

# Calidad de energía de una instalación industrial con generación fotovoltaica

Cubides Castro, Carlos Armando  
 carlos.cubides@mail.escuelaing.edu.co  
 Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

**Resumen – Este estudio presenta los resultados del trabajo de grado titulado Calidad de energía de una instalación industrial con generación fotovoltaica, en el cual se realizó el análisis del impacto de la instalación de generación fotovoltaica sobre los parámetros de calidad de energía eléctrica en una instalación industrial. Con la implementación de medidas de parámetros de calidad de energía en una instalación eléctrica industrial, se realizó la caracterización de la instalación y se implementaron simulaciones computacionales que fueron comparadas con las mediciones realizadas, se identificaron los problemas de calidad de energía en la instalación industrial, se realizaron simulaciones de diversas posibles soluciones para seleccionar las que mejoran el diseño y la funcionalidad de la instalación industrial. Los resultados obtenidos nos muestran que el factor de potencia es el de mayor impacto y mediante el uso de un compensador electrónico conocido comercialmente como SVG “Static VAR Generator”.**

**Índice de Términos – Generación fotovoltaica, paneles solares, calidad de energía, instalaciones eléctricas industriales.**

## I. INTRODUCCIÓN

En este documento se presentan los resultados de la tesis titulada “Calidad de energía de una instalación industrial con generación fotovoltaica”, en donde se plantea una metodología que le permite a los usuarios de instalaciones eléctricas industriales tener una opción de consulta que presenta el impacto sobre los índices de calidad de energía por la implementación de un arreglo solar en su instalación. Dentro del alcance se encuentran simulaciones de las soluciones planteadas para proponer posibles mejoras en el diseño y funcionalidad de la instalación.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El avance acelerado que se ha tenido con el ingreso de la generación de energía por medio de la implementación de arreglos fotovoltaicos a la red, es un punto de inflexión para las instalaciones convencionales que día a día van dinamizando su carga con la entrada de nuevas tecnologías en su carga, lo que implica cambios constantes en la operación de la instalación eléctrica, dichos cambios

pueden ser alterados en sus índices de calidad de energía de forma negativa particularmente por la afectación armónica de los componentes electrónicos usados en los dos involucrados en la red eléctrica, generación y consumo. En este documento se muestran los resultados obtenidos por mediciones de parámetros de calidad de energía, simulaciones y análisis para determinar el impacto en los índices de calidad de energía de una instalación industrial con generación fotovoltaica.

## III. OBJETIVOS

### 1) *Objetivo general*

Analizar el impacto de la generación fotovoltaica sobre los parámetros de calidad de energía eléctrica en una instalación industrial, por medio de mediciones de parámetros eléctricos y simulación del sistema para mejorar los diseños y funcionalidad.

### 2) *Objetivos específicos*

1. Caracterizar los parámetros de la calidad de energía de una instalación industrial con proyección de generación fotovoltaica, para la identificación de posibles problemas.

2. Identificar los problemas de calidad de energía mediante la comparación de los resultados de simulación y mediciones en la instalación industrial con proyección de generación fotovoltaica.

3. Proponer posibles mejoras en el diseño y funcionalidad de la instalación industrial.

## IV. METODOLOGÍA

Con base en mediciones de los parámetros de calidad de energía de la instalación eléctrica industrial en Valledupar, Cesar, para analizar el ingreso previo de un sistema de generación fotovoltaica, caracterizando la instalación, evaluando los parámetros medidos para caracterizarlos y simularnos en un software computacional que nos permite identificar los problemas de calidad de energía encontrados en la instalación eléctrica, y el planteamiento de soluciones para mejorar el diseño y la funcionalidad de la instalación eléctrica industrial.

Quedando como productos del proyecto:

1. El trabajo de grado: en donde se explica y desarrolla la metodología.
2. El presente artículo de investigación: en donde se plasmarán los resultados y hallazgos de la investigación.

V. RESULTADOS OBTENIDOS

En el presente artículo se mostrarán los resultados obtenidos en las mediciones realizadas a una instalación industrial ubicada en la ciudad de Valledupar, Cesar. La evaluación de los parámetros medidos, las simulaciones, y los escenarios de posibles soluciones se encontrarán en adelante en una oportunidad de apertura al analisis de los lectores buscando las buenas prácticas de la ingeniería eléctrica.

1) *Caracterizar los parámetros de la calidad de energía de una instalación industrial con proyección de generación fotovoltaica, para la identificación de posibles problemas*

Las mediciones de calidad de energía fueron el punto de partida de nuestro trabajo, estas se realizaron mediante un analizador de redes MYeBOX 1500, esta medición se realiza como se muestra en la siguiente figura.

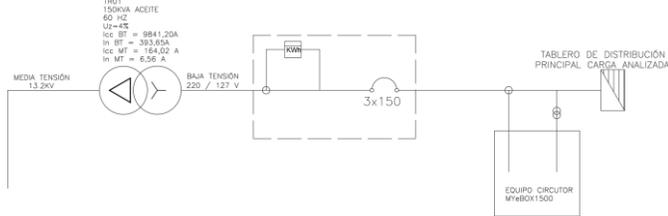


Figura 1. Diagrama Unifilar de conexión de analizador de redes MYeBOX 1500

En la figura 1 se muestra la información básica de la instalación y la ubicación del analizador de redes, los datos obtenidos de la medida se analizaron teniendo como resultado general la siguiente tabla.

Tabla 1. Caracterización de la carga en relación a medición obtenida desde el 20 de enero al 17 de febrero

Potencia	Maxima	24/01/2020	3/02/2020	3/02/2020	5/02/2020	Promedio	Promedio
		7:11	16:39	17:01	11:26	operación	general
S (kVA)	44	5	44	41	43	19.55	10.65
P (kW)	34	4	33	30	34	15.35	9.17
Q+ (kvar)	29	0	29	28	27	11.94	5.43
Q- (kvar)	1	1	0	0	0	1	0

En la tabla 1 se pueden observar los resultados de potencia máxima para la instalación eléctrica industrial, las fechas en las que ocurrieron cada una de ellas y sus promedios de operación y general.

En las figuras mostradas a continuación tenemos los perfiles de carga horarios para potencia activa, reactiva de la medición para cada día de la semana.

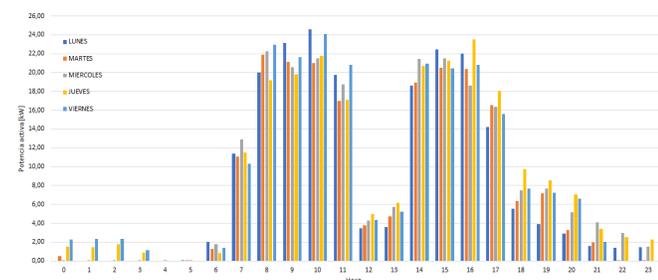


Figura 2. Potencia activa promedio de lunes a viernes en relación a medición obtenida desde el 20 de enero al 17 de febrero

En la figura 2 se muestra la potencia promedio horario de forma detallada para la instalación eléctrica industrial medida, además se evidencia el rango entre 12 del mediodía y las 2pm como horario de

almuerzo de la operación, en la figura 3 se muestra la potencia reactiva promedio horaria.

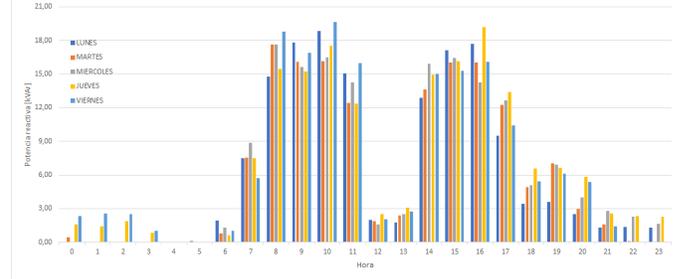


Figura 3. Potencia reactiva promedio de lunes a viernes en relación a medición obtenida desde el 20 de enero al 17 de febrero

De la figura 3 se puede validar que la potencia reactiva supera el umbral del 50% del valor de la potencia activa mostrada en la figura 2, lo que me va a dar una alerta a tener en cuenta para el factor de potencia, el cual se ve afectado por esta situación.

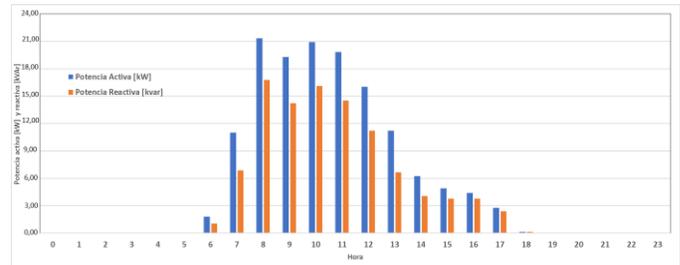


Figura 4. Potencia activa y reactiva promedio sábado en relación a medición obtenida desde el 20 de enero al 17 de febrero

En la figura 4 se muestra la potencia activa y reactiva horaria para el día sábado, que nos coincide con el horario de operación para este día.

2) *Identificar los problemas de calidad de energía mediante la comparación de los resultados de simulación y mediciones en la instalación industrial con proyección de generación fotovoltaica*

En la evaluación de los índices de calidad de energía encontramos afectaciones a índices de factor de potencia, potencia reactiva inductiva y capacitiva, tensión de línea, armónicos individuales y distorsión armónica total “THD”.

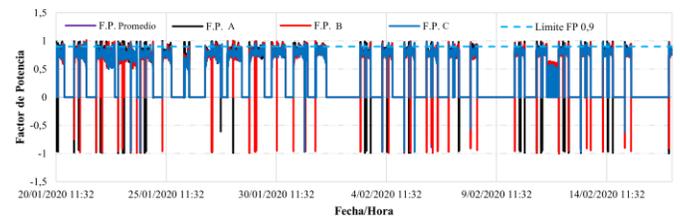


Figura 5. Factor de potencia medición obtenida desde el 20 de enero al 17 de febrero

En la figura 5 se observa el comportamiento del factor de potencia de la instalación para las tres fases y el promedio, donde se evidencia que en promedio esta regularmente por debajo del límite como se muestra en la tabla 2, donde también se incluye el factor de potencia calculado con los datos medidos.

$$Factor\ de\ Potencia = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}}$$

Figura 6. Formula utilizada para el factor de potencia Calculado.

En la figura 6 se muestra la formula utilizada para el calculo del factor de potencia, donde P corresponde a potencia activa, Q<sub>L</sub> a potencia reactiva inductiva y Q<sub>C</sub> a potencia reactiva capacitiva.

Tabla 2. Características principales del factor de potencia calculado y medido.

Fase	Máximo calculado	Máximo medido	Mínimo calculado	Mínimo medido	Promedio en operación calculado	Promedio en operación medido	Promedio general calculado	Promedio general medido
A	1	1	0	-1	0.83	0.74	0.39	0.35
B	1	1	-0.95	-0.99	0.78	0.74	0.34	0.32
C	1	0.98	0	-0.97	0.79	0.78	0.36	0.36
Promedio	1	0.98	-0.98	-0.97	0.81	0.78	0.38	0.36

La incidencia de la potencia reactiva inductiva y capacitiva se expresa en valores positivos para inductiva y negativos para capacitiva mostrados, y valores por debajo de 0,9 que son penalizados para potencia reactiva inductiva y en cualquier valor para potencia reactiva capacitiva.

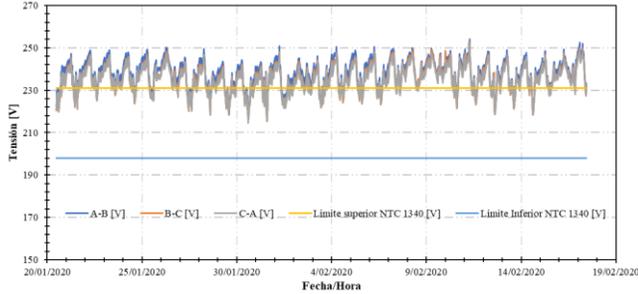


Figura 6. Perfil de tensión de línea medición obtenida desde el 20 de enero al 17 de febrero

En la figura 6 se muestra el perfil de tensión de línea donde se sobrepasa el límite superior de tensión contratado con el operador de red de forma constante, con un promedio de operación de 236 voltios, por lo que se contempla en la simulación la tensión de operador de red 240v.

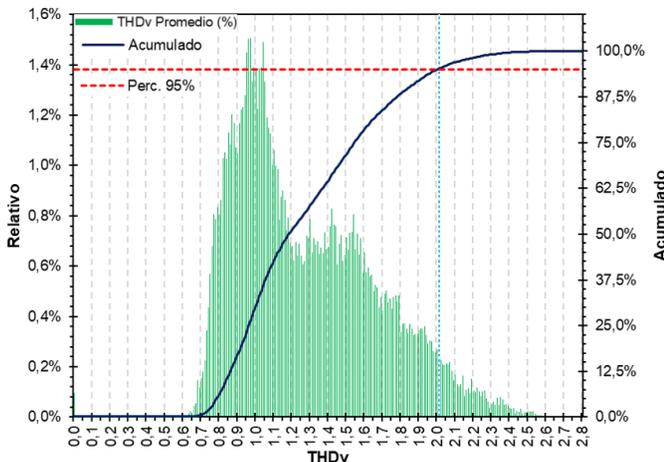


Figura 7. Histograma de THD en tensión medición obtenida desde el 20 de enero al 17 de febrero

En la figura 7 se presenta el percentil 95 del THD en tensión por medio de un histograma donde se obtiene un valor de 2%, que está dentro del límite indicado en la norma IEEE 519 de 2014.

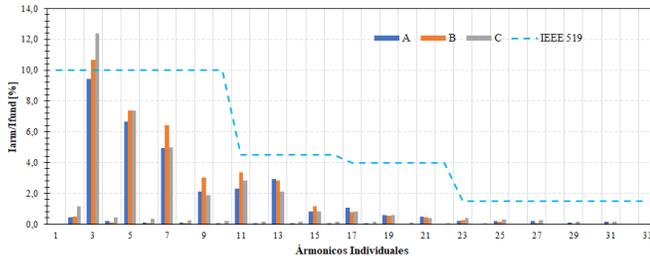


Figura 8. Perfil de armónicos en corriente medición obtenida desde el 20 de enero al 17 de febrero

En la figura 8 se observa el perfil de armónicos en corriente donde para el armónico 3º se superan los límites establecidos en la norma IEEE 519 de 2014 del 10% para la relación de corriente de corto circuito y corriente de carga máxima.

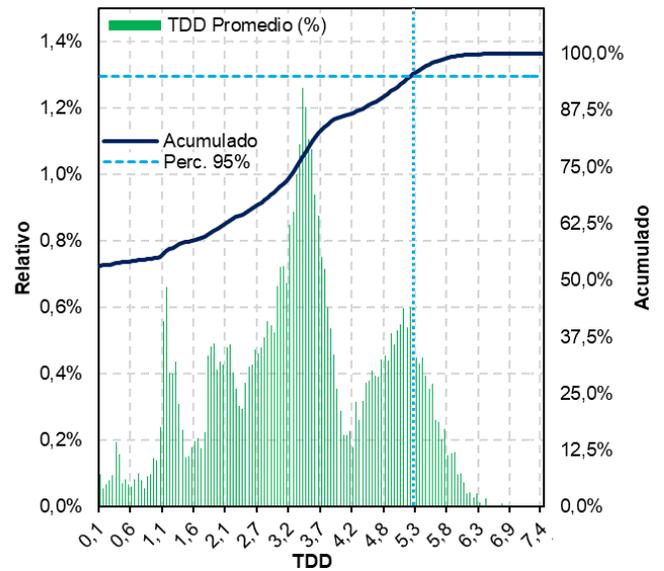


Figura 9. Perfil de TDD medición obtenida desde el 20 de enero al 17 de febrero

En la figura 9 se presenta el percentil 95 del THD en corriente que al ser evaluado con la relación de corriente de corto circuito y corriente de carga máxima se denomina TDD por medio de un histograma donde se obtiene un valor de 5,3%, que está dentro del límite indicado en la norma IEEE 519 de 2014.

### 3) Modelamiento de la instalación eléctrica industrial.

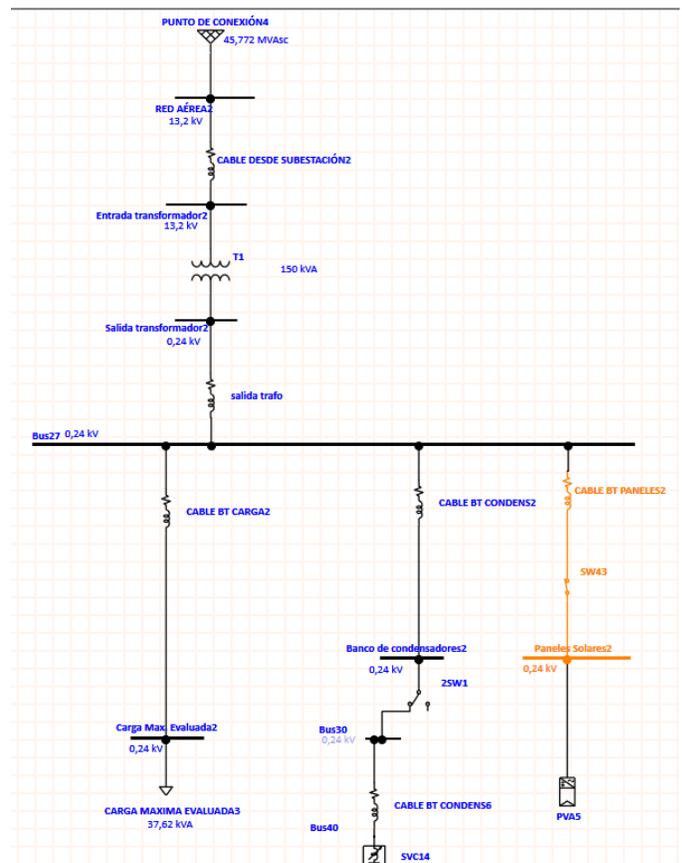


Figura 10. Diagrama unifilar instalación eléctrica industrial simulada en ETAP.

El modelamiento que se muestra en la figura 10, es realizado en el programa ETAP, y evidencia una instalación industrial, con la implementación de un arreglo solar y con un SVG.

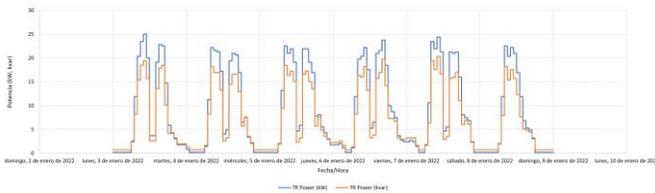


Figura 11. Potencia activa y reactiva instalación eléctrica industrial simulada.

En la figura 11 se observa la curva de potencia activa y reactiva simulada para la instalación eléctrica industrial.



Figura 12. Factor de potencia instalación eléctrica industrial simulada.

En la figura 12 se muestra la curva del factor de potencia simulada para la instalación eléctrica industrial.

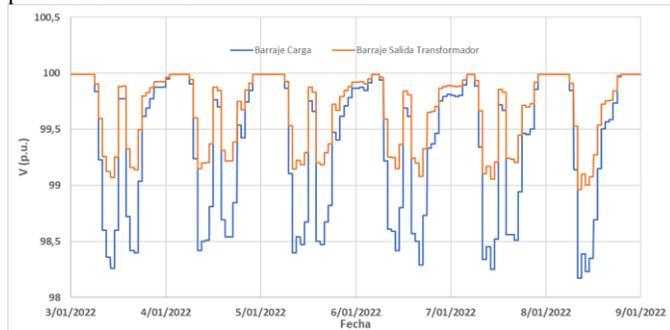


Figura 13. Tensión de línea instalación eléctrica industrial simulada.

En la figura 13 se tiene la tensión en por unidad que se tiene en el barraje de carga y en el barraje de salida del transformador simulada para la instalación eléctrica industrial.

4) *Proponer posibles mejoras en el diseño y funcionalidad de la instalación industrial.*

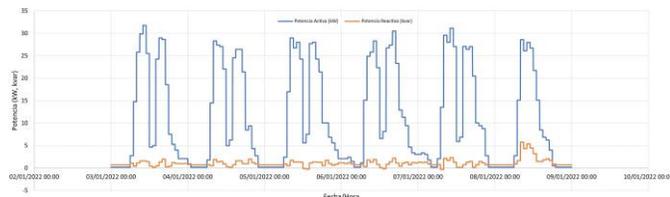


Figura 14. Potencia activa y reactiva instalación eléctrica industrial simulada corrigiendo los parámetros de calidad de energía.

Las propuestas para mejorar el diseño y funcionalidad de la instalación industrial se muestran con base en el orden de validación realizado en el trabajo, por lo tanto primero se realiza la simulación corrigiendo los parámetros de calidad de energía mediante la instalación de un SVG y en la figura 14 se muestra la curva de potencia activa y reactiva, la potencia activa no cambia, y la potencia reactiva disminuye su valor sustancialmente, teniendo valores por debajo de 5kvar inductivos y en ocasiones llegando a darles control hasta casi 0kvar.

Dando esta mejora en la potencia reactiva, se ve una mejora también en el factor de potencia que mejora sus valores manteniéndose entre 0,9 y 1 en la mayoría del tiempo y cayendo a 0 para valores de

potencia activa en 0, la curva del factor de potencia se puede ver en la figura 15.



Figura 15. Factor de potencia instalación eléctrica industrial simulada corrigiendo los parámetros de calidad de energía.

En la figura 16 se muestra la curva de potencia activa y reactiva de la instalación eléctrica industrial, la curva de potencia activa y reactiva de la generación solar, donde se observa que en las horas pico de generación, se está inyectando potencia activa a la red.

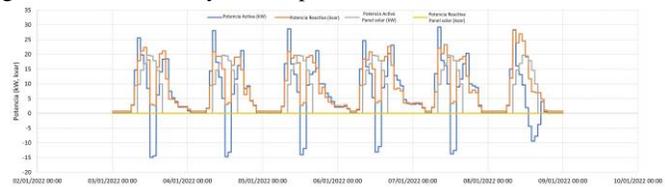


Figura 16. Potencia activa y reactiva instalación eléctrica industrial simulada incluyendo generación fotovoltaica.

En la figura 17 se muestra la curva de factor de potencia, y se evidencia que cambia de cuadrante para volverse capacitivo, esto porque se está inyectando potencia activa a la red, además se evidencia que el valor oscila entre 0.6 y 0.8 lo que nos indica que no está dentro de los límites establecidos que son entre 0.9 y 1, por esta razón genera una penalización que se debe pagar al operador de red.

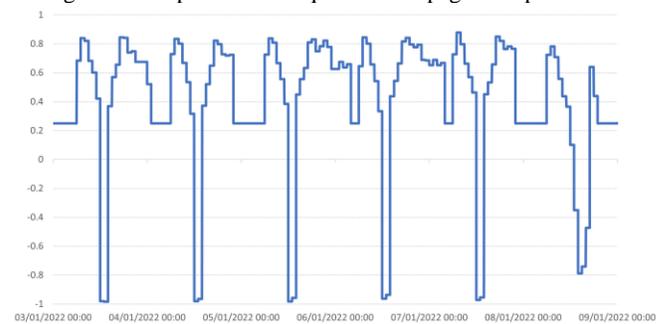


Figura 17. Factor de potencia de la instalación simulada incluyendo generación fotovoltaica.

Por último, se realiza la corrección de los parámetros de calidad de energía mediante la instalación de un SVG, y se incluye generación fotovoltaica, observando en las figuras 18 a 20 los resultados de esta simulación.

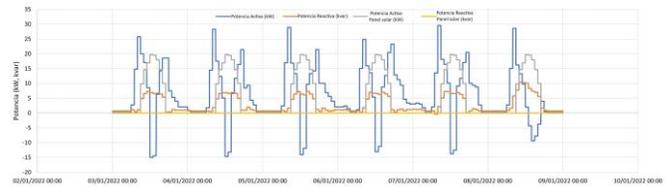


Figura 18. Potencia activa y reactiva de la instalación eléctrica industrial y de la generación fotovoltaica, corrigiendo los parámetros de calidad de energía con la instalación de un SVG.

En la figura 18 se observa que con la entrada de la generación fotovoltaica y el SVG, no se logra compensar la totalidad de la energía reactiva inductiva, y esto se da únicamente por la entrada de energía activa de la generación fotovoltaica, esto indicaría que por el cambio de cuadrantes de la potencia al pasar de ser positiva a ser negativa, el SVG no logra identificar que ese cambio se da por un

cambio de consumidor a generador y por tal razón no puede compensarla.



Figura 19. Factor de potencia de la instalación eléctrica con generación fotovoltaica corrigiendo los parámetros de calidad de energía con la instalación de un SVG.

En la figura 19 se observa que hay variaciones en el factor de potencia, que, al iniciar la inyección de potencia activa a la red, cambia para volverse negativo, es decir cambia de cuadrante, aunque realmente no se tiene presencia de energía reactiva capacitiva, el SVG al no identificar lo que está pasando, no logra realizar ninguna acción para corregirla, manteniéndose en negativo por el tiempo que inyecta y normalizándose nuevamente cuando deja de inyectar potencia activa a la red.

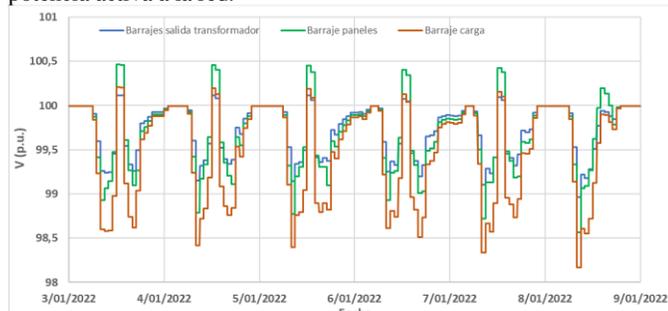


Figura 20. Tensión de línea en por unidad de la instalación eléctrica con generación fotovoltaica corrigiendo los parámetros de calidad de energía con la instalación de un SVG.

En la figura 20 se observa la tensión de línea en 3 puntos de la instalación, evidenciándose sobretensión en los 3 puntos cuando el sistema inyecta potencia activa a la red del operador de red, siendo mayor la sobretensión en el barraje donde se conecta el arreglo solar, con un incremento de 0.5% y en menor magnitud en el barraje de salida del transformador, con 0.1%, pero también afectando la tensión en el barraje de la carga en 0.2%, que siendo leve, es de importancia para nuestro análisis.

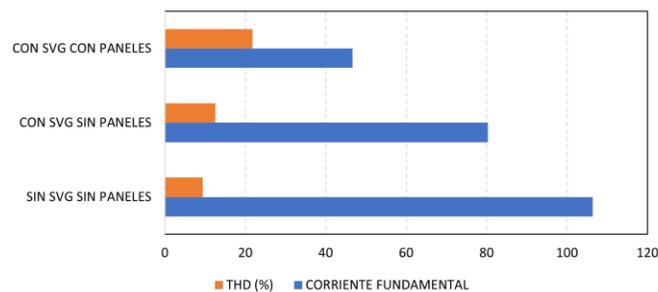


Figura 21. Relación entre la corriente fundamental y el THD(%) para cada uno de los escenarios simulados en ETAP.

En la figura 21 se observa la relación que se tiene con la corriente de cada uno de los escenarios simulados y se evidencia que al ser menor la corriente el THD tiende a incrementarse, por lo que es necesario seguir analizando este tipo de eventos para evitar posibles fallas en las instalaciones eléctricas debido a esta tendencia al incremento del THD.

## VI. CONCLUSIONES

1) Se presenta en general una necesidad de abarcar el análisis de las instalaciones existentes para poder identificar los problemas que se presentan en los índices de calidad de energía de la instalación eléctrica industrial, dando como resultado el diagnóstico previo y los efectos de la implementación de las tecnologías de generación de energía fotovoltaica.

2) Al momento de abarcar cada una de las situaciones específicas, se tiene que la instalación eléctrica evaluada en el capítulo 4, caso de estudio, tiene problemas de calidad de energía enmarcados en factor de potencia el cual oscila entre 0.36 a 0.78.

3) La instalación en general, analizando los parámetros de calidad de energía, diferentes al factor de potencia, están dentro del rango normativo citado en el capítulo 4 para cada uno de los puntos analizados.

4) De acuerdo al aporte que arrojó un análisis más profundo al factor de potencia, teniendo en cuenta que se tomó el valor medido, el calculado y el real, en los hitos de evaluación 4.1.10 y 4.1.11, se tiene presencia de energía reactiva inductiva y en instantes del día particularizados, mediante la transición de la operación, se observa que hay picos de energía capacitiva que no supera el valor de 1kvar capacitivo.

5) De acuerdo a la caracterización de la instalación en ETAP, se evidencia un error aceptable en los resultados mostrados, los cuales fueron analizados en el capítulo 3 donde se muestran los modelos del sistema.

6) Los problemas observados en las simulaciones se relacionan principalmente con la necesidad de corregir el factor de potencia, por lo que se realizó planteamiento de un SVC "Static VAR Compensator" o SVG "Static VAR Generator" con este último, citado como se conoce comercialmente.

7) Se evidencia compensación del factor de potencia con la implementación del SVG o SVC, antes de realizar el ingreso del arreglo solar, teniendo valores cercanos a 1, lo que evita penalizaciones por energía reactiva, validado con los resultados mostrados.

8) Cuando se realiza la inclusión del arreglo solar, sin tener en cuenta la corrección del factor de potencia, se mejora un poco el factor de potencia, pero no lo suficiente para evitar penalizaciones, y se logra ver que se tienen picos de energía reactiva atípicos a las mediciones normales, los cuales son penalizados directamente.

9) Al realizar la mejora de parámetros de calidad de energía, e incluir la generación del arreglo fotovoltaico, se presenta una mejora sustancial del factor de potencia, pero se evidencia que el SVG tiene unas variaciones irregulares a lo esperado, y se asocia a la inyección de energía activa a la red, lo que ocasiona que el SVG tenga problemas con el control de la energía reactiva capacitiva en esa ventana de máxima producción solar que se da entre las 12 del mediodía y las 2pm, maximizado por la ausencia de consumo en esa misma ventana, aunque es el único punto débil mostrado de la simulación, y que se plantea como trabajo futuro, un estudio profundo del comportamiento y la electrónica del SVG para estos casos particulares.

10) EL comportamiento de los armónicos con las simulaciones realizadas, se logra evidenciar que incrementa los valores sustancialmente, ante en la entrada de la generación fotovoltaica del arreglo solar, inicialmente en el análisis, por la reducción de la potencia activa propia del arreglo.

11) El THD también tiene un incremento, pero no tan alto como los armónicos individuales, lo que abriría el análisis puntualmente para un desarrollo futuro de complemento de este trabajo de grado.

12) Las mejoras recomendadas para esta instalación industrial son las siguientes:

- La implementación de un SVG para mejorar el factor de potencia, evitar las penalizaciones por energía reactiva inductiva y reactiva capacitiva generada por equipos electrónicos en la actualidad.

- Implementar el arreglo solar una vez mejorado el factor de potencia mediante el SVG.

- Tener en cuenta las buenas prácticas de ingeniería en la ejecución de las redes eléctricas internas aplicando la normatividad vigente conforme con el RETIE, con esto plantear una mejora al diseño interno de las redes existentes y complementarlas con una buena aplicación del diseño de energía solar basado en los análisis plasmados y simulados en este trabajo, con la implementación de un SVG, y mejoras en la topología de red aplicada al diseño generación de energía solar, además teniendo en cuenta un diseño adecuado de tierras que mejoran sustancialmente cualquier evento de falla.

- Tener en cuenta que al ingreso del arreglo solar se presenta un incremento de energía reactiva capacitiva, lo que se debe contrarrestar en la actualidad con la revisión normativa de generadores de energía solar.

## VII. TRABAJOS FUTUROS

1) Buscar una solución particular que sea incluyente para las cargas existentes en las instalaciones industriales que alerte previamente el impacto del ingreso de un proyecto de generación fotovoltaica mediante un software especializado de fácil uso para el usuario.

2) Incluir la simulación del SVG como un compensador no solo para energía reactiva capacitiva e inductiva, sino que se aproveche al máximo las herramientas como filtro activo y/o pasivo de acuerdo a la necesidad.

3) Incluir la simulación en el dominio del tiempo en instalaciones eléctricas, en software de interfaz mas sencilla para el usuario.

## REFERENCIAS

- [1] D. Committee of the IEEE Power y E. Society, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems Sponsored by the Transmission and Distribution Committee IEEE Power and Energy Society".
- [2] A. K. Singh, S. Kumar, and B. Singh, "Solar PV Energy Generation System Interfaced to Three Phase Grid With Improved Power Quality," vol. 67, no. 5, pp. 3798-3808, 2020.
- [3] R. P. Mandi and U. R. Yaragatti, "Power Quality Issues in Electrical Distribution system and Industries, Asian J. Eng. Technol. Innov. Spec. Conf. Issue, no. 3, pp. 64-69, 2017.
- [4] M. Hojabri and A. Toudeshki, "Power Quality Consideration for Off-Grid Renewable Energy Systems," Energy Power Eng., vol. 05, no. 05, pp. 377-383, 2013, doi: 10.4236/epe.2013.55039.
- [5] S. Lewis, "Analysis and management of the impacts of a high penetration of photovoltaic systems in an electricity distribution network," pp. 1-7, 2012, doi: 10.1109/isgtasia.2011.6257068.
- [6] J. A. Hernandez, D. Velasco, and C. L. Trujillo, "Analysis of the effect of the implementation of photovoltaic systems like option of distributed generation in Colombia," Renewable and Sustainable Energy Reviews,

vol. 15, no. 5. Elsevier Ltd, pp. 2290-2298, Jun. 01, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.02.003.

## Autor

Carlos Armando Cubides Castro.

Maestrante Ingeniería Eléctrica con énfasis en recursos energéticos.

Universidad Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito.