

**METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA EL ANÁLISIS DE FENÓMENOS DE  
RESONANCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA EL ANÁLISIS DE FENÓMENOS DE  
RESONANCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**AUTOR:  
JESSICA DAYANA BASANTES VIDAL**

**TUTOR:  
CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**

**Quito D.M., febrero de 2021**

Jessica Dayana Basantes Vidal

**METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA EL ANÁLISIS DE FENÓMENOS DE RESONANCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Jessica Dayana Basantes Vidal** (Y'1995). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio ITSE “Consejo Provincial de Pichincha” de la ciudad de Quito. Egresada de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el estudio de Metodologías de Cálculo para el Análisis de Fenómenos de Resonancia en Sistemas Eléctricos de Potencia. [jbasantesv@est.ups.edu.ec](mailto:jbasantesv@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Carlos Andrés Barrera Singaña** (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en 2013. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Zaragoza, España, donde obtuvo el título en Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética con Especialidad en Sistemas Eléctricos. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. [cbarrera@ups.edu.ec](mailto:cbarrera@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

©2021 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA EL ANÁLISIS DE FENÓMENOS DE RESONANCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA* realizado por Jessica Dayana Basantes Vidal, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., febrero de 2021



.....  
Carlos Andrés Barrera Singaña

C.C.: 0503503336

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Jessica Dayana Basantes Vidal, con documento de identificación N° 1753091451, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA EL ANÁLISIS DE FENÓMENOS DE RESONANCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Eléctrica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., febrero de 2021



.....  
Jessica Dayana Basantes Vidal

C.C.: 1753091451

## ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN .....	2
2	MARCO TEÓRICO .....	3
2.1	Resonancia en sistemas eléctricos.....	3
2.1.1	Resonancia serie .....	4
2.1.2	Resonancia en paralelo.....	4
2.2	Causas de la resonancia.....	5
2.3	Problemas ocasionados por resonancia .....	5
2.4	Mitigación de resonancias .....	5
2.4.1	Técnicas de mitigación.....	6
2.4.1.1	Detección de voltaje por Filtros Activos .....	6
2.4.1.2	Filtro Activo - Circuito Inversor Bypass .....	6
2.5	Métodos de cálculo de resonancias .....	6
2.5.1	Barrido de Frecuencia .....	6
2.5.2	Análisis Modal .....	7
2.5.2.1	Autovalores y Autovalores .....	7
2.5.2.2	Análisis Modal para la Resonancia Armónica .....	8
2.5.2.3	Aplicaciones .....	9
2.5.3	Análisis de respuesta en la frecuencia.....	9
2.5.3.1	Cálculo.....	10
2.5.3.2	Diagrama de Bode .....	10
2.5.3.3	Valor pico de Resonancia .....	11
2.5.4	Análisis en el dominio del tiempo.....	11
2.5.5	Análisis aproximado en el dominio de la frecuencia .....	11
3	DISCUSIÓN.....	11
4	MÉTODO PROPUESTO .....	13
4.1	Implementación en DIgSILENT PowerFactory.....	13
4.1.1	DPL .....	13
4.2	Metodología de Análisis.....	13
4.3	Sistemas de prueba .....	14
4.3.1	Sistema 1 .....	14
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	14
6	CONCLUSIONES .....	15
6.1	Trabajos futuros.....	15

7	REFERENCIAS .....	16
7.1	Matriz de Estado del Arte.....	19
7.2	Resumen de Indicadores.....	22
8	ANEXOS.....	24



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circuito con Resonancia Serie [24] .....	4
Figura 2. Circuito con Resonancia Paralelo [24].....	5
Figura 3. Resonancia Serie y Paralelo [27].....	5
Figura 4. Filtro Activo - Eliminación de Resonancia [31].....	6
Figura 5. Circuito Bypass [32] .....	6
Figura 6. Representación gráfica de la entrada y respuesta en estado estable [41] .....	9
Figura 7. Estructura de un comando DPL [44] .....	13
Figura 8. Diagrama de flujo que presenta la metodología empleada para la obtención resonancia armónica.....	13
Figura 9. Diagrama del sistema IEEE de 14 barras .....	14
Figura 10. Impedancia Armónica – Barra 6.....	14
Figura 11. Impedancia Armónica – Barra 8.....	14
Figura 12. Impedancia Armónica – Barra 9.....	15
Figura 13. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte .....	22
Figura 14. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	23
Figura 15. Indicador de solución - Estado del arte.....	23

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cuadro comparativo de las Metodologías de Cálculo para Resonancia en Sistemas Eléctricos de Potencia. ....	12
Tabla 2. Resonancia Armónica - Barra 6.....	14
Tabla 3. Resonancia Armónica – Barra 8 .....	14
Tabla 4. Resonancia Armónica - Barra 9 .....	15
Tabla 5. Matriz de Estado del Arte .....	19
Tabla 6. Datos del Sistema IEEE de 9 barras.....	24

# METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA EL ANÁLISIS DE FENÓMENOS DE RESONANCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

## Resumen

El fenómeno de resonancia puede presentarse en un sistema eléctrico de potencia, el cual es causado por la presencia de armónicos en la red, los mismos que son producidos por cargas no lineales (ej.: sistemas apoyados en electrónica de potencia), por lo que su impedancia no es constante y generan resultados indeseados poniendo en riesgo la calidad de energía hacia los consumidores. Por tanto, hoy en día se están llevando a cabo investigaciones para entender la naturaleza, como las consecuencias que estas ocasionan en las redes eléctricas. Este estudio es esencial porque este fenómeno puede lograr dañar el circuito de la instalación eléctrica ya que conduce valores de corriente y voltaje elevados. Por esta razón hay varios métodos para estudiar la resonancia, pero el emplearlos no es del todo sencillo. El presente documento está enfocado en una revisión bibliográfica e investigación de los métodos para calcular la resonancia armónica y a continuación se realiza un análisis comparativo de los mismos, además se propone una nueva metodología la cual ayuda a detectar la resonancia en el SEP de una manera más sensible sin omitir ningún componente, esto se realiza en el software DigSILENT PowerFactory en el sistema de prueba de 9 barras de IEEE.

**Palabras Clave:** Resonancia armónica, análisis de resonancia, calidad de energía, análisis modal, barrido de frecuencia, mitigación.

## Abstract

The resonance phenomenon can occur in an electrical power system, which is caused by the presence of harmonics in the network, the same ones that are produced by non-linear loads (eg: systems supported by power electronics), therefore their impedance is not constant, and they generate undesired results putting the quality of energy to consumers at risk. Therefore, nowadays research is being carried out to understand nature, such as the consequences that these cause in electrical networks. This study is essential because this phenomenon can damage the circuit of the electrical installation since it conducts high current and voltage values. For this reason, there are several methods to study resonance, but using them is not entirely easy. This document is focused on a bibliographic review and investigation of the methods to calculate the harmonic resonance and then a comparative analysis of the same is carried out. In addition, a new methodology is proposed which helps to detect the resonance in the SEP in a more sensitive way without omitting any components. This is done in DigSILENT PowerFactory software on the IEEE 9-bus test system.

**Keywords:** Harmonic resonance, resonance analysis, power quality, modal analysis, frequency sweep, mitigation.

# 1 Introducción

En los sistemas eléctricos de potencia, a lo largo de los últimos años se ha generado mayor inquietud por la distorsión de las ondas de corriente y voltaje en barras y alimentadores, fundamentalmente a la inmersión intensa de la electrónica de potencia en las redes industriales, de grandes hornos de arco, instalaciones de computadoras y equipo electrónico de control. Para aprovechar las ventajas de la tecnología de equipos electrónicos que ayudan a aumentar la productividad, bienestar y peculio de energía es preciso asignar medidas que sobrelleven a sustentar los sistemas eléctricos con una apropiada calidad de energía y así ayudar a aumentar la productividad, bienestar y ahorro de energía [1]-[2].

La operación correcta de las redes eléctricas requiere de algunos elementos, uno de ellos es la ya mencionada calidad de energía la cual se ocupa a todos los armónicos exceptuando los fundamentales y representa a la calidad de oscilación eléctrica, (normas descritas en las directrices nacionales). Este análisis se divide en dos: análisis de excitación y de resonancia, el artículo se centra en el análisis de resonancia y las herramientas de cálculo de la misma [3].

Es por esto que a causa del uso de estas cargas no lineales, como transformadores, motores, sobrecalentamiento de cables, fenómenos de resonancia, sobrecalentamiento de cables, etc., la calidad en el suministro de energía ha ido empeorando [4], lo que han llevado a realizar múltiples investigaciones enfocadas en el evento causante de la resonancia en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), los cuales dieron a conocer que los valores de voltaje y corriente son muy altos y llegan a estropear el SEP [5], [6].

La razón primordial por lo que la gente está interesada en la investigación de la calidad energética, es la economía. Aumentado el número de cargas sensibles a los cambios en los parámetros de la fuente de alimentación. En este sentido, no solo se ven afectados los consumidores domésticos o empresariales, sino también los consumidores industriales y las propias empresas de suministro y distribución de energía, que en la mayoría de los casos, los consumidores de energía y las empresas de suministro y distribución de energía utilizan tecnología electrónica de potencia [7].

La calidad de las formas de onda de voltaje es importante para las empresas de suministro de energía, los fabricantes de equipos eléctricos y los consumidores de energía. La forma de onda de voltaje deseada es una onda sinusoidal pura con una frecuencia y amplitud determinadas. Los inversores y los hornos de arco eléctrico producirán una variedad de componentes armónicos, estos componentes armónicos reducirán la calidad de la energía proporcionada, aumentarán la pérdida de energía y reducirán la confiabilidad del sistema de energía [8]-[9], [10].

Para estipular si existe una buena calidad de servicio de energía es necesario conocer con seguridad la magnitud y tipo de armónicos que se encuentran presentes en la red y la fuente que los produce, con el propósito de determinar la medida remedial más apropiada [7]-[11].

En teoría tanto el voltaje y la corriente en una barra de suministro de energía eléctrica presentan formas sinusoidales, pero en realidad, estas ondas están deformadas respecto a la forma ideal en términos de distorsión armónica [12].

Con un punto de conexión bastante débil de la planta y una monumental proporción de convertidores electrónicos de potencia, los inconvenientes de calidad

de la energía y la excitación armónica tienen la posibilidad de provocar perturbaciones en la red. Por consiguiente, los puntos de resonancia serían encontrados, y la compensación armónica de las frecuencias de resonancia crítica podría aplicarse con el apoyo del estudio [13]. Para los diferentes análisis de resonancia de las redes eléctricas, existen varias herramientas que permiten calcular las impedancias armónicas y frecuencias de resonancia. Un enfoque simple es una exploración de frecuencia de las impedancias armónicas equivalentes de los nodos eléctricos [14].

Es importante pasar por un método de solución que asegure que las magnitudes de operación cumplan las características de equipos estandarizados y que las sobrevoltajes por efecto de armónicos no filtrados sean resistibles [15].

Los resultados de la medición de armónicos existentes en la red se pueden utilizar para cuantificar la distorsión de las formas de onda de corriente y voltaje en uno o más puntos del sistema eléctrico.

En los últimos tiempos el conocer y estudiar el origen y la influencia de las fuentes armónicas en los sistemas eléctricos ha despertado grandemente el interés de los investigadores, pero, aunque no exista una propuesta completamente aceptada en la industria eléctrica, diversos trabajos han sido elaborados para remediar los problemas involucrados, lo que se usará de sustento para futuras investigaciones [16].

El presente documento aborda las diferentes metodologías que ayudan a detectar las fuentes armónicas presentes en los sistemas eléctricos de potencia.

En adelante el artículo se ha estructurado de la siguiente manera: en la sección II se pretende realizar una revisión en torno a la resonancia, tipos, causas, problemas que ha ocasionado y la teoría y exposición de las metodologías

para el análisis del fenómeno de resonancia. En la sección III se desarrolla la discusión de las diferentes metodologías. En la sección IV se propone un método de cálculo y simulaciones en el sistema de prueba. En la sección V se realiza el análisis de resultados obtenidos para los casos de estudio. En último lugar, en la sección VI se establecen las conclusiones y futuros trabajos.

## **2 Marco teórico**

### **2.1 Resonancia en sistemas eléctricos**

La resonancia armónica es la conexión accidental de una señal de voltaje a una frecuencia armónica, se refiere a la condición en la que la magnitud de la variable obtiene el valor máximo posible, cuando el sistema recibe una señal de excitación cuya frecuencia es igual a la frecuencia natural del sistema físico, esto expone al equipo a sobrevoltajes o sobrecorrientes elevadas. Este suceso trae como consecuencia un aumento en el esfuerzo eléctrico de los equipos instalados [17]-[18].

Por otro lado, cuando las partes imaginarias de impedancias o la admisión de componentes del circuito se anulan entre sí, se produce la resonancia eléctrica en el circuito con un ancho de banda particular, que se puede utilizar para ajustar el factor de potencia en la red eléctrica, a partir de elementos eléctricos como capacitores y transformadores. El circuito resonante genera un zumbido y genera mayor voltaje y corriente, esto puede hacer que el sistema sea inestable y se acompañe de un gran cambio en su fase de oscilación [19]-[20].

La captación de la frecuencia de resonancia en el sistema eléctrico logra causar la desconexión expuesta de los disyuntores, fallas del mecanismo de

control, fallas del transformador y problemas con los capacitores e incluso los fusibles y las celdas de la batería que se queman sin razón aparente. En muchos de los casos se producen salidas y también daños de equipos como el transformador y fallos de generadores.

La resonancia se encuentra estrechamente relacionado con las propiedades eléctricas de los componentes del circuito, como lo es la inductancia que está en cables, reactores transformadores, y máquinas eléctricas. Por otra parte, estos componentes tienen características capacitivas porque están referenciados a tierra [17]-[21], [22].

Por cuanto la resonancia armónica, existen dos posibilidades básicas: resonancia en serie y resonancia en paralelo.

### 2.1.1 Resonancia serie

La resonancia serie llega a estar presente cuando ocurre una alteración, durante la operación del sistema como una falla de fase a tierra. De igual manera aparece cuando la reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva [17]- [22], [23].

Cuando el capacitor equivalente está conectado en serie con la reactancia equivalente del sistema, también puede ocurrir resonancia en serie, creando así una ruta de baja impedancia para la circulación de corrientes armónicas [24].

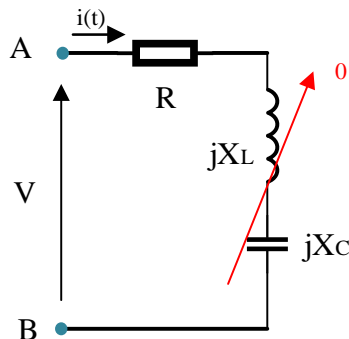


Figura 1. Circuito con Resonancia Serie [24]

La impedancia de entrada del circuito, por ley de Kirchhoff está dada por:

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

Donde  $\omega$  tiene un valor de  $\omega = 2\pi f$  y es la frecuencia angular del circuito, y  $Z$  en magnitud es:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2)$$

Se dice que el circuito está en resonancia cuando  $X_L = X_C$  o también  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  y  $R$  queda básicamente limitada por las variables del circuito [23]-[17], [25].

Por lo tanto, la resonancia viene dada por:

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \quad (3)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

$\omega_0$  es la frecuencia angular natural de resonancia, y  $\omega_0 = 2\pi f$  por consiguiente:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [Hz] \quad (5)$$

En resonancia, la energía se almacena en inductores y condensadores, y solo se disipa en resistencias. Además, la corriente que pasa a través del circuito de resonancia está en fase con el voltaje de la fuente de alimentación [17].

### 2.1.2 Resonancia en paralelo

El estudio de resonancia en paralelo es similar al de resonancia en serie, el cual se puede realizar por medio de la impedancia o admitancia, cual sea el caso se obtendrá el mismo resultado.

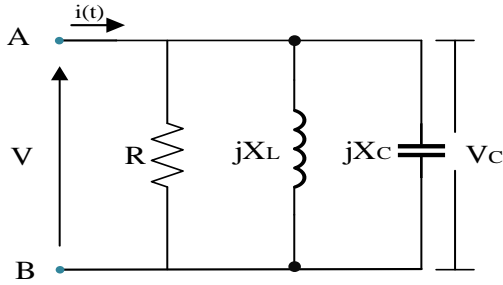


Figura 2. Circuito con Resonancia Paralelo [24]

En la Figura 2,  $i(t)$  viene dada por  $i(t) = \frac{v(t)}{Z}$ , por lo tanto la impedancia de del circuito, está dada por:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{jX_L} + \frac{1}{jX_C}} \quad (6)$$

Y la magnitud de  $Z$ , se puede hallar en términos de la admitancia, con la siguiente ecuación:

$$Y = Z^{-1} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2} \quad (7)$$

Sabiendo que la resonancia se da cuando  $\frac{1}{X_L} = \frac{1}{X_C}$ ; y la ecuación (7) lleva a  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , siendo la frecuencia de resonancia. Como se puede notar la frecuencia de resonancia es igual en la conexión serie y paralelo.

Pero a pesar de esta conclusión, el comportamiento en el circuito es diferente debido a que, alcanza un valor máximo en lugar de un valor mínimo, siendo  $Z$  infinito, y el sistema se comporta como circuito abierto [5]-[26].

En la Figura 3 se puede observar la resonancia serie y la resonancia en paralelo, la resonancia serie ocurre cuando  $X_L = X_C$  y se caracteriza por que su impedancia es más pequeña y el ángulo de fase cero (valles), en tanto que la resonancia en paralelo se caracteriza porque su impedancia es

aproximadamente alta (picos) y produce un voltaje relevante para  $V_C$  y  $V_L$ .

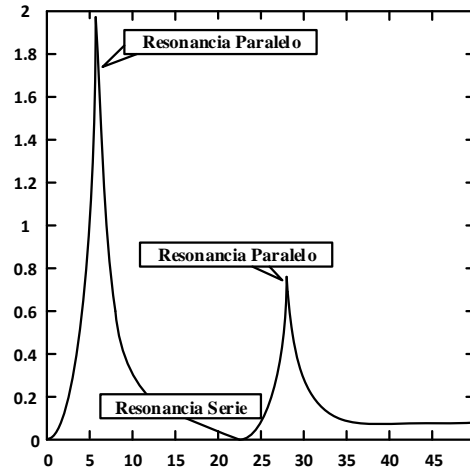


Figura 3. Resonancia Serie y Paralelo [27]

## 2.2 Causas de la resonancia

La primordial causa de la resonancia armónica es el espectro de voltajes no sinusoidales en diferentes puntos del sistema. Son causados por la corriente distorsionada que circula por las líneas. La circulación de estas corrientes ocasiona una caída de tensión deformada, evitando que la tensión de onda sinusoidal pura llegue a los nodos del sistema [27].

## 2.3 Problemas ocasionados por resonancia

Cuanto más grande sea la corriente armónica que circula a través del sistema de energía, mayor será la distorsión de voltaje en el nodo del circuito y lo que ocasionará que el problema sea más grave y colosal. Los voltajes no sinusoidales son responsables de muchas consecuencias que pueden dañar los equipos conectados al sistema. Estos efectos incluyen acortar la vida útil de los equipos eléctricos, así como reducir su eficiencia y funcionamiento general [27]-[28].

## 2.4 Mitigación de resonancias

Según la escala y el funcionamiento de la industria, es necesario la mitigación de

resonancia. Los efectos negativos como el disparo falso de las protecciones, la reducción de la vida útil del equipo y el funcionamiento ineficiente de los mismos disminuirán la rentabilidad de la industria. El diseño adecuado del tamaño del equipo de mitigación consigue reducir los costos de inversión, al igual que los costos de operación y mantenimiento de la industria [29]-[30].

### 2.4.1 Técnicas de mitigación

Hoy en día se dispone de varias técnicas de mitigación de resonancia, que se muestra a continuación:

#### 2.4.1.1 Detección de voltaje por Filtros Activos

En esta técnica se recomienda conectar varios filtros activos de detección de voltaje para aminorar los voltajes armónicos en los sistemas eléctricos de potencia [31]. La siguiente figura muestra cómo instalar estos filtros.

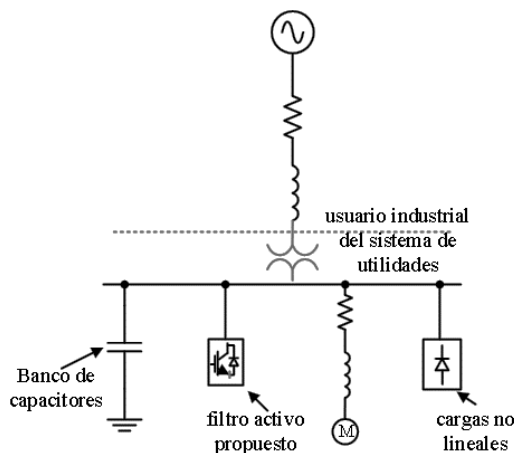


Figura 4. Filtro Activo - Eliminación de Resonancia [31]

El filtro activo actúa como una conductancia armónica en el sistema, con tipos de polarización armónica.

#### 2.4.1.2 Filtro Activo - Circuito Inversor Bypass

Esta técnica se basa en la conexión de un transformador base en paralelo con un

transformador principal y a su vez con el transformador en serie y con un filtro LC y el inversor PWM. La función del filtro LC es extraer las corrientes armónicas que son causadas por las cargas no lineales, por otro lado, para evitar que la resonancia de corriente armónica se conduzca entre la fuente de alimentación del sistema y el filtro LC, el inversor PWM es dirigido para que se comporte como resistor de amortiguamiento [31]. Seguidamente, se muestra el diagrama esquemático de la mitigación de resonancia armónica.

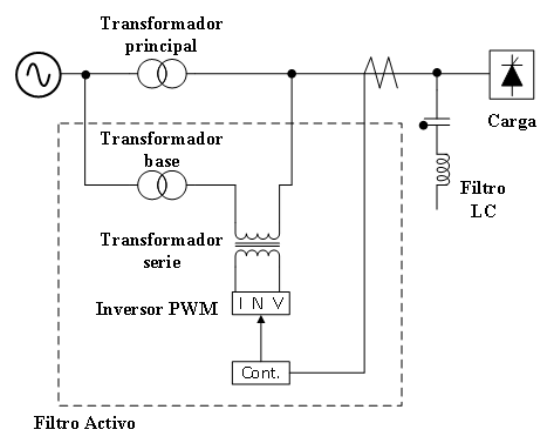


Figura 5. Circuito Bypass [32]

## 2.5 Métodos de cálculo de resonancias

Para el análisis del fenómeno de resonancia existen diferentes métodos que son:

### 2.5.1 Barrido de Frecuencia

Este método es usado para un análisis preliminar, que implica calcular la reactancia y la resistencia equivalente de la red a diferentes frecuencias vistas desde el rotor del generador. Realizar un barrido de frecuencia es el primer paso en la investigación de resonancia armónica y uno de los métodos más simples. El desarrollo de un barrido de frecuencia es un diagrama de Bode de la impedancia del sistema en el punto de inyección de armónicos, el cual es equivalente al

desarrollo gráfico de la impedancia a analizar versus la frecuencia [15].

El cálculo se trata de resolver la expresión matricial [15], [32]:

$$U^{(f)} = Z^{(f)} \cdot I^{(f)} \quad (8)$$

Donde

$U^{(f)}$ : vector de voltajes

$Z^{(f)}$ : matriz de impedancia

$I^{(f)}$ : vector de inyecciones corriente, para cada frecuencia.

En un análisis se conoce que del vector  $I^{(f)}$  solo el elemento k tiene valor unitario, en tanto que los demás son cero, de tal manera que el vector resultante  $U^{(f)}$  corresponderá a la columna k de la matriz de impedancia a esa frecuencia.

$$U^{(f)} = Z^{(f)} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,k}^{(f)} \\ \vdots \\ Z_{k,k}^{(f)} \\ \vdots \\ Z_{n,k}^{(f)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Los elementos de la matriz  $U_k^{(f)}$ , constituyen el voltaje de frecuencia en el nodo k el cual pertenece a la impedancia equivalente de Thevenin del nodo k,  $Z_{k,k}^{(f)}$ , el cual es producido en el nodo k cuando es introducida una corriente unitaria de tal frecuencia en dicho nodo. Mientras que los elementos de  $U_m^{(f)}$ , con condición  $m \neq k$ , es el voltaje de frecuencia del nodo m por una corriente inyectada en el nodo k, pertenece a la impedancia  $Z_{m,k}^{(f)}$ . Después de este proceso, se consiguen las características de frecuencia de impedancia equivalente e impedancia de transferencia [32].

Determinar la matriz de impedancia de cada frecuencia de la red como la inversa de la matriz de admitancia  $Y^{(f)}$ , la cual se realiza con los modelos establecidos para

diferentes elementos del sistema eléctrico [32]-[33].

Este método como antes se mencionaba es el estudio más eficiente para hallar resonancias en los sistemas eléctricos, generalmente este método es utilizado para secuencia positiva y secuencia cero de la red y también ha sido abundantemente usada para diseñar filtros.

Empleando el barrido de frecuencia, la contribución de cada fuente armónica a la distorsión de la red se puede calcular dentro de un intervalo de tiempo [15]-[34].

### 2.5.2 Análisis Modal

Pese a que se conoce las causas de la resonancia, los métodos de su análisis son escasos y el método de barrido de frecuencia es el más usual para hallar la existencia de resonancia, pero infortunadamente este no presenta la información adicional para solucionar el problema porque no manifiesta claramente la causa raíz de este fenómeno.

#### 2.5.2.1 Autovalores y Autovectores

Los autovalores (eigenvalores) y los autovectores (eigenvectores) permiten el desarrollo y cálculo de los sistemas matriciales los cuales son de sumo apoyo. A continuación, se resume el cálculo de los mismos [27].

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

El autovalor es la raíz del polinomio característico, que es el resultado del determinante de la matriz.

Donde A es una matriz cuadrada y  $\lambda$  es el autovalor de A, es decir que  $\lambda$  es la raíz de la ecuación del determinante de la



matriz  $(\lambda I - A) = 0$ , I matriz identidad [27].

$$\det[A - \lambda I] = \quad (11)$$

$$(a_{11} - \lambda)(a_{11} - \lambda) \cdots (a_{nn} - \lambda) = 0$$

Para encontrar los autovalores se debe resolver el sistema de ecuaciones del determinante  $(A - \lambda I) * X = 0$ , donde se hallan las raíces del polinomio.

$$[A - \lambda I] \cdot [X] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

Es necesario reemplazar los valores de  $\lambda$  para hallar la matriz de autovectores  $[X]$  y de la misma manera solucionar cada valor de  $\lambda$  del sistema  $[A - \lambda I] \cdot [A - X] = 0$  para encontrar autovectores y crear la matriz con valores de  $\lambda$  [27]-[35].

### 2.5.2.2 Análisis Modal para la Resonancia Armónica

Para el siguiente análisis para los nodos se utiliza la siguiente ecuación:

$$[V_f] = [Y_f]^{-1} \cdot [I_f] \quad (13)$$

Donde:

$V_f$ : voltaje nodal

$Y_f$ : Y de barra

$I_f$ : inyección de corriente, para cada frecuencia, el cual es 1.0 p.u.

En el método de análisis modal, dado que el comportamiento de la frecuencia ayuda a determinar el desarrollo del método, varios elementos del vector de voltaje tienen valores muy grandes [35].

La matriz  $[Y]$  se compone de la siguiente manera [27]:

$$[Y] = [L][\Lambda][T] \quad (14)$$

Donde:

$\Lambda$ : matriz diagonal de eigenvalores

L y T: matrices de autovectores izquierdo y derecho.

$$[Y]^{-1} = [L][\Lambda]^{-1}[T] \quad (15)$$

$$L^{-1} = T$$

$$[T][V] = [\Lambda]^{-1}[T][I] \quad (16)$$

Vector de voltajes modal

$$[U] = [T][V] \quad (17)$$

Vector de corrientes modal

$$[J] = [T][I] \quad (18)$$

Se simplifica en:

$$[U] = [\Lambda][J] \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_n^{-1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Este análisis se realiza para cada frecuencia que sea múltiplo de la frecuencia fundamental y haya presencia de resonancia armónica.

La matriz de impedancia modal se compone de unidades de impedancia la cual es la inversa de los autovalores. En (16) se puede determinar que al ser un autovalor cero o mucho más pequeño, la inversa del mismo será muy grande y una inyección de corriente modal dará lugar a un alto voltaje modal, esto es, flujo de corriente modal en  $J_1$  crea un mayor voltaje modal  $U_1$  [6]. Este flujo e corriente no alterará a los otros voltajes modales porque no preexiste unión entre los nodos, en otros términos, en el dominio modal es posible determinar la ubicación de resonancia [27].

Para un mayor entendimiento entre las conexiones de voltaje y corriente nodales,  $J_1$  y  $U_1$  se descompone de (17) y (18).

$$J_1 = T_{11}J_1 + T_{12}J_2 + T_{33}J_3 + \dots + T_{1n}J_n \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{21} \\ \dots \\ L_{n1} \end{bmatrix} \cdot U \quad (22)$$

De (21) se determina que los valores de los nodos  $T_{11}, T_{12}$ , etc., son los que poseen “excitabilidad” de resonancia, mientras que de la ecuación (22) se halla el nodo que tiene más “observabilidad”, en otras palabras el nodo en que la resonancia es vista [27]-[2].

En definitiva, el autovector derecho indica los nodos en donde existen sobrevoltajes armónicas, en cambio que el eigenvector izquierdo indica desde cuales nodos se puede excitar la resonancia, lo cual ayuda a resolver el problema [27]-[5].

### 2.5.2.3 Aplicaciones

Este método además de hallar los voltajes en los nodos a partir de sus eigenvalores también puede ser aplicado para lo siguiente [5]:

- Determinación del circuito equivalente Thévenin.
- Análisis de estabilidad dinámica (ecuaciones diferenciales).
- Estudio de estabilidad de tensión [36].
- Diagnóstico de fallas en máquinas [37].
- Análisis en tiempo real de oscilaciones de potencia [38].

### 2.5.3 Análisis de respuesta en la frecuencia

Respuesta en la frecuencia alude a la respuesta en estado estable de un sistema

que se encuentra sujeto a una señal sinusoidal amplitud y a una variable de frecuencia que varía en un cierto rango [39]. En el método de respuesta de frecuencia, la frecuencia de la señal de entrada cambia dentro de un cierto rango para analizar la respuesta del resultado [1].

El principio de estabilidad de Nyquist nos ayuda a encontrar su estabilidad relativa y absoluta a partir de las características de frecuencia de bucle abierto de los sistemas lineales de bucle cerrado [40].

Una ventaja del método de respuesta de frecuencia es que la prueba de respuesta de frecuencia suele ser simple y directa, y puede ser muy precisa utilizando generadores de señales sinusoidales estándar y equipos de medición exactos. La función de transferencia de componentes complejos generalmente se determina experimentalmente mediante pruebas de respuesta de frecuencia [41].

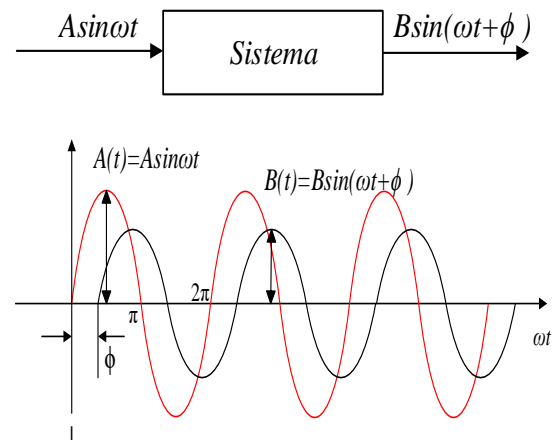


Figura 6. Representación gráfica de la entrada y respuesta en estado estable [41]

La información que se consigue por el análisis sinusoidal es utilizada para plantear la naturaleza de la respuesta a varias señales, así mismo es beneficioso para el mando analítico y experimental [39].

### 2.5.3.1 Cálculo

Cuando un sistema tiene una entrada sinusoidal  $A(t) = A \sin(\omega t)$  la respuesta en estado estable se calcula substituyendo en la función de transferencia  $s$  por  $j\omega$  [39].

$$G(s) \rightarrow G(j\omega) \quad (23)$$

Después  $B(t) = B \sin(\omega t + \phi)$  la respuesta en estado estable se consigue de un valor complejo representa como:

$$|M(\omega)| = |G(j\omega)| = \sqrt{Im^2 + Re^2} \quad (24)$$

$$\phi(\omega) = \angle G(j\omega) = \tan^{-1} \left( \frac{Im}{Re} \right) \quad (25)$$

Donde:

Im: parte imaginaria  $G(j\omega)$

Re: parte real  $G(j\omega)$

$M(\omega) = \frac{B}{A}$ : relación de amplitud

$\phi(\omega)$ : ángulo de fase

Si el ángulo de fase es negativo quiere decir que existe un atraso de fase y en el caso de ser positivo entonces se conoce como adelanto de fase [41].

Respuesta en estado estable se expresará de la siguiente manera:

$$M(\omega) A \sin(\omega t + \phi(\omega)) \quad (26)$$

Regularmente se emplean 3 tipos de gráfica para representar las funciones de transferencia senoidales:

1. Diagrama de Bode o gráficas logarítmicas
2. El gráfico de magnitud logarítmica contra la fase
3. Diagrama de Nyquist o traza polar

### 2.5.3.2 Diagrama de Bode

Para realizar el diagrama de Bode debe conocer sus factores básicos, como:

Ganancia (K): al ir variando esta ganancia, aumentar o disminuir afecta a la

curva de fase. Si la ganancia tiene un valor mayor a 1 entonces en decibelios serán valores positivos, mientras que si tiene valores menores los valores serán negativos. Una amplitud de  $20 \log K$  [dB] quiere decir que existe una ganancia  $K$  constante y su curva de magnitud será una recta horizontal [41]-[42].

Factores integrales y derivativos: la amplitud logarítmica en dB de  $1/j\omega$  es [41]:

$$20 \log \left| \frac{1}{j\omega} \right| = -20 \log \omega \text{ dB} \quad (27)$$

Ángulo de fase es  $-90^\circ$  y es constante.

La magnitud es una recta iguala a  $-20$  dB/década y  $\omega = 1$  con  $0$  dB.

En el caso de la función de transferencia sea  $(j\omega)^{\pm n}$  su magnitud es [39]:

$$20 \log \left| \frac{1}{(j\omega)^n} \right| = -n \times 20 \log \omega \text{ dB} \quad (28)$$

Factores de primer orden: la magnitud de este factor es:

$$20 \log \left| \frac{1}{1 + j\omega\tau} \right| = -20 \sqrt{1 + \omega^2\tau^2} \quad (29)$$

$$\phi = -\tan^{-1} \omega\tau$$

En frecuencia bajas  $\omega \ll \tau$

$$20 \log \left| \frac{1}{1 + j\omega\tau} \right| \approx -20 \sqrt{1} \text{ dB} = 0 \text{ dB} \quad (30)$$

$$\phi = 0^\circ \text{ cuando } \omega = 0$$

En frecuencias altas  $\omega \gg \tau$

$$-20 \log \sqrt{1 + \omega^2\tau^2} = -20 \log \omega\tau \text{ dB} \quad (31)$$

$$\phi = -90^\circ \text{ cuando } \omega = \infty$$

Frecuencia de corte  $\omega_c = 1/\tau \rightarrow \phi = -45^\circ$  Otros factores: estos tienen [41].

$$G(j\omega) = \frac{1}{-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) + 1} \quad (32)$$

Con una magnitud logarítmica de:

$$20 \log \frac{1}{-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) + 1} \quad (33)$$

$$= -20 \log \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\xi\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

Y su ángulo de fase:

$$\phi = -\tan^{-1} \frac{2\xi\omega_n}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}} \quad (34)$$

En frecuencia bajas  $\omega \ll \omega_n$

$$20 \log \left| \frac{1}{-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) + 1} \right| \quad (35)$$

$$\approx -20\sqrt{1} d = 0dB$$

$$\phi = 0^\circ \text{ cuando } \omega = 0$$

En frecuencia altas  $\omega \gg \omega_n$

$$20 \log \frac{\omega^2}{\omega_n^2} = -40 \log \frac{\omega}{\omega_n} dB \quad (36)$$

$$\phi = -180^\circ \text{ cuando } \omega = \infty$$

Frecuencia de corte  $\omega = \omega_n \rightarrow \phi = -90^\circ$ .

### 2.5.3.3 Valor pico de Resonancia ( $M_r$ ):

Cuando la función del denominador alcanza el valor mínimo, se obtendrá la amplitud de la función cuadrática en el pico de frecuencia  $\omega_r$ , este valor se calcula [41]:

$$M_r = 20 \log \frac{1}{2\xi\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (37)$$

Cumpliendo con:

$$M_r = 1 \text{ para } \xi \geq 0,0707 \text{ y}$$

$$M_r = \infty \text{ para } \xi \rightarrow 0$$

Frecuencia de Resonancia  $\omega_r$ : frecuencia con el valor de magnitud máximo [41], se calcula:

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (38)$$

$$\text{para } 0 < \xi < 0,707$$

Mientras  $\xi$  se aproxime a 0 la frecuencia de resonancia tiende a  $\omega_n$  y si  $\xi < 0,707$  no habría pico de resonancia.

Fase de frecuencia de resonancia:

$$\angle GH(j\omega_r)^\circ = -\tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{1 - 2\xi^2}}{\xi} \right\} \quad (39)$$

### 2.5.4 Análisis en el dominio del tiempo

Para este tipo de análisis se emplean programas que ayudan al cálculo de la respuesta transitoria, como por el ejemplo el programa de transitorios electromagnéticos [1] el cual está apoyado en el algoritmo de Dommel, que se conoce como “Método EMTP”(Electro Magnetic Transients Program), a su vez el método ajusta el “Método de características” con “Regla trapezoidal” en un algoritmo general, puede simular con precisión transitorios en una red que involucran parámetros agrupados y parámetros distribuidos [43].

### 2.5.5 Análisis aproximado en el dominio de la frecuencia

El análisis en el dominio de la frecuencia concede ver y estudiar el sistema de control desde otro ángulo, además examina la estabilidad individual de cada modo [27].

## 3 Discusión

A medida que aumenta la carga no lineal en los consumidores conectados al sistema de energía, provoca una distorsión de la corriente, que se manifiesta en una distorsión de voltaje, que repercute a otros usuarios conectados

a la red de distribución de energía. El problema en este ámbito es comprobar la fuente de distorsión para procurar una mejor calidad de energía, ya sea de distribuidoras o usuarios conectados a la red.

En esta sección se desarrolla un cuadro comparativo acerca de los diferentes

métodos estudiados para el cálculo de resonancia.

Tabla 1. Cuadro comparativo de las Metodologías de Cálculo para Resonancia en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Metodologías de Cálculo para Resonancia en Sistemas Eléctricos de Potencia			
Barrido de Frecuencia	Análisis Modal	Análisis de Respuesta en la Frecuencia	Análisis en el Dominio del tiempo
Es la técnica más simple y empleada mide la respuesta de frecuencia de la red, y se ha empleado para diseñar filtros, por lo general, se inyecta 1 p.u. de corriente de una frecuencia determinada en el nodo de deseado y se calcula el voltaje que aparece en ese nodo. Repita este cálculo para el rango de frecuencia estudiado, utilizando un cierto incremento para el paso de frecuencia utilizado. La matriz de impedancia se halla con la inversa de la matriz de admitancia la cual se realiza con los diferentes modelos establecidos del sistema eléctricos.	Uso de autovalores y autovectores los cuales dan más información referido a las diferentes frecuencias implicadas en el modelo para solucionar el problema ya que manifiestan claramente la causa-raíz de este fenómeno. Este método trabaja con frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental	La prueba de respuesta puede ser muy precisa utilizando generadores de señales sinusoidales estándar y equipos de medición exactos. Las funciones de transferencia se hallan mediante pruebas experimentales, y también facilita el diseño de sistemas repeliendo los efectos de ruido y sistemas no lineales de control. Los métodos gráficos (análisis) pueden deducir características de estabilidad y comportamiento.	Para este tipo de análisis existen programas como el EMTP Electro Magnetic Transients Program” consigue simular con precisión transitorios en una red que involucran parámetros agrupados y parámetros distribuidos, usado el algoritmo de Dommel.

## 4 Método propuesto

### 4.1 Implementación en DIGSILENT PowerFactory

#### 4.1.1 DPL

DIGSILENT (Programming Language) tiene como objetivo principal proporcionar una interfaz para trabajos automatizados realizadas en la herramienta de cálculo PowerFactory. Esta interfaz admite el acceso a comandos y objetos procesados por DIGSILENT, así como a funciones y variables creadas por los usuarios [44].

En la entrada del programa, puede predefinir los parámetros de entrada del objeto del diagrama unifilar de la base de datos o de un grupo de elementos u objetos, estos parámetros se almacenan interiormente y se nombran "selección regular". Puede utilizar funciones y variables internas para evaluar esta entrada [44].

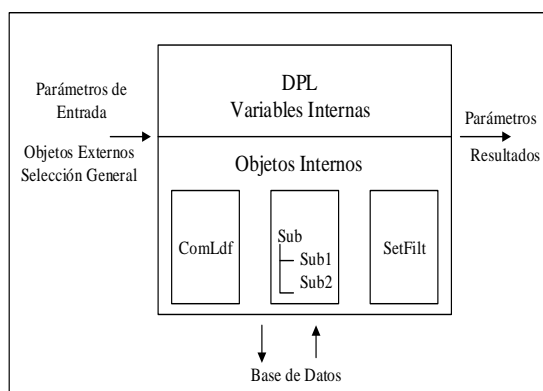


Figura 7. Estructura de un comando DPL [44]

### 4.2 Metodología de Análisis

Para la elaboración de esta metodología se toma en consideración una serie de pasos para conseguir los resultados correctos esperados. En la sección 5 se muestran los resultados de las simulaciones a través del software DIGSILENT PowerFactory.

Para alcanzar los objetivos trazados se establece la siguiente metodología, la cual

será llamada Barrido de frecuencia sensible:

1. Obtención de toda la información generada por la red de estudio.
2. Encontrar el equivalente Thevenin en el nodo k, (secuencia positiva) tomando en cuenta cada uno de los componentes del SEP.
3. Uso del modelo para impedancia en paralelo, presentado en [45].
4. Efectuar el análisis de barrido de frecuencia sensible de la siguiente manera:
  - 4.1. Se propone realizarlo en un intervalo de [0: 0,001: 4000], para 3 barras del sistema, con la finalidad de conseguir mayor sensibilidad y los probables casos de resonancia que se puedan presentar en la red.
5. Resultados en el software DIGSILENT PowerFactory.

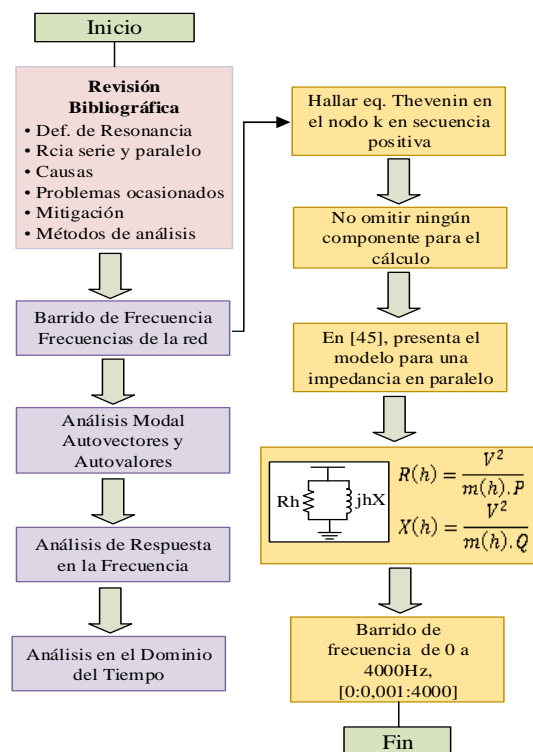


Figura 8. Diagrama de flujo que presenta la metodología empleada para la obtención de resonancia armónica.

### 4.3 Sistemas de prueba

Para verificar los probables casos de resonancia armónica en la red aplicando la metodología descrita, se emplea el modelo en el sistema de prueba IEEE de 9 barras de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

#### 4.3.1 Sistema 1

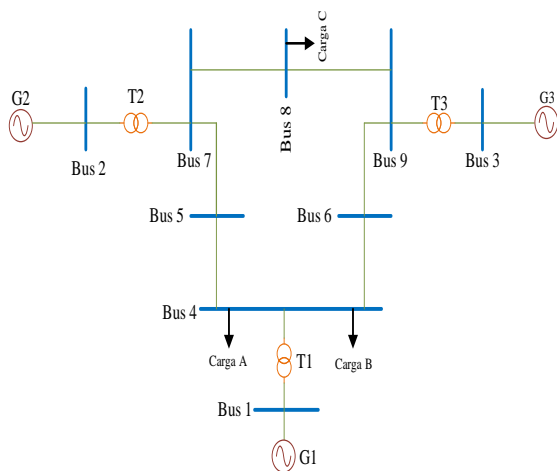


Figura 9. Diagrama del sistema IEEE de 9 barras

## 5 Análisis de resultados

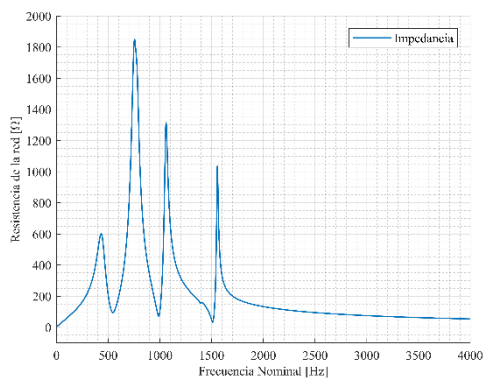


Figura 10. Impedancia Armónica – Barra 6

En la Figura 10 se presentan 4 frecuencias de resonancias correspondiente a puntos de resonancia paralelo, lo cual produce un aumento de voltaje y corriente que llega a producir inestabilidad en el sistema mientras que los puntos más bajos equivalen a resonancia serie la cual puede provocar distorsiones de voltaje.

Tabla 2. Resonancia Armónica - Barra 6.

Barra 6	
Resonancia	
	Frecuencia (Hz)
Paralelo	258.228
	451.841
	634.841
	931.777
Serie	343.911
	594.740
	904.282
	974.004

La siguiente figura muestra la metodología de barrido de frecuencia sensible para la barra 8.

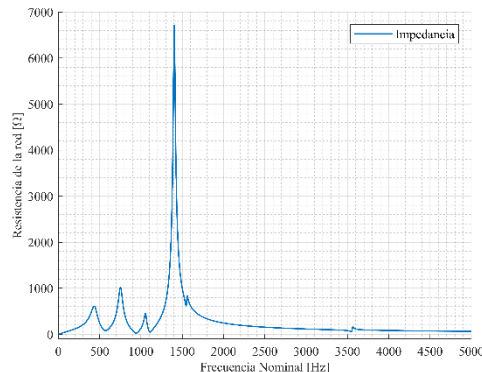


Figura 11. Impedancia Armónica – Barra 8

En la Figura 11 se puede apreciar un pico bastante alto de frecuencia de resonancia que representa a punto de resonancia paralelo, que produce un aumento de voltaje y corriente produciendo inestabilidad en el sistema mientras que los puntos más bajos equivalen a resonancia serie la cual puede provocar distorsiones de voltaje.

Tabla 3. Resonancia Armónica – Barra 8.

Barra 8	
Resonancia	
	Frecuencia (Hz)
Paralelo	260.685
	450.714
	632.321

	841.050
	348.007
Serie	565.044
	668.301
	925.991

La siguiente figura muestra la metodología de barrido de frecuencia sensible para la barra 9.

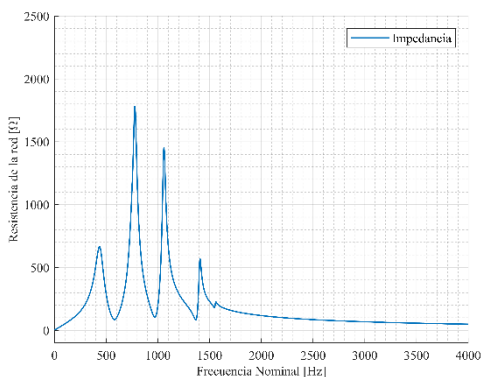


Figura 12. Impedancia Armónica – Barra 9

En la Figura 12 se observa 3 picos de frecuencia de resonancia que representan a puntos de resonancia paralelo, que produce un aumento de voltaje y corriente produciendo inestabilidad en el sistema mientras que los puntos bajos equivalen a resonancia serie la cual puede provocar distorsiones de voltaje.

Tabla 4. Resonancia Armónica – Barra 9.

Barra 9	
Resonancia	
	Frecuencia (Hz)
Paralelo	263.962
	466.535
	633.780
	845.607
	348.826
Serie	582.042
	821.748
	924.762

## 6 Conclusiones

De acuerdo con la calidad del servicio y la calidad de la energía brindada, se analizó la influencia de la resonancia armónica en la calidad de la energía.

Lo principal para la mitigación de resonancia armónica es la utilización de filtros los cuales se desarrollan de acuerdo con criterios como topología, capacidad de potencia, tipo de convertidor, número y tipo de elementos.

Se puede concluir a través de la simulación que la metodología de barrido de frecuencia sensible es el más útil y sencilla para el estudio de resonancia armónica en el sistema eléctrico de potencia y es de mucha ayuda ya que permite analizar la amplitud de resonancia en cada método. Adicionalmente es posible determinar los nodos afectados por la frecuencia de resonancia, comprobando cual impedancia tiene el mayor valor, al analizar la magnitud de la impedancia se determina cuál de los nodos tiene mayor observabilidad y excitabilidad.

Para realizar el análisis modal para la detección de resonancia es necesario trabajar con frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental, mientras que para el análisis de respuesta en la frecuencia necesita de pruebas experimentales y equipos de medición exactos y el análisis en el dominio del tiempo requiere del software EMPT para encontrar la resonancia armónica.

### 6.1 Trabajos futuros

Los resultados alcanzados en el presente trabajo puede ser el comienzo para llevar a cabo investigaciones relacionadas a las siguientes temáticas:



- Investigación sobre la inserción de filtros pasivos para eliminar o mitigar los efectos de los armónicos.
- Simulaciones con filtros activos.
- Configurar diferentes tipos de cargas no lineales.

## 7 Referencias

- [1] A. Mendoza Viveros, "Análisis de Resonancia Subsíncrona y Contar medidas," 2004.
- [2] Y. Cui and W. Xu, "Harmonic resonance mode analysis using real symmetrical nodal matrices," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1989–1990, 2007.
- [3] A. Neufeld, D. Heide, and L. Hofmann, "Calculation of Series Resonance Frequencies in Electrical Grids Using Resonance Mode Analysis," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2019-Decem, pp. 2–5, 2019.
- [4] J. Barros, M. De Apraiz, and R. I. Diego, "Measurement of subharmonics in power voltages," *2007 IEEE Lausanne POWERTECH, Proc.*, no. May, pp. 1736–1740, 2007.
- [5] A. I. Delgove and L. S. Saperá, "Programa para el estudio de resonancias en circuitos eléctricos Escola Tècnica Superior d' Enginyeria Industrial de Barcelona," pp. 1–35, 2019.
- [6] N. Eduardo and V. Salazar, "Análisis de Resonancia Armónica en Sistema de Distribución con Alta Penetración de Energía Eólica," pp. 21–45, 2016.
- [7] E. O. Morales Garcia and J. L. Rodriguez Gonzales, "Solución a los Problemas de Corrientes y Voltajes Armónicos en los Sistemas Industriales," 2012.
- [8] Z. Leonowicz, "Analysis of subharmonics in power systems," *2010 9th Conf. Environ. Electr. Eng. EEEIC 2010*, pp. 125–127, 2010.
- [9] D. Lin, T. Batan, E. F. Fuchs, and W. M. Grady, "Harmonic losses of single-phase induction motors under nonsinusoidal voltages," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 11, no. 2, pp. 273–279, 1996.
- [10] T. Lobos and J. Rezmer, "Real-time determination of power system frequency," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 46, no. 4, pp. 877–881, 1997.
- [11] J. M. Gers, "Teoría y diseño de filtros de armónicos en sistemas eléctricos Theory and design of harmonic filters for electrical systems," *Investig. Apl. e innovación*, vol. 2, no. 1, 2008.
- [12] J. D. Arcila, "Armónicos En Sistemas Eléctricos," *Armónicos En Sist. Eléctricos*, pp. 1–26, 2016.
- [13] S. Munir, S. Member, Y. W. Li, and S. Member, "Compensation Scheme Using Power Electronics Interfaced DGs," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1191–1203, 2016.
- [14] J. Arrillaga, B. C. Smith, N. R. Watson, and A. R. Wood, "Power system harmonic analysis," *Power Syst. Harmon. Anal.*, pp. 1–369, 2013.
- [15] A. Mujtaba, "Metodologías para identificar fuentes armónicas en sistemas eléctricos," vol. 67, no. 6, pp. 14–21, 2007.
- [16] E. T. Ramírez, "Distorsión armónica," *AP&C*, no. 222, p. 31.
- [17] Job Garcia Paredes, "Estudio del Fenómeno de Resonancia en el

- Sistema Eléctrico de Potencia de Complejos Procesadores de Gas,” 2004.
- [18] J. Garca and G. Garc, “Resonance in Electrical Power Systems of Petrochemical Plants,” *Petrochemicals*, 2012.
- [19] P. Esquivel, C. E. Castañeda, F. Ornelas-Tellez, and E. N. Reyes, “Empirical estimation approach to the study of inter-area resonance interactions in power systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 169, no. September 2018, pp. 150–161, 2019.
- [20] L. Monjo, L. Sainz, J. Liang, and J. Pedra, “Study of resonance in wind parks,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 128, pp. 30–38, 2015.
- [21] F. J. M. V. y P. M. J. García Paredes, O. A. Reyes Martínez, “Fallas en transformadores de potencial en conexión delta abierta.” Decimaquinta Reunión de Verano de Potencia RVP, IEEE Sección México, 2002.
- [22] F. Crespo, “Sobretensiones en las redes de alta tensión.” Asinel. España, 1975.
- [23] J. A. Halladay and C. H. Shih, “Resonant Overvoltage Phenomena Caused by Transmission Line Faults,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. PER-5, no. 9, pp. 51–52, 1985.
- [24] S. L. Potos, S. El, and L. Rosas, “Análisis Modal de Resonancia Armónica,” 2018.
- [25] G. T. Heydt, L. A. Kraft, S. Member, and W. Lafayette, “A Method to Analyze Voltage Resonance in Power Systems,” no. 5, pp. 1033–1037, 1984.
- [26] N. Trabajo *et al.*, “Xvi Conimera - 2005.”
- [27] C. Eduardo, C. Jiménez, C. Eduardo, and C. Jiménez, “Análisis de Resonancia Armónica en Sistemas Eléctricos,” p. 232, 2007.
- [28] G. O. Jiménez, “Armónicos: Cálculo de la Potencia Reactiva para la Implementación de Bancos de Condensadores en Cargas Aisladas.,” *Univ. Nac. Colomb.*, 2008.
- [29] C. Sankaran, *Power quality*. Boca Raton London New York Washington, D.C., 2002.
- [30] J. R. C. Peñaranda, “Armónicos y Mitigación,” pp. 1–5, 2019.
- [31] A. D. E. Filtros, H. Para, and E. L. Control, “Aplicación de filtros híbridos para el control de distorsion armonica en los sistemas de potencia industriales,” pp. 1–81, 2010.
- [32] I. P. Abril, “Barrido de frecuencia en coordenadas de fase Frequency scan on phase-coordinates,” *Rev. Científica Ing. Energética*, vol. 33, no. 1, pp. 35–45, 2012.
- [33] S. J. Ranade, “Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks, Part 1: Concepts, models, and simulation techniques,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 16, no. 1, p. 65, 1996.
- [34] I. Carhuapoma Acosta, *Calidad del servicio de energía eléctrica*, vol. 2, no. 1. 2006.
- [35] W. Xu, Z. Huang, Y. Cui, and H. Wang, “Harmonic resonance mode analysis,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2 I, pp. 1182–1190, 2005.
- [36] H. Al-Saadi, J. Zhao, Z. Jianwu, Y. Wang, and C. Wang, “Voltage stability evaluation by using extended modal analysis with dynamic internal impedance of synchronous generators,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*,

- vol. 2016-Novem, no. 1, 2016.
- [37] Z. Liguó, W. Yutian, Z. Sheng, and H. Guangpu, "The fault diagnosis of machine based on modal analysis," *2009 Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom. ICMTMA 2009*, vol. 1, no. 5, pp. 738–741, 2009.
- [38] T. Hiyama and N. Suzuki, "Real time modal analysis of power system oscillations," *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, vol. 4, pp. 225–228, 2000.
- [39] B. Bello, "Análisis de la respuesta de frecuencia." p. 22.
- [40] J. P. T. Portillo, "Respuesta de sistemas lineales e invariantes en el tiempo," *Introd. a las señales y Sist.*, pp. 43–72, 2017.
- [41] S. D. E. C. Autom and T. Daci-e-pn, "Sistemas de control automático daci-e-pn," pp. 1–20.
- [42] L. Zhu, X. Hu, and S. Li, "High-Frequency Resonance of DFIG-Based Wind Generation under Weak Power Network," *2018 Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON 2018 - Proc.*, no. 201804270000739, pp. 2719–2724, 2019.
- [43] E. P. D. E. Administración, M. Luz, and H. Choquehuanca, "Metodología para Análisis de Fenómenos de Resonancia Subsíncrona en un Sistema Eléctrico de Potencia.," *El Método Singapur Para La Enseñanza Del Concepto Número En Los Estud. Prim. Grado Educ. Primaria Del Col. "San Fr. Asís Arequipa"*, pp. 1–45, 2014.
- [44] E. A. Moreno and V. H. Hinojosa, "Análisis De Estabilidad Transitoria Para El Sistema Eléctrico Ecuatoriano Utilizando Redes Neuronales Artificiales," *Rev. Técnica "Energía"*, vol. 5, no. 1, 2009.
- [45] N. M. Calderón, "Simulación de flujos de potencia con presencia de contenido armónico usando el método frecuencial," 2020.

## 7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 5. Matriz de Estado del Arte.

METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA EL ANÁLISIS DE FENÓMENOS DE RESONANCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA																								
DATOS					TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	RESONANCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS	RESONANCIA SERIE Y PARALELO	PROBLEMAS OCASIONADOS POR RESONANCIA	CAUSAS DE LA RESONANCIA	CALIDAD DE LA ENERGÍA	MITIGACIÓN DE LA RESONANCIA	CÁLCULO DE RESONANCIA	CASO DE ESTUDIO	DISTORSIÓN DE LAS ONDAS	INESTABILIDAD DEL SEP	MODELACIÓN DE LOS COMPONENTES	TÉCNICAS DE MITIGACIÓN	DISTORSIONES DE SEÑAL	BARRIDO DE FRECUENCIA	ANÁLISIS MODAL	ANÁLISIS DE RESPUESTA EN LA FRECUENCIA	ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	MITIGACIÓN DE RESONANCIA	BARRIDO DE FRECUENCIA SENSIBLE	
1	2004	Analisis de Resonancia Subsíncrona y Contarmedidas	México	0	X			X	X	X		X		X		X		X					X	
2	2007	Harmonic resonance mode analysis using real symmetrical nodal matrices,	Canada	20		X	X						X	X						X				X
3	2019	Calculation of Series Resonance Frequencies in Electrical Grids Using Resonance Mode Analysis	Macao	5	X		X	X			X					X	X				X			
4	2007	Measurement of subharmonics in power voltages	España	11	X			X	X			X		X		X								X
5	2019	Programa para el estudio de resonancias en circuitos eléctricos Escola Técnica Superior d ' Enginyeria Industrial de Barcelona	España	0	X		X				X						X		X			X		
6	2016	Analisis de Resonancia Armónica en Sistema de Distribucion con Alta Penetración de Energía Eólica	Colombia	0	X	X		X	X				X		X	X								
7	2012	Solución a los Problemas de Corrientes y Voltajes Armónicos en los Sistemas Industriales	México	0						X					X						X	X		
8	2010	Analysis of sub-harmonics in power systems	República Checa	4		X		X			X		X				X	X						X
9	1996	Harmonic losses of single-phase induction motors under nonsinusoidal voltages	EEUU	32		X		X	X	X		X				X								X
10	1997	Real-time determination of power system frequency	Polonia	175		X									X	X	X							
11	2008	Teoría y diseño de filtros de armónicos en sistemas eléctricos Theory and design of harmonic filters for electrical systems,	Perú	0			X		X	X		X			X		X		X			X		X
12	2016	Armónicos En Sistemas Eléctricos	Colombia	0		X			X	X						X	X							

13	2016	Compensation Scheme Using Power Electronics Interfaced DGs	Canada	19				X							X	X		X		X
14	2013	Power system harmonic analysis	EEUU	0				X	X			X			X			X		X
15	2007	Metodologías para identificar fuentes armonicas en sistemas electricos	Colombia	0			X	X			X					X				
16	2010	Distorsion armonica	México	0					X									X		X
17	2004	Estudio del Fenómeno de Resonancia en el Sistema Eléctrico de Potencia de Complejos Procesadores de Gas	México	0			X								X	X				
18	2010	Resonance in Electrical Power Systems of Petrochemical Plants	México	0				X	X	X								X		X
19	2019	Empirical estimation approach to the study of inter-area resonance interactions in power systems	México	12		X			X			X			X	X				
20	2015	Study of resonance in wind parks	España	6			X	X			X				X		X			X
21	2002	Fallas en transformadores de potencial en conexión delta abierta	México	14						X				X						X
22	1975	Sobretensiones en las redes de alta tensión	España	0		X		X	X						X			X		X
23	1985	Resonant Overvoltage Phenomena Caused by Transmission Line Faults	EEUU	1						X			X			X	X			X
24	2018	S. L. Potos, S. El, and L. Rosas, "Análisis Modal de Resonancia Armónica	Colombia	0		X			X	X	X				X				X	
25	1984	A Method to Analyze Voltage Resonance in Power Systems	EEUU	4					X				X			X		X		X
26	2005	Xvi Conimera - 2005	Perú	0		X				X			X			X			X	
27	2007	Análisis de Resonancia Armónica en Sistemas Eléctricos	Colombia	0		X	X								X	X				X
28	2008	Armónicos: Cálculo de la Potencia Reactiva para la Implementación de Bancos de Condensadores en Cargas Aisladas	Colombia	0				X	X		X					X			X	X
29	2002	Power quality	EEUU	0						X		X			X					
30	2019	Armónicos y Mitigación	Colombia	0	X					X				X			X			X
31	2010	Aplicación de filtros híbridos para el control de distorsion armonica en los sistemas de potencia industriales	Colombia	0				X		X						X			X	X
32	1999	Novel active filter system composed of inverter bypass circuit for suppression of harmonic resonance	Japón	11		X				X			X						X	
33	2012	Barrido de frecuencia en coordenadas de fase Frequency scan on phase-coordinates	EEUU	6	X				X							X	X	X		X
34	1996	Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks, Part 1: Concepts, models, and simulation techniques	EEUU	236	X					X			X		X		X			X
35	2006	Calidad del servicio de energía eléctrica	Colombia			X	X	X	X		X				X		X			
36	2005	Harmonic resonance mode analysis	Canada	93		X										X	X			X
37	2016	Voltage stability evaluation by using extended modal analysis with dynamic internal impedance of synchronous generators	EEUU	32												X			X	X
38	2009	The fault diagnosis of machine based on modal analysis	China	1	X					X						X			X	X

39	2000	Real time modal analysis of power system oscillations	China	5				X		X				X												
40	2005	Analiis de la respuesta de frecuencia	Venezuela	0						X					X	X		X		X						
41	1973	Respuesta de sistemas lineales e invariantes en el tiempo	Argentina	0		X	X			X			X	X			X			X						
42	2005	Sistemas de control automático daci-epn	Ecuador	0	X					X					X				X	X						
43	2018	High-Frequency Resonance of DFIG-Based Wind Generation under Weak Power Network	China	12		X								X			X									
44	2018	Metodología para Análisis de Fenómenos de Resonancia Subsíncrona en un Sistema Eléctrico de Potencia	Perú	0	X					X	X			X			X			X						
				CANTIDAD:																						
					11	13		10	13	9	20		15	7	9	10		9	17	15	17	5	9	12	15	14

## 7.2 Resumen de Indicadores

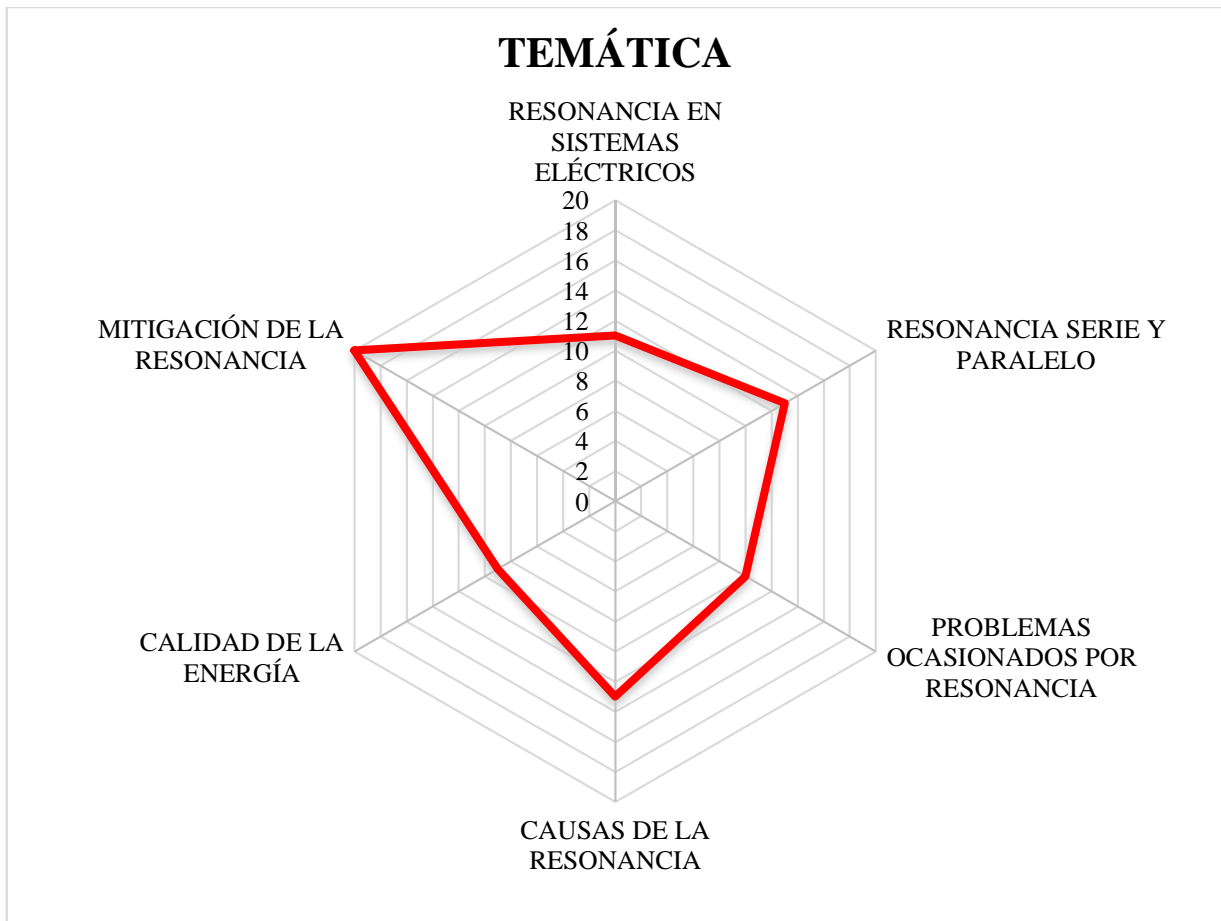


Figura 13. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte

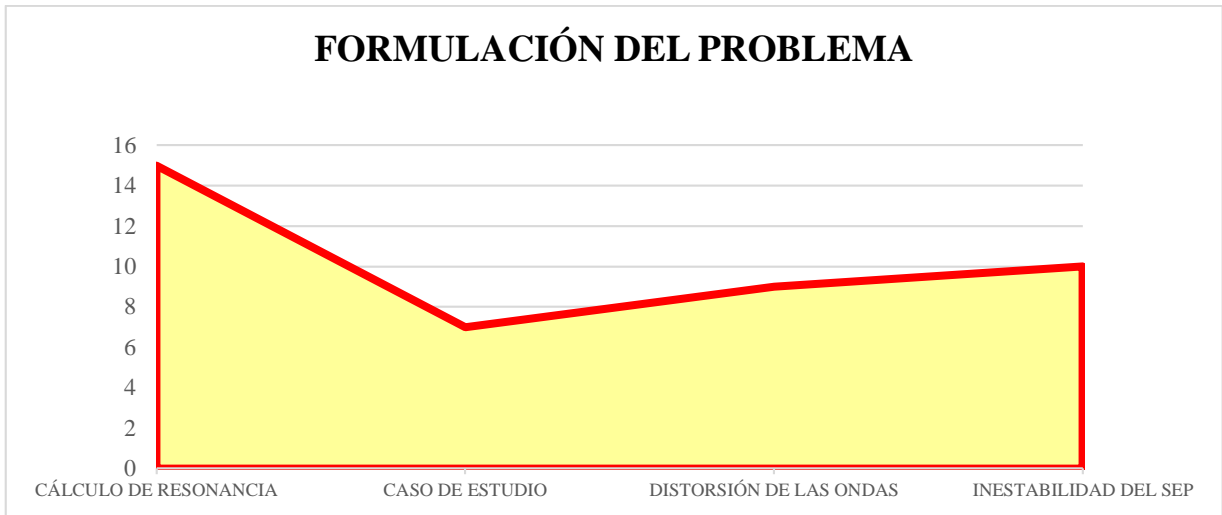


Figura 14. Indicador de formulación del problema - Estado del arte

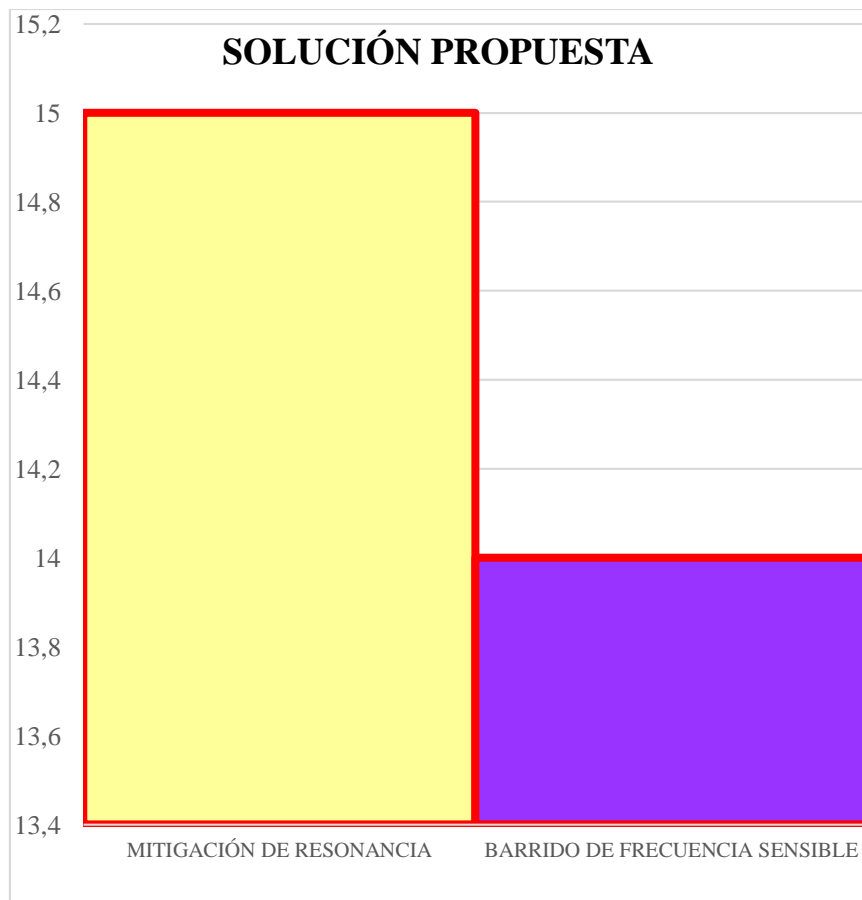


Figura 15. Indicador de solución - Estado del arte



## 8 Anexos

Tabla 6. Datos del Sistema IEEE de 9 barras.

Datos del Sistema de Potencia				
Tipo de Barras:				
1 - Barra Slack				
2 - Barra de Voltaje (P-V)				
3 - Barra de Carga (P-Q)				
4 - Barra de para control de voltaje (P-Q-V)				
Barra N°	Voltaje [p.u.]	Ángulo [rad]	Impedancia de la red [ $\Omega$ ]	Ángulo de impedancia [rad]
1	1.04	0.00	0.0955	87.50
2	1.025	0.00	0.2341	85.33
3	1.025	0.00	0.17796	85.55
4	1.025	0.00	35.320	82.31
5	0.995	0.00	53.158	76.03
6	1.012	0.00	57.564	75.941
7	1.015	0.00	45.063	81.62
8	1.032	0.00	55.359	78.27
9	1	0.00	50.840	81.86