

## Ecuadorian National Interconnected System (SNI) Using the Equal Area Criterion and Synchrophasor Measurements

### Metodología para Calcular los Límites de Estabilidad Estática de Ángulo en el Sistema Nacional Interconectado (SNI) Ecuatoriano Usando el Criterio de Áreas Iguales y Mediciones Sincrofásorales

S.T. Palacios<sup>1</sup>  0009-0005-8717-2538

<sup>1</sup>Operador Nacional de Electricidad CENACE, Gerencia Nacional de Planeamiento Operativo, Quito, Ecuador  
E-mail: [spalacios@cenace.gob.ec](mailto:spalacios@cenace.gob.ec), [sashapalacios@gmail.com](mailto:sashapalacios@gmail.com), [satapala@espol.edu.ec](mailto:satapala@espol.edu.ec)

#### Abstract

Static angle stability is a critical aspect in the operation of power systems, ensuring generator synchronization under disturbances. In Ecuador, the National Electricity Operator (CENACE) uses the WAProtector tool to support system monitoring and perform various specific analyses and studies. This tool includes a module for static angle stability analysis and receives real-time data from Phasor Measurement Units (PMUs) installed across the National Interconnected System (SNI). The objective of this work is to establish static angle stability limits between consecutive buses, which must be configured within WAProtector. To achieve this, a methodology based on the Equal Area Criterion is proposed, applied to data obtained from simulations in DIgSILENT PowerFactory software and validated with historical WAProtector records. The study focuses on seven transmission lines of the SNI, selected due to the availability of complete and reliable data from both simulations and the WAMS system. The results show that critical angle values range between 43° and 53°, and in most cases, thermal limits are reached before angular stability limits. This methodology provides a practical solution for defining reliable operational limits in monitoring tools for the Ecuadorian power system.

**Index terms**— Angular stability limits, equal area criterion, power system transmission, historical data analysis.

#### Resumen

La estabilidad estática de ángulo es un aspecto crítico en la operación de sistemas eléctricos, asegurando la sincronización de los generadores ante perturbaciones. En el Ecuador, el Operador Nacional de Electricidad CENACE utiliza la herramienta WAProtector como apoyo para monitorear el estado del sistema y realizar diversos análisis y estudios específicos, la cual incluye un módulo para el análisis de estabilidad estática de ángulo. Esta herramienta recibe datos en tiempo real desde Unidades de Medición Sincrofásorial (PMU) instaladas en el Sistema Nacional Interconectado (SNI). El objetivo de este trabajo es establecer límites de estabilidad estática de ángulo entre barras continuas, los cuales deben ser configurados dentro de WAProtector. Para ello, se propone una metodología basada en el criterio de áreas iguales, aplicada sobre datos obtenidos mediante simulaciones en el software PowerFactory de DIgSILENT, y validada con registros históricos de WAProtector. El estudio se acota en siete líneas de transmisión del SNI, seleccionadas por contar con información completa y confiable tanto en simulación como en registro del sistema WAMS. Los resultados muestran que los valores de ángulo crítico oscilan entre 43° y 53°, y que en la mayoría de casos el sistema alcanza primero los límites térmicos antes que los límites por estabilidad angular. Esta metodología ofrece una solución práctica para definir límites operativos confiables en herramientas de supervisión del sistema eléctrico ecuatoriano.

**Palabras clave**— Límites de estabilidad angular, criterio de áreas iguales, transmisión en sistemas eléctricos de potencia, análisis de datos históricos.

Recibido: 01-05-2025, Aprobado tras revisión: 04-07-2025

Forma sugerida de citación: Palacios, S. (2025). "Metodología para calcular los límites de estabilidad estática de ángulo en el Sistema Nacional Interconectado (SNI) ecuatoriano usando el criterio de áreas iguales y mediciones sincrofásorales". Revista Técnica "energía". No. 22, Issue I, Pp. 12-19.

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

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v21.n2.2025.709>

© 2025 Autores



Esta publicación está bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento – No Comercial 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



## 1. INTRODUCCIÓN

La estabilidad angular es una de las formas fundamentales de estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia, ya que refleja la capacidad de las máquinas sincrónicas para mantener el sincronismo ante perturbaciones significativas [1] [2]. Su análisis es esencial para evitar la pérdida de generadores, oscilaciones no amortiguadas y colapsos que comprometan la integridad del sistema [3].

Entre las herramientas tradicionales para evaluar esta forma de estabilidad, se destaca el criterio de áreas iguales (Equal Area Criterion, EAC), comúnmente aplicado en sistemas tipo generador-barra infinita. Este criterio permite estimar el ángulo crítico de estabilidad mediante la comparación gráfica de áreas de aceleración y desaceleración en las curvas de potencia vs ángulo [3] [4]. Aunque inicialmente limitado a modelos simples, su utilidad se ha extendido con diversas formulaciones. En [5] se propone una versión extendida del EAC para sistemas de alta tensión; en [6], se analizan variantes del criterio según el tiempo crítico de despeje; y en [7], se generaliza su aplicación a sistemas multimáquina complejos. Investigaciones recientes han retomado estos desarrollos para implementarlos en estudios aplicados con datos reales y mediciones PMU, como es el caso de [8], donde se realiza un tratamiento detallado del EAC en redes tipo SMIB y multimáquina, incluyendo deducciones matemáticas del ángulo crítico, o en [9], donde se analiza su utilidad en esquemas de protección ante inestabilidad angular, validados con simulaciones realistas de múltiples oscilaciones. En este contexto, el presente trabajo adopta esta base metodológica/matemática y la aplica al caso específico del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, considerando sus condiciones operativas reales y su integración dentro de la herramienta WAProtector.

En el caso del Ecuador, el Operador Nacional de Electricidad CENACE ha desarrollado una infraestructura avanzada para el monitoreo del Sistema Nacional Interconectado (SNI), a través del sistema WAMS implementado en 2013. Este sistema se basa en Unidades de Medición Sincrofasorial (PMU) ubicadas estratégicamente en subestaciones clave del sistema de transmisión, conforme a criterios técnicos como observabilidad, supervisión angular y análisis de estabilidad oscilatoria [10] [11] [12] [13]. La herramienta WAProtector, desarrollada por ELPROS y utilizada por CENACE, permite procesar las señales de las PMU y aplicar diversos módulos de análisis, entre ellos el de estabilidad estática de ángulo [14].

Diversos trabajos han documentado el uso de esta infraestructura. Por ejemplo, en [12] se describe detalladamente la arquitectura del sistema WAMS, la ubicación de las PMU en el SNI y las funcionalidades de WAProtector. Además, varias publicaciones hablan acerca de los beneficios que brindan las mediciones históricas y en tiempo real de las PMU, como en [10] en

donde se ha resaltado el potencial operativo de las PMU para el seguimiento en tiempo real de condiciones críticas del sistema eléctrico, o en [11] que muestra un estudio sobre la ubicación óptima de estas unidades para mejorar la observabilidad del sistema. Conjuntamente, estudios recientes han explorado el uso de técnicas de aprendizaje profundo para la evaluación de la estabilidad de voltaje a corto plazo basadas en datos de PMU; por ejemplo, en [15] proponen un método que emplea aprendizaje por transferencia profunda para mejorar la precisión de la evaluación de estabilidad, incluso en condiciones de cambios topológicos y conjuntos de datos limitados. Otra de las aplicaciones que se les puede dar a las mediciones de PMU se presenta en [1], con una revisión integral sobre técnicas modernas de evaluación de seguridad, destacando la relevancia de establecer límites operativos confiables mediante análisis preventivos basados en simulación.

Si bien existen trabajos previos aplicados al SNI que han estimado límites de estabilidad angular, como [16], en general se enfocan en analizar eventos pasados a partir de datos registrados, sin discriminar claramente el tipo de inestabilidad que condujo al colapso (por voltaje, frecuencia o ángulo). Esto limita la precisión operativa de los valores obtenidos. En contraste, el presente trabajo aplica directamente principios clásicos de estabilidad angular, asegurando que los límites calculados correspondan efectivamente a esta forma de inestabilidad.

Con base en lo anterior, el presente trabajo propone una metodología para calcular los límites de estabilidad estática de ángulo entre barras continuas del SNI, con el objetivo de establecerlos como parámetros operativos en el módulo de estabilidad angular de WAProtector. La metodología se basa en el criterio de áreas iguales y se implementa sobre simulaciones detalladas en el software PowerFactory de DIGSILENT, tomando como referencia topologías reales y condiciones representativas del sistema ecuatoriano, y considerando cambios en la demanda y generación que se podrían presentar durante la operación diaria. Posteriormente, los resultados obtenidos son validados con registros históricos de ángulos eléctricos y flujos de potencia medidos por PMU e integrados en WAProtector.

Como contribución principal, esta investigación propone una metodología que puede ser replicada periódicamente y que combina el criterio de áreas iguales como principio clásico de estabilidad angular con simulaciones en PowerFactory y datos reales provenientes de PMU para determinar límites de estabilidad angular en el SNI. A diferencia de estudios previos, que usualmente se enfocan en escenarios particulares de colapso sin una validación cruzada entre simulación y operación real, este trabajo presenta una sistematización aplicable a condiciones diarias del sistema ecuatoriano, ayudando a actualizar los parámetros de configuración directa en la herramienta

WAProtector, lo que convierte a este trabajo en un aporte útil para operadores en tiempo real y planificadores del sistema eléctrico.

## 2. MARCO TEÓRICO

La diferencia angular entre dos barras del sistema de potencia es una medida directa de la capacidad de transmisión entre estos nodos. La Fig. 1 ilustra dos barras (A y B) de un sistema de potencia interconectadas por un conjunto de vínculos eléctricos [3].

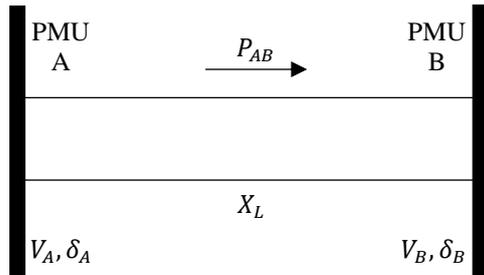


Figura 1: Transferencia de Potencia entre dos Barras del Sistema

Asumiendo el modelo “ $\pi$ ” para el vínculo equivalente entre los dos nodos o las dos barras, presentado en la Fig. 1, la transferencia de potencia entre el nodo A y el nodo B está dada por la expresión (1) [3].

$$P_{AB} = \frac{V_A V_B \sin(\delta_A - \delta_B)}{x} \quad (1)$$

Donde:

$V_A$ : Magnitud de voltaje en la barra A,

$V_B$ : Magnitud de voltaje en la barra B,

$\delta_A$ : Ángulo de voltaje en la barra A,

$\delta_B$ : Ángulo de voltaje en la barra B,

$x$ : Impedancia del vínculo entre las barras A y B.

En donde el valor teórico ideal de transferencia de potencia activa máxima está dado por (2):

$$P_{max} = \frac{V_A V_B}{x} = \frac{P_{AB}}{\sin(\delta_A - \delta_B)} \quad (2)$$

Idealmente el límite máximo de transferencia de potencia, se presenta en el punto más alto de la curva cuando se cumple que  $\sin(\delta_A - \delta_B) = 1$ ; es decir, cuando  $\delta_A - \delta_B = 90^\circ$ . 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 de estabilidad en estado estacionario [3] [4].

Bajo la premisa que en sistemas de potencia estables  $\delta_A - \delta_B$  corresponde a un valor menor a  $90^\circ$ , el flujo de potencia por el vínculo equivalente es directamente proporcional a esta diferencia angular. El máximo valor de diferencia angular en el margen de estabilidad e inestabilidad del sistema se llamará “ángulo crítico”, y el

valor de potencia que se puede transferir a través del vínculo con el valor de ángulo crítico se conocerá como “potencia crítica”.

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

Por lo tanto, para determinar la diferencia angular crítica entre las barras A y B (límite de estabilidad de ángulo) se debe llegar al límite crítico de transferencia de potencia por el vínculo.

Para lograr calcular los valores teóricos de ángulo crítico y potencia crítica se aplicará el criterio de las áreas iguales. Ver Fig. 2 [3] [4].

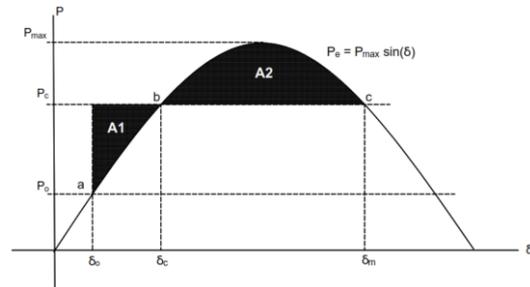


Figura 2: Curva Potencia Activa - Ángulo

El criterio mencionado define que, si el punto de operación en estado estacionario inicial (a) se ve alterado, por ejemplo, la potencia mecánica incrementa, esta puede aumentar hasta alcanzar un punto crítico (b) en el que se perdería la estabilidad por transitorios dinámicos [3] [4].

Debido al “swing” electromecánico que se genera debido a la aceleración/desaceleración de las máquinas cuando la potencia mecánica trata de igualar a la potencia eléctrica, durante un periodo de tiempo el punto de operación sobrepasa el punto crítico llegando a un punto de operación máximo (c). Estos 3 puntos de operación a, b y c determinan las áreas de aceleración y desaceleración ( $A_1, A_2$ ) del sistema [3] [4].

El criterio de las áreas iguales define que al igualar las áreas  $A_1$  y  $A_2$  se obtiene una expresión matemática en términos de ángulo crítico (delta crítico) [17] [18]:

$$A_1 = A_2$$

$$\int_{\delta_o}^{\delta_c} (P_c - P_{max} \sin(\delta)) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_{max} \sin(\delta) - P_c) d\delta$$

$$\int_{\delta_o}^{\delta_c} (P_c - P_{max} \sin(\delta)) d\delta = - \int_{\delta_c}^{\delta_m} (-P_{max} \sin(\delta) + P_c) d\delta$$

$$\int_{\delta_o}^{\delta_c} (P_c - P_{max} \sin(\delta)) d\delta + \int_{\delta_c}^{\delta_m} (P_c - P_{max} \sin(\delta)) d\delta = 0$$

$$\int_{\delta_o}^{\delta_m} (P_c - P_{max} \sin(\delta)) d\delta = 0$$

Conociendo que:

$$P_c = P_{max} \sin \delta_c$$

$$\delta_m = \pi - \delta_c$$

Se obtiene la siguiente expresión matemática en términos del ángulo crítico,  $\delta_c$ :

$$\int_{\delta_0}^{\pi-\delta_c} (P_{max} \sin \delta_c - P_{max} \sin(\delta)) d\delta = 0 \quad (3)$$

### 3. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en este estudio tiene como objetivo establecer límites de estabilidad angular entre barras continuas del SNI, mediante un enfoque práctico y replicable que articula tres elementos: i) simulaciones realistas en PowerFactory con topologías operativas del sistema ecuatoriano; ii) aplicación numérica del criterio de áreas iguales para estimar ángulos críticos; y iii) validación sistemática con registros de PMU procesados por WAProtector. Esta estructura metodológica permite vincular el análisis de estabilidad con la parametrización directa de herramientas de monitoreo en tiempo real, ofreciendo una mejora operativa frente a enfoques puramente analíticos o basados solo en datos históricos.

Para alcanzar este objetivo, se plantea un enfoque compuesto por tres etapas: simulación del sistema en PowerFactory, aplicación del criterio de áreas iguales para el cálculo del ángulo crítico, y validación de resultados mediante datos reales obtenidos desde WAProtector.

La Fig. 3 muestra el diagrama de flujo del proceso para obtener los valores de ángulo crítico de operación del SNI en cada uno de los vínculos estudiados.

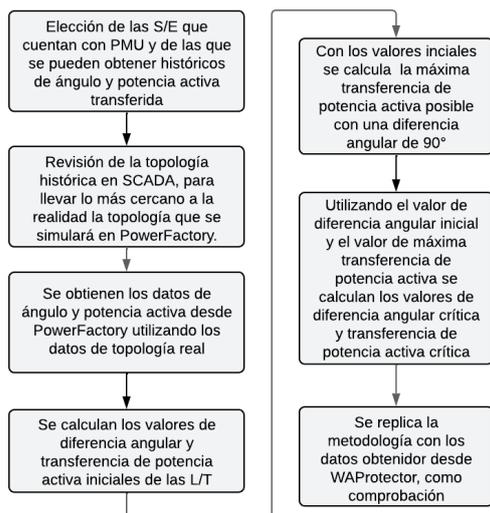


Figura 3: Diagrama de Flujo de la Metodología

#### 3.1 Cálculo de Límites en PowerFactory

Se adecuó el sistema eléctrico del SNI de CENACE simulado en PowerFactory a un modelo cercano a una

topología real correspondiente al 01 de mayo del año 2024 (fecha en que el SNI sufrió un colapso) y al periodo que va desde el 2 de diciembre de 2024 al 16 de enero de 2025 (topología extraída del sistema SCADA/EMS de CENACE). Se simularon condiciones operativas representativas, incluyendo variaciones en la generación de CCS y Paute, que inducen incrementos en el flujo de potencia activa y separación angular en ciertos vínculos de transmisión.

Las simulaciones en el dominio del tiempo RMS permitieron registrar la relación entre la potencia activa transmitida y la diferencia angular entre barras para siete líneas de transmisión (L/T) seleccionadas: Molino–Pascuales, Pomasqui–Santa Rosa, Pomasqui–Pimampiro, Milagro–Sopladora, Milagro–Zhoray, Totoras–Santa Rosa y Minas San Francisco–Machala.

Con los datos obtenidos, se aplicó el criterio de áreas iguales (EAC) para calcular el valor crítico del ángulo eléctrico que define el umbral de estabilidad angular para cada línea. Este cálculo se realizó mediante herramientas numéricas en Python 3,9 y hojas de cálculo en Excel.

La Fig. 4 muestra una gráfica de potencia eléctrica versus ángulo de la L/T Pomasqui – Pimampiro 230 kV simulada en PowerFactory, asumiendo un desvío de carga y redespacho de generación en la zona.

#### 3.2 Validación con Datos del Sistema Real

Para verificar la coherencia de los valores determinados, se utilizaron registros históricos de ángulos eléctricos y potencias activas obtenidos desde WAProtector, el sistema de monitoreo en tiempo real basado en PMU operado por CENACE. Se extrajeron datos horarios correspondientes al mismo período simulado, únicamente de barras con PMU operativas en niveles de 230 kV.

Esta etapa permitió contrastar los resultados teóricos obtenidos en el entorno simulado con el comportamiento real del sistema, y así validar que los límites calculados son técnicamente consistentes y adecuados para su implementación como parámetros operativos dentro del módulo de estabilidad angular de WAProtector.

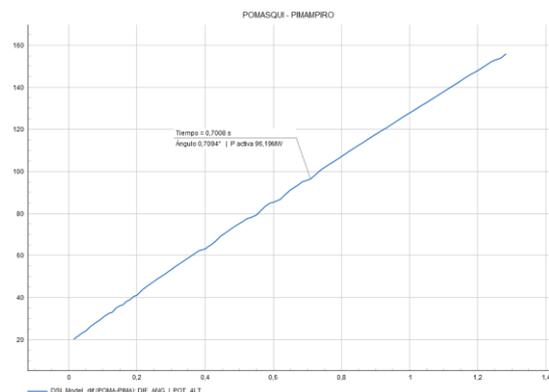


Figura 4: Gráfica de Potencia vs. Ángulo de la L/T Pomasqui - Pimampiro 230 kV Simulada en Powerfactory de DIgSILENT



#### 4. EJEMPLO DE CÁLCULO

Para mostrar un ejemplo de la metodología utilizada y los cálculos, se toma el caso de la L/T Molino – Pascuales 230 kV. En la Tabla 1 se muestran los datos obtenidos de la simulación en PowerFactory; adicionalmente, se muestran los datos en una fecha y hora específicas tomados de WAProtector. Estos datos muestran la diferencia angular entre las barras de Molino y Pascuales y el flujo de potencia activa a través del vínculo que une las dos subestaciones.

**Tabla 1: Datos de Diferencia Angular y Flujo de Potencia Activa Obtenidos de PowerFactory y WAProtector de la L/T Molino – Pascuales 230 kV**

DATOS DE POWERFACTORY	
DIFERENCIA ANGULAR (°)	POTENCIA ACTIVA (MW)
4,43	96,43
DATOS DE WAPROTECTOR	
DIFERENCIA ANGULAR (°)	POTENCIA ACTIVA (MW)
0,35	12,48

Con estos datos se utiliza la expresión matemática (2) para calcular el valor teórico ideal de transferencia de potencia activa máxima.

Primero, para los datos obtenidos de PowerFactory:

$$P_{max} = \frac{96,43 \text{ MW}}{\sin(4,43^\circ)} = 1\,248,43 \text{ MW}$$

Segundo, para los datos obtenidos de WAProtector:

$$P_{max} = \frac{12,48 \text{ MW}}{\sin(0,35^\circ)} = 2\,002,15 \text{ MW}$$

Luego, haciendo uso de la expresión matemática (3), se calcula el valor del ángulo crítico de transferencia de potencia entre las dos subestaciones. Los valores de ángulos deben ser transformados de grados a radianes.

Primero, para los datos obtenidos de PowerFactory:

$$\int_{0,0773}^{\pi-\delta_c} (1\,248,43 \sin\delta_c - 1\,248,43 \sin(\delta)) d\delta = 0$$

$$\delta_c = 0,8454 \text{ rad} = 48,44^\circ$$

Segundo, para los datos obtenidos de WAProtector:

$$\int_{0,1433}^{\pi-\delta_c} (2\,002,15 \sin\delta_c - 2\,002,15 \sin(\delta)) d\delta = 0$$

$$\delta_c = 0,8132 \text{ rad} = 46,59^\circ$$

Finalmente, con los valores de ángulo crítico, se puede calcular el valor de potencia activa crítica, despejando la variable de la expresión matemática (2).

$$P_c = P_{max} \times \sin(\delta_c)$$

Primero, para los datos obtenidos de PowerFactory:

$$P_{cr} = (1\,248,43) \times \sin(48,44^\circ) = 974,91 \text{ MW}$$

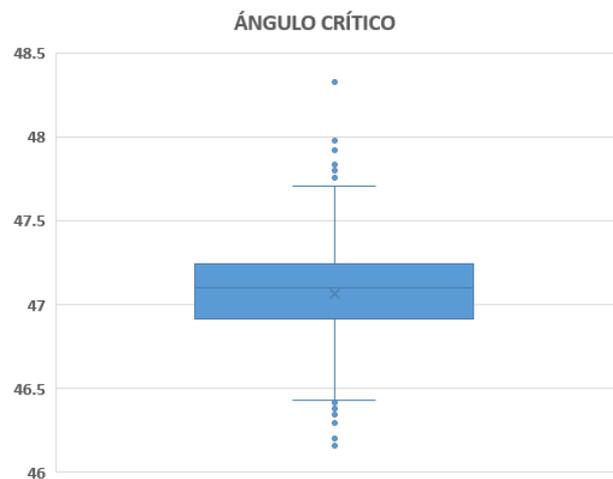
Segundo, para los datos obtenidos de WAProtector:

$$P_{cr} = (2\,002,15) \times \sin(46,59^\circ) = 1\,454,65 \text{ MW}$$

#### 5. RESULTADOS

A partir del desarrollo de los escenarios de simulación definidos en la metodología, se obtuvieron los valores límite de estabilidad angular para distintos puntos del sistema. Para sustentar la validez de estos resultados, se emplearon 1.099 registros extraídos del sistema WAProtector, correspondientes a eventos reales del Sistema Nacional Interconectado. Los datos analizados comprenden el periodo entre el 2 de diciembre de 2024 y el 16 de enero de 2025, e incluyen adicionalmente los registros asociados al evento de colapso ocurrido el 1 de mayo de 2024. Durante el proceso de depuración, aproximadamente el 0,36% de los datos fueron identificados como aberrantes y descartados por presentar desviaciones significativas respecto al comportamiento general. El conjunto restante de observaciones válidas mostró una alta consistencia, con valores que se concentraron en un rango estrecho entre 43 y 53 grados. En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones junto con los valores más restrictivos obtenidos de los datos empíricos, permitiendo visualizar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales y simuladas.

En la Fig. 5 se presenta un ejemplo típico de la distribución, en un diagrama de caja, de los ángulos críticos registrados para una de las líneas evaluadas, donde se observa claramente la acumulación de valores dentro del rango mencionado, así como la presencia puntual de valores atípicos. Esta información permitió seleccionar, para cada línea, el valor más restrictivo dentro del conjunto de datos depurados, el cual se compara con el resultado obtenido mediante simulación.



**Figura 5: Distribución del Ángulo Crítico en la L/T Pomasqui – Santa Rosa 230 kV con Datos de WAProtector**

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para cada una de las líneas de transmisión analizadas,



distinguiendo entre los escenarios de PowerFactory de DI-SILENT (DS) y los valores más restrictivos de los datos reales del sistema WAProtector (WP), una vez descartados los datos aberrantes. Para cada caso, se reporta el ángulo crítico (en grados) y la potencia activa crítica (en megavatios) correspondiente. Esta comparación permite visualizar las diferencias entre los valores teóricos calculados mediante simulaciones y los promedios observados en la operación real del sistema.

**Tabla 2: Comparación entre Resultados Simulados (DS) y Datos Real más Restrictivo del Sistema WAProtector (WP) para el Ángulo Crítico y la Potencia Activa Crítica por Línea de Transmisión Evaluada**

L/T	PD	ÁNGULO CRÍTICO (°)	POTENCIA ACTIVA CRÍTICA (MW)
MOLINO - PASCUALES	DS	48,44	974,91
	WP	46,59	1 454,65
POMASQUI - SANTA ROSA	DS	46,74	948,87
	WP	47,29	957,35
PIMAMPIRO - POMASQUI	DS	46,75	949,01
	WP	46,64	947,24
SOPLADORA - MILAGRO	DS	53,50	1 047,37
	WP	50,86	1010,49
ZHORAY - MILAGRO	DS	50,65	1 007,42
	WP	49,77	1 040,15
SANTA ROSA - TOTORAS	DS	46,89	951,33
	WP	43,30	1 346,81
MINAS SAN FRANCISCO - MACHALA	DS	47,66	963,01
	WP	45,55	736,34

En la Tabla 3 se muestran los valores seleccionados como los más restrictivos de ángulo y potencia críticos de cada una de las líneas de transmisión estudiadas en este trabajo. La mayoría de los ángulos críticos obtenidos se encuentran en el rango de 43° a 53°, lo cual concuerda con la teoría clásica [3].

**Tabla 3: Ángulo y Potencia Activa Críticos de las L/T**

L/T	ÁNGULO CRÍTICO (°)	POTENCIA ACTIVA CRÍTICA (MW)
MOLINO-PASCUALES	48,44	974,91
POMASQUI-SANTA ROSA	46,74	948,87
PIMAMPIRO-POMASQUI	46,64	947,24
SOPLADORA-MILAGRO	50,86	1010,49
ZHORAY-MILAGRO	50,65	1 007,42
SANTA ROSA-TOTORAS	46,89	951,33
MINAS SAN FRANCISCO-MACHALA	45,55	736,34

En la Tabla 4 se realiza una comparación entre: los valores de transferencia de potencia activa máximos permitidos por CELEC EP TRANSELECTRIC según [17], y los valores de potencia calculados en la Tabla 3.

**Tabla 4: Comparación de Potencia Crítica por Estabilidad de Ángulo y Valor Máximo de Transferencia de Potencia Declarado por TRANSELECTRIC**

L/T	Potencia crítica (MW)	Máxima transferencia de potencia activa con factor de potencia de 0.95 Estado emergencia TRANSELECTRIC (MW)
MOLINO-PASCUALES	974,91	839,8
POMASQUI-SANTA ROSA	948,87	813,2
PIMAMPIRO-POMASQUI	947,24	1626,4
SOPLADORA-MILAGRO	1010,49	563,35
ZHORAY-MILAGRO	1 007,42	839,8
SANTA ROSA-TOTORAS	951,33	839,8
MINAS SAN FRANCISCO-MACHALA	736,34	406,6

En conjunto, los resultados evidencian que, en la mayoría de los casos, los límites térmicos declarados por TRANSELECTRIC actúan antes que los márgenes de estabilidad angular. Sin embargo, existen excepciones relevantes como en la L/T Pimampiro-Pomasqui 230 kV, donde la estabilidad angular puede ser el factor limitante, lo cual debe ser considerado en futuras configuraciones operativas y coordinaciones internacionales. No obstante, actualmente, CENACE maneja como límite de transferencia de potencia entre Ecuador y Colombia un valor de 450 MW por motivo de asegurar la estabilidad de voltaje [18].

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La metodología aquí propuesta permite establecer límites de estabilidad angular con una base operativa concreta, superando aproximaciones anteriores que no discriminaban adecuadamente entre los tipos de inestabilidad (frecuencia, tensión o ángulo). Al articular simulaciones con condiciones representativas del SNI y datos reales de PMU, se proporciona un marco de análisis que puede ser utilizado directamente en entornos operativos, y que permite actualizar los umbrales del módulo de estabilidad angular de WAProtector de forma justificada. Esta sistematización es particularmente valiosa para contextos donde las condiciones operativas cambian frecuentemente y se requiere adaptar los límites de protección sin depender exclusivamente de eventos extremos previos.

En este documento se han establecido los límites por estabilidad estática de ángulo entre las barras de las L/T



de 230 kV Molino - Pascuales, Pomasqui - Santa Rosa, Pomasqui - Pimampiro, Milagro - Sopladora, Milagro - Zhoray, Totoras - Santa Rosa, y Minas San Francisco - Machala; teniendo todos valores aproximados entre 43° y 53° como lo indica la teoría.

Los valores de potencia crítica calculados en este trabajo demuestran que, al menos en lo que respecta a las líneas de transmisión estudiadas, en el SNI no se presentan problemas por estabilidad estática de ángulo; ya que antes de llegar a esto, actuarían las protecciones por límites de flujo de potencia establecidos por TRANSELECTRIC, y sólo en el caso de la interconexión entre Ecuador y Colombia actuaría primero la protección por inestabilidad de voltaje.

Cabe destacar que la metodología desarrollada en este trabajo ha sido adoptada oficialmente por el Operador Nacional de Electricidad CENACE como base técnica para el cálculo de los límites de estabilidad angular del SNI. Esta metodología fue implementada en el informe técnico institucional [19], utilizado como declaración oficial de los límites de estabilidad angular correspondiente al año 2025.

Aunque la metodología fue aplicada sobre escenarios representativos que incluyen condiciones operativas exigentes e incluso un evento real de colapso (01 de mayo de 2024), se reconoce que el análisis está centrado en siete líneas seleccionadas del sistema y no contempla aún la totalidad de interconexiones críticas del SNI. Asimismo, el enfoque se basa en estabilidad estática de ángulo, por lo que no se han explorado otros tipos de estabilidad (como la transitoria o la de voltaje) que también podrían condicionar los márgenes operativos.

Como trabajos futuros se propone ampliar el análisis a otras regiones del sistema, considerar escenarios con mayor participación de generación renovable no convencional, e investigar la combinación de esta metodología con indicadores dinámicos adicionales que permitan una visión más integral de la estabilidad del sistema.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Gerencia Nacional de Planeamiento Operativo del Operador Nacional de Electricidad CENACE por el respaldo brindado para el desarrollo de este trabajo. En especial, a Wendy por darme la oportunidad de llevar adelante esta iniciativa, a Verónica por apoyar mis ideas y aportar con observaciones valiosas, y a Diego por su apoyo en la validación del estudio.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Gholami, M., Sanjari, M. J., Safari, M., Akbari, M., & Kamali, M. R. (2020). Static security assessment of power systems: A review. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(9).

- [2] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, et al., "Definition and classification of power system stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, pp. 1387–1401, 2004.
- [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.
- [4] M. Ribbens-Pavella, P. Murthy, *Transient Stability of Power Systems*, Wiley, 1994.
- [5] Y. Xue et al., "Extended equal area criterion revisited (EHV power systems)," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, no. 3, pp. 1127–1130, 1992.
- [6] Y. Sun et al., "Equal-area criterion in power systems revisited," *Proc. R. Soc. A*, vol. 474, no. 2210, p. 20170733, 2018.
- [7] Y. Xue and K. Sun, "Generalized Equal Area Criterion for Transient Stability Analysis," *Proc. 4th IEEE Conf. Energy Internet*, Wuhan, China, 2020.
- [8] G. Araque and R. Barba, "Unidades de Medición Fasorial - PMU," *Rev. Téc. Energía*, vol. 10, no. 1, 2014.
- [9] D. Jiménez and W. Vargas, "Ubicación Óptima de Unidades de Medición Sincrofasoriales PMU's para mejorar la Observabilidad de un Sistema Eléctrico de Potencia," *Rev. Téc. Energía*, vol. 10, no. 1, 2014. [Online]. Available: <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/download/58/56/107>
- [10] A. De La Torre, J. Cepeda y J. C. Herrera, "Implementación de un sistema de monitoreo de área extendida WAMS en el Sistema Nacional Interconectado del Ecuador SNI," *Revista INGENIUS*, no. 10, pp. 34–43, 2013.
- [11] C. Lozano, F. Castro, and S. Ramírez, "Unidades de medición fasorial (PMU)," *El Hombre y la Máquina*, vol. 38, pp. 66–74, 2014. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/478/47823946008.pdf>
- [12] "WAProtector: Power System Wide Area Monitoring". ELPROS. Disponible en: <http://www.elpros.si/>
- [13] Li, Y., Zhang, S., Li, Y., Cao, J., & Jia, S. (2023). PMU measurements-based short-term voltage stability assessment of power systems via deep transfer learning. arXiv preprint arXiv:2308.03953
- [14] J. Cepeda and P. Verdugo, "Determinación de los Límites de Estabilidad Estática de Ángulo del Sistema Nacional Interconectado," *Rev. Téc. Energía*, vol. 10, no. 1, 2014.

- [15] CELEC EP TRANSELECTRIC, “Declaración de límites de transferencia de las instalaciones del SNT – Líneas de transmisión,” CELEC EP TRANSELECTRIC, Quito, Informe técnico, Dic. 21, 2022.
- [16] XM S.A. E.S.P., CENACE, y CELEC EP TRANSELECTRIC, Generación de seguridad y límites de transferencia de potencia Colombia – Ecuador para 2025, Documento XM CND – CENACE – TRANSELECTRIC 023, dic. 2024.
- [17] M. El Hajj, Transient Stability Analysis in Power Systems Using Equal Area Criterion and Energy Functions, MSc Thesis, University of Manitoba, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://mspace.lib.umanitoba.ca/handle/1993/34409>
- [18] M. A. Moustafa, Multiple Swing Out-of-Step Relaying and Simulation Techniques, M.Sc. Thesis, Virginia Tech, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/77199>
- [19] CENACE, Determinación de los límites de estabilidad estática de ángulo del Sistema Nacional Interconectado (SNI) – Año 2025, Informe Técnico, diciembre 2024.



**Sasha Palacios Brito.** - Nació en Ecuador. Recibió su título de Ingeniera Eléctrica de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y su título de Máster en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Actualmente, trabaja en

el Operador Nacional de Electricidad CENACE, dentro de la Gerencia de Planeamiento Eléctrico. Ha trabajado en investigación sobre redes de transmisión de alta tensión y ha desarrollado estudios con el software PSS/E para la integración de sistemas HVDC y parques fotovoltaicos en el sistema eléctrico argentino. Sus áreas de interés incluyen redes inteligentes (Smart Grids), SCADA y sistemas de comunicación en infraestructura eléctrica.