

# Estudio de estabilidad de voltaje mediante análisis modal aplicado al sistema eléctrico nacional en sus niveles de tensión de 765 y 400 kV

## Voltage stability study by modal analysis applied to the national electric system at 765 and 400 kV voltage levels

Barroso, Alexis

Universidad Católica Andrés Bello Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería-CIDI  
y Universidad Central de Venezuela, Departamento de Potencia  
[abarroso@ucab.edu.ve](mailto:abarroso@ucab.edu.ve)

### Resumen

*La estabilidad de voltaje es un tema fundamental en el estudio y análisis de cualquier sistema de potencia. Está asociada a la incapacidad suministrar la potencia reactiva necesaria para mantener los perfiles de tensión adecuados. En su estudio se pueden emplear métodos estáticos como el análisis modal, método que analiza la viabilidad del punto de equilibrio representado por una condición de operación específica. Es una técnica basada en la reducción de la matriz Jacobiana, el fin es hallar los autovectores y autovalores. La ventaja del método es que proporciona información valiosa con respecto a la estabilidad de voltaje, desde una amplia perspectiva del sistema e identifica claramente las áreas con problemas potenciales en nodos y ramas del sistema. A nivel mundial se han presentado casos de colapsos debido a la inestabilidad de voltaje, ocasionando apagones a gran escala como los reportados en Escandinavia (2003), el noreste de Estados Unidos (2003), Atenas (2004) y Brasil (2009) entre otros. Para el caso del Sistema Eléctrico Nacional se determinó la máxima transferencia de potencia en los niveles de tensión de 765 y 400 kV, con el uso del programa Neplan, versión 5.5.5 haciendo variaciones leves en la carga hasta llevar al sistema a un punto próximo a la inestabilidad. Por otra parte, la violación de los límites de transmisión por estabilidad de voltaje podría ocasionar eventos con pérdidas de grandes bloques de carga.*

**Palabras clave:** límite de transmisión, matriz de autovalores, autovalor, estabilidad de voltaje.

### Abstract

*Voltage stability is a fundamental issue in the study and analysis of any power system. It is associated with the inability of a Power Electrical System (PES) to supply the reactive power necessary to maintain adequate voltage profiles. Static methods such as modal analysis, a method that analyzes the feasibility of the equilibrium point represented by a specific operating condition, can be used in its study. It is a technique based on the reduction of the Jacobian matrix, the purpose is to find the eigenvectors and eigenvalues. The advantage of the method is that it provides valuable information regarding voltage stability from a broad system perspective and identifies potential problem areas at nodes and branches of the system. There have been cases of collapse due to voltage instability in different parts of the world, causing large-scale blackouts such as those reported in Scandinavia (2003), the northeastern United States (2003), Athens (2004) and Brazil (2009) among others. For the case of the National Electric System, the maximum power transfer was determined at the 765 and 400 kV voltage levels, using the Neplan program, version 5.5.5, with slight variations in the load until the system reached a point close to instability. On the other hand, violation of the transmission limits due to voltage stability could cause events with losses of large blocks of load.*

**Keywords:** transmission limit, eigenvalue matrix, eigenvalue, voltage stability.

## 1 Introducción

El fenómeno de estabilidad de voltaje ha sido objeto de estudio dentro del análisis de sistemas eléctricos de potencia desde hace varias décadas. En diferentes literaturas se han propuesto diversas definiciones del mismo que suelen estar referidas en términos de intervalos de tiempo, estados operativos del sistema, magnitud de las perturbaciones entre otros.

A nivel general, la estabilidad de un sistema de potencia es una característica particular para mantener un estado de equilibrio en condiciones normales de operación o luego de estar sujeto a una perturbación o falla (Kundur, 1994). Se entiende como perturbación a un cambio repentino o una secuencia de cambios en uno o varios parámetros del sistema o cantidades operativas.

El problema de la estabilidad de voltaje se asocia a la incapacidad del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) para suplir la potencia reactiva requerida con el objeto de mantener los perfiles de tensión. Para su estudio se pueden emplear métodos estáticos como el análisis modal, el cual analiza la viabilidad del punto de equilibrio representado por una condición de operación específica. La ventaja del método es que proporciona información valiosa con respecto a la estabilidad de voltaje, desde una amplia perspectiva del sistema e identifica claramente las áreas con problemas potenciales.

Desde el punto de vista de la seguridad eléctrica se debe garantizar la operación integrada de los recursos de generación y transmisión de manera de cubrir la demanda de potencia de manera confiable, segura y de calidad. Gómez (2002) explica que el objetivo de control, en tiempo real, es básicamente mantener las magnitudes eléctricas entre límites predeterminados.

En este sentido, la seguridad en un SEP, según Kundur y col., 2006, es la capacidad del sistema de soportar perturbaciones repentinas como cortocircuitos o pérdidas de componentes no anticipadas, todo esto sin verse interrumpido el servicio al cliente. Por lo tanto, la seguridad se relaciona con la robustez del sistema ante perturbaciones o contingencias inminentes y depende de las condiciones operativas del sistema, así como de la probabilidad de ocurrencia de las mismas. El análisis de seguridad es una función primordial perteneciente a la gestión operativa de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), donde se hace necesario medir la capacidad de soportar un conjunto de perturbaciones en el transcurso de su operación (Cutsem y col., 1998). Es importante que después de dichas alteraciones, de gran o pequeña señal, el sistema se coloque en nuevas condiciones operativas de tal forma que no se violen restricciones físicas.

Por otra parte, en diferentes literaturas se han reportado casos de colapsos del sistema eléctrico debido a la inestabilidad de la voltaje, ocasionando apagones a gran escala como los reportados en Escandinavia en el año 2003, el noreste de Estados

Unidos en el 2003, Atenas en el 2004 y Brasil en el 2009 (Machowski y col., 2009; Ordacgi, 2010).

Un criterio a tomar en cuenta en el estudio de estabilidad de voltaje, según Kundur (1994), se relaciona que a cierta condición de operación, para todas las barras del sistema, el voltaje aumentará a medida que aumenta la potencia reactiva inyectada en la barra.

Un sistema poseerá, entonces, inestabilidad de voltaje si para al menos una barra del sistema, el voltaje decae a medida que aumente su potencia reactiva inyectada. En otras palabras, el sistema será estable (en cuanto a voltaje se refiere) si la sensibilidad voltaje-potencia reactiva (V-Q) es positiva para cada barra y será inestable si la sensibilidad V-Q es negativa en al menos una barra.

Algunas de las razones por las que ocurre un colapso de tensión son: aumentos incrementales de la carga, generadores, condensadores sincrónicos o SVC que alcanzan los límites de potencia reactiva, acción de los taps de los transformadores, recuperación de carga dinámica, salida de la línea o falla del generador.

Y algunas de las acciones que se toman para mitigar un colapso de tensión son: bloqueo del tap del transformador, maniobra con capacitores en derivación, empleo de un nuevo despacho de generación, reprogramación de las tensiones del generador y barra de referencia (slack), bote de carga, sobrecarga temporal de potencia reactiva en generadores (Kundur, 1994).

En consecuencia, para un operador del sistema eléctrico la seguridad se puede cuantificar en términos de la capacidad de permanecer en un estado factible, sin violar cualquiera de los límites operacionales impuestos (Barroso, 2022). En otras palabras, la capacidad de mantener el estado deseado frente a los cambios previsible (demanda y generación) y ante eventos impredecibles conocidos como contingencias. El proceso consiste en corregir los efectos de la evolución de la demanda y las consecuencias de posibles eventos.

En tal sentido, DyLaico (1974) expone que un Sistema Eléctrico de Potencia se encontrará operando en estado normal cuando la demanda eléctrica está completamente suplida y además se respeten las restricciones técnicas sobre las variables eléctricas; es decir, cuando tanto los generadores como el resto de equipos presentes en la red trabajen dentro de sus límites de operación.

La inestabilidad puede tomar diversas formas y estar influenciada por una amplia gama de factores. Existe una serie de criterios que abordan la comprensión del problema, ubicándolo dentro de una clasificación que depende de la naturaleza física, magnitud de la perturbación y escala del tiempo del mismo. Pero básicamente, se puede clasificar la estabilidad de un sistema de potencia en: ángulo, frecuencia, voltaje, resonancia y de los convertidores (Hatziaargyriou y col., 2021).

En particular, para propósitos de análisis, es útil clasificar la estabilidad de voltaje en las siguientes subclases:

- Estabilidad de voltaje de grandes perturbaciones: relacionada con la habilidad del sistema para controlar los voltajes subsiguientes a grandes perturbaciones tales como fallas del sistema, pérdidas de generación o contingencia de circuito.
- Estabilidad de voltaje para perturbaciones pequeñas: habilidad del sistema para controlar los voltajes ante pequeñas perturbaciones, como cambios incrementales en carga del sistema. Esta forma de estabilidad es determinada por la característica de la carga. Este concepto es útil en determinar, en algún instante, como el voltaje del sistema responderá ante pequeños cambios del sistema.

El análisis estático puede ser efectivamente usado para determinar los márgenes de estabilidad, identificar factores que influyen en la estabilidad, examinar un gran rango de condiciones del sistema y un gran número de escenarios (Gao y col., 1992).

De la misma forma, Pérez (2005) expresa que en el análisis de los eventos de estabilidad de voltaje se ha podido visualizar que ciertos factores prevalecen en la mayoría de los incidentes tales como:

- Se presentan usualmente cuando el sistema está bajo condiciones de sobrecarga.
- Los márgenes tanto de potencia activa como de potencia reactiva se encuentran muy cercanos a sus límites tolerables.
- En algunos casos, la pérdida de estabilidad de voltaje se inicia generalmente con la salida de un solo elemento, ocasionando un efecto en cascada o de fallos sucesivos dentro del sistema.

Por esta razón, el presente trabajo se enfoca en encontrar los límites máximos de Exportación Guayana e Importación Centro de red de 765 y 400 kV del SEN, de modo de obtener información para operar los recursos del sistema eléctrico de potencia, de manera segura y mantener adecuados márgenes de potencia reactiva.

## 2. Análisis Modal

Una de las técnicas de análisis de la estabilidad de voltaje en estado estable es el análisis modal. El mismo se clasifica como un análisis de estabilidad de régimen permanente (Gao y col., 1992, Kundur, 1994) y se emplea para determinar las áreas más débiles y para obtener información con respecto a los mecanismos de la inestabilidad de voltaje por medio del cálculo de factores de participación (Kundur, 1994).

La matriz Jacobiana reducida se calcula a partir de las ecuaciones de estado estable que relacionan la potencia con el voltaje en un

punto de operación dado. Las ecuaciones de relación matricial son:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_R \\ \Delta Q_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta R} & J_{PVR} \\ J_{Q\theta R} & J_{QVR} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_R \\ \Delta V_R \end{bmatrix} \quad (1)$$

Igualando la variación de  $\Delta P=0$  y evaluando la estabilidad de voltaje considerando la relación incremental entre  $\Delta Q$  y  $\Delta V$  (Kundur, 1994). Esto es análogo a las curvas Q-V. Se puede obtener la matriz Jacobiana reducida ( $J_r$ ), así:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta R} & J_{PVR} \\ J_{Q\theta R} & J_{QVR} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_R \\ \Delta V_R \end{bmatrix} \quad (2)$$

Basado en las consideraciones anteriores, en cuanto a las submatrices, se tiene la siguiente reducción de Kron:

$$\Delta Q = \left[ J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \right] \cdot \Delta V \quad (3)$$

En forma reducida:

$$\Delta Q = J_{RK} \cdot \Delta V \quad (4)$$

Al aplicar el método de autovalores y autovectores, luego al diagonalizar la matriz jacobiana reducida se obtiene:

$$J_{RK} = \underline{\xi} \cdot \underline{\Lambda} \cdot \underline{\eta} \quad (5)$$

Donde:

$\underline{\xi}$  = matriz de autovectores derechos de JRK.

$\underline{\eta}$  = matriz de autovectores izquierdos de JRK.

$\underline{\Lambda}$  = matriz diagonal de los autovalores de JRK.

Se puede reescribir (5) como:

$$J_{RK}^{-1} = \underline{\xi} \cdot \underline{\Lambda}^{-1} \cdot \underline{\eta} \quad (6)$$

La ecuación (4) puede reescribirse como:

$$\Delta V = \underline{\xi} \cdot \underline{\Lambda}^{-1} \cdot \underline{\eta} \cdot \Delta Q \quad (7)$$

La expresión anterior corresponde a la ecuación que evalúa directamente la sensibilidad entre la magnitud de la tensión y la potencia reactiva inyectada y cambia dependiendo del punto de operación tomado (potencia activa constante). Como  $\underline{\xi}^{-1} = \underline{\eta}$  de la ecuación (7) puede escribirse como:

$$v_i = \frac{1}{\lambda_i} \cdot q_i \tag{8}$$

En que  $v_i$  y  $q_i$  son los vectores de variaciones modales de voltaje y potencia reactiva respectivamente. Si  $\lambda_i$  es igual a cero, al ocurrir cualquier variación de la potencia reactiva, la correspondiente variación de voltaje será infinita, en cuyo caso se está en presencia del colapso de voltaje. Por lo tanto, en condiciones de equilibrio los valores de  $\lambda_i$  serán positivos, siendo los más críticos los que se acerquen a la frontera de estabilidad de voltaje, es decir, tienden a cero.

La magnitud de los autovalores puede proveer una medida relativa de la proximidad de inestabilidad. La aplicación del análisis modal ayuda a determinar cuán estable el sistema de potencia es y cuánta carga extra puede ser transferida. Por otra parte, el análisis modal tiene la ventaja que proporciona información amplia del sistema eléctrico de potencia bajo estudio e identifica áreas con potenciales problemas de inestabilidad.

### 2.1 Descripción del Sistema Eléctrico Bajo Estudio

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) interconecta los sistemas de generación de las diferentes regiones a través de la Red Troncal de Transmisión (RTT), Figura 1, estructurada por líneas de 765 kV, 400 kV y 230 kV (Barroso, 2022), dicho sistema permite la transferencia de energía desde la Región de Guayana al resto del país .

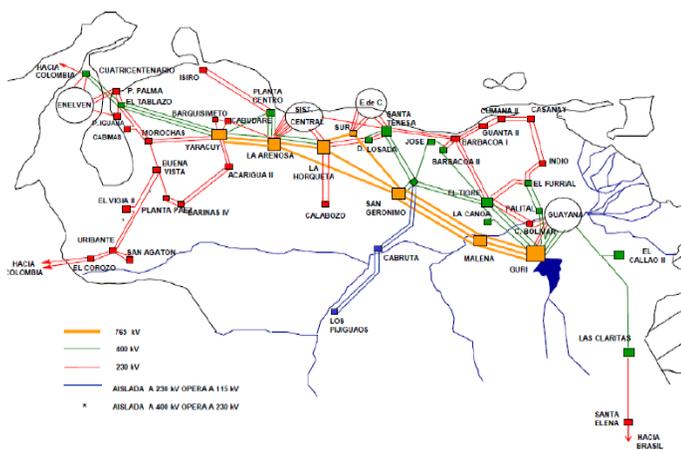


Fig. 1: Red Troncal de Transmisión del SEN (Barroso, 2022)

### 3 Procedimiento Experimental

En el marco de la investigación planteada se define en función de los objetivos establecidos en el presente estudio y está referido a analizar la estabilidad de voltaje del Sistema Eléctrico Nacional en sus niveles de tensión de 765 kV y 400 kV. Se definió el tipo de investigación como una investigación de campo debido a que consiste en un análisis sistemático con datos

recopilados de un sistema físico, como el SEN, ya sea para entender la naturaleza del problema, predecir su ocurrencia, y explicar las causas y efectos utilizando cualquiera de los paradigmas o enfoques de investigación. Para dicho estudio se utilizó el programa NEPLAN, versión 5.5.5, que es una herramienta informática para analizar, planear, optimizar y simular redes eléctricas. Posee un módulo de análisis de estabilidad de tensiones por el método de reducción de la matriz Jacobina, determinando así sensibilidades, autovalores, factores de participación de barras, ramas y generadores, entre otras variables.

En cuanto al Sistema Eléctrico Nacional en la Figura 2 se puede observar las regiones operativas y los principales intercambios asociados a las regiones Guayana (Exportación Guayana) y Centro (Importación Centro), donde se define cada una de ellas y sus puntos de interconexión entre las distintas áreas (Barroso, 2022).

Los intercambios de potencia Exportación Guayana e Importación Centro posee unos límites máximos de transferencia de potencia de 7.875 MW y 5.360 MW respectivamente (Quiroz y col., 2018).

Estos límites de transmisión son definidos en base a los criterios mínimos de estabilidad establecidos por la Corporación Eléctrica Nacional (CORPOELEC) y dependen directamente de la demanda presente y de la cantidad de unidades de generación operando en la región Centro del país (Quiroz y col., 2018).

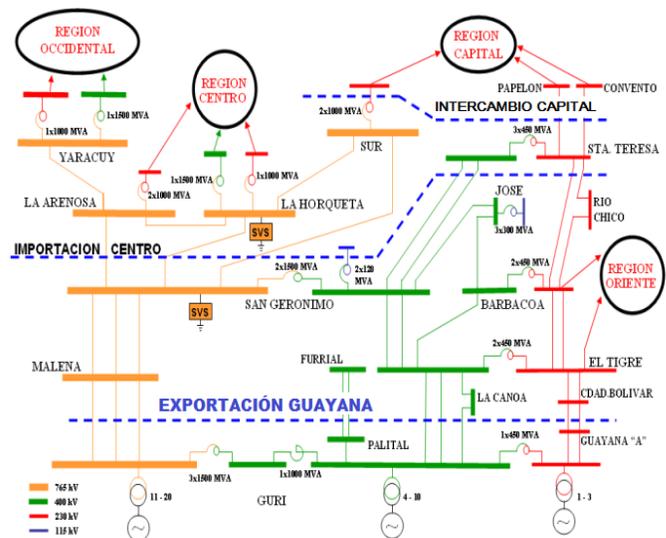


Fig. 2: Intercambios principales potencia del SEN (Caraballo y col., 2012)

En condiciones normales y emergencia, la máxima variación de tensión nominal permitida es de 5 % en niveles de tensiones mayores o iguales a 230 kV y menor estricto para el nivel de 765 kV. Además, no se permite sobrecargas de ningún elemento del sistema de potencia, ni tampoco sobrecargas en líneas de

transmisión por encima de su capacidad térmica (IEEE Std 738, 2012).

La cargabilidad de una línea de transmisión indica la capacidad de potencia que puede transmitir bajo condiciones de operación aceptables y depende de factores como: la tensión de operación, longitud de la línea, número de conductores por fase y fuentes de compensación de potencia reactiva (que incrementan la capacidad de transferencia y proporcionan un mayor soporte de voltaje).

Las condiciones con las que se determinó el incremento del límite de transmisión de Exportación Guayana e Importación Centro a 765 y 400 kV consistió evaluar la máxima transferencia de potencia activa desde la fuente principal, las hidroeléctricas de la región de Guayana (Guri, Caruachi y Macagua), hacia el resto del sistema interconectado nacional y se basa en maximizar el intercambio, a factor de potencia constante (Kundur, 1994), definido como Exportación Guayana e Importación Centro hasta llevarlo a un punto cercano a la inestabilidad de voltaje (autovalor más cercano a cero).

#### 4 Discusión y Resultados

Para el caso de máxima transferencia de potencia, el objetivo es hallar el punto cercano al colapso por estabilidad de voltaje, se procedió a perturbar las áreas o zonas de carga propensas a la inestabilidad, haciendo variaciones leves en la misma hasta llevar el sistema a un punto próximo a la inestabilidad, manteniendo el factor de potencia constante. Para este estudio se incrementó la demanda con generación constante en las demás regiones, a excepción de la Región de Guayana que suministra potencia a través de la red troncal de transmisión, mientras que los intercambios del sistema se venían incrementando junto con el crecimiento de la demanda.

En la Tabla 1 se presenta los tres primeros autovalores obtenidos para la condición de máxima transferencia de potencia activa, en dicho escenario se está cercano a la inestabilidad de voltaje, con un autovalor  $\lambda_1 = 0,1683$  (una variación leve de la demanda el sistema entra en la zona de colapso).

**Tabla 1:** Valor propio y factores de participación de Subestaciones por modo caso Carga máxima (Elaboración propia)

| Valor Propio |             |             |
|--------------|-------------|-------------|
| $\lambda_1$  | $\lambda_2$ | $\lambda_3$ |
| 0,1683       | 8,9264      | 13,3397     |

En este estado de operación se procedió a la determinación de los límites de transferencia de potencia, de manera de establecer fronteras entre puntos de operación seguros y confiables y puntos de operación que pongan en riesgo la integridad del sistema

eléctrico. En la Tabla 2 se presentan dichos límites, definidos como límites estáticos.

**Tabla 2:** Límites estático del SEN (Elaboración propia)

| Límites de Transmisión | Potencia transmitida (MW) |
|------------------------|---------------------------|
| Exportación Guayana    | 8.650                     |
| Importación Centro     | 6.530                     |

#### 5 Conclusiones

Los valores analizados de máxima transferencia de Exportación Guayana e Importación Centro están basados en la capacidad máxima de la red troncal de transporte en cuanto a estabilidad de voltaje. Sin embargo, no implica que a este nivel de transferencia no se estén presentando problemas locales de inestabilidad de voltaje como sería el caso de áreas en los andes (Región Suroccidente) y áreas en Anzoátegui, Sucre y Monagas (Región Oriente) e incluso en el Zulia (Región Occidente).

Resulta importante para el SEN poseer alta disponibilidad en la generación interna de las diferentes regiones que la integran, para así poder operar lejos de una zona de inestabilidad de voltaje y evitar racionamientos de la demanda eléctrica y posibles colapsos.

La magnitud de los autovalores puede proveer una medida relativa de la proximidad de inestabilidad. La aplicación del análisis modal ayuda a determinar cuán estable el sistema de potencia es y cuánta carga extra puede ser transferida. Por otra parte, el análisis modal tiene la ventaja que proporciona información amplia del sistema eléctrico de potencia bajo estudio e identifica áreas con potenciales problemas de inestabilidad.

#### Referencias

- Barroso, A. (2022). Impacto de la compensación serie en la red de 765 kV del Sistema Eléctrico Nacional. *Ciencia e Ingeniería* 43(3), 257-262. <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/cienciaeingenieria/article/view/18148>
- Caraballo, J., Bermúdez, O. (2012). Herramienta Computacional para Monitorear la Estabilidad de Tensión en Sistemas de Potencia Empleando Tecnología de Medición Sincronizada de Fasores. *Ciencia y Tecnología*, 16 (63), pp. 93-103. <http://ve.scielo.org/pdf/uct/v16n63/art03.pdf>
- Cutsem, T., y Vournas, C. (1998). *Voltage Stability of Electric Power Systems*. USA: Springer Science and Business Media Dordrecht.
- DyLiacco, T. (1974). *Real-Time Computer Control of Power Systems*. Proceedings of the IEEE.

- Gao, B., Morison, G. K., Kundur, P. (1992). Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis. *IEEE Power Engineering Review*. Vol. 12, no. 11, pp. 41-42. doi: 10.1109/MPER.1992.161430.
- Gómez, A. (2002). *Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica*. McGraw-Hill.
- Hatziaargyriou, N., Milanovic, J., Rahmann, C., Ajjarapu, V., Canizares, C., Erlich, I., Hill, D., Hiskens, I., Kamwa, I., Pal, B., Pourbeik, P., Sanchez-Gasca, J., Stankovic, A., Van Cutsem, T., Vittal, V., Vournas, C. (2021). Definition and classification of power system stability, revisited and extended. *IEEE transactions on Power Systems*. 36(4), 3271–3281. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.3041774>
- IEEE Std 738, (2012). Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. vol., no., pp.1-72, 23 Dec. 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6692858.
- Kundur, P., (1994). *Power system stability and control*. Canada: McGraw Hill.
- Kundur, P., Paserba, J., Vittal V., and Andersson, G. (2006). Closure of Definition and classification of power system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 446-, doi: 10.1109/TPWRS.2005.861952.
- Machowski, J., Bialek, J. W., Bumby, J. R. (2008). *Power System Dynamics*. John Wiley and Sons.
- Ordacgi, J. M. (2010). Brazilian blackout. *Protection, Automation and Control World*. Available at: [http://www.pacw.org/fileadmin/doc/MarchIssue2010/Brazilian\\_Blackout\\_march\\_2010.pdf](http://www.pacw.org/fileadmin/doc/MarchIssue2010/Brazilian_Blackout_march_2010.pdf).
- Pérez, M. (2005). *Análisis del STATCOM trifásico en estado estacionario y dinámico para la estabilidad de voltaje*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N. Unidad Guadalajara.
- Quiroz, A., Sorrentino, E., Orea, E. (2018). Analysis of auto-reclosing options in Venezuelan 765 kV system including series compensation. 2018 IEEE ANDESCON, 1–6.

**Barroso, Alexis:** *Esp. en Sistemas Eléctricos de Potencia (UCV), Maestría en Ingeniería Eléctrica (UCV), Ingeniero Electricista (USB). Ha trabajado como ingeniero de operaciones y planificación en el Centro Nacional de Despacho (CND) y asesor en el sector eléctrico venezolano. Actualmente profesor investigador CIDI-UCAB y UCV Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Potencia. Correo electrónico: alexisbarroso@gmail.com y abarroso@Ucab.edu.ve. Líneas de investigación: flujos de carga en redes de distribución, estabilidad de voltaje y energías alternativas.*  <https://orcid.org/0000-0002-5109-9077>

**Recibido:** 15 de noviembre de 2022,

**Aceptado:** 12 de febrero de 2023