

Identificación de Niveles Confiables de Penetración de Generación Fotovoltaica

Oscar M. Torres, Blas Díaz, Antonio Carlos Zambroni

Administración Nacional de Electricidad, Universidad Nacional de Asunción, Universidade Federal de Itajubá

Paraguay

1.1 Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de una metodología que permite identificar los niveles de penetración confiables de generación renovable no convencional, como ser el caso de la generación fotovoltaica al Sistema de Transmisión de Paraguay. Por ello, se desarrolla dicha metodología para la cuantificación de márgenes de estabilidad actuales, el reconocimiento de las áreas críticas del sistema, y la identificación de las barras candidatas para posibles refuerzos del sistema como ser la inserción de la generación solar fotovoltaica, obteniendo así, una evaluación del desempeño técnico del sistema. Para esto, se aplican algunas herramientas clásicas de estabilidad de tensión como ser el Margen de Carga (MC), obtenido mediante las curvas PV y el Vector Tangente (VT).

Así mismo, este análisis permite obtener los impactos positivos de una mayor penetración fotovoltaica como ser un aumento significativo en el MC, así como eventuales efectos negativos considerando la disminución de la inercia rotacional del sistema. Finalmente, se concluye que este método es válido para el análisis propuesto y que, en el sistema paraguayo, se puede insertar hasta un 15% de generación renovable no convencional de forma segura, basado en estudios dinámicos.

1.2 Palabras clave

Generación renovable no convencional, generación fotovoltaica, margen de carga, estudios dinámicos

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

1. INTRODUCCIÓN

El aumento demográfico sumado al desarrollo de nuevas tecnologías en el sector industrial a nivel mundial se refleja en el aumento de la demanda de energía eléctrica, provocando que las grandes concesionarias de energía eléctrica operen con niveles limitados de generación y en condiciones cercanas a los límites de seguridad y estabilidad.

Estos factores requieren una planificación más compleja y precisa, para poder cumplir con los requisitos de la demanda que garanticen la sostenibilidad del servicio, con seguridad. En este sentido, en los últimos años la integración de Energías Renovables No Convencionales ha ido en constante aumento.[1]

En el Paraguay, el sistema de generación consiste en fuentes 100% renovables convencionales (hidráulica), contando actualmente con las centrales hidroeléctricas de Itaipú, Yacretá y Acaray, que cubren ampliamente las necesidades de consumo del país. Las futuras expansiones relacionadas a la generación de energía eléctrica, con nuevas fuentes energéticas, comprenden principalmente tecnologías que aprovechan fuentes renovables no convencionales. Sin embargo, la principal fuente para satisfacer la creciente demanda del sector energético seguirá siendo la energía hidroeléctrica. No obstante, a pesar de ser de tipo renovable y con un efecto positivo en relación a la emisión de gases de efecto invernadero, requiere mantener una sólida política ambiental para mitigar otros efectos no deseados en el ámbito social y ambiental. Además de tener en cuenta otros factores, como la incertidumbre relacionada con los ciclos hidrológicos, el conocimiento y aplicación de nuevas tecnologías, y en especial la disponibilidad de otros recursos naturales existentes en el país, las fuentes no renovables con menor impacto en el medio ambiente, hacen que la inserción de nuevas fuentes **Renovables No Convencionales** se convierta en una realidad en el mediano plazo.

Considerando la falta de soporte de energía reactiva y la reducción de la inercia rotacional debido a la alta penetración de la Generación Solar Fotovoltaica, es importante señalar que el sistema eléctrico paraguayo tiene áreas susceptibles de estabilidad de tensión, especialmente en áreas donde el sistema está bastante cargado y cercano a sus límites operacionales, por lo que es necesario analizar la ubicación óptima para el desarrollo de futuros emprendimientos de este tipo de tecnología, atendiendo además el porcentaje de generación seguro y confiable para una red eléctrica como la de Paraguay, constituido por un sistema de generación 100 % hidráulica.

Los principales objetivos del presente trabajo son: a) identificar los niveles de penetración confiables de generación del tipo Renovable No Convencional como ser el caso de la Generación Fotovoltaica (con paneles solares) al Sistema de Transmisión de Paraguay, b) desarrollar una metodología para cuantificar márgenes de estabilidad, c) identificar áreas críticas de un sistema y barras candidatas para refuerzos en generación y d) aplicar la metodología en casos de prueba y en el sistema eléctrico paraguayo.

En la literatura, se han reportado diferentes trabajos que abordan la problemática de ubicación de generación solar fotovoltaica considerando estabilidad de voltaje, por ejemplo, en[2]se sistematiza el análisis de curva PV y QV mediante el software PowerWorld, pero sólo se realiza un análisis estático de la red, en[3]se utiliza sólo las curvas PV y el índice de estabilidad de voltaje mejorado, en[4]se analiza el impacto del aumento de la generación fotovoltaica en la estabilidad transitoria y el rendimiento estático mediante las curvas PV y finalmente en[5] se analiza la variación de tensión, frecuencia y desequilibrios de tensión, al igual que varias soluciones a estos problemas, como control inteligente, protecciones y almacenamiento. El principal aporte de este trabajo es el análisis estático y dinámico de la red, mediante el estudio sistemático de las curvas PV, el Margen de Carga (MC), Punto Crítico (Vector Tangente) y análisis de contingencias.

Este trabajo está estructurado de la siguiente forma: a continuación, en el ítem 2 se presenta la Metodología, en el ítem 3 se presentan los Sistemas de prueba seguido de los Resultados en 4 y Conclusiones en 5.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

2. METODLOGÍA

A continuación, se presentan los análisis de estabilidad que componen la metodología propuesta. Estos análisis se realizan de forma sistemática en cada sistema de prueba analizado.

2.1 Obtención del Margen de Carga Inicial

El conocimiento del Margen de Carga (MC) es de suma importancia, y es un índice o factor de seguridad del sistema, ya que valores pequeños del mismo, indican la proximidad al colapso. En este sentido, las curvas PV son trazadas con el auxilio del método de la continuación, en el que la carga y la generación en las áreas o barras seleccionadas del sistema en estudio, son incrementadas de una forma predefinida hasta encontrar en punto crítico y en consecuencia el MC [6] y [7].

A través de estas curvas es posible calcular la diferencia entre el nivel de carga del punto inicial de operación del sistema y el punto de colapso.

2.2 Determinación del Punto Critico

Siendo el colapso de tensión un fenómeno que se inicia localmente y se extiende en la vecindad, un aspecto importante en el análisis de estabilidad de tensión es la identificación de la barra o de las barras críticas del sistema, es decir, aquella barra cuya variación de carga produce mayor variación de tensión. Para la determinación de dichas barras se utiliza la técnica del análisis del Vector Tangente [6],[8],[9] y [10].

2.3 Obtención de los Márgenes de Carga con la inserción de paneles solares

Los refuerzos tendientes a la inserción de Generación Solar Fotovoltaica, son localizados en las barras críticas obtenidas con la aplicación del vector tangente del ítem anterior, en este sentido, se vuelve a obtener el MC con la incorporación de esta tecnología, midiendo la diferencia desde el punto operativo del caso base al nuevo punto de colapso.

2.4 Análisis de contingencias

Las aplicaciones presentadas anteriormente como ser el Margen de Carga entre el punto de operación inicial y el punto de colapso de tensión, además de los puntos críticos obtenidos mediante la aplicación del Vector Tangente, al estar basadas en ecuaciones algebraicas derivadas de las condiciones de equilibrio de las dinámicas de larga duración del sistema, capturan la pérdida de equilibrio de larga duración y no pueden, al menos fácilmente, llevar en cuenta los controles que dependen de la evolución del tiempo del sistema. En este sentido, en este análisis se consideran las ecuaciones diferenciales del sistema y se utiliza simulaciones en el dominio del tiempo, requiriéndose para ello, los modelos apropiados de las no linealidades importantes para la estabilidad de tensión, incluyendo a las asociadas con las cargas dependientes de la tensión, y límites de generadores y compensadores [11].

Este enfoque es complementario a las simulaciones estáticas, pero importante de modo a determinar un nivel de penetración de la Generación Solar Fotovoltaica confiable al sistema.

3. SISTEMAS DE PRUEBA

Se seleccionaron tres sistemas de prueba para realizar las simulaciones. Dos correspondientes a casos académicos y otro a un caso real. Los sistemas seleccionados son los siguientes:

- Sistema 14 Barras – Sistema académico IEEE.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

- Sistema 30 Barras – Sistema académico IEEE.
- Sistema 3.576 Barras – Sistema de ANDE (Administración Nacional de Electricidad), Sistema Real Planificado, año 2030.

4. RESULTADOS

4.1 Margen de carga inicial

En la Tabla I se presentan los correspondientes márgenes de carga activa para los casos estudiados, considerando la configuración del caso base de cada sistema, obtenidos para un aumento de carga uniforme en todo el sistema.

Del análisis de los valores incluidos en la Tabla I, puede apreciarse un aceptable margen de carga para los sistemas de la IEEE analizados, lo cual indica la seguridad operativa con respecto a la posible inestabilidad de tensión de ambos sistemas. Sin embargo, para el sistema de Paraguay se observa un margen de carga bastante reducido, causado principalmente por el agotamiento de las reservas de potencia reactiva. Criterios internacionales adoptan un margen de carga mínimo de 5%, con lo cual se busca que el sistema se encuentre en puntos operativos suficientemente seguros con respecto al punto crítico de colapso de tensión.

Tabla I. Margen de carga de para casos base de sistemas analizados.

Sistema	Casos Base		
	Margen de Carga		
	Po	Pf	Δ MC
Sistema IEEE 14 barras	259	455,84	43,18
Sistema IEEE 30 barras	283,4	435,44	34,92
Sistema ANDE	8105,3	8324,7	2,71

4.2 Punto Critico

En la siguiente Tabla II, muestra las correspondientes barras o puntos críticos obtenidos con la aplicación del vector tangente.

Tabla II. MARGEN DE CARGA DE PARA CASOS BASE DE SISTEMAS ANALIZADOS

Sistema	Punto crítico
Sistema IEEE 14 barras	Barra 14
Sistema IEEE 30 barras	barra 30
Sistema ANDE	Loma Plata

Se observa que, la aplicación del Vector Tangente indica cuáles son las zonas vulnerables del sistema, por lo tanto, los lugares de determinación de acciones de control, ilustrando las barras del sistema donde actuar. Por lo tanto, esta información es determinante considerando que la inserción de las Energías Renovables No Convencionales será en las barras mencionadas.

4.3 Obtención de Márgenes de Carga com la inserción de paneles solares

Las Figuras 1, 2, y 3 muestran las curvas PV para diferentes niveles de penetración de los sistemas de la IEEE 14 barras, IEEE30 Barras, y del sistema paraguay respectivamente.

En las figuras, puede apreciarse la variación del margen de estabilidad de tensión con que operarían los sistemas analizados para los distintos niveles de penetración de generación fotovoltaica. Para el caso del

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

sistema paraguayo, si bien el MC aumenta, se puede notar que existen áreas aun susceptibles a los problemas de estabilidad de tensión, originada principalmente por las largas distancias de transmisión, con una configuración altamente radial que dificulta la regulación de la tensión en ciertas localidades del sistema. No obstante, con esta penetración de Generación Solar Fotovoltaica se observa un incremento del Margen de Carga superando el 5% mínimo mencionado en criterios internacionales.

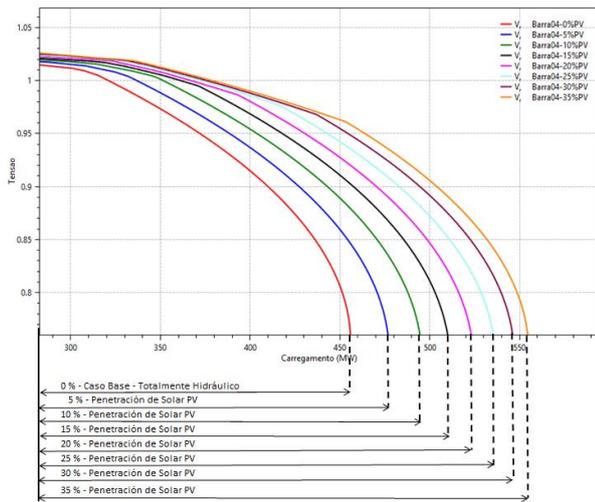


Figura 1: Curvas PV para diferentes niveles de penetración en el sistema de la IEEE 14 barras.

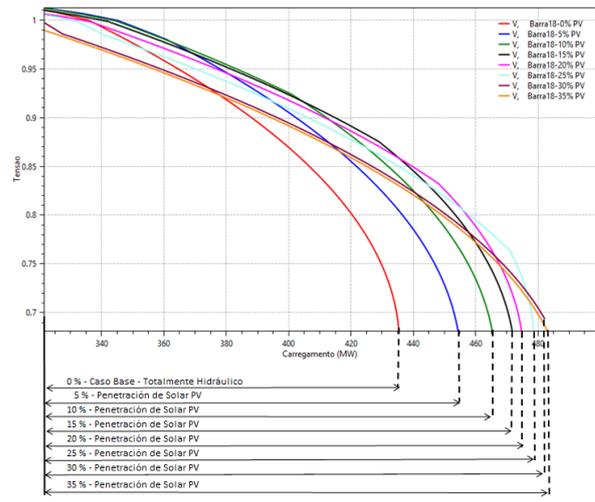


Figura 2: Curvas PV para diferentes niveles de penetración en el sistema de la IEEE 30 barras.

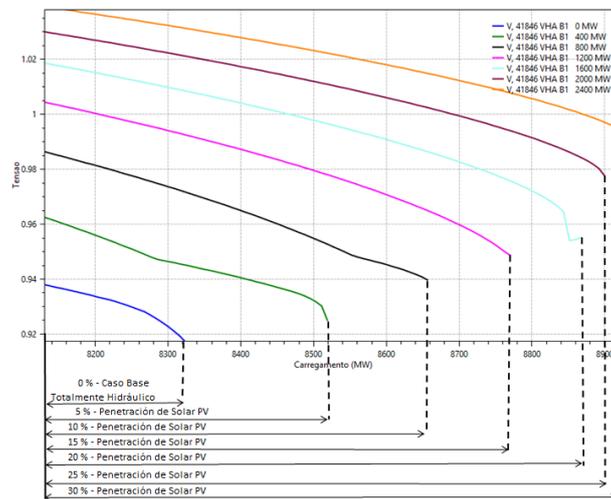


Figura 3: Curvas PV para diferentes niveles de penetración en el sistema paraguayo.

4.4 Análisis de contingencias

Se analiza la contingencia de un step o una rampa de carga, dada que las Centrales Solares Fotovoltaicas se desconectan del sistema en horas de la noche, por lo que se tendría que suplantar esta generación. Considerando que la red de Transmisión del Paraguay es una red fuerte, ya que la misma está proyectada para soportar contingencias dobles de 500 kV, por lo tanto, la manifestación de una disminución de impedancia de transferencia en los generadores no es dramática dinámicamente (ante contingencias de líneas) y se da más en

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

forma de pérdidas de transmisión, que no afecta a los ángulos rotóricos.

La figura 4 muestra curva de carga de un día de verano del Paraguay, donde se observa como de 16 h a 18 h la carga aumenta considerablemente, a razón de 300 MW/hora, pasando de 1300 MW paso a 2000 MW, lo cual refleja un crecimiento de 35% de la carga total del sistema (2000MW) en pocas horas.

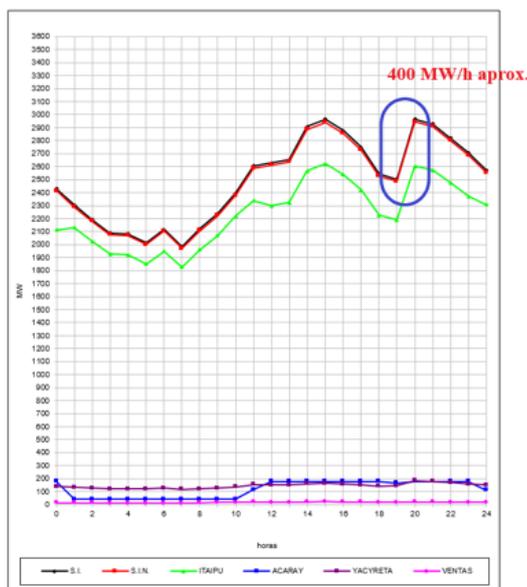


Figura 4: Curva de carga de un día típico del Paraguay (corresponde al 06/03/2020).

En este sentido, no se altera la red de transmisión ni las impedancias de la fuente, el análisis considerado para el evento es un step de carga. Resultados de los sistemas de prueba de la IEEE permiten hasta un 20 % de penetración fotovoltaica sin dificultades para el sistema, según se observa en las figuras 5 y 6.

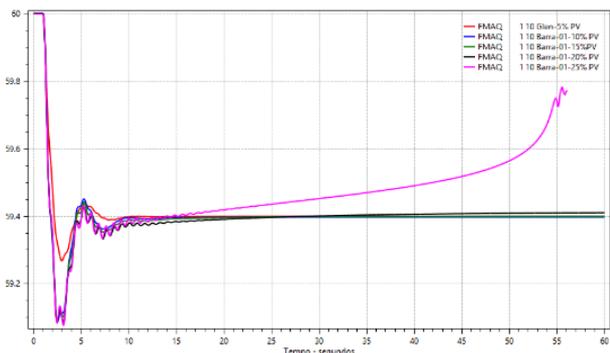


Figura 5: Frecuencia versus tiempo para diferentes niveles de penetración de generación solar fotovoltaica, considerando una rampa de carga en el sistema IEEE 14 barras.

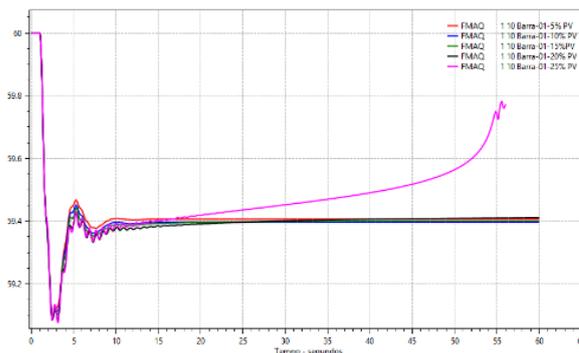


Figura 6: Frecuencia versus tiempo para diferentes niveles de penetración de generación solar fotovoltaica, considerando una rampa de carga en el sistema IEEE 30 barras.

Sin embargo, en el caso de un sistema real como el de la ANDE, la inserción de generación renovable no convencional provoca un aumento en el MC y disminución en la inercia del sistema, dando un nivel máximo de 15 % de penetración aceptable para generación solar fotovoltaica, donde se puede notar que, si bien se tiene un sistema robusto de transmisión, la poca reserva de generación es un punto que debe de estudiarse.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

5. CONCLUSION

Las metodología desarrollada y testeada con los sistemas de prueba de la IEEE 14 Barras, IEEE 30 Barras, se aplicó en el caso de un sistema real, en este caso en el sistema de la ANDE, arrojaron resultados satisfactorios y se contrastaron con la literatura.

Se compararon los desempeños de los sistemas con dicha metodología, que en un principio utilizaron exclusivamente técnicas de análisis estática para estudios de estabilidad de tensión. Se graficaron las Curvas PV para la obtención del MC del sistema al igual que el vector tangente para la definición de barras críticas.

La ubicación de bloques de Generación del tipo no convencional en las barras críticas determinadas con la aplicación del vector tangente, proporcionan excelentes resultados, en este contexto se observó un considerable aumento del MC, además de importantes reducciones de las pérdidas a nivel de transmisión.

De modo a determinar una penetración confiable y segura para los sistemas analizados, se evaluaron situaciones de contingencias en el dominio del tiempo, donde se analizó un step o rampa de carga como evento de contingencia, considerando que las centrales solares fotovoltaicas se desconectan del sistema en horas de la noche lo que implica reducidos márgenes de reserva de generación.

El procedimiento proporcionó en todos los casos de la IEEE resultados similares, denotando claramente un nivel de hasta 20% de penetración fotovoltaica no acarrea dificultad para esos sistemas. Ya en el caso de estudio del Sistema ANDE, un sistema complejo y constituido con fuentes de generación 100% hidráulica, la inserción de fuentes de Generación solar Fotovoltaica resulta en un incremento importante del MC, pero provoca una disminución de la inercia del sistema, esta metodología determinó que un nivel de penetración aceptable de este tipo de tecnología es de 15% para la red de transmisión de ANDE.

Por lo expuesto, la principal contribución de este trabajo es la metodología propuesta para la ubicación y la determinación de un nivel seguro para la penetración de Generadores No Convencionales del tipo Solar Fotovoltaica en el sistema eléctrico de potencia de la ANDE.

Esta propuesta, presenta un enfoque novedoso y diferente, basada en criterios estáticos de estabilidad de tensión y complementado con herramientas dinámicas, y es aplicable principalmente en el ambiente de planificación.

6. BILIOGRAFIA

- [1] S. Chen *et al.*, “The Potential of Photovoltaics to Power the Belt and Road Initiative The Potential of Photovoltaics to Power the Belt and Road Initiative,” pp. 1895–1912, 2019, doi: 10.1016/j.joule.2019.06.006.
- [2] N. Hosseinzadeh, A. Aziz, A. Mahmud, A. Gargoom, and M. Rabbani, “Voltage stability of power systems with renewable-energy inverter-based generators: A review,” *Electron.*, vol. 10, no. 2, pp. 1–27, 2021, doi: 10.3390/electronics10020115.
- [3] Z. A. Kamaruzzaman and A. Mohamed, “Impact of grid-connected photovoltaic generator using P-V curve and improved voltage stability index,” *Conf. Proceeding - 2014 IEEE Int. Conf. Power Energy, PECon 2014*, pp. 196–200, 2014, doi: 10.1109/PECON.2014.7062440.
- [4] K. Emmanuel, T. Antonis, Y. Katsigiannis, and M. Moschakis, “Impact of increased RES generation on power systems dynamic performance,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 721, pp. 185–190, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.721.185.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

-
- [5] Q. T. Tran, M. Cong Pham, L. Parent, and K. Sousa, "Integration of PV Systems into Grid: From Impact Analysis to Solutions," *Proc. - 2018 IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2018 IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. IEEEIC/I CPS Eur. 2018*, pp. 2–7, 2018, doi: 10.1109/IEEEIC.2018.8494400.
- [6] P. Kundur, "Power System Stability And Control by Prabha Kundur.pdf," *McGraw-Hill, Inc.* p. 1167, 1994.
- [7] A. P. Guimaraes, "Criterios para la Ubicación de Generación Térmica Local basados en el Uso de las Curvas PV y QV San Lorenzo – Paraguay," *Maest. en Ing. Eléctrica con Énfasis en Sist. Potencia. Fac. Ing. Univ. Nac. Asunción*, 2011.
- [8] A. C. Z. De Souza and J. M. Filho, "Identifying a vanishing eigenvalue in voltage collapse analysis with limits consideration," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 20, no. 5, pp. 76–77, 2000, doi: 10.1109/39.841360.
- [9] A. C. Zambroni De Souza, "Discussion on some voltage collapse indices," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 53, no. 1, pp. 53–58, 2000, doi: 10.1016/S0378-7796(99)00042-5.
- [10] T. R. O. Krauer, "Uma Metodologia De Análise De Sistemas De Potência Aplicando O Continuado Qv E Pv No Ambiente De Planejamento De Sistemas Eléctricos," *Univ. Fed. Itajubá*, p. 110, 2007, [Online]. Available: <http://saturno.unifei.edu.br/bim/0032373.pdf>.
- [11] O. A. B. Giménez, "Curva QV e Vetor Tangente na Análise da Estabilidade de Longo- Termo como Ferramentas de Planejamento," *Univ. Fed. ITAJUBÁ PROGRAMA PÓS-GRADUAÇÃO EM Eng. ELÉTRICA*, 2014.