

Análisis de Estabilidad Angular en un Sistema de Laboratorio

Barrera C.*, Játiva J.*

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador
e-mail: candres.barrera@gmail.com; jjativa@yahoo.com

Resumen: En este artículo se desarrolla un estudio de estabilidad angular de un sistema eléctrico de potencia armado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Para la obtención del comportamiento de los ángulos de potencia se utiliza una tarjeta de adquisición de datos NI DAQ 6009 OEM y una aplicación en LabVIEW™. La aplicación procesa las señales provenientes de circuitos electrónicos que detectan cruces ascendentes del voltaje terminal de un generador y la posición mecánica del rotor de cada generador. La metodología se basa en que el voltaje interno de un generador está relacionado con la posición mecánica del rotor. Los resultados del análisis de estabilidad angular muestran un sistema estable con aumentos y disminuciones súbitas de carga resistiva inductiva y resistiva capacitiva. Con un cortocircuito trifásico al final de una de las líneas de transmisión, el sistema es inestable produciéndose la salida súbita de los generadores.

Palabras clave: Estabilidad Angular, Medición del Ángulo de Potencia, Sistema de Potencia de Laboratorio, LabVIEW™.

Abstract: In this project an angular stability study in a power system assembled in the Electrical Machines Laboratory of Electrical and Electronics Engineering is developed. To obtain the power angle behavior, a data acquisition card NI DAQ 6009 OEM and a LabVIEW™ application are used. The application processes the signals from electronics circuits which detect the upward crossings of a generator terminal voltage and the rotor mechanical position of each generator. The methodology is based on that the generator internal voltage is related to the mechanical position of the rotor. The stability test results show a stable system against sudden increases and decreases of resistive load. For a three phase short circuit at the end of one of the transmission lines, the system is unstable resulting in sudden generators outputs.

Keywords: Angular Stability, Power Angle Measurement, Power System Laboratory, LabVIEW™.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de estabilidad de un sistema eléctrico de potencia son requeridos por las entidades de transmisión y control que rigen el funcionamiento de sistemas regionales o nacionales, a fin de conocer, por ejemplo, si la salida de generación, la pérdida de un enlace de transmisión o el seccionamiento de carga afectan la seguridad operativa del sistema.

De manera general, la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia es definida como la propiedad de permanecer en un estado operativo de equilibrio bajo condiciones de operación normal así como de recuperarse luego de haber sido sometido a una perturbación hasta un nuevo estado de equilibrio.

La inestabilidad en un sistema de potencia puede manifestarse de muchas maneras dependiendo de su configuración y su

modo operativo. La inestabilidad puede ocurrir ya sea por problemas de ángulo de los rotores de las máquinas sincrónicas o de voltaje en un área o todo el sistema eléctrico. El primero está relacionado con el mantenimiento de la operación sincrónica de todas las máquinas sincrónicas, generadores y motores, en funcionamiento; en tanto que, el segundo tiene que ver con el balance de potencia reactiva en el sistema.

La estabilidad angular está influenciada por la dinámica de los ángulos de los rotores y las relaciones potencia - ángulo, ante una perturbación de gran o pequeña magnitud. Estas relaciones son altamente no lineales, dada por su dependencia con la función sinusoidal de los ángulos de los rotores. Tradicionalmente, los problemas de estabilidad han sido analizados mediante la solución del sistema de ecuaciones de oscilación por métodos numéricos; sin embargo, una apreciación real del comportamiento de los ángulos internos de las máquinas fue postergada hasta las década de los 90.

La medición de los ángulos de los rotores ha sido tratada últimamente gracias a la disponibilidad de dispositivos y paquetes computacionales de adquisición y procesamiento de datos. En este trabajo se utiliza la tarjeta de National Instruments NI DAQ 6009 y se desarrolla una aplicación en el programa LabVIEW™, conjuntamente con tarjetas electrónicas de adaptación de señales construidas para las máquinas disponibles en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional.

2. MEDICIÓN DE LOS ÁNGULOS DE POTENCIA EN EL SISTEMA DE LABORATORIO

El desarrollo tecnológico ha permitido cada vez conocer más a detalle los fenómenos que ocurren en los sistemas eléctricos en general. La medición del ángulo de potencia de un generador síncrono hace muchos años era muy difícil realizarla; sin embargo, los dispositivos de adquisición de datos disponibles en la actualidad permiten elaborar aplicaciones computacionales y electrónicas en base al procesamiento de variables eléctricas y mecánicas.

2.1 Metodología Aplicada [6] [8]

El ángulo de potencia δ puede definirse como la diferencia angular entre el fasor voltaje interno del generador, inducido por el campo magnético del rotor, y el fasor voltaje de una fase de los terminales del generador; como se observa en el diagrama de la Figura 1.

La fase del voltaje interno E_i está relacionada con la posición mecánica del rotor, por lo que el ángulo δ puede verse como el ángulo eléctrico entre un eje del rotor y la posición de una fase del voltaje en los terminales del generador.

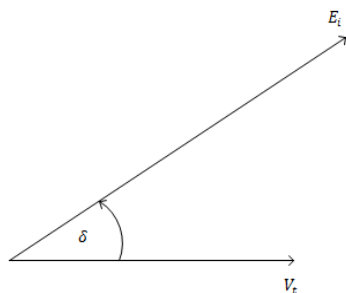


Figura 1. Descripción del ángulo de potencia

En condiciones de vacío, el ángulo de potencia es igual a cero, y los voltajes interno y terminal del generador son iguales. A medida que se incrementa la carga del generador, el ángulo de potencia aumentará siguiendo el comportamiento de la curva de potencia activa en función del ángulo de potencia.

2.2 Método Estroboscópico para la Medición del Ángulo de Potencia de un Generador Síncrono [6]

El método estroboscópico está basado en la obtención de señales entregadas por un sensor óptico al incidir luz sobre el mismo. La señal entregada por el sensor óptico indica la posición de un punto del rotor (señal del voltaje interno) y al ser comparada con la señal de cruce por cero del voltaje terminal del generador permite obtener el desfase de tiempo entre estas dos señales. Luego este desfase es transformado a grados mecánicos por medio de la ecuación (1).

$$\delta = 2\pi f_{rotor} \Delta t \quad (rad \text{ mec}) \quad (1)$$

Donde:

- f_{rotor} : Frecuencia a la que gira el rotor
- Δt : Desfase tiempo entre la señal del sensor óptico y la señal del voltaje terminal

La condición de vacío del generador permite tener una referencia del cambio del ángulo de potencia ante aumentos o disminuciones de carga. A partir de la operación en vacío del generador se obtienen el valor inicial de desfase entre las señales del voltaje interno y el voltaje terminal.

En la ecuación (1), la variable que produce un cambio en el ángulo de potencia es el desfase de tiempo Δt entre las señales del voltaje interno y el voltaje terminal del generador, por lo que el mejor tipo de señal para medir esta diferencia de tiempo son pulsos positivos, los mismos que deben ser obtenidos mediante circuitos electrónicos debidamente diseñados.

La Figura 2 ilustra las señales de los circuitos electrónicos requeridos por un generador síncrono con rotor de dos pares de polos. En cada giro del rotor se tienen dos ondas de voltaje terminal sinusoidal (a), y por cada giro del rotor, se tiene un pulso proveniente de un circuito electrónico (c), al igual que dos pulsos del circuito detector de cruce por cero ascendente del voltaje terminal del generador (b).

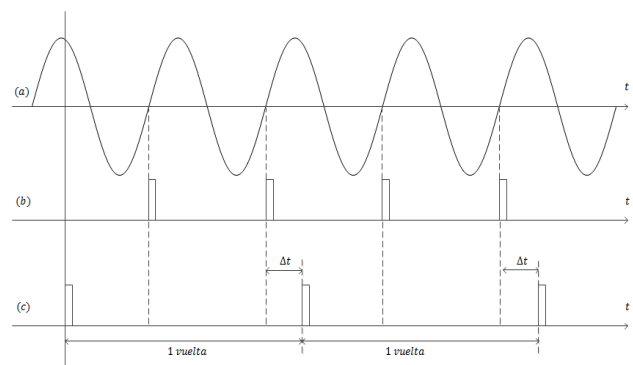


Figura 2. Pulsos del circuito detector de cruce por cero ascendente del voltaje terminal del generador y pulsos de la posición mecánica del rotor [6]

Mediante la adquisición de datos realizada por la tarjeta DAQ, se puede procesar la información mediante el software LabVIEW™, con el objeto de encontrar el desfase Δt indicado en la Figura 2.

Para la transformación de grados mecánicos a grados eléctricos, se utiliza la Ecuación (2).

$$\theta_{eléctricos} = p / 2 \theta_{mecánicos} \quad (2)$$

Donde:

- p : Número de polos del generador sincrónico

Los dos generadores sincrónicos del Laboratorio de Máquinas Eléctricas tienen cuatro polos cada uno, por lo que la ecuación (1) debe considerar lo expuesto en la ecuación (2), obteniéndose:

$$\delta = 2(2\pi f_{rotor} \Delta t) \quad (rad \text{ eléc}) \quad (3)$$

Transformando los radianes eléctricos a grados eléctricos, se tiene la Ecuación (4):

$$\delta = 720 f_{rotor} \Delta t \quad (°eléc) \quad (4)$$

La ecuación (4) debe ser utilizada en la programación implementada en LabVIEW™ para determinar el ángulo de potencia δ .

2.3 Medidor del Angulo de Potencia [2]

Para realizar la medición del ángulo de potencia son necesarios dos circuitos electrónicos capaces de entregar pulsos positivos de voltaje con una amplitud adecuada a las especificaciones de la etapa de adquisición de datos, el conjunto medidor del ángulo de potencia se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 3.

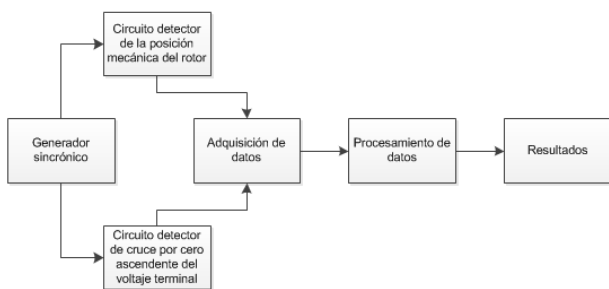


Figura 3. Diagrama bloques del medidor del ángulo de potencia

La Figura 4 muestra el diagrama esquemático y la respuesta de la simulación del circuito detector de la posición del rotor.

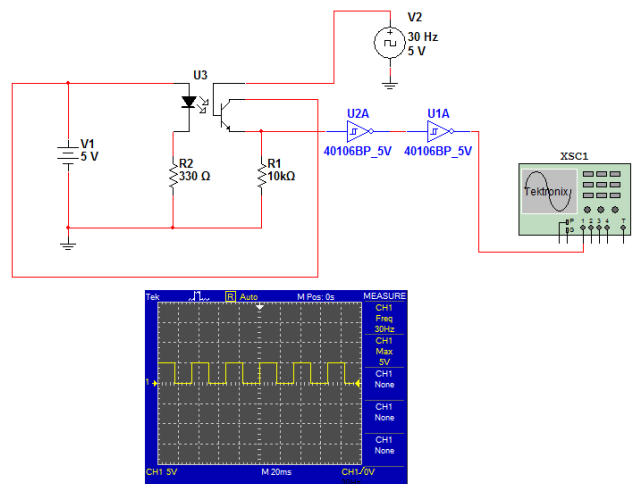


Figura 4. Diagrama esquemático y resultado de la simulación del circuito detector de la posición del rotor

La Figura 5 muestra el diagrama esquemático y el resultado de la simulación del circuito detector de cruce por cero ascendente del voltaje terminal.

Para el proceso de adquisición de datos, se utiliza una tarjeta DAQ 6009 OEM (Figura 6) fabricada por National Instruments™. La tarjeta en su versión OEM (bajo costo) tiene las siguientes características generales:

- 8 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s)
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s)
- 12 E/S digitales
- Contador de 32 bits
- Conexión USB
- Software controlador para Windows, Mac OS X, Linux® y PDA

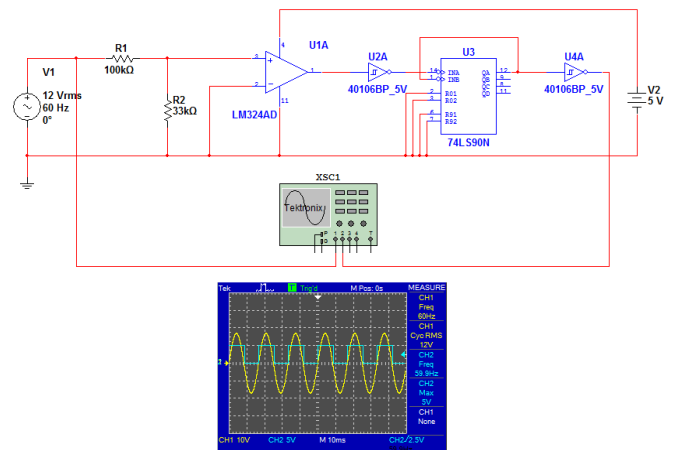


Figura 5. Diagrama esquemático y resultado de la simulación del circuito detector de cruce por cero ascendente

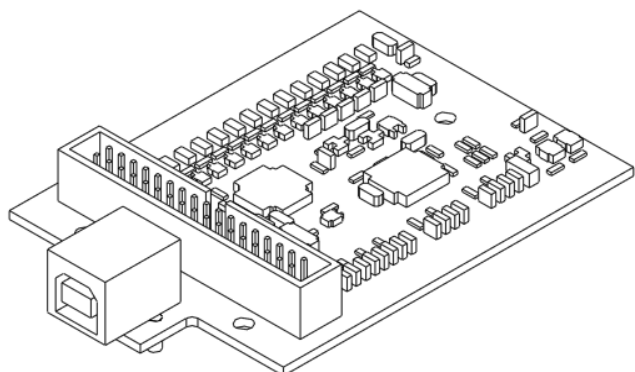


Figura 6. Tarjeta de adquisición de datos NI DAQ 6009 OEM [4]

La programación gráfica y la integración de hardware para el diseño y control está implementada en una aplicación de LabVIEW™.

3. APLICACIÓN DESARROLADA EN LABVIEW™

El diseño de la aplicación para medir y graficar en tiempo real los ángulos de potencia de los dos generadores sincrónicos, parte del diagrama fasorial mostrado en la Figura 7. A partir de los pulsos del voltaje terminal de un generador y la ecuación (4), se mide el tiempo de desfase entre los pulsos proporcionados por los rotores de cada generador, de manera individual.

Los ángulos de potencia con los generadores en vacío constituyen los valores iniciales de los ángulos y pasan a convertirse en las referencias ($\delta = 0^\circ$), para medir y observar las variaciones de estos ángulos frente a cambios operativos de generación o carga así como de la red eléctrica. Del voltaje terminal de uno de los generadores se toma la referencia para la medición, el mismo que es un voltaje fase - fase. El diagrama de la Figura 7 presenta fasores fase - neutro, por lo que se debe considerar el desfase de 30° para realizar la medición. Al tomar la referencia de los ángulos de potencia en un valor inicial, los 30° de desfase entre los fasores fase - fase y fase - neutro se encuentran ya considerados en estos valores iniciales.

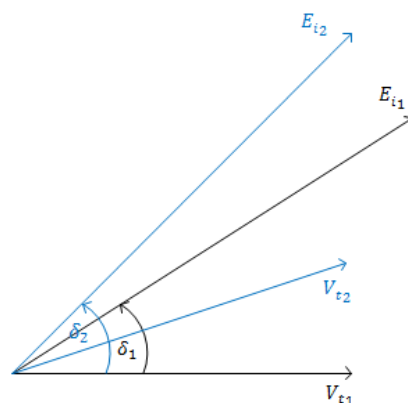


Figura 7. Diagrama fasorial de dos generadores sincrónicos con referencia en V_{t1}

Los generadores sincrónicos del Laboratorio de Máquinas Eléctricas se encuentran montados en las Mesas 3 y 4, números con los cuales se identifican en adelante cualquier variable de estos generadores en la aplicación en LabVIEW™. Las características constructivas que presentan los generadores, permiten seleccionar al generador sincrónico de la Mesa 4 como el generador referencia para la medición de los ángulos de potencia.

La Figura 8 muestra el diagrama de bloques de la aplicación desarrollada en LabVIEW™.

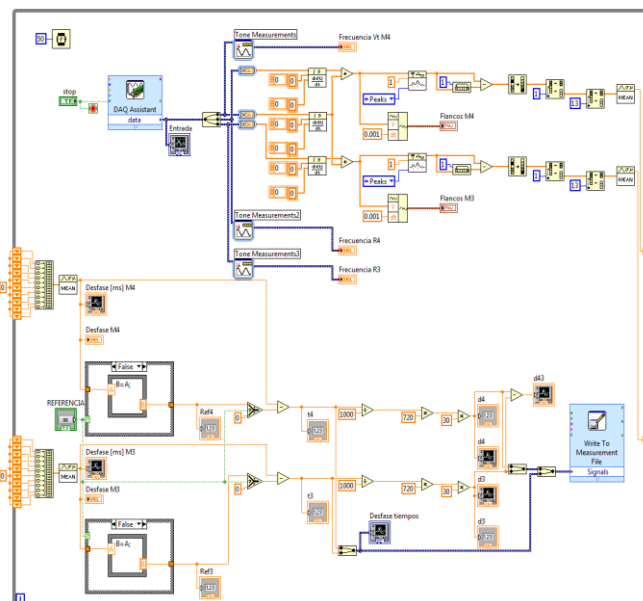


Figura 8. Diagrama de bloques de la aplicación desarrollada en LabVIEW™

La Figura 9 presenta el panel frontal de la aplicación, donde se tienen ventanas que despliegan el comportamiento en tiempo real de los ángulos de potencia, además de su correspondiente valor numérico.

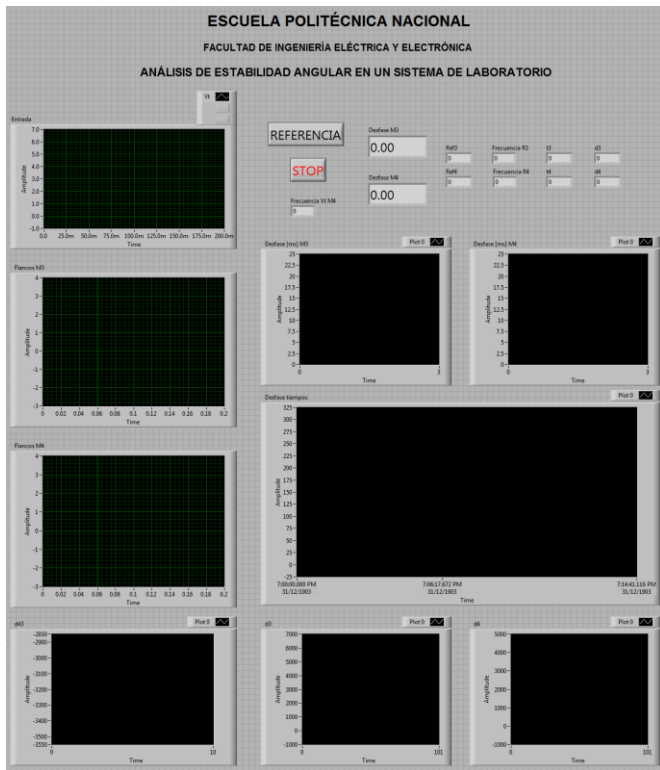


Figura 9. Panel frontal de la aplicación desarrollada en LabVIEW™

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA APLICACIÓN PRÁCTICA

Los resultados en un análisis de estabilidad angular provienen de la observación detallada de los ángulos de potencia de los generadores que componen el sistema eléctrico. La aplicación permite observar en tiempo real el comportamiento de los ángulos de potencia, constituyéndose en una herramienta didáctica para el estudio de problemas de estabilidad transitoria.

4.1 Descripción del Sistema de Laboratorio

El sistema eléctrico de potencia, sobre el cual se va a estudiar problemas de estabilidad angular, consta de dos generadores síncronos de cuatro polos, dos líneas de transmisión de 100 km y una línea de transmisión de 200 km. Las cargas a emplearse son bancos balanceados trifásicos de RL y RC.

Los datos de placa de los generadores síncronos que conforman el sistema se muestran en la Tabla 1 y 2.

Tabla 1 Datos de placa del generador síncrono de la Mesa 3

Marca	CETEL Bruxelles
Voltaje	220 (V)
Corriente	7,25 (A)
Potencia Aparente	2,76 (kVA)
fp	0,8 ind
Velocidad	1800 (rpm)
Frecuencia	60 (Hz)

Tabla 2 Datos de placa del generador síncrono de la Mesa 4

Marca	Siemens
Voltaje	230 (V)
Corriente	8,7 (A)
Potencia Aparente	3,5 (kVA)
fp	0,8 ind
Velocidad	1800 (rpm)
Frecuencia	60 (Hz)

Para emular las líneas de transmisión se utiliza un modelo a escala, constituido de 3 módulos de parámetros concentrados, el cual está disponible en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y que se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Modelo a escala de línea de transmisión [8]

El diagrama trifilar de la Figura 11 detalla la conexión del sistema eléctrico de laboratorio. Para el monitoreo de los generadores y la carga se emplean analizadores industriales, los que entregan datos de voltajes, corrientes y potencias de cada elemento. El acoplamiento entre las distintas mesas del laboratorio se realiza internamente en el tablero principal del mismo para conectar la carga en la Mesa 11.

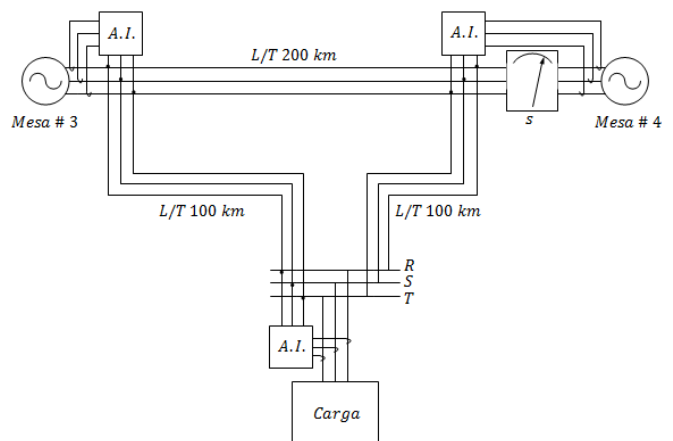


Figura 11. Diagrama trifilar del sistema de laboratorio

La conexión del medidor del ángulo de potencia debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- La fuente de 5 V_{DC} que polariza los tres circuitos debe ser la misma.
- La salida de cada circuito debe estar conectada a los correspondientes terminales asignados en la configuración de entradas de la tarjeta de adquisición de datos.
- La conexión debe realizarse con cables de cobre #24 AWG, usados generalmente para protoboards.
- La ubicación del circuito detector de la posición del rotor debe estar bajo la marca colocada en el mismo, a una distancia del rotor tal que provea una buena señal de pulso en LabVIEW™. Además debe estar completamente fijo, para evitar desplazamientos que puedan darse por el movimiento del rotor.

El circuito detector de cruce por cero ascendente del voltaje terminal y la tarjeta DAQ pueden estar ubicados arbitrariamente, ya que no influyen en el proceso de medición.

La referencia inicial depende de los pulsos provenientes del circuito detector de la posición del rotor, los cuales pueden ser variables por causas mecánicas como:

- El ancho de la marca colocada sobre el rotor.
- Ubicación de la marca colocada sobre el rotor.
- Ubicación del sensor óptico bajo el eje del rotor.
- Condiciones mecánicas del acoplamiento entre el eje del generador y el eje del motor asíncrono que entrega la energía motriz.

La Figura 12 muestra la ubicación del circuito detector de la posición del rotor del generador de la Mesa 4.

En las Figura 13 y 14 se observa como los valores de desfase y ángulos pasan de un valor inicial a otro cercano a cero, tomado como referencia.

4.2 Resultados Carga RL

Los valores medidos de potencia aparente y factor de potencia de cada paso de carga tipo RL, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 Potencia aparente y fp de cada paso de carga

Paso de Carga RL	S (kVA)	fp
1	0,13	0,12
2	0,44	0,05
3	0,74	0,10
4	1,66	0,09

Al primer paso de carga, como se aprecia en la Figura 15, los ángulos de potencia δ_3 y δ_4 cambian de un estado inicial a un nuevo estado estable sin oscilar mayormente, incluso durante el proceso de ajuste manual de velocidad y voltaje del generador de la Mesa 4.

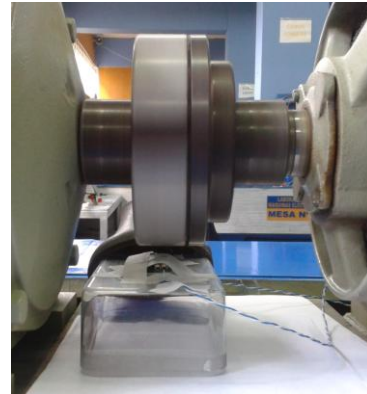


Figura 12. Ubicación del circuito detector de la posición del rotor - Mesa 4

Con el segundo paso de carga, en la Figura 16, δ_3 presenta una caída en su comportamiento, el cual se debe al ajuste manual de la frecuencia, mientras que δ_4 oscila de manera continua sin que este hecho afecte al sincronismo del sistema.

Ante el tercer paso de carga, en la Figura 17, δ_3 y δ_4 presentan una caída en sus valores, siendo el de δ_3 el más pronunciado; sin embargo, al restablecer las condiciones del sistema, los ángulos llegan a un nuevo estado estable a pesar de las leves oscilaciones de δ_4 .

Con un cuarto paso de carga y al igual que los pasos anteriores, en la Figura 18, δ_3 se comporta de similar manera, aspecto que no afecta la estabilidad del sistema, a pesar también del comportamiento de δ_4 .

Para una carga tipo RL, los mayores efectos transitorios se observan en δ_3 , además de leves oscilaciones de δ_4 , los que en conjunto no afectan la estabilidad del sistema de laboratorio frente a aumentos de este tipo de carga.

4.2 Resultados Cortocircuitos

A fin de precautelar la integridad de los generadores del laboratorio, se realizará únicamente un cortocircuito trifásico a tierra al final de la línea de 100 km cuyo terminal de salida está en los terminales del generador de la Mesa 3. Previo al evento del cortocircuito, el sistema suministra a dos pasos de carga RL.

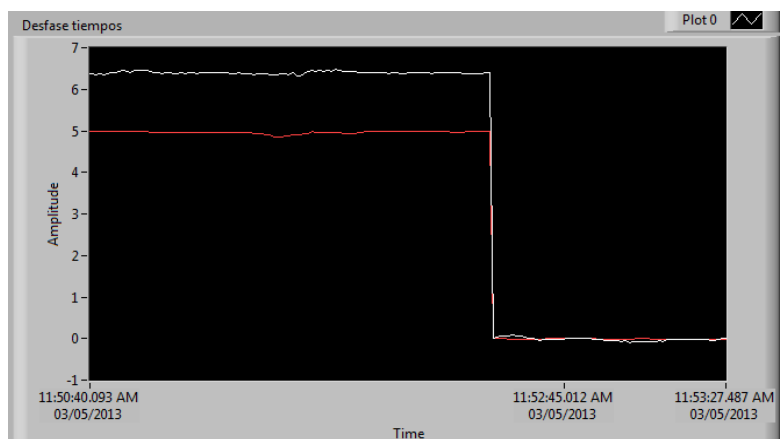


Figura 13. Desfase referenciado, con el tiempo en ms

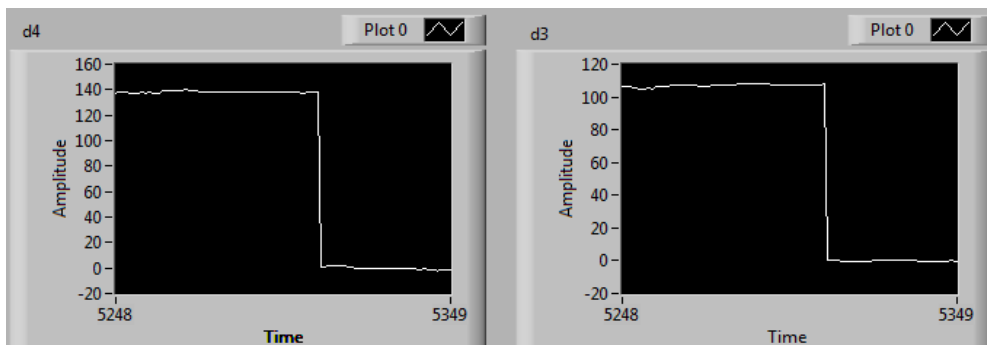


Figura 14. Ángulos de potencia referenciados, en grados

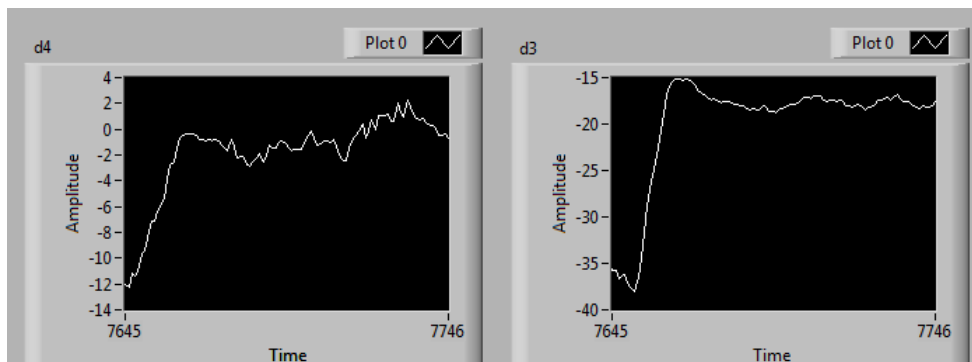


Figura 15. Ángulos de potencia δ_3 y δ_4 , con carga RL, Primer paso - LabVIEW™

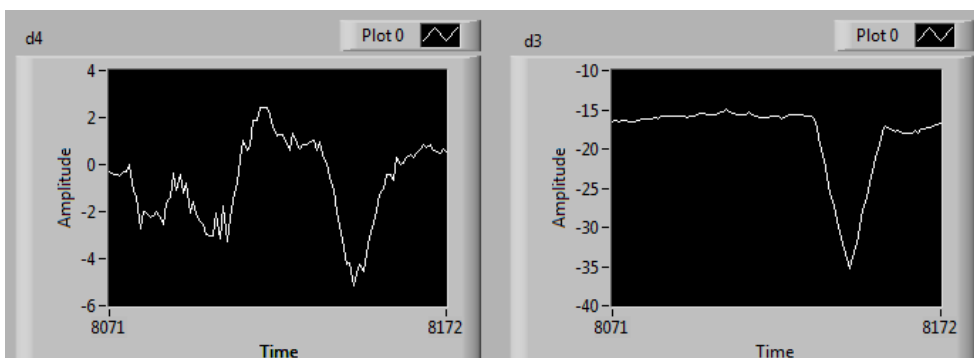


Figura 16. Ángulos de potencia δ_3 y δ_4 , con carga RL, Segundo paso - LabVIEW™

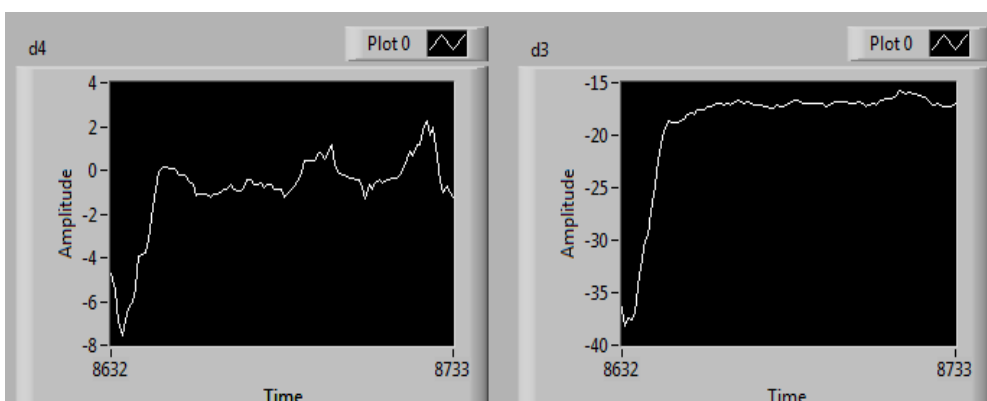


Figura 17. Ángulos de potencia δ_3 y δ_4 , con carga RL, Tercer paso - LabVIEW™

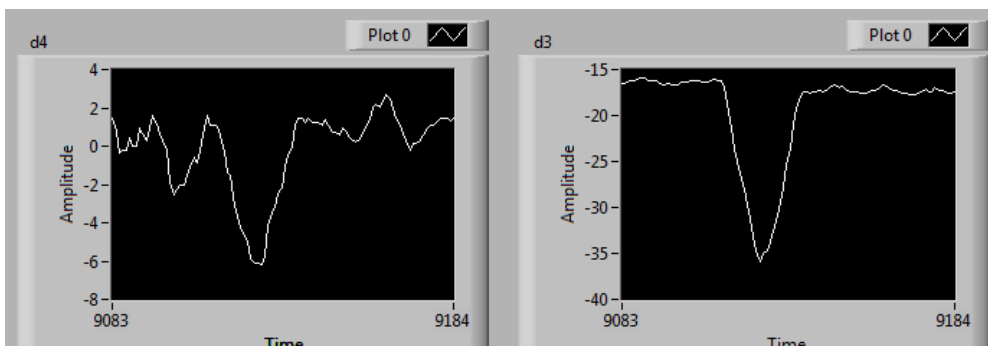


Figura 18. Ángulos de potencia δ_3 y δ_4 , con carga RL, Cuarto paso - LabVIEW™

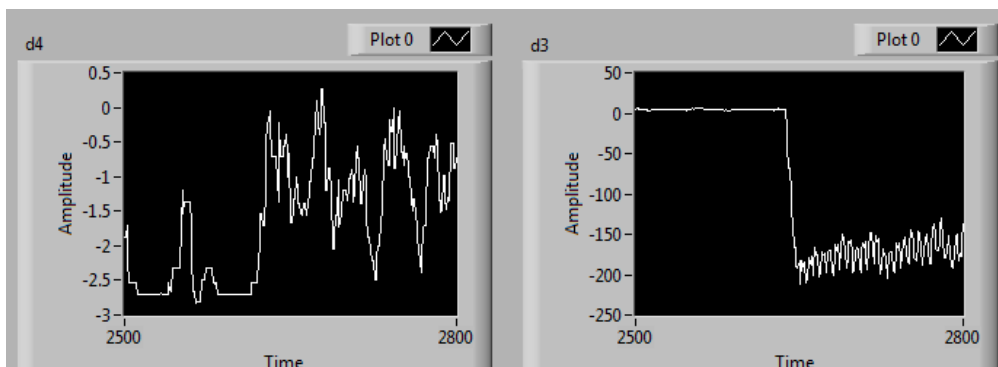


Figura 19. Ángulos de potencia δ_3 y δ_4 , con cortocircuito - LabVIEW™

El cortocircuito se realiza por medio de un contactor, que al ser energizada su bobina mediante el pulsante S1 envía las tres fases de la línea de transmisión a tierra, como lo muestra el diagrama de la Figura 19. Al dejar de presionar S1, se desenergiza la bobina y se libera el cortocircuito; la duración del cortocircuito transitorio es de alrededor de un segundo.

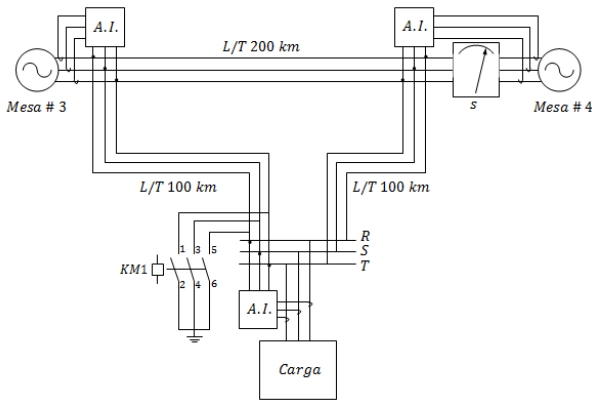


Figura 19. Diagrama trifilar del sistema multimáquina de laboratorio con un cortocircuito trifásico al final de una de las líneas de transmisión

Los ángulos de potencia tienen una referencia de vacío diferente a la de los escenarios de aumento de carga, puesto que el sistema tiene que ser apagado para adecuarlo a la ejecución del cortocircuito.

Como se puede apreciar en la Fig. 19 y 21, durante el cortocircuito, δ_3 sufre una caída rápida y luego de ser liberado el cortocircuito, oscila constantemente. El ángulo δ_4 oscila manteniendo un valor cercano al que tenía previo a la falla. Estos comportamientos hacen que el sistema pierda su estabilidad y salga de su operación en paralelo, abriéndose los contactores del sincronoscopio.

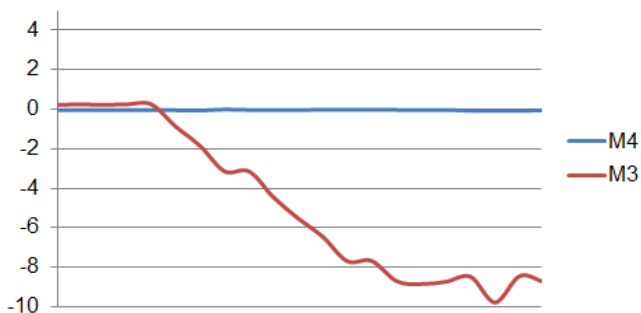


Figura 20. Tiempo de desfase en ms, con cortocircuito - Microsoft Excel®

5. SIMULACIONES DINÁMICAS EN DIGSILENT POWER FACTORY

A fin de contrastar los resultados del comportamiento de los ángulos de potencia del sistema implementado en el Laboratorio, se realizan sendas simulaciones dinámicas en

DIGSILENT Power Factory, cuyos resultados tienen el carácter de cualitativo.

La diferencia entre los resultados de las simulaciones y los de los experimentos se debe principalmente al acercamiento de los pulsos de cruce por cero del voltaje terminal y los pulsos de la posición del rotor, siendo el Δt de cada paso de carga menor al de la referencia tomada. Este hecho se debe a que la marca colocada sobre el rotor está alejada del eje en cuadratura o es demasiado ancha, midiéndose entonces un Δt complementario al real, ya que si el Δt medido disminuye, su complemento con respecto al tiempo de giro del rotor aumenta, teniéndose allí el comportamiento real del ángulo de potencia.

El efecto del ajuste manual de frecuencia y voltaje se observa como un “pico” en la mayoría de gráficas. Cuando se realiza un ajuste fino de la velocidad/frecuencia estos picos no se presentan.

El comportamiento de los ángulos de las máquinas de las Mesas 3 y 4 ante el cortocircuito trifásico, al extremo de la línea cerca a la carga (Mesa 11), tanto en la simulación como en el experimento de laboratorio, es muy parecido, con un ángulo levemente oscilatorio en la máquina de la Mesa 4 y un ángulo con fuertes oscilaciones en la máquina de la Mesa 3. En la condición de operación realizada, la máquina de la Mesa 3 absorbe potencia activa previa a la falla, por lo que durante este evento el ángulo disminuye hasta que el sistema sale de sincronismo.

La Figura 21 muestra la simulación dinámica realizada en DIGSILENT Power Factory para el primer paso de carga RL, donde se muestran las variables más importantes del sistema. La Figura presenta el comportamiento del sistema con el evento de cortocircuito descrito.

6. CONCLUSIONES

El sistema eléctrico de potencia armado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, constituido por dos grupos motor - generador y tres segmentos de línea de transmisión, presenta comportamientos estables en los ángulos de potencia de los generadores sincrónicos ante escenarios de aumento y disminución de carga.

En el escenario de cortocircuito trifásico, localizado en la barra de carga, a 100 km de cada uno de los grupos motor - generador, el sistema es inestable al perder el sincronismo de manera súbita.

Los errores que presenta el comportamiento de los ángulos de potencia, no le resta validez a la metodología aplicada, únicamente la hace dependiente de aspectos mecánicos y del método de adquisición de datos.

La comparación entre los resultados obtenidos en LabVIEW™ y DiGSILENT Power Factory tiene carácter cualitativo, en vista que la metodología incorpora deficiencias en la adquisición de datos debido a cuestiones principalmente mecánicas.

La tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009 OEM presenta una limitante en su velocidad de adquisición de datos (48 kS/s). De requerirse la observación de comportamientos transitorios en rangos de tiempo del orden de milisegundos, esta tarjeta resulta ser relativamente insuficiente.

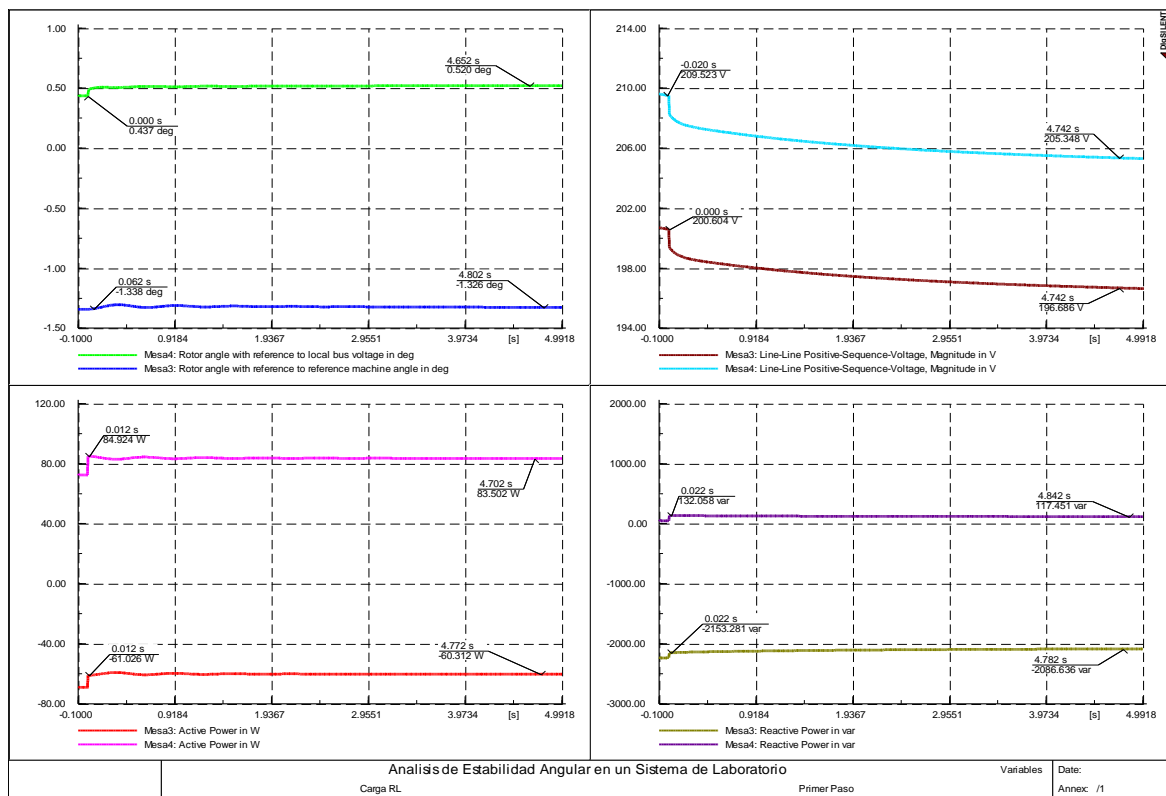


Figura 21. Ángulos, voltajes, potencias activa y reactiva de los dos generadores del sistema con variación del primer paso de carga RL - DiGSILENT Power Factory

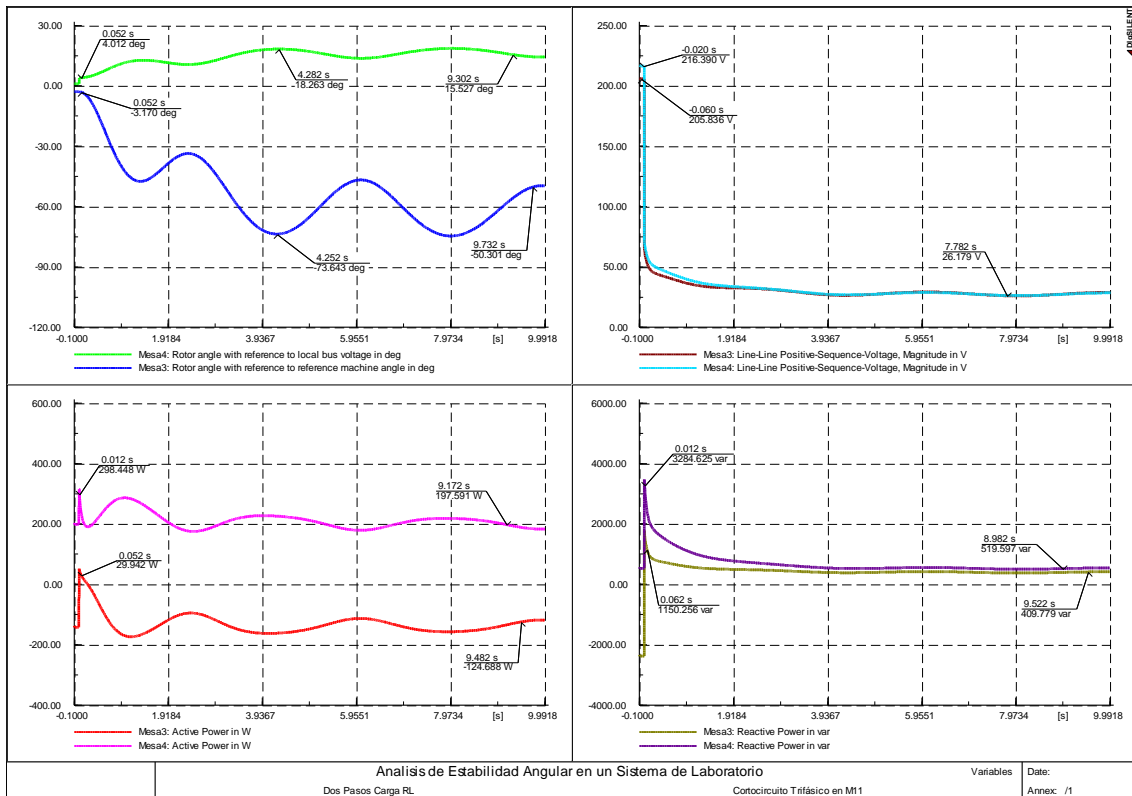


Figura 23. Ángulos, voltajes, potencias activa y reactiva de los dos generadores del sistema alimentando dos pasos de carga RL y cortocircuito trifásico en la línea de transmisión - DlgSILENT Power Factory

RECONOCIMIENTO

Un agradecimiento especial a Andrés Vega Pérez, por su colaboración en la programación de la aplicación en LabVIEW™.

REFERENCIAS

- [1] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, 2 ed.: Wiley Interscience.
- [2] J. J. Grainger and J. William D. Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*: McGraw Hill, Inc, 1996.
- [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*: McGraw Hill, Inc.
- [4] N. Instruments, "User guide NI USB-6008/6009 OEM," N. I. Corporation, Ed., ed, 2006.
- [5] N. Instruments. (2013). Software de desarrollo de sistemas NI LabVIEW. Disponible en: <http://www.ni.com/labview/esa/>
- [6] A. Pérez and Y. Romero, "Medición indirecta de algunos parámetros de la máquina síncrona a partir de la medida del ángulo del par," Ingeniero Electricista, Facultad de Ingenierías: Eléctrica, Electrónica, Física y Ciencias de la Computación, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2007.
- [7] R. Rodas, "Estudio de una Línea de Transmisión mediante un modelo," Ingeniero en Electricidad, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1970.
- [8] S. Villacreses, "Medición del ángulo de potencia de un generador síncrono," Ingeniero Eléctrico, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2012.