

# Estudio de resonancias armónicas en red eléctrica ante variación de carga

S. Martínez-Morales<sup>1\*</sup>, F.S. Sellschopp-Sánchez<sup>1</sup>, R. Loera-Palomo<sup>2</sup>, M.A. Rivero-Corona<sup>2</sup>, R. Vargas-Salas<sup>1</sup>

**Resumen**— Las redes eléctricas están compuestas básicamente por elementos resistivos e inductivos, y los efectos capacitivos aparecen cuando se insertan bancos de capacitores o cuando las líneas de transmisión son de mediana a gran longitud. Esta composición de la red, incluyendo efectos capacitivos, llega a ser relevante cuando las cargas, o inclusive las fuentes de generación renovable, producen una distorsión en la forma de onda de las variables de tensión y corriente. Por un lado se encuentra la respuesta natural de la impedancia de la red eléctrica en un rango de frecuencia, resultando en un espectro armónico de la red que proporciona información de las resonancias existentes en dicho sistema eléctrico. Por otro lado se tiene la distorsión de las variables eléctricas que se define por el espectro armónico de las cargas. La combinación de ambos espectros cuando existe coincidencia de armónicos, detona un problema importante de contaminación armónica en la red eléctrica. En este trabajo se estudia el comportamiento del espectro de resonancias de la red eléctrica considerando diferentes escenarios de carga con la finalidad de evaluar la modificación de dicho espectro de resonancias. Esto permitirá determinar cuando existe mayor susceptibilidad a altas contaminaciones armónicas en la red eléctrica.

**Palabras claves**— Distorsión Armónica, Espectro de Resonancia, Resonancia Paralelo, Resonancia Serie, Variación de Carga.

**Abstract**— Electrical networks are composed basically of resistive and inductive elements, and the capacitive effects appear when capacitor banks are inserted or when the transmission lines are of medium to large length. This network composition, including capacitive effects, becomes relevant when loads, or even renewable generations sources, produce a distortion in the waveform of the voltage and/or current. On the one hand there is the natural response of the impedance of the electrical network in a frequency range, resulting in a network harmonic spectrum that provides information of the resonances existing in the electrical system. On the other hand we have the distortion of the electrical variables that is defined by the load harmonic

spectrum. The combination of both spectra when there is a coincidence of harmonics, triggers an important problem of harmonic contamination in the electrical network. In this work, the behavior of the resonance spectrum of the electrical network is studied considering different load scenarios in order to evaluate the modification of the resonances spectrum. This will allow to determine when there is greater susceptibility to high harmonic contamination in the electrical network

**Keywords**— Harmonic Distortion, Resonance Spectrum, Parallel Resonance, Series Resonance, Load Variation.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha hecho un esfuerzo importante para reducir los efectos provocados en la red eléctrica debido a las nuevas formas de generación de energía eléctrica por medio de las fuentes renovables. Estas nuevas formas de generación de energía como lo son la eólica y la solar-fotovoltaica han traído consigo uno de los problemas más comunes que afectan a la calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia, deformando las señales de onda de tensión y de corriente, producidas en gran medida por el fenómeno denominado “distorsión armónica”, problema que prácticamente puede llegar a afectar a toda la red eléctrica, [1], [2]. Es así que, frente a estos efectos que modifican la respuesta natural de la impedancia en la frecuencia, se ha realizado un análisis que determine el impacto que estos efectos tienen sobre la red eléctrica considerando la variación de carga en el sistema.

Para el análisis se utiliza el simulador PSCAD para extraer los datos de comportamiento del modelo de una red eléctrica típica representada por medio de un circuito equivalente pi. Este circuito es sometido a diferentes condiciones de operación con el propósito de obtener la evolución de su comportamiento, para posteriormente visualizar y analizar los resultados por medios gráficos.

## II. ASPECTOS TEÓRICOS EN EL ANÁLISIS DEL PROBLEMA

El estudio realizado se basa en una línea de transmisión de potencia de longitud larga donde se llega a contemplar los efectos capacitivos, los cuales ocasionan resonancias en la red eléctrica que se pueden identificar en el espectro de resonancias. Para comprender de mejor manera los

<sup>1</sup>TecNM – Instituto Tecnológico de La Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna, S/N, Col. Centro, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México.

<sup>2</sup>CONACYT – TecNM – Instituto Tecnológico de La Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna, S/N, Col. Centro, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México.

\*samuelmtz08@hotmail.com.

términos clave que envuelven este estudio, es conveniente definir de manera concreta cada uno de ellos.

*A. Distorsión Armónica.*

Cuando la tensión o la corriente de un sistema eléctrico tiene deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que la señal está distorsionada. La distorsión puede deberse a, [3]:

- *Fenómenos transitorios* tales como el arranque de motores, conmutación de capacitores, efectos de tormentas eléctricas, fallas por cortocircuito entre otras.

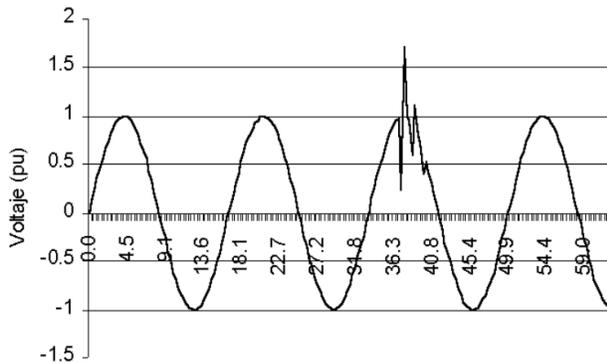


Figura 1. Efecto en la tensión por conmutación de capacitores

- *Condiciones permanentes* que están relacionadas con armónicas de estado estable, las cuales son producidas por las cargas no lineales conectadas a la red eléctrica.

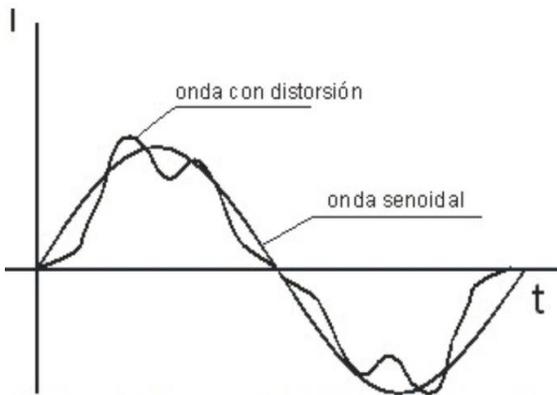


Figura 2. Distorsión armónica producida por cargas no lineales

En las redes eléctricas es común encontrar que las señales tengan una cierta distorsión en la forma de onda, que cuando es baja, no ocasiona problemas en la operación de los equipos y dispositivos. Sin embargo, cuando los niveles de distorsión son altos, la red eléctrica tiene problemas en su operación. Es por ello que existen normas que establecen los límites permisibles de distorsión,

dependiendo del nivel de tensión de operación y de su influencia en el sistema. [3].

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en algún punto de la red eléctrica se encuentra distorsionada, con una relación a la onda senoidal que idealmente se espera tener, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicas. Para que se considere como una distorsión armónica las deformaciones en una señal, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Que la señal tenga valores definidos dentro de un intervalo
- Que la señal sea periódica, teniendo la misma onda en cada ciclo de la señal de tensión o corriente
- Que la distorsión armónica se presente en cualquier instante de tiempo, es decir, que sea permanente y no transitoria.

*B. Espectro de Resonancia*

El espectro de resonancia es una representación gráfica de la impedancia de la red eléctrica en función de la frecuencia. Al tener en la red elementos que sus valores dependen de la frecuencia como lo son las inductancias y las capacitancias, cuyos comportamientos son totalmente opuestos, el comportamiento de la impedancia con respecto a la frecuencia puede presentar variaciones importantes tanto en magnitud como en ángulo de fase a diferentes frecuencias, [1], [2]. Comúnmente, cuando se desea representar de manera general la impedancia de las redes eléctricas desde algún punto, se hace por medio de una impedancia equivalente, la cual está constituida por los elementos resistivos, inductivos y capacitivos que conforman la red original. Dicha impedancia equivalente se compone de una parte real y una parte imaginaria.

$$Z_{eq} = R + j(X_L - X_C) \tag{1}$$

En donde la parte real  $R$  corresponde a la parte resistiva, mientras que la parte imaginaria conformada por  $X_L$  y  $X_C$  corresponden a los elementos inductivos y capacitivos respectivamente. Estas últimas definidas como reactancia inductiva y capacitiva, sus valores dependen de la frecuencia:

$$X_L = 2 * \pi * f * L \tag{2}$$

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * f * C} \tag{3}$$

Siendo  $L$  el valor de la inductancia y  $C$  el de la capacitancia.

Cuando la parte imaginaria de la impedancia es cero, es decir, que la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva

son iguales a una determinada frecuencia se dice que la red entra en resonancia. A la frecuencia en donde se produce el fenómeno se le conoce como frecuencia de resonancia.

*C. Resonancia Paralelo.*

En una resonancia paralelo la impedancia de un circuito se vuelve extremadamente alta, lo que conduce a una sobretensión de igual manera muy alta cuando existe una corriente a dicha frecuencia de resonancia paralelo. En un caso extremo, incluso cuando una corriente armónica es relativamente pequeña puede causar picos de tensión destructivamente altos a la frecuencia de resonancia. La resonancia paralelo es muy común cuando existen bancos de capacitores o líneas de CA largas conectadas con transformadores de potencia. En este caso las grandes capacitancias e inductancias comienzan a resonar entre sí.

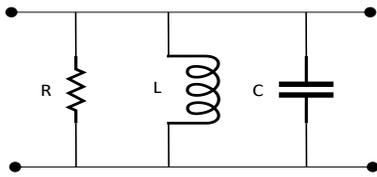


Figura 3. Circuito RLC en paralelo

$$Z_p = \frac{R \times j\omega L \times (-j\frac{1}{\omega C})}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \quad (4)$$

En este circuito, la condición de resonancia ignorando R es tomando el denominador de (4):

$$j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = 0 \quad (5)$$

Entonces, la frecuencia de resonancia es:

$$f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (6)$$

Por lo que la impedancia en resonancia paralelo,  $Z_p$ , tiende a ser elevada, figura 4.

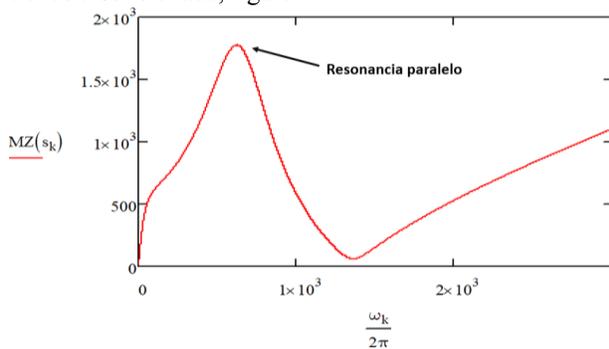


Figura 4. Resonancia paralelo

*D. Resonancia Serie.*

La resonancia en serie difiere de la resonancia en paralelo en su baja impedancia a la frecuencia de resonancia. En la frecuencia de resonancia, la reactancia inductiva y capacitiva se vuelven igual. En este caso, la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva se anulan, por lo que la impedancia de la red eléctrica a dicha frecuencia solo consiste en una resistencia. Como las resistencias de los conductores son normalmente muy bajas, la reducción de la impedancia puede generar corrientes notablemente altas.

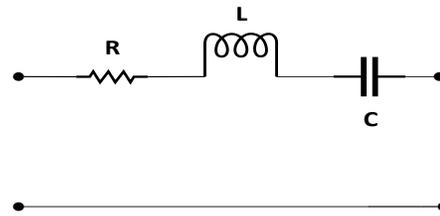


Figura 5. Circuito RLC en serie

La conexión en serie simple del circuito resonante se muestra en la figura 5 y la impedancia de tal circuito es la siguiente:

$$Z_s = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (7)$$

En el caso de la resonancia serie, la impedancia total en la frecuencia de resonancia se reduce exclusivamente al componente del circuito resistivo. Suponiendo que  $R = 0$ , es decir, se deduce la frecuencia de resonancia:

$$j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = 0 \quad (8)$$

Lo que conduce a:

$$f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (9)$$

Un ejemplo de la resonancia serie se muestra en la figura 6

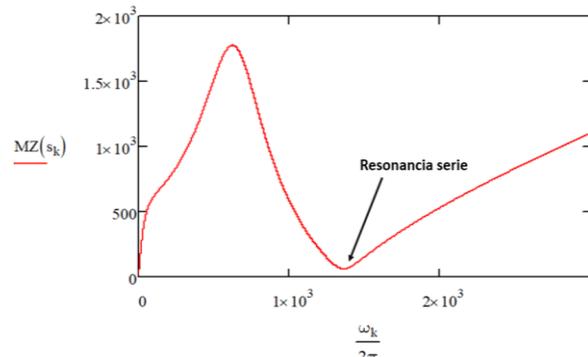


Figura 6. Resonancia serie

E. Modelado de la red eléctrica

Las líneas de transmisión de energía eléctrica se pueden modelar por medio de un circuito equivalente haciendo uso de los parámetros concentrados que conforman este modelo. El circuito equivalente pi considera la resistencia y la inductancia serie de los conductores, y la capacitancia en derivación que se llega a presentar en líneas de longitud media y larga, [4]-[6].

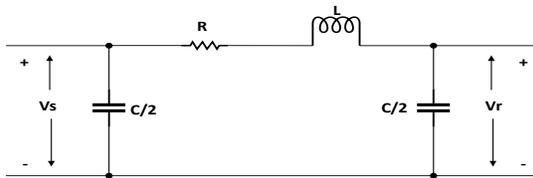


Figura 7. Circuito equivalente

Los datos utilizados para realizar el modelado de este estudio se han tomado de [4].

TABLA I  
PARÁMETROS DE LÍNEAS

Serie Z		Y en paralelo	
R p.u	X p.u	Mvar	$\frac{Y}{2}$ p.u
0.01008	0.05040	10.25	0.05125

En la Tabla I se muestran los parámetros en p.u. de la línea de transmisión que se ha modelado; el simulador PSCAD que es donde se lleva a cabo el modelado solo permite hacerlo en valores reales, es decir que se tiene que realizar la conversión de valores en por unidad a valores de resistencia, inductancia y capacitancia. Para esto se ha considerado una potencia y una tensión base del sistema de 100 MVA y 230 kV respectivamente, además se ha agregado una carga nominal de 100 MW y 75 MVARs la cual se ha variado desde un 5% hasta un 100% con respecto a la carga nominal.

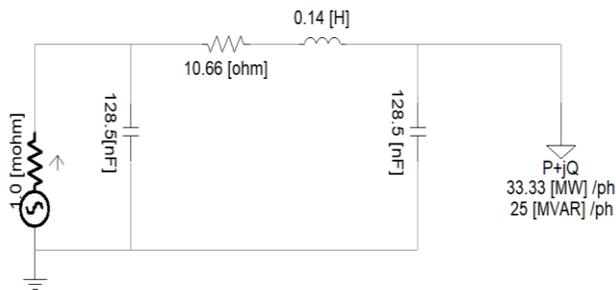


Figura 8. Red eléctrica modelada

El espectro de resonancia se obtiene por medio de una

interfaz misma de PSCAD, la cual genera un archivo de texto con datos de la impedancia para cada valor de frecuencia y que pueden ser graficados en un software matemático externo.

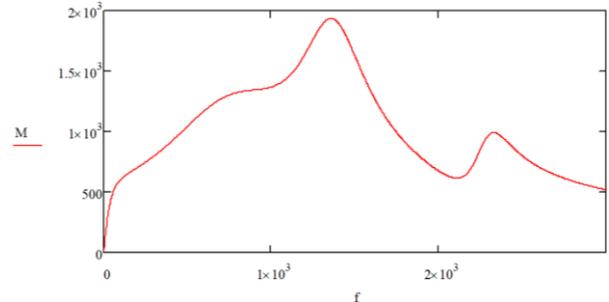


Figura 9. Respuesta en frecuencia del sistema

Como se muestra en la figura 9 la respuesta en frecuencia del sistema en condiciones nominales presenta dos frecuencias de resonancias paralelo producidas por las dos capacitancias presentes en el circuito. Al variar la carga del sistema se modifican las condiciones de operación, lo cual a su vez modifica la impedancia equivalente del mismo, por lo que se espera que la respuesta en frecuencia también se vea afectada.

III. RESULTADOS DE CASOS DE ESTUDIO

Los casos de estudio que se proponen consideran la variación de carga al circuito equivalente. Para cada valor de carga se obtiene el espectro de frecuencias de la red, tomando como punto de medición la interconexión de la carga con la red eléctrica. La siguiente tabla muestra los porcentajes y tipos de carga empleados en este estudio.

TABLA II  
PORCENTAJES DE VARIACIÓN DE CARGA

Casos	P	Q
1	5% al 100%	5% al 100%
2	0%	5% al 100% inductiva

Los resultados obtenidos por los estudios realizados en el sistema para cada nivel de carga se grafican para visualizar mejor el comportamiento de la impedancia en la frecuencia ante variación de carga.

A. Caso 1

Para el primer caso, la potencia real P, así como la potencia reactiva Q de la carga del sistema se varían desde un 5% hasta 100% con respecto a la carga nominal (100 MW y 75 MVARs). Para obtener una representación más exacta del comportamiento de la impedancia en el espectro de resonancia la variación de carga se realiza en intervalos de 5%.

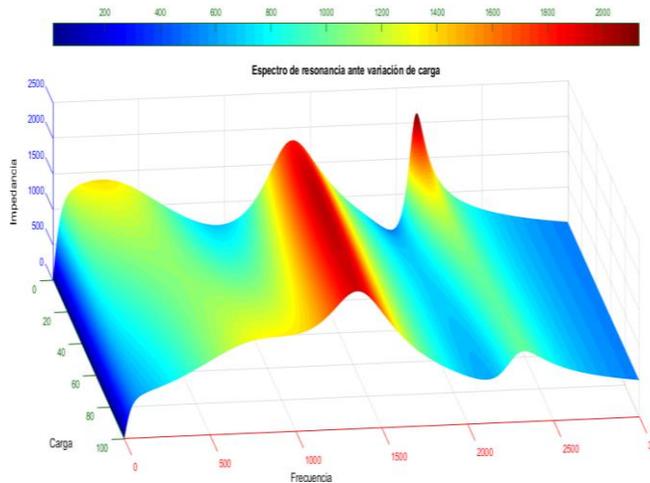


Figura 10. Espectro de resonancia ante variación de carga

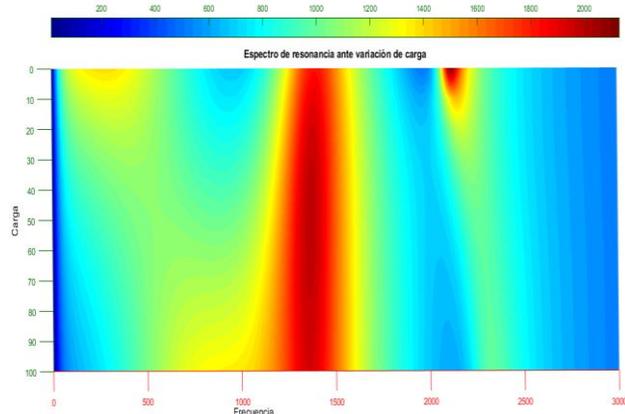


Figura 11. Vista superior del espectro de resonancia

Al visualizar los resultados gráficos se aprecia que cuando existe menor carga, aparece con mayor intensidad una resonancia paralelo a la frecuencia de 2200 Hz, mientras que a la frecuencia de 1400 Hz se aprecia de menor intensidad. Así mismo, se aprecia un ligero incremento de resonancia paralelo a baja frecuencia, alrededor de los 250 Hz. Respecto a la resonancia serie, solo se aprecia que existe a una frecuencia cercana a los 2000 Hz. Por otro lado, cuando existe incremento de carga, se visualiza una modificación importante al espectro de frecuencias, por lo que el espectro armónico debe ser analizado en este aspecto.

**B. Caso 2**

En este caso, se considera no tomar en cuenta la potencia real P de la carga, por lo que solo se tiene potencia reactiva en el sistema. La potencia reactiva en forma de una carga inductiva de igual forma se varía desde un 5% hasta un 100% con respecto a la carga reactiva nominal en intervalos de 5% entre cada nivel de carga. La potencia real P de la carga se ha omitido para visualizar el impacto

que puede llegar a representar una carga puramente inductiva en el comportamiento de la impedancia.

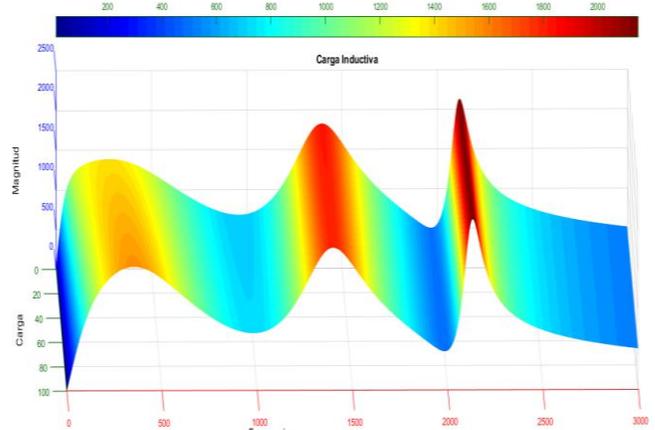


Figura 12. Espectro de resonancia ante variación de carga inductiva

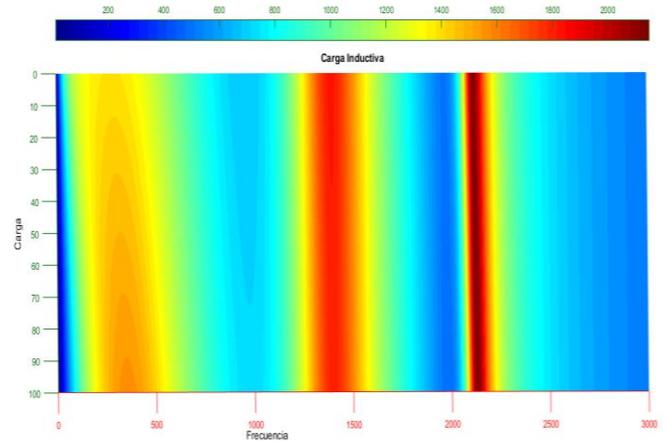


Figura 13. Vista superior del espectro de resonancia de carga inductiva

Al no considerar la parte resistiva de la carga para este caso, la cual actúa como un amortiguador ante las resonancias que puedan existir en el sistema, los resultados obtenidos a través de las gráficas demuestran un comportamiento diferente de la impedancia en la frecuencia con respecto al caso anterior. Al no tener una parte resistiva que ayude a amortiguar las resonancias existentes, el comportamiento de la impedancia no es afectado considerablemente ante la variación de carga, ya que, ante las condiciones extremas de operación, es decir ante un 5% y un 100% el valor de la impedancia es casi la misma a lo largo del espectro de frecuencia, a excepción del pequeño cambio que existe en la primera resonancia paralelo que se ubica alrededor de los 250 Hz. En la primera frecuencia de resonancia paralelo, con una carga inductiva al 5%, se visualiza que ocurre cercano a los 250 Hz mientras que con una carga máxima inductiva la resonancia paralelo ocurre a los 350 Hz. Las otras dos

resonancias paralelo ocurren a la misma frecuencia sin importar el nivel de carga con el que cuente el sistema.

#### IV. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos del estudio de resonancias ante la variación de carga, se concluye de manera general que el comportamiento de la impedancia operacional de la red eléctrica depende del nivel de carga de potencia activa o real con el que esta opere. Sin embargo, cuando no existe potencia real que ayude a amortiguar las resonancias que se puedan llegar a presentar en el sistema, la impedancia de este tendrá un comportamiento similar sin importar el nivel de carga inductiva.

#### V. REFERENCIAS

- [1] Francisco C. De La Rosa (2006). *Harmonics and Power System*, Taylor and Francis.
- [2] J.C Das (2015). *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, IEEE- Wiley.
- [3] *IEEE Recommended Practice and Requerements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Standard 519- 2014.
- [4] William D. Stevenson (1996). *Power System Analysis*. McGraw-Hill Education.
- [5] Norman Balabanian (1969). *Electrical Network Theory*. John Wiley & Sons.
- [6] Norman Balabanian. (1964). *Linear Network Analysis*. John Wiley & Sons

#### VI. BIOGRAFÍA



**Martínez Morales Samuel.** Nació en Torreón Coahuila el 8 de Junio de 1995. Egresado del Instituto Tecnológico de la Laguna de la carrera de Ingeniería Eléctrica en Diciembre de 2016 Torreón Coahuila México. Actualmente estudia una maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en la línea de investigación en potencia y energías renovables. Sus áreas de investigación son la calidad de la energía eléctrica, así como la incorporación de fuentes renovables a redes eléctricas.



**Sellschopp Sánchez Francisco Sergio.** Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Tecnológico de La Laguna en 2003 en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Él actualmente forma parte de la planta académica del posgrado de Ingeniería Eléctrica del TecNM/Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, Coahuila, México. Sus áreas actuales de investigación son máquinas y redes eléctricas, calidad de la energía e incorporación de fuentes renovables a redes eléctricas.



**Loera Palomo Rodrigo.** Obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica en 2007 en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en 2013 en la misma institución. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de la Laguna. Sus áreas de investigación corresponden a los sistemas electrónicos de potencia, reguladores conmutados de alta frecuencia y teoría de control aplicada a sistemas electrónicos de potencia.



**Rivero Corona Michel.** Doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Investigador adscrito al CONACYT - Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de La Laguna. Las líneas de interés del Dr. Rivero es la dinámica de fluidos, implementación de modelos para la estimación y predicción del potencial eólico y solar, flujos magnetohidrodinámicos, Procesamiento Electromagnético de Materiales.



**Vargas Salas Ricardo.** Nació en Torreón Coahuila el 7 de Agosto de 1949. Egresado de la carrera del Instituto Tecnológico de la Laguna de la carrera de Ingeniería Industrial con opción en Eléctrica en Julio de 1971 en Torreón Coahuila México. Obtuvo el grado de M.C. en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey en Junio de 1975. Candidato al grado en Ingeniería Eléctrica de la Sección de graduados de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional. Él es profesor investigador del Departamento de Estudios de Posgrado en Investigación del ITL en la ciudad de Torreón Coahuila. Sus áreas de interés incluyen el control de máquinas eléctricas, estudios de estabilidad, Sistemas eléctricos de potencia. El M. C. Vargas ha participado en varias ocasiones en diferentes congresos, entre los cuales se encuentran recientemente RVP-AI del IEEE en 2013 y el CNIES también en 2013.