

# Use of the Frequency Response Technique to Analyze the Impact of Improving the Power Factor in the Electrical Networks

R. Manrique, L. Moya, and E. Gómez-Luna

**Abstract**—Current electrical systems tend to have low power factors that are often accompanied by high levels of harmonic distortion of voltage and current, which have been growing by the increase of the loads no line in the electrical systems, infringing the limits established by the norms and regulations in force.

These operating conditions affect the stability of the network and the bad functioning of the equipment, presenting high costs of billing and sanctions imposed by the state.

Therefore, the need to analyze the electrical systems before the ingredient of non-linear loads arises in order to guarantee the correct operation and the quality of the power according to the normative requirements. This article presents a typical case study; The installation of capacitor banks to improve the power factor, which fulfil their main task, but serious problems such as the generation of resonances in parallel in the natural response of system, deformation of the waveforms of tension and current, and increase of the harmonic distortion individual and total of tension and current. for which a frequency response or frequency-scanning analysis is presented using ETAP as an additional analysis tool.

**Index Terms**—Current, Harmonics, Power Factor (PF), Total Harmonic Distortion (THD), Total Demand Distortion (TDD), Voltage.

## I. INTRODUCCIÓN

Las redes eléctricas actuales en el país tienden a tener bajos factores de potencia y problemas operativos por la presencia de armónicos que distorsionan las señales de tensión y corriente de la alimentación, presentando inconvenientes con la estabilidad de los equipos y redes internas de los propietarios ocasionando a su vez afectaciones en las redes externas de los operadores de red local.

Los bajos niveles de factor de potencia y presencia armónicos de magnitud considerable que infringen los límites establecidos en la norma IEEE Std 519 de 1992-2014, se deben a la inclusión de elementos con bajos factores de potencia (algunos motores) y a los elementos no lineales constituidos principalmente por equipos electrónicos [1]-[5].

R. F. Manrique, Grupo de Investigación GITICAP, Potencia y Tecnologías Incorporadas S.A, Departamento de I+D+i, Cali, Colombia. rafael.franco@pti-sa.com.co.

L. Moya, Grupo de Investigación GITICAP, Potencia y Tecnologías Incorporadas S.A, Departamento de I+D+i, Cali, Colombia. luis.moya@pti-sa.com.co.

E. G. Luna, Grupo de Investigación GITICAP, Potencia y Tecnologías Incorporadas S.A, Departamento de I+D+i, Cali, Colombia. eduardo.gomez@pti-sa.com.co.

Teniendo en cuenta en que típicamente los sistemas con bajos niveles de factor de potencia vienen acompañados alto niveles de armónicos por la instalación de cargas no lineales (equipos electrónicos, convertidores, inversores, sistemas DC, sistemas de UPS, etc.).

Las cargas no lineales se han implementado en su mayor parte en centros de oficinas, data centers, centros de telecomunicaciones y todo sistema que requiera del uso de convertidores, inversores, sistemas DC, sistemas de UPS entre otros.

El área industrial también presenta bajos niveles de factor de potencia y altos contenidos de cargas armónicas, correspondientes mayormente a los motores y variadores de velocidad, los cuales operan en números estándar de 6, 12, 18 y 24 pulsos, cabe resaltar que los variadores de mayor uso por su precio son los de 6 pulsos, que a su vez entregan una mayor cantidad de distorsiones armónicas a la red que los de un número mayor de pulsos. También debe indicarse que gran parte de los motores instalados en estas plantas contiene un bajo nivel de factor de potencia.

Los problemas más comúnmente encontrados por la presencia de armónicos están el calentamiento de conductores, máquinas y transformadores, disparo de protecciones, frenado de máquinas, además de problemas de arranque en los motores, paros imprevistos de los equipos y procesos, presencia de flickers y altos costos de facturación por la sobrecorriente que debe suministrarse para entregar la potencia activa a los clientes.

Actualmente la normatividad y reglamentos de Colombia [3], [6]-[9], indica que el factor de potencia no debe ser menor al 90%, permaneciendo entre valores del 90% al 100% de operación, para lo cual la opción más utilizada por costos es la instalación de bancos de condensadores, pero esto acarrea altos riesgos por resonancias consecuentes por la inclusión de las capacitancias y potencia reactiva que cambiara la respuesta natural del sistema, generando un pico de resonancia en paralelo que con la presencia de una descarga atmosférica, una falla por cortocircuito y/o con la inclusión de una nueva carga inductiva que entre en resonancia con la respuesta natural del sistema (con el banco de condensadores) ocasionando una explosión del banco de condensadores, averías en la instalación eléctrica y daños a la vida humana, animal o vegetal.

Este artículo trabaja sobre el ejemplo ANSI / IEEE del software ETAP versión 14.1, [10], [11] con el cual se obtendrán el factor de potencia en el Bus 1 valorado, los niveles de distorsión armónica individual y total de tensión y corriente, y

la respuesta en frecuencia del sistema ante la inclusión de capacitancias de diferente valor, determinando las consecuencias de su inclusión como el aumento de los niveles de distorsión armónica individual y total de tensión y corriente, degradación de las señales de tensión y corriente; y generación de puntos de resonancia que con el aumento de las capacitancias incluidas.

II. CASO DE ESTUDIO

A. Descripción Del Caso

El sistema a estudiar se muestra en la Fig. 1, y se enfoca en la barra 1 (Bus1), el cual energiza la carga de un sistema DC que alimenta una serie de baterías, rectificadores e inversores, estas cargas entregan al sistema AC que contiene un factor de potencia que supere los límites establecidos en la normatividad y reglamentos vigentes [3], [6]-[9], además contener un aporte notorio de armónicos de tensión y corriente.

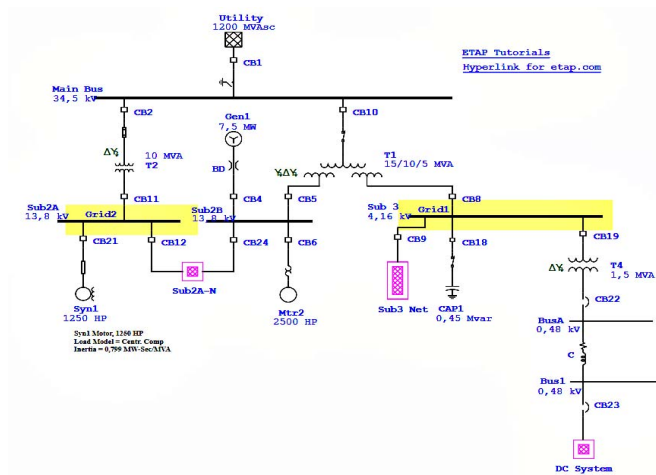


Fig. 1. Ejemplo ANSI / IEEE del software ETAP versión 14.1.

El análisis sobre la barra 1 (Bus1) mostrada en la Fig. 1, inicia corriendo el módulo de flujo de carga del software etap obteniendo las variables operativas del sistema, tales como tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia; el factor de potencia actual de la instalación es de 85.6% el cual supera el límite del 90% indicado por la normatividad y reglamentos vigentes [3],[7]-[9]. Ver Tabla I.

TABLA I  
FLUJO DE CARGA AC EN EL RAMAL QUE ENERGIZA EL BUS 1  
FLUJO DE CARGA EN EL BUS 1

Descripción	V	%Δ	P	Q	S	FP	I
Bus ID	kV	%	kW	kVAR	kVA	%	A
Bus1	0,48	98,38	357,8	216	417,9	85,6	511

El grafico de los espectros armónicos individuales de tensión armónica se visualiza en la Fig. 2 y los de corriente armónica se visualizan en la Fig. 3, los que se contrastarán con los límites armónicos individuales y totales establecidos por de la normatividad vigente de ANSI / IEEE [1], [2]; y NTC [3]

vigente.

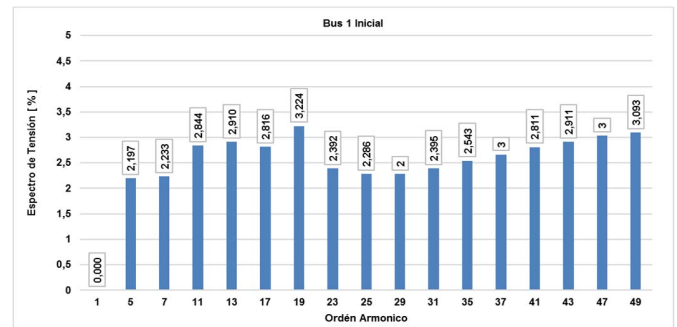


Fig. 2. Índices de las tensiones armónicas individuales en el Bus1.

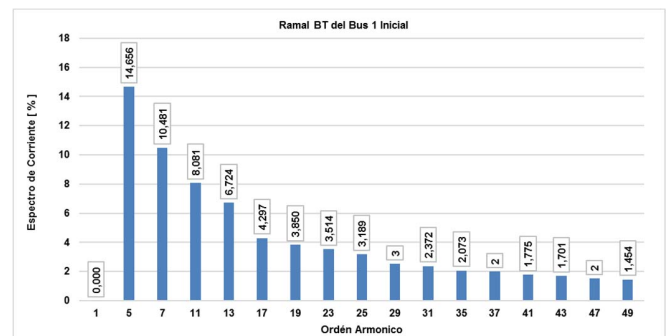


Fig. 3. Índices de las corrientes armónicas individuales en el ramal que alimenta el Bus1.

B. Análisis

El sistema usado para el estudio, es un esquema de tipo radial con una alimentación de 34.5 kV en el equivalente de red, el cual energiza dos transformadores con una carga total instalada de 25 MVA. El circuito de interés es la derivación que alimenta la carga del Bus1 (DC System) y proviene del transformador T4 de 1.5 MVA que posee un nivel de tensión de 4.16/0.48 kV.

Tal como se muestra en la Tabla I el factor de potencia en el Bus 1 del sistema es de 85.6% en cual supera los límites establecidos la normatividad vigente de ANSI / IEEE [1], [2] y NTC [3] vigente; [4], [6] por cual se hace necesario la implementación de dispositivo que permita mejorar el factor de potencia, en este caso se implementaran una serie de bancos de condensadores de diferente para aumentar los factores de potencia de 90% al 100%.

Para la evaluación del impacto de la adición de capacitancias sobre los armónicos de tensión y corriente se utilizarán como referencia los límites armónicos establecidos en la normativa vigente de ANSI / IEEE [1]. En la Tabla II, se indican los límites armónicos individuales y totales de tensión, y en la Tabla III se muestran los límites armónicos individuales y totales de corriente según la normatividad ANSI / IEEE [1].

De acuerdo al nuevo estándar de la norma IEEE Std 519 de 2014 se incluyó un nuevo rango de límites para sistemas de baja tensión menores a 1 kV, desde el cual se evalúa el caso de estudio.

La normatividad ANSI / IEEE [1], [2] y NTC [3] vigente establece una serie de límites de operación para los armónicos individuales de corriente y las distorsiones de demanda total que se seleccionan con respecto a la relación de corriente

máxima cortocircuito (Isc) a la máxima corriente de demanda (IL) en el punto de conexión, en este caso el Bus1.

TABLA II  
LÍMITES DE DISTORSIÓN DE TENSIÓN

Rango de Tensión	Distorsión Individual de Tensión [%]	Distorsión Total de Tensión: THD [%]
$V \leq 1 \text{ kV}$	5	8
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$V > 161.001 \text{ kV}$	1	1.5*

Nota: \* Los sistemas de alta tensión pueden tener hasta 2 % de THD, donde la causa es una terminal de HVDC que se atenúa por el tiempo de uso.

Los límites de distorsión individual de corriente y la distorsión de la demanda total son clasificados según tres rangos de tensión de operación, que son 120 V a 69 kV, 69 kV a 161 kV y sistemas con tensiones mayores a 161 kV [1], [3]-[8]; en este caso el nivel de tensión en el punto común de conexión es 480 V que está en el rango 120 V a 69 kV y sus límites están descritas en la Tabla III.

TABLA III  
LÍMITES DE DISTORSIÓN DE CORRIENTE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN (120 V A 69 KV)

Máxima Distorsión Armónica de Corriente en Porcentajes IL						
Orden Armónico Individual						
Isc / IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 20^*$	4	2	1,5	0,6	0,3	5
$20 < 50$	7	3,5	2,5	1	0,5	8
$50 < 100$	10	4,5	4	1,5	0,7	12
$100 < 1000$	12	5,5	5	2	1	15
$> 1000$	15	7	6	2,5	1,4	20

Incluso los armónicos pares se limitan a 25 [%] de los límites armónicos impares por encima

Las distorsiones de corriente que dan lugar a un desplazamiento, como los convertidores de media onda de corriente continua, no están permitidos.

\* Todos los equipos de generación de energía se limitan a estos valores de distorsión de corriente, independientemente de la relación actual Isc / IL.

Dónde:

h = Orden Armónico

PCC = Punto de Conexión Común

Isc = Corriente máxima de cortocircuito en el PCC.

IL = corriente de carga máxima demanda (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.

Las características iniciales de operación de la carga que alimenta el Bus1 se reflejan en la Tabla IV, incluyendo el valor de la distorsión de la demanda total de corriente (TDD) que se obtiene con base a los parámetros de la normatividad ANSI / IEEE [1], [2] y NTC [3] vigente.

### III. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

#### A. Análisis de los Armónicos en el Sistema Inicial

El análisis mostrado en la Tabla V muestra que los armónicos individuales y totales de tensión infringen los límites armónicos establecidos en la normatividad ANSI / IEEE [1], [2]; NTC [3]

vigente y [4].

TABLA IV  
CONDICIONES INICIALES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

Descripción	Identificación	Magnitud	Unidad
Tensión nominal	Vn	0,48	kV
Tensión rms	Vrms	98,17	%
Tensión fundamental	V	97,58	%
Distorsión armónica total de tensión	THD V	11,01	%
Distorsión armónica total de la corriente	THD I	22,841	%
Distorsión de la demanda total de corriente	TDD	36,26	%
Corriente rms	Irms	832,03	A
Corriente demandada	IL	511	A
Corriente fundamental	I1	811,14	A
Corriente trifásica	Isc	27278	A
Relación de cortocircuito	Isc / IL	53,38	A
Rango de la relación para los límites	-	50 < 100	A

TABLA V  
ANÁLISIS DE LOS ARMÓNICOS DE TENSIÓN INICIAL

Orden Armónico	Espectro de Tensión (%)	Rango	Limite	Análisis
1	0	$V \leq 1 \text{ kV}$	10	No Excede
5	2,19703	$V \leq 1 \text{ kV}$	10	No Excede
7	2,23259	$V \leq 1 \text{ kV}$	10	No Excede
11	2,84418	$V \leq 1 \text{ kV}$	4,5	No Excede
13	2,91033	$V \leq 1 \text{ kV}$	4,5	No Excede
17	2,81559	$V \leq 1 \text{ kV}$	4	No Excede
19	3,22416	$V \leq 1 \text{ kV}$	4	No Excede
23	2,39	$V \leq 1 \text{ kV}$	1,5	Excede
25	2,29	$V \leq 1 \text{ kV}$	1,5	Excede
29	2,29	$V \leq 1 \text{ kV}$	1,5	Excede
31	2,40	$V \leq 1 \text{ kV}$	1,5	Excede
35	2,54	$V \leq 1 \text{ kV}$	0,7	Excede
37	2,66	$V \leq 1 \text{ kV}$	0,7	Excede
41	2,81	$V \leq 1 \text{ kV}$	0,7	Excede
43	2,91	$V \leq 1 \text{ kV}$	0,7	Excede
47	3,04	$V \leq 1 \text{ kV}$	0,7	Excede
49	3,09	$V \leq 1 \text{ kV}$	0,7	Excede
THD	11,01	$V \leq 1 \text{ kV}$	12	No Excede

El análisis mostrado en la Tabla VI indica que la mayoría de los armónicos individuales de corriente y la distorsión de la demanda total de corriente superan los límites armónicos establecidos en la normatividad ANSI / IEEE [1], [2]; y NTC [3] vigente.

#### B. Análisis de los Armónicos del Sistema con Bancos de Condensadores

Para el análisis del impacto de los diferentes valores de potencia reactiva de los bancos de condensadores sobre los armónicos de tensión y corriente se realizaron varias pruebas con diferentes capacitancias que permitieron mejorar los factores de potencia a diferentes [5] valores los

cuales se muestran en la Tabla VII.

TABLA VI  
ANÁLISIS DE LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE INICIAL

Orden Armónico	Espectro de Corriente (%)	Rango	Limite	Análisis
1	0	$3 \leq h < 11$	10	No Excede
5	14,66	$3 \leq h < 11$	10	Excede
7	10,48	$3 \leq h < 11$	10	Excede
11	8,08	$11 \leq h < 17$	4,5	Excede
13	6,72	$11 \leq h < 17$	4,5	Excede
17	4,30	$17 \leq h < 23$	4	Excede
19	3,85	$17 \leq h < 23$	4	No Excede
23	3,51	$23 \leq h < 35$	1,5	Excede
25	3,19	$23 \leq h < 35$	1,5	Excede
29	2,52	$23 \leq h < 35$	1,5	Excede
31	2,37	$23 \leq h < 35$	1,5	Excede
35	2,07	$35 \leq h < 50$	0,7	Excede
37	1,99	$35 \leq h < 50$	0,7	Excede
41	1,78	$35 \leq h < 50$	0,7	Excede
43	1,70	$35 \leq h < 50$	0,7	Excede
47	1,53	$35 \leq h < 50$	0,7	Excede
49	1,45	$35 \leq h < 50$	0,7	Excede
TDD	36,26	TDD	12	Excede

TABLA VII  
BANCOS DE CONDENSADORES PARA LOS DIFERENTES FACTORES DE POTENCIA

Banco de Condensadores	Factor de Potencia
kVAR	%
45	90
60	92
90	94
105	96
150	98
210	100

En la Fig. 4 se evidencia que los niveles de los armónicos de tensión incrementaban con el aumento de las capacitancias y potencia reactiva de los bancos de condensadores que incrementaban los factores de potencia en el Bus 1.

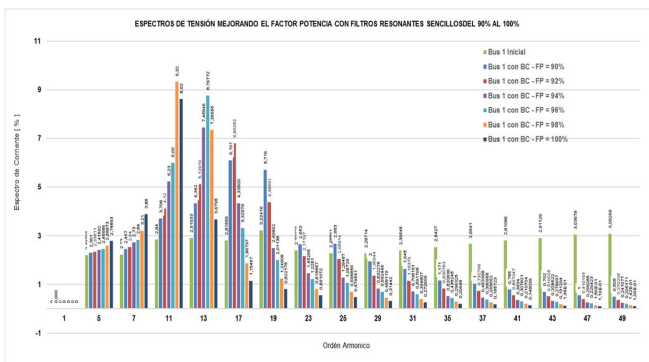


Fig. 4. Incremento de los armónicos de tensión frente al aumento de capacitancias.

En la Fig. 5 se confirma que los niveles de los armónicos de tensión incrementaban con el aumento de las capacitancias y potencia reactiva de los bancos de condensadores que incrementaban los factores de potencia en el Bus 1.

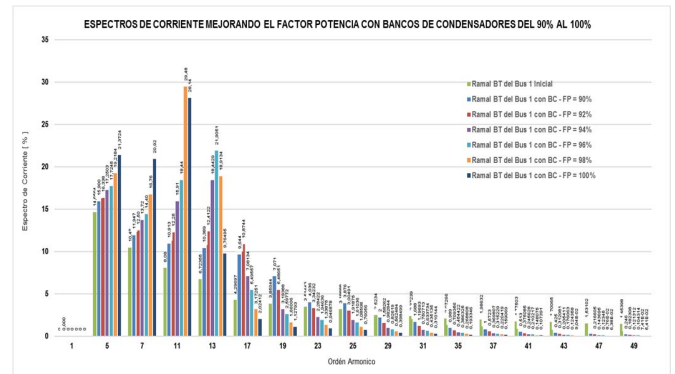


Fig. 5. Incremento de los armónicos de corriente frente al aumento de capacitancias

En la Fig. 6 se muestra que el aumento de los armónicos de secuencia positiva que entran en fase con la señal de la tensión fundamental, la cual afecta notoriamente la señal de tensión generando hundimientos de profundidad considerable, además de amplificar la magnitud de la señal, lo cual acarrea problemas por calentamiento de los conductores, equipos y transformadores, además que la alteración de la forma de onda y los aportes de secuencia negativa de en los primeros armónicos (menores a 11) indican problemas con los arranques de las máquinas, paradas imprevistas de los proceso, entre otros [4]- [13].

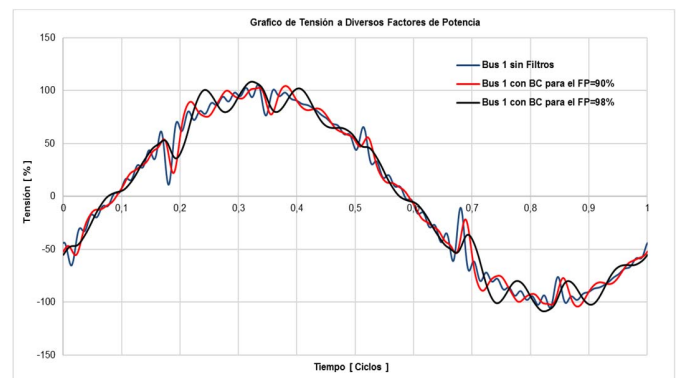


Fig. 6. Señal de tensión a diversos factores de potencia.

En la Tabla VIII se muestra la distorsión armónica total de tensión con respecto a la variación de los factores de factores de potencia, donde se evidencia que los THD de tensión son variables tienden una tendencia a incrementar con la inclusión de capacitancias, esto hasta incluir un banco de condensadores para mejorar el 100%, donde la inclusión de potencia reactiva se vuelve redundante y el THD desciende.

En la Tabla IX se muestra la distorsión armónica total de corriente y la distorsión total de demanda con la inclusión de capacitancias de mayor valor tiene aumentar.

TABLA VIII  
THD V CON RESPECTO A LA VARIACIÓN  
DE FACTORES DE POTENCIA

Factor de Potencia	THD V	Análisis
%	%	
85,6 (inicial)	11,01	Excede
90	12,04	Excede
92	11,87	Excede
94	11,51	Excede
96	12,33	Excede
98	13,07	Excede
100	10,82	Excede

TABLA IX  
THD I y TDD CON RESPECTO A LA VARIACIÓN  
DE LOS FACTORES DE POTENCIA

Factor de Potencia	THD I	I1	IL	Isc / IL	TDD	Análisis
%	%	A	A	A	%	
85,6 (inicial)	22,84	832	511	53,38	37,19	Excede
90	28,41	814,1	484,5	56,30	47,74	Excede
92	30,02	808,5	476,1	57,29	50,98	Excede
94	33,92	800,2	462,8	58,94	58,65	Excede
96	37,23	800,4	456,7	59,73	65,25	Excede
98	43,52	794,9	442,4	61,66	78,20	Excede
100	42,3	766,7	433,4	62,94	74,83	Excede

IV. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA

A. Análisis de Respuesta de la Magnitud de la impedancia Vs Frecuencia.

En la presente sección se mostrarán el impacto de la respuesta en frecuencia por medio del análisis de las alteraciones del comportamiento de la magnitud de impedancia con respecto al aumento de frecuencia.

En la Fig. 7 se muestra los puntos de resonancia ocasionados por cada una de las inclusiones de los bancos de condensadores descritos en la Tabla VI que se usaron para obtener las mejoras del factor de potencia, evidenciando que con el aumento de la inclusión de capacitancias de mayor magnitud y potencia reactiva las resonancias se acercan más a la frecuencia fundamental de operación [11].

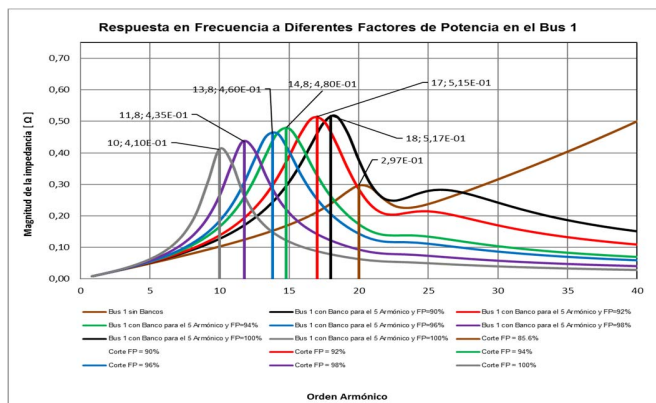


Fig. 7. Resonancias de frecuencia a diferentes valores de factor de potencia en Bus 1.

B. Impacto de la Respuesta en Frecuencia en el Sistema Radial.

En la Fig. 8 se muestra el impacto en el Bus Sub 3 (primario del transformador T4) que tiene la implementación de los distintos bancos de condensadores en el Bus 1, donde la respuesta de magnitud de impedancia tiene una variación en la resonancia natural del sistema en el orden 20 (1200 Hz), generando un segundo punto de resonancia de menor magnitud, pero que con el aumento de capacitancia se acerca más a la respuesta natural del sistema [12]- [11].

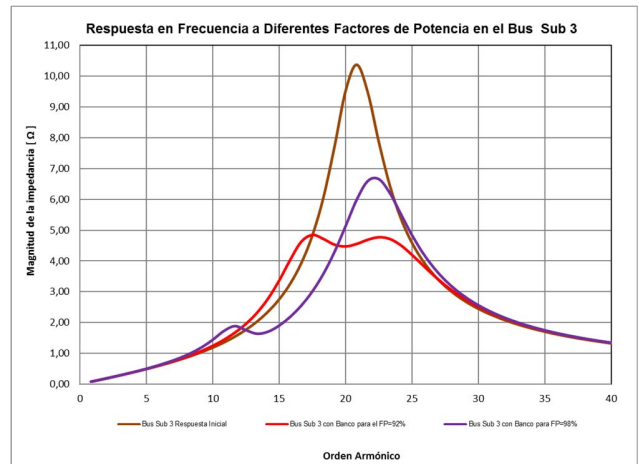


Fig. 8. Resonancias de frecuencia a diferentes valores de factor de potencia en Bus Sub 3.

C. Impacto de la Respuesta en Frecuencia en el Sistema Contiguo.

En la Fig. 9 se muestra la respuesta en frecuencia en el Bus Sub 2B (secundario del transformador T4) con la implementación de los distintos bancos de condensadores en el Bus 1, donde la magnitud de la impedancia no muestra un cambio considerable por lo que se determina como despreciable [12], [14]-[18].

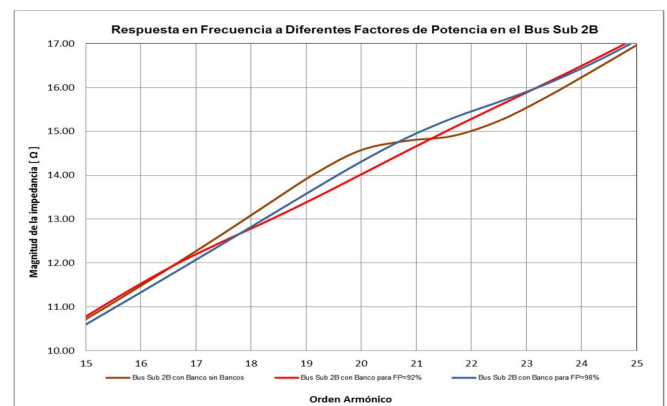


Fig. 9. Resonancias de frecuencia a diferentes valores de factor de potencia en Bus Sub 2B.

D. Impacto de la Respuesta en Frecuencia en el Sistema con Bancos de Condensadores y la Inclusión de Nuevas Cargas Inductivas.

En la Fig. 10 se contempla como la respuesta natural del sistema con diversos valores de capacitancias es afectada por la



inclusión de 2 cargas inductivas correspondientes unos motores de 200 HP y 1000 HP, mostrando que la inclusión de este tipo de carga mueve los puntos de resonancia a una frecuencia más alta, alejándolos de la frecuencia natural.

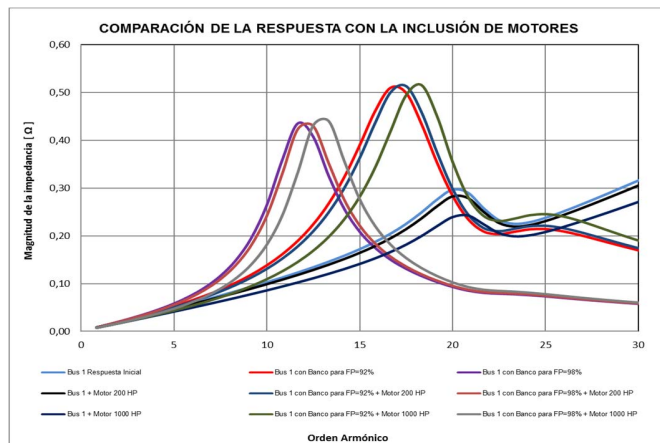


Fig. 10. Resonancias de frecuencia con la inclusión de cargas inductivas.

## V. CONCLUSIONES

Gracias a las bondades del software se logró evidenciar resultados exactos del comportamiento de los armónicos y factores de potencia del sistema, valorando los efectos de la inclusión de cargas reactivas (condensadores) y cargas inductivas (motores), evidenciando su afectación en la respuesta de la frecuencia natural del modelo. Permitiendo al operador de red tomar decisiones adecuadas en el sistema eléctrico

Como factor crítico se evidencia que la inclusión de capacitancias ocasiona resonancias en la respuesta natural del sistema, al igual que el aumento del valor de los bancos de condensadores ocasiona que los puntos de resonancia se acercan a la frecuencia fundamental, lo que puede ocasionar un riesgo en la operación del sistema de potencia.

La inclusión de los bancos de condensadores ocasiona incrementos considerables de los armónicos individuales de tensión y corriente en los armónicos principales de 1 a 13, lo cual acarrearía problemas en las 3 secuencias de operación como parada de procesos (secuencia negativa), calentamiento de conductores y transformadores (secuencia positiva) y disparo de protecciones (secuencia cero).

Las capacitancias adicionales en el sistema acarrearán cambios abruptos de los THD de tensión que tienden a aumentar, lo cual se refleja en alteraciones considerables de la señal de tensión con hundimientos que pueden reflejarse en la parada de los procesos de la planta o mal funcionamiento de los equipos.

Los THD de corriente y los TDD tienden a tener incrementos abruptos con el aumento de capacitancias, causando un incremento en la variación de la señal de corriente ocasionando graves problemas en el funcionamiento de las máquinas y conductores, además de alejarse más de los límites de establecidos en la normatividad ANSI / IEEE vigente.

La inclusión de capacitancias en un sistema radial que incluye un transformador traslada los problemas de resonancia al primario del equipo generando puntos de resonancia

adicionales y más cercanos a la respuesta en frecuencia con el aumento de capacitancias.

La inclusión de cargas inductivas considerables en el sistema con los bancos de condensadores no elimina o mitiga las magnitudes de los puntos de resonancia, pero si los traslada a una frecuencia más alta, alejándolos de la frecuencia fundamental.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan los más sinceros agradecimientos a la empresa Potencia y Tecnologías Incorporadas PTI S.A por todo el soporte durante esta investigación, también al grupo de investigación GITICAP de esta misma compañía por las contribuciones y discusiones hechas durante el desarrollo del proyecto de innovación 54558-2016 aprobado por el CNBT de Colciencias.

## REFERENCIAS

- [1] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems, IEEE Std 519, 2014.
- [2] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems, IEEE Std 519, 1992.
- [3] NTC Calidad de la Potencia Eléctrica, Límites y Metodología de la Evaluación en Punto de Conexión Común, NTC 500, 2008.
- [4] IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, IEEE Std 1531, 2003.
- [5] IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, IEEE Std 18, 2002.
- [6] H. Alvarado, J. M. Ramirez-Sánchez, "Metodología para el Análisis de la Propagación y Filtrado de Armónicas en Sistemas Eléctricos", Trabajo de Grado, Instituto Politécnico Nacional, Mexico D.F., 2010.
- [7] Resolución 108 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG 108, 1997.
- [8] Resolución 097 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG 97, 2008.
- [9] Resolución 024 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG 024, 2005.
- [10] S. Ramseier and H. Spiess, "El canto de las líneas eléctricas," Revista ABB No. 2, Aug. 2006. Baden, Switzerland. [Online]. Available: [http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/cd6491bf4a ccb5fc1257264004903aa/\\$file/review\\_s.indd\\_1.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/cd6491bf4a ccb5fc1257264004903aa/$file/review_s.indd_1.pdf)
- [11] D. D. Giustina, L. Andersson, C. Casirati, S. Zanini, and L. Cremaschini, "Testing the broadband power line communication for the distribution grid management in a real operation environment," in Proc. Int. Symp. Power Electron., Elect. Drives, Autom. Motion, 2012, pp. 785–789.
- [12] E. Gómez-Luna, G. Aponte, C. González-García and J. Pleite. "Current Status and Future Trends in the Frequency Response Analysis (FRA) with the Transformer in Service". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 28 N° 2, pp. 1024-1031. April, 2013.
- [13] S. Ryder, "Methods for comparing frequency response analysis measurements," in Proc. IEEE Conf. Rec. Int. Symp. Elect. Insul., Boston, MA, 2002, pp. 187–190
- [14] C. Bengtsson, "Status and trends in transformer monitoring," IEEE Trans. Power Del., vol. 11, no. 3, pp. 1379–1384, Jul. 1995.
- [15] T. Anderson and A. Golder, "Validation of on-line power system dynamics measurements," presented at the IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting. Conf., Edmonton, AB, Canada, 1999.
- [16] R. Malewski, J. Douville, and L. Lavallée, "Measurement of switching transients in 735 kV substations and assessment of their severity for transformer insulation," IEEE Trans. Power Del., vol. 3, no. 4, pp. 1380–1390, Oct. 1988.
- [17] C. González, J. Pleite, J. Sanz, and V. Valdivia, "Online measurements of the frequency response of the transformer by means of the bushing tap coupler," in Proc. Advanced Res. Workshop Transformers, Baiona, Spain, Oct. 2007, pp. 1–6.

- [18] A. Setayeshmehr, H. Borsi, E. Gockenbach, and I. Fofana, "On-line monitoring of transformer via transfer function," in Proc. IEEE Elect. Insul. Conf., Canada, Jun. 2009, pp. 278–282.



**Ing. Rafael Franco Manrique. Esp.**  
CoInvestigador Grupo GITICAP /  
Ingeniero Líder de Ventas y Soporte  
Técnico etap - Proyectos y Consultoría PTI  
S.A. Tecnólogo en Electrónica de la  
Universidad del Valle, Palmira - 2004.  
Ingeniero Electricista de la Universidad del  
Valle, Cali - 2009. Especialista en

Ingeniería de la Universidad del Valle, Cali - 2012. Áreas de interés: sistemas de potencia, modelamiento y simulación de sistemas eléctricos, simulación predictiva, SCADA y simulación en tiempo real.

Se desempeñó como auxiliar de pruebas en el laboratorio de Alta Tensión GRALTA, por algunos años y también como profesor Hora Cátedra en la Escuela de Electrónica de la Universidad del Valle, vinculado a un proyecto para Ecopetrol–Villavicencio "Análisis de Confiabilidad" antes de vincularse a PTI S.A. Actualmente se desempeña como Ingeniero Líder de Ventas y Soporte Técnico etap - Proyectos y Consultoría para Colombia y Panamá en el software etap. y Soluciones etap Real Time.



**Ing. Luis Moya. Esp.** Ingeniero eléctrico  
con experiencia en la elaboración de  
estudios de flujo de carga, análisis de  
cortocircuito, coordinación de  
protecciones de sobrecorriente,  
protecciones diferenciales, calidad de  
potencia, arco eléctrico, análisis de  
resistividad de terreno, diseño de mallas

de SPT, diseño de redes y subestaciones de MT y BT en niveles de tensión de hasta 34.5 kV. Poseedor de un amplio conocimiento de textos y normatividad internacional y nacional tal como ANSI / IEEE, IEC, NEC, NTC y de normas particulares de los operadores de red local, además del manejo de herramientas de simulación de sistemas de potencia como ETAP, NEPLAN, Digsilent y ATP. Actualmente se desempeña con ingeniero de estudios y soporte técnico de ETAP.



**Ing. Eduardo Gomez Luna. Ph.D,  
(M'09)**

Director grupo GITICAP / Líder del  
Departamento de Investigación y  
Desarrollo PTI S.A. Tecnólogo en  
Electrónica de la Universidad del Valle,  
Palmira - 2004. Ingeniero Electricista de la  
Universidad del Valle, Cali - 2009. Doctor

en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, Cali - 2014. Áreas de Interés: transformadores, matemáticas aplicadas, electrónica de potencia, procesamiento de señal, sistemas de potencia y simuladores en tiempo real. [orcid.org/0000-0003-2263-6758](https://orcid.org/0000-0003-2263-6758).