

# Uso de la metodología causa-raíz para la mejora y diagnóstico en tableros eléctricos de baja tensión

1<sup>st</sup> Alejandro Zaleta-Aguilar  
Departamento de Ingeniería  
Mecánica  
Universidad de Guanajuato  
Salamanca, Gto., México  
azaleta@ugto.mx

2<sup>nd</sup> David Aarón Rodríguez-  
Alejandro  
Departamento de Ingeniería  
Mecánica  
Universidad de Guanajuato  
Salamanca, Gto., México  
da.rodriguez@ugto.mx

3<sup>rd</sup> Sergio Adrián Gamez  
Arredondo  
Departamento de Ingeniería  
Mecánica  
Universidad de Guanajuato  
Salamanca, Gto., México  
sa.gamez@hotmail.com

4<sup>th</sup> Donni González Soria  
Departamento de Ingeniería  
Eléctrica  
Universidad de Guanajuato  
Salamanca, Gto., México  
d.gonzalezsoria@ugto.mx

**Abstract—** En este apartado se mostrará un breve resumen de la aplicación del procedimiento especializado la instrumentación, las mediciones y como se emplearon éstas para la detección de problemas eléctrico y la utilidad para generar una propuesta de solución a estos problemas por medio de la metodología.

Se resume a grandes rasgos la problemática detectada, las instalaciones industriales a las que se aplicará el procedimiento, el uso de la instrumentación, los resultados encontrados del análisis en campo, y las propuestas para mejorar el comportamiento eléctrico y/o soluciones técnicas.

## Introduction (Heading 1)

En todo el mundo se ha ejercido un esfuerzo por generar soluciones eficientes el cual permita tener sistemas más eficientes y que reduzcan costos tanto de mantenimiento como de operación, y por consecuencia que se reduzcan emisiones de gases de invernadero.

Para lograr este fin en energía eléctrica es requerido mantener ciertos niveles en los parámetros eléctricos tales como nivel de tensión, perturbaciones en las señales eléctricas y factor de potencia. Organismos como *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), *International Electrotechnical Commission* (IEC) y la misma Comisión Federal de Electricidad (CFE) han redactado especificaciones y normas que proporcionan los límites para las variaciones de las señales eléctricas, de manera que los datos siempre se mantengan dentro de valores operativos óptimos.

El término de calidad de la energía se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracteriza la tensión y corriente en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia [1]. Se pueden clasificar de distintas maneras tales como fenómeno conducido a baja frecuencia, fenómeno radiado en baja frecuencia, fenómeno conducido en alta frecuencia, fenómeno radiado en alta frecuencia, fenómeno de descarga electrostática y pulso nuclear electromagnético [1]. Así mismo también es posible clasificarlos como transitorios, corta duración, variaciones de rms de larga duración, desbalance, distorsión en las formas de onda, fluctuaciones en la tensión y variaciones en la frecuencia de la potencia [1].

Aunque en [1] el factor de potencia no es considerado como un problema de calidad de energía, juega un papel importante dentro del análisis de infraestructura eléctrica, en México contar con un factor de potencia bajo amerita una penalización en el cobro de la factura eléctrica [2], esto se debe a que a la empresa que genera eléctrica y lleva a cabo la transmisión y distribución le genera más costos de operación y mantenimiento. Típicamente para reducir el factor de potencia se emplean equipos como bancos de capacitores y variadores de frecuencia, sin embargo, llevar a cabo la implementación de estos equipos puede llegar a ser contraproducente debido que generan problemas con la calidad de la energía tal y es explicado en [3].

Como se menciona en [3] desde que se inició a emplear equipos de control digitales en la industria, las redes eléctricas se han visto afectadas a contaminación no deseada, en un entorno industrial no solo hay equipos eléctricos sino también hay sistemas de comunicación, equipos de cómputo, sistemas de seguridad, el cual son sensibles a estos fenómenos y pueden llegar a dañar dichos equipos.

Se han llevado a cabo estudios y experimentaciones de métodos y técnicas para aumentar el factor de potencia y mitigar los problemas secundarios que se generan como transitorios y armónicos. En [4] se lleva a cabo la corrección de desbalance, filtrado de armónicos en un transformador, para lograrlo se implementó un filtro de potencia activo que en conjunto del algoritmo empleado se logró compensar los problemas con la energía eléctrica. Otras aplicaciones similares son empleadas, en [5] se mitiga el fenómeno de armónicos y se corrige el factor de potencia generado tanto por la carga eléctrica y el que es causado debido a los armónicos por medio de filtros RLC controlados, controlar el filtro permite corregir el factor de potencia y reducir los armónicos. Para la conmutación del filtro se emplea la técnica de activación por cero (0 V), sin embargo, generan *notches*, el cual son mitigados por medio de un reactor.

Algunos otros métodos son empleados para corregir los problemas de la energía como emplear rectificadores controlados como se lleva a cabo en [6], también se emplean sistemas reversibles el cual compensan armónicos y corrigen factor de potencia por medio de rectificadores y electrónica de potencia como se lleva a cabo en [7], o bien se generan sumideros y se emplea convertidores *boost* para lograr un

desacoplamiento entre líneas de corriente alterna y corriente directa con el que se logra corregir el factor de potencia y no generar armónicos, esta técnica es empleada en [8].

En los casos previos es conocido el problema relacionado con la calidad de energía, con base al problema es que se propone la solución, se lleva a cabo la simulación y la experimentación, sin embargo, cada instalación eléctrica es un caso particular y los problemas que puede presentar son distintos por el tipo de máquinas, los métodos de accionamiento, la cantidad de cargas monofásicas, métodos de compensación utilizados, entre otras variables que puedan afectar la calidad de la energía, el cual es necesario llevar a cabo un análisis particular.

En México el principal motivo para solicitar un estudio de calidad de energía es para reducir costos en la facturación de la energía eléctrica, o bien, compensar el factor de potencia en el que se tiene un valor bajo.

En la planta Whirlpool Celaya se lleva a cabo la manufactura de estufas, lavadoras y refrigeradores, la planta cuenta con áreas como almacén, galvanoplastia, manufactura, esmaltado y ensamble, entre otras, donde se cuenta oficinas donde laboral administrativos y el departamento de ingeniería.

Se llevó a cabo un estudio del factor de potencia implementando un método de causa raíz en las áreas de ensamble de estufas y manufactura en el cual se encuentran diversas máquinas eléctricas y equipos de control como variadores de frecuencia, en el que dados los equipos puede presentarse problemas con armónicos en tensión y corriente.

## I. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y ARREGLO

Para llevar a cabo las mediciones eléctricas se empleó un registrador de datos de la marca Fluke y modelo 1735, el cual permite medir parámetros eléctricos tales como tensión, corriente, formas de onda, armónicos y energía. Dado que a la empresa le era de suma importancia conocer su factor de potencia en estas áreas.

En la Figura 1 se muestra el unifilar que comprende la subestación a medir, la subestación cuenta con una celda de interrupción de corriente aislada con aire y cuchillas de 10 a, el transformador de voltaje se conecta a la red principal en delta y se obtiene un voltaje trifásico en estrella a una tensión de línea de 220 v. En el lado de baja se lleva a cabo la medición de corriente y tensión, inmediatamente del punto de medición local cuenta con un interruptor termomagnético para llevar a cabo la distribución de energía.

Debido a limitaciones del equipo y requerimientos por parte del cliente, las mediciones eléctricas se llevaron a cabo en el lado de baja tensión en el punto indicado en *Figura 1*.

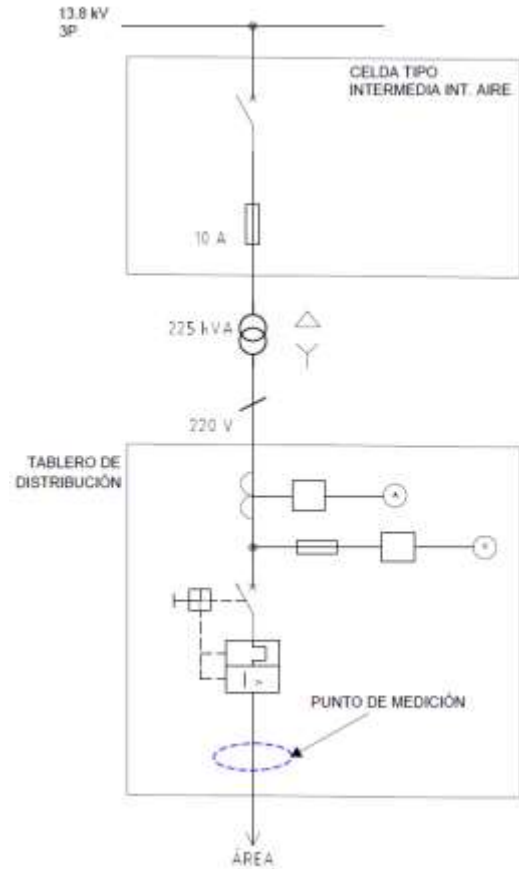


FIGURA 1. DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL DE LA SUBESTACIÓN.

## II. IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO

Para llevar a cabo las mediciones eléctricas se siguieron las recomendaciones dictadas en [9].

Las mediciones en cada tablero eléctrico se realizaron durante una semana las veinticuatro horas de manera continua, de tal manera que se obtenga un comportamiento general de todo el sistema.

Debido a que en el secundario del transformador entrega un voltaje trifásico en estrella, por lo que también es necesario considerar la medición en el neutro, el diagrama de conexión del equipo se llevó a cabo conforme a lo que se indica en la Figura 2.

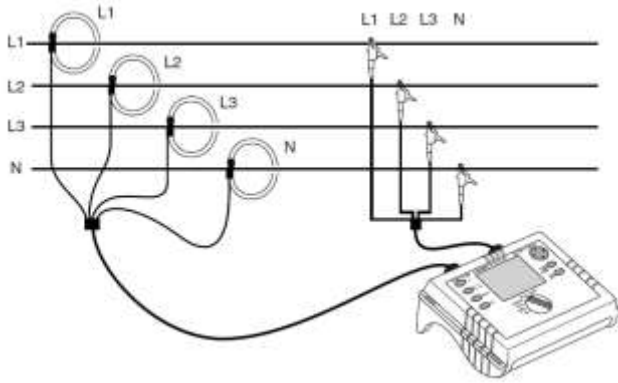


FIGURA 2. DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN.

El promediado de las mediciones el equipo se configura para que se lleven a cabo cada 5 minutos, con esta configuración el equipo obtiene los valores mínimos, promedio y máximos de las variables físicas, además, puede monitorear y almacenar información por 15 días.

Se conecta a la línea eléctrica de manera que la alimentación de la batería sirva como una alimentación de respaldo.

### III. MEDICIONES ELÉCTRICAS

Dado que los equipos de medición cuentan con poca memoria de almacenamiento estos guardan datos mínimos, promedio y máximos de las variables eléctrica.

Para este fin se considera los valores cuadráticos medios (o rms por sus siglas en inglés) verdadero el cual considera la distorsión armónica de las señales eléctrica.

$$v_{rms} = V = \sqrt{\frac{1}{T} \int (v)^2 dt} \quad (1)$$

$$i_{rms} = I = \sqrt{\frac{1}{T} \int (i)^2 dt} \quad (2)$$

Mientras que el valor de potencia activa y reactiva se obtiene mediante las siguientes expresiones:

$$P = \sum_{k=h}^{50} V_k I_k \cos(\phi_k) \quad (3)$$

$$Q = \sum_{k=h}^{50} V_k I_k \sin(\phi_k) \quad (4)$$

Donde h se refiere al orden del armónico.

Para obtener el cálculo de potencia aparente se obtiene mediante el producto de las mediciones de tensión y corriente:

$$S = VI \quad (5)$$

Mientras que el factor de potencia se obtiene con el cálculo:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (6)$$

En la Tabla 1 se muestran las mediciones globales del tablero eléctrico ubicado en el área de ensamble de estufas, la tabla muestra los valores mínimos, promedio y máximos de los días que el equipo estuvo midiendo de las variables eléctricas.

TABLA 1. MEDICIONES GLOBALES DEL TABLERO EN ÁREA DE ENSAMBLE.

Parámetro	Unidad	Línea	Mínimo	Promedio	Máximo
Tensión	V	L1-N	116.83	130.37	136.75
		L2-N	122.08	131.38	137.70
		L3-N	122.53	131.26	137.85
Corriente	A	L1	76.91	134.01	209.73
		L2	100.77	157.16	258.00
		L3	124.50	156.82	183.55
		N	0.41	2.01	7.23
Frecuencia	Hz	-	59.81	59.99	60.14
Potencia real	W	L1-N	2820.00	8710.99	24780.00
		L2-N	1800.00	9788.41	27480.00
		L3-N	2760.00	9488.61	23670.00
Potencia reactiva	VARs	L1-N	-17790.00	-14467.30	-12807.12
		L2-N	-22200.00	-17279.91	-15381.38
		L3-N	-21450.00	-17689.54	-15923.67
Factor de potencia	-	L1-N	0.17	0.49	1.00
		L2-N	0.10	0.46	1.00
		L3-N	0.13	0.46	0.97
Tensión THD	%	L1-N	0.20	1.09	3.00
		L2-N	0.50	1.18	3.70
		L3-N	0.10	1.08	3.60
Corriente THD	%	L1	4.10	11.54	27.40
		L2	5.00	13.05	29.00
		L3	3.20	10.90	28.20
		N	15.50	59.42	99.90

Los parámetros de distorsión armónica, el equipo implementa el siguiente cálculo:

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{25} V_k^2}}{V_1} \times 100 \% \quad (7)$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{25} I_k^2}}{I_1} \times 100 \% \quad (8)$$

Los datos medidos deben ser comparados con los datos recomendados por la norma IEEE Std. 519 y la especificación CFE L0000-45, el cual establece que se debe comparar con la demanda total de distorsión (TDD) en el caso de armónicos en la corriente. Este se obtiene mediante el procedimiento indicado por documento digital [10], donde:

$$TDD = \frac{\sqrt{h_a^2 + h_b^2 + h_c^2}}{I_{rms\ max}} \quad (9)$$

TABLA 2. MEDICIONES GLOBALES DEL TABLERO EN ÁREA DE MANUFACTURA.

Parámetro	Unidad	Línea	Mínimo	Promedio	Máximo
Tensión	V	L1-N	183.82	257.71	272.46
		L2-N	225.06	256.74	272.18
		L3-N	237.06	258.12	273.38
Corriente	A	L1	51.41	206.98	602.73
		L2	52.23	207.52	607.36
		L3	51.68	210.47	611.18
		N	0.00	0.00	0.27
Frecuencia	Hz	-	59.81	59.99	60.19
Potencia real	W	L1-N	130.91	44725.01	138698.19
		L2-N	327.27	45169.50	139090.91
		L3-N	65.46	45744.86	140334.55
Potencia reactiva	VARs	L1-N	- 41563.64	13462.60	131694.55
		L2-N	- 39992.73	13002.93	131367.27
		L3-N	- 40843.64	14004.97	133461.81
Factor de potencia	-	L1-N	0.00	0.83	1.00
		L2-N	0.01	0.84	1.00
		L3-N	0.00	0.84	1.00
Tensión THD	%	L1-N	0.00	0.80	5.00
		L2-N	0.00	0.75	5.00
		L3-N	0.00	0.73	5.20
Corriente THD	%	L1	0.20	5.72	99.90
		L2	0.40	5.31	99.80
		L3	0.40	5.52	99.80

En la Tabla 2 se muestra los valores mínimos, promedio y máximos que comprenden las mediciones en el tablero ubicado en el área de manufactura, estas mediciones corresponden a los días que se llevó a cabo la medición. Como se puede observar en ambas tablas, existe un problema con el parámetro de factor de potencia.

#### IV. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ

En esta planta se solicitó y facilitó el análisis de mediciones, originalmente debido a un costo de facturación de energía eléctrica elevada siendo el problema principal. Se empleó un análisis de causa raíz para determinar el origen de la falla.

El método empleado fue Análisis de cambios cuyo procedimiento es descrito en [11], para ello se describió el evento con consecuencias no deseables y el evento con consecuencias deseables, se lleva a cabo la comparación, se identifican las diferencias y se lleva a cabo el análisis de estas diferencias.

#### V. EVENTO CON CONSECUENCIAS DESEABLES

Se lleva a cabo la producción y manufactura de línea blanca con un consumo de energía eléctrica moderada, en el que los parámetros de tensión y corriente sufren variaciones y perturbaciones mínimas, además de mantener estable el factor de potencia en 0.9.

Para que esta condición se cumpla es necesario que los parámetros mostrados en la tabla tengan los valores presentados.

TABLA 3. CONDICIONES IDEALES.

Parámetro	Valor
<b>Factor de Potencia</b>	0.9
<b>THF en tensión [%]</b>	0
<b>THF en corriente [%]</b>	0

#### VI. EVENTO CON CONSECUENCIAS NO DESEABLES

Se lleva a cabo la producción y manufactura de línea blanca con un consumo de energía eléctrica elevada, en el que los parámetros de tensión y corriente sufren variaciones y perturbaciones, además el factor de potencia tiene un valor menor a 0.9.

En la Tabla 4 se muestra la comparativa de datos entre el evento con consecuencias deseadas y el evento con consecuencias no deseadas del tablero ubicado en el área de ensamble.

TABLA 4. COMPARATIVA DE ENTRE VALORES DESEADOS Y VALORES MEDIDOS DEL TABLERO EN ÁREA DE ENSAMBLE.

Parámetro	Valor deseado	Valor medido
Factor de potencia en L1-N	0.9	0.49
Factor de potencia en L2-N	0.9	0.46
Factor de potencia en L3-N	0.9	0.46
THD de tensión L1-N [%]	0	1.09
THD de tensión L2-N [%]	0	1.18
THD de tensión L3-N [%]	0	1.08
THD de corriente L1 [%]	0	11.54
THD de corriente L2 [%]	0	13.05
THD de corriente L3 [%]	0	10.09

En la Tabla 5 se muestra la comparativa de datos entre el evento con consecuencias deseadas y el evento con consecuencias no deseadas del tablero ubicado en el área de manufactura.

TABLA 5. COMPARATIVA DE ENTRE VALORES DESEADOS Y VALORES MEDIDOS DEL TABLERO EN ÁREA DE MANUFACTURA.

Parámetro	Valor deseado	Valor medido
Factor de potencia en L1-N	0.9	0.83
Factor de potencia en L2-N	0.9	0.84
Factor de potencia en L3-N	0.9	0.84
THD de tensión L1-N [%]	0	0.79
THD de tensión L2-N [%]	0	0.75
THD de tensión L3-N [%]	0	0.72
THD de corriente L1 [%]	0	5.71
THD de corriente L2 [%]	0	5.30
THD de corriente L3 [%]	0	5.52

## VII. IDENTIFICACIÓN DE DIFERENCIAS

Como se puede observar en la Tabla 4 los datos que tienen una variación considerable son los datos de factor de potencia y los datos de factor distorsión armónica total en corriente, mientras que en la TABLA 5 se puede observar que la mayor diferencia se encuentra en los valores de distorsión armónica total en corriente.

Se describe en que consiste el procedimiento de implementación de sistemas híbridos, las partes principales que conforman este procedimiento. La información se analiza observando la evolución temporal, la principal desventaja de

los datos globales es que no siempre se puede observar el comportamiento y sobre todo periodos en los que el fenómeno se presenta, sin embargo, ayudan a identificar posibles problemas.

## VIII. TABLERO EN ENSAMBLE FINAL

En la Figura 3 y Figura 4 se muestran los valores máximos y mínimos, respectivamente, registrados en el periodo de medición, en la gráfica se muestran los límites que recomienda IEEE en Std 1159.

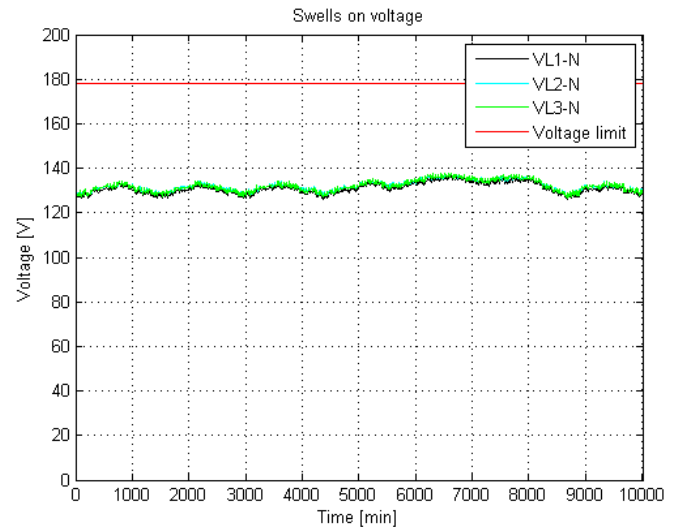


FIGURA 3. VALORES MÁXIMOS DE TENSIÓN Y LÍMITES DE VALORES MÁXIMOS EN TABLERO EN ENSAMBLE FINAL.

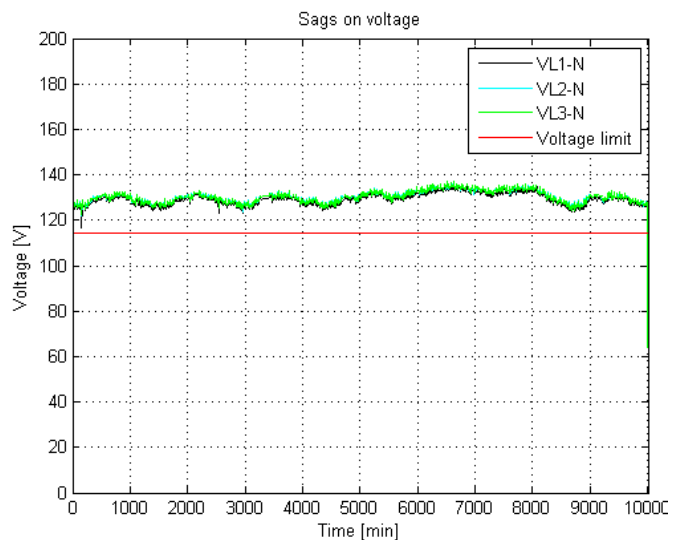


FIGURA 4. VALORES MÁXIMOS DE TENSIÓN Y LÍMITES DE VALORES MÍNIMOS EN TABLERO EN ENSAMBLE FINAL.

Otros parámetros de importancia el comportamiento tanto de la potencia activa como de la potencia, en la Figura 5 y Figura 6 se muestra el comportamiento de la potencia activa y potencia reactiva, respectivamente.

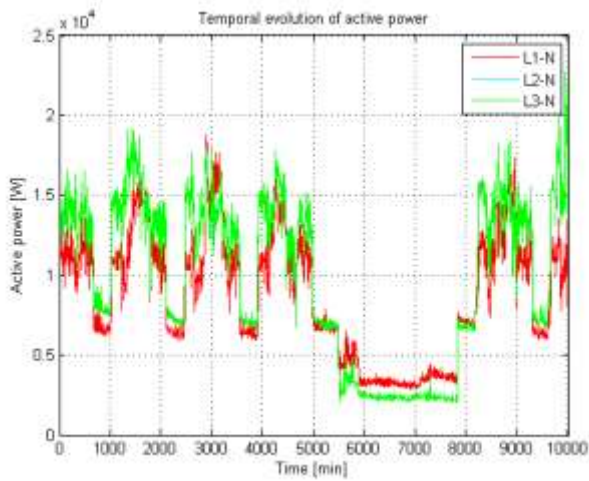


FIGURA 5. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA POTENCIA ACTIVA DEL TABLERO EN ENSAMBLE FINAL.

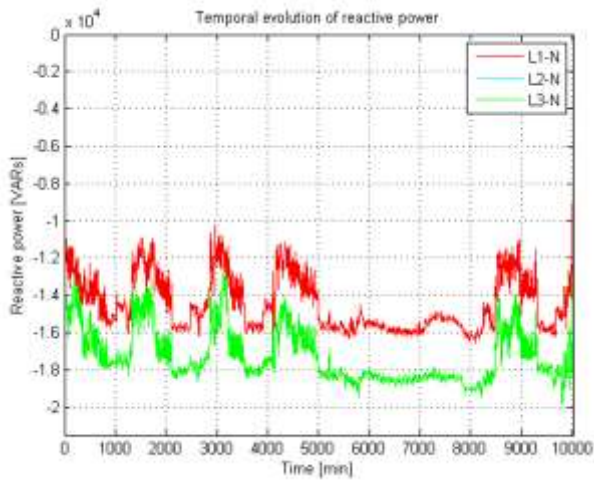


FIGURA 6. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA POTENCIA REACTIVA DEL TABLERO EN ENSAMBLE FINAL.

En la Figura 7 se muestra el comportamiento temporal del factor de potencia por cada fase, así como el valor requerido para no tener penalización por parte de CFE.

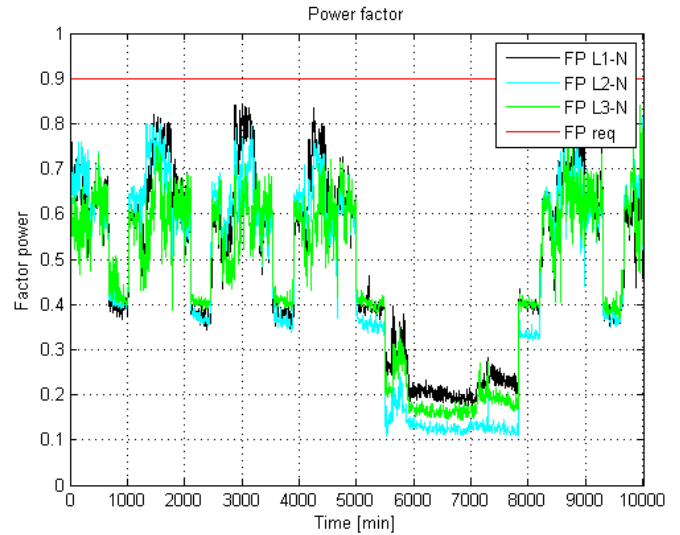


FIGURA 7. COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA EN EL TABLERO EN ENSAMBLE FINAL.

Como es posible observar en la figura previa, el factor de potencia es bajo debido a que la mayor parte del tiempo existe una potencia reactiva elevada el cual se puede observar en la Figura 5 y Figura 6, de igual manera en los valores de la potencia reactiva es con signo negativo el cual representa que la fuente de alimentación observa que la carga conectada es capacitiva.

Adicionalmente, se llevó a cabo el análisis de los datos armónicos. En la Figura 8 se muestra la evolución temporal del THD en tensión para cada línea, mientras que en la Figura 9 se muestra la evolución temporal de TDD en la corriente.

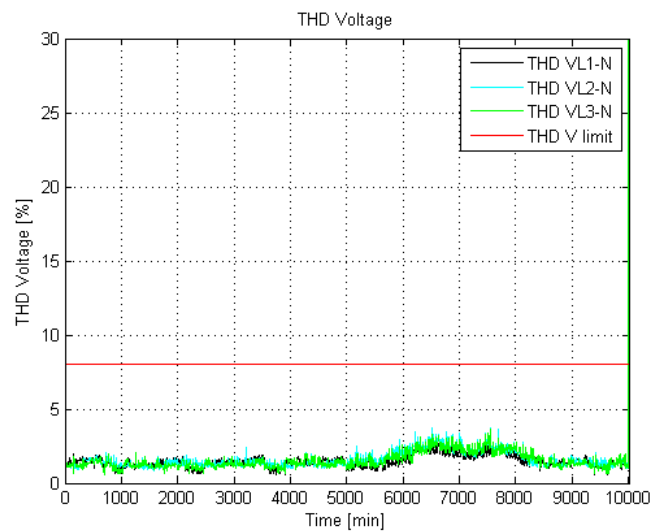


FIGURA 8. COMPORTAMIENTO DEL VALOR THD EN VOLTAJE EN TABLERO EN ENSAMBLE FINAL.



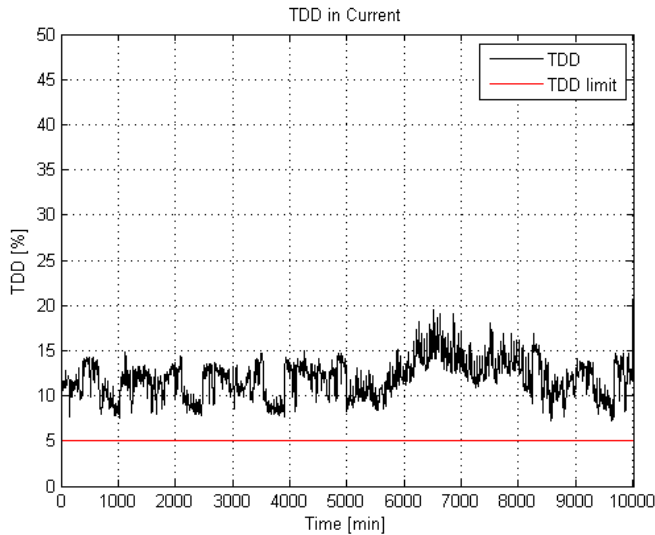


FIGURA 9. COMPORTAMIENTO DE TDD DE LA CORRIENTE EN TABLERO EN ENSAMBLE FINAL.

Como se puede observar en la Figura 8 y Figura 9, el consumo de corriente elevado no es una consecuencia de variación del voltaje o al menos no de manera directa, como también se pudo observar en la Tabla 1, el efecto de la variación de tensión es poca por lo que el consumo elevado no se ve impactado de gran manera.

Una segunda posibilidad de un consumo eléctrico es el factor de potencia global que el sistema eléctrico observa, como se puede observar en la Figura 7 existen fluctuaciones en el que el factor de potencia el cual en periodos de tiempo prolongados disminuye hasta 0.4, y en ocasiones es afectado aún más debido a que el factor disminuye aún más hasta 0.2 este intervalo comprende un fin de semana en el que la planta no opera esa área. En días y horas productivos, el factor de potencia aumenta a 0.8 aproximadamente, el cual aún sigue siendo un valor el cual amerita penalización.

En las Figura 8 y Figura 9 se muestra el comportamiento evolutivo del THD de tensión y el TDD de corriente, respectivamente, y sus límites indicados por IEEE Std 519. En la tensión se encuentra dentro de los límites recomendados, sin embargo, los valores de TDD en la corriente se encuentra fuera de los límites recomendados.

## IX. TABLERO EN MANUFACTURA

En la Figura 10 y Figura 11 se muestra la evolución temporal del comportamiento de la tensión máxima de línea y tensión mínima de línea, así como los límites recomendados para determinar si hubo presencia de swells o sags.

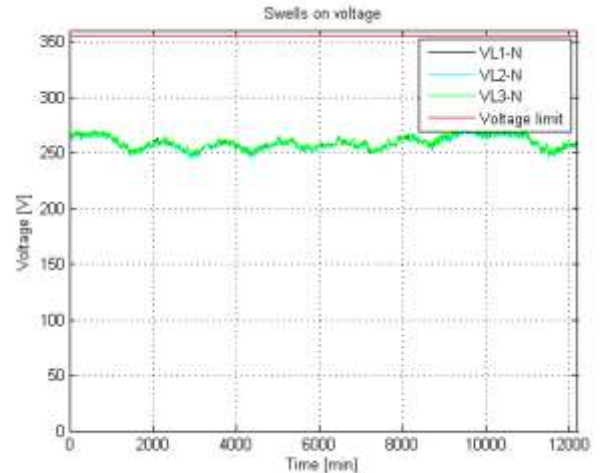


FIGURA 10. VALORES MÁXIMOS DE TENSIÓN Y LÍMITES DE VALORES MÁXIMOS EN TABLERO EN MANUFACTURA.

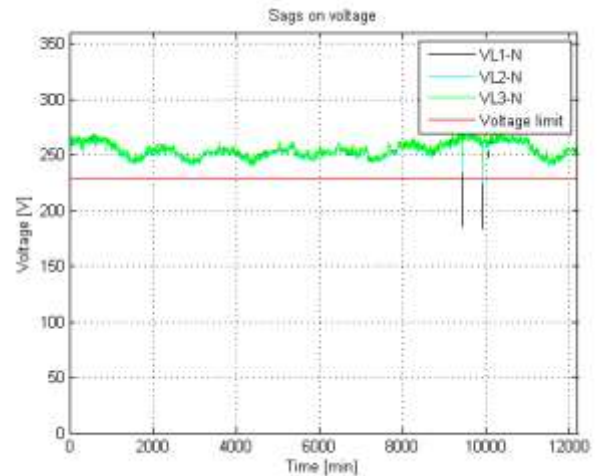


FIGURA 11. VALORES MÁXIMOS DE TENSIÓN Y LÍMITES DE VALORES MÍNIMOS EN TABLERO EN MANUFACTURA.

Como se puede observar en la Figura 11 no hubo sobretensiones, sin embargo, si hubo presencia de sags en dos ocasiones, pero no fue un fenómeno periódico como se puede observar el comportamiento en la mayor parte del tiempo se encuentra dentro de los límites recomendados.

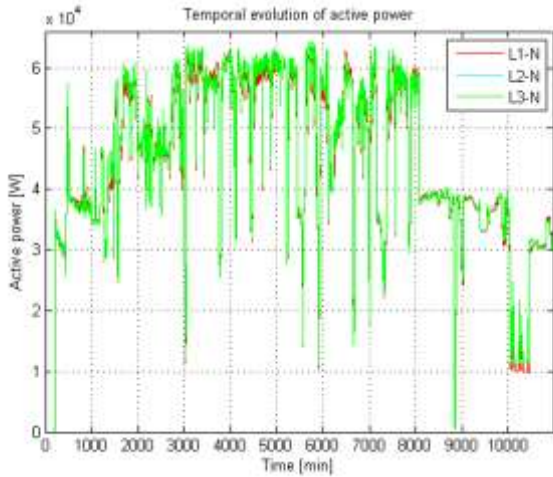


FIGURA 12. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA POTENCIA ACTIVA DEL TABLERO EN MANUFACTURA.

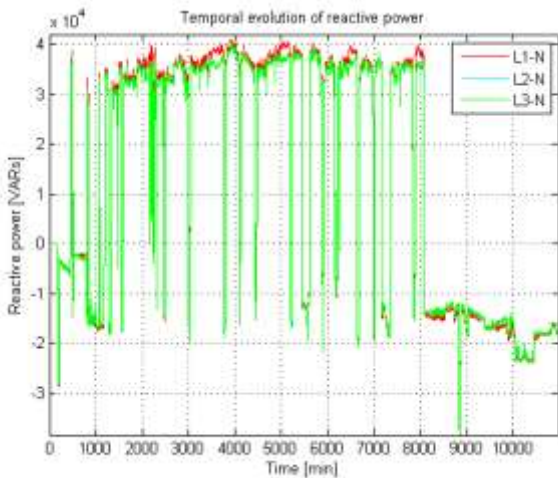


FIGURA 13. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA POTENCIA REACTIVA DEL TABLERO EN MANUFACTURA.

En la Figura 14 se muestra el comportamiento del factor de potencia en el tiempo, típicamente el valor del factor de potencia tiende a estar en aproximadamente 0.8 y en algunas ocasiones hasta por arriba del valor requerido.

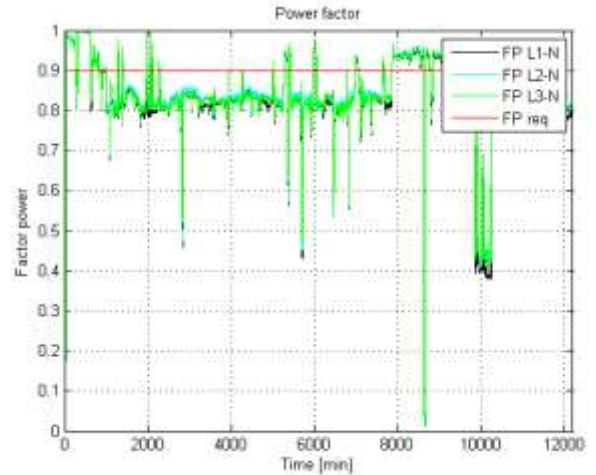


FIGURA 14. COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA EN EL TABLERO EN MANUFACTURA.

De la Figura 12, Figura 13 y Figura 14 se puede observar que el problema con el factor de potencia es bajo en la mayor parte del tiempo, sin embargo, se puede observar que tanto la potencia activa como la potencia reactiva comparten un comportamiento similar y se ve reflejado en el factor de potencia. En este caso la mayor parte del tiempo es una carga inductiva y en muy pequeños intervalos de tiempo esta carga se vuelve capacitiva, sobre todo en días no laborales para esta área.

Se lleva a cabo el análisis de distorsión armónica, en la Figura 15 se muestra el THD en voltaje, mientras que en la Figura 16 se muestra el TDD en corriente.

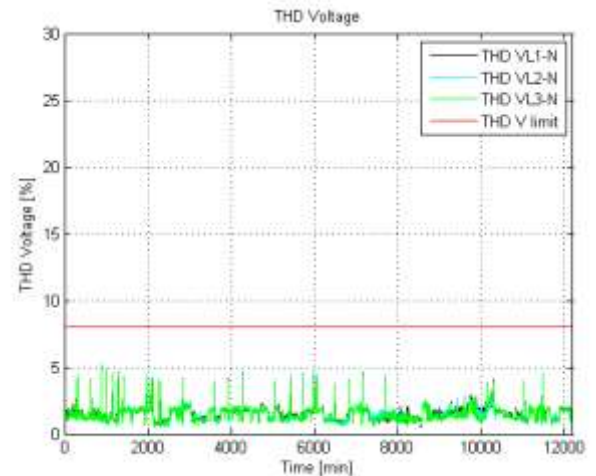


FIGURA 15. COMPORTAMIENTO DEL VALOR THD EN VOLTAJE EN TABLERO DE MANUFACTURA.



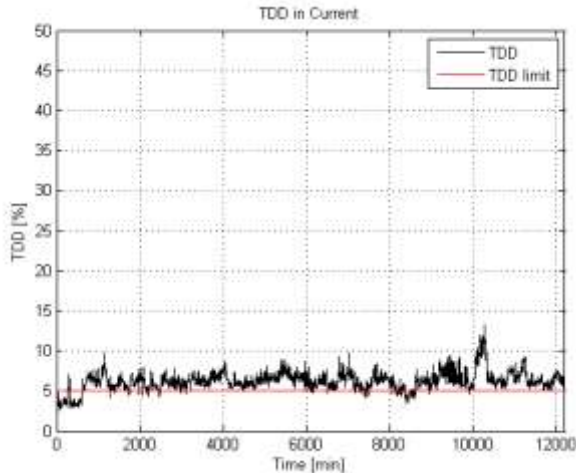


FIGURA 16. COMPORTAMIENTO DE TDD DE LA CORRIENTE EN TABLERO DE MANUFACTURA.

Como se puede observar el alto consumo de corriente, no se debe a reducción del nivel de tensión, sin embargo, se puede observar que cuando se producen los dos eventos de disminución de tensión el factor de potencia se ve alterado.

El análisis preliminar de armónicos muestra que la perturbación en tensión se encuentra dentro de valores aceptados de distorsión, mientras que el valor de TDD en la mayor parte del tiempo se encuentra fuera del límite recomendado.

## X. PROPUESTAS DE MEJORAS EN LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA

Dado que en las dos áreas existe una diferencia entre equipos y máquinas instaladas, para cada subestación es necesario aplicar distintas soluciones que permitan mitigar el principal problema sin que se vea afectado otros fenómenos físicos.

En el tablero ubicado en el área de ensamble final es importante verificar las cargas conectadas y con base al levantamiento se pueda ubicar aquellas sobrecompensaciones de factor de potencia (capacitores) el cual se encuentran conectados a la red eléctrica, por lo que el problema en su mayor parte debería quedar resuelto una vez que se añada y/o modifique la manera de conmutación de estos compensadores de factor de potencia.

Por otro lado, los valores de TDD en todo tiempo se encuentran fuera de los límites establecidos por la norma IEEE Std. 519 y la especificación CFE L0000-45, sin embargo, para determinar acciones concretas es importante llevar a cabo un análisis exclusivo de armónicos. Debido al área en la que se encuentra el tablero es posible que estas

distorsiones se deban al funcionamiento de variadores de frecuencia.

En el caso del tablero instalado en el área de manufactura, la mayor parte de máquinas son eléctricas que funcionan de manera continua, algunas otras cuentan con un accionamiento neumático por lo que la carga eléctrica es un motor o motores que funcionan de manera intermitente.

Como se puede observar en la Figura 12 se muestra que el comportamiento de potencia activa es caótico, esto indica que hay equipos los cuales son conmutados.

En intervalos de tiempo decrece el valor de potencia activa, sin embargo, cada vez que la potencia activa la potencia reactiva también lo hace, sin embargo, en las mediciones se puede observar que cuando las cargas que son conmutadas, la potencia reactiva se vuelve negativa indicando que hay una sobrecompensación con capacitores. Entre las mejoras que se pueden implementar es conmutar capacitores solo cuando es requerido, renovar equipos de compensación y llevar a cabo un análisis de armónicos.

## XI. MODELO MATEMÁTICO

Los tableros son sistemas eléctricos trifásicos y su circuito equivalente se puede representar por medio del circuito de la Figura 17.

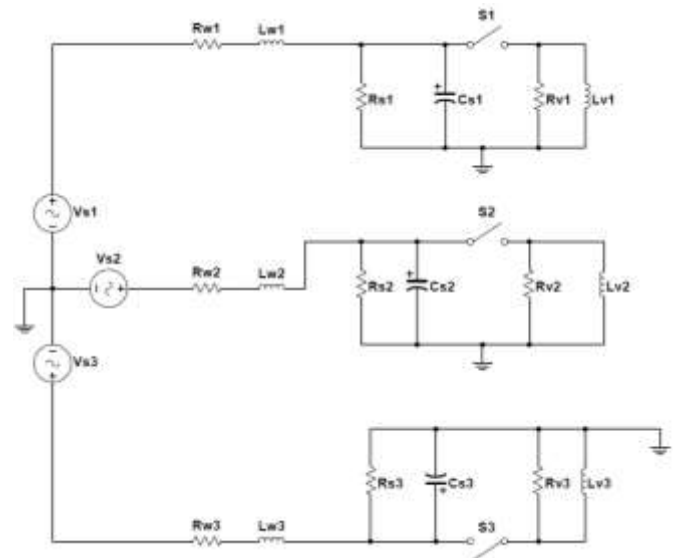


FIGURA 17. CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DE LOS TABLEROS.

Para el análisis de los tableros se considera circuitos RLC equivalentes, por este motivo se lleva a cabo análisis de un circuito eléctrico RLC por cada fase. Para este fin se consideran cuatro casos, el primer caso se considera el estado

actual con cargas estáticas, el segundo caso considera el estado actual con cargas variables y estáticas, el tercer caso muestra el estado de la mejora con cargas estáticas, mientras que el último caso muestra el estado con la mejora con cargas estáticas y variables.

Caso 1: Circuito con cargas estáticas, sin la mejora implementada

El modelo del caso 1 describe el circuito RLC de la Figura 18.

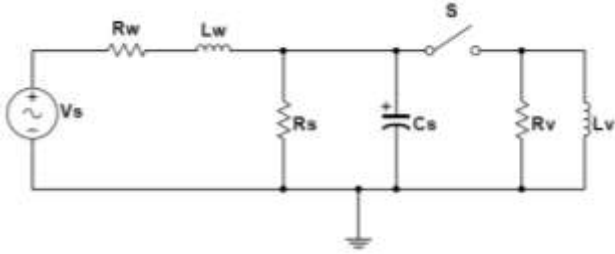


FIGURA 18. CIRCUITO EQUIVALENTE CASO 1.

Para su análisis se obtiene la función de transferencia del sistema en el que la corriente de línea es la respuesta del sistema y la señal de entrada es la tensión de fase. En todos los casos se considera que tanto capacitores e inductores no están cargados.

$$\frac{I_{S\phi}(s)}{V_{S\phi}(s)} = \frac{as + b}{As^2 + Bs + C} \quad (10)$$

Donde:

$$a = R_s C_s \quad (11)$$

$$b = 1 \quad (12)$$

$$A = R_s L_w C_s \quad (13)$$

$$B = R_s R_w C_s + L_w \quad (14)$$

$$C = R_w + R_s \quad (15)$$

Caso 2: Circuito con cargas estáticas y variables, sin la mejora implementada

El modelo del caso 2 describe el circuito RLC de la Figura 19.

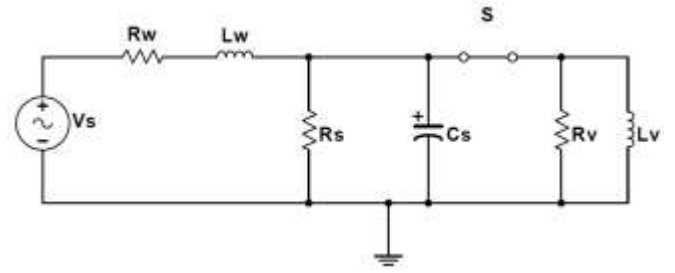


FIGURA 19. CIRCUITO EQUIVALENTE CASO 2.

En donde su modelo matemático queda representado con las siguientes funciones:

$$\frac{I_{S\phi}(s)}{V_{S\phi}(s)} = \frac{as^2 + bs + c}{As^3 + Bs^2 + Cs + D} \quad (16)$$

Donde:

$$a = R_s R_v C_s L_v \quad (17)$$

$$b = L_v (R_s + R_v) \quad (18)$$

$$c = R_s R_v L_v \quad (19)$$

$$A = R_s R_v C_s L_v L_w \quad (20)$$

$$B = L_v (R_s R_v R_w + L_w R_v + L_w R_s) \quad (21)$$

$$C = R_v R_w L_v + R_s R_w L_v + R_s R_v L_w + R_s R_v L_v \quad (22)$$

$$D = R_s R_v R_w \quad (23)$$

Caso 3: Circuito con cargas estáticas, con la mejora implementada

El modelo del caso 3 describe el circuito RLC de la Figura 20.

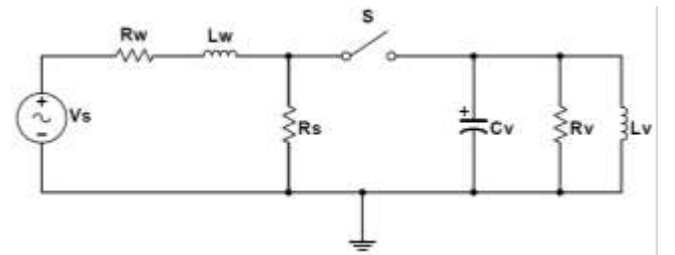


FIGURA 20. CIRCUITO EQUIVALENTE CASO 3.

En donde su modelo matemático queda representado con las siguientes funciones:

$$\frac{I_{S\phi}(s)}{V_{S\phi}(s)} = \frac{1}{As + B} \quad (24)$$

Donde:

$$A = L_w \quad (25)$$

$$B = R_s + R_w \quad (26)$$

Caso 4: Circuito con cargas estáticas y variables, con la mejora implementada, el modelo describe el circuito RLC de la Figura 21.

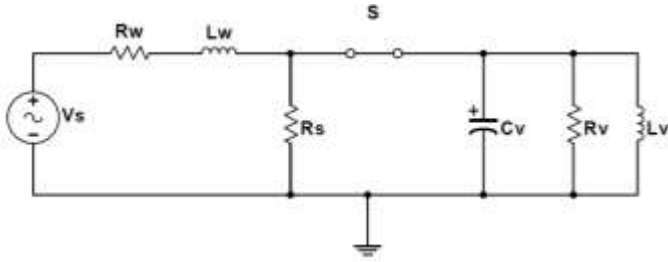


FIGURA 21. CIRCUITO EQUIVALENTE CASO 4.

En donde su modelo matemático queda representado con las siguientes funciones:

$$\frac{I_{S\phi}(s)}{V_{S\phi}(s)} = \frac{as^2 + bs + c}{As^3 + Bs^2 + Cs + D} \quad (27)$$

$$R_e = \frac{R_s R_v}{R_s + R_v} \quad (28)$$

Donde:

$$a = R_e C_v L_v \quad (29)$$

$$b = L_v \quad (30)$$

$$c = R_e \quad (31)$$

$$A = R_e C_v L_v L_w \quad (32)$$

$$B = L_v (R_e R_w C_v + L_w) \quad (33)$$

$$C = R_e L_v + R_w L_v + R_e L_w \quad (34)$$

$$D = R_w + R_e \quad (35)$$

Los modelos matemáticos previos deben ser replicados para cada fase y con sus valores particulares.

## XII. TABLERO EN ENSAMBLE FINAL

Con la información medida el sistema y considerando el caso 1 y caso 2 como horario no operativo y operativo, respectivamente, se puede llevar a cabo la simulación del estado actual. En la Tabla 6 se muestran los datos de tensión rms, corriente rms, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia a partir de la simulación numérica.

Tabla 6. Resultados de la simulación para el caso 1 del tablero en ensamble final.

Parámetro	Horario operativo		
	Fase L1-N	Fase L2-N	Fase L3-N
Tensión	133.34	138.51	135.49
Resistencia del cable	0.11	0.11	0.11
Inductancia del cable	2.21E-04	2.21E-04	2.21E-04
Resistencia estática	2.96	2.95	2.42
Resistencia variable	2.80	2.15	3.36
Capacitancia estática	2.44E-03	2.80E-03	2.98E-03
Inductancia variable	1.97E-02	2.25E-02	1.44E-02
Corriente	131.95	149.92	164.62
Potencia activa	5269.54	5470.04	6600.83
Potencia reactiva	-14358.16	-17045.02	-17932.80
Factor de potencia	0.43	0.40	0.44

Parámetro	Horario no operativo		
	Fase L1-N	Fase L2-N	Fase L3-N
Tensión	125.50	130.77	129.71
Resistencia del cable	0.11	0.11	0.11
Inductancia del cable	2.21E-04	2.21E-04	2.21E-04
Resistencia estática	2.96	2.95	2.42
Resistencia variable	0.00	0.00	0.00
Capacitancia estática	2.44E-03	2.80E-03	2.98E-03
Inductancia variable	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Corriente	135.87	156.01	155.10
Potencia activa	9620.35	11222.88	10141.92
Potencia reactiva	-10894.88	-13128.14	-13423.17
Factor de potencia	0.71	0.70	0.66

Para comprobar la implementación de la mejora se emplea los casos 3 y 4, 3 para el caso en el que no es horario operativo y 4 para el caso en el que es horario operativo. Los cambios principales respecto al modelo del caso 1 y 2 es que se considera que se elimina la carga capacitiva y esta solo se conecta cuando es un horario operativo. En la

Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 7. Resultados obtenidos de la simulación para el modelo con la propuesta de mejora del tablero en ensamble final.

Parámetro	Horario operativo		
	Fase L1-N	Fase L2-N	Fase L3-N
Tensión	117.1307	118.5269	119.042
Resistencia del cable	0.11	0.11	0.11
Inductancia del cable	2.21E-04	2.21E-04	2.21E-04
Resistencia estática	2.96	2.95	2.42
Resistencia variable	2.7965	2.1483	3.362
Capacitancia variable	3.57E-04	3.13E-04	4.89E-04
Inductancia variable	1.97E-02	2.25E-02	1.44E-02
Corriente	83.4771	98.4646	91.8749
Potencia activa	7852.3856	9009.5498	8117.5004
Potencia reactiva	0.4326	0.2049	-0.5022
Factor de potencia	1	1	1

Parámetro	Horario no operativo		
	Fase L1-N	Fase L2-N	Fase L3-N
Tensión	125.4629	127.2318	125.0405
Resistencia del cable	0.11	0.11	0.11
Inductancia del cable	2.21E-04	2.21E-04	2.21E-04
Resistencia estática	2.96	2.95	2.42
Resistencia variable	0	0	0
Capacitancia variable	0	0	0
Inductancia variable	0	0	0
Corriente	42.3576	43.1003	51.6936
Potencia activa	4409.4393	4491.7001	5384.1218
Potencia reactiva	0	0	0
Factor de potencia	1	1	1

El comportamiento del consumo eléctrico en este tablero es distinto al tablero en el área de ensamble final, este tablero alimenta cargas eléctricas que se conmutan conforme es necesario. Para verificar el estado actual se emplea el caso 1 y caso 2, el primer caso considera solo las cargas estáticas mientras que en el segundo aquellas cargas que son conmutadas.

De acuerdo con la propuesta se recomienda la desconexión de capacitores cuando las cargas eléctricas que son conmutadas no son requeridas. Para el análisis de la mejora considera el caso 3 y 4, en el que se considera solo las cargas estáticas, mientras que el caso 4 considera tanto las cargas estáticas como aquellas cargas que se conmutan. La

Tabla 8 muestra los datos indicados y obtenidos a partir de la simulación del modelo mejorado.

Tabla 8. Resultados obtenidos de la simulación para el modelo con la propuesta de mejora del tablero en manufactura.

Parámetro	Con cargas conmutadas		
	Fase L1-N	Fase L2-N	Fase L3-N
Tensión	231.4944	231.5979	234.0754
Resistencia del cable	0.11	0.11	0.11
Inductancia del cable	2.21E-04	2.21E-04	2.21E-04
Resistencia estática	1.92	1.89	1.90
Resistencia variable	4.19	4.07	3.94
Capacitancia variable	1.53E-03	1.51E-03	1.54E-03
Inductancia variable	4.59E-03	4.65E-03	4.55E-03
Corriente	164.9864	192.4474	180.7457
Potencia activa	30669.3954	34393.1703	31379.0938
Potencia reactiva	1.7045	0.861	-2.0585
Factor de potencia	1	1	1

Parámetro	Cargas estáticas		
	Fase L1-N	Fase L2-N	Fase L3-N
Tensión	243.3872	242.4826	243.8498
Resistencia del cable	0.11	0.11	0.11
Inductancia del cable	2.21E-04	2.21E-04	2.21E-04
Resistencia estática	1.92	1.89	1.90
Resistencia variable	0.00	0.00	0.00
Capacitancia variable	0.00	0.00	0.00
Inductancia variable	0.00	0.00	0.00
Corriente	83.7048	84.2425	101.6708
Potencia activa	17220.1041	17144.6214	20810.41
Potencia reactiva	0	0	0
Factor de potencia	1	1	1

### XIII. CONCLUSIONES

Como se puede observar en las simulaciones el problema del factor de potencia es resuelto de tal manera que el consumo de corriente se ha disminuido en gran medida generando un ahorro de energía y aumentar el valor de factor de potencia. Sin embargo, antes de implementar las mejoras en el sistema es requerido y de suma importancia llevar a cabo un análisis de armónicos y verificar que la implementación de capacitores no cause una mayor distorsión en las señales de corriente y tensión, de tal manera que se posible implementar los capacitores o bien proponer otras soluciones que permitan mitigar otros problemas con la calidad de energía. De acuerdo con las mediciones, otro problema que se puede corregir particularmente en

Definir los beneficios técnicos de la empresa a largo plazo, así como establecer condiciones operativas para mejorar el aprovechamiento energético de las instalaciones.

### XIV. NOMENCLATURA

A continuación, se describe nomenclatura mencionada en las ecuaciones de los modelos matemáticos:

Vrms	Voltaje eficaz
T	Periodo de la señal
dt	Diferencial con respecto al tiempo
V	Voltaje
Irms	Corriente eficaz
P	Potencia real [W]
Q	Potencia reactiva [VAR]
S	Potencia aparente [VA]

FP	Factor de potencia
C	Capacitancia [F]
L	Inductancia [H]
R	Resistencia [ $\Omega$ ]

### XV. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo en el financiamiento del proyecto al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, así como al Fondo de Sustentabilidad Energética a través del apoyo no. S0019-Sustentabilidad Energética. Se agradece las facilidades y soporte brindado a la empresa Whirlpool México por el desarrollo del caso de estudio en su centro de investigación de Celaya, Guanajuato, México.

### XVI. REFERENCIAS

- [1] Creara Eficiencia Energética, abril 2015. [En línea]. Available: [http://www.creara.es/calculo\\_huella\\_carbono.htm](http://www.creara.es/calculo_huella_carbono.htm).
- [2] J. W. Nilsson y S. A. Riedel, Circuitos eléctricos, Madrid: Pearson Educación, 2005.
- [3] C. K. Alexander y M. N. O. Sadiku, Fundamentals of Electric Circuits, New York: McGraw-Hill, 2009.
- [4] Calidad de la energía: Características y límites de las perturbaciones de los parámetros de la energía eléctrica, CFE L0000-70, 2009.
- [5] Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica, CFE-L0000-45, 2005.
- [6] IEEE, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, 1993 (R1999).