

# Caracterización y estudio del modelo IEEE9 orientado hacia el análisis de estabilidad transitoria

Artículo de Investigación - Fecha de recepción: 10 de junio de 2012 - Fecha de aceptación: 5 de agosto de 2012

Jorge Iván Silva

Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica, Corporación Universidad de la Costa - CUC. Barranquilla, Colombia,  
[jsilva6@cuc.edu.co](mailto:jsilva6@cuc.edu.co)

## RESUMEN

En este documento se resume el comportamiento de un modelo caracterizado y centrado en el análisis de estabilidad de sistemas eléctricos de potencia a partir de la teoría de estabilidad y las condiciones de anormalidad, tales como salida de operación de elementos conectados o perturbaciones presentadas por cambios en la variabilidad de la demanda de energía, con el objeto de identificar, clasificar y categorizar nodos vulnerables ante eventos no deseados. De acuerdo con los criterios de estabilidad asociados, este tipo de análisis de desempeño puede ser utilizado en sistemas más complejos, como es el caso de los sistemas reales, para que estos representen el porcentaje de vulnerabilidad en los elementos y equipos que se conectan al sistema eléctrico de potencia.

## Palabras clave

Estabilidad de voltaje, análisis de transitorios, polos, ceros, estabilidad de pequeña señal, cortocircuitos, flujos de carga.

## *Categorization and study of IEEE9 Model toward transient stability analysis*

### **ABSTRACT**

This paper summarizes the behavior of a characterized model focused on stability analysis of power systems taking into account Stability theory and the presence of abnormal conditions in order to identify, classify and categorize into parametric forms vulnerable nodes, thus, preventing or predicting undesired events. According to stability analysis criteria, this study may become a guide in real systems to determine vulnerability percentage for certain elements and connected power system equipment.

### **Keywords**

Voltage stability, transients, poles, zeros, small signal stability, faults, power flow.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia han sido el foco de estudio de la ingeniería eléctrica desde la perspectiva de alcanzar la estabilidad deseada en el comportamiento; por ejemplo, los niveles de tensión fuera de sus límites pueden ser causantes de severas contingencias tales como daños en equipos, ausencia de electricidad, pérdida total o parcial del suministro, lo que a su vez se traduce en pérdidas económicas.

Los estudios de caracterización de los sistemas, junto con una línea base, comúnmente arrojan resultados favorables al momento de analizar el comportamiento de un sistema, por este motivo se parte de tomar como punto de análisis el sistema de potencia denominado IEEE9 propuesto en NEPLAN, a fin de definir sus características como ejemplo de caso aplicado mediante esta herramienta [1].

El presente artículo servirá de guía para detallar los parámetros asociados y seleccionados para el sistema, el tipo de tecnología implementada en cada una de las unidades generadoras, posteriormente se detalla un análisis de flujo de carga, junto con el estudio de contingencias y fallas asociado a los elementos activos. Finalmente se realiza un estudio de estabilidad transitorio de pequeña señal y de estabilidad de tensión ante la variación de parámetros [2].

Este estudio busca, en resumen, determinar qué tan perjudicial puede ser una perturbación y/o contingencia e identificar cuáles son los puntos más vulnerables a los cuales

el sistema no pueda ser capaz de estabilizarse ante un cambio producido por un evento transitorio.

## METODOLOGÍA DE TRABAJO

El siguiente desarrollo se realizó a partir de la herramienta NEPLAN, en donde se presentó el modelo inicial y al cual se le introdujeron los datos arrojados por el sistema para su respectivo análisis [2], [3]. El trabajo está basado en la aplicación y el análisis de casos de estudio que permitan aplicar este mismo tipo de observaciones de desempeño a sistemas más complejos en los cuales se desconoce su comportamiento característico y que para la operación basada en confiabilidad, seguridad y flexibilidad es un paso necesario.

Una vez parametrizado el modelo se procede a aplicar los siguientes estudios apoyados en simulación para analizar el desempeño del sistema [2]:

- Flujo de carga que validará que el modelo funciona de manera óptima.
- Análisis de estabilidad de tensión para determinar los criterios de estabilidad del sistema.
- Análisis de pequeña señal con el objetivo de identificar cómo afectan pequeñas perturbaciones la operación del sistema.
- Estabilidad transitoria para determinar el tiempo de recuperación del sistema ante condiciones de inestabilidad.

El modelo IEEE9 fue seleccionado debido a que reúne las propiedades para el análisis de estabilidad, cuenta con líneas de transmisión, fuentes de generación y cargas. A continuación se detallan cada una de las etapas de parametrización y análisis de resultados [2], [4].

## PARÁMETROS Y VALORES INICIALES DEL MODELO IEEE9

Aquí se describen los parámetros asociados al análisis realizado junto con los datos de partida y de operación nominal del sistema trabajado.

### Esquema general del modelo IEEE9

El sistema ilustrado en la Fig. 1 corresponde al modelo IEEE9, el cual consta de tres

unidades generadoras, nueve barrajes, tres transformadores asociados a cada unidad generadora, un sistema enmallado compuesto por seis líneas interconectadas a 230 kV y tres cargas ubicadas en distintos barrajes al mismo nivel de tensión correspondiente al anillo. Cada unidad generadora es independiente, de condiciones de operación diferente y trabajada con distintas tecnologías.

### Parámetros y condiciones nominales de operación

A continuación se detalla cada uno de los parámetros utilizados durante la caracterización e identificación de las condiciones nominales de operación de los elementos del sistema:

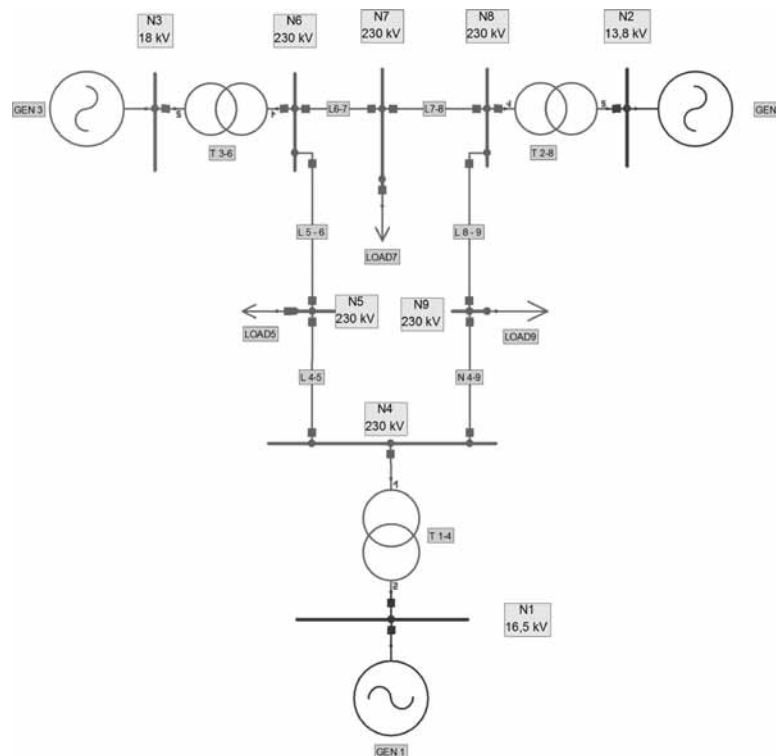


Fig. 1 Diagrama unifilar simulado en Neplan del modelo IEEE9

La Tabla I representa los niveles de tensión asociados a cada nodo del modelo planteado. En la Tabla II se muestran los valores de potencia activa y reactiva de cada una de las cargas asociadas. En la Tabla III se aprecia la impedancia asociada a cada unidad de transformación, siendo la resistencia igual a cero para todas las unidades debido a que se considera netamente reactiva cada unidad.

TABLA I  
RELACIONES NOMINALES DE TENSIÓN ASOCIADA  
A LOS NODOS

Nodo	Nivel de tensión (kV)
1	16,5
2	13,8
3	18
4 - 9	230

TABLA II  
CONDICIONES DE OPERACIÓN DE CADA UNA  
DE LAS CARGAS ASOCIADAS

Carga	P (MW)	Q (MVAR)
Nodo 5	125	50
Nodo 7	100	35
Nodo 9	90	30

TABLA III  
RELACIÓN DE IMPEDANCIAS Y CAPACIDAD NOMINAL  
DE CADA UNIDAD DE TRANSFORMACIÓN

Transformador	S (MVA)	Impedancia [PU] Base [100MVA]
1-4	100	0,0576
8-2	100	0,0586
3-6	200	0,0625

La Tabla IV representa los parámetros principales de las líneas de transición y la Tabla V corresponde a las propiedades de cada unidad generadora.

TABLA IV  
PARÁMETROS DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Líneas	R fases (Ohm/km)	Longitud (km)
N7 - N8	0,057	80
N6 - N7	0,056	70
N5 - N6	0,095	120
N9 - N4	0,095	75
N9 - N8	0,115	140
N4 - N5	0,056	75

Diagrama del diseño realizado basado en el modelo IEEE9

TABLA V  
PARÁMETROS DE LAS UNIDADES GENERADORAS  
ASOCIADAS AL SISTEMA

Parámetros	GEN1	GEN2	GEN3
Potencia Nominal (MVA)	247,5	192	128
Generación	Hidráulica	Térmica	Térmica
N (RPM)	180	3600	3600
H (S)	23,64	6,4	3,01
$K_{fric}$	4	3	3
$x_d$	0,146	0,8958	0,3125
$x_d'$	0,0608	0,1198	0,1813
$x_q$	0,0969	0,8645	1,2578
$x_q'$	0,0968	0,1969	0,25
$x_l$	0,0336	0,0521	0,0742
Td0	8,96	6	5,89
Tq0	0,31	0,532	0,6

Información tomada de referencia del modelo IEEE9 presentado por el software NEPLAN

## ANÁLISIS Y ESTUDIOS ASOCIADOS A ESTABILIDAD

El análisis de resultados está enfocado en los resultados obtenidos del flujo de carga, análisis de estabilidad de tensión, estabilidad de pequeña señal y estabilidad transitoria, los cuales finalmente indican las condiciones de operación que debe tener el sistema y cuál es su máximo operativo antes de que este salga de operación por una perturbación no asociada directamente a fallas.

### Flujo de carga

Para el análisis del comportamiento en operación normal del sistema IEEE9, se procedió a realizar el flujo de carga en NEPLAN [5]. En la Fig. 2 se muestran las condiciones iniciales fijadas para el flujo de carga entre las cuales se resaltan:

- *Modelo de cálculo:* Newton Raphson Extendido.
- *Error de convergencia:* 0,001
- *Número de iteraciones:* 200
- *Frecuencia de operación:* 60 Hz

Una vez realizado el corrido del flujo de carga, se tuvieron en cuenta las variaciones en tensión en cada uno de los nodos asociados al sistema (Caso 1), en donde se encontraban activas todas las unidades generadoras y adicionalmente operando los barrajes y líneas asociadas al sistema [2]. Estos valores se aprecian en la Tabla VI, por cada nodo asociado.

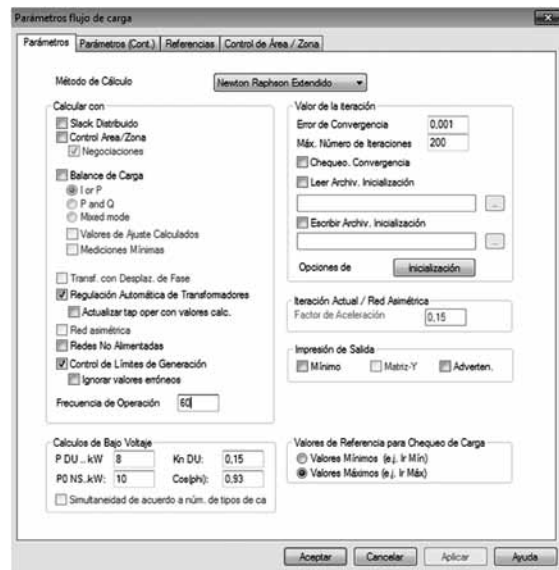


Fig. 2 Parámetros para el desarrollo del flujo de carga

Se deseaba, adicionalmente, verificar el comportamiento del sistema si se desconectaban elementos de estos; a continuación se presentaron los siguientes casos analizados:

**Caso 2:** Comportamiento del sistema desconectado el generador 3.

**Caso 3:** Comportamiento del sistema desconectado el generador 2.

**Caso 4:** Comportamiento del sistema desconectando el nodo 7.

**Caso 5:** Comportamiento del sistema desconectando la línea comprendida entre los nodos 4 y 5.

**Caso 6:** Comportamiento del sistema desconectando la línea comprendida entre los nodos 4 y 9.

**Caso 7:** Comportamiento del sistema desconectando la línea comprendida entre los nodos 5 y 6.

**Caso 8:** Comportamiento del sistema desconectando la línea comprendida entre los nodos 8 y 9.

La Tabla VI muestra los comportamientos asociados por nodos del sistema, estos parámetros se encuentran referenciados en valores por unidad y representan la variación ante posibles situaciones. Obsérvese que aunque se presenten cambios en la topología los nodos 1, 2 y 3 se encuentran estables y equivalentes al 100% debido a que estos se encuentran asociados a las unidades generadoras.

Las condiciones iguales a 0% representan la desconexión de elementos cercanos a nodos en donde no se presenta flujo de potencia. La Fig. 3 ilustra los nodos con mayor variación ante cambios en la topología, obsérvese que el nodo con mayor caída en el nivel de tensión asociado es el nodo 5 y la mayor caída se presenta para el caso 5 donde se realiza la desconexión entre los nodos 4 y 5 [6].

### Estabilidad de tensión

A continuación se ilustran los comportamientos asociados al análisis de tensión ante variaciones presentes en potencia. La Fig. 4 ilustra las variaciones en tensión para los nodos asociados a las unidades generadoras (nodos 1, 2 y 3). Al igual que en el análisis del flujo de carga, las variaciones de tensión alrededor de estos nodos fueron estables y esto se le atribuye a su cercanía con cada una de las unidades generadoras.

De manera análoga se analizan los demás nodos del sistema en la Fig. 5, obsérvese que se presenta mayor variación de tensión sobre el nodo 5, así como ocurrió en el análisis del flujo de carga. Obsérvese también la caída de tensión presente en el nodo 9, el cual es paralelo y con propiedades similares al nodo 5. Estos dos puntos son considerados, de acuerdo con el análisis realizado, como los puntos vulnerables en tensión del sistema siendo el nodo 5 de mayor priori-

TABLA VI  
RESUMEN PORCENTUAL DE LOS NIVELES DE TENSIÓN POR BARRAJE PARA DIVERSOS CASOS DE ESTUDIO

Caso \ Nudo	1	2	3	4	5	6	7	8
N1	100	100	100	100	100	100	100	100
N2	100	100	0	100	100	100	100	100
N3	100	0	100	100	100	100	100	100
N4	98,41	97,78	96,69	98,79	94,8	96,34	98,03	98,57
N5	95,81	94,36	93,98	96,45	82,76	92,36	94,81	95,93
N6	99,42	96,65	98,62	100,2	95,79	98,22	99,6	99,42
N7	98,21	96,23	96,47	0	91,29	97,14	98,15	98,15
N8	99,91	99,18	96,85	101,5	93,29	99,2	99,69	99,78
N9	97,33	96,63	94,55	97,84	87,77	94,11	96,9	97,77

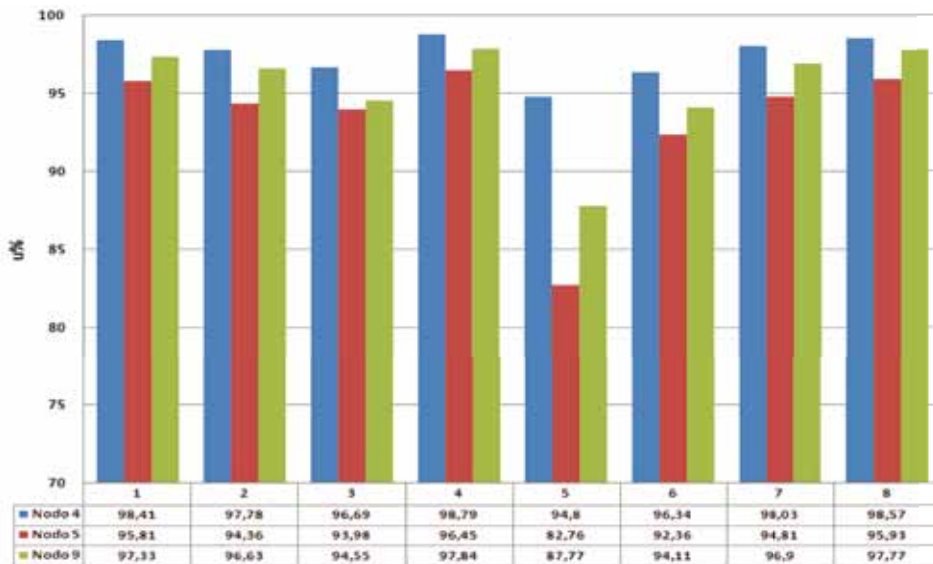


Fig. 3 Comportamiento de nodos con mayores cambios en tensión

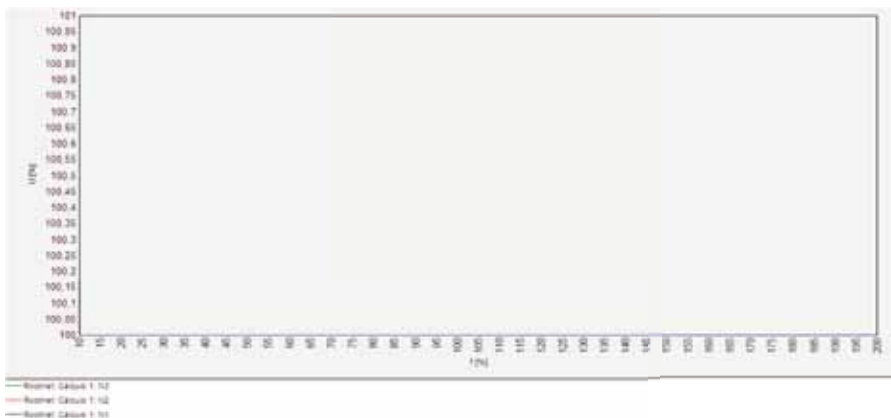


Fig. 4 Análisis del comportamiento P-V para los nodos 1, 2, 3 (Relación equivalente al 100%. Línea ubicada sobre el eje Y)

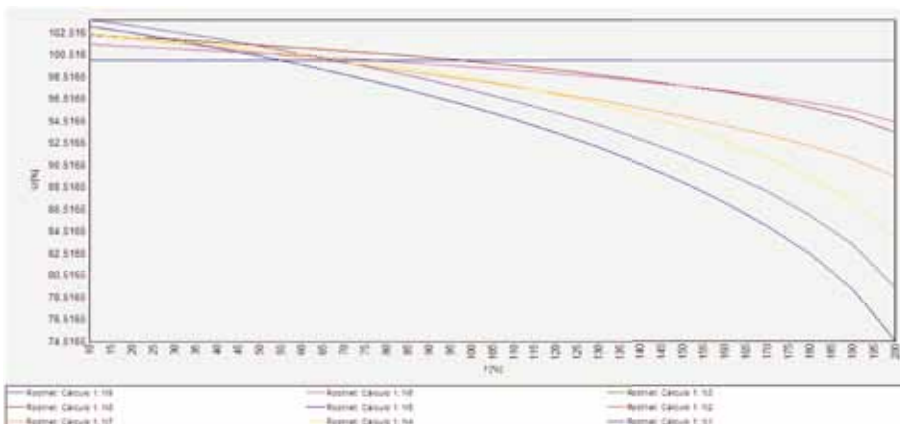


Fig. 5 Análisis del comportamiento P-V para todos los nodos



dad ante el evento sin descartar la relevancia del nodo 9.

La Fig. 6 ilustra el comportamiento de la potencia reactiva ante las variaciones de tensión. Nótese de esta figura que el nodo 4 es afectado ante las variaciones y se considera crítico y debe vigilarse ante caídas súbitas de tensión debido a que es posible que pueda presentarse inestabilidad alrededor de este punto [7].

La Tabla 6, al igual que la Fig. 7, corresponden a los niveles de potencia reactiva asociados por nodos; obsérvese que la mayor

variación porcentual por nodo es la correspondiente a los nodos 9 y 5.

TABLA VI  
RESUMEN PORCENTUAL DE LOS NIVELES DE SENSIBILIDAD ASOCIADA A CADA NODO DEL SISTEMA IEEE9

Nodo asociado	Sensibilidad
N9	0,0950
N5	0,0912
N7	0,0646
N4	0,0458
N8	0,0412
N6	0,0260

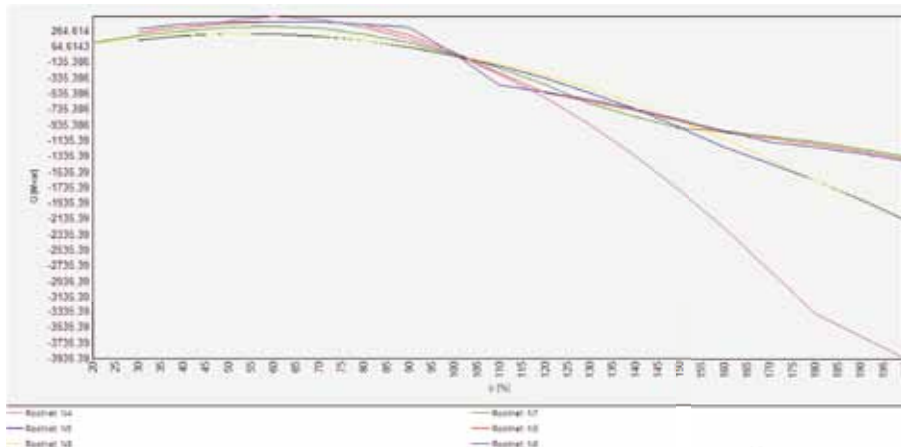


Fig. 6 Análisis del comportamiento V-Q para todos los nodos asociados

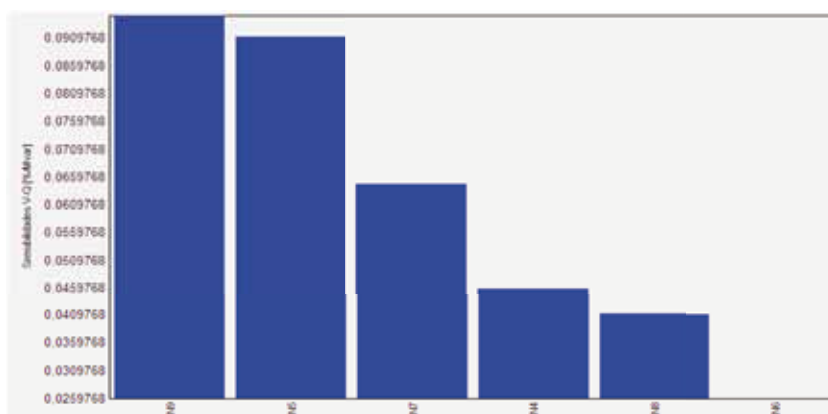


Fig. 7 Valores porcentuales de sensibilidad por nodos

## Análisis de pequeña señal

El análisis de pequeña señal considera el estudio del sistema analizando sus polos y ceros respectivos [8]. La Tabla VII ilustra la ubicación de los valores propios del sistema, su relación de amortiguamiento y la frecuencia a la que ocurren cuando hay presencia de variaciones debidas a la velocidad del rotor [8].

La Tabla VIII ilustra la causa de cada uno de los valores propios asociados al sistema. Estas condiciones se presentan bajo las condiciones previamente señaladas en la primera parte de este informe y teniendo las tres unidades generadoras activas.

TABLA VII  
CONDICIONES REALES E IMAGINARIAS ASOCIADAS  
A CADA UNO DE LOS VALORES PROPIOS DEL SISTEMA

No.	Valores propios		Relación de amortiguamiento	Frec
	P. Real	P. Imag		
1	-0,177	13,16	0,013	2,095
2	-0,084	7,289	0,012	1,16
3	0	—	—	—
4	-0,112	—	—	—
5	-0,137	—	—	—
6	-0,169	—	—	—
7	-0,179	—	—	—
8	-1,67	—	—	—
9	-1,881	—	—	—
10	-0,084	-7,289	0,012	1,16
11	-0,177	-13,16	0,013	2,095

TABLA VIII  
ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DE ESTADO DE MAYOR PARTICIPACIÓN

No.	Variable de estado de mayor participación	
	Unidad	Causa
1	GEN 3 (ID=1528186)	Velocidad del Rotor
2	GEN 2 (ID=1528220)	Velocidad del Rotor
3	GEN 1 (ID=1528343)	Ángulo Rotor
4	GEN 1 (ID=1528343)	Enlaces de Flujo fd
5	GEN 1 (ID=1528343)	Velocidad del Rotor
6	GEN 2 (ID=1528220)	Enlaces de Flujo fd
7	GEN 3 (ID=1528186)	Enlaces de Flujo fd
8	GEN 3 (ID=1528186)	Enlaces de Flujo 1q
9	GEN 2 (ID=1528220)	Enlaces de Flujo 1q
10	GEN 2 (ID=1528220)	Velocidad del Rotor
11	GEN 3 (ID=1528186)	Velocidad del Rotor

La Fig. 8 ilustra el comportamiento de los valores propios asociado al sistema, obsérvese la distribución respectiva resaltando la proximidad con el eje positivo por parte de algunos de estos puntos. Esto es atribuible a la operación continua de cada una de las máquinas que se encuentran en operación.

La Fig. 9 ilustra la distribución de los valores propios del sistema al reducir la potencia de operación de la unidad generadora 3. Al comparar las Fig. 8 y 9, obsérvese la re-

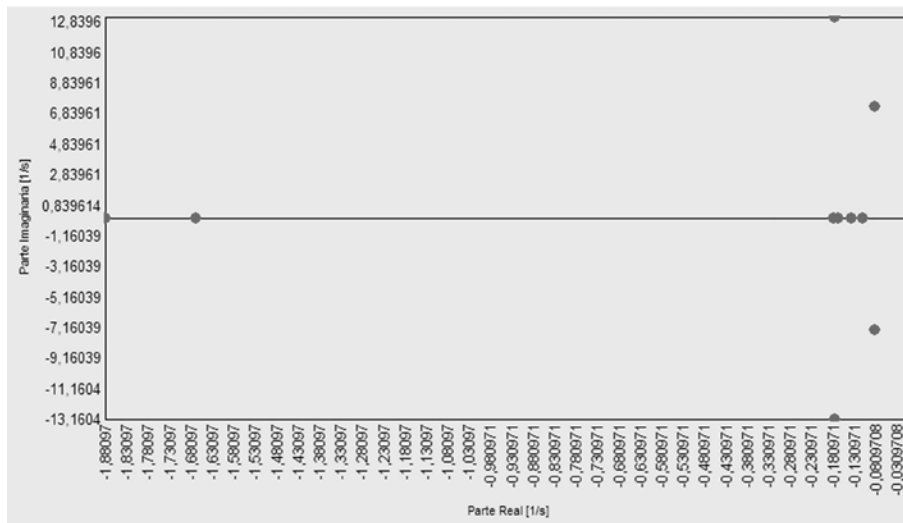


Fig. 8 Distribución de los valores propios del sistema en operación nominal

distribución de los polos con partes reales e imaginarias y cómo estas se alejan del cero. Nótese que la magnitud de estos se duplica y se distribuye a lo largo de los ejes en análisis.

Este fenómeno se presenta debido a la variación de la velocidad de giro del rotor de la unidad 3 a la cual se le disminuyó la potencia de operación, por lo tanto su velocidad disminuye en gran medida.

Obsérvese un comportamiento similar al igualar la potencia de operación de la unidad 3 a 50 MVA (Fig. 10), al cual le varían la ubicación de los valores propios producto de la velocidad de giro del rotor de la unidad 3.

Las Fig. 11 y 12 ilustran el comportamiento del sistema al desconectar las unidades 3 y 2, respectivamente.

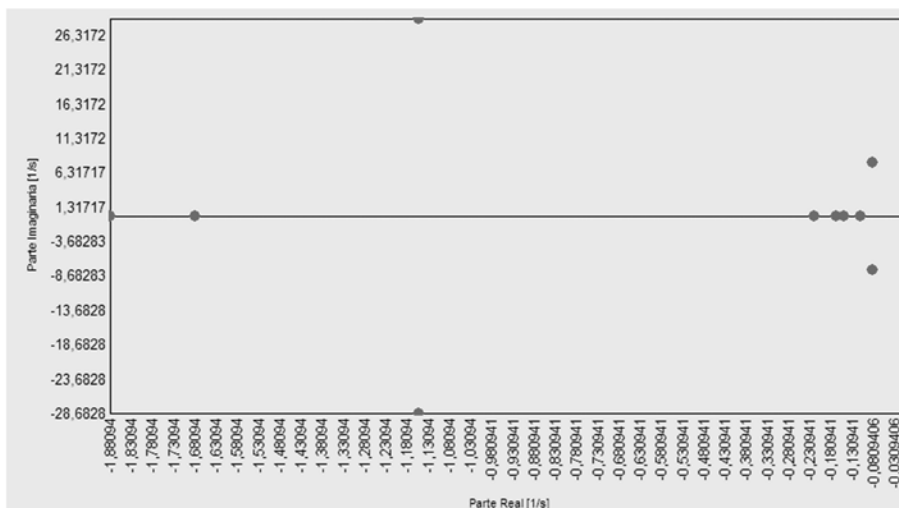


Fig. 9 Distribución de los valores propios del sistema al disminuirse la potencia de operación del generador 3

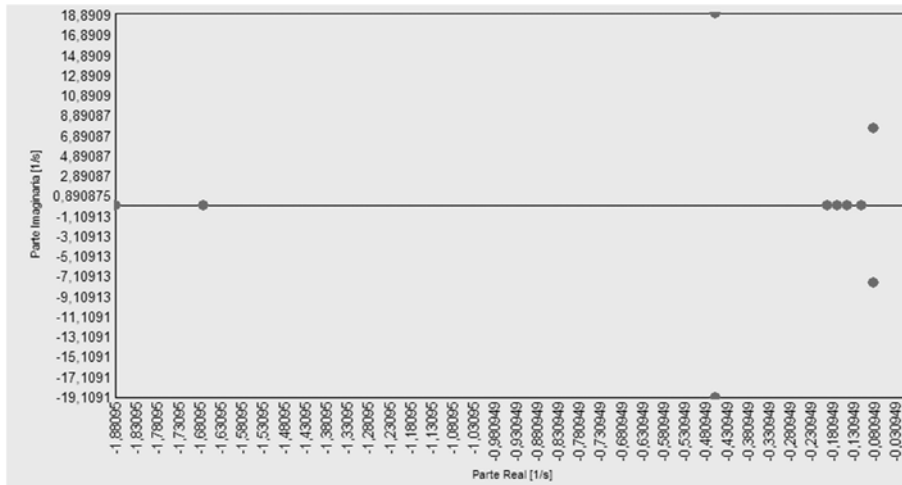


Fig. 10 Distribución de los valores propios del sistema al igualar la potencia de operación del generador 3 a 50 MVA

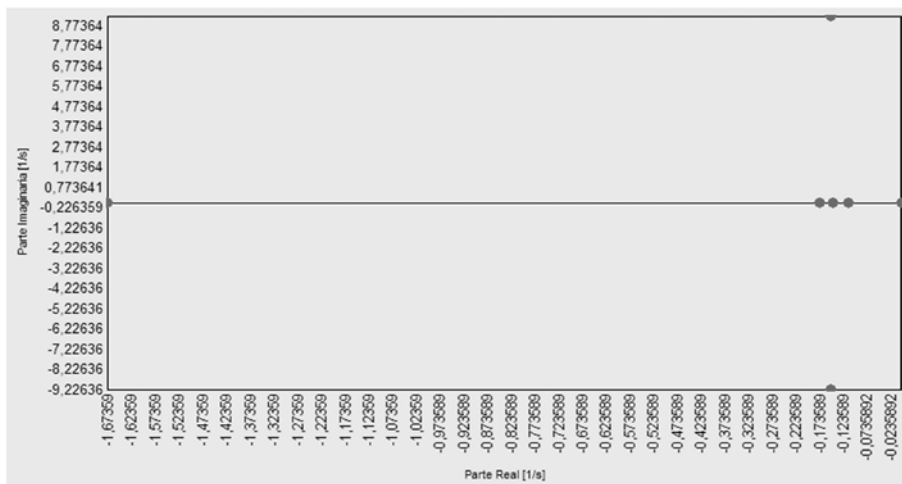


Fig. 11 Distribución de los valores propios del sistema al desconectar el generador 3

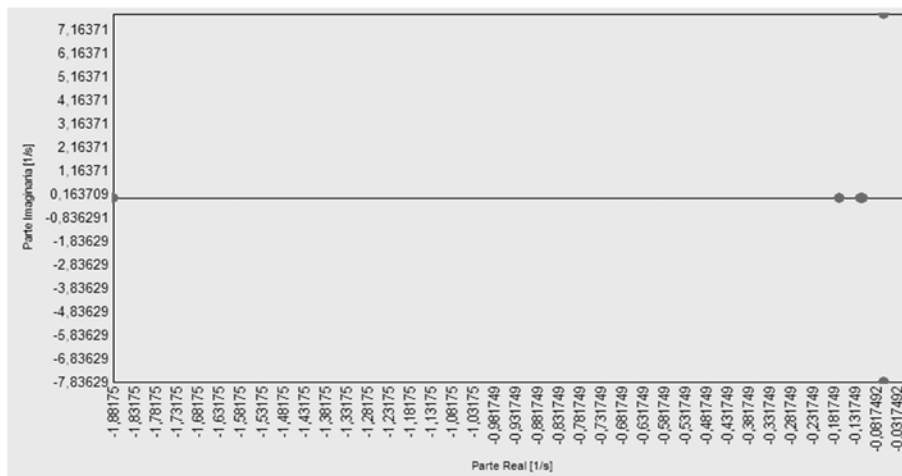


Fig. 12 Distribución de los valores propios del sistema al desconectar el generador 2

En síntesis, los valores propios de un sistema varían en función de su topología, las velocidades de operación de cada una de las unidades presentes, la cantidad de unidades que se encuentran en el sistema, la potencia suministrada por cada unidad, el ángulo de rotor al cual se encuentra operando.

Por este motivo es de vital importancia el constante monitoreo de los valores propios del sistema debido a que estos se encuentran en constante movimiento si se presentan constantes cambios dentro del sistema en estudio.

### Estabilidad transitoria

El estudio de transitorios determinará el comportamiento de cada uno de los elementos asociados del sistema ante perturbaciones. Partiendo de este hecho se realizaron

simulaciones de perturbaciones debidas a fallas en el nodo 5, ya que este se consideró, de acuerdo con los estudios anteriores, como punto vulnerable del sistema [9].

La Fig. 13 ilustra el comportamiento asociado a las unidades generadoras ante la presencia de una falla del tipo trifásica en este barraje, el tiempo de observación tomado fue de 150 segundos y durante este tiempo el sistema no se recuperó. Se planteó aislar la falla sacando de operación el respectivo nodo en falla, sin embargo el sistema no se recupera ante esta salida, como lo evidencia la Fig. 14 [10].

La Fig. 15 muestra el comportamiento de las tensiones nodales de los nodos que se encuentran asociados al anillo que interconecta el sistema; obsérvense las variaciones en las tensiones a pesar de haber aislado la

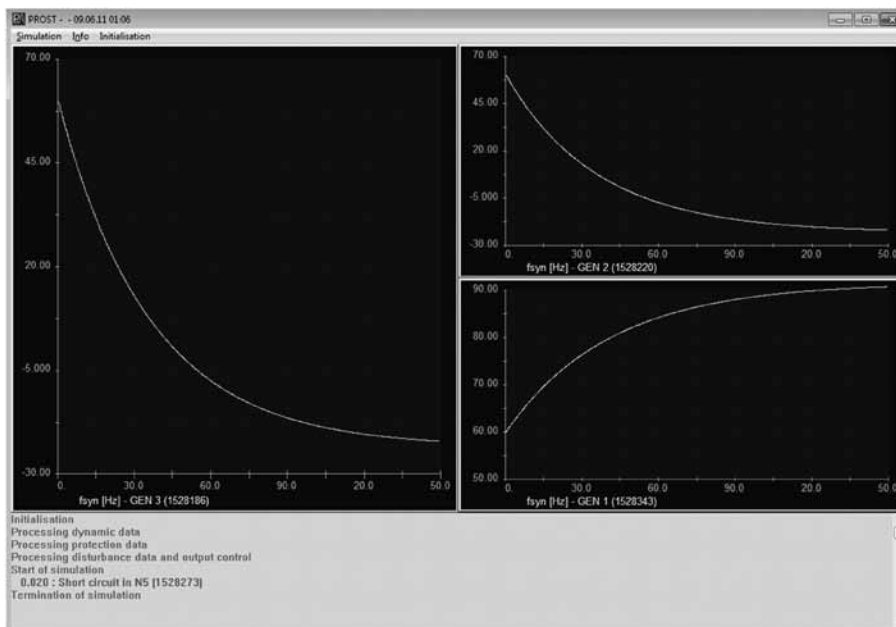


Fig. 13 Curvas de comportamiento de las unidades generadoras asociadas ante una falla trifásica en el nodo 5

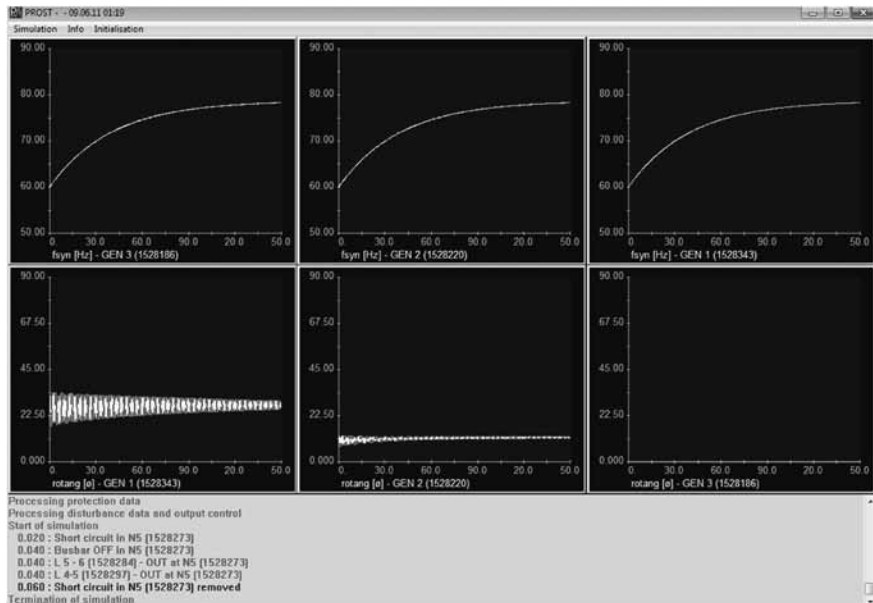


Fig. 14 Curvas de comportamiento de las unidades generadoras asociadas ante una falla trifásica en el nodo 5 (Arriba gráficos de frecuencia y abajo velocidad de giro del rotor)

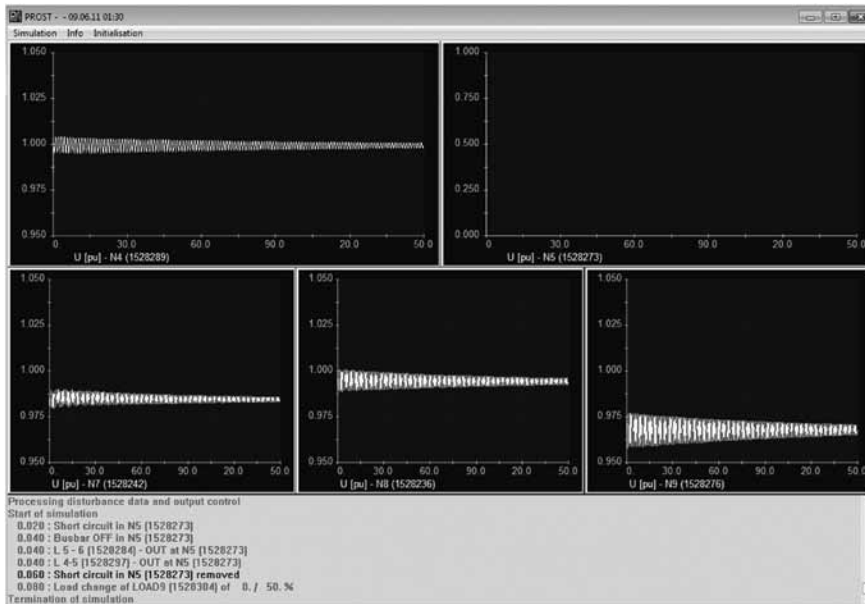


Fig. 15 Niveles de tensiones nodales ante una falla trifásica en el nodo 5

falla, lo que conlleva a concluir que el sistema no se estabiliza.

La Fig. 16 muestra las variaciones en las tensiones nodales al desconectar la línea

7-4. Obsérvese que el sistema no se repone fácilmente ante esta perturbación, por lo que la tensión oscila hasta alcanzar un margen de estabilidad y teniendo un comportamiento del tipo subamortiguado [3].

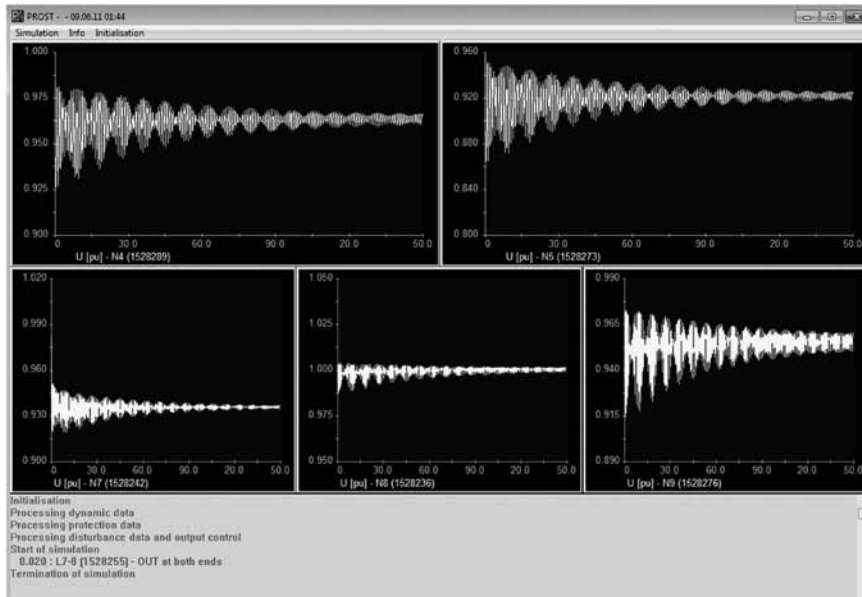


Fig. 16 Comportamiento de los niveles de tensión de cada uno de los nodos del sistema al desconectar la línea 7-4

De la Fig. 17 se puede observar el comportamiento de las unidades generadoras al desconectar la línea 7-4; al desconectar esta línea no se observan grandes cambios en las variaciones de frecuencia, sin embargo es prudente realizar acciones correctivas.

Si se compara con el caso del nodo 5, este nodo sí tiende a hacer inestable todo el sistema, por lo que el análisis transitorio concluye un análisis de las condiciones de operación para el nodo 5 con el objetivo de realizar una adecuada caracterización de

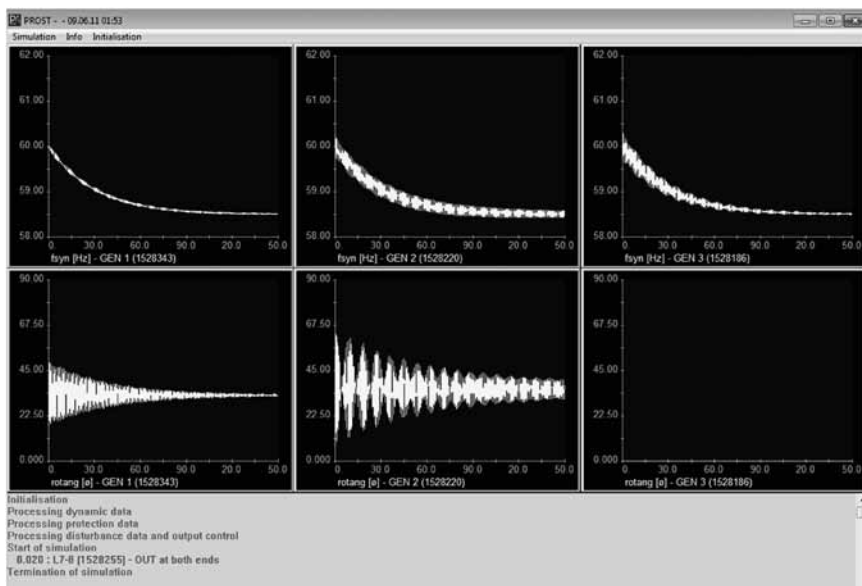


Fig. 17 Variaciones en la frecuencia y velocidad de giro de las unidades generadoras.

este para proponer acciones correctivas que mitiguen posibles efectos ante fallas y/o contingencias alrededor de este punto.

## CONCLUSIONES

Con base en la caracterización realizada y el estudio de estabilidad realizado se tienen las siguientes conclusiones del sistema asociado y en general de los criterios y las condiciones de estabilidad:

- Para el caso del modelo IEEE9, los puntos vulnerables del sistema, de acuerdo con el análisis de flujo de carga y el estudio de estabilidad de tensión, se tiene que estos puntos son respectivamente los nodos 5 y 9, los cuales hacen parte del anillo que interconecta las unidades generadoras y enlaza las cargas. Por este motivo, la dependencia de las unidades generadoras los hace vulnerables por lo que la contribución de la caída de tensión se ve asociada a estos nodos.
- Los valores propios de un sistema dependen de las topologías asociadas y de las unidades generadoras conectadas al sistema, junto con sus condiciones de operación asociadas, por ejemplo: Potencia nominal de operación, velocidad de giro del rotor, flujos de potencia a través del sistema [9], entre otros.
- Los valores propios son cambiantes ante variaciones en las condiciones del sistema, por lo que hacen parte fundamental del estudio de estabilidad debido a que permiten visualizar el estado del

sistema ante posibles eventos de inestabilidad [9].

- El análisis de transitorios permite identificar puntos vulnerables del sistema, para así proponer acciones correctivas que mitiguen los efectos que puedan verse reflejados en todo el sistema.

## REFERENCIAS

- [1] F. Morales and A. Cipriano, "RUDNICK, Hugh. Evaluación de técnicas basadas en conocimiento para el diseño de controles de excitación en Sistemas de Potencia". Facultad de Ingeniería, PUCC, Chile., Universidad Católica de Chile, p. 6, 2010.
- [2] IEEE, Standard 110. Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses, IEEE, 2002.
- [3] D. Serna and J. González, "Análisis de indicadores basados en sistemas IEEE y en Colombia para predicciones de estabilidad de tensión," 2010.
- [4] A. Aguilera-González and C. Morales Morales, "Situación actual de los sistemas de diagnóstico y control tolerante a fallas basado en múltiples modelos," Congreso Anual 2009 de la Asociación de México de Control Automático, vol. 1, no. 1, p. 7, 2009.
- [5] P. Ledesma Larrea, *Análisis dinámico de sistemas eléctricos con generación eólica*, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [6] O. E. Díaz Vanegas and J. A. Rodríguez Meza, *Prácticas computacionales sobre flujos de carga y análisis de corto circuito en sistemas eléctricos de potencia utilizan-*



- do los programas ETAP POWERSTATION 3.02 y POWERWORLD SIMULATOR 7.0*, Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2001.
- [7] G. Enriquez Harper, *Análisis moderno de sistemas eléctricos de potencia*, México: Limusa, 1992.
- [8] C. Juárez and D. Colomé, "Tendencias en la supervisión en tiempo real de la estabilidad de pequeña señal de sistemas de potencia," XIII ERIAC Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, vol. XIII, pp. 1-8, 2009.
- [9] J. Grainger and W. Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*, México: McGraw-Hill, 2001.
- [10] D. K. de Alencar Ohi, *Análise e estudo de estabilidade em sistemas elétricos de potência*, Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2011.
- [11] S. Rivera Rodríguez, "Estado del arte en la ubicación óptima de capacitores y estudio de optimización de la solución mediante búsqueda exhaustiva," *Visión actual*, vol. 1, p. 10, 2008.

