  
**DIRECTOR**

Copia. Archivo  
\*etr.

[www.uaslp.mx](http://www.uaslp.mx)

Av. Manuel Huelga  
Zona Universitaria - CP. 64000  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. 4449 576 1101 a 23  
fax 4449 826 2136

## Glosario de Términos.

A continuación, se presenta una breve definición de los términos comúnmente usados en calidad de la energía tomadas del estándar *IEEE 1159-2009 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*.

**Cambio de voltaje.** Una variación del valor eficaz o pico de voltaje entre dos niveles consecutivos sostenidos para duraciones definidas, pero no específicas.

**Componente interarmónica.** Componente de frecuencia de una onda periódica que no es un número entero múltiplo de la frecuencia a la cual el sistema de potencia está operando.

**Componente fundamental.** El componente de orden 1 (ejemplo 50Hz o 60Hz) de la serie de Fourier de una cantidad periódica.

**Desbalance (voltaje o corriente).** La relación entre la componente de secuencia negativa y la componente de secuencia positiva, usualmente expresada como porcentaje.

**Distorsión de la forma de onda.** Una desviación de estado estable del comportamiento idealmente sinusoidal de una forma de onda a la frecuencia fundamental del sistema eléctrico, caracterizada principalmente por el contenido espectral de la desviación.

**Fluctuación de voltaje.** Una serie de cambios en el voltaje o variaciones cíclicas del voltaje.

**Instantáneo.** Cuando el término es usado para cuantificar la duración de una variación de corta duración del valor RMS como modificador, se refiere a un rango de tiempo entre 0.5 a 30 ciclos de la frecuencia del voltaje.

**Interrupción de voltaje.** La desaparición de la fuente de voltaje en una o más fases.

**Interrupción momentánea.** Variación de corta duración del voltaje RMS, donde la pérdida total de voltaje ( $<0.1$  pu), en uno o más conductores de fase, es por un periodo de tiempo entre 0.5 ciclos y 3 segundos.

**Interrupción sostenida.** Variación de larga duración del voltaje RMS, donde la pérdida total de voltaje ( $<0.1$  pu), en uno o más conductores de fase, es por un periodo de tiempo mayor a 1 minuto.

**Interrupción temporal.** Variación de corta duración del voltaje RMS, donde la pérdida total de voltaje ( $<0.1$  pu), en uno o más conductores de fase, es por un periodo de tiempo entre 3 segundos y 1 minuto.

**Parpadeo (flicker).** Impresión de inestabilidad de la sensación visual inducida por un estímulo de luz cuya luminancia o distribución espectral fluctúa con el tiempo. Este cambio de intensidad en la fuente luminosa es causado por una variación del voltaje de entrada.

**Transitorio impulsivo.** Un cambio repentino a diferente frecuencia de la fundamental, en estado estacionario, de voltaje o corriente que es unidireccional en polaridad (principalmente positivo o negativo).

**Valor RMS (Root Mean Square).** Valor cuadrático medio de una magnitud eléctrica o también conocido como valor eficaz. Se define como el valor de una corriente continua que al circular por una determinada resistencia óhmica pura produce los mismos efectos caloríficos (igual potencia disipada) que dicha corriente alterna. De esta forma una corriente eficaz es capaz de producir el mismo trabajo que su valor en corriente continua.

**Variación RMS.** Un término frecuentemente usado para expresar una variación en el valor eficaz de una medición de voltaje o corriente con respecto al valor nominal.

**Variación RMS de corta duración.** Variación del valor eficaz de voltaje o corriente nominal por un tiempo mayor a 0.5 ciclos de la frecuencia de potencia, pero menor o igual a 1 minuto.

**Variación RMS de larga duración.** Variación del valor eficaz de voltaje o corriente nominal por un tiempo mayor a 1 minuto





## **Introducción.**

La energía eléctrica es uno de los principales insumos usados en la actualidad. En el sector comercial, industrial, financiero, en el campo de la ciencia y la tecnología, así como en el hogar se cuenta con una cantidad considerable de aparatos que funcionan con energía eléctrica, son muy pocas cosas que no lo hacen así.

Asimismo, hoy en día las exigencias del sector industrial han cambiado, se busca producir más, en el menor tiempo y al menor costo posible, esto ha ocasionado que los ingenieros de manufactura se vuelquen en la búsqueda de equipos más productivos, rápidos, eficientes y precisos. Para lograr el diseño de equipos que cumplan con tales características ha sido necesaria la implementación de circuitos de control basados en microelectrónica así como el uso de la electrónica de potencia. Paradójicamente, el uso de este tipo de elementos en los equipos industriales y de oficina ha ocasionado que éstos se vuelvan más sensibles a cualquier disturbio en la red eléctrica, es por este motivo que en el sector industrial la energía eléctrica se vuelve un insumo de vital importancia pues los disturbios en el sistema eléctrico pueden traducirse en daños a los equipos que conforman las líneas de producción, los cuales son muy costosos por lo cual el usuario final demanda un suministro de energía eléctrica constante que no presente fluctuaciones que mermen el desempeño de sus equipos, es decir, un servicio de calidad (Cortés, 2009).

Para tener una mejor descripción de lo antes mencionado es necesario considerar los siguientes puntos:

- A. El problema de la calidad de la energía.
- B. Las características de las formas de onda de voltaje y corriente.
- C. La Importancia de la calidad de la energía eléctrica.
- D. Estándares sobre calidad de la energía.

## **A. El problema de la calidad de la energía eléctrica.**

El problema de la calidad de energía se refiere a cualquier fenómeno electromagnético en el sistema eléctrico de potencia que derive en la desviación de la forma de onda de la señal de voltaje, corriente o frecuencia y que provoque el envejecimiento prematuro, mala operación o falla de un equipo causando afectación negativa en la economía y bienestar del usuario (Dugan, Mc Granaghan, Santoso, & Beaty, 2004).

Estos fenómenos pueden tener efectos como el aumento de las pérdidas de energía en el sistema eléctrico de potencia, afectación negativa a la producción, economía y competitividad del usuario final, así como el deterioro de la confiabilidad y disponibilidad del servicio (Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente, 2008).

Desafortunadamente los problemas de la calidad de la energía eléctrica se han vuelto más frecuentes en los últimos años debido a factores como el incremento del uso de equipos de comunicaciones y procesamiento de datos en el sector privado y residencial, la incorporación de equipos eléctricos de nueva generación que involucran controles basados en microelectrónica y el uso de electrónica de potencia, lo cual los hace más sensibles a las variaciones de la energía eléctrica así como el desarrollo a gran escala de poblaciones, lo cual ha provocado que los puntos de demanda de energía eléctrica crezcan a mayor velocidad que los puntos de generación lo cual ha aumentado el número

de disturbios eléctricos (Arellano Martínez, Mireles Huerta, & Samayoa Castillo, 2011) y (Dugan, Mc Granaghan, Santoso, & Beaty, 2004) .

Así mismo ha habido cambios que han afectado al sistema eléctrico de potencia tales como (Arellano Martínez, Mireles Huerta, & Samayoa Castillo, 2011):

- Aumento de carga a nivel residencial, comercial e industrial que incluye equipos electrónicos modernos con circuitos integrados que demandan un reducido consumo de potencia requiriendo niveles de tensión y energía menores y que son más sensibles a las variaciones de la calidad de la energía.
- El uso de electrónica de potencia para generar dispositivos de alta capacidad y bajo costo. De igual manera, son sensibles a las variaciones repentinas y súbitas de voltaje, además de que su mismo funcionamiento introduce armónicos a la red.
- Equipos diseñados para trabajar dentro de ciertos límites normalizados, dejando de lado los diseños robustos y sobrados.
- El uso de bancos de capacitores para corregir el factor de potencia y aumentar la eficiencia del sistema eléctrico de potencia. Estos capacitores son la puerta de entrada para corrientes de alta frecuencia que incrementan la cantidad de armónicos en la red y pudieran provocar comportamientos no deseados en el sistema eléctrico.
- Incorporación de fuentes alternativas de energía eléctrica como la eólica y solar en el cual el uso de generadores con inversores implica la generación de armónicos.

## **B. Características de las formas de onda de voltaje y corriente.**

En la actualidad la electricidad es considerada una mercancía y la definición de parámetros de aceptación permiten determinar las características de competitividad del producto del proveedor del servicio (Cobas Pereira, (s/f)).

De aquí la importancia de definir las características que deben cumplir las formas de onda de las señales eléctricas como corriente y voltaje para que el usuario pueda determinar si la energía eléctrica recibida es un producto de calidad o no.

Pero en un entorno industrial tan competitivo como el actual ¿qué se debe esperar de un servicio de energía eléctrica de calidad? Usualmente se busca obtener una señal de voltaje que cumpla con los valores nominales establecidos, con una forma de onda sinusoidal limpia y una frecuencia constante. Es decir, contar con señales de voltaje y corriente en fase y con frecuencia constante que permitan la correcta operación de los equipos eléctricos.

Sin embargo, es la calidad del voltaje lo que constantemente se está monitoreando, en realidad solo se puede controlar la calidad de la tensión entregada; ya que no existe la posibilidad de hacer control sobre las corrientes que las cargas, como las no lineales, pueden requerir. De esta forma, los estándares en el área de la calidad de la energía están dedicados a mantener el voltaje de alimentación dentro de ciertos límites establecidos (Dugan, Mc Granaghan, Santoso, & Beaty, 2004).

Cabe aclarar que existe una estrecha relación entre la tensión y la corriente. Aunque los generadores puedan proporcionar una señal de voltaje sinusoidal casi perfecta, la

corriente que pasa a través de la impedancia del sistema puede causar diversas perturbaciones en la tensión, por ejemplo:

- Las corrientes generadas por una descarga atmosférica y que pasan a través del sistema eléctrico pueden causar picos de voltaje que frecuentemente queman los aislamientos y generan otros fenómenos como cortos circuitos.
- La corriente resultante de un corto circuito puede provocar abatimientos o pérdida total de voltaje.
- Las corrientes distorsionadas de las cargas que producen armónicos también distorsionan la tensión a medida que pasan por la impedancia del sistema, de esta manera las señales de voltaje distorsionado se presentan a otros usuarios.

Por esta razón, si bien es la calidad del voltaje lo que preocupa, es necesario conocer los fenómenos en la corriente para entender las bases de muchos problemas de calidad de energía (Dugan, Mc Granaghan, Santoso, & Beaty, 2004).

### **C. Estándares sobre calidad de la energía.**

El uso de los estándares en el área de monitoreo de calidad de la energía (Kennedy, 2000) son muy importantes para:

- Que las empresas suministradoras puedan asegurar que la energía que están entregando tiene la calidad necesaria que el usuario final requiere para operar sus equipos.
- Para que la industria de equipos electrónicos sepa con qué límites y tolerancias debe diseñar y fabricar los equipos electrónicos de uso doméstico e industrial.

- Para que los fabricantes de equipos de protección contra sobre corrientes tengan un mismo parámetro para diseñar los equipos que protegen a otros dispositivos electrónicos.

Con el uso de los estándares se asegura que todas las empresas suministradoras tengan una misma referencia de la calidad de energía que tienen que entregar a los usuarios finales y así evitar que cada uno tenga su propio criterio de evaluación.

Es decir, los niveles de calidad de la energía deben ser definidos consistentemente y caracterizados usando los mismos métodos si están siendo comparados de un sitio a otro o de un sistema a otro (Dugan, Mc Granaghan, Santoso, & Beaty, 2004).

Algunas de las organizaciones responsables del desarrollo de los estándares de calidad de la energía (Kennedy, 2000) en los Estados Unidos son:

- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- American National Standards Institute (ANSI)
- National Institute of Standards and Technology (NIST)
- National Fire Protection Association (NFPA)
- National Electrical Manufacturers Association (NEMA)
- Electric Power Research Institute (EPRI)
- Underwriters Laboratories (UL)

Fuera de Estados Unidos algunas de las principales organizaciones responsables del desarrollo de estándares internacionales de la calidad de la energía son:

- International Electrotechnical Commission (IEC)
- Euronorms

- ESKOM

Actualmente los organismos con mayor aceptación son la IEEE para América e IEC para Europa (Cortés, 2009). En Tabla 1 y Tabla 2 se listan los estándares más relevantes de la IEEE e IEC, respectivamente.

**Tabla 1.** Estándares IEEE relevantes para la calidad de la energía por campos de cobertura.

<b>CAMPO DE COBERTURA</b>	<b>ESTÁNDARES RELEVANTES</b>
Armónicas	IEEE Std. C57.110 IEEE Std. 519 IEEE Std. 929
Disturbios	ANSI C62.41 IEEE Std 1100 IEEE Std 1250
Equipo de mitigación	IEEE Std 446 IEEE Std 1035 IEEE Std 1250
Interfase con la compañía	IEEE Std 446 IEEE Std 1001 IEEE Std 1035
Monitoreo	IEEE Std 1100 IEEE Std 1159
Inmunidad de la carga	IEEE Std 141 IEEE Std 446 IEEE Std 1100

**Tabla 2.** Estándares IEC relevantes para la calidad de la energía por campo de cobertura.

<b>CAMPO DE COBERTURA</b>	<b>ESTÁNDAR RELEVANTE</b>
Definiciones y metodología	61000-1
Ambiente	61000-2
Límites	61000-3
Pruebas y mediciones	61000-4
Instalación y mitigación	61000-5
Inmunidad genérica y emisiones	61000-6

En México el documento usado por la Comisión Federal de Electricidad para la evaluación de la calidad de la energía suministrada al consumidor, es la especificación CFE L0000-45. Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica.

#### **D. Importancia de la calidad de la energía eléctrica.**

Hoy en día el interés por mejorar y asegurar la calidad de la energía eléctrica obedece a varias razones, entre ellas que la vitalidad comercial, financiera, industrial y social depende completamente de equipos que funcionan con electricidad, cualquier anomalía en el sistema eléctrico se traduce en la eliminación del beneficio económico y bienestar proporcionado por la tecnología (Arellano Martínez, Mireles Huerta, & Samayoa Castillo, 2011) .

La deficiente calidad de la energía eléctrica provoca una operación ineficiente incrementando los costos de operación tanto de la compañía suministradora como del usuario final lo cual resulta en pérdidas económicas para ambos.

De igual forma, el sistema eléctrico ha crecido a gran escala y existen una mayor cantidad de dispositivos interconectados en la red. La falla del suministro ahora afecta a procesos integrados y hay mayores consecuencias.

Adicionalmente el usuario final está más informado acerca de los problemas de calidad de energía eléctrica y exige a la a compañía suministradora aumentar la calidad del servicio proporcionado (Dugan, Mc Granaghan, Santoso, & Beaty, 2004).

Se puede decir que la importancia de la calidad de la energía eléctrica reside en encontrar las soluciones más convenientes en relación costo – beneficio para corregir los disturbios y variaciones de voltaje en el lado del usuario final, así como proponer



soluciones para corregir las fallas que se presentan del lado de la compañía suministradora de energía eléctrica y de esta forma lograr un suministro de energía eléctrica con calidad (Harper, 2004). Con base en lo anterior, en la siguiente sección se presenta el planteamiento del problema que motiva esta tesis.

## **E. Planteamiento del problema.**

El departamento de Infraestructura de la empresa Schweitzer Engineering Laboratories ubicada en San Luis Potosí (SEL S.L.P.) ha informado sobre el daño que presentan las fuentes de alimentación, servomotores, arrancadores suaves y variadores de velocidad en las máquinas punzonadoras, dobladoras, robot de soldadura, torno CNC y centro de maquinados de la Unidad Productiva de Gabinetes (UPG) y del área de Maquinado Inyección y Troqueado (MIT).

Se cree que el daño en los equipos previamente mencionados pudiera ser ocasionado por las variaciones de voltaje en la alimentación principal de las máquinas, originados por la conexión y desconexión de cargas, durante el transcurso del día, al sistema eléctrico de la compañía.

Debido al costo que representan la reparación y el paro de proceso, se seleccionó la dobladora marca Trumpf modelo TruBend 5130, ubicada en la Unidad Productiva de Gabinetes, como la máquina para realizar un estudio de calidad de energía que permita identificar las causas del daño en los componentes de la misma.

En la Tabla 3 se exponen los costos de las refacciones y de mano de obra del técnico de servicio encargado de efectuar las reparaciones de la máquina dobladora de lámina antes mencionada.

Los datos aquí mostrados han sido proporcionados por el departamento de Infraestructura de SEL, S.L.P. y deben ser tratados de manera confidencial.

**Tabla 3.** Costos de reparación de la máquina dobladora TruBend 5130.

<b>Dispositivo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Tiempo de entrega</b>
Servomotor	3 piezas	3, 331.00 USD	4 días hábiles
Arrancador suave	1 pieza	2,500.00 USD	7 días hábiles
Mano de obra (se ha pagado hasta 2,520.00 USD)	1 hora	125.00USD	Lunes - viernes 08:00 - 18:00 hrs
		175.00USD	Lunes - viernes 08:00 - 06:00 hrs
		275.00USD	Sábado - domingo Cualquier horario, servicio mínimo de 10 horas.

Se debe tener en consideración que los gastos por refacciones y reparación no son los únicos absorbidos por la compañía, también se generan altos costos por tiempo muerto, retrabajos y desperdicio de materia prima, por mencionar algunos. Con base en lo antes planteado a continuación se presentan las preguntas de investigación realizadas para este trabajo.

## **F. Preguntas de investigación.**

- ¿Cuáles son las características eléctricas que se deben de considerar para la instalación de la máquina dobladora?
- ¿Cuáles son las causas asociadas a parámetros eléctricos que provocan el daño de la máquina dobladora?

- ¿Qué impacto en tiempo, dinero y relación con el cliente representan los paros de la máquina dobladora para el proceso productivo?

## **G. Objetivos.**

### ***Objetivo general.***

Proponer una metodología estandarizada con base en una serie de lineamientos para realizar un estudio de calidad de energía, mediante mediciones de parámetros eléctricos para el diagnóstico de las causas del daño que sufre la máquina dobladora de lámina a fin de reducir retrasos en la producción de gabinetes y minimizar impactos negativos en los recursos financieros de la empresa.

### ***Objetivos específicos.***

- Monitorear el comportamiento del voltaje de alimentación principal de la máquina dobladora TruBender 5130 ubicada en la Unidad Productiva de Gabinetes.
- Identificar el tipo de perturbaciones que afectan la calidad de la energía y se presentan en las terminales de alimentación principal de la máquina dobladora TruBender 5130.
- Proponer recomendaciones a perturbaciones identificadas, para evitar daños y paros en el proceso de la máquina en cuestión.

## **H. Alcance.**

El alcance de este trabajo es proponer una metodología estandarizada que permita realizar un estudio de la calidad de energía eléctrica aplicado a una máquina dobladora de lámina.

Se busca que esta metodología esté disponible para ser utilizada por los ingenieros de la empresa Schweitzer Engineering Laboratories y sea de utilidad para diagnosticar, analizar e identificar problemas similares en la maquinaria utilizada en esta misma empresa.

El resto de este documento está dividido en 3 capítulos, el contenido de cada uno de ellos se describe brevemente a continuación:

- En el Capítulo 1 se presenta una breve descripción de los fenómenos electromagnéticos que pueden afectar al sistema eléctrico de potencia y sus posibles causas.
- En el Capítulo 2 se propone una metodología para identificar la causa raíz de los fenómenos electromagnéticos que pudieran presentarse en una empresa de la zona industrial y afectar negativamente el funcionamiento de algunas máquinas.
- En el Capítulo 3 se describe un estudio de caso el cual se llevó a cabo en la empresa Schweitzer Engineering Laboratories en San Luis Potosí, México.
- En la sección final del documento se muestra las conclusiones del estudio de caso presentado en el Capítulo 3.

# **Capítulo 1 Fenómenos electromagnéticos de los sistemas eléctricos de potencia.**

## **1.1 Definición de la calidad de la energía.**

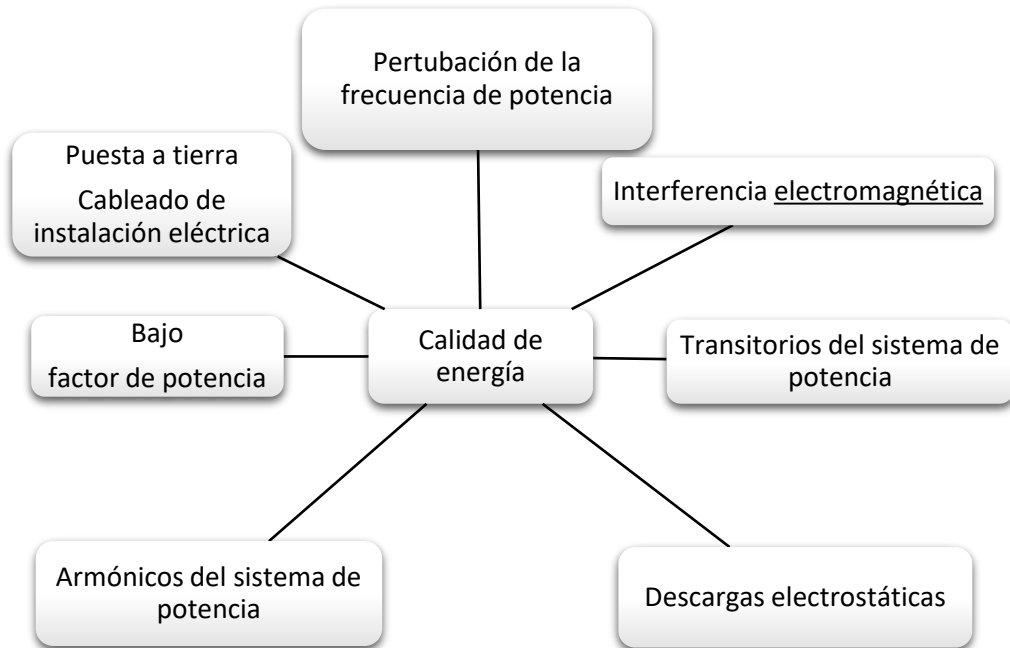
La calidad de la energía eléctrica es difícil de cuantificar y medir, no existe una única definición de la calidad de la energía aceptada por toda la comunidad ingenieril. Existen parámetros estándar de voltaje y otros criterios técnicos que pueden ser medidos, sin embargo, la medida final de la calidad de energía está dada por el rendimiento y productividad del equipo del usuario final. Si la energía eléctrica suministrada es deficiente para estas necesidades, entonces no hay calidad (Dugan, Mc Granaghan, Santoso, & Beaty, 2004).

Un problema de calidad de energía se percibe como cualquier problema que se manifieste en el voltaje, la corriente o alguna variación de la frecuencia y que resulte en la falla o la mala operación de algún equipo del cliente (Dugan, Mc Granaghan, Santoso, & Beaty, 2004).

Calidad de la energía también se define como el concepto de energizar y aterrizar equipo electrónico de tal manera que sea adecuado para el funcionamiento del mismo y sea compatible con el sistema de cableado local y otros equipos conectados. El término también se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan el voltaje y la corriente en un tiempo dado y en una ubicación específica en el sistema de potencia (IEEE, 2009).

Otro concepto también aceptable podría ser: “Calidad de energía es un conjunto de límites eléctricos que permiten que un equipo funcione de la manera prevista sin pérdidas

significativas de desempeño o expectativa de vida”. Esta definición engloba dos características que se demandan de un dispositivo eléctrico: rendimiento y esperanza de vida (Sankaran, 2002).



**Figura 1.** Problemas de calidad de energía.

Se puede definir calidad de la energía como la ausencia de distorsiones en las señales de voltaje, corriente o frecuencia que pudieran conducir a la mala operación o falla de un dispositivo eléctrico.

Calidad de energía es un término que engloba una multitud de fenómenos que pueden presentarse en los sistemas eléctricos de potencia, antes de iniciar con una descripción detallada es importante contar con una clasificación global de éstos. La Figura 1 muestra una clasificación sencilla y general de las condiciones de instalación y los fenómenos electromagnéticos que pudieran mermar la calidad de la energía eléctrica.

## 1.2 Clasificación de los fenómenos electromagnéticos.

Es importante clasificar los fenómenos electromagnéticos en diferentes categorías pues su análisis y posibles soluciones dependerán de las características particulares de cada fenómeno. En la Tabla 4 se muestra una clasificación en grupos de los fenómenos que pueden causar perturbaciones electromagnéticas de acuerdo al estándar *IEC 6100-2-5:1995 Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 2-5: Environment - Classification of electromagnetic environments* (IEEE, 2009).

**Tabla 4.** Fenómenos principales que causan perturbaciones electromagnéticas de acuerdo con la clasificación de la IEC 6100-2-5:1995.

<b>Grupo</b>	<b>Ejemplos</b>
Fenómenos conducidos de baja frecuencia	Armónicos, interarmónicos
	Sistemas de señalización (power line carrier)
	Fluctuaciones de voltaje (flicker)
	Interrupciones o caídas de voltaje
	Desbalance de voltaje
	Variaciones de frecuencia
	Voltajes inducidos de baja frecuencia
Fenómenos radiados de baja frecuencia	Campos magnéticos
	Campos eléctricos
	Campos electromagnéticos
Fenómenos conducidos de alta frecuencia	Voltajes o corrientes inducidos de onda continua
	Transitorios unidireccionales
	Transitorios oscilatorios
Fenómenos radiados de alta frecuencia	Campos magnéticos
	Campos eléctricos
	Campos electromagnéticos
	Ondas continuas
Fenómenos de descarga electrostática (ESD)	-----
	-----
Pulso electromagnético nuclear (NEMP)	-----

Los fenómenos mencionados en la Tabla 4 pueden ser descritos a detalle si se consideran los atributos apropiados como los listados a continuación para los fenómenos de estado estacionario (IEEE, 2009):

- Amplitud
- Frecuencia
- Espectro
- Modulación
- Impedancia fuente
- Profundidad de la muesca
- Área de la muesca

Para los fenómenos de estado no estacionario los siguientes atributos deben ser tomados en cuenta (IEEE, 2009):

- Razón de elevación
- Amplitud
- Duración
- Espectro
- Frecuencia
- Razón de ocurrencia
- Potencial de energía
- Impedancia fuente



De igual forma, en la Tabla 5 se puede apreciar otra distribución en la cual se proporciona información sobre el contenido espectral, duración y magnitud de cada fenómeno electromagnético según su categoría (IEEE, 2009).

**Tabla 5.** Categorías y características típicas de los fenómenos electromagnéticos de los sistemas de potencia de acuerdo a Estándar IEEE 1159-2009 *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*.

<b>Categorías</b>	<b>Contenido espectral típico</b>	<b>Duración típica</b>	<b>Magnitud de voltaje típico</b>
1.0 Transitorio 1.1 Impulsivo 1.1.1 Nanosegundos 1.1.2 Microsegundos 1.1.3 Milisegundos  1.2 Oscilatorio 1.2.1 Baja frecuencia 1.2.2 Media frecuencia 1.2.3 Alta frecuencia	5 ns de elevación 1 $\mu$ s de elevación 0.1 ms de elevación  < 5 kHz 5 – 500 kHz 0.5 – 5 Mhz	< 50 ns 50ns – 1 ms > 1ms  0.3 – 50 ms 20 $\mu$ s 5 $\mu$ s	0 – 4 pu 0 – 8 pu 0 – 4 pu
2.0 Variaciones RMS de corta duración. 2.1 Instantáneo 2.1.1 Sag 2.1.2 Swell 2.2 Momentáneo 2.2.1 Interrupción 2.2.2 Sag 2.2.3 Swell 2.3 Temporal 2.3.1 Interrupción 2.3.2 Sag 2.3.3 Swell		0.5 – 30 ciclos 0.5 – 30 ciclos  0.5 ciclos – 3 s 30 ciclos – 3 s 30 ciclos – 3 s  > 3 s – 1 min > 3 s – 1 min > 3 s – 1 min	0.1- 0.9 pu 1.1- 1.8 pu  <0.1 pu 0.1- 0.9 pu 1.1 - 1.4 pu  < 0.1 pu 0.1- 0.9 pu 1.1 - 1.2 pu
3.0 Variaciones RMS de larga duración 3.1 Interrupción 3.2 Bajo voltaje 3.3 Sobrevoltaje		> 1 min > 1 min > 1 min	0.0 pu 0.8 - 0.9 pu 1.1 - 1.2 pu

4.0 Desbalance 4.1 Voltaje 4.2 Corriente		EE <sup>a</sup> EE <sup>a</sup>	0.5 - 2% 1.0 - 3.0 %
5.0 Distorsión de la forma de onda 5.1 Desplazamiento de DC 5.2 Armónicos 5.3 Interarmónicos 5.4 Muecas (Notching) 5.5 Ruido	0 – 9 kHz 0 – 9 kHz  Banda ancha	EE <sup>a</sup> EE <sup>a</sup> EE <sup>a</sup> EE <sup>a</sup> EE <sup>a</sup>	0 – 0.1% 0 – 20% 0 – 2%  0 – 1%
6.0 Fluctuaciones de voltaje	<25 Hz	Intermitente	0.1 - 7% 0.2 - 2 P <sub>st</sub>
7.0 Variaciones de frecuencia		< 10 s	±10 Hz

<sup>a</sup>: EE: Estado Estacionario.

Sin olvidar que además de estos fenómenos eléctricos, también existen condiciones de instalación que pueden afectar la calidad de la energía eléctrica, entre ellos (Cortés, 2009):

- Alambrado eléctrico
- Sistema de puesta a tierra
- Interacción de cargas eléctricas
- Requerimientos eléctricos del equipo
- Requerimientos de instalación física del equipo

### 1.3 Definición de los fenómenos electromagnéticos.

En la siguiente sección se brinda una descripción breve y las posibles causas de origen de los fenómenos electromagnéticos que pueden presentarse en los Sistemas Eléctricos de Potencia. Una explicación más amplia de estos fenómenos puede encontrarse en los siguientes trabajos:

- *IEEE Std 1159-2009 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* (IEEE, 2009).
- *Power Quality* de C.Sankaran (Sankaran, 2002).
- *Power Quality Primer* por Barry W. Kennedy (Kennedy, 2000).

### **1.3.1 Transitorios.**

Se podría definir un transitorio como un evento no deseado de corta duración y que aparece momentáneamente. Produce distorsiones en la forma de onda de una señal alterna de corriente o voltaje. Sus características como frecuencia, magnitud y factor de amortiguamiento dependen del disturbio que lo origina y los parámetros de la red, especialmente en el punto donde se presenta, como resistencia, inductancia y capacitancia. Su duración es menor a un ciclo y puede presentarse como un impulso unidireccional, positivo o negativo, o como una onda oscilatoria con el primer pico sumando o restando a la señal fundamental (IEEE, 2009).

Los transitorios pueden generarse fuera de las instalaciones donde se presentan o dentro de las mismas. Un transitorio originado de manera externa puede ser consecuencia de un impacto directo de un rayo o de corrientes inducidas por el campo electromagnético creado por el rayo en las cercanías de algún conductor o equipo del sistema de potencia, también de las operaciones de conmutación del sistema como desconexión de carga, sacar de servicio una línea o maniobrar bancos de capacitores (IEEE, 2009).

Las fuentes internas pueden ser la operación de cargas inductivas, cargas no lineales, conmutación de motores o desconexión de circuitos de grandes corrientes instalados dentro del sistema donde se presentan estos disturbios (IEEE, 2009).

Tomando en cuenta la forma de onda de un transitorio, éste puede clasificarse en dos categorías: impulsivos y oscilatorios.

### **1.3.1.1 Transitorio impulsivo.**

Un transitorio impulsivo es un cambio repentino a diferente frecuencia de la fundamental, en estado estacionario, de voltaje y/o corriente, que es unidireccional en polaridad, ya sea positivo o negativo. Los transitorios impulsivos se caracterizan e identifican por su tiempo de elevación y decremento (IEEE, 2009). Este fenómeno también puede ser descrito por su contenido espectral, por ejemplo, cuando un transitorio impulsivo es expresado como una forma de onda  $8/20\mu\text{s}$ , 3kA significa que se eleva desde cero a su valor pico de 3 kA en 8 micro segundos y decae a la mitad de su valor pico en 20 micro segundos (IEEE, 2009).

A altas frecuencias la resistencia de los equipos que componen el sistema de potencia aumenta, esta característica proporciona mejor amortiguamiento frente a los transitorios impulsivos, pero si éstos no son mitigados pueden llegar a excitar la frecuencia natural de los componentes del sistema de potencia y dar origen a transitorios oscilatorios, los cuales se explican a continuación (IEEE, 2009).

### **1.3.1.2 Transitorios oscilatorios.**

Un transitorio oscilatorio se define como un cambio repentino a frecuencia diferente de la fundamental en la condición de estado estacionario de voltaje, corriente o ambas, que incluye valores de polaridad positiva y negativa. Es decir, se trata de una señal de voltaje o corriente cuyo valor instantáneo cambia de polaridad, de positivo a negativo o viceversa, rápidamente (IEEE, 2009).

Este tipo de transitorios, como se muestra en la Tabla 5, pueden ser clasificados como de baja, media y alta frecuencia.

Los transitorios oscilatorios son muy comunes en los sistemas de transmisión y distribución y son causados principalmente por la energización de transformador o banco de capacitores (IEEE, 2009).

Los transitorios oscilatorios pueden ser medidos con o sin la componente fundamental de frecuencia incluida, pero es importante que en cada caso se indique la magnitud con y sin la componente fundamental (IEEE, 2009).

### **1.3.2 Variaciones del valor RMS de corta duración.**

Los fenómenos que se clasifican bajo este concepto son:

- Interrupciones momentáneas y temporales
- Sags (depresiones) instantáneos, momentáneos y temporales.
- Swells (elevaciones) instantáneos, momentáneos y temporales.

De los cuales se da una breve explicación en los párrafos siguientes.

#### **1.3.2.1 Interrupciones.**

Una interrupción ocurre cuando el valor eficaz de voltaje disminuye a menos del 10% del valor nominal o 0.1 pu durante un periodo de tiempo no mayor a 1 minuto (IEEE, 2009).

De acuerdo al estándar *IEEE 1159-2009 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, las interrupciones clasificadas como variaciones RMS de corta duración pueden dividirse en momentáneas, si su duración va de 0.5 hasta 3 segundos o temporales si rebasan los 3 segundos, pero son menores a 1 minuto.

Las interrupciones son resultado de alguna falla en el sistema eléctrico que involucran la red de distribución, equipo primario averiado por sobre cargas en la red de baja tensión (IEEE, 2009).

### **1.3.2.2 Sag (depresión).**

Un sag es una disminución entre 0.1 pu y 0.9 pu o entre el 10% al 90% en el valor del voltaje RMS; puede clasificarse como instantáneo si su duración va de 0.5 hasta 30 ciclos; como momentáneo si se presenta desde 30 ciclos a 3 segundos o como temporal si se manifiesta por un tiempo mayor a los 3 segundos pero menor a 1 minuto (IEEE, 2009).

La recomendación del estándar *IEEE 1159-2009 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* para describir la magnitud de un sag, es referirse al voltaje remanente; es decir, un sag de 80% se refiere a un disturbio que resulta en un voltaje de 0.8 pu. Siguiendo este mismo ejemplo, en un voltaje nominal de 460 VAC, un sag de 80% resultará en un valor de 368 VAC (IEEE, 2009).

Los sags son usualmente causados por fallas en el sistema eléctrico de potencia, conexión de grandes cargas, altas corrientes de arranque de motores, descargas atmosféricas, etc (IEEE, 2009).

### **1.3.2.3 Swell (elevación).**

Un swell representa una elevación momentánea que va desde 1.1 pu hasta 1.8 pu o un aumento del 110% hasta el 180% del valor nominal del voltaje. Su duración puede ir desde 0.5 ciclos hasta 1 minuto (IEEE, 2009). Pueden clasificarse en instantáneos,

momentáneos o temporales, su magnitud y duración varían según cada clasificación lo cual se encuentra especificado en la Tabla 4 de la sección 1.2 de este trabajo.

Son causados por fallas en el sistema eléctrico, por ejemplo un swell puede observarse durante la falla de una fase a tierra, el incremento de voltaje se manifestará en las otras dos fases no falladas; también puede deberse a la desconexión de grandes cargas (IEEE, 2009).

### **1.3.3 Variaciones del valor RMS de larga duración.**

Los fenómenos que se encuentran bajo esta clasificación de acuerdo a la Tabla 5 son:

- Interrupciones sostenidas
- Bajos voltajes
- Sobre voltajes

La característica común entre todos ellos es que su duración es mayor a 1 minuto.

Usualmente estos fenómenos son resultado de la variación de carga en el sistema eléctrico u operaciones de conmutación, pero pocas veces son ocasionadas por fallas en las líneas eléctricas (IEEE, 2009).

#### **1.3.3.1 Interrupciones sostenidas.**

Se considera una interrupción sostenida a la pérdida completa de voltaje por un tiempo mayor a 1 minuto. Usualmente estas interrupciones son permanentes y requieren de intervención manual para reestablecer la alimentación del sistema (IEEE, 2009).

### **1.3.3.2 Bajo voltaje.**

Un bajo voltaje se refiere a la disminución por debajo del 90% o 0.9 pu del valor del voltaje eficaz. Los valores usuales oscilan entre el 80% y el 90% del voltaje RMS, su duración es mayor a 1 minuto (IEEE, 2009).

La incorporación de cargas al sistema, la salida de un banco de capacitores, la pérdida de una línea de transmisión o circuitos mal dimensionados y con sobrecarga en las instalaciones del usuario final puede ser fuente de bajos voltajes (IEEE, 2009).

### **1.3.3.3 Sobre voltaje.**

Una variación del voltaje RMS por encima del 110% o 1.1 pu y con duración mayor a 1 minuto representa un sobre voltaje. Los valores más comunes van del 110% al 120% del valor nominal de voltaje (IEEE, 2009).

Las causas más comunes de un fenómeno de este tipo son la incorporación de un banco de capacitores al sistema eléctrico, la disminución de carga, la configuración incorrecta de los devanados de transformadores, etc (IEEE, 2009).

### **1.3.4 Desbalances de voltaje y corriente.**

El desbalance de voltaje en un sistema trifásico se define como la razón de cambio de la magnitud de la componente de secuencia negativa con respecto a la magnitud de la componente de secuencia positiva expresada en porcentaje, representado por la ecuación 1 (IEEE, 2009).

$$\% \text{ desbalance} = \frac{|V_{neg}|}{|V_{pos}|} * 100\% \quad (1)$$



El estándar ANSI C84.1-2006, *American National Standard for Electric Power Systems and Equipment Voltage Ratings* define desbalance como la máxima desviación entre las tres fases con respecto al voltaje trifásico promedio dividido entre el voltaje trifásico promedio, como se expresa en la ecuaciones 2 y 3.

$$\% \text{ desbalance} = \frac{|Max. Dev. V_{3\phi \text{ prom.}}|}{|V_{3\phi \text{ prom.}}|} * 100\% \quad (2)$$

Donde

$$V_{3\phi \text{ prom.}} = \frac{V_A + V_B + V_C}{3} \quad (3)$$

Sin embargo, se prefiere la primer definición sobre otras debido a que es posible aplicarla en señales donde el contenido de armónicos es alto.

Esta misma definición es aplicable para el desbalance de corriente.

La mayoría de los equipos pueden soportar desbalances de voltaje por debajo del 2%, éstos son considerados como de menor importancia, un desbalance mayor al 5% se considera severo. El origen de este fenómeno puede deberse a la conexión no balanceada de cargas monofásicas en un circuito trifásico, es decir que se conecten más cargas monofásicas a una fase que a otra; un fusible fundido en una de las fases de un banco de capacitores trifásico o la operación monofásica de un dispositivo de protección (IEEE, 2009).

### **1.3.5 Distorsión de la forma de onda.**

Los fenómenos abordados en esta sección se refieren a aquellos que representan una desviación constante del comportamiento idealmente sinusoidal de una forma de onda a la frecuencia fundamental del sistema eléctrico, 50 Hz o 60Hz según el país de que se trate, y se caracterizan por el contenido espectral de la misma desviación (IEEE, 2009).

Existen cinco tipos primarios de la distorsión de la forma de onda:

- Componente de directa
- Armónicos
- Interarmónicos
- Muecas
- Ruido

Los cuales son descritos de manera breve a continuación.

### **1.3.5.1 Componente de corriente directa.**

La presencia de una señal de corriente o voltaje de corriente directa (CD) en un sistema de corriente alterna (CA) es llamado componente de directa o *DC Offset* por su término en inglés. Este fenómeno puede ocurrir como resultado del uso de rectificadores de media onda instalados en el sistema y que pudieran ser necesarios para el funcionamiento de otros equipos. La presencia de componentes de directa en un sistema de CA puede incrementar la saturación de los transformadores en operación normal, producir sobre calentamiento que disminuye la vida útil del transformador y producir estrés en el aislamiento (IEEE, 2009).

### **1.3.5.2 Armónicos.**

Los armónicos son señales de voltaje o corriente cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema, en este caso 60Hz (IEEE, 2009).

Así las señales armónicas pueden ser de orden (h) 2, 3, 4, etc., es decir 2, 3 o 4 veces la frecuencia de la señal fundamental; por ejemplo, para un sistema a una frecuencia fundamental de 60 Hz, el quinto armónico es 5 veces esta frecuencia, es decir una señal

de 300 Hz. Estas señales armónicas se suman a la forma de onda de frecuencia fundamental, la distorsionan y la convierten en una señal no sinusoidal (Kennedy, 2000). El matemático Jean Baptiste Fourier formuló que una función periódica no sinusoidal de una frecuencia fundamental  $f$  puede expresarse como la suma de funciones sinusoidales de frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental (Sankaran, 2002). Es decir, las señales distorsionadas pueden ser descompuestas en una forma de onda fundamental más la suma de las componentes armónicas.

Los armónicos son generados, en su mayoría, por cargas no lineales en el sistema eléctrico por ejemplo, convertidores estáticos de potencia, variadores de velocidad ajustables, controladores de calefacción de estado sólido, fuentes de alimentación conmutables, fuentes de alimentación no interrumpidas (UPS), rectificadores, filtros y dispositivos electrónicos que involucran electrónica de potencia. Las cargas no lineales hacen que las corrientes armónicas cambien de una corriente sinusoidal a una no sinusoidal al dibujar breves ráfagas de corriente en cada ciclo o interrumpir la corriente durante un ciclo (Kennedy, 2000).

El nivel de distorsión armónica se mide por el espectro total armónico con magnitudes y fases de ángulo para cada componente armónica individual, para esto se usa el término THD (Total Harmonic Distortion por sus siglas en inglés o distorsión total armónica), como una medida de la magnitud de la distorsión armónica. Otro término usado es el TDD (Total Demand Distortion por sus siglas en inglés o distorsión total de demanda) el cual es similar al THD excepto que este término es expresado como porcentaje de la corriente de carga seleccionada, por ejemplo la demanda pico, más que como porcentaje del valor RMS de la corriente fundamental (IEEE, 2009).

Es decir, TDD es la distorsión armónica de corriente calculado contra la carga total del sistema e indica el impacto de la distorsión armónica en el sistema, mientras que THD es la medición de la desviación contra la forma de onda sinusoidal. Por ejemplo, si se muestra un THD muy alto pero una demanda baja, el impacto de la distorsión armónica en el sistema también es bajo, en cambio a plena carga el valor de THD y TDD es el mismo y si es alto puede tener un impacto negativo sobre el sistema (Kennedy, 2000).

Los armónicos de voltaje y corriente tiene efectos dañinos como sobre calentamiento de cables, motores y transformadores; disparos en falso de dispositivos de protección; mediciones incorrectas de voltaje y corriente; corrientes excesivas en el neutro, ferresonancia y esfuerzos excesivos en equipos sensibles (Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente, 2008).

### **1.3.5.3 Interarmónicos.**

Los interarmónicos son señales de voltaje o corriente cuya frecuencia es múltiplo no entero de la frecuencia fundamental para la que está diseñado el sistema para funcionar. Efectos de calentamiento, similar a los producidos por los armónicos, pueden ser causados por los interarmónicos. Además las corrientes interarmónicas pueden generar resonancias graves en el sistema de potencia a medida que la frecuencia interarmónica coincida con las frecuencias naturales del sistema (Dugan, Mc Granaghan, Santoso, & Beaty, 2004).

Estos fenómenos se pueden encontrar en sistemas de cualquier nivel de voltaje y la fuentes principales de estas distorsiones son convertidores estáticos de frecuencia, cicloconvertidores, motores asíncronos, hornos de inducción y dispositivos de arco (IEEE, 2009).

#### **1.3.5.4 Muestras.**

Las muescas son un cambio periódico, positivo o negativo, de polaridad opuesta a la señal de operación. Estas se manifiestan en la forma de onda de voltaje y son causadas por la operación normal de dispositivos de electrónica de potencia; ocurren cuando la corriente es conmutada de una fase a otra (IEEE, 2009).

Estos fenómenos son generados por cortos entre fases producidos por la conmutación de los SCR (*Silicon Controller Rectifier* por sus siglas en inglés) en los circuitos con rectificadores (Cortés, 2009).

#### **1.3.5.5 Ruido.**

El ruido se define como señales eléctricas no deseadas con un contenido espectral de banda ancha inferior a 200 kHz superpuestos a una señal de voltaje o corriente del sistema de potencia en los conductores de fase o en los conductores de neutro o en las líneas de señales (IEEE, 2009).

Estas perturbaciones no pueden ser clasificadas como armónicos o transitorios, usualmente son originadas por dispositivos de electrónica de potencia, cargas con rectificadores de estado sólido, fuentes conmutadas y equipos de arco. El aterrizamiento incorrecto también puede causar problemas de ruido en las señales (IEEE, 2009).

La magnitud típica de estos fenómenos es menor al 1% de la magnitud de voltaje. El ruido puede dañar diversos componentes electrónicos usados en equipos de cómputo como micro controladores programables (IEEE, 2009).

### **1.3.6 Fluctuaciones de voltaje.**

Son variaciones rápidas y aleatorias del valor del voltaje eficaz pero dentro de los límites de 0.95 pu a 1.05 pu. Usualmente son causadas por soldadoras, hornos de arco o cualquier otra carga que tenga variaciones cíclicas significativas y que involucre componentes reactivos (Kennedy, 2000).

No se debe usar el término *flicker* para referirse a las fluctuaciones de voltaje; el flicker o parpadeo, usualmente perceptible en las lámparas, es la consecuencia visual de las fluctuaciones de voltaje (IEEE, 2009).

### **1.3.7 Variaciones de frecuencia.**

Las variaciones de frecuencia son las desviaciones con respecto al valor nominal de la frecuencia fundamental del sistema eléctrico en cuestión; 50 o 60 Hz según el país en cuestión (IEEE, 2009) .

El valor de la frecuencia está relacionado con la velocidad de rotación de los generadores que componen el sistema. El mantener un valor de frecuencia estable está directamente relacionado con el balance que exista entre la carga de un sistema y la generación; cuando este equilibrio se altera también lo hace el valor de la frecuencia (IEEE, 2009).

La conexión o desconexión de carga al sistema eléctrico es una de las razones más frecuentes de cambios pequeños en la frecuencia y, aunque pequeños, son más notables en el lado de la carga, usualmente el sistema de generación no responde a éstos.

Los cambios de frecuencia que rebasan los límites aceptables de  $\pm 10$  Hz son, en la mayoría de los casos, ocasionados por la desconexión de grandes bloques de cargas o la salida de unidades de generación de gran aportación (IEEE, 2009).

## **Capítulo 2 Metodología para identificar la causa raíz de fenómenos electromagnéticos.**

En este capítulo se explica la metodología propuesta para hacer un estudio de calidad de energía eléctrica. Se pretende que esta metodología sirva como guía para el departamento de Infraestructura de la empresa Schweitzer Engineering Laboratories en la ejecución de un estudio de calidad de energía eléctrica en caso de que se presentara alguna anomalía en el desempeño de las máquinas de producción y siempre y cuando esta anomalía esté asociada a los parámetros eléctricos de dicho equipo.

### **2.1 Conocer el problema.**

El primer paso es conocer las características del problema con el objetivo de tener un contexto de la situación actual. Para esto, es necesario realizar algunas entrevistas al operador de los equipos fallados y al ingeniero de Infraestructura a cargo a fin de obtener la información del evento que se haya presentado. Primeramente, se deberá familiarizar con las características del problema, para esto es importante realizar una documentación de cada falla que se haya presentado en cada máquina, de esta manera se tendrá mayor contexto de la situación y se podrá saber si se trata de una falla aislada o un conjunto de estas, así como investigar si existe alguna relación entre ellas. El siguiente paso es validar que se cumplan las condiciones físicas de instalación, es decir los requerimientos ambientales y eléctricos de operación de los equipos. Una vez obtenida esta información se recomienda usar el estándar *IEEE 1159-2009* en el cual se describen las características típicas de los fenómenos electromagnéticos de un sistema de potencia, y

empatar la información obtenida con los fenómenos ahí descritos, esto permitirá hacer una asociación rápida de las características que se encuentren y relacionarlo con el fenómeno electromagnético correspondiente.

### **2.1.1 Documentar las fallas de los equipos.**

El departamento de Infraestructura deberá guardar un reporte por cada falla presentada en los equipos. El operador en turno de la máquina que falle y su supervisor deberán responder un cuestionario a fin de generar el reporte antes mencionado.

El cuestionario es un método de recopilación de datos que puede ser distribuido a una mayor cantidad de personas y, en consecuencia, una mayor cantidad de datos puede ser recolectada. De igual manera, es una herramienta flexible que permite la recolección de datos de equipos ubicados en diferentes localidades (Jenny Preece, 2015).

Adicionalmente, las preguntas abiertas son la mejor opción cuando el objetivo de la sesión es exploratoria; las preguntas cerradas pueden ser usadas solo cuando, de manera anticipada, se conocen las posibles respuestas (Jenny Preece, 2015).

Es por esto que se ha diseñado un cuestionario de preguntas abiertas con el objetivo de conocer qué es lo que sucede en el momento en que falla una máquina. Esta herramienta permitirá coleccionar datos provenientes del personal que se encuentra trabajando en diferentes turnos así como de equipos ubicados en diferentes áreas, así la información puede ser obtenida en cualquier momento en que los equipos fallen.

Este reporte debe contener preguntas mostradas en el [Anexo 1](#).



## **2.1.2 Validación de los requerimientos físicos de la instalación.**

En este punto se busca conocer los requerimientos eléctricos y ambientales de operación de los equipos afectados, así como determinar si las instalaciones de cableado y aterrizamiento son las óptimas. Tanto los requerimientos ambientales como los eléctricos se encuentran definidos en el manual de cada equipo y pueden variar de una máquina a otra. En caso de que exista alguna condición de instalación física o ambiental que no se cumpla, deberá corregirse lo más pronto posible.

- Requerimientos ambientales de instalación: por ejemplo, temperatura de operación, área y superficie de instalación, altitud, humedad relativa.
- Obtener las tolerancias de variación de los parámetros eléctricos de la máquina afectada.
- Validar si se está operando bajo las condiciones eléctricas establecidas en el manual. Considerar cableado y parámetros eléctricos.

## **2.2 Definir punto de medición.**

El primer paso en la resolución de los problemas de calidad de la energía es definir el punto o puntos de medición. Instalar un equipo de medición en una ubicación que no es óptima con respecto al equipo afectado, puede dar lugar a información engañosa o insuficiente. La mejor manera de abordar un problema de calidad de la energía es primero examinar la calidad de la energía en el punto más cercano al equipo afectado (Sankaran, 2002).

## **2.3 Realizar mediciones.**

Con base en la información obtenida en la sección 2.1 Conocer el problema, se definirán los fenómenos electromagnéticos a monitorear con un equipo analizador de calidad de energía. Se deberá usar la especificación *L0000-45 Desviaciones Permisibles en las Formas de Onda de Tensión y Corriente en el Suministro y Consumo de Energía Eléctrica* y el estándar *IEEE 1159 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* para establecer los límites de los fenómenos a monitorear, los cuales deberán ser configurados en el equipo analizador de calidad de energía eléctrica.

Las mediciones se deben realizar en las terminales de alimentación de las máquinas afectadas o lo más cercano a éstas. El tiempo mínimo recomendado por el estándar *L0000-45 Desviaciones Permisibles en las Formas de Onda de Tensión y Corriente en el Suministro y Consumo de Energía Eléctrica* para realizar las mediciones es de una semana (CFE, 2005) sin embargo, en esta metodología se recomienda hacerlo por un periodo de al menos 2 semanas.

## **2.4 Analizar los datos y emitir un diagnóstico.**

Una vez que se haya instalado el equipo de medición, durante la primer semana se recomienda revisar los datos recabados cada dos días a fin de evaluar que la información que se está obteniendo es adecuada para realizar un diagnóstico, en caso de que no lo sea, se deberán ajustar los parámetros de medición y volver a revisar los datos obtenidos. Cuando los datos obtenidos permitan realizar un diagnóstico, se deberá continuar con las mediciones y después de cumplir con el tiempo de medición establecido se deberá proceder al análisis buscando cubrir los siguientes puntos:

- Identificar los disturbios electromagnéticos presentes en las mediciones obtenidas y registrarlos de manera cronológica usando el formato propuesto en el [Anexo 2](#). Esto ayudará a identificar, de manera rápida, si estos disturbios están relacionados con algún problema de calidad de la energía. Es importante señalar que este formato contiene el registro de fecha, hora, tipo de disturbio, magnitud y duración, así como los equipos aledaños afectados. La columna “tipo de disturbio” debe definirse de acuerdo con la Tabla 5 (IEEE, 2009).
- Validar si la magnitud y duración de los eventos registrados rebasan los límites establecidos en el manual del equipo afectado, en la norma *L0000-45 Desviaciones Permisibles en las Formas de Onda de Tensión y Corriente en el Suministro y Consumo de Energía Eléctrica* así como en el estándar *IEEE 1159 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* .
- Identificar si los fenómenos electromagnéticos detectados están relacionados con las características del problema documentadas en la sección 2.1 y de esta forma poder establecer una relación con la falla del equipo.
- Revisar el diagrama unifilar de la empresa, ubicar el equipo afectado y verificar si existe alguna condición que pudiera contribuir a la aparición de los fenómenos electromagnéticos detectados.
- Establecer la causa o causas de los disturbios y emitir un diagnóstico del problema
- Identificar posibles soluciones.

## **2.5 Presentar posibles soluciones.**

Es necesario presentar las posibles soluciones a la gerencia del departamento, las cuales deberán justificarse con un análisis costo – beneficio, el cual debe cubrir los siguientes puntos:

- Análisis de riesgos
- Estudio de impacto en los procesos
- Inversión inicial
- Tiempo de recuperación de la inversión
- Plan de implementación

De las opciones presentadas se debe escoger aquella que, después de ser presentada a la gerencia, se concluya que resolverá el problema.

## **2.6 Implementar solución.**

En esta etapa es necesario seguir el plan de implementación desarrollado para la solución que haya sido seleccionada en el paso anterior.

El plan de implementación debe ejecutarse dando cumplimiento a una fecha compromiso y reportando mensualmente el porcentaje de avance a la gerencia.

En [Anexo 3](#) se muestra un ejemplo de formato para el plan de implementación.

## **2.7 Evaluar efectividad de la solución.**

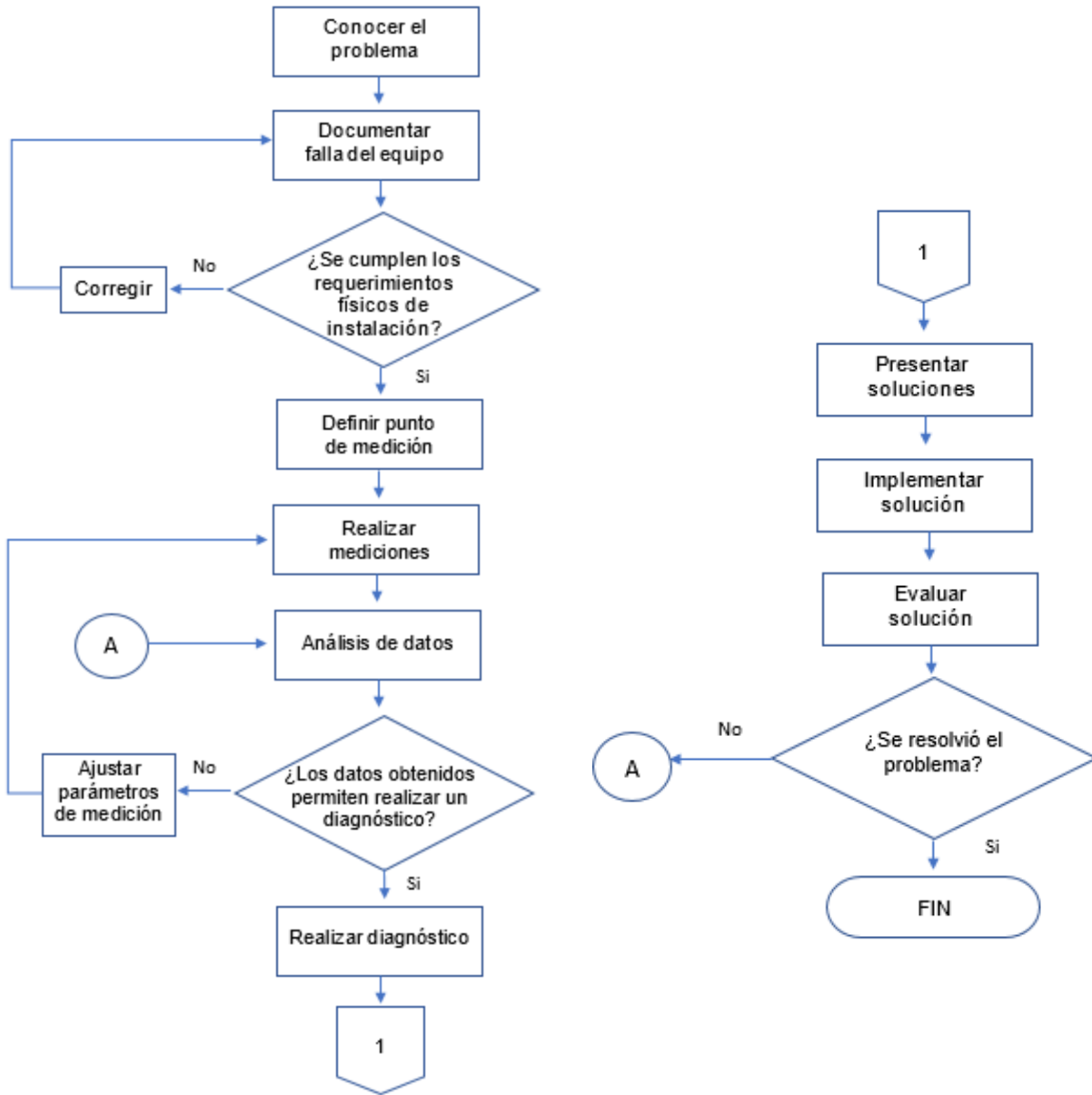
Una vez que se haya dado cumplimiento a todas las actividades del plan de implementación de la solución escogida, se deberá evaluar si el problema está resuelto.

Se sugiere hacer nuevamente, durante 2 semanas, el monitoreo de los parámetros

eléctricos definidos en la sección 2.2 Definir fenómenos a monitorear y realizar mediciones, después, durante los siguientes 3 meses, se deberá verificar que la máquina no salga de operación debido a alguna falla ocasionada por una pobre calidad de la energía eléctrica.

Si no se presenta una nueva falla, el problema se considera como solucionado, de lo contrario se deberán repetir los pasos a partir de la sección 2.3 con los datos recolectados en las últimas 2 semanas, así hasta que el problema sea resuelto.

En la Figura 2 se presenta un diagrama de flujo que engloba la metodología desarrollada en este capítulo.



**Figura 2.** Diagrama de flujo de metodología propuesta para realizar un estudio de calidad de energía eléctrica.

# Capítulo 3 Estudio de caso: máquina dobladora de lámina.

## 3.1 Descripción del estudio de caso.

El departamento de Infraestructura de la empresa Schweitzer Engineering Laboratories ubicada en San Luis Potosí (SEL S.L.P.) ha reportado daño en fuentes de alimentación, servomotores, arrancadores suaves y variadores de velocidad en las máquinas punzonadoras, dobladoras, robot de soldadura, torno CNC y centro de maquinados de la Unidad Productiva de Gabinetes (UPG) y del área de Maquinado Inyección y Troqueado (MIT).

De igual forma, se reportan altos costos derivados de la reparación y paro de proceso de las máquinas dobladoras de lámina.

Los equipos que han sufrido daños son:

Unidad Productiva de Gabinetes:

- 2 punzonadoras
- 2 dobladoras
- 1 robot de soldadura

Maquinado Inyección y Troquelado:

- 1 Centro de maquinado
- 1 Torno CNC

Debido al costo que representan la reparación y el paro de proceso (referirse a la Tabla 3), se selecciona la dobladora marca Trumpf modelo TruBend 5130, ubicada en la Unidad Productiva de Gabinetes, como la máquina objetivo para realizar un estudio de calidad de energía que nos permita identificar las causas del daño en los componentes de la misma.

## **3.2 Conocer el problema.**

### **3.2.1 Documentar las fallas del equipo.**

Para familiarizarse con las características del problema se realizó un breve cuestionario al ingeniero de Infraestructura encargado de la Unidad Productiva de Gabinetes, el cual se detalla a continuación.

#### ***1.- ¿Qué sucede en la máquina dobladora Trumpf TrueBend 5130?***

R: Se dañan los drivers de la máquina, cuenta con 4 y se han reemplazado 5 piezas. Una pieza se ha reemplazado 2 veces.

#### ***2.- ¿Cuándo se presenta la falla?, ¿con qué frecuencia se presenta?***

R: No se sabe con exactitud, simplemente se descomponen, a veces los variadores de velocidad se dañan cuando hay variaciones de bajo voltaje o durante lluvias con descargas eléctricas.

#### ***3.- ¿Cómo se manifiesta el problema?, ¿cuáles fueron las características?***

R: No hay manifestaciones concretas, solo deja de operar. En algunas ocasiones, en la pantalla de la máquina, se despliega un mensaje de error indicando que alguno de los ejes no alcanza la posición base.



#### 4.- ¿Qué componentes fallan en cada evento?

R: Los variadores de velocidad son los que más se dañan, no se sabe qué parte del variador de velocidad sufre daños, nunca se han abierto.

#### 5.- ¿En qué parte de la máquina están los componentes?

R: En el circuito de control de 24VCD.

#### 6.- ¿Se cuenta con algún registro de seguimiento de las fallas de la máquina?

R: No

### 3.2.2 Validación de los requerimientos físicos de la instalación.

La dobladora TruBend 5130, debe ser alimentada en las terminales DISC11 con un voltaje de 460 VAC, 3 $\phi$ , con una tolerancia de  $\pm 5\%$  en un sistema eléctrico a 60 Hz (TRUMPF, 2007). De acuerdo al esquema eléctrico, placa de datos y requerimientos eléctricos mostrados en la Figura 3, Figura 4, y Tabla 6 respectivamente.

<b>TRUMPF Maschine Austria</b>			
GmbH & Co KG			
A – 4061 Pasching Industriepark 24 Tel.: + 43(0)7221-603-0			
<b>Hydraulik press brake</b>			
Type:	<b>TruBend 5130</b>		
Serial no.:	B0504A0502		
Prod. No.:	F1027F		
Tonnage:	1432.6 (1300) sh tn (kN)	Weight:	24034 (10900) lbs (kg)
Max. Stroke:	17.51 (445) in (mm)	Voltage:	3x460 V
Max. Operating press:	4350 (300) psi (bar)	Full load current:	34.0 A
Max. Brake time:	95 ms	Frequency:	60 Hz
Springback at 220 mm/s max.:	10 mm	Electric connection:	27.0 kVA
Springback at 160mm/s max.:	8.5 mm	Amp. Rating of largest motor:	29.0 A
Min. Safety distance:	7.48 (190) in (mm)	Control voltage:	24 VDC
Construction year:	September 2007	Pneumatic connection:	87 (6) psi (bar)
		Electric diagram no:	Index

Figura 3. Placa de datos de máquina TruBend 5130 (TRUMPF, 2007).

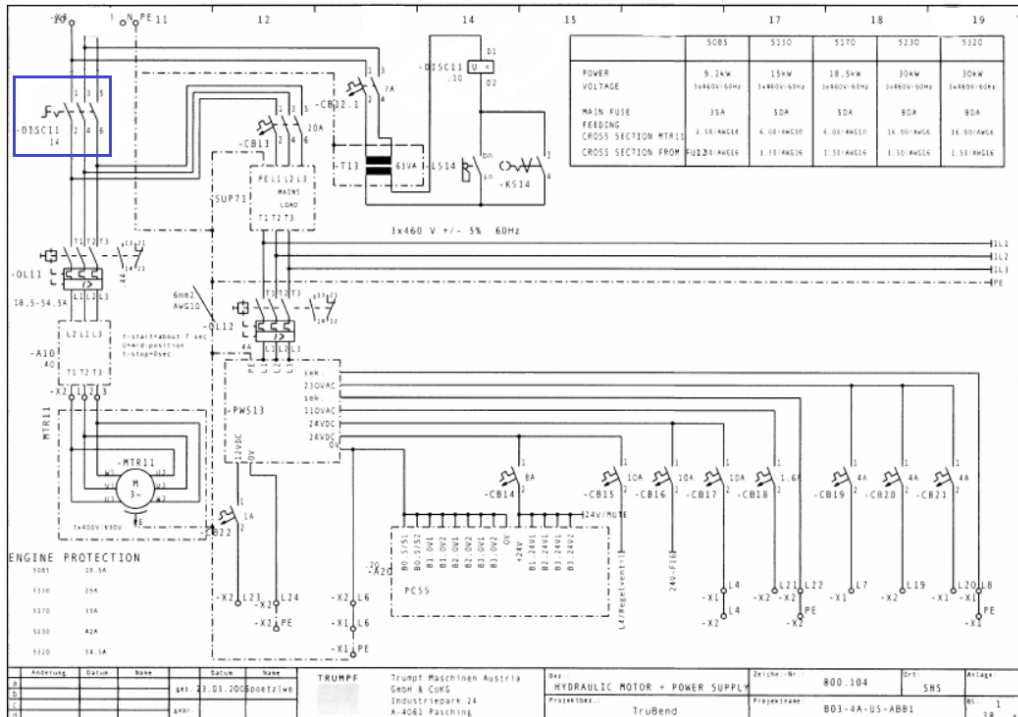
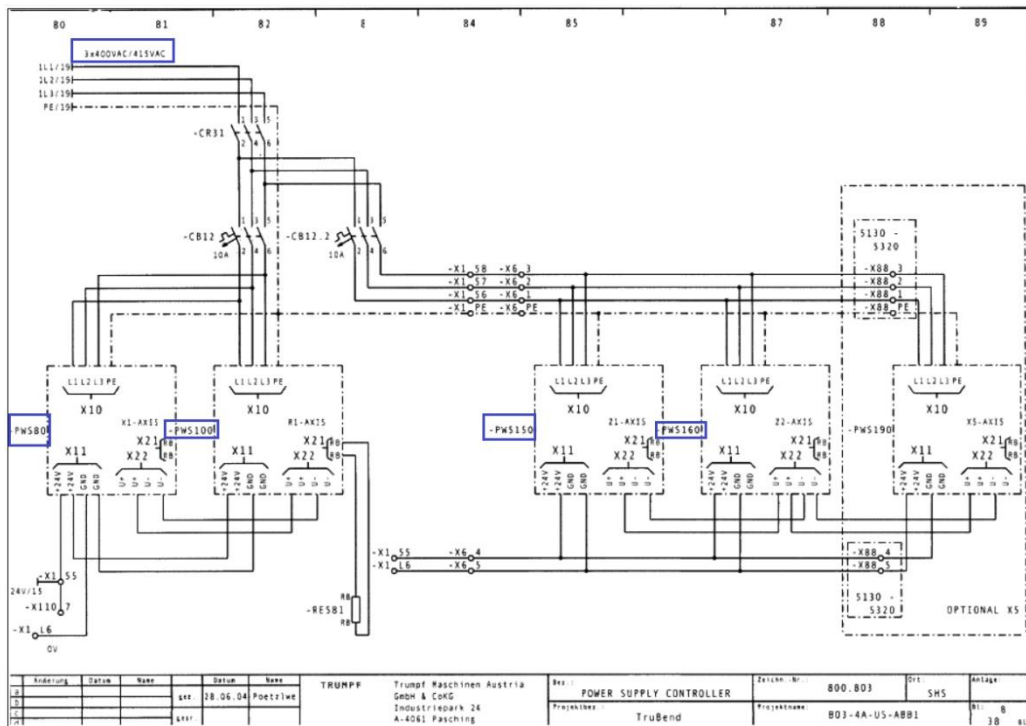


Figura 4. Alimentación de máquina TruBend 5130 (TRUMPF, 2007).

Tabla 6. Requerimientos eléctricos de dobladora TruBend 5130.

Modelo	TruBend 5130
No. serial	B0504A0502
Voltaje de alimentación	460 VAC $3\phi$
Tolerancia de voltaje de alimentación	$\pm 5\%$
Corriente a plena carga	34 A
Frecuencia	60 Hz
Tolerancia de frecuencia	$\pm 2\%$
Voltaje de control	24 VDC

Una derivación de este mismo voltaje es el que alimenta a los variadores de velocidad instalados en esta máquina, identificados como PWS80, PWS100, PWS150 y PWS160 (Figura 5).



**Figura 5.** Alimentación de variadores de velocidad (TRUMPF, 2007).

De acuerdo a la Figura 6 correspondiente al manual de instrucciones de la máquina dobladora, la tarjeta de potencia de los variadores de velocidad modelo MDS5015A/LT deben ser alimentados con 480VAC, 3φ con una tolerancia de variación en el voltaje de +10% / -58% para sistemas eléctricos a 60 Hz (STÖBER, 2015).

Device	MDS 5007	MDS 5008	MDS 5015
ID no.	44556	44557	44558
up to HW 190 (MDS 5xxx)	55401	55402	55403
start. from HW 200 (MDS 5xxxA)			
Recommended motor power	0.75 kW	0.75 kW	1.5 kW
U <sub>1PU</sub>	(L1 – N) 1 × 230 V +20 % / -40 % 50/60 Hz	(L1 – L3) 3 × 400 V, +32 % / -50 %, 50 Hz (L1 – L3) 3 × 480 V, +10 % / -58 %, 60 Hz	
I <sub>1N,PU</sub>	ID 44556: 1 × 6 A ID 55401: 1 × 6 A	ID 44557: 3 × 2 A ID 55402: 3 × 2.2 A	ID 44558: 3 × 3.7 A ID 55403: 3 × 4 A
f <sub>2PU</sub>	ID 44556, 44557, 44558: 0 to 400 Hz ID 55401, 55402, 55403: 0 to 700 Hz		
U <sub>2PU</sub>	0 to 230 V	0 to 400 V	

**Figura 6.** Requerimientos eléctricos de variadores de velocidad (STÖBER, 2015).

Se validó que los requerimientos eléctricos de voltaje y frecuencia en las terminales de alimentación de la máquina y del variador de velocidad se cumplieran.

De igual manera se validó que las condiciones ambientales indicadas en el manual de la máquina dobladora y mostradas en la Tabla 77 se respetaran, así como las condiciones de cableado y puesta a tierra.

**Tabla 7.** Condiciones ambientales de operación (TRUMPF, 2007).

Temperatura ambiente de operación	+10°C/ +50°F a +40°C/ +104°F
Temperatura ambiente para el sistema de control cuando la máquina está fuera de operación	-20°C/ -4°F a +70°C/ +158°F

### 3.3 Realizar mediciones.

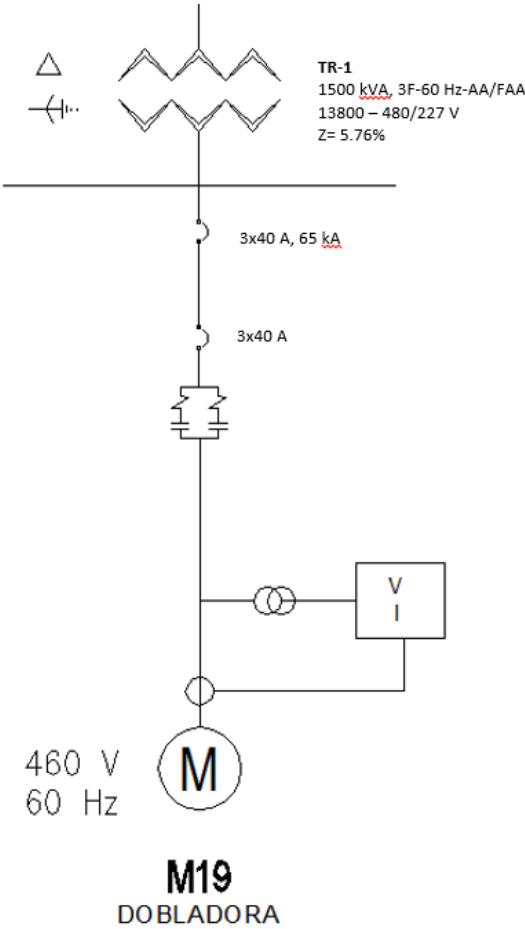
Una vez que los requerimientos anteriores fueron validados satisfactoriamente, se procedió a la instalación de un equipo analizador de energía con el fin de obtener información para evaluar la calidad de la energía en la alimentación principal de la máquina dobladora (Figura 7).

La instalación se llevó a cabo el viernes 24 de marzo del 2017. Se conectó un equipo analizador de la calidad del suministro eléctrico marca Dranetz modelo 440s



**Figura 7.** Instalación de equipo de medición.

En la Figura 8 se muestra el diagrama unifilar de las conexiones realizadas para llevar a cabo las mediciones de voltaje y corriente en las terminales de alimentación de la máquina dobladora.



**Figura 8.** Diagrama unifilar de conexión de medidor de la calidad de la energía.

### **3.4 Análisis de datos.**

Aunque la instalación del equipo analizador de energía se hizo el 24 de marzo del 2017, debido a cambios en la instalación y configuración en el equipo, las mediciones que se tomaron para el análisis son las de las fechas a partir del 07 de abril hasta el 21 de abril del 2017.

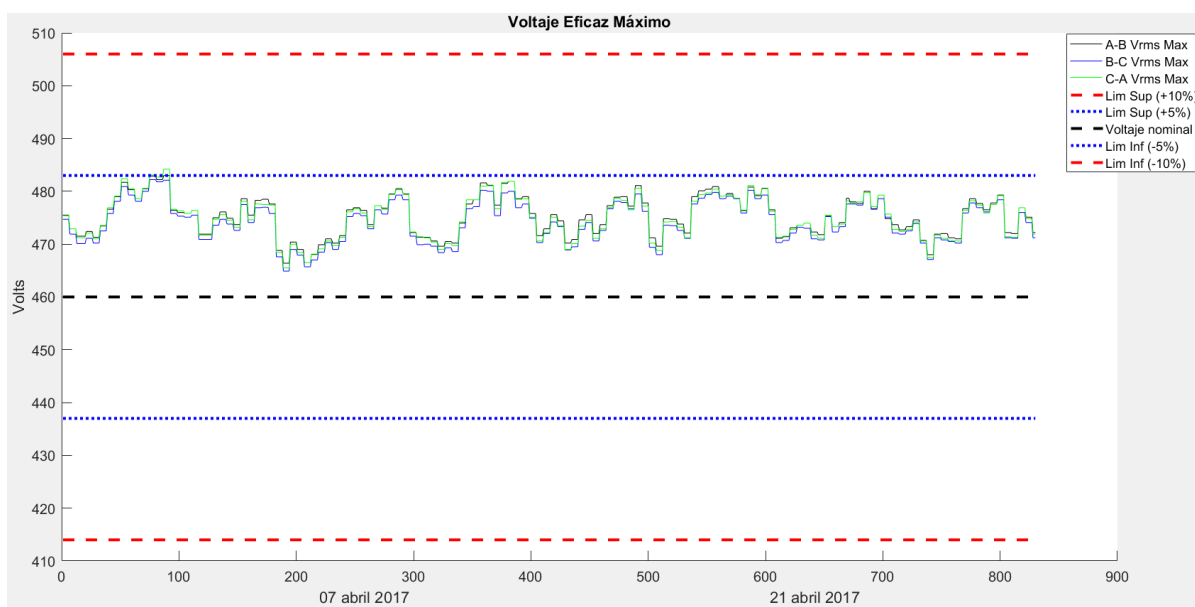
Se han establecido dos bandas como límites para el análisis de las mediciones de voltaje. La primera corresponde a una variación de  $\pm 5\%$  del voltaje nominal de alimentación; la segunda, a una variación de  $\pm 10\%$  del mismo parámetro. Los límites para la primera banda, listando primero el inferior y después el superior, son 437 VAC a 483 VAC. Los límites para la segunda banda se encuentran en 414 VAC y 506 VAC.

La primera banda se establece con base a la variación soportada por la máquina, documentada en el manual de la misma. La segunda banda de  $\pm 10\%$  se estableció para poder detectar swells y sags en las mediciones de voltaje eficaz máximo y voltaje eficaz mínimo, respectivamente.

La Figura 9 muestra los registros de voltaje eficaz máximo, se observa que las mediciones se mantienen dentro de la banda del  $\pm 10\%$  pero no así para la banda del  $\pm 5\%$  donde se detectan las siguientes mediciones por encima del límite superior:

- 483.1VAC, voltaje de línea C-A durante 50 minutos, de 23:00 – 23:50 hrs.
- 484.2VAC, voltaje de línea C-A durante 50 minutos, de 08:00 – 08:50 hrs.

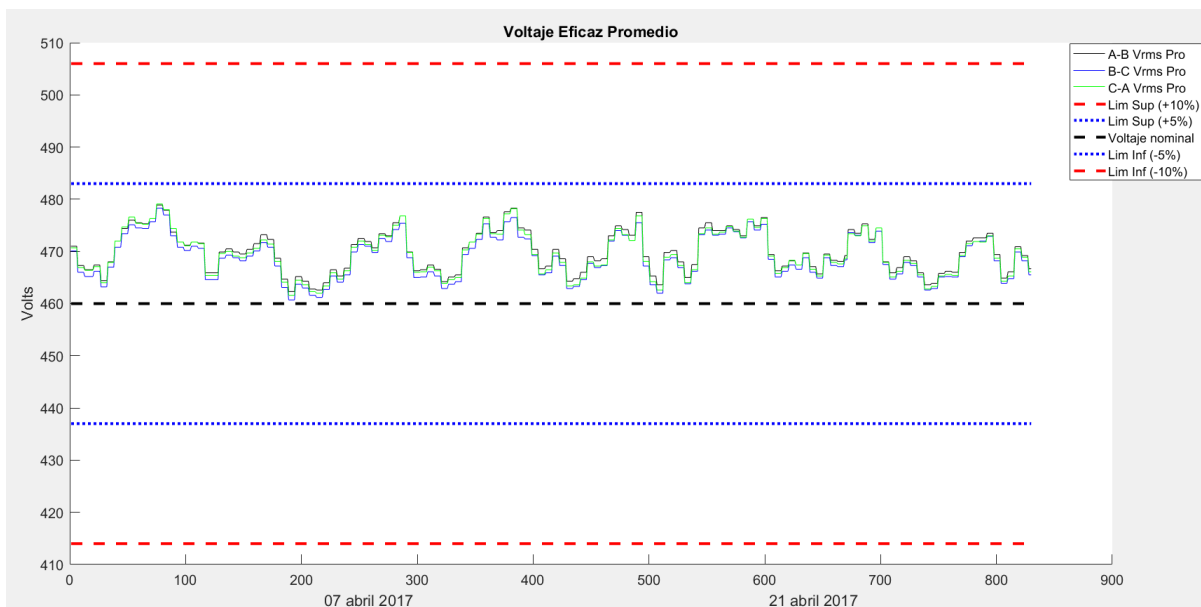
Si bien no se detectan swells, se comprueba que sí existen mediciones sobre el límite máximo de tolerancia de voltaje de alimentación aceptado por la máquina.



**Figura 9.** Voltaje eficaz máximo.



En la Figura 10 se observa que el voltaje eficaz promedio que alimenta a la máquina dobladora está por encima de 460 VAC, 3φ pero dentro de la banda de tolerancia de  $\pm 5\%$  pero por encima de 460 VAC. Se obtienen las siguientes mediciones: 470.1 VAC voltaje de línea A-B, 468.9 VAC para B-C y 469.5 VAC para C-A.



**Figura 10.** Voltaje eficaz promedio.

En la Figura 11 se registran voltajes por debajo de los límites inferiores de las bandas del 5% y 10%.

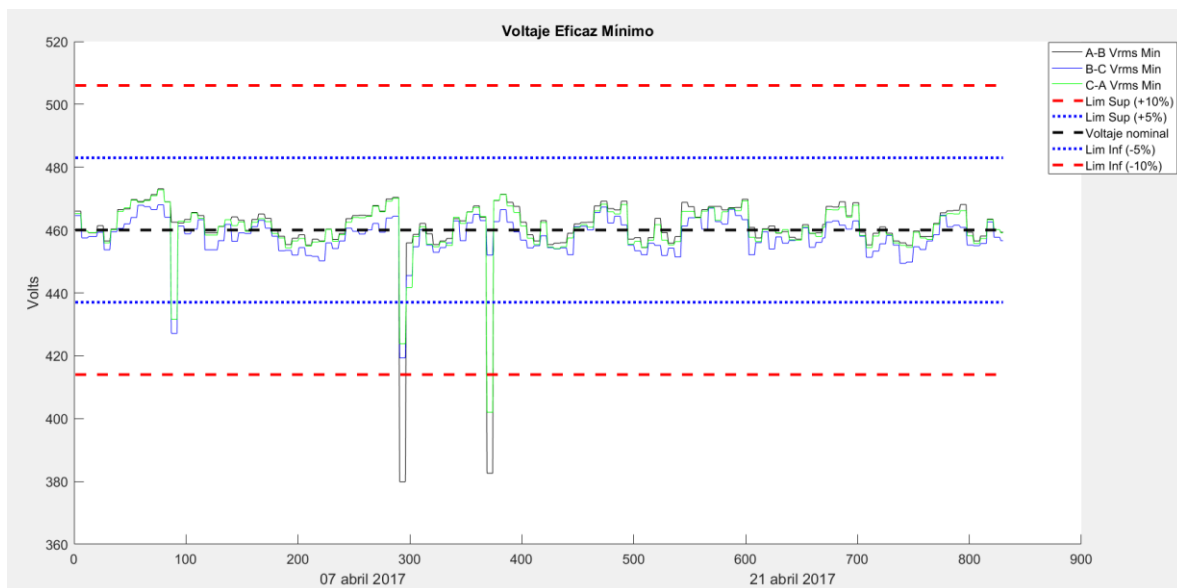
Eventos registrados por debajo del límite inferior de la banda de 5% pero dentro de la banda de 10%:

- Voltaje de línea B-C registra 427.1 VAC durante 50 minutos, de 08:00 - 08:50 hrs del 08 abril 2017.
- Voltaje de línea C-A registra 431.6 VAC durante 50 minutos, de 08:00 - 08:50 hrs del 08 abril 2017.

- Voltaje de línea C-A registra 423.8 VAC durante 50 minutos, de 08:00 - 08:50 hrs del 12 abril 2017
- Voltaje de línea B-C registra 419.3 VAC durante 50 minutos, de 08:00 - 8:50 hrs del 12 abril 2017.

Eventos registrados por debajo del límite inferior de la banda de 10%:

- Voltaje de línea A-B registra 379.9 VAC durante 50 minutos, de 08:00 - 08:50 hrs del 12 abril 2017.
- Voltaje de línea C-A registra 402 VAC durante 50 minutos, de 21:00 -21:50 hrs del 12 abril 2017.
- Voltaje de línea A-B registra 382.6 VAC durante 50 minutos, de 21:00 -21:50 hrs del 12 abril 2017.



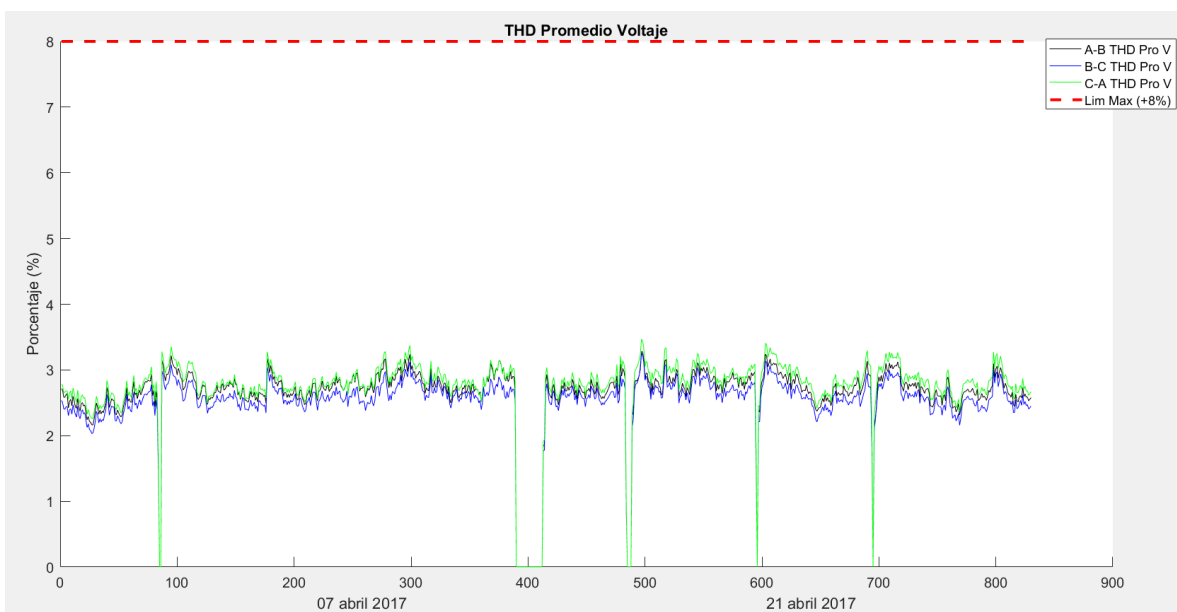
**Figura 11.** Voltaje eficaz mínimo.

La distorsión total armónica (THD por sus siglas en inglés) es otro parámetro importante de analizar y presentar su comportamiento. En las siguientes Figura 12, Figura 13 y

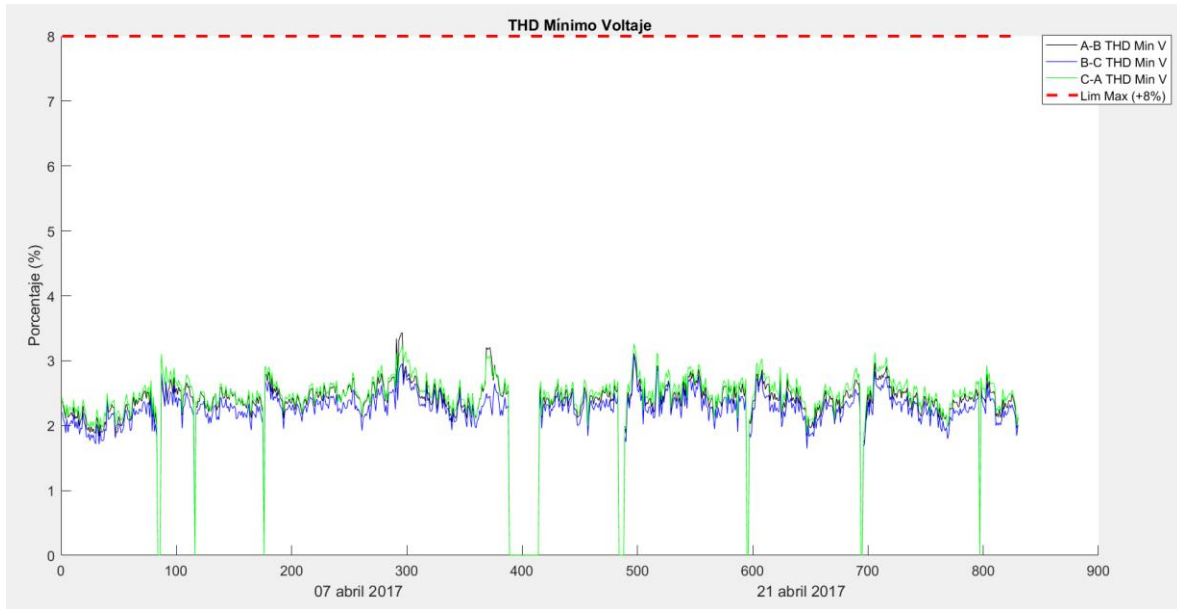
Figura 14, se aprecia la THD máxima, promedio y mínima, en cada gráfica se ha establecido un límite superior del 8%, de acuerdo a la norma L0000-45 para sistemas con tensión menor a 1 kV.



**Figura 12. THD máxima voltaje.**



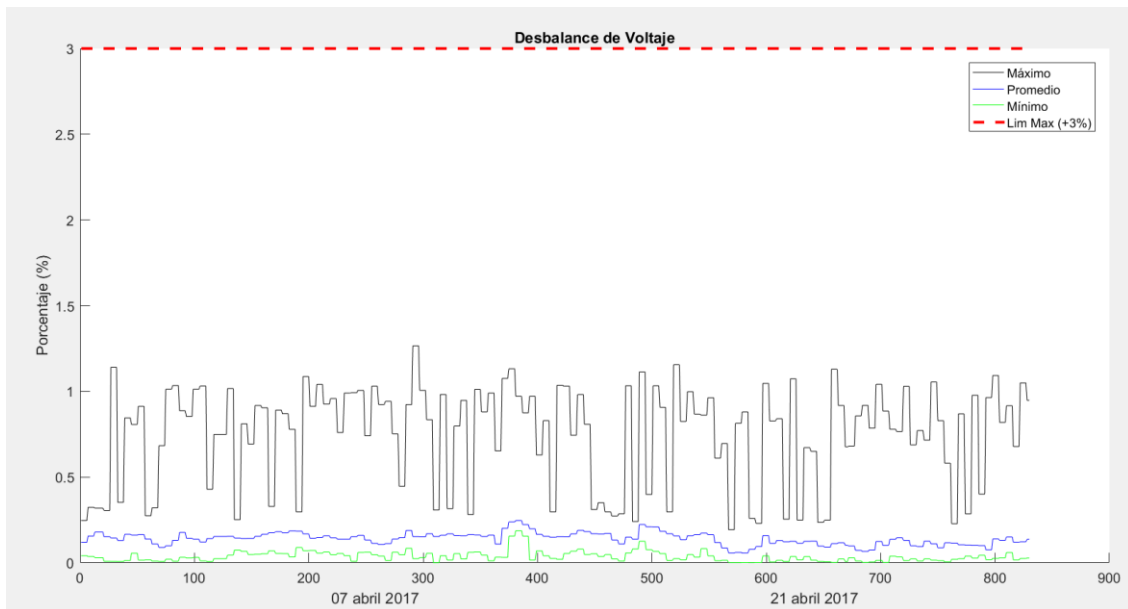
**Figura 13. THD promedio voltaje.**



**Figura 14.** THD mínimo voltaje.

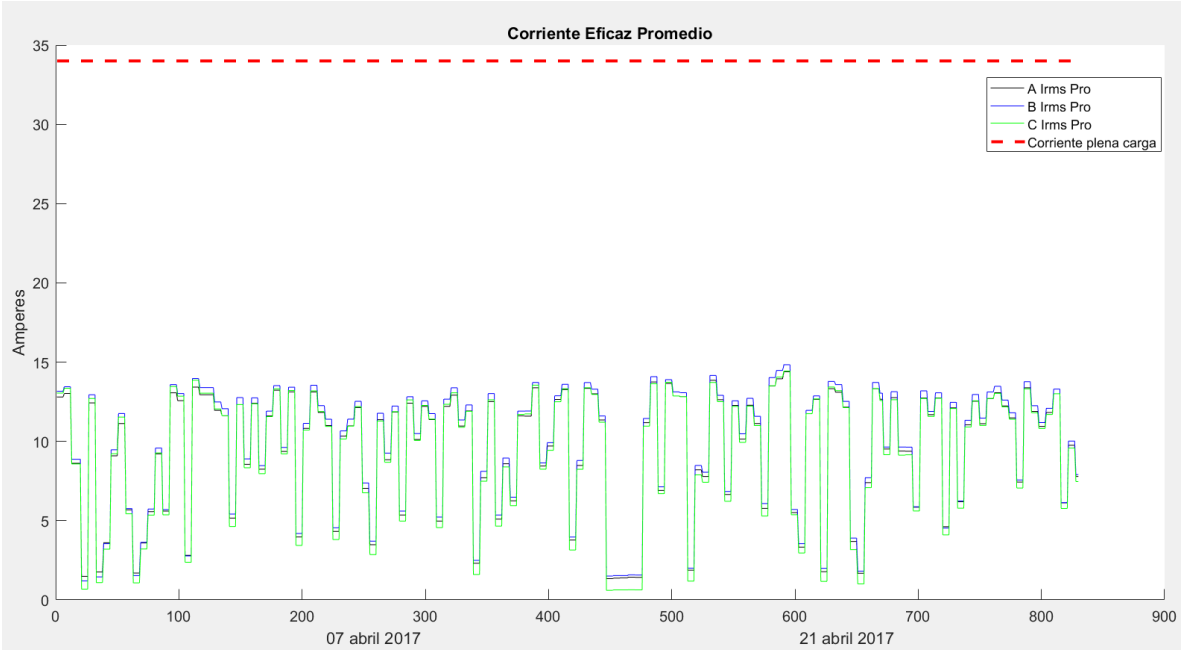
En las tres figuras anteriores se observa que la THD se encuentra por debajo del 8%.

En la Figura 15 se muestra el desbalance de voltaje y se comprueba que se encuentra por debajo del 3%, límite establecido en la especificación L0000-45.



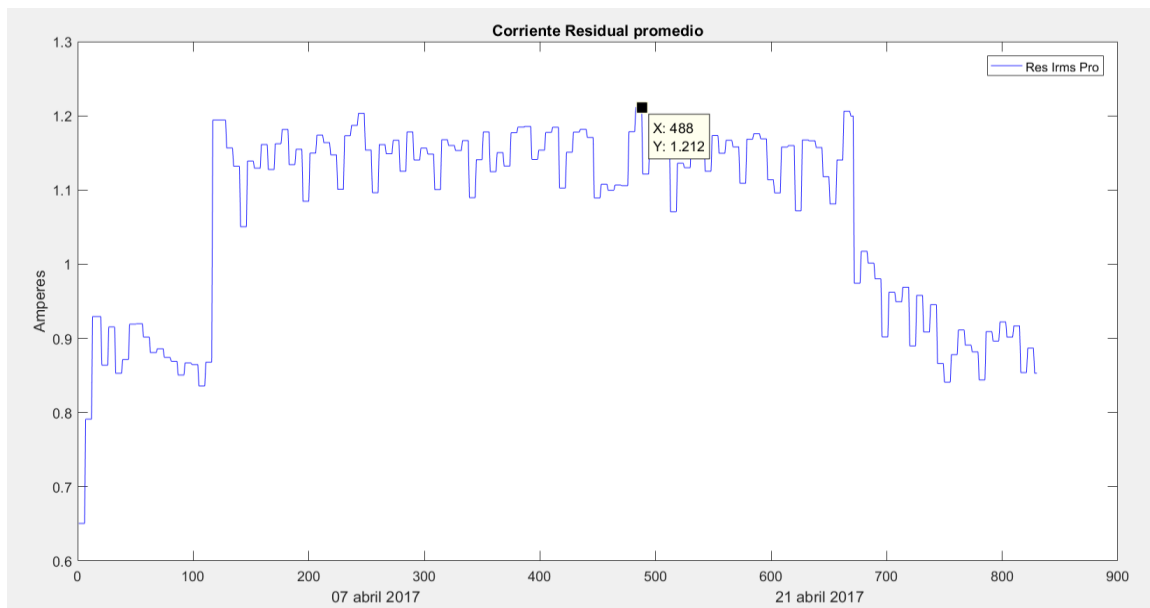
**Figura 15.** Desbalance de voltaje.

En la Figura 16 se observa que el consumo de corriente eficaz promedio es de 15 A y es menor a 34 A, corriente de plena carga de la máquina.



**Figura 16.** Corriente eficaz promedio.

En la Figura 17 se observa la corriente residual promedio, el valor máximo alcanzado es de 1.212 A, un valor muy bajo comparado con la corriente de plena carga de la máquina, 34 A.



**Figura 17.** Corriente residual promedio.

Por otro lado se llevó a cabo la medición del voltaje instantáneo de línea AB del interruptor termomagnético CB12, por medio del cual se alimentan los variadores de velocidad y se obtuvo una medición de 471.1 VAC, como se muestra en la Figura 18.



**Figura 18.** Voltaje en terminales de alimentación de variador de velocidad.

En resumen, el voltaje eficaz promedio en el que opera la máquina dobladora de lámina se encuentra dentro de las bandas de tolerancia del  $\pm 5\%$ , indicado por la tabla de datos de la máquina y  $\pm 10\%$ , indicado por la norma L0000-45 (Tabla 8).

El voltaje de alimentación medido en las terminales de los variadores de velocidad, también se encuentran dentro del rango de tolerancia del  $\pm 10\%$  indicado en el manual de instrucciones de la máquina dobladora (Tabla 8).

**Tabla 8.** Voltajes de alimentación para dobladora y variadores de velocidad.

	<b>Voltaje teórico</b>	<b>Voltaje medido</b>	<b>Rango de tolerancia</b>
<b>Dobladora</b>	460 VAC	469.50 VAC	437 - 483 VAC
<b>Variador de velocidad</b>	480 VAC	471.10 VAC	201.60 - 528 VAC

Las mediciones de THD en las terminales de alimentación de la máquina dobladora de lámina se encuentran por debajo del 8%, límite establecido por la norma L0000-45 para sistemas con tensión menor a 1 kV

El desbalance de voltaje se encuentra por debajo del 3%, límite establecido en la especificación L0000-45 para sistemas con tensión menor a 1 kV.

El valor máximo de la corriente eficaz promedio es 15 A, menor a los 34 A de corriente de plena carga.

Adicional a esto, durante el periodo de mediciones no se registraron fallos en la máquina dobladora de lámina.



## Conclusiones.

No se detectan perturbaciones en las mediciones realizadas en el periodo del 07-21 abril 2017 que pudieran causar algún daño o mal funcionamiento en los variadores de velocidad instalados en la máquina dobladora.

La falta de información ha sido otro problema afrontado, pues no se cuenta con un reporte de las fallas anteriores de esta máquina ni de los equipos dañados.

Como consecuencia de la falta de documentación de las fallas de los equipos se propone una metodología que ayude a identificar la causa raíz de los fenómenos electromagnéticos que pudieran afectar la calidad de la energía y causar daños en los equipos de producción. De igual manera, en la sección de Anexos, se proponen algunos formatos que pueden ser usados en la recolección y análisis de datos.

En caso de presentarse futuras fallas en la máquina dobladora, se recomienda documentar cada evento teniendo como guía la sección *2.1.1 Documentar las fallas de los equipos.*, esto facilitara futuros análisis de la calidad de la energía.

En caso de que se volviera a reportar alguna falla en los variadores de velocidad, se recomienda hacer mediciones en las terminales de alimentación de la máquina dobladora y de los variadores de velocidad al mismo tiempo, además de medir los siguientes parámetros: voltaje eficaz, corriente eficaz, corriente residual, desbalance de voltaje, presencia de armónicos, distorsión total armónica (THD).

Como trabajo futuro se buscará que esta metodología sea implementada por el departamento de Infraestructura en caso de detectar algún otro problema de calidad de la energía. La finalidad es obtener retroalimentación que permita mejorar este trabajo y

poder implementar esta metodología de manera estándar en las plantas de SEL SA de CV alrededor del mundo.

## Bibliografía.

- Arellano Martínez, A., Mireles Huerta, D., & Samayoa Castillo, R. d. (julio de 2011). Mejora de la confiabilidad en el edificio Valdés Vallejo de la UNAM. *Mejora de la confiabilidad en el edificio Valdés Vallejo de la UNAM*. México D.F., Edo de México, México.
- CFE. (Enero de 2005). Especificación CFE L0000-45. *Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica*. México.
- Cobas Pereira, M. F. ((s/f)). La calidad del suministro de la energía eléctrica. *La calidad del suministro de la energía eléctrica. Presentación para Power Point. Facultad de Energía Eléctrica ISPJAE*.
- Cortés, M. A. (2009). *Calidad de la Energía Eléctrica*. Puebla: Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica.
- Dugan, R. C., Mc Granaghan, M. F., Santoso, S., & Beaty, H. W. (2004). *Power Systems Quality*. Mc Graw-Hill.
- Fuchs, E. F., & Masoum, M. A. (2008). *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. AP.
- Harper, G. E. (2004). *El ABC de la calidad de la energía eléctrica*. México: Limusa.
- IEEE. (2000). *IEEE 100, The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms (Sevent Edition ed.)*. IEEE Standards Editorial.
- IEEE. (2009). *IEEE Std 1159 - 2009 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. New York: IEEE Standards Editorial.
- Jenny Preece, H. S. (2015). *Interaction Design Beyond Human-Computer Interaction*. West Sussex: WILEY.
- Kennedy, B. W. (2000). *Power Quality Primer*. New York: McGraw-Hill.
- Sankaran, C. (2002). *Power Quality*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- STÖBER. (2015). Posidrive MDS 5000. Projecting Manual.
- TRUMPF. (2007). TruBend Series 5000. Instruction Manual.
- Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente. (2008). *Calidad de la Energía Eléctrica*. Colombia.



## Anexo 1 Cuestionario.

REPORTE NO.:	FECHA Y HORA:
EQUIPO:	NO. DE IDENTIFICACIÓN DE EQUIPO:
ÁREA:	FÁBRICA:
QUIEN REPORTA:	SUPERVISOR:

**QUIEN REPORTA, RESPONDA LAS SIGUIENTES PREGUNTAS:**

1. ¿EXISTE ALGUNA CONDICIÓN CLIMATOLÓGICA ESPECIAL CUANDO OCURRIÓ LA FALLA?
2. ¿QUÉ EQUIPOS ALEDAÑOS OPERABAN CUANDO OCURRIÓ LA FALLA?
3. ¿SE PRESENTÓ ALGÚN OTRO DISTURBIO EN OTRO EQUIPO AL MISMO TIEMPO?
4. ¿QUÉ OPERACIÓN SE LLEVABA A CABO EN LA MÁQUINA CUANDO OCURRIÓ LA FALLA?
5. DESCRIBIR EL COMPORTAMIENTO DE LA MÁQUINA CUANDO FALLÓ.
6. ¿CON QUÉ RECURRENCIA HA OCURRIDO LA FALLA?

**SUPERVISOR, RESPONDA LAS SIGUIENTES PREGUNTAS:**

7. ¿LA FALLA DEL EQUIPO RETRASA LA ENTREGA DEL PRODUCTO AL SIGUIENTE PROCESO?
8. ¿POR CUÁNTO TIEMPO SE RETRASA LA ENTREGA DEL PRODUCTO AL SIGUIENTE PROCESO?
9. ¿LA FALLA DEL EQUIPO REPRESENTA ALGUNA AFECTACIÓN ECONÓMICA?
10. ¿CUÁL ES EL MONTO, EN MONEDA NACIONAL, DE ESTA AFECTACIÓN ECONÓMICA?
11. ¿LA FALLA DEL EQUIPO AFECTA LA CALIDAD DEL PRODUCTO?
12. ¿CUÁLES SON LOS COMPONENTES DE LA MÁQUINA, QUE SUFRIERON DAÑADOS (FUENTE DE ALIMENTACIÓN, VARIADORES DE VELOCIDAD, ETC.)?
13. SI EL COMPONENTE DAÑADO FUE ENVIADO A REPARACIÓN SE DEBERÁ SOLICITAR AL TÉCNICO DE SERVICIO UN REPORTE DETALLADO DEL DISPOSITIVO DAÑADO EN EL QUE SE LISTEN LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS AFECTADOS.



## Anexo 2 Registro de eventos.

EQUIPO:		NO. DE IDENTIFICACIÓN DE EQUIPO:			
ÁREA:		FÁBRICA:			
FECHA	HORA	TIPO DE DISTURBIO	MAGNITUD Y DURACIÓN	¿REBASA LÍMITES ESTABLECIDOS EN ESTÁNDAR?	EQUIPOS ALEDAÑOS AFECTADOS





### Anexo 3 Plan de implementación.

<b>NOMBRE DEL PROYECTO:</b>					
<b>AREA DE IMPLEMENTACIÓN:</b>					
<b>FÁBRICA:</b>					
<b>NO.</b>	<b>ACTIVIDAD</b>	<b>RESPONSABLE</b>	<b>FECHA CUMPLIMIENTO</b>	<b>PORCENTAJE DE AVANCE</b>	<b>ESTATUS</b>