

Determination of safety limits of static angle stability in SNI from synchrophasorial measurements

Determinación de límites de seguridad estática de ángulo en el SNI a partir de mediciones sincrofasoriales

Luis Bonilla¹Raúl Cubillo¹

¹Operador Nacional de Electricidad – CENACE, Quito, Ecuador
E-mail: lbonilla@cenace.org.ec; rcubillo@cenace.org.ec

Resumen

Los sistemas eléctricos de potencia están conformados por distintos elementos que presentan comportamientos dinámicos particulares, es por ello que cada sistema eléctrico requiere de estudios y evaluaciones propias que permitan conocer su dinámica operativa y establecer índices o límites de seguridad con el fin prevenir colapsos totales o parciales.

Este documento presenta una Metodología para Identificar límites seguros de diferencia angular en un sistema eléctrico de potencia conocidos también como límites de estabilidad estática de ángulo. Para la elaboración de este trabajo se resalta el uso de herramientas tecnológicas modernas de monitoreo y análisis de sistemas de potencia, como el Sistema de Monitoreo de Área extendida (WAMS) implementado en el CENACE, y adicionalmente, se emplea la técnica de análisis de datos de la ley de logaritmo iterado para identificar límites de banda de operación normal de las diferencias angulares entre las barras de 230 kV del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador, tomando como referencia a la barra de 500 kV de la subestación Coca Codo Sinclair. La identificación de estos límites permitirá alertar al operador del sistema posibles problemas de estabilidad estática de ángulo y con ello crear una conciencia operativa a fin de establecer medidas de protección y control para incrementar los niveles de seguridad y confiabilidad en el suministro de energía eléctrica.

Palabras claves—WAMS, Diferencia angular, ley de logaritmo iterado.

Abstract

The power electric systems are made up of different elements that show particular dynamic behaviors, that is why each electrical system requires studies and own evaluations that allow to know its operational dynamics and to establish security indexes or limits in order to prevent total or partial collapses.

This document presents a methodology to identify safe limits of angular difference in electric power system also known as static angle stability limits. For the elaboration of this work, the use of modern technological tools for monitoring and analysis of power systems is highlighted, such as the Extended Area Monitoring System (WAMS) implemented in the CENACE, and additionally, the data analysis technique is used of the iterated logarithm law to identify the normal operating band limits of the angular differences between the 230 kV bars of the National Interconnected System of Ecuador, taking as reference the 500 kV bus from the Coca Codo Sinclair substation. The identification of these limits will alert the system operator to possible problems of static angle stability and thus create an operational awareness in order to establish protection and control measures to increase the levels of security and reliability in the supply of electricity.

Index terms— WAMS, Angular difference, law of logarithm iterado.

Recibido: 15-05-2018, Aprobado tras revisión: 30-07-2018

Forma sugerida de citación: Bonilla, L.; Cubillo, R. (2018). “Determinación de límites de seguridad de estabilidad estática de ángulo en el SNI a partir de mediciones Sincrofasoriales”, Revista Técnica “energía”. No. 15, Issue I, Pp. 90-97

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2018 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la demanda que viene de la mano con el ingreso de nuevos proyectos de generación y por ende con el crecimiento obligado de la topología de red de manera especial en los últimos años, ha provocado que los sistemas eléctricos de potencia (SEPs), operen cada vez más cerca de sus límites de estabilidad y seguridad, es por ello que es de gran importancia la determinación de límites de seguridad que permitan garantizar una operación segura y confiable del sistema.

La determinación de límites de transferencia de energía eléctrica es una tarea fundamental para garantizar la seguridad de los sistemas eléctricos de potencia. En ese sentido se identifican diversas restricciones que limitan el flujo de potencia a través de una línea de transmisión, como el límite térmico de los conductores, límite de cargabilidad, límites de estabilidad entre otros. Desde el punto de vista de la estabilidad estática de ángulo, el límite máximo de transferencia de potencia de una línea de transmisión se caracteriza básicamente por la diferencia angular entre los extremos de este vínculo [1].

Tradicionalmente los límites de estabilidad estática de ángulo han sido obtenidos con simulaciones eléctricas realizadas en software’s especializados, los cuales consisten en simular eventos que provoquen incrementos en el flujo de potencia paulatinos en una red de transmisión hasta encontrar la diferencia angular máxima previo a la pérdida de estabilidad del sistema. Sin embargo este tipo de metodologías no son muy recomendadas dado que como se mencionó anteriormente requieren condiciones previas a la pérdida de la estabilidad del sistema lo cual no es aplicable en un sistema eléctrico de potencia real dado que el propósito de implementar un límite de seguridad es establecer una alerta temprana en tiempo real con el fin de evitar precisamente la pérdida de estabilidad en el sistema [2]. Con el desarrollo de la tecnología de medición sincrofasorial se han desarrollado nuevas herramientas que permiten monitorear condiciones estáticas y dinámicas, en tiempo real, de un SEP, en este sentido, es posible implementar metodologías que permitan establecer indicadores de seguridad en función del comportamiento real que tiene el sistema a partir de las mediciones sincrofasoriales. En este sentido, en este trabajo se propone una metodología para determinar límites seguros de estabilidad estática de ángulo en un SEP partir de mediciones sincrofasoriales y empleando técnicas estadísticas para análisis valores extremos.

Esta metodología es aplicada al Sistema Nacional Interconectado (SNI) de Ecuador, para lo cual se utiliza la información de los fasores de voltaje, obtenidos de las unidades de medición sincrofasorial (PMUs) instaladas en las diferentes subestaciones del sistema eléctrico ecuatoriano, y se calcula la diferencia angular del sistema de transmisión a nivel de 230 kV tomando

como referencia la barra de 500 kV de la subestación Coca Codo Sinclair. Y por otra parte, debido a la característica de información voluminosa de la información, se emplea la técnica de la Ley del Logaritmo Iterado para realizar un análisis de valores extremos y con ello establecer límites seguros de estabilidad estática de ángulo en función de la diferencia angular característica del SNI.

2. ESTABILIDAD ESTÁTICA DE ANGULO

La estabilidad estática de ángulo, como se había mencionado anteriormente, se encuentra relacionada con la capacidad que tiene un vínculo de transmisión para transferir energía eléctrica sin que se presente pérdida de sincronismo. La diferencia angular entre dos barras del sistema de potencia es una medida directa de la capacidad de transmisión entre estos nodos. En la Fig. 1 se ilustra dos áreas (A y B), de un sistema de potencia, que se encuentran interconectadas por un conjunto de vínculos eléctricos [2].

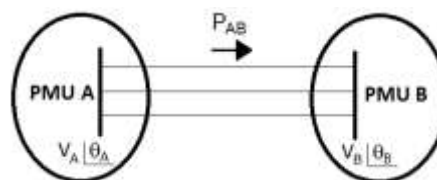


Figura 1: Transferencia de potencia entre dos barras del sistema

Asumiendo el modelo “π” para el vínculo equivalente entre dos áreas, como se muestra en la Figura 2, la transferencia de potencia entre el área A y el área B está dada por la expresión (1).

$$P_{AB} = \frac{V_A^2 r - r V_A V_B \cos(\theta_A - \theta_B) + x V_A V_B \sin(\theta_A - \theta_B)}{r^2 + x^2} \tag{1}$$

Donde:

- V_A : Magnitud de voltaje en la barra A
- V_B : Magnitud de voltaje en la barra B
- θ_A : Ángulo de voltaje en la barra A
- θ_B : Ángulo de voltaje en la barra B
- x : Impedancia del vínculo entre la barra A y la barra B
- r : Resistencia del vínculo entre la barra A y la barra B

Considerando que normalmente $x \gg r$, la expresión anterior se reduce a (2).

$$P_{AB} = \frac{V_A V_B \sin(\theta_A - \theta_B)}{x} \tag{2}$$

En la Fig. 2 se presenta la curva característica de la transferencia de potencia entre dos áreas de un sistema eléctrico de potencia a través de un vínculo de transmisión.



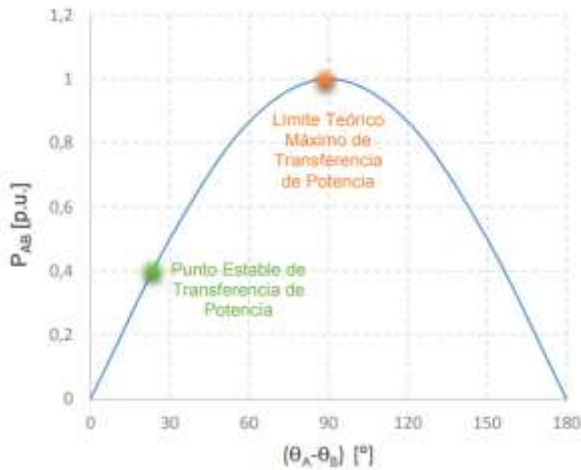


Figura 2: Curva de transferencia de potencia entre dos barras de un SEP

Idealmente el límite máximo de transferencia de potencia, se presenta en el punto más alto de la curva cuando se cumple que, $\sin(\theta_A - \theta_B) = 1$; es decir, cuando $\theta_A - \theta_B = 90^\circ$. Sin embargo, debido a la complejidad del sistema de potencia, que provoca una congestión de la red de transmisión, existen otros factores que no permiten alcanzar este límite ideal.

Bajo la premisa que en sistemas de potencia estables $\theta_A - \theta_B$ corresponde a un valor pequeño, el flujo de potencia por el vínculo equivalente es directamente proporcional a esta diferencia angular.

$$P_{AB} \approx \frac{V_A V_B (\theta_A - \theta_B)}{x} \Rightarrow P_{AB} \propto (\theta_A - \theta_B) \quad (3)$$

En este sentido, el límite de la transferencia de potencia entre las barras A y B es íntimamente dependiente del límite máximo de diferencia angular entre dichos nodos y viceversa.

3. SISTEMA DE MONITOREO DE ÁREA EXTENDIDA (WAMS)

Un WAMS es un sistema basado en el uso de Unidades de Medición fasorial (PMU) para proporcionar mediciones del sistema de potencia con alta precisión a una velocidad de adquisición de información en el orden de los milisegundos y con una misma referencia de tiempo mediante un Sistema de Posicionamiento Global GPS.

Las unidades de medición sincrofasorial (PMUs) son dispositivos que permiten estimar los fasores de las ondas sinusoides de corriente y voltaje AC en diferentes nodos de un SEP. Para calcular un sincrofasor, una PMU necesita leer tanto la onda a ser estimada como también la onda de referencia “coseno universal” sincronizada con el tiempo UTC (Universal Time Coordinated). Para lo cual utiliza un algoritmo de estimación fasorial que mediante un número N de

muestras en el tiempo, efectúa el cálculo de la estimación del fasor. El algoritmo más utilizado para estimar estos fasores es la transformada discreta de Fourier [3] [4]. La alta precisión, velocidad de respuesta y sincronización de tiempo hacen de las PMUs equipos apropiados para el monitoreo de un sistema eléctrico de potencia tanto en estado estable como en dinámico, así como aplicaciones de protección y control de área extendida en tiempo real.

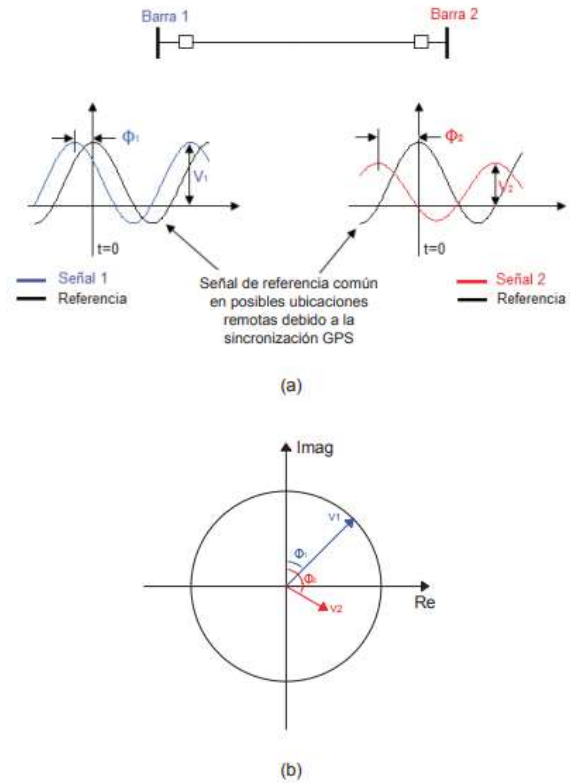


Figura 3: (a)Cálculo de Fasores utilizando la misma referencia de tiempo en instalaciones Geográficamente alejadas (b)Representación Fasorial de (a) en un plano complejo común[4]

Los WAMS están constituidos básicamente por PMUs, sistemas de comunicación, concentradores de datos (por sus siglas en inglés PDC cuya función principal es almacenar la información de los datos de las PMUs), y un software especializado que permita visualizar esta información.

Un WAMS brinda principalmente los siguientes beneficios:

- Monitoreo en tiempo real de las condiciones dinámicas del sistema; permitiendo de esta manera tener alertas tempranas para que el operador cuente con un análisis situacional de lo que ocurre en el sistema.
- Detección automática de oscilaciones.



- Ubicación de problemas de estabilidad más precisa y rápida.
- Identificación de islas eléctricas; en caso de que se divida el sistema de potencia, saber dónde se separó nos ayuda mucho al momento de restaurar el sistema.
- Análisis post mortem, nos ofrece una reconstrucción más rápida del comportamiento dinámico y la mejora de distintos dispositivos en la planta y sistemas de potencia.
- Identificación de los modelos de sistema de potencia, necesario para la elaboración de estudios eléctricos.

4. METODOS DE ANÁLISIS DE MINERÍA DE DATOS

Una diferencia notable acerca de la información que es recibida a través de las PMUs, es justamente el volumen de información que esta es recopilada de manera continua, lo que lógicamente está directamente relacionada con la capacidad de un sistema de procesar e identificar los resultados de manera satisfactoria frente a un volumen grande de información y a través de este el adquirir conocimiento sobre las variables observadas.

Actualmente las herramientas estadísticas han evolucionado de tal manera que estos procesos de análisis de la data sean más fáciles de efectuar mediante diversas técnicas de la minería de datos.

Por otra parte, la mayoría de las veces el análisis estadístico clásico, por así decirlo ha dedicado esfuerzos sobre las medidas de tendencia central y las teorías que son comúnmente conocidas y utilizadas se basan en el supuesto de la normalidad de los datos las cuales han dado muy buen resultado. Sin embargo, dentro de estos análisis exploratorios se considera eliminar los valores atípicos pues lógicamente pueden influenciar en los resultados y en especial si las colas son pesadas.

La experiencia en el desarrollo de análisis de datos, al contrario, ha determinado que los datos atípicos o extremos llevan consigo mucha información especialmente relacionada con el riesgo y sucesos no esperados, e incluso inimaginables pero que finalmente ocurrieron en algún momento. Es por ello, que los valores atípicos pueden incluso contener más información acerca de los datos y sucesos relacionados motivando a explorarlos y a ser estudiados más exhaustivamente.

En relación con la información de nuestro interés, relacionada con la medición angular se puede verificar que esta medición sigue una distribución normal de manera general, pero que pueden variar en base a la condición operativa del sistema, de manera práctica se puede interpretar como un desplazamiento de este valor de tendencia central.

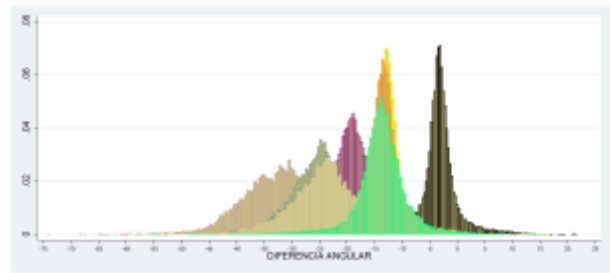


Figura 4: Espectro de las mediciones de las diferencias angulares en las subestaciones del SNI

De la imagen anterior, se puede inferir que el valor de diferencias angulares con respecto a una barra común sigue una distribución normal en cada una de las subestaciones donde se dispone de esta medición (PMU).

Que en función de esta aseveración se analiza una metodología más adecuada para determinar límites operativos de seguridad en base a algunos estadísticos descriptivos.

a) Ley de los grandes números

La característica del volumen de información estadísticamente permite en este caso aplicar la ley de los grandes números, describiendo el comportamiento del promedio de una sucesión de la variable aleatorias diferencia angular, conforme se incrementa el número de ensayos.

$$S_n = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{S_n}{n} - u\right| \geq \varepsilon\right) = 0$$

De manera práctica y considerando la variedad de observaciones disponibles el estadístico valor medio (\bar{x}); y con el conocimiento a priori que esta variable puede ser estimada como el valor promedio, no resulta ser suficiente para describirla y debería de estar acompañada de un intervalo de confianza a fin de garantizar un rango de datos de la cual pertenece el valor medio, sin embargo un intervalo de confianza describe a la media como valor probabilístico y sería un gran error considerar como límites operativos a los intervalos.

b) Teorema del límite central

De igual manera en base a la información y análisis empírico de la figura 4, y fácilmente comprobable a través de las técnicas de bondad de ajuste a la distribución normal, es de sencilla determinación establecer un valor medio del ángulo que refleje la operación en un determinado punto, y además incluir

sobre esta, la variabilidad de la media a través de la desviación estándar.

$$S_n = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n$$

$$Z_n = \frac{S_n - n\mu}{\sigma\sqrt{n}}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{S_n - n\mu}{\sigma\sqrt{n}} < z\right) = \Phi(z)$$

Conocida la media y su varianza se puede establecer un criterio determinístico que habitualmente se utiliza en los sistemas de control estadístico de calidad estableciendo límites de tolerancia superior e inferior.

$$LS = \bar{x} + k(\sigma) \quad \text{límite superior}$$

$$LI = \bar{x} - k(\sigma) \quad \text{límite inferior}$$

Donde k puede tomar valores en base al criterio de selección del nivel de la desviación que se requiera supervisar.

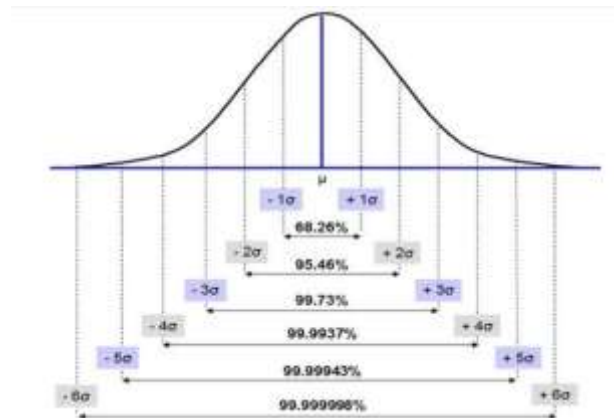


Figura 5: Valor de probabilidad de las observaciones basado en un factor de la desviación estándar (significancia)

Sin embargo, esta metodología no deja de ser un criterio que se transforma en empírico, dado que es el observador quien determina bajo su mejor criterio esta tolerancia (límites de significancia).

c) Criterio de valores atípicos (outliers)

Los criterios antes descritos basan su análisis en un estadístico de tendencia central que es comúnmente aplicable y práctico. Pero por otra parte se dispone del estadístico de posición, la mediana que en distribuciones normales viene a ser prácticamente el valor medio.

Sin embargo, el criterio de la mediana permite establecer los valores atípicos independientemente del tipo de distribución ya que sobre la distribución de los datos esta establece la posición en donde la información

es dividida en partes iguales.

La aplicación de este estadístico sobre este estudio consiste en determinar un punto estadístico donde las medidas obtenidas dejan de ser normales y se convierten en mediciones de las que se puede tomar alerta de un estado anómalo razón de nuestro interés; es decir la definición de los límites entre datos normales y anormales a través de la construcción de diagrama de caja.

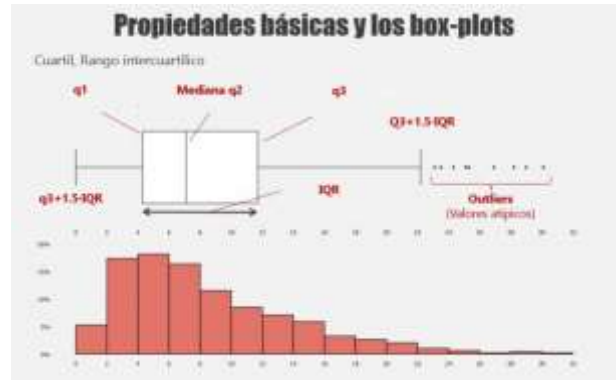


Figura 6: Valor de probabilidad de las observaciones basado en un factor de la desviación estándar (significancia)

- Valores atípicos leves

$$LS = Q_3 + 1,5 * RIC$$

$$LI = Q_1 - 1,5 * RIC$$

Dónde: $RIC = Q_3 - Q_1$

- Valores atípicos extremos

$$LS = Q_3 + 3 * RIC$$

$$LI = Q_1 - 3 * RIC$$

Dónde: $RIC = Q_3 - Q_1$

$$Q_1 = \text{cuantil } 25\%$$

$$Q_3 = \text{cuantil } 75\%$$

Bajo este concepto se puede entonces también establecer condiciones normales y atípicas o críticas de los valores de diferencias angulares como criterio.

d) Ley de logaritmo Iterado

Finalmente, la propuesta de metodología de este trabajo consiste en utilizar la ley de Logaritmo iterado, la cual se puede decir que conjuga la ley de los grandes números y el Teorema de límite central; que conceptualmente consiste en aplicar un proceso iterativo, donde con cada iteración se describe la magnitud de oscilación de la variable del proceso aleatorio.



$$S_n = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup = \frac{S_n}{2n \ln(\ln n)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \inf = \frac{S_n}{2n \ln(\ln n)^{\frac{1}{2}}}$$

Es decir, con cada iteración se logra establecer una referencia que finalmente tiende a converger en los valores estadísticamente más probables cuando estos tienden por la derecha o por la izquierda formando límites definitivamente nada empíricos y más bien probabilísticos. Cabe comentar que lógicamente los valores atípicos que existan siempre y cuando estos sean reales o extremos con la iteración de la metodología se van diluyendo durante este proceso.

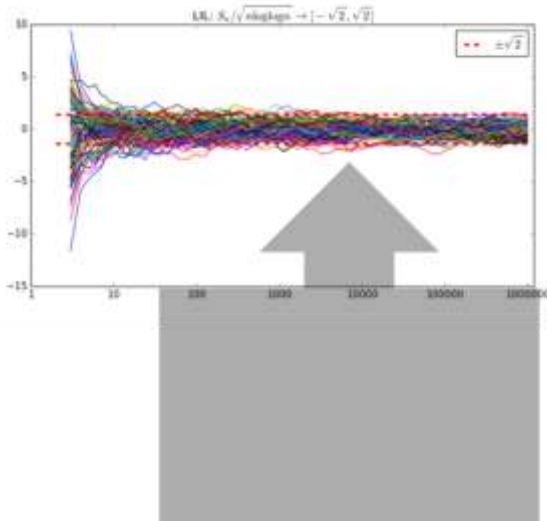


Figura 7: Proceso de convergencia de los datos utilizando la ley de logaritmo iterado

5. METODOLOGÍA APLICADA

Con el fin de determinar límites seguros de estabilidad estática de ángulo se plantea la siguiente metodología:

- Exportar, del sistema WAMS, los datos de voltaje de secuencia positiva de voltaje de cada una de las barras consideradas en el análisis.
- Cálculo de la diferencia angular entre cada una de las barras del sistema consideradas en el análisis con respecto a una barra de referencia.
- Realizar un análisis de datos, se elimina datos no típicos, se empleó la técnica de la mediana explicada en el numeral c) de la sección 4 de este trabajo.
- Establecimiento de límites de diferencia angular aplicando el método de análisis de

datos denominado “Ley de Logaritmo Iterado”.



Figura 8: Diagrama de flujo de la metodología empleada para determinar límites seguros de estabilidad estática de ángulo

6. RESULTADOS

En el presente trabajo se empleó la metodología descrita en la sesión anterior en el Sistema de transmisión del SNI de Ecuador, para lo cual se utilizó la información de secuencia positiva de voltaje de las PMUs instaladas en las subestaciones que se indica en la Tabla 1:

Tabla 1: Subestaciones consideradas en el análisis

COCA CODO SINCLAIR 500 kV
PASCUALES230kV
QUEVEDO230kV
ZHORAY230kV
SOPLADORA230kV
MOLINO230kV
SANT DOMINGO230kV
SANTA ROSA230kV
TOTORAS230kV
POMASQUII230kV
DUE230kV
EL INGA500kV

Se realizó el cálculo de la diferencia angular de cada una de las barras consideradas en el análisis tomando como referencia a la subestación Coca Codo Sinclair.

En la Fig. 9 se presenta el espectro del comportamiento de las diferencias angulares entre las barras del SNI mostradas en la Tabla 1 (Referencia Coca Codo Sinclair), de acuerdo con este espectro se verifica que la diferencia angular sigue una distribución normal por lo cual fue posible aplicar la ley de logaritmo iterado.

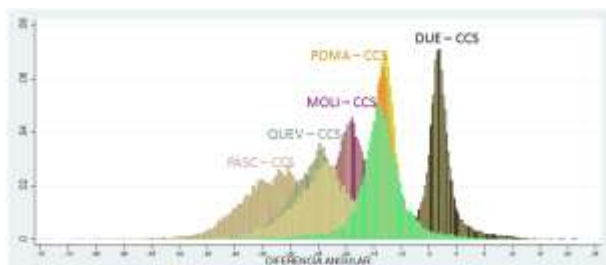


Figura 9: Espectro de las mediciones de las diferencias angulares en las subestaciones del SNI consideradas en el análisis.



Figura 10: Gráfico del comportamiento de la diferencia angular entre Coca Codo Sinclair – Pascuales empleando la Ley de Logaritmo Iterado – Datos del 2017.

En la Tabla 2 se muestra los límites de diferencia angular los cuales fueron obtenidos con la máxima diferencia angular existente entre las barras consideradas en el análisis, mostradas en la Tabla 1, la data analizada contempla las mediciones de voltaje en el año 2017.

Tabla 2: Resultados de los límites de la diferencia angular empleado la metodología indicada.

Barra de Ref. C.C.S.	LIMITES DE DIFERENCIA ANGULAR MÁXIMA(°)
PASCUALES230kV	44.15
QUEVEDO230kV	32.37
ZHORAY230kV	33.09
SOPLADORA230kV	35.71
MOLINO230kV	31.99
SANT DOMINGO230kV	23.15
SANTA ROSA230kV	13.63
TOTORAS230kV	17.51
POMASQUI230kV	12.65
DUE230kV	0.63
EL INGA500kV	2.09

7. CONCLUSIONES

- El uso de nuevas herramientas tecnológicas como WAMS permiten el desarrollo de nuevas metodologías para analizar la seguridad de un sistema de potencia, y con ello establecer límites de alerta temprana a fin de mejorar la seguridad del sistema.
- La metodología aplicada en este trabajo, para determinar los límites seguros de estabilidad estática de ángulo del SNI, se basó en las mediciones sincrofasoriales de tiempo real del sistema WAMS de CENACE, y además se empleó la técnica de minería de datos denominada Ley de Logaritmo Iterado utilizada para analizar valores extremos.
- El comportamiento de la diferencia angular entre las barras del SNI, Tomando como referencia al ángulo de voltaje de la subestación Coca Codo Sinclair 500 kV obedece a un comportamiento de distribución Normal, por lo que fue posible aplicar la Ley de Logaritmo Iterado para analizar valores extremos.
- Los límites de diferencia angular determinados en este trabajo, mostrados en la Tabla 2, también conocidos como límites de estabilidad estática de ángulo permitirá alertar al operador del sistema posibles problemas de estabilidad estática de ángulo y con ello crear una conciencia operativa a fin de establecer medidas de protección y control para incrementar los niveles de seguridad y confiabilidad en el suministro de energía eléctrica.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar la metodología aplicada en este trabajo para actualizar los límites de estabilidad estática de ángulo en función del ingreso de nuevas obras de expansión de generación y transmisión, como son centrales de generación, cargas que modifiquen las magnitudes y/o sentido de las transferencias de potencia y/o nuevas líneas de transmisión.
- Se recomienda implementar en el sistema WAMS de CENACE una alerta temprana considerando los límites obtenidos en este trabajo, los cuales son mostrados en la Tabla 2.



9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Castellanos B. “Determinación de límites de transmisión en sistemas eléctricos de potencia”, revista “Ingeniería Investigación y Tecnología”, volumen XV (número 2), abril-junio 2014: 271-286 ISSN 1405- 7743 FI-UNAM.
- [2] J. Cepeda, P. Verdugo “Determinación de los límites de estabilidad estática de ángulo del Sistema Nacional Interconectado”, Revista Técnica “energía”, 2014, p.5-12. ISSN 1390-5074.
- [3] J. Cepeda, P. Verdugo, G. Arguello “Monitoreo de la Estabilidad de Voltaje de Corredores de Transmisión en Tiempo Real a partir de Mediciones Sincrofasoriales”, Revista Politécnica, Volumen 33, 2014.
- [4] E.Tapia “Monitoreo en Tiempo Real de Oscilaciones de Potencia en el corredor Molino – Totoras – Santa Rosa – Pomasqui utilizando mediciones sincrofasoriales de las subestaciones Pomasqui y Molino” Tesis para obtener el título de Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador, Febrero 2015.
- [5] E.Tapia Pingyan, Chen. Limiting behavior of delayed sums under a non-identically distribution setup. An. Acad. Bras. Ciênc., Dec 2008, vol.80, no.4, p.617-625. ISSN 0001-3765.
- [6] Cormen, Thomas H.; Leiserson, Charles E., Rivest, Ronald L., Stein, Clifford (2001) [1990]. Introduction to Algorithms (2nd edición). MIT Press and McGraw-Hill. ISBN 0-262-03293-7.



Raúl Cubillo Nació en Quito, Ecuador en 1975. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en el 2001; Egresado de la Maestría en estadística Aplicada de la Escuela Politécnica Nacional, funcionario de CENACE a partir del año 2001, en la

Gerencia Nacional de Operaciones del Operador nacional de Electricidad CENACE desempeñando cargos de Ingeniero Operador de Tiempo Real, Supervisor de Operaciones, Instructor de Operadores, actualmente se desempeña como Subgerente Nacional de Análisis de la Operación, área en la que se desempeña actividades de análisis de eventos y Gestión de la información Estadística. Especialista en Análisis de Datos relacionadas con variables eléctricas e indicadores de gestión, conocimientos y experiencia en el campo de la Ciencia de datos, Big Data y software estadístico.



Luis E. Bonilla Guerrero. Nació en Ambato, Ecuador en 1989. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito en Septiembre de 2017. Actualmente trabaja en el Operador Nacional de Electricidad CENACE de

Ecuador en la subgerencia de Análisis de la Operación. Sus campos de interés son: Estabilidad y Control de sistemas Eléctricos de Potencia, y sistemas de medición Sincrofasoriales PMU's.