

# Métodos de Diferenciación Numérica Aplicados a Estudios de Estabilidad Angular a Pequeña Señal

Eder Iván Rivera López

Daniel Ruiz Vega, *Senior Member, IEEE*

Programas de Posgrado en Ingeniería Eléctrica, SEPI-ESIME-Zacatenco

Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

e-mail: eder.ivan.rivera@gmail.com, drv\_liege@yahoo.com

**Abstract**— En este trabajo se presenta un enfoque para obtener aproximaciones lineales a través de técnicas de sensibilidad basadas en un método de diferenciación numérica, las cuales se aplican directamente con el modelo dinámico no lineal del sistema de potencia multimáquinas. Se logra un proceso de perturbación secuenciado, en el que la alteración a las variables de estado base por pequeños disturbios se propaga a lo largo de la red, permitiendo la perturbación automática de las variables algebraicas de voltaje y corriente que se usarán para estimar las tasas de cambio dinámicas de los elementos conectados al sistema. El proceso de validación del método se realiza con un análisis de oscilaciones en el sistema de prueba del *Western Electric Coordinating Council* de 9 nodos y 3 generadores. Los resultados muestran que el método funciona adecuadamente y es adecuado para desarrollar el modelo lineal dinámico del sistema de potencia.

**Keywords**—Diferenciación numérica, linealización, análisis modal, eigenanálisis, máquina síncrona

## I. INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico de potencia (SEP) es un sistema dinámico de gran dimensión que es inherentemente oscilatorio. Por esta razón, siempre se presentan oscilaciones durante los cambios que ocurren en la operación normal del sistema, y ante disturbios repentinos e inesperados debidos a fallas. Las oscilaciones son un problema importante de los sistemas de potencia, y éstas se incrementaron durante el desarrollo de los grandes sistemas interconectados a finales de la década de 1960 en Estados Unidos, y en la década de 1970 en México. A partir de esas fechas se han propuesto diferentes técnicas de análisis de las oscilaciones de sistemas interconectados.

Un sistema de potencia moderno típico es un proceso multivariable de alto orden cuya respuesta dinámica está influenciada por un amplio arreglo de dispositivos con características diferentes y proporción de respuestas. La estabilidad es una condición de equilibrio entre fuerzas opuestas que depende de la topología de la red, las condiciones de operación y del tipo de disturbios que, conducen a diferentes

formas de inestabilidad [1].

La mayor parte de las oscilaciones se deben a que los rotores de los generadores síncronos oscilan de manera relativa con el rotor de algún otro generador síncrono, ya sea de la misma área o de un área diferente. Las oscilaciones del generador que involucran a las masas del mismo tienen una ocurrencia en un intervalo entre 0.1 y 2 Hz [2].

El incremento del número de controles automáticos es otro de los factores del aumento de las oscilaciones y sus efectos en el sistema, debido a que los controladores principales de las máquinas generan un amortiguamiento negativo para las frecuencias en el rango oscilatorio del sistema de potencia. Mientras que el gobernador de velocidad del generador tiene pequeños efectos, el regulador de voltaje del generador tiene efectos grandes sobre las oscilaciones [2].

El estudio de la inestabilidad en SEP's tiene un amplio número de herramientas disponibles, la selección de la técnica de análisis más conveniente depende del tipo de fenómeno a estudiar y los intereses de quien realiza el estudio [1].

Es de suma importancia que el desarrollo de técnicas y programas orientados a la realización de estudios de estabilidad cuente con los modelos disponibles más detallados de los elementos que conforman al SEP bajo estudio. Esto sin duda, otorga el beneficio en la seguridad que todas las dinámicas involucradas están bien representadas y que los resultados para análisis son confiables [2].

Este trabajo describe un enfoque para analizar las oscilaciones de un *Sistema de Potencia Multimáquinas* (SPM) con técnicas de Análisis Modal mediante el desarrollo de un programa que emplea técnicas de sensibilidad, basadas en diferenciación numérica, que perturban el modelo no lineal y, de esta forma, obtiene un modelo linealizado del sistema alrededor de un punto de operación específico. Esta técnica tiene el potencial de construir modelos lineales a partir de resultados de simulación de modelos no lineales para el análisis de oscilaciones en sistemas grandes.

## II. MODELO NO LINEAL DE LA MÁQUINA SÍNCRONA CON PARÁMETROS ESTÁNDAR

Las deducciones clásicas de la formulación no lineal de la Máquina Síncrona (MS) se llevan a cabo por medio del Modelo de Park, el cual expresa los modelos en términos de inductancias y enlaces de flujo. Sus variables de estado pueden

---

Este trabajo fue desarrollado dentro de las actividades del proyecto SIP 20201092, financiado por el Instituto Politécnico Nacional, y el proyecto "Desarrollo de componentes de una función de seguridad para la evaluación de la estabilidad transitoria en línea y en tiempo real" del CEMIE-Redes Inteligentes, financiado por CONACyT, México.

Los autores agradecen al CONACyT por el apoyo económico otorgado al primer autor, por la beca para desarrollar sus estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la SEPI-ESIME-Zacatenco del IPN.

quedar en términos de las corrientes o los enlaces de flujo, según se prefiera [3].

Otra forma de deducción se hace por inspección de los Circuitos Equivalentes. Con este tipo de modelos se acostumbra analizar el comportamiento de las MS en términos de un conjunto de parámetros distintos a las variables de Park; sus variables de estado se encuentran en términos de las tensiones en eje  $d$  y en eje  $q$  y a su vez, incluyen las reactancias en los estados permanentes, transitorio y subtransitorio a la par de las constantes de tiempo asociadas [4]. Al tipo de modelo que representan se le da el nombre de *Modelo No Recíproco pu*. Las razones para justificar su utilización son [4]:

- Estandarización de la nomenclatura.
- Determinación de los parámetros a partir de un grupo de pruebas simples.
- El sistema no recíproco en por unidad ofrece una forma diferente de expresar el sistema de excitación: una corriente de campo de 1.0 pu es requerida para producir un voltaje en terminales de 1.0 pu en condiciones de circuito abierto. En términos numéricos, éste sistema proporciona una mejor conveniencia al ser usado y visualizado.

Por ejemplo, el Modelo No Recíproco pu Reducido de Polos Lisos de 4° orden estaría dado por las ecuaciones siguientes:

$$\frac{d}{dt} \delta = \omega_0 \Delta \omega \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - T_D \Delta \omega) \quad (2)$$

$$pE'_q = \frac{1}{T'_{d0}} [V_{fd} - E'_q - (x_d - x'_d)(-i_d)] \quad (3)$$

$$p(-E'_d) = \frac{1}{T'_{q0}} [(x_q - x'_q)i_q - (-E'_d)] \quad (4)$$

$$T_e = (-E'_d)(-i_d) + E'_q i_q - (x'_d - x'_q)(-i_d)i_q \quad (5)$$

Donde  $x_d$  y  $x_q$  son las reactancias síncronas,  $x'_d$  y  $x'_q$  son las reactancias transitorias,  $i_d$  e  $i_q$  son las componentes de corriente,  $T_m$  y  $T_e$  son los pares de salida y entrada,  $H$  es la constante de inercia del generador,  $V_{fd}$  es el voltaje de campo,  $E'_d$  y  $E'_q$  son los voltajes proporcionales a los enlaces de flujo del segundo devanado de amortiguamiento en  $q$  y del devanado de campo,  $T'_{d0}$  y  $T'_{q0}$  son las constantes de tiempo transitorias,  $\delta$  es el ángulo de carga,  $\omega$  es la velocidad del rotor,  $\omega_0$  es la velocidad síncrona y  $\Delta \omega$  es la variación de velocidad.

### III. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA MULTIMÁQUINAS CON MÉTODOS DE DERIVADAS NUMÉRICAS

La expresión generalizada para múltiples variables, considerando el vector de funciones  $r: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  donde la matriz Jacobiana de primeras derivadas [1], resulta ser:

$$J(x) = \left[ \frac{\partial r_j}{\partial x_i} \right]_{\substack{j=1,\dots,m \\ i=1,\dots,n}} \quad (6)$$

Donde se tienen  $m$  ecuaciones y  $n$  variables de estado.

El modelo de ecuaciones no lineales que representan al SEP es [5]:

$$\dot{x} = f(x, z) \quad (7)$$

$$0 = g(x, z) \quad (8)$$

En las ecuaciones anteriores,  $x$  representa el vector de variables de estado y  $z$  es el vector de variables algebraicas de la red. La representación lineal del modelo de  $m$  ecuaciones de las formulaciones (7) y (8) es [5]:

$$\Delta \dot{x} = [A_1 - A_2 A_4^{-1} A_3] \Delta z \quad (9)$$

Donde  $A_1$  es la matriz de derivadas parciales (mdp) de las funciones con respecto de  $x$ ,  $A_2$  es la mdp de las funciones con respecto de  $z$ ,  $A_3$  es la mdp de las ecuaciones de red con respecto de  $x$ ,  $A_4$  es la mdp de las ecuaciones de red con respecto de  $z$ .

La formulación que se ha mostrado es un proceso intrincado que involucra un alto número de operaciones. Alternativamente, puede sacarse ventaja de la estructura de un programa de simulación dinámica para obtener directamente el modelo lineal [6]. En esencia, se utiliza el algoritmo de solución de la red para calcular el impacto de las perturbaciones en las variables de estado, medir la tasa de cambio en las variables algebraicas debido a la alteración y, por último, cuantificar la propagación a los demás elementos conectados a la red, lo que, en pocas palabras, se define como la solución de la red para las variables perturbadas [6].

Perturbando la  $i$ -ésima componente de  $x$  por una cantidad positiva  $\Delta x_i$  en la  $i$ -ésima entrada de  $x$ , tal que  $x = x_{pe} + \Delta x_i$ , donde el subíndice  $pe$  denota variables en el punto de equilibrio [6]. Una consecuencia de lo anterior es la perturbación de los elementos algebraicos, tal que  $z = z_{pe} + \Delta z_i$ , se pueda calcular la  $i$ -ésima columna de la matriz lineal como [6]:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{f(x_{pe} + \Delta x_i, z_{pe}, u_{pe}) - f(x_{pe}, z_{pe}, u_{pe})}{\Delta x_i} \quad (10)$$

### IV. REPRESENTACIÓN ADECUADA DE LA RED

Se puede considerar que el sistema multimáquinas de  $mg$  nodos está representado por el diagrama de la Fig. 1, con una representación matemática en forma matricial [7]:

$$[I] = [Y][V] \quad (11)$$

En la Fig. 1 se observa que hay nodos adicionales para los voltajes internos del generador,  $V_1, V_2, \dots, V_{ng}$  con  $ng$  igual al número total de generadores, en donde la reactancia transitoria

se encuentra entre estos nodos y los nodos terminales  $V_{t1}$ ,  $V_{t2}, \dots, V_{tng}$ .

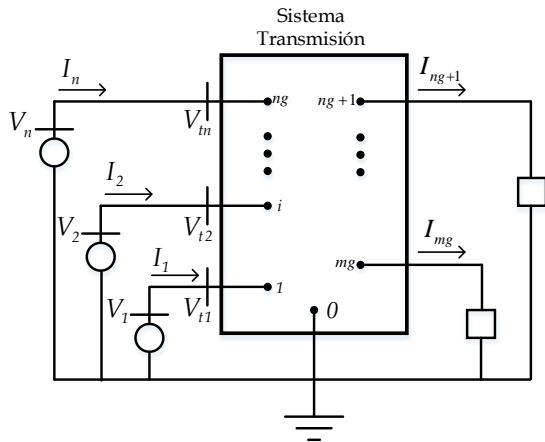


Fig. 1. Representación del Sistema de Potencia Multimáquinas (adaptado de [7]).

La adaptación de los métodos de derivadas numéricas requiere la extensión de las ecuaciones de red a los nodos internos de la máquina, siguiendo y adaptando los procedimientos vistos en [6] y [7] como se demuestra en la Fig. 2.

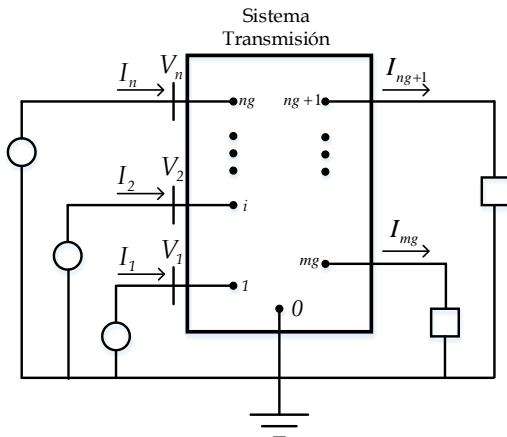


Fig. 2. Sistema Multimáquinas con modificación en los nodos de referencia (adaptado de [7]).

La adición de los nodos internos de los generadores supone una modificación en la topología de la red, expandiendo los nodos terminales hasta los nodos internos para fungir como los nuevos voltajes terminales. Así, la reactancia transitoria de cada máquina se adiciona directamente a la diagonal de la matriz de admitancias nodales, lo que también modifica los criterios de consideración de las componentes de inyección de corriente del estator con dirección a la red.

La solución de la red es lineal si es utilizado el modelo de carga de impedancias constantes [6]. Habiendo realizado las consideraciones conducentes con los nodos de inyección de corriente y los modelos de carga a considerar, razón que puede ser consultado a detalle en las referencias [6] y [7], se procede a realizar un proceso de simplificación de la red considerando la técnica de Kron.

## V. ANÁLISIS DE OSCILACIONES DEL SISTEMA WSCC

### A. Sistema de prueba

Para validar la técnica que se presenta en este trabajo, se estudiará la Estabilidad a Pequeña Señal del *Western Electric Coordinating Council* (WECC, por sus siglas en inglés) tomado de la referencia [8] y representado en la Fig. 3.

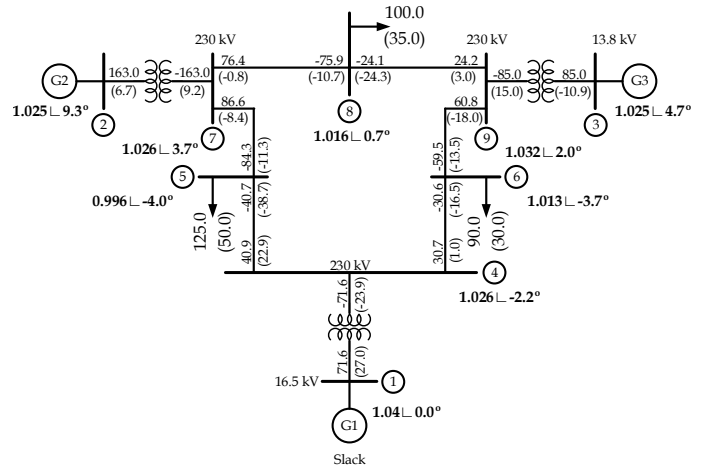


Fig. 3. Sistema WECC (tomado de [8]).

El sistema de la Fig. 3 se simula considerando lo siguiente:

- Modelos reducidos de Polos Lisos de 4° orden en los 3 generadores.
- Modelos de carga de impedancia constante.

El algoritmo de solución numérica que se emplea para la etapa de linealización del Análisis Modal se escribió el programa `spm_ddfaotp` en MATLAB® y los resultados se presentan para comparar dos casos:

- Caso A. Considerando controles de excitación lentos IEEE tipo DC1A [9].
- Caso B. Considerando controles de excitación rápidos IEEE tipo AC4A [9].

Los datos de simulación de los controles pueden consultarse en las referencias [8] y [10].

### B. Respuesta Transitoria del Sistema WECC para una Contingencia Sencilla Severa

En la Fig. 4 se presenta la respuesta en el tiempo del voltaje terminal que se obtiene del modelo no lineal sin fallas que comprueba que las condiciones iniciales del sistema son determinadas de manera adecuada. Las simulaciones transitorias son realizadas con el módulo TSAT de DSAT® v11.0.

El estudio comienza al excitar los modos de oscilación del sistema aplicando un disturbio trifásico de 0.001 s de duración en el Nodo 7. Al hacer esto, la naturaleza de las respuestas de salida es oscilatoria, como puede verse en las Fig. 5 y Fig. 6 con las respuestas de salida del ángulo de carga y la potencia activa de la MS 2. En las figuras, las variables están referidas al centro de inercia.

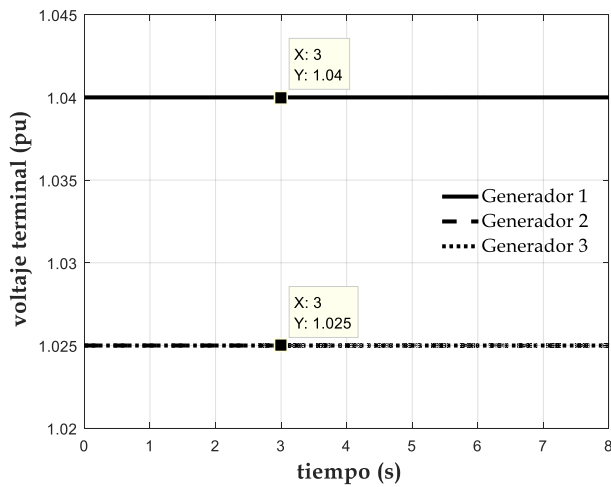


Fig. 4. Respuesta en el tiempo de la salida de voltaje terminal.

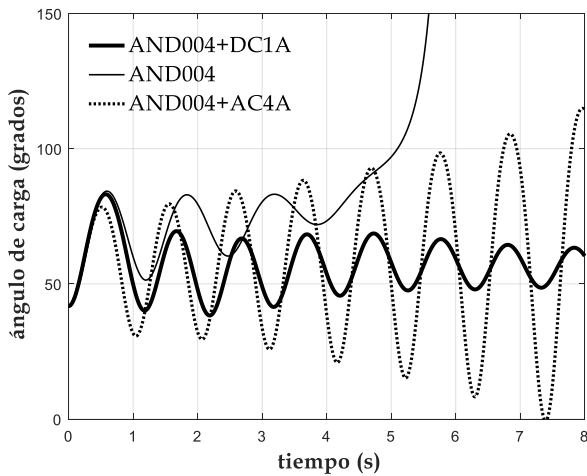


Fig. 5. Respuesta en el tiempo del ángulo de carga del generador 2 ante una falla trifásica de 1ms en el Nodo 7.

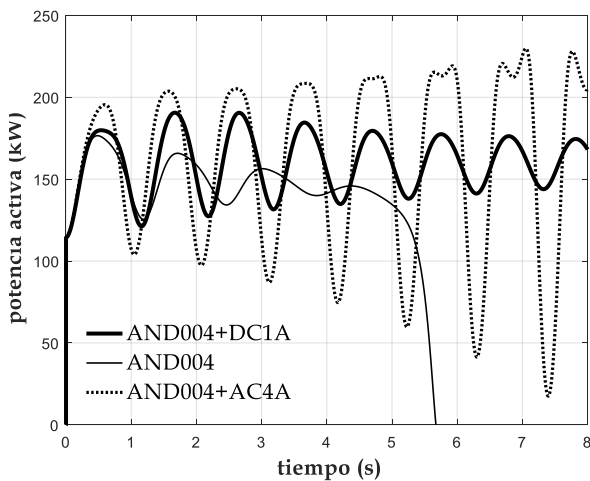


Fig. 6. Respuesta en el tiempo de la potencia activa del generador 2 ante una falla trifásica de 1ms en el Nodo 7.

En las Fig. 5 y 6 se advierte que la naturaleza de la respuesta sin controles es inestable después de 3 oscilaciones. Cuando los controles de excitación lentos están integrados en el SPM, la respuesta es “estable” sub amortiguada, y con controles de excitación rápidos se presenta un fenómeno de oscilaciones inestables.

### C. Eigenanálisis del Sistema WECC sin contingencia

El objetivo de este ejercicio es probar la fiabilidad de los métodos de derivadas numéricas aplicados al Análisis Modal de SPM. Por lo que la información presentada en las Fig. 5 y 6 será de utilidad en combinación con el Estudio a Pequeña Señal. El eigenanálisis correspondiente al sistema sin contingencias para cada esquema de control se presenta en las Tablas I y II.

TABLA I EIGENANÁLISIS DEL SISTEMA WECC + IEEE TIPO DC1A, SIN CONTINGENCIAS.

EIGENVALORES	
Programa SSAT de DSAT @ v11.0	Programa spm_ddfaotp
-0.7707 ± 12.7647	-0.9354 ± 13.0449
(ζ = 6.03 %, f = 2.0316)	(ζ = 7.15 %, f = 2.0762)
<b>-0.2015 ± 8.2875</b>	<b>-0.3088 ± 8.5891</b>
(ζ = 2.43 %, f = 1.3190)	(ζ = 3.59 %, f = 1.3670)
-5.1784	-6.3397
-3.5616	-3.9717
-3.2258	-3.2486
-0.3998 ± 0.5152	-0.4258 ± 0.4921
(ζ = 61.31 %, f = 0.0802)	(ζ = 65.43 %, f = 0.0783)
-0.4208 ± 0.7544	-0.4461 ± 0.7314
(ζ = 48.72 %, f = 0.1201)	(ζ = 52.07 %, f = 0.1164)
-0.4559 ± 1.1088	-0.4749 ± 1.0849
(ζ = 38.03 %, f = 0.1765)	(ζ = 40.10 %, f = 0.1727)
-5.1717 ± 7.8804	-5.4935 ± 7.9628
(ζ = 54.87 %, f = 1.2542)	(ζ = 56.79 %, f = 1.2673)
-5.1902 ± 7.9261	-5.3240 ± 7.9392
(ζ = 54.78 %, f = 1.2615)	(ζ = 57.70 %, f = 1.2636)
-5.1195 ± 7.8067	-5.2352 ± 7.8472
(ζ = 54.84 %, f = 1.2452)	(ζ = 55.50 %, f = 1.2489)
-0.0001	0.01e-06 ± 0.18e-03
-0.0503	(ζ = -0.01 %, f = 0.03-e03)

TABLA II. EIGENANÁLISIS DEL SISTEMA WECC + IEEE TIPO AC4A, SIN CONTINGENCIAS.

EIGENVALORES	
SSAT de DSAT @ v11.0	spm_ddfaotp
-0.7480 ± 12.8084	-0.8690 ± 13.0897
(ζ = 5.83 %, f = 2.0385)	(ζ = 6.62 %, f = 2.0833)
<b>-0.1433 ± 8.3171</b>	<b>-0.2100 ± 8.6361</b>
(ζ = 1.72 %, f = 1.3237)	(ζ = 2.43 %, f = 1.3745)
-5.5860	-6.8847
-3.0180	-2.9418
-3.2259	-3.6046
-9.0708	-9.1961
-14.6889	-14.7888
-15.5435	-15.4276
-0.5253 ± 0.7980	-0.5247 ± 0.7939
(ζ = 54.98 %, f = 0.1270)	(ζ = 55.14 %, f = 0.1263)
-0.8482 ± 0.9673	-0.8452 ± 0.9645
(ζ = 65.93 %, f = 0.1540)	(ζ = 65.91 %, f = 0.1535)
-1.7594 ± 1.1452	-1.7858 ± 1.1483
(ζ = 83.81 %, f = 0.1823)	(ζ = 84.11 %, f = 0.1828)
-0.0001	± 0.19e-03
-0.0487	(ζ = -0.001 %, f = 0.03-e03)

Para obtener un punto de comparación para dar validez a los resultados recabados con el programa *spm\_ddfaotp* se ha utilizado el módulo SSAT de DSAT ® v11.0. Los resultados de la Tablas I y II son consistentes entre sí, las pequeñas diferencias que se encuentran son debido a la técnica de linealización que cada programa emplea, así como a ciertas diferencias en el tratamiento de los modelos dinámicos.

Los eigenanálisis indican que hay dos modos electromecánicos de importancia en las condiciones de operación normal (indicados en negritas en las Tablas I, II). Los datos indican que las oscilaciones debido al control de excitación rápido (modelo AC4A) son ligeramente más rápidas que con el control de excitación lento (modelo DC1A). De la misma manera, se indica que el amortiguamiento del modo más crítico es menor en esquema con el control de alta ganancia; no obstante que el amortiguamiento de ambos esquemas de control no es seguro, porque no se acerca al mínimo coeficiente de amortiguamiento del 5% que se recomienda en algunos casos [2].

#### D. Eigenanálisis del Sistema WECC para una Contingencia Sencilla Severa

Si el sistema se ve estresado por la contingencia que da lugar a las respuestas en el tiempo de las Figs. 5 y 6, habrá alteraciones en los modos de oscilación.

Para realizar el estudio de oscilaciones considerando la aplicación de la falla, es necesario determinar el punto de operación de post disturbio del sistema al que llegan los generadores cuando se ha terminado el transitorio. En este trabajo se determinó el punto de equilibrio de post contingencia empleando el programa POSTCON, desarrollado en [11].

Aplicando el eigenanálisis del punto de equilibrio de post contingencia determinado para los casos en los que se emplea el control lento (modelo DC1A) y el rápido (modelo AC4A), se obtienen los resultados presentados en las Tablas III y IV, respectivamente. Se presentan solamente los resultados de los modos electromecánicos, debido a que los otros no cambiaron de manera importante. Los modos críticos se resaltan en negritas.

TABLA III. EIGENANÁLISIS DEL SISTEMA WECC + IEEE TIPO DC1A, FALLA TRIFÁSICA EN EL NODO 7.

SSAT de DSAT ® v11.0	spm ddfaotp
-0.8780±12.5885 ( $\zeta = 6.96\%$ , $f = 2.0035$ )	-1.0657±12.8605 ( $\zeta = 8.26\%$ , $f = 2.0468$ )
<b>-0.1727 ± 6.1337</b> ( $\zeta = 2.81\%$ , $f = 0.9762$ )	<b>-0.1904 ± 6.2283</b> ( $\zeta = 3.06\%$ , $f = 0.9913$ )

TABLA IV. EIGENANÁLISIS DEL SISTEMA WECC + IEEE TIPO AC4A, FALLA TRIFÁSICA EN EL NODO 7.

SSAT de DSAT ® v11.0	spm ddfaotp
-0.8476±12.6230 ( $\zeta = 6.70\%$ , $f = 2.0090$ )	-1.0111±12.9691 ( $\zeta = 7.77\%$ , $f = 2.0641$ )
<b>0.0749 ± 6.1285</b> ( $\zeta = -1.22\%$ , $f = 0.9754$ )	<b>0.0649 ± 6.2665</b> ( $\zeta = -1.04\%$ , $f = 0.9974$ )

La Tabla III indica que, tras la falla, el sistema logra incrementar suavemente el amortiguamiento de ambos modos dominantes, sin embargo, no lo suficiente para poderlo catalogar como seguro. Como se ve en las Figs. 5 y 6, la respuesta de este tipo de control está muy pobremente amortiguada y es insegura.

Por otro lado, en la Tabla IV se ve que la inestabilidad oscilatoria que se presenta en la respuesta en el tiempo de la máquina 2 con los excitadores de alta ganancia en las Figs. 5 y Fig. 6, puede ser observada al realizar el estudio de análisis modal del punto de equilibrio de posfalla del sistema. Como se observa en la Tabla IV la inestabilidad tiene su origen en el Modo 2, en el que la parte real de su eigenvalor es positiva, mostrando un amortiguamiento negativo de -1.04%. Con ambas tablas se prueban algunos efectos de las contingencias sobre el sistema de potencia estudiado.

## VI. CONCLUSIONES

El sistema de prueba utilizado ha ayudado para comprobar hechos importantes sobre el origen de las oscilaciones debido a los controles de excitación. Se pudo corroborar que los excitadores lentos o de baja ganancia benefician la Estabilidad a Pequeña Señal, pero a un costo de desempeño pobre en la etapa transitoria, ya que no proveen el nivel de amortiguamiento positivo suficiente para abatir las oscilaciones del sistema con relaciones de amortiguamiento aceptables.

También se vio que los controles de excitación rápidos o de alta ganancia actúan con mejor respuesta que los lentos, pero tienden a dotar de amortiguamiento negativo, lo que deriva en problemas de inestabilidad oscilatoria.

Sin embargo, la parte más importante de las pruebas realizadas consistió en probar el buen funcionamiento de las técnicas basadas en derivadas numéricas para desarrollar el modelo lineal de la red, el cual es de naturaleza altamente no lineal. Los resultados de los experimentos indican que estas técnicas se adaptan bien a los modelos de la máquina síncrona, aunque se detectan ciertas diferencias cuando se comparan los productos con los obtenidos con un programa de simulación de grado industrial como lo es DSAT ®, el cual utiliza técnicas analíticas para desarrollar el modelo lineal.

Las diferencias que se encuentran se deben a las diferencias que ambas técnicas dan a los modelos dinámicos y, principalmente, al método de linealización empleado.

En el análisis de postcontingencia se pudo comprobar un hecho interesante: en los casos en los que el sistema de potencia no tuvo una inestabilidad transitoria (los casos del sistema con controles de excitación), el análisis modal del punto de equilibrio de post contingencia del sistema fue capaz de detectar los problemas de inestabilidad oscilatoria, sin necesidad de realizar las simulaciones en el tiempo. Este tipo de técnica podría ser empleada para el desarrollo futuro de una función de seguridad de pequeños disturbios.

Este tipo de método de diferenciación numérica es empleado en programas comerciales como el PSS/E® de SIEMENS, y el PST® de Cherry Tree Software. Se concluye que las técnicas numéricas son de gran utilidad y confiabilidad,

sobre todo, si son acompañadas de métodos que ayuden a estimar tamaño óptimo de la perturbación empleada en la diferenciación numérica, asunto en el que se está trabajando actualmente, y que no es tratado en este trabajo.

#### REFERENCIAS

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definition and classification of Power System Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, n° 2, pp. 1387-1401, May 2004.
- [2] CIGRE Task Force 38.01.07. "Analysis and Control of Power System Oscillations. Final Report 111". CIGRE, December 1996.
- [3] E. I. Rivera-López, A. Villegas-Ortega y D. Ruiz-Vega, "Derivadas Numéricas Aplicadas al Análisis Modal de un Sistema de Potencia Tipo Máquina-Bus Infinito" *Memorias del 18° Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*, Ciudad de México, México, Noviembre 2019.
- [4] D. Ruiz Vega, *Efecto de los Modelos de Motores de Inducción en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, SEPI-ESIME-Zacatenco. Febrero de 1996, Ciudad de México, México.
- [5] M. A. Pai, D. P. Sen Gupta y K. R. Padiyar. *Small Signal Analysis of Power Systems*. Alpha Science International Ltd., 2004, Harrow, UK.
- [6] J. H. Chow y J. J. Sanchez-Gasca. *Power System Modeling, Computation and Control*. John Wiley & Sons, 2020. New York, USA.
- [7] P. M. Anderson y A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*., IEEE Press, 2003 New Jersey, USA.
- [8] P. W. Sauer y M. A. Pai. *Power System Dynamics and Stability*., Prentice-Hall, 1998 New Jersey, USA.
- [9] IEEE Power and Energy Society, IEEE Std 421.5-2016. *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, New York, USA: IEEE, 15 May 2016.
- [10] R. Meléndez Pérez, *Regulador Automático de Voltaje de Generadores Síncronos Tipo ANFIS en Sistemas de Potencia Multimáquinas*. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, SEPI-ESIME-Zacatenco. Noviembre de 2019, Ciudad de México, México.
- [11] M. A. García Domínguez, *Modelo de Equilibrio del Generador Síncrono con Controles Primarios para Estudios de Simulación Cuasi-Estacionaria en el Tiempo*. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, SEPI-ESIME-Zacatenco. Diciembre de 2007, Ciudad de México, México.