

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS



**Análisis no lineal de oscilaciones forzadas en sistemas eléctricos
de potencia mediante un método de perturbación**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica

PRESENTA
Erick Christopher Davalos González

DIRECTOR DE TESIS
Dr. Emilio Barocio Espejo

Protocolo de investigación

1.1. Motivación

La operación de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) cada vez se vuelve más compleja debido a la interconexión de redes de gran tamaño, mayor demanda de energía y la instalación masiva de equipos basados en convertidores. Esto ha ocasionado un incremento en los eventos de oscilaciones [1]. Las oscilaciones pueden limitar la transferencia de energía, ocasionar la desconexión de elementos del sistema, dañar equipos e incluso provocar apagones masivos [2].

Las oscilaciones naturales por fallas, maniobras o variaciones aleatorias de la dinámica carga–generación se han estudiado desde los inicios de los sistemas eléctricos. En cambio, las oscilaciones forzadas aparecen de forma esporádica, suelen ser ocasionadas por fallas en controles y componentes mecánicos y persisten mientras exista la fuente externa. Cuando la frecuencia de la fuente externa coincide o se aproxima a la de un modo natural, las oscilaciones forzadas pueden amplificarse críticamente por resonancia. Sus efectos pueden ser catastróficos: en la central Sayano-Shushenskaya, 9 de 10 turbinas (6400 MW) resultaron dañadas o destruidas y murieron 75 personas, se considera que una oscilación forzada fue una de las causas principales de esta catástrofe [3].

1.2. Antecedentes

Los sistemas eléctricos de potencia mal amortiguados pueden volverse inestables o presentar oscilaciones sostenidas de forma natural. Cuando existe amortiguamiento suficiente, las oscilaciones naturales se atenúan y el sistema retorna a un punto de operación estable. Sin embargo, la presencia de una excitación externa puede mantener una oscilación en sistemas estables y amortiguados [4]. Las oscilaciones forzadas no implican inestabilidad por sí mismas sino que el riesgo surge cuando interactúan con los modos naturales del sistema.

En general, las oscilaciones forzadas pueden presentar frecuencias impredecibles dentro de un amplio espectro, aparecer y desaparecer de forma intermitente, e incluir componentes armónicas o formas de onda no senoidales, como ciclos límite o trenes de pulsos, con duraciones que van desde minutos hasta horas. La forma de onda está rela-

cionada con la naturaleza de la fuente que provoca la oscilación forzada, desde formas sinusoidales para fuentes mecánicas hasta ondas cuadradas o triangulares vinculadas a cargas cíclicas o convertidores.

Aplicar medidas de mitigación no solo mantiene la estabilidad del sistema, sino que también permite al operador reducir el desgaste de los equipos y los costos de mantenimiento [4]. La mitigación generalmente consiste en reparar o aislar la fuente de oscilación, aunque aumentar el amortiguamiento puede atenuar sus efectos. No obstante, localizar la fuente en redes eléctricas de gran tamaño sigue siendo un gran reto [5].

1.2.1. Fuentes de oscilaciones forzadas

De forma general, las fuentes de oscilaciones forzadas se pueden clasificar en 4 grupos: cargas cíclicas, unidades de generación convencional, energías renovables y cambios en la topología del sistema.

1.2.1.1. Cargas cíclicas

Diversos procesos industriales, como los de plantas cementeras, siderúrgicas y aceleradores de partículas, demandan grandes cantidades de energía de manera cíclica. En [6], J. Ness estudió la respuesta de sistemas eléctricos ante la presencia de cargas periódicas. Dichas cargas pueden inducir fluctuaciones en tensión y potencia dentro del rango de 0.3 Hz a 7.5 Hz [5]. La mayor parte del conocimiento disponible sobre el impacto de estas cargas en los SEP proviene de estudios de simulación más que de registros de campo.

1.2.1.2. Unidades de Generación Convencional

Las unidades de generación, como las térmicas, hidroeléctricas o diésel, pueden experimentar fallas o desajustes en sus sistemas de control. En particular, los reguladores de excitación (AVR y PSS) y los sistemas de control de frecuencia (gobernadores) pueden convertirse en fuentes de oscilaciones forzadas cuando fallan o están mal sintonizados. Por ejemplo, en [7] se analiza el efecto de los parámetros del AVR y del gobernador en la generación de oscilaciones forzadas sostenidas utilizando el sistema de dos áreas de Kundur. Los rangos típicos de oscilaciones forzadas asociadas a unidades de generación convencionales se sitúan entre 0.1 y 2.5 Hz.

1.2.1.3. Energías Renovables

La generación renovable, suele presentar oscilaciones vinculadas a la intermitencia de la fuente y a condiciones meteorológicas particulares. Además, los convertidores de electrónica de potencia pueden inducir distintos tipos de oscilaciones forzadas por

la interacción de sus lazos de control con la red y por acoplamientos con otros convertidores. Por otro lado, en centrales hidroeléctricas, vórtices en las tomas de agua pueden arrastrar aire hacia la turbina y provocar cavitación, originando oscilaciones electromecánicas. En [8] se documenta una oscilación forzada de 0.38 Hz en el oeste del sistema de potencia norteamericano atribuida a una central hidroeléctrica.

Los rangos de frecuencia reportados en la literatura abarcan aproximadamente de 0.1 Hz a 13.33 Hz [5]. Un evento reciente es el ocurrido el 28 de abril del 2025 en España, donde se detectó una oscilación forzada de 0.6Hz con posible origen en una planta fotovoltaica de la provincia de Badajoz, fue uno de los eventos que se presentaron momentos antes del apagón de toda España.

1.2.1.4. Cambios en la Topología del Sistema

La desconexión o reconfiguración de elementos puede fragmentar la red en subsistemas que buscan su propio equilibrio, generando respuestas oscilatorias y, en algunos casos, exacerbando oscilaciones forzadas. En [9] se señala que el islanding incompleto puede producir oscilaciones forzadas severas cuando una porción de la red queda parcialmente aislada pero aún conectada con baja fuerza de cortocircuito.

1.2.2. Resonancia forzada

La resonancia forzada se presenta cuando existe una entrada externa que interactúa con los modos de vibración naturales del sistema. A medida que la coincidencia en frecuencia aumenta, el sistema tiende a absorber en mayor medida la energía de la perturbación. Si el amortiguamiento del modo de vibración es bajo, este disipa menos energía por lo que la amplitud de la oscilación forzada será mayor a comparación del caso con buen amortiguamiento. En [8] se documenta un caso donde una oscilación forzada de 10 MW provocó una respuesta resonante de 477 MW en el sistema de dos áreas de Kundur, por lo que se puede concluir que pequeñas perturbaciones pueden crear respuestas de gran magnitud.

Los sistemas eléctricos de potencia presentan modos electromecánicos asociados a la dinámica inercial de las unidades de generación, usualmente representados por pares complejos conjugados con frecuencias típicas de entre 0.1–0.7 Hz para modos inter-área y 0.7–3 Hz para modos locales. Los modos torsionales y de control se ubican por encima de 3 Hz, de modo que la resonancia forzada puede manifestarse en un amplio rango de frecuencias, desde bajas frecuencias asociadas con componentes mecánicos hasta altas frecuencias vinculadas con dispositivos electrónicos.

1.2.3. Métodos para la detección de oscilaciones forzadas

Aunque la detección y localización de oscilaciones esta estrechamente relacionada, estas responden a preguntas diferentes, una establece la presencia de una oscilación forzada mientras que la otra identifica su origen.

1.2.3.1. Detección basada en energía

En condiciones normales, la energía contenida en las mediciones entre ventanas de datos consecutivas permanece aproximadamente constante. Cuando ocurre una oscilación forzada, se añade energía adicional en la ventana correspondiente, por lo que comparar la energía entre ventanas adyacentes permite inferir la presencia de una perturbación. En [10] se estima la energía RMS de las señales medidas y se aplican filtros para analizar bandas de frecuencia específicas, mientras que la implementación práctica de este tipo de detector se documenta en [11].

1.2.3.2. Detección basada en coherencia espectral

La coherencia espectral es una medida estadística que cuantifica, para cada frecuencia, el grado de correlación lineal entre dos señales, calculada a partir de sus densidades espectrales de potencia (PSD) y del espectro cruzado. Zhou en [12] aplicó esta técnica a mediciones de PMUs en distintas áreas del sistema occidental de Estados Unidos, demostrando mayor precisión respecto al método del periodograma. Posteriormente, en [13] se extendió el método a un solo canal de datos, desarrollando la coherencia propia, que analiza la correlación entre el dato actual y sus retardos temporales.

1.2.3.3. Detección basada en características

Los métodos basados en características pueden considerarse enfoques híbridos, ya que combinan información obtenida de mediciones con ecuaciones de un modelo analítico linealizado. En [14] se presentan diversos métodos para distinguir entre oscilaciones naturales y forzadas a partir de características específicas, los cuales se resumen en la tabla 1.1.

1.2.3.4. Método de Extracción de Potencia Dinámica de G.E Phasor Point

El método de extracción de potencia dinámica (PDX) de General Electric, se basa en la identificación autorregresiva de modos en una ventana deslizante [15]. El algoritmo rastrea de forma conjunta la evolución de frecuencia, amortiguamiento y amplitud dentro de bandas modales predefinidas. Una función clave es la identificación de armónicos, útil para distinguir entre oscilaciones naturales mal amortiguadas y excitaciones forzadas con contenido armónico.

Tabla 1.1: Métodos presentados en [14] basados en características.

Método	Principio	Tipo de dato	Criterio	Limitaciones
Envolvente de la fase inicial	Análisis de la pendiente σ , envolvente exponencial $Ae^{\sigma t}$	Valor pico-pico al inicio de la señal, datos ring-down	$S = \sigma T$: $S < 0 \rightarrow$ forzada; $S > 0 \rightarrow$ natural	Requiere capturar el inicio del evento, sensible al ruido y elección de la ventana.
Ángulo entre fasores de potencia y frecuencia	Relación entre amortiguamiento y ángulo ϕ entre los fasores P y f .	Fasores de potencia activa y frecuencia, datos ring-down	$\phi < (\phi_0 \approx 0,25\pi) \rightarrow$ forzada, $\phi > \phi_0 \rightarrow$ natural	Fiable si la oscilación es bien observable, sensible al ruido.
Índice de contenido armónico	Proporción de armónicos: $h = (m_2 + m_3)/m_1$	Transformada rápida de Fourier de datos ambiente	$h > 0,11 \rightarrow$ forzada, $h \leq 0,11 \rightarrow$ natural	No detecta oscilaciones puramente sinusoidales, no linealidades pueden generar armónicos.

1.2.4. Métodos para localizar fuentes de oscilaciones forzadas

Con el despliegue masivo de unidades de medición fasorial (PMUs) y sistemas de medición de área amplia, han surgido gran variedad de métodos impulsados por datos que no requieren un modelo detallado para localizar la fuente de la oscilación forzada. La mayoría de los enfoques y conceptos presentados se basan en [2], [5] y [16].

1.2.4.1. Flujo de potencia o energía

Los métodos basados en flujos de energía buscan identificar la fuente de la oscilación rastreando cómo fluye la energía osculatoria a través del sistema. La idea es que el elemento que produce la oscilación forzada estará inyectando energía neta al modo oscilatorio. Estudios han mostrado que sus resultados pueden ser sensibles al modelo de cargas del sistema e incluso llevar a diagnósticos erróneos en ciertos escenarios.

1.2.4.2. Modo shape y amortiguamiento

Los métodos basados en el análisis de la forma modal parten de examinar el patrón de oscilación medido en diferentes puntos de la red para inferir la ubicación de la fuente. Se asume que la fuente exhibirá la oscilación de mayor amplitud y/o con la fase más adelantada respecto a la del resto del sistema. Observaciones empíricas respaldan este criterio: se ha mostrado que el primer pico detectable de la oscilación suele aparecer en donde se origina. Este método tiende a fallar cuando existe resonancia.

En cambio, los métodos basados en amortiguamiento se enfocan en detectar qué generador presenta un coeficiente de amortiguamiento negativo en el modo dominante.

Este enfoque requiere estimar el torque eléctrico de cada máquina y su amortiguamiento. Un aspecto favorable es que identifica directamente la fuente y que puede aplicarse de forma distribuida en cada central de generación. Sin embargo, depende de datos locales y puede fallar en algunos casos de oscilaciones forzadas.

1.2.4.3. Onda viajera

El método de onda viajera asume que la onda se propaga a una velocidad casi constante por la red. Al comparar las señales de diversas PMUs, es posible detectar diferencias en el tiempo de llegada de la oscilación. Esta técnica resulta intuitiva y, en teoría, muy rápida, ya que aprovecha los primeros instantes de la oscilación para localizarla. No obstante, requieren de mediciones sincronizadas de alta resolución y equipos para mejorar la observabilidad de la red, así como algoritmos precisos, lo cual puede complicarse por ruido en los datos o múltiples oscilaciones.

1.2.4.4. Basados en modelos

Los métodos basados en modelo plantean la localización como un problema de ajuste: se prueban hipótesis de ubicación de la fuente en el modelo y se elige la que mejor explica las mediciones. Un ejemplo es el uso de observadores de estado que, partiendo de un modelo, se estima la entrada que explica la discrepancia entre la salida del modelo y la medición real. Existen otras técnicas que utilizan la matriz de impedancia de los generadores o circuitos equivalentes.

1.2.4.5. Impulsados por datos

Estos enfoques aplican técnicas de análisis estadístico sobre los registros espacio temporales del sistema para extraer patrones vinculados a la fuente del disturbio. La principal fortaleza de los métodos impulsados por datos es su independencia del modelo. No obstante, trasladan el peso a la calidad y disponibilidad de los datos. En muchos casos requieren gran volumen de datos para funcionar de forma confiable. Además, suelen carecer de la interpretabilidad física.

1.2.4.6. Inteligencia artificial (IA)

Estos métodos aplican técnicas avanzadas de aprendizaje automático, a menudo tratándolo como un problema de clasificación o regresión con base en características extraídas de los datos. Por ejemplo, un árbol de decisión entrenado fuera de línea con datos de distintas condiciones operativas. Recientemente, se han propuesto métodos de aprendizaje profundo (deep learning) que logran niveles muy altos de precisión en escenarios complejos. Los enfoques basados en IA requieren un entrenamiento exhaustivo y representativo de las condiciones esperadas en la red.

1.2.5. Métodos de análisis para oscilaciones forzadas en SEP

Para caracterizar oscilaciones forzadas de forma analítica se emplean dos enfoques: pequeña señal, que lineariza alrededor del punto de operación para revelar modos, frecuencias y amortiguamientos; y métodos de perturbación, que conservan la no linealidad y describen la evolución de la amplitud y fase del sistema.

1.2.5.1. Análisis de pequeña señal

En [17] se presenta una formulación explícita del caso multimaquina linealizado con una entrada forzada del tipo sinusoidal en el torque mecánico y se proponen criterios de distinción basados en componentes y en la forma de la envolvente, el sistema se validó en el sistema de Nueva Inglaterra con 39 buses y un caso real. Además, se demuestra que modos con menor coeficiente de amortiguamiento y mayor cercanía en frecuencia con la perturbación generan oscilaciones forzadas más intensas.

1.2.5.2. Métodos de perturbación

Los métodos de perturbación son técnicas analíticas para aproximar soluciones de sistemas no lineales, añade correcciones por un parámetro pequeño, típicamente en forma de series de potencias. Entre los enfoques más usados están el balance armónico, que calcula la respuesta periódica en régimen permanente en el dominio de la frecuencia, y el método de escalas múltiples, que introduce escalas de tiempo para eliminar términos seculares y obtener aproximaciones válidas. Estos métodos resultan útiles fuera del régimen lineal y en escenarios de resonancia, donde permiten capturar fenómenos como el desplazamiento de la frecuencia efectiva y, en osciladores no lineales típicos (tipo Duffing), bifurcaciones de la respuesta con saltos de amplitud. En [18] se aplica el método de escalas múltiples a un sistema barra bus infinito con una no linealidad cuadrática y forzamiento senoidal, se obtienen expresiones analíticas que explican los saltos de amplitud y el desplazamiento en frecuencia con respecto al sistema lineal.

1.3. Planteamiento del problema de investigación

Numerosos incidentes de oscilaciones forzadas han motivado el desarrollo de una amplia variedad de algoritmos basados en mediciones. Sin embargo, el fenómeno en sí mismo sigue siendo poco comprendido, especialmente en lo que respecta a las variables que intervienen. Además, la mayoría de los estudios analíticos y herramientas prácticas se basan en modelos lineales. Por lo que se requiere investigar de forma sistemática las características no lineales de las oscilaciones forzadas en los sistemas eléctricos de potencia.

1.4. Justificación

Las oscilaciones forzadas entre 0.1 y 2.5 Hz representan un riesgo relevante cuando su frecuencia coincide con modos poco amortiguados, generando oscilaciones sostenidas capaces de afectar la estabilidad del sistema y producir impactos sociales y económicos. En México, un evento forzado de 200 MW con una duración de 45 minutos puede afectar a cerca de 200,000 familias y generar pérdidas de 7,140,900 MXN [19]. Este fenómeno se vincula con las prioridades del PRONACE en transición energética, que busca fortalecer la confiabilidad del sistema eléctrico. La presente investigación propone un enfoque analítico basado en el análisis no lineal de un sistema eléctrico sujeto a perturbaciones periódicas para comprender su respuesta forzada y desarrollar índices que cuantifiquen interacciones entre variables y modos de vibración.

1.5. Objetivos

Analizar un sistema eléctrico de potencia no lineal mediante un método de perturbación para obtener expresiones cerradas que permitan comprender la respuesta del sistema ante entradas forzadas.

1.5.1. Objetivos específicos

- Determinar las limitaciones de los métodos tradicionales que se utilizan para estudiar sistemas eléctricos de potencia.
- Analizar un sistema eléctrico de potencia sujeto a entradas externas utilizando un método de perturbación para incluir no linealidades.
- Validar los resultados obtenidos en el análisis utilizando integración numérica y simulación en software.
- Proponer una posible acción de mitigación para oscilaciones forzadas, basada en los resultados obtenidos.

1.6. Hipótesis

Si se utiliza un método de perturbación en modelos no lineales de sistemas eléctricos de potencia forzados por entradas externas, es posible derivar expresiones cerradas que ofrezcan una comprensión predictiva y causal de los fenómenos de resonancia forzada y de su dependencia con los parámetros del sistema.

1.7. Metodología

La Fig. 1.1 presenta la metodología propuesta para desarrollar esta investigación.

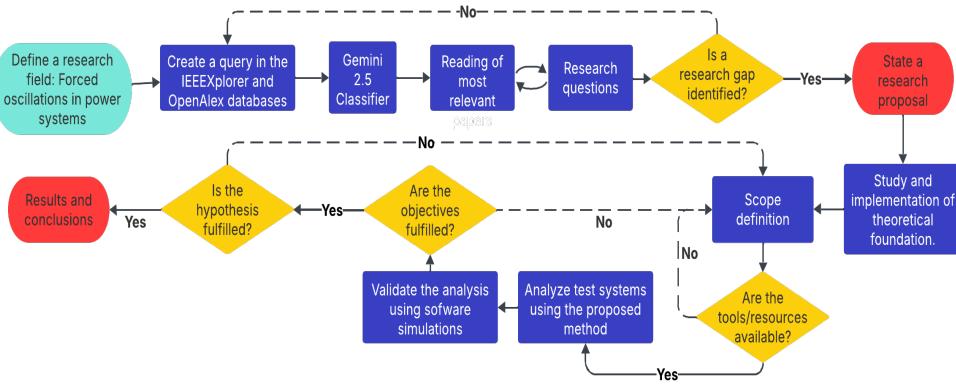


Fig. 1.1: Metodología general propuesta para el desarrollo del trabajo de investigación

Referencias

- [1] L. G. Meegahapola, S. Bu, D. P. Wadduwage, C. Y. Chung, and X. Yu, “Review on Oscillatory Stability in Power Grids With Renewable Energy Sources: Monitoring, Analysis, and Control Using Synchrophasor Technology,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 1, pp. 519–531, Jan. 2021.
- [2] Y. Chen, Z. Fan, D. Gregory, X. Zhou, and R. Rabbani, “A Survey of Oscillation Localization Techniques in Power Systems,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 28 836–28 860, 2025.
- [3] L. Zhu, W. Yu, Z. Jiang, C. Zhang, Y. Zhao, J. Dong, W. Wang, Y. Liu, E. Farantatos, D. Ramasubramanian, A. Arana, and R. Quint, “A Comprehensive Method to Mitigate Forced Oscillations in Large Interconnected Power Grids,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 22 503–22 515, 2021.
- [4] “Reliability Guideline Forced Oscillation Monitoring & Mitigation,” North American Electric Reliability Coordination (NERC), 2017.
- [5] M. Ghorbaniparvar, “Survey on forced oscillations in power system,” *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 5, no. 5, pp. 671–682, Sep. 2017.
- [6] J. Van Ness, “Response of Large Power Systems to Cyclic Load Variations,” *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.*, vol. PAS-85, no. 7, pp. 723–727, Jul. 1966.
- [7] N. L. Thotakura, C. R. Burge, and Y. Liu, “Impact of the Exciter and Governor Parameters on Forced Oscillations,” *Electronics*, vol. 13, no. 16, p. 3177, Aug. 2024.

- [8] S. A. N. Sarmadi and V. Venkatasubramanian, "Inter-Area Resonance in Power Systems From Forced Oscillations," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 378–386, Jan. 2016.
- [9] Ruichao Xie and D. Trudnowski, "Distinguishing features of natural and forced oscillations," in *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Denver, CO, USA: IEEE, Jul. 2015, pp. 1–5.
- [10] M. Donnelly, D. Trudnowski, J. Colwell, J. Pierre, and L. Dosiek, "RMS-energy filter design for real-time oscillation detection," in *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Denver, CO, USA: IEEE, Jul. 2015, pp. 1–5.
- [11] D. Kosterev, A. Donahoo, N. Leitschuh, J. Dagle, F. Tuffner, and D. Trudnowski, "Deployment and Initial Experience with Oscillation Detection Application at Bonneville Power Administration," 2016.
- [12] Ning Zhou, "A coherence method for detecting and analyzing oscillations," in *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Vancouver, BC: IEEE, 2013, pp. 1–5.
- [13] N. Zhou and J. Dagle, "Initial Results in Using a Self-Coherence Method for Detecting Sustained Oscillations," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 522–530, Jan. 2015.
- [14] "TR-110 Forced Oscillations in Power Systems," IEEE Power & Energy Society, Technical Report, 2023.
- [15] "Recommended Oscillation Analysis for Monitoring and Mitigation Reference Document," North American Electric Reliability Coordination (NERC), Tech. Rep., Nov. 2021.
- [16] B. Wang and K. Sun, "Location methods of oscillation sources in power systems: a survey," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, no. 2, pp. 151–159, Mar. 2017.
- [17] H. Ye, Y. Liu, P. Zhang, and Z. Du, "Analysis and Detection of Forced Oscillation in Power System," *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–1, 2016.
- [18] Y. Zhou, J. Wu, H. Li, and Y. Li, "Analysis of Nonlinear Characteristics for Forced Oscillation Affected by Quadratic Nonlinearity," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 37, no. 1, pp. 804–807, Jan. 2022.
- [19] "Precio tope de los precios marginales locales (PML) del mercado de energía de corto plazo," Jan. 2025.