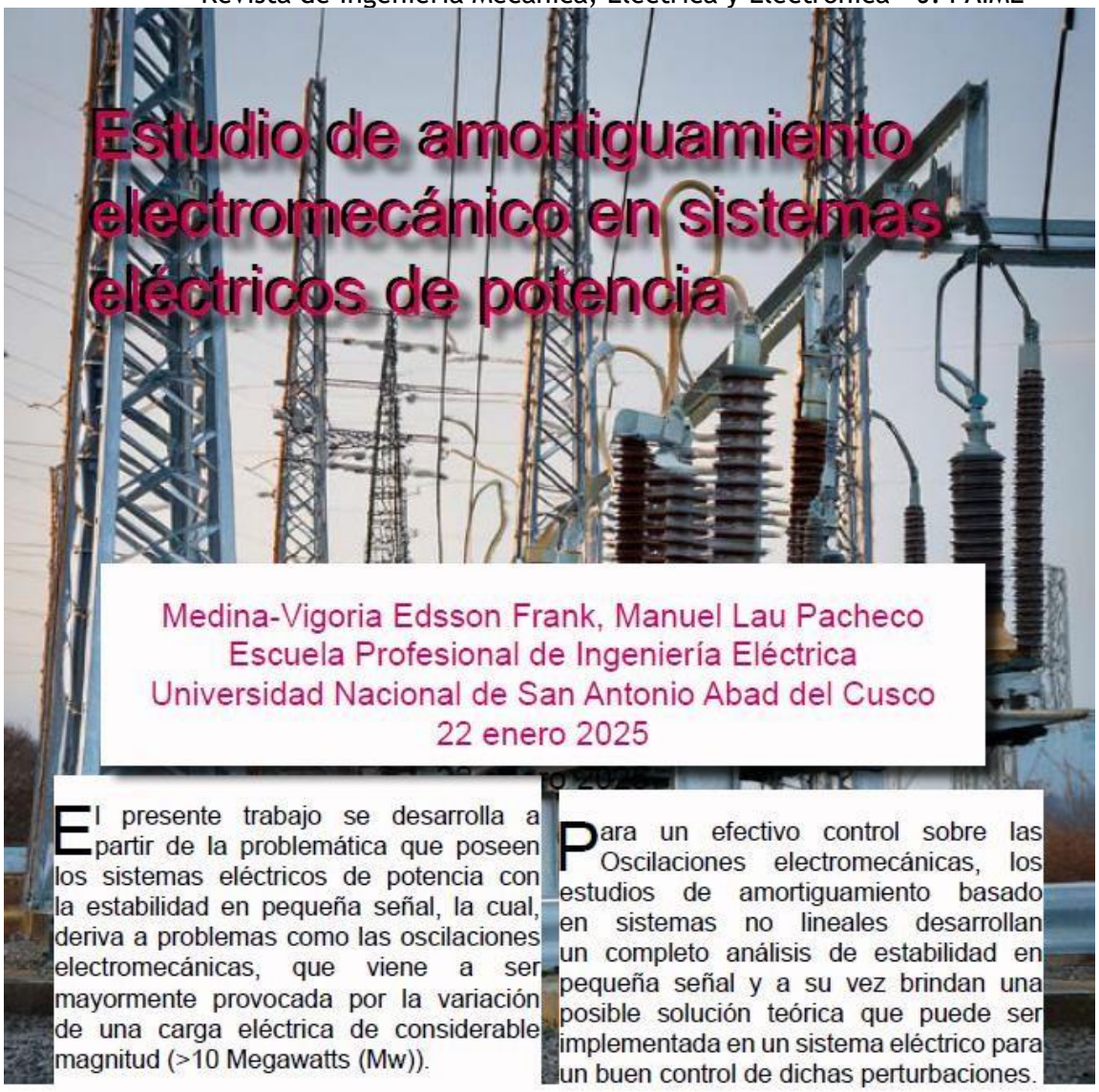

Estudio de amortiguamiento electromecánico en sistemas eléctricos de potencia

Medina-Vigoria Edsson Frank, Manuel Lau Pacheco
Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica
Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
22 enero 2025

El presente trabajo se desarrolla a partir de la problemática que poseen los sistemas eléctricos de potencia con la estabilidad en pequeña señal, la cual, deriva a problemas como las oscilaciones electromecánicas, que viene a ser mayormente provocada por la variación de una carga eléctrica de considerable magnitud (>10 Megawatts (Mw)).

Para un efectivo control sobre las Oscilaciones electromecánicas, los estudios de amortiguamiento basado en sistemas no lineales desarrollan un completo análisis de estabilidad en pequeña señal y a su vez brindan una posible solución teórica que puede ser implementada en un sistema eléctrico para un buen control de dichas perturbaciones.

Este tipo de oscilaciones generan inestabilidad en el sistema eléctrico, los cuales no pueden ser controlados debido a una falta de amortiguamiento en el sistema, en consecuencia conllevan a problemas mayores como salida de grupos generación, salidas de líneas de transmisión, etc. y éstos a su vez, generan pérdidas económicas.

Este estudio contempla la comparación de un sistema masa-resorte con sistema eléctrico de potencia, donde, se desarrolla un completo análisis del amortiguamiento del sistema eléctrico comparado con el amortiguamiento del sistema masa-resorte con la finalidad de comprender mejor su comportamiento.

https://doc.uni75paime.org/Estudio_amortiguamiento_Electromecanico_Sistemas_Electricos_de_Potencia.pdf

Lau Pacheco Manuel, Medina Vigoria Edsson Frank
Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica
Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

Citar: J. PAIME, **2025**, 2, 78-85
22 enero 2025

ESTUDIO DE AMORTIGUAMIENTO ELECTROMECÁNICO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

STUDY OF ELECTROMECHANICAL DAMPING IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Lau Pacheco Manuel, Medina Vigoria Edsson Frank

Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Departamento de Cusco, Cusco – Perú

RESUMEN:

El presente trabajo se desarrolla a partir de la problemática que poseen los sistemas eléctricos de potencia con la estabilidad en pequeña señal, la cual, deriva a problemas como las oscilaciones electromecánicas, que viene a ser mayormente provocada por la variación de una carga eléctrica de considerable magnitud (>10 Megawatts (Mw)).

Este tipo de oscilaciones generan inestabilidad en el sistema eléctrico, los cuales no pueden ser controlados debido a una falta de amortiguamiento en el sistema, en consecuencia conllevan a problemas mayores como salida de grupos generación, salidas de líneas de transmisión, etc. y éstos a su vez, generan pérdidas económicas.

Para un efectivo control sobre las Oscilaciones electromecánicas, los estudios de amortiguamiento basado en sistemas no lineales desarrollan un completo análisis de estabilidad en pequeña señal y a su vez brindan una posible solución teórica que puede ser implementada en un sistema eléctrico para un buen control de dichas perturbaciones.

Este estudio contempla la comparación de un sistema masa-resorte con sistema eléctrico de potencia, donde, se desarrolla un completo análisis del amortiguamiento del sistema eléctrico comparado con el amortiguamiento del sistema masa-resorte con la finalidad de comprender mejor su comportamiento.

Palabras claves: Oscilaciones Electromecánicas, Amortiguamiento, Carga eléctrica, Tiempo, Sistemas eléctrico de potencia, Sistema masa resorte.

ABSTRACT:

This present work is developed from the problem that the power systems have with stability in small signal, which, produces problems like electromechanical oscillations, these are caused mostly by the variation of the electric charge of a big magnitude (>10 Megawatts (Mw)).

This kind of oscillations generates instability in the electrical power system, which, cannot be controlled because the lack of cushioning in the system. In consequence, it produces bigger problems like generation groups disconnection, disconnection of transmission lines, etc. Consequently, it produces economic losses.

With the purpose of an effective control over electromechanical oscillations, the damping studies based in nonlinear systems developing a complete stability analysis in small signal and in turn, it provides a possible theoretical solution, which can be implemented in an electric power system for a good control in the disturbances.

This study contemplates the comparison between mass-spring system and electric power system, where, is developed an full analysis of the damping of electrical power systems, which is compared with the damping of the mass-spring system with the purpose to understand in a best way its behavior.

Keywords: Electromechanical Oscillations, Electric Charge, Damping, Time, Electric power system, Mass-spring system.

1.INTRODUCCION

La estabilidad en sistemas eléctricos de potencia en la actualidad viene a ser de mucha importancia para un correcto funcionamiento del sistema, por tanto hoy en día existen muchos tipos de estudios basados en este tópico, sin embargo la estabilidad en pequeña señal sigue siendo un desafío hasta el día de hoy debido a su complejidad de poder modelar el comportamiento no lineal del sistema, en este estudio se desarrollará el análisis del generador, línea de transmisión y una barra infinita, (la cual no oscila, posee voltaje y frecuencia constantes), que viene a representar el sistema eléctrico en su totalidad. Estos elementos serán comparados con el sistema masa-resorte (Fig. 1), (el cual posee amortiguamiento (Dm) y un resorte (k) que representa la inercia del sistema), debido al gran parecido entre el comportamiento de un sistema mecánico con el sistema eléctrico de potencia (Fig. 2), (está compuesto por H que viene a ser la inercia del generador y Xe que representa la reactancia del sistema de transmisión), ya que mediante la segunda ley de Newton es posible expresar una ecuación diferencial de segundo orden que manifieste un comportamiento semejante al de las oscilaciones electromecánicas [1], [2].

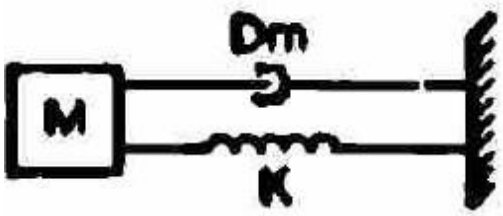

Fig. 1. Sistema masa-resorte. [1]

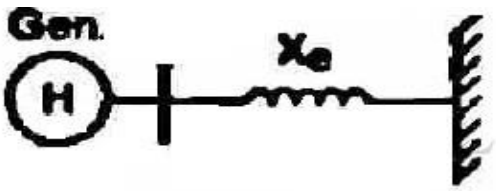

Fig. 2. Sistema eléctrico de potencia. [1]

Al presenciar la semejanza entre ambos sistemas es posible establecer dicha ecuación diferencial de segundo orden en el sistema eléctrico (ecuación 1), la cual describirá el movimiento relativo del rotor y el campo del entrehierro relacionando así las variables físicas del rotor como la inercia (H) y la parte mecánica que viene a ser la velocidad mecánica que genera la potencia eléctrica, la cual es llamada la ecuación de oscilación, dicha ecuación está basada en el estudio de estabilidad en pequeña señal que describe el comportamiento del ángulo de potencia, el cual sufrirá variaciones cuando el sistema eléctrico se encuentre perturbado [1].

$$\boldsymbol{M\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right) + Dm\left(\frac{dx}{dt}\right) + K * \Delta x = 0} \qquad (1)$$

Donde M es la masa expresada en kilogramos (Kg), Dm es el amortiguamiento mecánico (kg/s), k representa la inercia del resorte (N) y x representa la aceleración del sistema (m/s^2). Cuando el valor de Dm es considerado despreciable, el sistema toma un comportamiento sinusoidal amortiguado, el cual es reflejado en una frecuencia de oscilación (Ecuación 2) [1].

$$\boldsymbol{\omega_n = \sqrt{K/M}} \qquad (2)$$

Al comparar con la ecuación de oscilación (Ecuación 3), se puede obtener la similitud diferencial entre ambos sistemas, lo que comprueba la teoría de la segundo ley de Newton. [2]

$$\boldsymbol{\frac{2 * H}{\omega_0} * \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = \Delta Tm - \Delta Te} \qquad (3)$$

Donde H representa la constante de inercia del generador (p.u.), δ la posición angular del rotor (rad), ω_0 la velocidad síncrona del generador (rad/seg), ΔTm viene a ser el torque mecánico, ΔTe representa el torque eléctrico (p.u), t el tiempo (seg). Al despreciar el valor de Tm (ΔTm=0) y calculando la ecuación diferencial se obtiene el factor amortiguante (K_D) (Ecuación 4) [2].

$$\boldsymbol{\Delta T_e = K_D * \Delta\omega} \qquad (4)$$

El factor amortiguante (K_D) viene a ser el factor de disminución de las oscilaciones del generador, entonces si existe una ausencia de K_D, el sistema se encontrará en estado inestable de crecimiento de oscilación. Reemplazando la ecuación 4 en 3 y despreciando el toque mecánico se obtiene el factor sincronizante (K_s) descrito en la (Ecuación 5) [2].

$$\boldsymbol{K_s = \frac{E_G * E_M * cos\delta}{X_T}} \qquad (5)$$

El factor sincronizante viene a ser el factor que mantiene la sincronía eléctrica entre los generadores del sistema, y está compuesto por E_G que viene a ser el voltaje de reactancia transitoria (p.u.), E_M voltaje de la

barra infinita (p.u.), δ el ángulo de potencia y X_T viene a ser la reactancia de transmisión (p.u.). En caso de la falta de K_s el sistema provocará el aumento constante del ángulo de potencia lo que conllevará a una inestabilidad oscilatoria dentro del sistema eléctrico de potencia. Entonces, reemplazando la ecuación 4 y 5 en la ecuación 3 se obtiene la ecuación del sistema eléctrico de potencia (Ecuación 6) [2], [3].

$$2H\frac{d^2\delta}{dt^2} + K_D\frac{d\delta}{dt} + K_s\Delta\delta = 0 \quad (6)$$

Es factible observar que la ecuación del sistema posee la misma estructura que la ecuación del sistema masa-resorte. En el cual, H representa la inercia del generador (p.u.), δ Ángulo de potencia (rad), K_D viene a ser el factor amortiguante, K_S es el factor sincronizante, Δδ es la desviación angular del rotor (rad) [3], [4].

2. ANÁLISIS DEL AMORTIGUAMIENTO DE UN SISTEMA NO LINEAL

El análisis de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia es muy diverso en las diferentes condiciones en las que se puede encontrar un sistema, si el sistema se considera lineal y estacionario, exigen métodos para poder llegar al punto de equilibrio, sin embargo existen algunos sistemas que no pueden ser calculados debido a su comportamiento no lineal que no puede ser resuelto con métodos clásicos.

Estos sistemas no lineales poseen múltiples puntos de equilibrio que se encuentran aislados a diferencia de un sistema lineal que posee una única solución estacionaria. Estos tipos de sistemas no lineales pueden clasificarse en tres tipos de comportamiento [5], [6]:

a) Estable:

$$\|x(0) < \delta\| \rightarrow \|\emptyset(t, t_0, x_0)\| < \varepsilon, \forall t \geq 0 \quad (6)$$

b) Asintóticamente estable:

$$\|x(0) < \delta\| \rightarrow \lim_{t\to\infty} \emptyset(t, t_0, x_0) = 0 \quad (7)$$

c) Inestable:

$x(0)$ ***no cumple con la condición de estable***
es decir no posee puntos de equilibro en
los reales

2.1 ESTABILIDAD DEL AMORTIGUAMIENTO IMPLEMENTADA AL LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES (LGR)

El lugar geométrico de las raíces es un método de posicionamiento de untos en un sistema que posee un plano complejo por lo que su uso en la estabilidad y control es muy usado en la actualidad. En la Fig. 3 se muestran los planos del lugar de las raíces que muestran en que región es estable y en cual no [7].

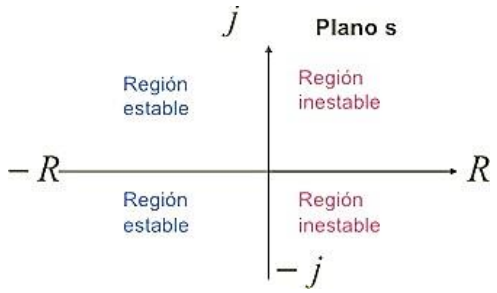

Fig. 3. Regiones del lugar geométrico de las raíces. [1]

Al considerar que $\dot{x}$ no es dependiente del tiempo (autónomo) se puede establecer que su dominio pertenece a los reales por tanto: $D \epsilon \mathbb{R}^n$ [5], [6].

$$\dot{x} = f(x) \quad (8)$$

Entonces la matriz Jacobiana es:

$$A = \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{x=0} \quad (9)$$

Para un sistema autónomo forzado donde $\dot{x} = f(x, u)$, entonces en el caso de perturbaciones en pequeña señal las funciones f(x, u) son expresadas mediante las series de Taylor en términos de potencia de segundo orden y superior [5], [6].:

$$\dot{x} = f(x_0 + u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_i}\Delta x_i + \cdots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n}\Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_i}\Delta u_i + \cdots + \frac{\partial f_i}{\partial u_n}\Delta u_n \quad (10)$$

Al aplicar la transformada de Laplace, se halla:

$$\det(sI - A) = 0 \quad (11)$$

Para la existencia de puntos estables en pequeña señal de un sistema no lineal, depende de las raíces de la ecuación del sistema, es decir de los valores propios de la Matriz A [5], [6].

En base a las propiedades de los valores propios del sistema se puede establecer que los parámetros son escalares (λ), entonces para llegar a su cálculo se demuestra en la siguiente ecuación (ecuación 12) [5], [6]:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (12)$$

Donde σ viene a ser la parte real que representa la amortiguación del nodo, este a su vez posee dos significados, si este es positivo representa aumento de la amplitud de la oscilación, por otro lado, si es negativo expresa la reducción de dicha amplitud. La parte imaginaria jω viene a ser la velocidad de dicha oscilación.

2.1 RESPUESTA DEL AMORTIGUAMIENTO ANTE LOS VALORES PROPIOS

El sistema eléctrico de potencia, es considerado como un sistema no lineal y cuadrático que se puede expresar mediante un sistema de segundo orden, y esta a su vez puede ser expresada mediante una función de trasferencia de lazo cerrado (Ecuación 13) [7].

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n} \quad (13)$$

Resolviendo la ecuación de segundo orden, es posible obtener la ecuación característica del sistema eléctrico de potencia (Ecuación 14).

$$a(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (14)$$

Donde ω_n viene a ser la frecuencia natural de la oscilación y ζ la razón de amortiguamiento, reemplazando la ecuación 14 en la 12, se obtiene los valores propios del sistema eléctrico de potencia (Ecuación 15):

$$\lambda = -\zeta\omega_n \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}\omega_n \quad (15)$$

De acuerdo a los valores que adopten los valores propios, se puede clasificar el tipo de respuesta del amortiguamiento del sistema eléctrico de potencia, existen 4 tipos de respuesta que se muestran a continuación [7]:

a) Respuesta Subamortiguada:

En este tipo de respuesta la razón de amortiguamiento (ζ) se encuentra comprendido entre 0<ζ<1 por lo cual los valores propios del sistema eléctrico de potencia resultarán negativo, por lo cual, su conjugada viene a ser la siguiente ecuación (Ecuación 16):

$$\lambda = -\zeta\omega_n \pm j\omega_d \quad (16)$$

Donde:

$$\omega_d = \sqrt{1-\zeta^2}\omega_n \quad (17)$$

Donde ω_d viene a ser la frecuencia natural amortiguada.

b) Respuesta de amortiguamiento crítica:

En este tipo de respuesta, la razón de amortiguamiento ζ=1, por tanto, los valores propios vienen a ser igual a la frecuencia natural amortiguada (Ecuación 18).

$$\lambda = -\omega_n \quad (18)$$

c) Respuesta de sobre amortiguamiento:

En este tipo de respuesta, el valor de la razón de amortiguamiento es ζ>1, por tanto, los valores propios vienen a ser (Ecuación 19):

$$\lambda = \omega_n(-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (19)$$

d) Respuesta oscilatoria:

Para este tipo de respuesta, la razón de amortiguamiento es 0 por tanto los valores propios toman la siguiente condición (Ecuación 20):

$$\lambda = \pm j\omega \quad (20)$$

Basado en las respuestas de los valores propios se puede determinar si el sistema es estable o no, según su comportamiento en el lugar geométrico de las raíces, si los valores se encuentran en la región estable entonces indica que el valor angular del sistema eléctrico de potencia se encuentra funcionando en una región segura, por otro lado si se encuentra en la región inestable éste indica que el sistema eléctrico de potencia se encuentra en un estado inestable y en el

peor de los casos los valores propios se encontrarán en una región imaginaria que no tiene significado real.

Resumiendo los pasos del estudio de estabilidad en pequeña señal, se establece el siguiente flujo grama (Fig. 4), que expresa los pasos a seguir para poder analizar si el comportamiento del sistema es estable y opera con normalidad [4].

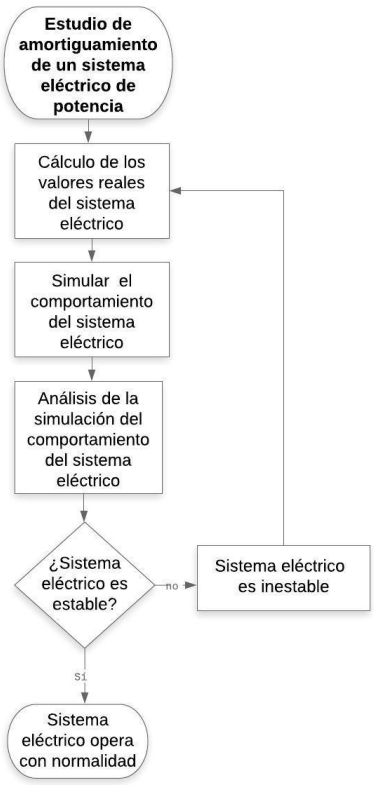

Fig. 4. Flujo grama de estudio de estabilidad en pequeña señal.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE AMORTIGUAMIENTO EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.

Basado en la teoría de amortiguamiento de sistemas eléctricos de potencia, los valores propios definen el comportamiento de las oscilaciones dentro de este, por tanto al realizar una simulación de dichos valores en el software Matlab, se obtienen tres tipos de respuesta. Estos tipos de respuesta se muestran a continuación [2], [4], [7]:

a) Respuesta de amortiguamiento crítico y sobre amortiguamiento:

Para este tipo de comportamiento, los valores propios del sistema eléctrico de potencia asumieron un estado estable en el lugar geométrico de las raíces (Fig.5) por tanto, el amortiguamiento del sistema eléctrico de potencia obtuvo un factor amortiguante positivo, lo que señala que se encuentra en estado estable tal como se puede observar en la Fig. 6, donde, se ve que las oscilaciones son amortiguadas con el tiempo sin afectar a la operación normal del sistema.

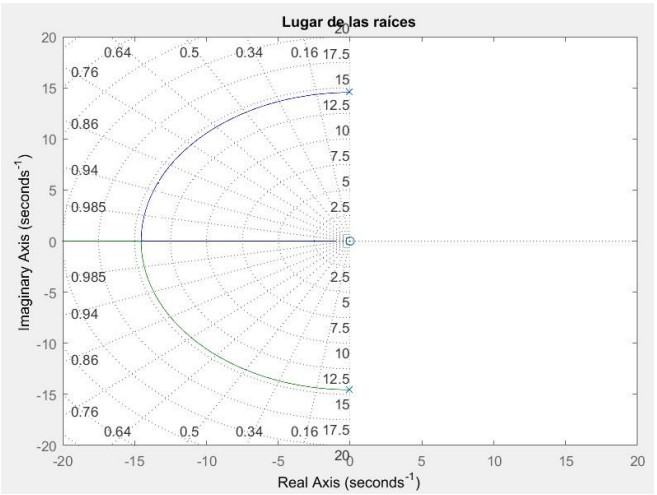

Fig. 5. Lugar geométrico de las raíces para una respuesta de amortiguamiento crítico y sobre amortiguamiento.

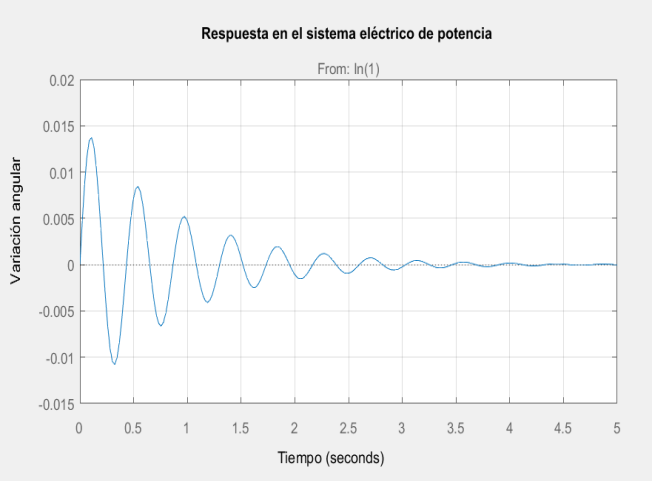

Fig. 6. Respuesta de amortiguamiento del sistema eléctrico de potencia ante una perturbación que ocasiona una oscilación electromecánica.

b) Respuesta Subamortiguada:

En este tipo respuesta, los valores propios del sistema asumen un estado inestable en el lugar geométrico de las raíces (Fig. 7) consecuentemente, el sistema eléctrico de potencia se verá afectado ante la inestabilidad de las oscilaciones electromecánicas (Fig.

8) produciendo contingencias en la operación normal de este. Por consiguiente, es posible afirmar que el amortiguamiento del sistema se vuelve negativo al no poder frenar el crecimiento de dichas oscilaciones, lo que conllevará a la salida del generador síncrono para evitar su deterioro.

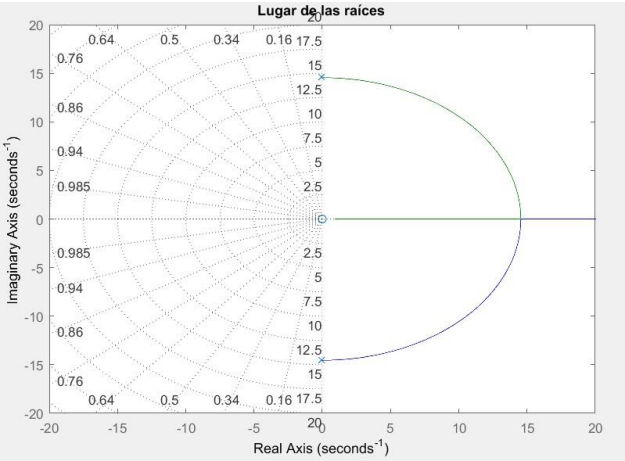

Fig. 7. Lugar geométrico de las raíces para una respuesta de subamortiguamiento.

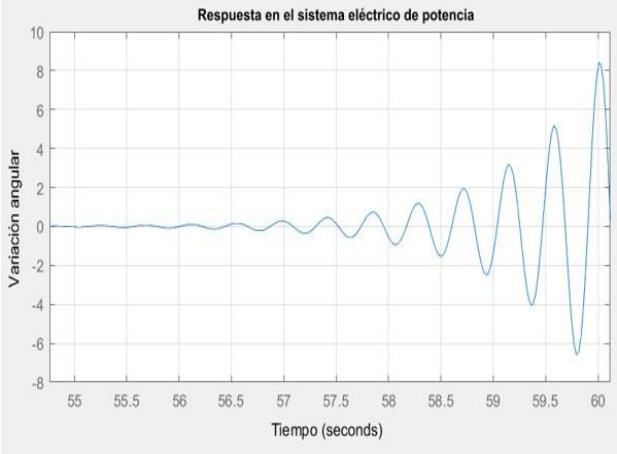

Fig. 8. Respuesta de amortiguamiento negativo del sistema eléctrico de potencia ante una perturbación que ocasiona la ampliación de una oscilación electromecánica, generando inestabilidad en el sistema.

c) Respuesta de amortiguamiento oscilatorio:

Este tipo de respuesta, viene a ser la más compleja debido a su característica irreal para la operación del sistema eléctrico de potencia, debido a que los valores propios del sistema asumen valores imaginarios (Fig. 9), por tanto, la respuesta en el lugar geométrico de las raíces se encuentra en el eje imaginario. Consecuentemente, al clasificarse como una respuesta imaginaria, el comportamiento del sistema se vería reflejado con una respuesta irreal (Fig.10), en donde se establece un comportamiento oscilatorio permanente, el cual, es inestable. Adicionalmente, es factible expresar que el sistema eléctrico de potencia no puede operar debido a la desincronización de éste por la inexistencia de amortiguamiento en el sistema (Caso ideal).

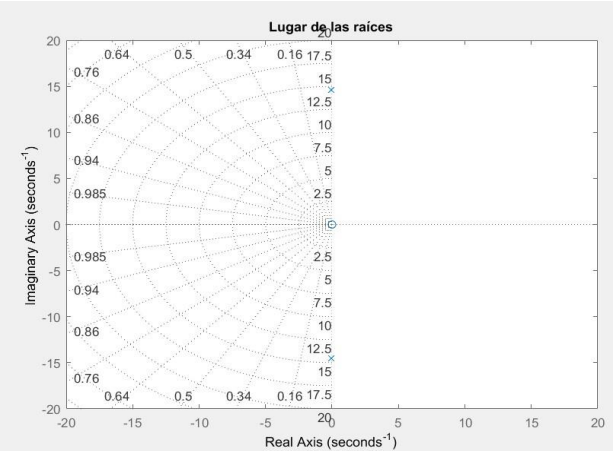

Fig. 9. Lugar geométrico de las raíces para una respuesta oscilatoria.

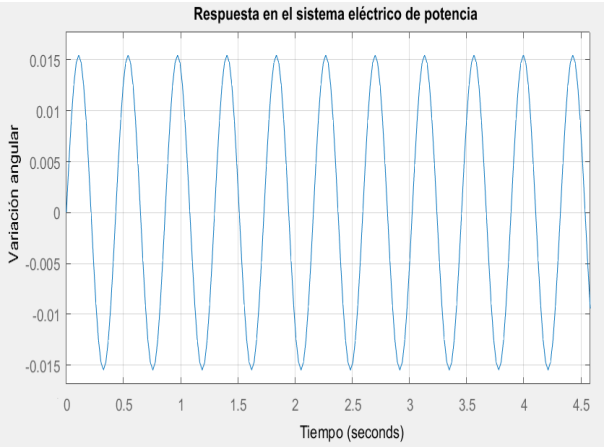

Fig. 10. Respuesta oscilatoria por amortiguamiento inexistente en el sistema eléctrico (Caso ideal).

CONCLUSIONES:

- En este estudio, se pudo comprobar la importancia del amortiguamiento en el sistema eléctrico de potencia, por tanto, mientras el amortiguamiento del sistema sea positivo, éste funcionará a condiciones normales.
- El estudio de sistemas no lineales, hoy en día es de mucha importancia debido a su presencia en los

fenómenos físicos, por consiguiente, al estudiar un sistema no lineal como el sistema eléctrico de potencia se puede determinar su comportamiento y a la vez poder prevenir que sufra alguna inestabilidad que ponga en riesgo su operación normal que conlleve a salidas de grupos de generación, líneas de transmisión, etc. Las cuales, ocasionan pérdidas económicas.

- La respuesta del sistema eléctrico de potencia ante perturbaciones, muestra la sensibilidad del ángulo de potencia ante cambios bruscos, cambiando de estado estable a inestable debido al rápido cambio del valor del factor amortiguante, por lo que la implementación de elementos de protección es obligatoria para un sistema eléctrico.

REFERENCIAS:

[1] Sanchez, F. Análisis y control de oscilaciones electromecánicas en sistemas eléctricos de potencia. Universidad Autónoma de Nuevo León. 1997.

[2] Gonzáles, J. A. Introducción a los sistemas eléctricos de potencia. Universidad Nacional de Tucumán. 2015.

[3] Agudelo, V. M., Parra, D. Control de oscilaciones electromecánicas en sistemas eléctricos de potencia usando análisis modal, Universidad Tecnológica de Pereira. 2008.

[4] Castañeda, J. A. Análisis de estabilidad en pequeña señal de una máquina síncrona conectada a un bus infinito. Universidad Tecnológica de Pereira. 2013.

[5] Seron, M.; Braskavsky, J. Sistemas no lineales. Rosario. 2000.

[6] Khalil, H. K. Nonlinear Systems Third Edition. Michigan State University. 2002.

[7] Ogata, K. Ingeniería de control Tercera edición. Minnesota Pearson Education. 1998.