

# Estabilidad de Tensión en Redes de Transmisión con Diferentes Tecnologías de Generadores Eólicos

Fabian D. Rinaudo\*<sup>1</sup>, Luis M. Aromataris\*<sup>2</sup>, Marcos Galetto\*<sup>3</sup>

\*Grupo de Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia, Universidad Nacional de Río Cuarto

Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

<sup>1</sup>frinaudo@ing.unrc.edu.ar

<sup>2</sup>laromata@ing.unrc.edu.ar

<sup>3</sup>mgaletto@ing.unrc.edu.ar

**Resumen**—En este trabajo se presenta el análisis de estabilidad de tensión de un sistema eléctrico de potencia con distintos tipos de tecnologías de aerogeneradores. El análisis se realiza usando las clásicas curvas PV con el sistema en condiciones normales y también frente a distintas contingencias. También para los puntos del sistema con margen estabilidad reducido, se realiza el análisis de las curvas VQ. El resultado obtenido del análisis muestra como las nuevas tecnologías aerogeneradores aumentan en el margen de la estabilidad de tensión del sistema y su relación con el nivel de inserción de energía eólicos.

**Abstract**— The analysis of voltage stability of a power system with different types of wind power generation technology is presented. The analysis is performed using classical PV curves with the system under normal conditions and contingencies. Also the VQ curve analysis is performed to points of system where voltage stability margin is reduced. The result show new wind power technologies increase the range of voltage stability and relation with level of wind power penetration.

**Index Terms**—Estabilidad de tensión, energía eólica, potencia reactiva, curvas PV - VQ.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha tratado de reducir las emisiones de gases nocivos y reemplazar el uso de combustibles fósiles, por energías renovables. En este aspecto la energía eólica se ha convertido en un recurso muy utilizado para este propósito. A fin de aprovechar este recurso se han ido desarrollando distintos tipos de tecnologías para la construcción de aerogeneradores eólicos. En la actualidad existen dos grandes grupos de tecnologías cuya principal diferencia es que la velocidad de rotación del rotor puede ser constante o variable.

Los aerogeneradores de velocidad constante, con palas fijas o regulables, son equipados con generadores de inducción asíncronos con rotor en jaula de ardilla y utilizan una caja de engranajes multiplicadora para adecuar la velocidad de la turbina con la velocidad del generador. Estas maquinas se conectan directamente a la red y no poseen la capacidad de aportar potencia reactiva a la red. Para poder obtener el factor de potencia requerido por el código de red se deben conectar bancos de capacitores.

Los aerogeneradores de velocidad variables pueden estar equipados con generadores de inducción doblemente alimentados

(DFIG), generadores sincrónicos convencionales o generadores sincrónicos de imanes permanentes conectados a la red a través de convertidores de frecuencia (FSC). En estas últimas tecnologías el convertidor de frecuencia puede operar con el 100 % de la potencia de la maquina, mientras en el primer caso el intercambio de potencia del convertidor es solo del 30 % [1].

El incremento de la generación mediante fuentes renovables, como la eólica, tiene su impacto sobre la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia, ya que su comportamiento difiere de las plantas de generación convencionales. Dentro de los distintos tipos de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia, la estabilidad de tensión es uno de los análisis mas importante para estudio de redes [2]. Este se puede realizar mediante técnicas de simulación dinámica, o también mediante técnicas estáticas a través de las clásicas curvas P-V y V-Q [3]. Las curvas P-V dependen de las características del sistema de potencia (topología, estado de generación, estado de carga) y de las características de la carga (entre otras, carga a potencia constante, a corriente constante, a impedancia constante) en el nodo del sistema para el cual se construye cada curva. Estas curvas son valiosas porque aportan una visión conceptual sobre cuan lejos se encuentra el estado de operación del sistema respecto del límite de estabilidad de tensión y sobre como se modifica esa distancia al límite cuando el sistema eléctrico es modificado. Todos los puntos representados en curvas P-V representan puntos de equilibrio estable del sistema [4].

También como parte del análisis mediante técnicas estáticas, podemos agregar las curvas V-Q. Estas curvas son similares a la curvas P-V solo que relacionan la tensión de la barra en estudio con su potencia reactiva, pero a potencia activa constante.

Este trabajo analiza el impacto sobre la estabilidad de tensión cuando se incorporan distintas tecnologías de aerogeneradores. El estudio se realiza en distintos nodos del sistema mediante las curvas P-V y V-Q. Se producen contingencias en líneas de transmisión y se compara el comportamiento del sistema frente a distintas tecnologías.

## II. ANÁLISIS MEDIANTE TÉCNICAS ESTÁTICAS

Para el análisis de técnicas estáticas es necesario modelar la red de transmisión mediante ecuaciones algebraicas no lineales que son las denominadas ecuaciones de flujo de potencia y son resueltas mediante métodos iterativos [5].

### II-A. Curvas P-V

El análisis mediante curvas P-V es realizado con sucesivos flujos de potencias y se va monitoreando los cambios en las variables del sistema. Este método aproximado es útil cuando se desea conocer el límite de transferencia de potencia activa frente a las limitaciones de tensión y los efectos en los flujos de potencia reactiva [6], [4]. Cuando se aumenta la transferencia de potencia, los valores de tensión en las barras cercanas disminuyen. El incremento de potencia continua hasta su valor máximo donde se produce el colapso de tensión como se muestra en la Fig. 1. En esta figura está representado mediante la línea de trazo el lugar de potencias máximas para distintos valores de factor de potencia.

La construcción de la curva se lleva a cabo a través de un programa de flujo de potencia convencional (se utiliza el modelo de cargas de potencia constante), únicamente puede construirse hasta el punto de potencia máxima (nariz de la curva) debido a que de allí en adelante este método numérico no converge. Estas técnicas han sido ampliamente usadas en diversos trabajos [7], [8], [9], [10].

Se puede demostrar usando una simple red radial como se muestra en la Fig. 2 la relación existente entre la fuente de alimentación y la carga del sistema por medio de las Ecs. 6-9

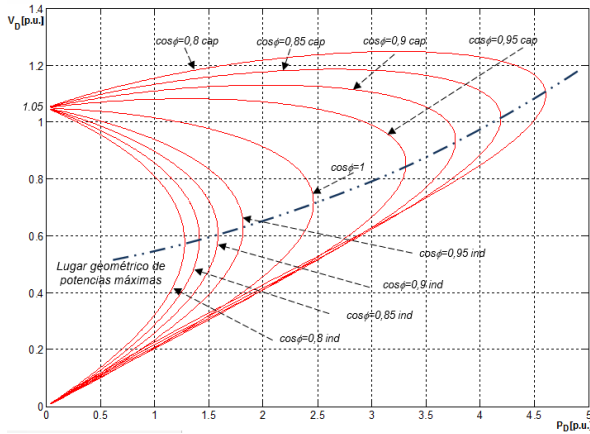


Figura 1. Curvas P-V

$$Z_D [pu] = R_D [pu] + jX_D [pu] \quad (1)$$

$$I = \frac{V_D}{Z_D} \quad (2)$$

La potencia activa consumida por la carga es:

$$P_D = \text{Re} \{V_D I^*\} \quad (3)$$

$$P_D = \text{Re} \left\{ V_D \left[ \frac{V_D}{Z_D} \right]^* \right\} = \text{Re} \left\{ \frac{|V_D|^2}{Z_D^*} \right\} \quad (4)$$

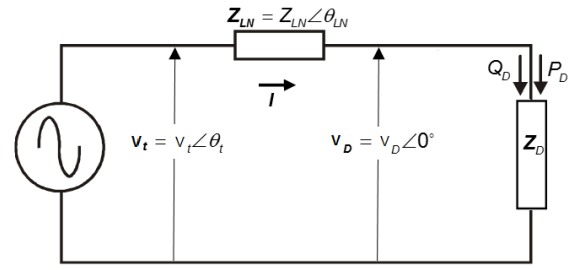


Figura 2. Red Radial: Gen-Linea-Carga

$$P_D = \text{Re} \left\{ \frac{|V_D|^2}{R_D - jX_D} \right\} \quad (5)$$

En términos de módulos de los vectores:

$$P_D = \frac{V_D^2}{R_D^2 + X_D^2} R_D \quad (6)$$

De la misma manera se calcula:

$$Q_D = \frac{V_D^2}{R_D^2 + X_D^2} X_D \quad (7)$$

La tensión en la carga se puede obtener a partir de:

$$V_D = V_t - I \cdot Z_{LN} = V_t - \frac{V_D}{Z_D} Z_{LN} \quad (8)$$

El módulo de la expresión anterior es:

$$V_D = \left| \frac{V_t \cdot Z_D}{Z_D + Z_{NL}} \right| \quad (9)$$

### II-B. Curvas V-Q

Las curvas V-Q relacionan la tensión de una barra en estudio con su potencia reactiva a potencia activa constante. Para el estudio de grandes sistemas se construyen a través de programas de Flujo de Potencia. En el análisis V-Q la barra de carga en estudio se convierte a una barra de tensión controlada sin límites de potencia reactiva. El valor de Q representa la potencia reactiva consumida o inyectada en dicha barra para distintos valores de tensión en la barra. En la Fig. 3 se muestra una curva V-Q típica, en ella se puede observar que el punto de operación del sistema está ubicado en la intersección de la curva con el eje de abscisas y que el punto mínimo de la curva muestra el margen de potencia reactiva en esa barra [6].

## III. SIMULACIONES

El sistema eléctrico que se utilizara para este estudio es IEEE 39 barras New England cuyo diagrama unifilar se muestra a la Fig. 4. El estudio se realizara sobre el programa comercial PSS<sup>®</sup>E, de Siemens [11].

En una primera simulación (Simulación 1) solo se comparara la estabilidad de tensión mediante técnicas de análisis PV-VQ, cuando al sistema se conectan parques eólicos con aerogeneradores de tecnología de velocidad variable frente a tecnología de velocidad fija. El primer caso (Caso 1) los parques eólicos a instalar poseen aerogeneradores de

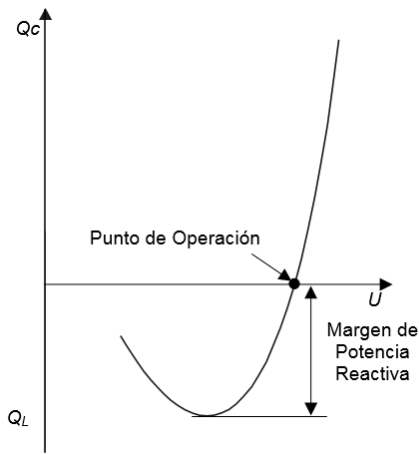


Figura 3. Curva V-Q

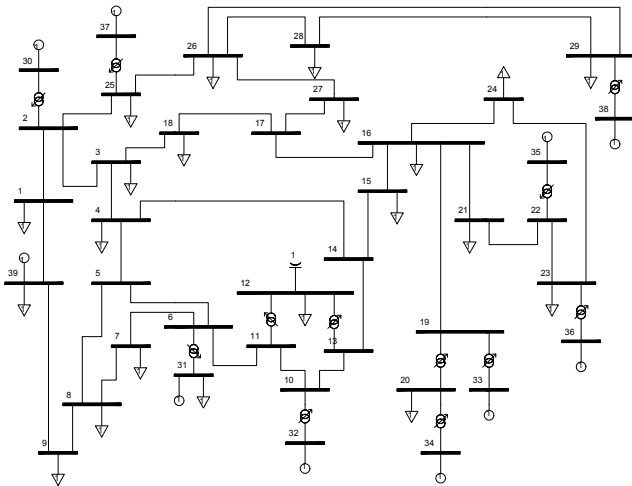


Figura 4. New England 39-bus

velocidad fija y otro caso (Caso 2) con aerogeneradores de velocidad variable. Para el análisis se supone que los parques instalados no están entregando su máxima potencia activa (ver Tab. I), y el nivel de penetración de energía eólica es de solo el 10% que es el resultado de la conexión de las máquinas eólicas en una primera etapa (Etapa 1) como se muestra en la Tab. I

Luego en una segunda simulación (Simulación 2) se estudia el sistema con un nivel de penetración de 10%, 15% y 28% respectivamente que es el resultado de la conexión de las máquinas en las Etapas 1, 2 y 3, como lo muestra la Tab. I y se observa el impacto que se produce sobre el margen de estabilidad. Con las simulaciones se realizan las curvas VQ y mediante distintos coeficientes se analiza el impacto sobre el margen de estabilidad. Los valores obtenidos para los distintos niveles de penetración se comparan con gráficos de barras.

La conexión de los distintos aerogeneradores se realizará como se muestra en la Fig. 5.

Para todos los estudios realizados las cargas del sistema serán tratadas como carga de potencia constante. También se representará el parque eólico concentrado en una simple máquina como hace referencia el trabajo [12].

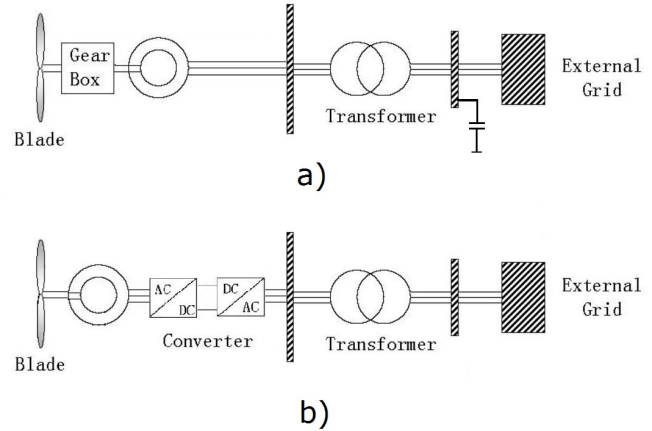


Figura 5. a) Velocidad Fija - b) Velocidad Variable

### III-A. Simulación 1

**III-A1. Caso 1:** La tecnología de los aerogeneradores que se va a considerar en este caso no tiene la posibilidad de controlar la inyección de potencia reactiva. Por lo tanto no se puede controlar la tensión en su punto de conexión. Para cumplir con lo que exigen las reglamentación se conectarán bancos de capacitores hasta obtener un factor de potencia de 0.95 para la potencia activa que se está entregando como se muestra en la Fig. 6 a).

**III-A2. Caso 2:** La tecnología de los aerogeneradores de velocidad variable si tienen la posibilidad de controlar la tensión en su punto de conexión. Por lo tanto para cumplir con lo que exige la reglamentación no será necesario que se conecten bancos de capacitores, ya que la energía reactiva necesaria será entregada por el aerogenerador. En la Fig. 6 b) se muestra la curva de capacidad de los aerogeneradores de velocidad variable usados en la simulación. En donde cualquier punto dentro del rectángulo es un punto de operación posible.

### III-B. Simulación 2

Con esta simulación se analizará el sistema sin contingencia (caso base) y con las contingencias elegidas como se presentan en la Tab. II. Las contingencias fueron elegidas por ser las más desfavorables para el sistema en estudio. Para cada una de ellas se realizarán las curvas VQ sobre las distintas barras y con distintos niveles de penetración para ambas tecnologías de aerogeneradores (Caso 1 y Caso 2). De los resultados

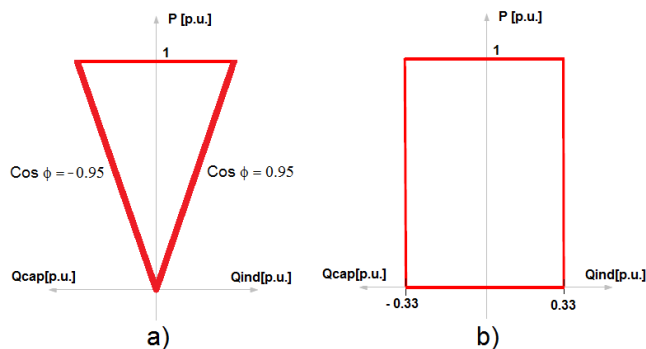


Figura 6. a) Curva de capacidad del aerogenerador para Caso 1. b) Curva de capacidad del aerogenerador para Caso 2

Tabla I  
PUNTOS DE CONEXIÓN DE NUEVAS MAQUINAS

Nro. barra conexión	Potencia Total [MVA]	P entregada a la red [MW]	Nivel de penetración
1	165	70	Etapa 1
4	165	60	Etapa 1
8	165	70	Etapa 1
9	175	90	Etapa 1
31	140	80	Etapa 1
14	175	90	Etapa 2
17	175	90	Etapa 2
18	165	70	Etapa 2
28	175	90	Etapa 2
5	175	90	Etapa 3
6	175	90	Etapa 3
13	175	90	Etapa 3
16	175	90	Etapa 3
19	175	90	Etapa 3
24	175	90	Etapa 3
26	175	90	Etapa 3

obtenidos se propone el calculo de coeficientes para analizar el impacto de ambas tecnologías con el incremento del nivel de inserción.

Para llevar a cabo el análisis mencionado se proponen la creación de un primer coeficiente que relaciona el punto mas bajo en la curva VQ de una contingencia dada, con el menor valor obtenido en la curva VQ del Caso Base (sin contingencia). Este coeficiente nos da una idea de cuanto difiere el margen de estabilidad obtenido con una contingencia dada respecto del caso base.

$$C_1 = \frac{QC_{min}}{QB_{min}} \quad (10)$$

donde:

$QC_{min}$  mínimo valor de la curva VQ con la contingencia.

$QB_{min}$  mínimo valor de la curva VQ con el caso base.

Luego se propone la creación de un segundo coeficiente que va a mostrar la diferencia entre dos casos con distintas tecnologías de aerogeneradores. En primer lugar, para una contingencia determinada se simulara con las dos tecnologías obteniendo los coeficientes  $C_{1c1}$  y  $C_{1c2}$ . Esto se realiza un

nivel del 10 %, 15 % y 28 % de penetración.

El nuevo coeficiente  $C_2$  sera la diferencia entre  $C_{1c1}$  y  $C_{1c2}$  para cada nivel de penetración, como se muestra a continuación:

$$C_{2_{10\%}} = C_{1c2_{10\%}} - C_{1c1_{10\%}} \quad (11)$$

$$C_{2_{15\%}} = C_{1c2_{15\%}} - C_{1c1_{15\%}} \quad (12)$$

$$C_{2_{28\%}} = C_{1c2_{28\%}} - C_{1c1_{28\%}} \quad (13)$$

donde:

$C_{1c1}$  :  $C_1$  calculado para el Caso 1 (Vel. Fija)

$C_{1c2}$  :  $C_1$  calculado para el Caso 2 (Vel. Variable)

Con el coeficiente  $C_2$  se muestra la diferencia en el margen de estabilidad sobre distintas barras del sistema entre ambas tecnologías utilizadas y con distintos valores de penetración de energía eólica.

## IV. RESULTADOS

### IV-A. Simulación 1

*IV-A.1. Caso 1:* Se realiza el análisis de las curvas PV obtenidas en la simulación y se muestran los resultados en la Fig. 7. El incremento de la demanda para el caso base (sin ningún tipo de contingencia) es suministrado por los generadores del sistema hasta su máxima capacidad sin problemas. Pero cuando se realizan las simulaciones con las aperturas de distintas líneas de transmisión como se muestra en la Tab. II, se observa que la peor contingencia del sistema se produce con la apertura de la línea que une las barras 21 y 22. Para este caso no podemos encontrar solución numérica.

Para profundizar el análisis de la contingencia mencionada anteriormente, se realiza la curva VQ sobre la barra 21 y se muestra el resultado en la Fig. 8. Como se puede observar, para este caso no existe un punto de operación en estado estable con la contingencia dada, ya que la curva queda por encima del eje de abscisas. Si se compara con el caso base, en este se puede visualizar el corte de la curva con el eje de abscisas ya que el mismo tiene un punto de operación estable en el estado inicial.

Tabla II  
CONTINGENCIAS Y BARRAS ANALIZADAS

Contingencias	Análisis VQ en barras
Caso Base	
Apertura Línea 2-3	3, 8, 12,
Apertura Línea 8-9	21 y 27
Apertura Línea 15-16	
Apertura Línea 21-22	

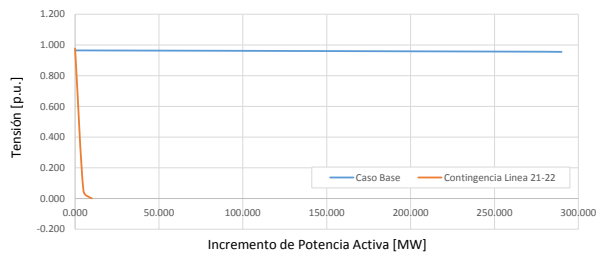


Figura 7. Curva PV realizada sobre la barra 21. Caso 1

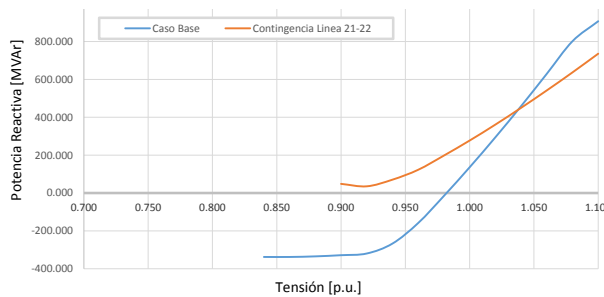


Figura 8. Curva VQ realizada sobre la barra 21. Caso 1

110 [MW].

Con el análisis de la curva VQ sobre la barra 21, se puede observar en la Fig. 10 que para este caso existe un punto de operación en estado estable con la contingencia dada, ya que la curva corta el eje de abscisas.

Esta variación en el comportamiento del sistema se debe a que la tecnología de aerogeneradores instalada permite el control de tensión en barra y con ello aumenta el margen de estabilidad de tensión del sistema.

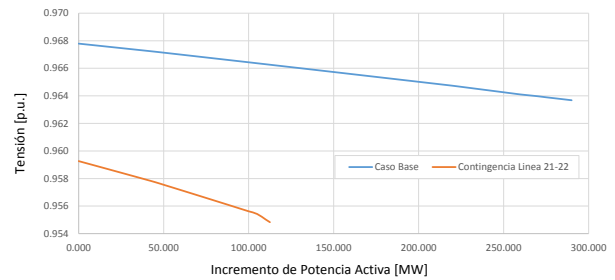


Figura 9. Curva PV realizada sobre la barra 21. Caso 2

*IV-A2. Caso 2:* El análisis de las curvas PV para este caso se muestra en la Fig. 9. Como se puede observar cuando se realiza la simulación con la apertura de la línea que une las barras 21 y 22, a diferencia del Caso 1, el sistema permite el incremento de la demanda hasta aproximadamente unos

#### IV-B. Simulación 2

Luego de realizar todas las simulaciones propuestas, se trata de estimar el comportamiento del margen de estabilidad con los porcentajes de potencia eólica instalada en el sistema. En la Tab. III se muestran los coeficientes  $C_1$  obtenidos. También se muestra con gráficos de barras en la Fig. 11

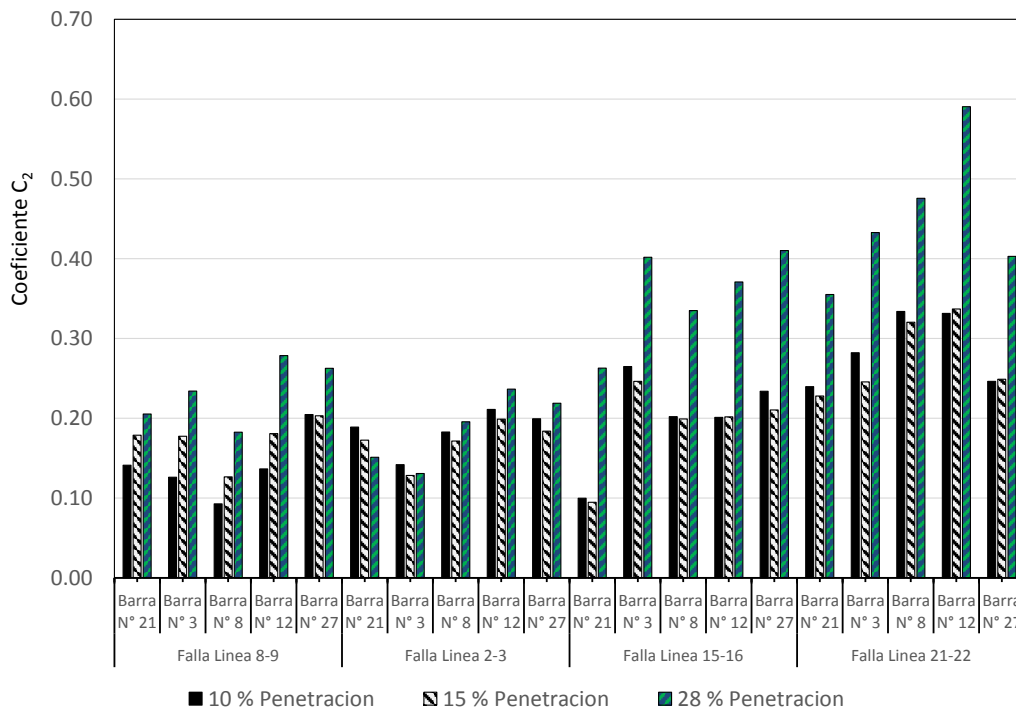


Figura 11. Gráfico de los coeficientes ( $C_2$ ) calculados

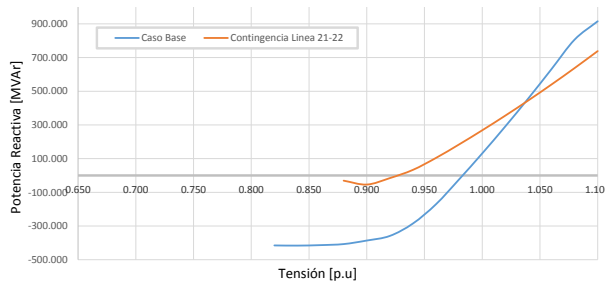


Figura 10. Curva VQ realizada sobre la barra 21. Caso 2

Tabla III  
COEFICIENTES  $C_1$  PARA DISTINTOS VALORES DE PENETRACIÓN

Contingencias Línea	Análisis VQ en Barra	10 %		15 %		28 %	
		$C_{1c1}$	$C_{1c2}$	$C_{1c1}$	$C_{1c2}$	$C_{1c1}$	$C_{1c2}$
2-3	3	0.50	0.63	0.35	0.48	0.50	0.63
2-3	8	0.60	0.80	0.43	0.60	0.60	0.80
2-3	12	0.64	0.87	0.48	0.67	0.64	0.87
2-3	21	0.70	0.85	0.49	0.66	0.70	0.85
2-3	27	0.69	0.91	0.51	0.70	0.69	0.91
8-9	3	0.51	0.75	0.47	0.64	0.51	0.75
8-9	8	0.37	0.55	0.31	0.43	0.37	0.55
8-9	12	0.49	0.76	0.41	0.59	0.49	0.76
8-9	21	0.69	0.90	0.58	0.76	0.69	0.90
8-9	27	0.59	0.85	0.53	0.73	0.59	0.85
15-16	3	0.19	0.60	0.37	0.62	0.19	0.60
15-16	8	0.14	0.47	0.25	0.45	0.14	0.47
15-16	12	0.14	0.51	0.26	0.46	0.14	0.51
15-16	21	0.48	0.74	0.66	0.76	0.48	0.74
15-16	27	0.29	0.70	0.52	0.73	0.29	0.70
21-22	3	0.08	0.51	0.02	0.27	0.08	0.51
21-22	8	0.11	0.58	0.03	0.35	0.11	0.58
21-22	12	0.11	0.70	0.02	0.36	0.11	0.70
21-22	21	0.08	0.44	0.03	0.26	0.08	0.44
21-22	27	0.10	0.50	0.04	0.29	0.10	0.50

los coeficientes  $C_2$  para cada una de las contingencias con distintos niveles de penetración. Como se puede observar en la gráfica, el índice de aumento en la estabilidad de tensión en algunos puntos del sistema cuando se utiliza tecnología de velocidad variable respecto de tecnología de velocidad fija, supera ampliamente el índice de incremento del nivel de penetración. Por ejemplo, en la barra 12 si analizamos para una penetración de un 30 % (0.3) tenemos un incremento de la estabilidad de tensión de alrededor de 60 % (0.6) cuando utilizamos tecnología de velocidad variable en lugar de velocidad fija.

## V. CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se ha mostrado que cuando se produce una inclusión de aerogeneradores de velocidad variable, con capacidad de control de tensión sobre un sistema eléctrico, se produce un incremento en el margen de estabilidad de tensión. Este comportamiento no fue observado cuando se incorporaron a la red aerogeneradores de velocidad constante, ya que esta tecnología no permite aportes de potencia reactiva al sistema y la compensación se realiza por medio de banco de capacitores, razón por la cual tienen menor de capacidad

de entregar reactivo. También podemos afirmar que cuando aumenta el porcentaje de inserción de energía eólica y utilizamos aerogeneradores con tecnología de velocidad variable, el margen de estabilidad de tensión aumenta en mayor grado que cuando utilizamos tecnología de velocidad fija.

## REFERENCIAS

- [1] T. Ackermann, Ed., *Wind Power in Power Systems, 2nd Edition*. Wiley, Nov. 2012, no. 6.
- [2] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziaiyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004.
- [3] J. E. Candelo, G. Caicedo, and F. Castro, "Metodos para el estudio de la estabilidad de voltaje en sistemas de potencia," *Univ. del Valle, Esc. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Grupo de Investigación en Alta Tensión*, 2008.
- [4] P. KUNDUR, *Power system stability an control*. McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [5] A. E. Feijoo and J. Cidras, "Modeling of wind farms in the load flow analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, 2000.
- [6] C. Taylor, "Power system voltage stability," in *Mc - Graw Hill*, 1994, pp. 1–8.
- [7] N. T. Linh, "Voltage stability analysis of grids connected wind generators," in *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2009.
- [8] Y. Chi, Y. Liu, W. Wang, and H. Dai, "Voltage stability analysis of wind farm integration into transmission network," in *International Conference on Power System Technology, 2006*, 2006.
- [9] V. Kumar, K. Reddy, and D. Thukaram, "Coordination of reactive power in grid connected wind farms for voltage stability enhancement," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014.
- [10] L. Aromataris, P. L. Arnera, and J. Riubrugent, "Estudio dinámico de estabilidad de tensión comparando modelos de carga estática y carga dinámica," 2001.
- [11] Siemens, "PSS/E documentation."
- [12] J. Brochu, C. Larose, and R. Gagnon, "Validation of single- and multiple-machine equivalents for modeling wind power plants," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011.