



Estudio de estabilidad de tensión en la red de distribución de la provincia Guantánamo

Study of tension stability in the distribution network of the Guantánamo province

David Calas Cardero^{1,*}, Frank Grau Merconchini¹, Irina Laamanen^{II}

¹ Universidad de Oriente (UO). Santiago de Cuba, Cuba

^{II} Universidad de Tampere, Tampere, Finlandia

*Autor de la correspondencia: david.calas@uo.edu.cu

Recibido: 2 septiembre de 2024

Aprobado: 28 de noviembre de 2024

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ABSTRACT

Cuba, ha trazado una política para el desarrollo sostenible del país, basada en el cambio de la matriz energética, hacia el empleo de las energías renovables dentro de la generación distribuida (GD) para el año 2030. Por la alta incidencia de la generación propia en la provincia de Guantánamo, en donde el 85 % de la generación pertenece a la GD y el 15 % proviene del SEN, es de vital importancia, evaluar la estabilidad de tensión de la red de distribución de media tensión de la provincia, tanto en el régimen de operación estable como transitorio. En este sentido, en la presente investigación, aporta un estudio de estabilidad de tensión con el empleo del DIGSILENT Power Factory, utilizando los métodos de estabilidad estáticos y dinámicos, en la Red de Media Tensión con generación distribuida de la provincia Guantánamo específicamente en las subestaciones de Guantánamo 1 y 2.

Palabras clave: estabilidad, generación distribuida, redes de distribución.

Cuba has outlined a policy for the sustainable development of the country, based on the change in the energy matrix, towards the use of renewable energies within distributed generation (DG) by the year 2030. Due to the high incidence of its own generation in the province of Guantánamo, where 85% of the generation belongs to the DG and 15% comes from the SEN, it is of vital importance to evaluate the voltage stability of the province's medium voltage distribution network, both in the stable and transient operating regime. In this sense, in this research, a voltage stability study is provided with the use of the DIGSILENT Power Factory, using static and dynamic stability methods, in the Medium Voltage Network with distributed generation of the Guantánamo province, specifically in the substations of Guantánamo 1 and 2.

Key words: stability, distributed generation, distribution network.

INTRODUCCIÓN

El Sistema Electroenergético Nacional (SEN) tenía una estructura centralizada regida por grandes centrales termoeléctricas que suplían la demanda de energía eléctrica del sistema. Con la incorporación de las plantas generadoras con el empleo de las fuentes renovables de energía a este sistema y grupos electrógenos Diésel y Fuel-oil, que se encuentran cercanas a las cargas, su configuración comienza a sufrir grandes cambios y surge así el concepto de Generación Distribuida (GD) en el sistema de distribución [1-3].

Cómo citar este artículo:

David Calas Cardero y otros. Metodología para el estudio de estabilidad de tensión en la red de distribución de la provincia Guantánamo. Ingeniería Energética. 2024. 45 (3), septiembre/diciembre. ISSN 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Todo esto tiene una gran repercusión en la economía debido al ahorro de combustible fósil dejado de quemar, por la reducción de las pérdidas en la transmisión y distribución de la energía eléctrica, incidiendo también en los flujos de potencia y en los niveles de tensión en el extremo de consumo [3, 4]. Las variaciones en los flujos y en los niveles de tensión han de tenerse en cuenta, ya que estos sistemas eléctricos de potencia son diseñados para operar a valores de tensión y frecuencia de estado estable para cada caso en particular, y cuando estos varían como consecuencia de la inyección o remoción de carga en el sistema debido a operaciones de maniobra, pérdida de generación, arranque de grandes grupos de motores o el retardo en el despeje de fallas de magnitudes considerables, y no ocurre el retorno del sistema a su condición anterior, se está en presencia de la pérdida de estabilidad, ésta altera los parámetros operativos volviéndose entonces el sistema afectado un peligro para sí mismo.

A pesar de formar parte de un fenómeno de particular importancia, los eventos que ocurren durante la operación normal y que provocan perturbaciones en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), no son por lo general considerados con precisión para la elaboración de las premisas de manipulación y control de dichos sistemas. Esto deja un gran problema, pues no se conoce en qué condiciones está operando el sistema o si cumple con todas las normas técnicas de los criterios operativos [5, 6]. Además, no se tiene conocimiento de su punto de operación ni de hasta donde es capaz de soportar un incremento de la carga, sin perder la habilidad de mantener las tensiones en estado estacionario en todos sus nodos, después de haber sido sometido a las perturbaciones antes mencionadas [5].

La provincia de Guantánamo por sus potencialidades de gran incidencia solar, hidráulica y eólica, presenta una gran penetración de plantas generadoras con fuentes renovables de energía en el SEP, además de los emplazamientos de grupos electrógenos Diésel y Fuel-oil en sus subestaciones principales. Todas estas plantas generadoras están conectadas a las redes de distribución de media tensión, fortaleciendo el concepto de la generación distribuida. Por la alta incidencia de la generación distribuida en la provincia de Guantánamo, en donde el 85 % de la generación pertenece a la GD y el 15 % proviene del SEN, es de vital importancia, evaluar la estabilidad de tensión de la red de distribución de media tensión de la provincia, tanto en el régimen de operación estable como transitorio, para poder conocer los márgenes de incremento de potencia activa y reactiva en los nodos, sin que ocurra un colapso de tensión, y la respuesta dinámica de la tensión en dichos nodos, al ocurrir una gran perturbación.

Para el análisis de la estabilidad de estas redes, es necesario realizar un diagnóstico inicial de la operación en régimen estable, para lo que es necesario evaluar los siguientes indicadores [5, 7]:

1. El esquema monolineal de la red de distribución primaria montada en el software Power Factory.
2. Las tomas de carga de los diferentes nodos o barras del sistema.
3. Datos del tipo de carga de los circuitos de cada barra o nodo.
4. Capacidad instalada de cada nodo de carga.
5. Niveles de tensión en cada subestación en régimen normal de operación.
6. Perfiles de la tensión en cada subestación en régimen normal de operación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Existen diferentes razones por las cuales se quiera realizar un análisis sobre el SEP, lo cierto es que siempre se deberá realizar un planeamiento operativo del sistema a largo, mediano y corto plazo. Para esto se requiere conocer diferentes variables que ayudarán a obtener un modelo más preciso [7, 8]. Los procedimientos que se deben seguir para realizar una buena evaluación al SEP, comprende los siguientes análisis: Estacionario y Transitorio, obteniendo como resultado todas las condiciones u alteraciones a las que puede estar sometido el sistema, algunos ejemplos son: límites de tensión, necesidades de compensación, tiempo de despeje de fallas, control de generación para regulación primaria y secundaria, entre otros [7-9].

Análisis de Estado Estacionario del SEP: el objetivo de este análisis es establecer los límites de seguridad para los SEP, en los cuales el sistema tiene una respuesta adecuada y aceptable de todos sus elementos como en generación, detectar problemas de regulación de tensión, sobrecargas de las líneas y transformadores asociados [10].

Análisis de Estado Transitorio del SEP: Este análisis evalúa el periodo correspondiente a la contingencia, en el cual se pueden apreciar las variaciones en las variables del sistema y que pueden llevar a inestabilidad de este, afectaciones de variables como: tensión, corriente, potencia y frecuencia [10].

El sistema de potencia es un sistema altamente no lineal que opera en un ambiente de constante cambio; las cargas, generadores y parámetros de operación cambian continuamente. Cuando está sujeto a una perturbación, **la estabilidad** del sistema depende de las condiciones iniciales de operación, así como también, de la naturaleza de la perturbación [5]. El sistema también debe estar en la capacidad de sobrevivir ante numerosas perturbaciones severas, tales como un cortocircuito en una línea de transmisión o pérdida de una importante fuente de generación. Una gran perturbación puede ocasionar cambios estructurales debido al aislamiento de los elementos fallados, como resultado de la actuación de los relés de protección. Un sistema de potencia puede ser estable para una perturbación física dada, y ser inestable para otra [10, 11].

Metodologías utilizadas para analizar el problema de estabilidad de tensión

Existen gran cantidad de trabajos que proponen diversos métodos para estudiar los problemas relacionados con la estabilidad de tensión, éstos van desde los más simples hasta los más complejos. A continuación, se detallan métodos estáticos y de análisis dinámicos, ya que, para un análisis completo de la estabilidad de tensión, es necesario emplear cada uno de ellos, en dependencia de sus objetivos y potencialidades.

Dentro de los métodos estáticos se encuentran [12-14]:

- Análisis Modal QV.
- Análisis de Sensibilidad VQ.
- Curvas PV.
- Curvas VQ.

Para este tipo de estudio, por la gran cantidad de elementos que integran un sistema eléctrico de potencia, se emplean softwares profesionales como el, PowerSystem Explorer (PSX), NEPLAN, entre otros [15-17]. Para el estudio en cuestión utilizamos el DigSilentPower Factory 2021 SP2 licencia: 2021-0303-1000001, en conjunto con la universidad de Tampere Unit of Electrical Engineering.

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se basa en la valoración de la variación de la tensión con respecto al cambio de la potencia de la carga y la determinación de las zonas más sensibles del sistema, para el estado normal de operación y después de contingencias. Este análisis se realiza a través de los flujos de potencia convencionales estáticos [8, 11].

Curvas PV y VQ

Para obtener los límites de estabilidad de tensión con el incremento progresivo de la carga, se emplean métodos de análisis estáticos basados en flujos de potencia continuos o progresivos, que buscan con precisión la máxima cargabilidad de un nodo. Con los resultados del flujo progresivo, se pueden graficar las curvas potencia activa – tensión (PV) y potencia reactiva-tensión (QV), en el nodo de carga a estudiar [12, 18].

Curvas PV

La gráfica de la tensión versus la potencia (Curvas PV) sirve para calcular los límites, márgenes, índices de proximidad a la inestabilidad e identificación de las áreas, nodos o elementos débiles del sistema. Cuando se estudia la estabilidad de tensión, resulta de interés la relación entre la potencia transmitida (P) y la tensión del receptor final (V). El proceso de análisis de estabilidad de tensión analiza la transferencia de P de una zona a otra del sistema, y comprueba sus efectos en las tensiones del sistema, V. Este tipo de análisis se le denomina comúnmente estudio PV [12, 18], (ver figura 1).

Observando la gráfica de la figura 1, se puede ver que en el punto de inflexión (“knee”) de la curva PV, la tensión cae rápidamente cuando hay un ligero incremento en la carga demandada. El flujo de potencia no converge a partir de este punto, lo cual indica que el sistema ha llegado a ser inestable. Este punto se llama Punto Crítico o punto de colapso de la tensión, y puede ser utilizado para determinar la tensión de funcionamiento crítica del sistema y el margen de colapso [8, 19]. El punto crítico, aporta la información de la potencia máxima que se debe transferir al nodo, para obtener la tensión crítica, por debajo de la cuál ocurre el colapso de la tensión en ese nodo.

La gráfica de la figura 1, también aporta la información de la potencia máxima que se debe transferir para obtener la tensión mínima normada, así como el margen de cargabilidad por tensión mínima y el margen de cargabilidad total. Generalmente, puntos de funcionamiento por encima del punto crítico significan que el sistema está funcionando en condiciones estables y si los puntos de funcionamiento están por debajo de dicho punto el sistema se dice que está funcionando en una condición inestable.

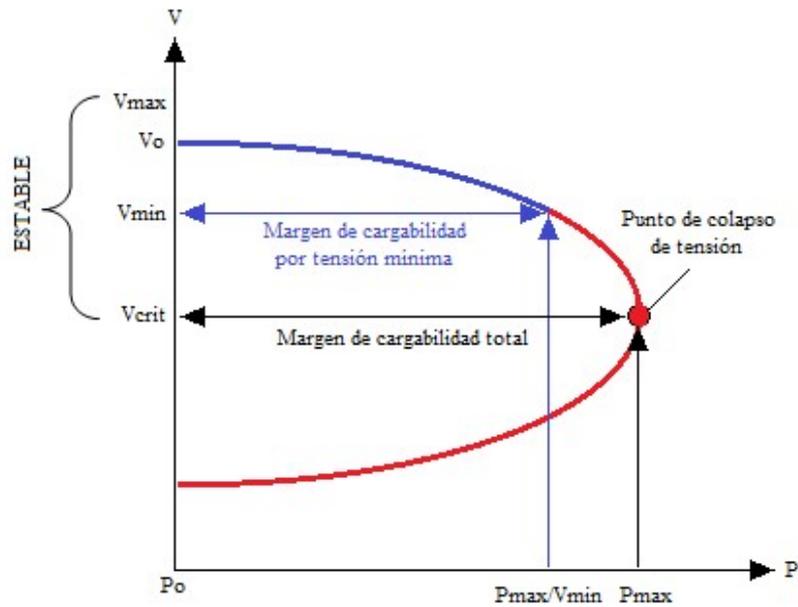


Fig. 1. Características generales de una Curva PV. Fuente: Adaptado a partir de [12]

Curva QV

Con el método de la curva QV, se analiza la sensibilidad de tensión con respecto a la potencia reactiva de un nodo de carga (Curvas QV), y sirve para obtener un índice de proximidad al límite, el peor escenario de operación del sistema en estado estable y la probabilidad de que este ocurra. También permite determinar las reservas de reactivos y controlar la estabilidad con compensación en los nodos críticos. La figura 2, muestra una curva típica QV, la cual se obtiene normalmente a partir de una serie de soluciones de flujo de potencia [3].

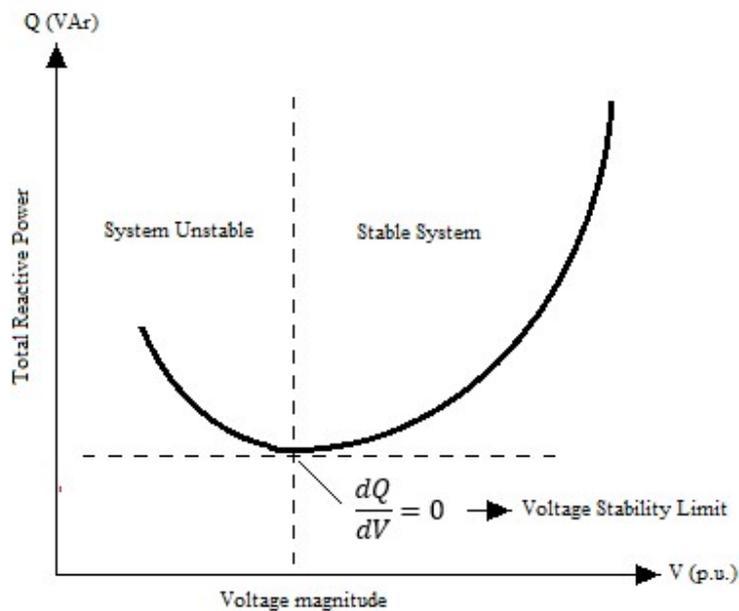


Fig. 2. Curva Potencia reactiva-Tensión (QV). Fuente: Adaptado a partir de [3]

En dicha figura se puede observar que el límite de estabilidad de tensión es el punto donde la derivada dQ/dV es cero. Este punto también define el mínimo de potencia reactiva requerida para un funcionamiento estable del sistema.

Como se ha dicho anteriormente en condiciones normales de funcionamiento un aumento de Q va acompañado de un aumento de la tensión, por tanto, todos los equipos de compensación funcionaran satisfactoriamente. En todos los puntos de funcionamiento situados en el lado derecho de la curva el sistema es estable y por el contrario en los puntos de funcionamiento situados a la izquierda de la curva el sistema es inestable.

Concepción de la metodología para la evaluación de la estabilidad de tensión en una red de distribución con generación distribuida

Para lograr un resultado eficaz de la estabilidad de tensión, es necesaria la aplicación no solo de métodos dinámicos o estáticos si no de una combinación de ambos, debido a que los métodos estáticos brindan la información del sistema en un régimen estacionario, desconociendo lo que sucede en el transitorio. Si la desviación de la tensión durante el transitorio es muy grande, se disparan las protecciones y el sistema no puede recuperar un estado estable próximo a la inicial.

RESULTADOS y(o) DISCUSIÓN

El el esquema eléctrico que se estudia es un esquema eléctrico simplificado de la provincia Guantánamo, el que presenta niveles de alta (110 kV) y media tensión (34,5 kV y 13,8 kV), recibe energía eléctrica del resto del sistema, a través del nodo de enlace de San Luis, siendo este el nodo de referencia del sistema. Además se alimenta de plantas generadoras conectadas a diferentes subestaciones, de diferentes naturalezas: grupos electrógenos Diésel y Fuel –Oil y plantas fotovoltaicas, constituyendo la generación distribuida de este sistema simplificado, como se muestra en la figura 3.

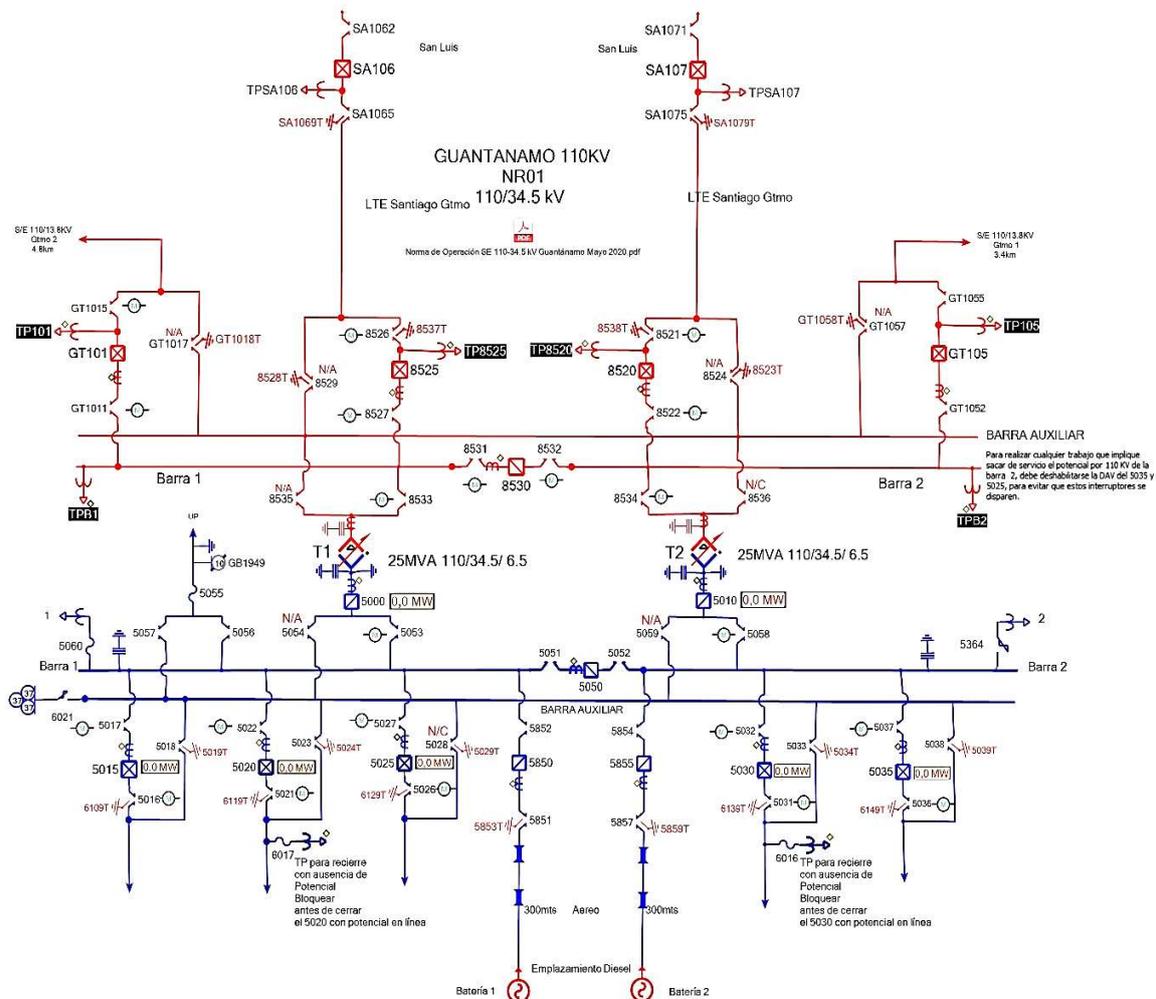


Fig. 3. Esquema monolineal simplificado de la provincia Guantánamo. Fuente: Empresa Eléctrica Provincia Guantánamo

Análisis Modal y Sensibilidad (métodos estáticos), de la Red de Distribución en régimen de operación estable

Análisis de Sensibilidad

Escenario base: El sistema trabajando en condiciones normales de operación, para ver cómo se comporta la tensión a través del Análisis Modal y Análisis de Sensibilidad [20].

En la figura 4, se observan los valores propios del sistema, los cuales hablan de la estabilidad del sistema, pues todos los valores se encuentran en el segundo cuadrante del eje de coordenadas cartesianas, donde la parte imaginaria del valor propio es negativo. Los puntos verdes que representan los valores propios, describen los modos de operación y su estabilidad. Los más cercanos al origen de coordenadas, son los modos más inestables y los más alejados los más estables.

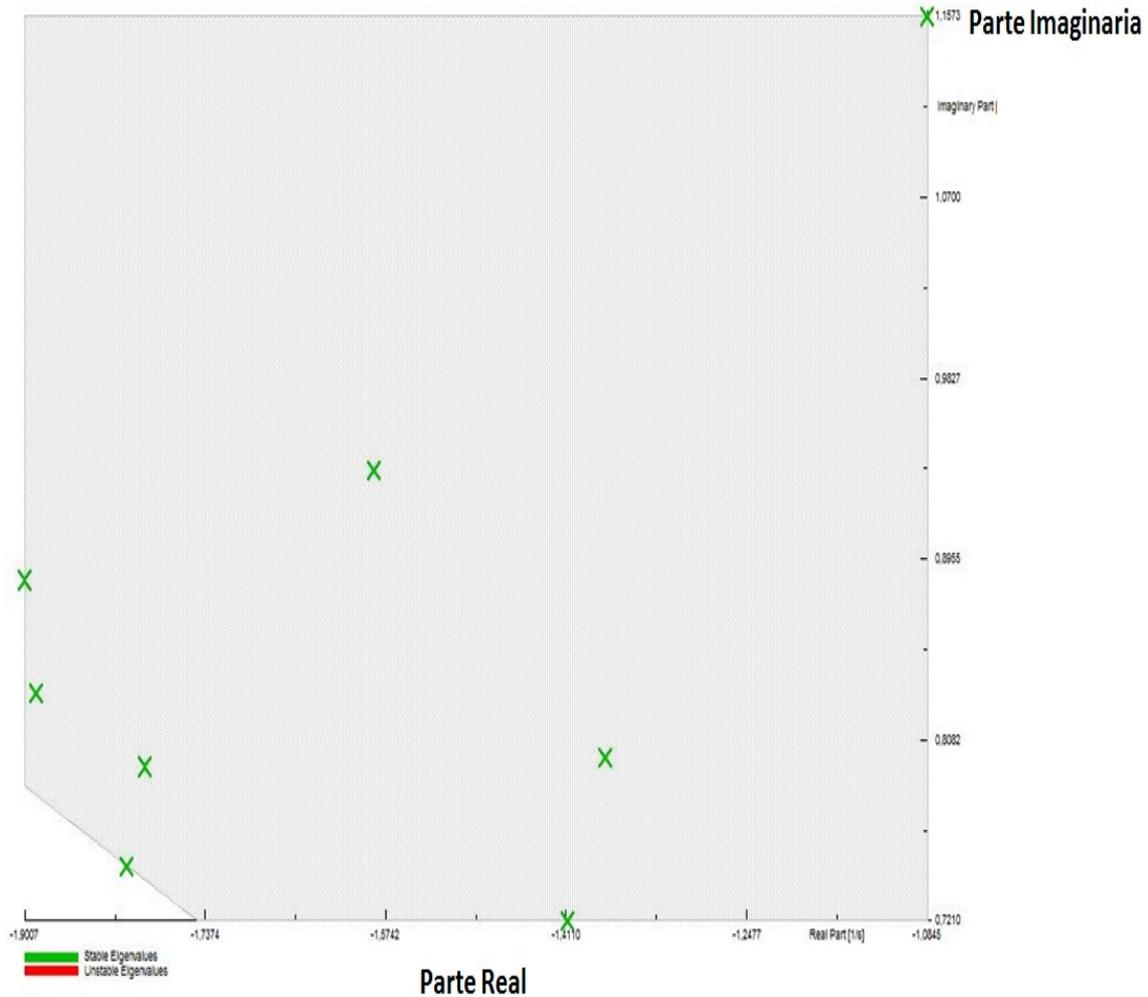


Fig.4. Valores propios del sistema. Fuente: Elaboración propia

En la figura 5, se muestra en un gráfico de barras, el grado de participación de los generadores encargados del aporte de potencia, ante pequeñas variaciones de la carga, para mantener la estabilidad de tensión en los nodos. Se observa en la figura 5, la poca participación de los generadores, ya que es el punto más alejado del sistema de coordenadas. Se puede ver la gran influencia de las Baterías 2-3, la cual es una de las generaciones más importantes, con 8 MW y 0,8 MVAR, representando un 11% de la generación de la Red de Distribución de la provincia de Guantánamo.

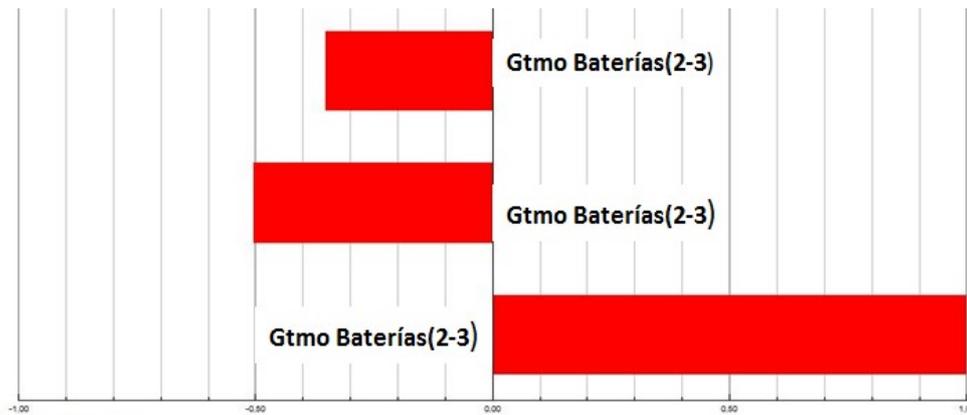


Fig. 5. Valor propio más alejado del sistema. Fuente: Elaboración propia

En la figura 6, se refleja la gran participación de los generadores, ya que es el punto más cercano del sistema de coordenadas, por lo que es el modo menos estable. Se puede ver la gran influencia de todo el grupo de Baterías que alimenta la provincia de Guantánamo, la cual representa más de 30% de la generación de la Red de Distribución de la provincia de Guantánamo.

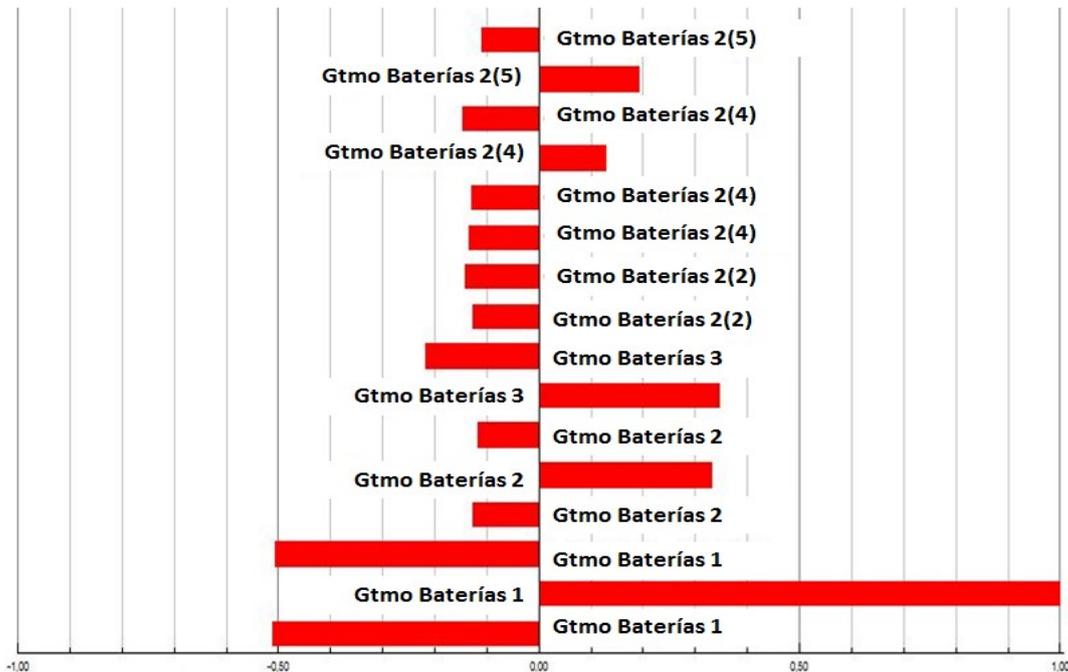


Fig. 6. Valor propio más cercano del sistema. Fuente: Elaboración propia

Análisis de Sensibilidad

En el estudio de estabilidad de tensión, es necesario evaluar la sensibilidad de los nodos, para definir aquellos nodos que están más cercanos a los valores límites permisibles $\pm 10\%$ por lo que son más sensibles a colapso de tensión. En el estudio realizado por el Power Factory se observa los nodos con mayor posibilidad de colapso de tensión.

En la figura 7, se muestran los nodos más sensibles al colapso de tensión, en este caso se analiza el nodo Boqu(1). Este nodo tiene una desviación mayor del 10% por lo que es sensible al colapso de tensión, esta desviación se debe a la poca influencia del complejo de Baterías, las cuales se encuentran alejadas de este nodo de generación. Los demás encuentran en los rangos permisibles de desviación de tensión.

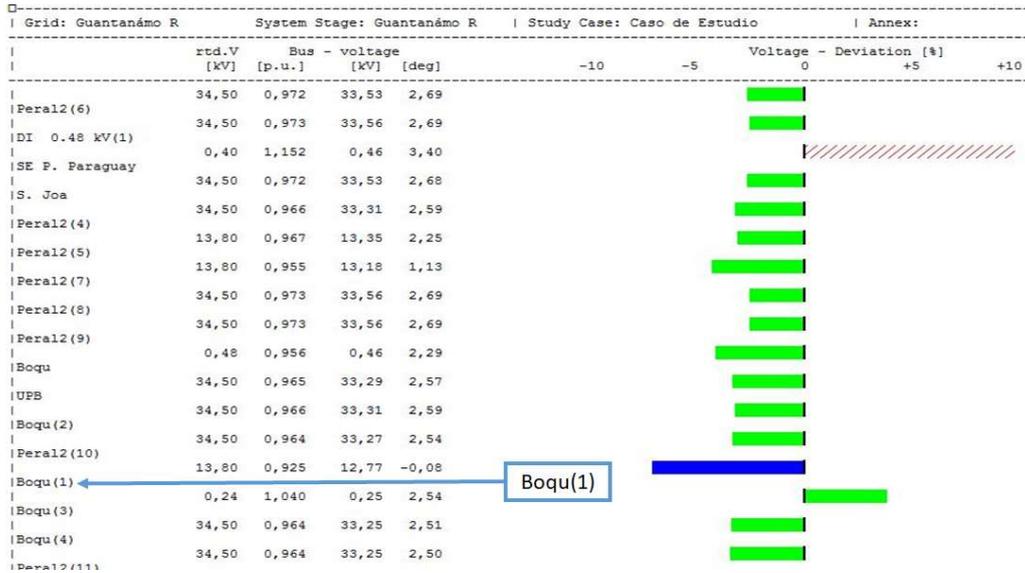


Fig. 7. Análisis de Sensibilidad. Fuente: Elaboración propia

Análisis transitorio de la estabilidad de tensión (corto plazo), de los nodos a estudiar

Para el análisis de la estabilidad de tensión a corto plazo se tomaron 2 escenarios [20]:

1. La desconexión de una de las líneas de transmisión de 110kV que alimentan dicha provincia con manejo de carga.
2. La desconexión del grupo electrógeno de la subestación principal Guantánamo (Baterías 2-3) con manejo de carga.

Escenario #1: Desconexión de una de las líneas de transmisión de 110kV que alimentan dicha provincia, con manejo de carga.

La simulación tiene una duración de 550 segundos. A los 20 segundos de iniciada la misma ocurre un evento de desconexión de una de las líneas de alta tensión proveniente de San Luis que conecta la RMT de la provincia con el SEN. El impacto del evento sobre la tensión a lo largo del tiempo de simulación se evidencia en la figura 10, las cuales representan la caída de tensión en las subestaciones Guantánamo 1 y 2. Como se aprecia la figura 8, donde se analiza la tensión contra tiempo después de la desconexión de la línea, los niveles de tensión comienzan a descender con rapidez, hasta llegar al punto de colapso alrededor de los 50 segundos. Esto se debe a que la carga que demandan estas subestaciones es considerable por lo que la otra línea de transmisión no puede compensar esta perturbación provocada al sistema.

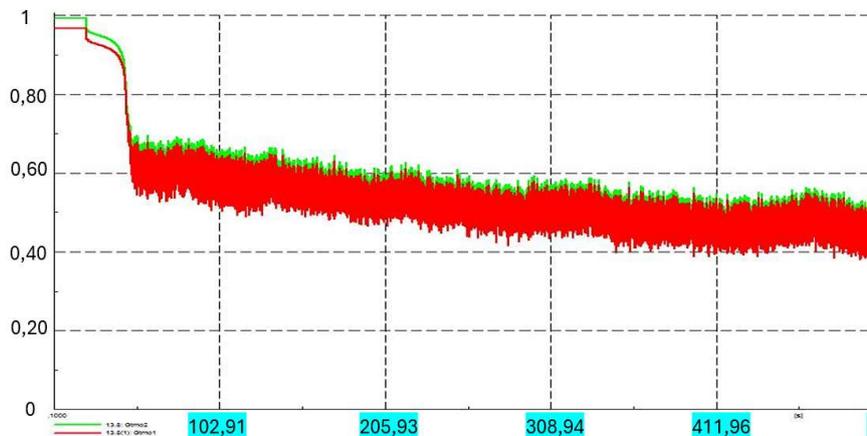


Fig. 8. Comportamiento de la tensión en las subestaciones Guantánamo 1 y 2, sin manejo de cargas ante la salida de una de las líneas de transmisión. Fuente: Elaboración propia

Para contrarrestar este efecto, se realizó otra simulación en la cual se hizo un manejo de cargas para que el cambio de régimen del sistema genere una menor variación en los perfiles de tensión, la cual se muestra en la figura 9. En este escenario se realizó una simulación de 550 segundos, en la cual se programaron un total 2 eventos de desconexión de cargas. El primero evento ocurre a los 20 segundos de iniciada la simulación, que es la desconexión de una de las líneas de 110 kV provenientes de San Luis. Luego se realiza la desconexión de la línea de Guantánamo 110 kV Bombeo de Prisiones a los 23 segundos la cual es una línea que alimenta a un conjunto de cargas que demandan unos 7 MW, logrando así que la tensión se estabilice y vuelva a otro punto de operación. Se observa que este punto de operación se encuentra muy cercano al punto de operación del sistema antes de la falla, por lo que el sistema logró alcanzar de nuevo la estabilidad.

Se aprecia en la figura 9, la tensión en las subestaciones Guantánamo 1 y 2, se mantiene estable. El punto de operación inicial Gtmo 1 es de 0,968 en pu para 13,35 kV y en Gtmo 2 de 0,992 en pu para 13,68 kV. A los 20 segundos se produce una caída de tensión, en Gtmo 1 de 0,933 pu para 12,87 kV representando un 7 %, inferior al 10 % normado de desviación de la tensión, por lo que el servicio eléctrico continúa y en Gtmo 2 de 0,958 pu para 13,22 KV, representando el 5 % inferior al 10 % normado de desviación de la tensión, por lo que el servicio eléctrico continúa. Con la salida de la línea de transmisión, a los 23 segundos, se desconecta las del nodo Bombeo de Prisiones, alcanzando aproximadamente a los 43 segundos, la estabilidad en el sistema, logrando alcanzar un nuevo punto de operación en Gtmo 1 de 1,002 pu para 13,82 kV y en Gtmo 2 de 1,028 pu, para 14,18 para un 2,8 % de desviación por encima del nominal.

Escenario #2: La desconexión del grupo electrógeno de la subestación principal Guantánamo (Baterías 2-3) con manejo de carga. La simulación tiene una duración de 550 segundos. A los 20 segundos de iniciada la misma ocurre un evento de desconexión de las Baterías 2-3, y luego se realiza la desconexión a los 23 segundos, de SISA y San Justo, la primera con una demanda de 2.29 MW y la segunda con 5.68 MW. Se desconectan estas cargas ya que al desconectarse las Baterías 2-3 que son una de las generaciones más importantes de la provincia, las cuales generan 8 MW hay que buscar una carga o cargas las cuales sean cercanas o de la misma capacidad de la desconectada, para que el sistema no pierda la estabilidad.

El impacto del evento sobre la tensión a lo largo del tiempo de simulación se evidencia en la figura 9, la cual representa la caída de tensión en las subestaciones Guantánamo 1 y 2. En la tabla 1, se hace un resumen, de la cargabilidad y calidad de las subestaciones Guantánamo 1 y 2.

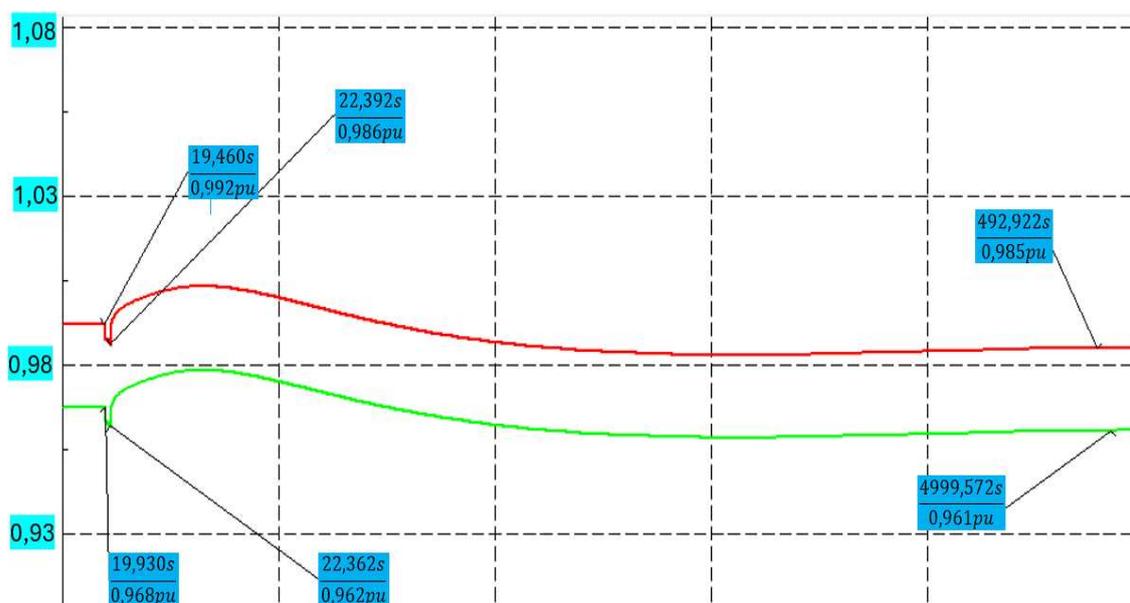


Fig. 9. Comportamiento de la tensión en las subestaciones Guantánamo 1 y 2, con manejo de cargas ante la salida de las Baterías 2-3. Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Análisis de sensibilidad en los Guantánamo 1 y 2. Fuente: Elaboración propia

	Márgenes			
	(+5% y -5%) Calidad			
	(+10% y -10%) Cargabilidad			
	Escenario 1		Escenario 2	
	pu	kV	pu	kV
Guantánamo 1	0,968	13,35	0,963	13,30
Guantánamo 2	0,992	13,37	0,988	13,32

CONCLUSIONES

Con la aplicación de la metodología propuesta para el estudio de la estabilidad de tensión en la red de distribución de media tensión, con generación distribuida, en la provincia de Guantánamo se obtuvo que para el análisis modal y de sensibilidad, los valores son muy cercanos para cuando ocurre una contingencia y se aplican la medida de desconectar carga y en condiciones normales de operación, lo que da cuenta que el sistema es estable. Los valores de la tensión en las subestaciones de Guantánamo 1 y 2 antes, durante y después de la perturbación estuvieron entre ($\pm 1.5\%$ y $\pm 2.5\%$) cumpliendo con la norma del $\pm 10\%$ de la tensión nominal.

Con la metodología para la evaluación de la estabilidad de tensión en una red de distribución con generación distribuida diseñada en esta investigación, se ha logrado integrar de manera coherente, los métodos de análisis para el estudio de la estabilidad de tensión. En esta metodología se tienen en cuenta los regímenes de operación estable y transitorio de dichas redes, aplicando los métodos analíticos estáticos: Análisis Modal, Análisis de la Sensibilidad y curvas PV y VQ a través de flujos de potencias progresivos. El método dinámico que se emplea es el de simulación. Todos estos análisis se realizan con el software profesional DigSilentPower Factory.

Al aplicar la metodología propuesta se obtiene como resultado que la red de distribución de media tensión de Guantánamo es estable por tensión. Los valores de la tensión en las subestaciones de Guantánamo 1 y 2 antes, durante y después de la perturbación estuvieron entre $\pm 1,5\%$ y $\pm 2,5\%$ cumpliendo con la norma del $\pm 10\%$ de la tensión nominal. Se aportaron de manera aproximada los márgenes de calidad y de cargabilidad de potencia activa y reactiva en los nodos de Guantánamo 1 y 2, con el incremento progresivo de la demanda, pero no se logró obtener el punto de colapso de tensión, ya que el método empleado fue una serie de flujos de potencias progresivos de manera manual, que sólo dio una visión aproximada de cómo obtener y leer los indicadores de margen de calidad y cargabilidad de los nodos a estudiar.

REFERENCIAS

- [1]. Fernández C., M., *et al.* "Calidad de la energía y generación distribuida en Cuba". Rev. Cuba. Ing. 2010, vol. 1, n. 3, p. 41-50. ISSN 2223-1781. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/download/28/29/32&ved=2ahUKEwjgofYuomKAXASDABHW68CLgQFnoECBcQAQ&usq=AOvVaw05H1oXjHm1wSp2G9qm-BGb>
- [2]. Cubillos, Á., *et al.* "Perspectiva Del Transformador De Distribución En Redes Eléctricas Con Alta Penetración De Generación Distribuida Y Vehículos Eléctricos". Cienc. E Ing. Neogranadina. 2016, vol. 26, n. 2, p. 35-48. ISSN 0124-8170. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/911/91146925003/html/>
- [3]. Heras, I. "Evaluación del impacto de la generación distribuida en sistemas de distribución primaria de energía eléctrica". Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València, 2008. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/1894>
- [4]. Altshuler, J. "Una luz que llegó para quedarse". Universidad de Texas, Texas, Estados Unidos. 1997, ed. 1, p. 395. ISBN 978-959-05-0149-4. Disponible en: <https://isbn.cloud/9789590501494/una-luz-que-llego-para-quequedarse/>

- [5]. Campaña, M., *et al.* "Estabilidad de tensión y compensación electrónica en sistemas eléctricos de potencia usando herramientas de simulación". *Ingenius Rev. Cienc. Tecnol.* 2023, n. 29, p. 9–23. ISSN 1390-860X. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/366861525_Estabilidad_de_tension_y_compensacion_electronica_en_sistemas_electricos_de_potencia_usando_herramientas_de_simulacion
- [6]. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. *IEEE Std 1547-2003*. Jul. 2003, p. 1–28. ISBN 978-0-7381-3721-6. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1225051>
- [7]. Hao, W., *et al.* "Short-term voltage stability analysis in power systems: A voltage solvability indicator". *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* Aug. 2024, vol. 161. ISSN 1879-3517. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206152400406X>
- [8]. Valerino, J., *et al.* "La estabilidad de la tensión de los sistemas eléctricos de potencia utilizando el programa "PSAF"". *Ing. Energética*. Aug. 2012, vol. 33, n. 2, p. 84–93. ISSN 1815-5901. Disponible en: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/332/327>
- [9]. Espinoza, J., and Espinoza, L. "Índices de estabilidad de voltaje calculados a partir del flujo de potencia continuado". *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.* Dec. 2021, vol. 5, n. 6. ISSN 2310-2799. Disponible en: <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/1216>
- [10]. Candelo, J., *et al.* "Métodos para el Estudio de la Estabilidad de Voltaje en Sistemas de Potencia". *Inf. Tecnológica*. 2008, vol. 19, n. 5, p. 97–110. ISSN 0718-0764. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642008000500011
- [11]. Suárez, E., and Colomé, D. "Evaluación de la Estabilidad de Corto Plazo y Discriminación de Inestabilidades Transitoria y de Tensión". 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON). Sep. 2022, p. 1–7. ISBN 978-1-6654-8014-7. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9939901>
- [12]. Peña, R., *et al.* "Análisis de Estabilidad de Voltaje en un Sistema de Subtransmisión, Mediante Curvas QV – PV y Análisis Modal". *INGENIO*. Dec. 2021, vol. 4, p. 4–15. ISSN 2011-642X. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/357018937_Analisis_de_Estabilidad_de_Voltaje_en_un_Sistema_de_Subtransmision_Mediante_Curvas_QV_-_PV_y_Analisis_Modal
- [13]. Guzmán, F., *et al.* "Estabilidad en régimen permanente de sistemas eléctricos de potencia considerando límites de operación en generadores, transformadores y líneas de transmisión". *Iteckne*. Dec. 2021, vol. 18, n. 2, p. 141–149. ISSN 1692-1798. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8308277>
- [14]. Paredes, L., *et al.* "Mejora de la estabilidad dinámica de tensión en una microrred utilizando un DSTATCOM". *Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind.* Sep. 2021, vol. 18, n. 4. ISSN 1697-7920. Disponible en: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/14813>
- [15]. Giraldo, A., *et al.* "Análisis control de tensión en una red de distribución, operando de manera aislada". Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2015. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58972>
- [16]. Verdejo, H., *et al.* "Implementation of Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm for Tuning of Power System Stabilizers in Multimachine Electric Power Systems". *Energies*. Jan. 2020, vol. 13, n. 8. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/8/2093>
- [17]. Abbas, A., *et al.* "Optimal Harmonic Mitigation in Distribution Systems with Inverter Based Distributed Generation". *Appl. Sci.* Jan. 2021, vol. 11, p. 774. ISSN 2076-4317. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-4317/11/2/774>
- [18]. Guesmi, T., *et al.* "Robust design of multimachine power system stabilizers based on improved non-dominated sorting genetic algorithms". *Electr. Eng.* Sep. 2018, vol. 100, n. 3, p. 1351–1363. ISSN 1482-0487. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00202-017-0589-0>
- [19]. Chulde, R., *et al.* "Estabilidad de Voltaje de Largo Plazo en Sistemas Eléctricos de Potencia Usando Modelos de Carga". *Iteckne*. Jun. 2022, vol. 19, n. 1, p. 15–25. ISSN 1692-1798. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8308282.pdf&ved=2ahUKEwjZru6Rx4mKAXfRzABHd4aBf4QFnoECBwQAQ&usq=AOvVaw39PGO06cXWujkhaX1AGRZ->
- [20]. De Castro, R., and Díaz, H. "Estabilidad de tensión en el corto plazo: Fenómeno, análisis y acciones de control". *Rev. Fac. Ing.* Dec. 2002, vol. 10, p. 11-21. ISSN 0718-1337. Disponible en: <https://www.scielo.cl/pdf/rfacing/v10/art03.pdf>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

David Calás Cardero: <https://orcid.org/0000-0002-6773-141X>

Participó en el diseño de la investigación, diseño del modelo, la simulación, el procesamiento de los datos y la redacción del manuscrito, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Frank Grau Merconchini: <https://orcid.org/0000-0002-0174-5309>

Participó en el diseño de la investigación, la redacción del manuscrito, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Irina Laamanen: <https://orcid.org/0000-0002-7007-203X>

Participó en el diseño del modelo, la simulación y el procesamiento de los datos, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.