

Monitoreo en Tiempo Real de Oscilaciones de Potencia en el Corredor Oriental Molino – Totoras – Santa Rosa – Pomasqui utilizando Mediciones Sincrofasoriales de las Subestaciones Pomasqui y Molino a Nivel de 230 kV

E. Tapia¹J. Játiva¹J. Torres²¹ Escuela Politécnica Nacional, EPN

E-mail: estefy_ats@hotmail.com; jjatviva@yahoo.com

² CELEC – EP TRANSELECTRIC

E-mail: jose.torres@celec.gob.ec

Resumen

En este trabajo se investigan y aplican los algoritmos Power Swing Detection, PSD y Predictive Out of Step Tripping, OOST, los cuales basan su funcionamiento en mediciones sincrofasoriales para la detección de condiciones oscilatorias y pérdida de sincronismo. Los algoritmos son dirigidos al problema de estabilidad angular que presenta el Sistema Nacional Interconectado (S.N.I) con el Sistema Eléctrico Colombiano ante contingencias N-2 en ciertas zonas de la Red Troncal de 230 kV, lo cual puede desencadenar condiciones oscilatorias inestables o bien la pérdida de sincronismo, si estas condiciones no son detectadas a tiempo y no se realizan acciones de control.

Para lo cual se llega a desarrollar una herramienta computacional basada en sincrofasores en donde se aplica los algoritmos PSD y OOST, para ello se debe determinar previamente sus parámetros de ajuste característicos, los mismos que dependen del sistema de potencia en donde se los implemente. Esta herramienta permite observar y monitorear en tiempo real el comportamiento dinámico de los generadores cercanos a las barras de donde se obtiene las mediciones sincrofasoriales, además permite detectar condiciones oscilatorias estables e inestables, llegándose a obtener una herramienta adicional para la toma de decisiones en caso de ser necesario.

Palabras clave—oscilaciones de potencia, estabilidad angular, PMU, WAMS, PSD, OOST.

Abstract

This paper investigates and implements algorithms denominated Power Swing Detection – PSD and Predictive Out-Of-Step Tripping – OOST, which base their operation on synchrophasor measurements for the detection of oscillatory conditions and loss of synchronism. The algorithms are directed to the problem of angular stability presented by the National Interconnected System (SNI) with the Colombian System when occurs contingencies N-2 in certain areas of 230 kV Network, which can trigger unstable oscillatory conditions or loss of synchronism, if these conditions are not detected on time and control actions are performed.

For which develops a computational tool based on Synchrophasor where PSD and OOST algorithms are applied, for it must first determine the parameters of characteristic setting them dependent power system in which they are implemented. This tool allows to observe and monitor in real time the dynamic behavior of nearby generators buses where synchrophasors measurements were obtained, in addition to detect stable and unstable oscillatory conditions, reaching to get an additional tool for decision making if is necessary.

Index terms—power Swing, Angular Stability, PMU, WAMS, PSD, OOST.

Recibido: 21-09-2014, Aprobado tras revisión: 21-11-2014.

Forma sugerida de citación: Tapia, E.; Jativa, J.; Torres, J (2015). “Monitoreo en Tiempo Real de Oscilaciones de Potencia en el Corredor Oriental Molino – Totoras – Santa Rosa – Pomasqui utilizando Mediciones Sincrofasoriales de las Subestaciones Pomasqui y Molino a Nivel de 230 kV”. Revista Técnica “energía”. No 11, Pp. 195-203. ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema eléctrico de potencia se encuentra expuesto a grandes perturbaciones eléctricas como: cortocircuitos, aperturas de líneas de transmisión, salida intempestiva de grandes centrales de generación o bloques de carga; es decir un sin número de eventos que pueden afectar la estabilidad del sistema de potencia, por lo que es necesario un sistema de monitoreo que permita tener observabilidad del sistema en forma dinámica pudiendo saber las condiciones reales a las que está siendo sometido el sistema, y con ello poder tomar acciones oportunas con el fin de mejorar su estabilidad. Esto se logra mediante el desarrollo de aplicaciones específicas mediante la utilización de tecnología innovadora correspondiente a los sistemas de medición sincrofásorial, PMU (*Phasor Measurement Unit*).

En este sentido, el presente trabajo desarrolla una aplicación computacional específica basada en mediciones sincrofásoriales. Aplicación dirigida al problema de estabilidad angular que presenta el Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.) con el Sistema Eléctrico Colombiano cuando se presentan contingencias N-2, es decir ante la apertura de circuitos paralelos en ciertas zonas de la red troncal de 230 kV. Este tipo de contingencias desencadena condiciones oscilatorias y pérdida de sincronismo, que pueden culminar con el colapso del sistema si estas condiciones no son detectadas a tiempo y no se realizan acciones de control.

Dado a ello se investiga y utiliza algoritmos novedosos basados en sincrofasores denominados OOST (*Predictive-Out-Of Step Tripping*) y PSD (*Power Swing Detection*) los cuales detectan condiciones oscilatorias y pérdida predictiva de sincronismo. Estos algoritmos utilizan para su operación el deslizamiento (velocidad de variación) y la aceleración (derivada del deslizamiento) de la fase relativa entre dos voltajes medidos.

La detección de oscilaciones inestables mediante los algoritmos PSD y OOST se aplica en este trabajo, midiendo la fase de los sincrofasores de los voltajes directos en las barras de la subestaciones Molino y Pomasqui 230 kV. Los estudios de estos algoritmos se desarrollan mediante estudios de estabilidad transitoria usando modelos dinámicos para simular el comportamiento del sistema eléctrico ante varias perturbaciones y con ello analizar en el plano aceleración-deslizamiento diversos patrones de oscilación y evaluar el desempeño de operación de los algoritmos en la detección y predicción de oscilaciones inestables.

Una vez determinados los valores de los parámetros de los algoritmos PSD y OOST se llega a implementarlos en el desarrollo de la aplicación computacional, permitiendo con ello monitorear en

tiempo real el punto de trabajo en el que se encuentra el sistema de potencia, además de la generación de señales de alarma cuando se llegue a detectar condiciones inestables. Llegando a obtener para el personal del Centro de Operación observabilidad y señales de alerta, resultando la aplicación como una herramienta adicional para tomar decisiones en caso de ser necesario.

2. OSCILACIONES DE POTENCIA

Oscilaciones de potencia son las variaciones en el flujo de potencia que se producen cuando los voltajes internos de los generadores en diferentes lugares del sistema de alimentación se deslizan uno respecto al otro.

Según la severidad de una perturbación, la configuración de la red eléctrica, el estado de operación y la acción de los controladores, las máquinas sincrónicas pueden llegar a situaciones estables o inestables. [7]

La Fig. 1 muestra la respuesta del ángulo rotórico para un caso estable y dos casos inestables después de ocurrir una perturbación. [2]

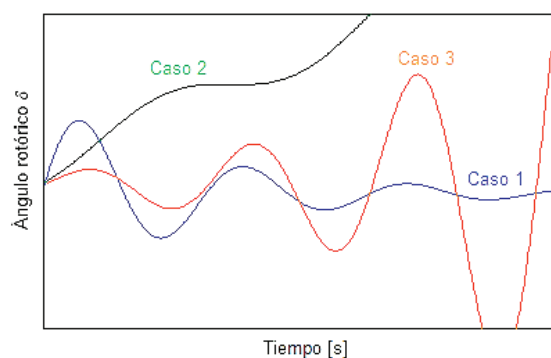


Figura 1: Respuesta del Ángulo del Rotor de una Máquina Sincrónica a una perturbación transitoria [2]

- Caso 1. El ángulo del rotor se incrementa a un máximo, posteriormente decrece y oscila con decremento en la amplitud hasta alcanzar el régimen permanente. Este caso corresponde a oscilaciones estables.
- Caso 2. El ángulo rotórico se incrementa en forma continua hasta que se pierde el sincronismo. Esta forma de inestabilidad es referida como inestabilidad de primera oscilación (*first-swing*) y es causado por insuficiente torque sincronizante. Trayectoria correspondiente a pérdida de sincronismo.
- Caso 3. En este caso, el ángulo del rotor en la primera oscilación es estable pero posteriormente se vuelve inestable ya que su amplitud de oscilación se incrementa hasta perder el sincronismo. Este caso es correspondiente a oscilaciones inestables.

3. DETECCIÓN DE OSCILACIONES INESTABLES Y PÉRDIDA DE SINCRONISMO MEDIANTE EL USO DE SINROFASORES

Los sincrofasores pueden ser usados eficazmente para detectar condiciones oscilatorias inestables o pérdida de sincronismo, usando metodologías modernas como son los algoritmos PSD y OOST que se describen a continuación y se aplican en el S.N.I.

3.1. Algoritmos PSD y OOST

Los algoritmos PSD y OOST trabajan en el análisis de oscilaciones de potencia ante grandes perturbaciones, haciendo uso de la diferencia angular δ entre dos puntos del sistema eléctrico, puntos que corresponden a generadores o equivalentes de los mismos, áreas, o barras representativas de un SEP.

Ambos algoritmos se caracterizan por usar en su operación la primera derivada δ' , S (velocidad o deslizamiento en Hz) y la segunda derivada δ'' , A (aceleración en Hz/s) de la diferencia de los argumentos de los fasores de voltaje de secuencia positiva entre dos puntos de medición sincrofasorial. [3] [4]

Los cálculos de diferencia angular así como su primera y segunda derivada se realizan en forma aproximada mediante los siguientes cálculos discretos. [6]

$$\delta'_i = \frac{1}{360} \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \text{ [Hz]} \quad (1)$$

$$\delta''_i = \frac{\delta'_i - \delta'_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \left[\frac{\text{Hz}}{\text{s}} \right] \quad (2)$$

3.1.1. Algoritmo PSD

El algoritmo PSD trabaja en el plano A(S), se encarga de detectar condiciones oscilatorias de potencia, por lo cual diferencia mediante límites mínimos y máximos, condiciones de oscilaciones de potencia con condiciones normales de operación (límites mínimos, Smin y Amin) y con condiciones de falla (límites máximos, Smax y Amax).

El diagrama de bloques en el que se establece el algoritmo PSD es mostrado en la Fig. 2, y su interpretación gráfica correspondiente en el plano A(S) se observa en la Fig. 3.

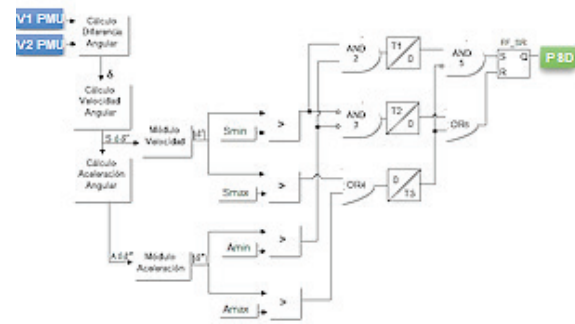


Figura 2: Diagrama de Bloques del Algoritmo PSD. [3]

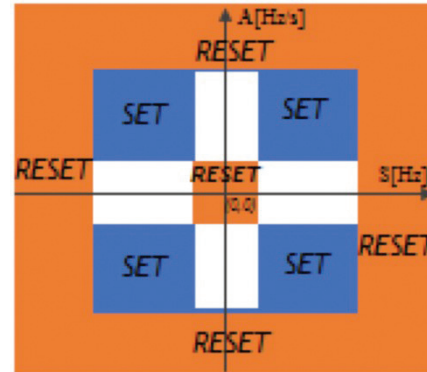


Figura 3: Característica de Operación PSD en el Plano A(S) fuera de Escala [3]

El funcionamiento del algoritmo PSD, se describe brevemente de la siguiente manera. Cuando PSD resulta en un valor “falso”, quiere decir que la trayectoria en el plano A(S) se encuentra en las zonas de “reset” (Fig. 3), es decir cuando los valores de A y S son conjuntamente pequeños (condición normal de operación) o bien cuando son conjuntamente grandes (condición de falla) con respecto a valores umbrales (Smin, Amin y Smax, Amax) los cuales deben ser establecidos adecuadamente.

En cambio cuando PSD resulta en un valor “verdadero”, quiere decir que la trayectoria en el plano A(S) se encuentra en las zonas “set” (Fig. 3), en donde las variables A y S conjuntamente presentan valores intermedios (condición oscilatoria). En cuanto a las zonas de color blanco, cuando la trayectoria ingrese en cualquiera de ellas, el valor de salida de PSD no es modificado, reteniendo su último valor. Cada transición en las zonas del algoritmo presenta una temporización asociada con el fin de evitar detecciones erróneas.

3.1.2. Algoritmo OOST

El algoritmo OOST al igual que el algoritmo PSD trabaja en el plano A(S), se encarga de detectar condición predictiva de pérdida de sincronismo o pérdida de paso polar.

El diagrama de bloques lógico correspondiente al algoritmo OOST así como la gráfica característica de operación se muestran en las siguientes figuras.

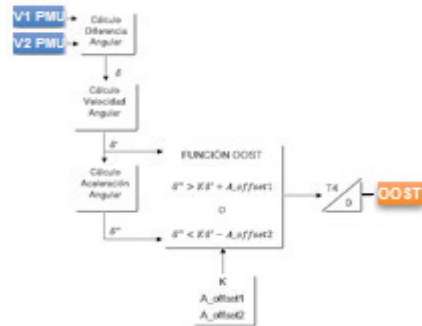


Figura 4: Diagrama de Bloques del Algoritmo OOST. [3]

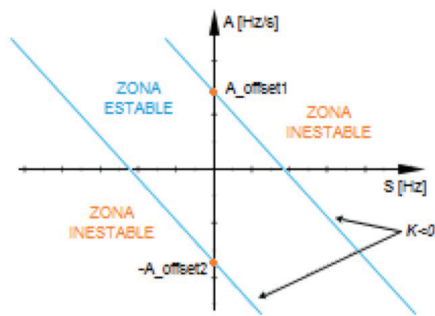


Figura 5: Característica de Operación OOST en el Plano A(S) fuera de Escala [3]

Este algoritmo es definido por tres zonas (Fig. 5), delimitadas por dos rectas oblicuas paralelas llamadas "blindados", en la cual se especifica que la zona que se encuentra entre las dos rectas, es una zona estable, donde las oscilaciones que se encuentren allí serán estables, y las dos zonas predictivas de inestabilidad son el resto del plano, es decir lo que queda fuera de las dos rectas. Los parámetros de las rectas oblicuas de igual manera deben ser establecidos adecuadamente.

Además las transiciones de las zonas de este algoritmo también cuentan con una temporización asociada.

3.1.3. Combinación de los Algoritmos PSD y OOST

La combinación de los algoritmos bajo estudio, es aplicado de la siguiente manera.

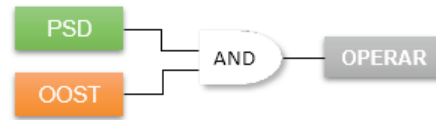


Figura 6: Combinación Implementada de los Algoritmos PSD y OOST

La combinación que se ha planteado en la Fig. 6, puede observarse en el plano A(S) como la superposición de las Fig. 3 y 5, y con los valores de los parámetros de los algoritmos que se ha determinado para el caso de estudio específico del Corredor Oriental Molino – Totoras - Santa Rosa 230 kV.

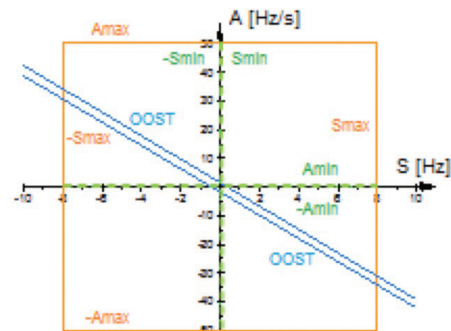


Figura 7: Algoritmos PSD y OOST representados en el plano A(S)

Como se puede observar los valores de los límites mínimos, Smin y Amin, del algoritmo PSD son muy pequeños, es decir el interior de la zona de color naranja en "reset" y las zonas de color blancas en la Fig. 3 son imperceptibles en la Fig. 7.

Los valores de los parámetros de los algoritmos para el caso de estudio presente se muestran más adelante.

3.2. Análisis del Plano A(S)

Los algoritmos predictivos PSD y OOST descritos anteriormente actúan según el lugar en el que se encuentre la trayectoria en el plano A(S). En este plano básicamente se reflejan los cambios de velocidad de giro entre los generadores cercanos a cada barra de donde se está midiendo la fase de voltaje.

Para conocer el uso y características principales del plano A(S), así como el andamiento de la trayectoria ante oscilaciones se modela tres casos típicos de respuesta del ángulo relativo δ en función del tiempo, que generalmente son encontrados en estudios de estabilidad transitoria. En la Fig. 8 se representa una respuesta oscilatoria estable seguida de una respuesta inestable no oscilatoria y una respuesta oscilatoria inestable.

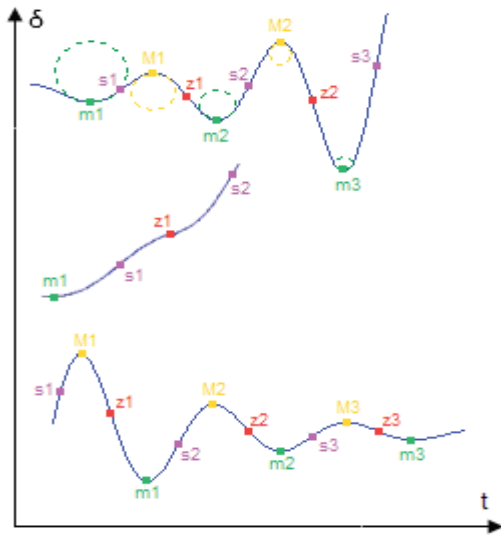


Figura 8: Respuesta del Ángulo Relativo $\delta(t)$ para tres casos de estudio

Tomando como referencia la respuesta oscilatoria inestable, se puede observar marcados puntos característicos, como son los extremos relativos máximos (M) y mínimos (m), además los puntos de inflexión, de pendiente negativa (z) y positiva (s). Además se observa el radio de curvatura para cada extremo relativo.

La segunda derivada de los puntos característicos viene a ser inversamente proporcionales al radio de curvatura correspondiente. Las trayectorias correspondientes en el plano A(S) para cada caso de respuesta angular $\delta(t)$ se muestran a continuación.

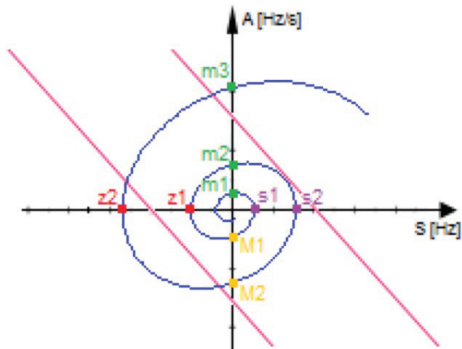


Figura 9: Trayectoria de Oscilación Inestable en el Plano A(S)

Las oscilaciones inestables vistas como crecientes en el plano $\delta(t)$ corresponden en el plano A(S) a espirales crecientes rodeando al origen, en donde los extremos relativos se ubican en el eje de las ordenadas y los puntos de inflexión en el eje de las abscisas.

Para el caso de oscilaciones estables, la trayectoria en el plano A(S) tendrá el mismo principio, es decir la trayectoria en forma de espirales pero en este caso rodearán cada vez más de cerca al origen (Fig. 10).

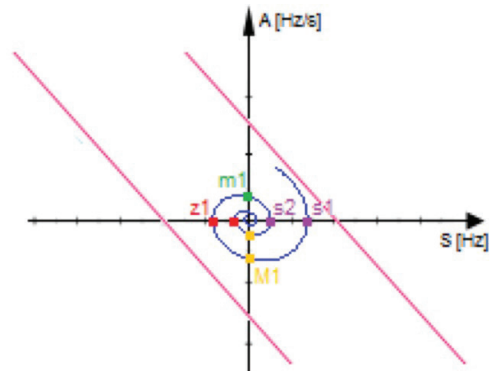


Figura 10: Trayectoria de Oscilación Estable en el Plano A(S)

Finalmente para el caso inestable no oscilatorio, es decir la existencia de pérdida de sincronismo, no existen extremos relativos, por lo que su trayectoria en el plano A(S) no cruzará el eje de las ordenadas y tenderá a alejarse rápidamente del origen formando un bloque cerrado que cruza el eje de las abscisas por medio de los puntos de inflexión.

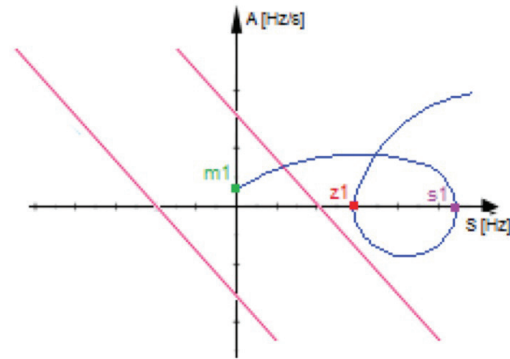


Figura 11: Trayectoria de Condición Inestable No Oscilatoria en el Plano A(S)

El algoritmo OOST aparece predictivo o preventivo cuando detecta la condición de pérdida de sincronismo al momento en que la trayectoria sale de la zona estable delimitada por los “blindings” correspondientes, antes de que se forme el bloque cerrado.

Con respecto al algoritmo PSD se da origen debido a que idealmente el sistema de potencia en estado estable opera en el origen (0,0) del plano A(S), sin embargo el sistema realmente se encuentra en constante cambio y por lo cual la trayectoria será cercana rodeando al origen, es por ello el motivo de la zona central naranja en “reset” de la Fig. 3. Por otra parte, valores de velocidad y aceleración excesivos son asociadas a cortocircuitos, lo cual motiva a la existencia de la zona externa naranja en “reset” de la Fig. 3.

4. APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS PSD Y OOST EN EL S.N.I.

Para detectar contingencias de tipo N-2, ante la apertura de circuitos paralelos en ciertas zonas de la red troncal de 230 kV que produzcan la pérdida de estabilidad, se hace uso de los algoritmos PSD y OOST.

Para ello se obtiene las mediciones de la fase de los sincrofasores de voltaje de dos barras representativas del S.N.I. Las barras seleccionadas son Molino y Pomasqui 230 kV. La barra de Molino debido a que representa la mayor generación del país, mientras que la barra de Pomasqui puede representar al sistema eléctrico Colombiano, debido a que tiene conexión directa con él.

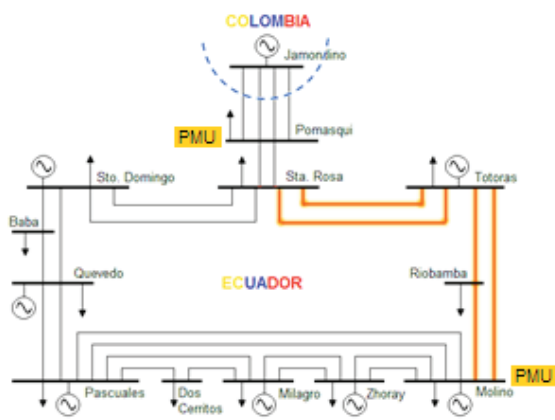


Figura 12: Diagrama Unifilar de la Red Troncal de 230 kV y ubicación de las PMU

4.1. Determinación de los Parámetros de Ajuste

Los parámetros de ajuste se han establecido realizando simulaciones dinámicas de contingencias mediante un software de análisis de SEP como lo es Power Factory de DIGSILENT, siguiendo una metodología distinta para cada algoritmo.

4.1.1. Algoritmo PSD

Límites Mínimos (S_{min} y A_{min})

- Las simulaciones dinámicas que se realicen deben ser en un escenario de alta hidrología.
- Los eventos de simulación deben ser de operación normal que se puedan presentar efectivamente en el S.N.I.
- Se toma a los valores máximos de velocidad y aceleración angular de los eventos simulados, pudiendo determinar con ello los valores de los límites mínimos S_{min} y A_{min} , teniendo en cuenta la existencia de las temporizaciones asociadas.

En este caso se realizaron aperturas intempestivas en las principales L/T de la Red de 230 kV.

Límites Máximos (S_{max} y A_{max})

- Se toma como referencia los valores de ajuste que propone la patente de los algoritmos SEL (Schweitzer Engineering Laboratories), que ayudan a tener una idea inicial sobre el orden de los ajustes.

Tabla 1: Valores de Ajuste Iniciales [4]

S_{max}	10 [Hz]
A_{max}	50 [Hz/s]

- Bajo los límites iniciales establecidos, se realizan simulaciones de distintos tipos de cortocircuitos en algunos puntos de la red, analizando por separado a la aceleración y velocidad angular en función del tiempo durante la duración del cortocircuito, bajo los valores de ajuste inicial.
- Optimizar los valores de ajuste finales de acuerdo a los resultados obtenidos en las simulaciones de cortocircuitos, teniendo en cuenta de igual manera la temporización asociada.

4.1.2. Algoritmo OOST

En este caso, se deben establecer los parámetros de ajuste de las rectas oblicuas o los "blindings", es decir $A_{offset1}$, $A_{offset2}$, y K de la Fig. 5. Para lo cual se ha desarrollado la siguiente metodología de ajuste.

- Establecer condiciones previas en la base del sistema modelado, dejando fuera de servicio a las acciones de protección implementadas, por ejemplo relés de alivio de carga, relé ESA (Esquema de Separación de Áreas), etc. con el fin de obtener resultados que permitan identificar realmente hasta qué punto el sistema puede soportar alguna perturbación.
- Realizar simulaciones dinámicas de contingencias en escenarios críticos, es decir en donde el sistema se encuentre susceptible a perder estabilidad ante contingencias N-2 en la Red Troncal de 230 kV.
- Las simulaciones pueden ser aperturas intempestivas o cortocircuitos en distintas configuraciones de la red.
- Se recomienda que los cortocircuitos que se simulen sean trifásicos ya que representan el peor caso.
- Simular alguna contingencia en donde el despeje de falla sea en el tiempo crítico, pudiendo obtener el crecimiento máximo de oscilación y su posterior amortiguamiento, lo

cual implica obtener parámetros iniciales de los “blindens” por medio de ensayo y error.

- Una vez obtenidos los parámetros iniciales, se los compara con los casos en donde se haya producido inestabilidad tomando como principio que el algoritmo detecte lo más rápido condiciones inestables y que no detecte cuando simplemente no las haya.

En este caso se ha tomado como referencia para realizar las diversas simulaciones, a la contingencia que es considerada como la severa, la apertura de los dos circuitos de la L/T Santa Rosa – Totoras 230 kV. Llegando a simular las siguientes contingencias en un escenario de alta hidrología con una alta transferencia de potencia por el Corredor Oriental.

1. Se produce una falla trifásica en el circuito 1 de la L/T Santa Rosa – Totoras cercano a Santa Rosa, el despeje de falla se produce a los 80 ms desde el inicio de falla. Teniendo a la configuración de la red con el circuito 2 de la L/T Santa Rosa – Totoras fuera de servicio.
2. La contingencia que se simula es la misma que la anterior, pero en este caso el despeje de falla se produce en el tiempo crítico, además de que la configuración de la red está con todas las L/T de la red de 230 kV en servicio.

Mediante la simulación N° 2, se produce el máximo crecimiento angular que soportan las máquinas antes de que pierdan sincronismo, por lo cual se llega a obtener los parámetros iniciales máximos de los “blindens” mediante pruebas de ensayo y error.

Siguiendo la metodología planteada, se procede a ubicar los “blindens” iniciales en la simulación N° 1, en donde se produce la pérdida de sincronismo; por lo cual esta condición debe ser detectada rápidamente. En caso de que la detección de pérdida de sincronismo con los parámetros iniciales no sea en un tiempo óptimo o que la trayectoria regrese a zona de estabilidad pudiendo causar un “reset” en su detección, se tiene que optimizar los ajustes iniciales, teniendo en cuenta además que existe una temporización asociada al algoritmo.

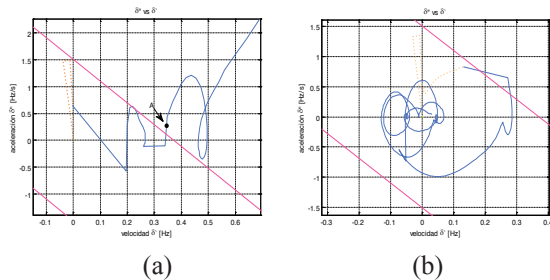


Figura 13: Trayectoria en el plano A(S) Implementados los ajustes de los parámetros OOST ante la Contingencia (a) 1 y (b) 2

Con los parámetros de los “blindens” establecidos se puede observar que la primera detección de pérdida de sincronismo (punto A de la Fig. 13a) se produce antes de que se forme el bloque cerrado siendo su detección bastante rápida además la trayectoria no regresa a zona de estabilidad. Sin embargo en la Fig. 13b en donde no se debe detectar condición de pérdida de sincronismo se observa que existe un momento en donde el comportamiento de la trayectoria sobrepasa la zona de estabilidad, pero en realidad esto no representa un conflicto, ya que su duración es de aproximadamente un ciclo, y mediante la temporización propia del algoritmo no se detectará condición de inestabilidad.

4.2. Resultados de los Parámetros Establecidos para cada Algoritmo

Tabla 2: Resultados de los Parámetros PSD y OOST

Algoritmo PSD	Smin	0.035 [Hz]
	Amin	0.16 [Hz/s]
	Smax	8 [Hz]
	Amax	50 [Hz/s]
Algoritmo OOST	A_offset1	1.5 [Hz/s]
	A_offset2	-1.5 [Hz/s]
	K	-4.0541 s ⁻¹

Con respecto a las temporizaciones asociadas a cada algoritmo se ha llegado a establecer que todas cuando se demora 3 ciclos de retardo es decir 48 ms.

4.3. Tiempo de Detección De Condiciones Inestables

Teniendo en cuenta primeramente que un programa de estudios de estabilidad como lo es Power Factory no genera datos de fasores de igual manera que una PMU, además de que las PMU’s tienen su tasa de error. Por lo que los resultados que se obtendrán serán aproximados.

Una vez establecidos los ajustes de los parámetros de los algoritmos, se analiza el tiempo que tardarían actuando en conjunto en la detección de condiciones de inestabilidad. Para lo cual se toma como referencia la contingencia 1 en donde se produce la pérdida de sincronismo.

En la Fig. 14 se muestra la trayectoria que sigue la contingencia 1 en los planos $\delta(t)$, $\delta'(\delta)$ y S(A). En donde se representa:

- El punto A que corresponde al instante en donde se supera por primera vez la recta superior oblicua del algoritmo OOST.
- El punto B corresponde a un tiempo T4 después de que ocurre el punto A, poniéndose en “1” la señal de salida (OOST y PSD).

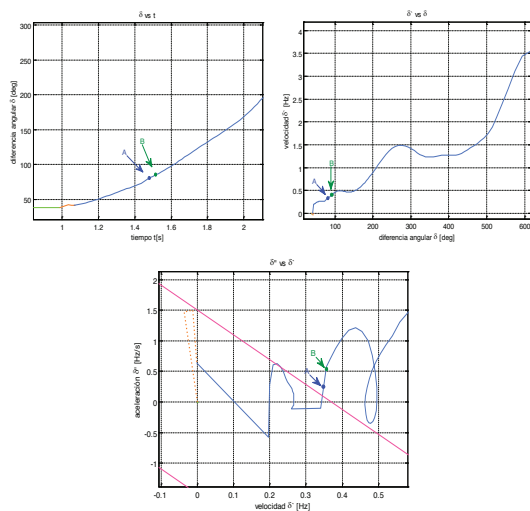


Figura 14: Trayectoria de la Contingencia 1 en los tres Planos $\delta(t)$, $S(\delta)$ y $S(A)$

La primera detección de condición de inestabilidad, es decir el punto B ocurre:

- En el instante 1.5148 s de la simulación.
- Es decir 515 ms luego del comienzo del cortocircuito.
- O sea 434 ms después del fin del cortocircuito.

5. APLICACIÓN COMPUTACIONAL DEL SISTEMA DE MONITOREO DE OSCILACIONES DE POTENCIA MEDIANTE SINCRÓFASTORES

La base de la aplicación desarrollada es el programa llamado OpenPDC, ya que de allí se obtienen las librerías fundamentales que recogen la información empaquetada según el estándar IEEE C37.118.2005 que llega desde el PDC. Una vez que se reciben los datos, los valores sincrofásoriales son manipulados mediante el Software Visual Basic Express 2008 realizando los cálculos necesarios y la interfaz de usuario personalizada para la implementación del sistema de monitoreo de oscilaciones de potencia mediante los algoritmos PSD y OOST.

El uso de las librerías es posible gracias a la modalidad del código de libre acceso del OpenPDC. Las librerías utilizadas son:

- TVA.Communication.dll.
- TimeSeriesFramework.dll.
- TVA.Core.dll.
- TVA.PhasorProtocols.dll.

La aplicación realiza tareas como:

- Recepción de datos fasoriales provenientes del PDC (Concentrador de Datos Fasoriales) de la Corporación CENACE.

- Información de errores de conexión con los datos de las PMU.
- Cálculos a partir de los datos recibidos, como diferencia, velocidad y aceleración angular.
- Información gráfica del comportamiento de las variables calculadas, es decir la representación gráfica de los algoritmos PSD y OOST en los tres planos $A(S)$, $\delta'(t)$ y $\delta(t)$.
- Generación de alarmas tipo semáforo que informan la detección de oscilaciones de potencia estables e inestables y pérdida de sincronismo.
- Grabación automática de los valores de ángulo de voltaje en cada barra de donde se obtiene el parámetro de diferencia angular en un archivo .xlsx cuando se detecte condiciones inestables.
- Opción de grabar los valores del ángulo de voltaje en cada barra, cuando el usuario lo desee.
- Opción de suavizar la señal del parámetro de diferencia angular por el método de media móvil, cuando el usuario crea que es necesario.

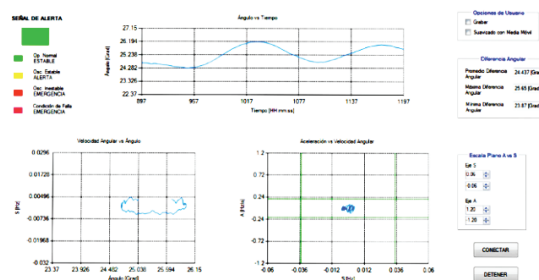


Figura 15: Interfaz Gráfica Desarrollada Mediante Sincrofásiores

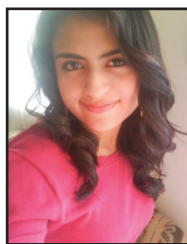
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante el estudio e investigación de los algoritmos PSD y OOST, se ha llegado a monitorear el S.N.I. en tiempo real pudiendo con ello detectar condiciones oscilatorias inestables, pérdida de sincronismo o bien la ocurrencia de fallas en un tiempo de detección óptimo el cual depende de los parámetros establecidos de los algoritmos. Todo esto con el desarrollo de la aplicación computacional, basada en librerías de libre acceso que permiten la manipulación de los datos sincrofásoriales.

Por lo tanto las aplicaciones que se pueden desarrollar mediante sincrofásiores son ilimitadas, basta con la utilización de las librerías del OpenPDC que son de libre acceso para poder desarrollarlas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Guzman-Casillas, "Systems and methods for power swing and out-of-step detection using time stamped data", United States Patent Application Publication US 2009/0089608 A1, April 2009.
- [2] F. Gonzalez-Longatt, "Estabilidad en Sistemas de Potencia", Febrero, 2006.
- [3] R. Franco, "Uso de Sincrofasores para la Detección de Oscilaciones de Potencia y Pérdida de Sincronismo. Aplicación al Sistema Eléctrico Uruguayo para la Separación Controlada en Islas", Tesis M.Sc., Universidad de la República de Uruguay, 2012.
- [4] Guzman-Casillas, V. Mynam, G. Zweigle, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., "Backup Transmission Line Protection for Ground Faults and Power Swing Detection Using Synchrophasors", Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 20070918 · TP6291-01, 2007.
- [5] E. III Schweitzer, D. Whitehead, A. Guzman-Casillas, Y. Gong, M. Donolo, "Advance Real-Time Synchrophasor Applications", Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 20080923 · TP6337-01-2008.
- [6] E. III Schweitzer, A. Guzman-Casillas, H. Altuve, D. Tziouvaras, "Real Time Synchrophasor Applications for Wide Area Protection. Control and Monitoring", Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 20090831 · TP6379-01-2009.
- [7] IEEE PSRC WG D6, "Power Swing And Out-Of-Step Considerations On Transmission Lines", Report to the Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society, 2005.



Estefanía Tapia Suárez.- Nació en Quito, Ecuador en 1991. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico "Tulcán" y sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, actualmente es egresada de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.



Jesús Játiva Ibarra.- Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en 1981. Realizó sus estudios de postgrado en la Universidad de Texas en Arlington de Estados Unidos de América, donde obtuvo el grado de Master of Science in Electrical Engineering en 1988, y posteriormente el título de Doctor of Philosophy en 1991. Cuenta con más de treinta años de experiencia en actividades de Planificación, Operación, Administración y Economía de sistemas eléctricos de potencia. Actualmente es Decano de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional.