

Valoración de los impactos técnicos de la generación distribuida en sistemas de energía eléctrica

Assessing the technical impacts of distributed generation on electrical power systems

LUISA FERNANDA BUITRAGO ARROYAVE

Ingeniera Electricista. Ingeniera de diseño de Comercial ALPA S.A.S. Medellín, Colombia. Contacto: *lbuitrago@alpa.co*.

JESÚS MARÍA LÓPEZ LEZAMA

Ingeniero Eléctrico, Doctor en Ingeniería Eléctrica. Docente de la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Contacto: *lezama@udea.edu.co*.

Fecha de recepción: 02 de abril de 2012

Fecha de aceptación: 12 de febrero de 2013

Clasificación del artículo: Investigación

Financiamiento: Universidad de Antioquia

Palabras clave: congestión, generación distribuida, pérdidas de potencia, perfil de tensión.

Key words: congestion, distributed generation, power losses, voltage profile.

RESUMEN

En este artículo se presenta una valoración de los impactos técnicos de la generación distribuida (GD) en los sistemas de energía eléctrica. Para cuantificar los impactos de la GD en las redes eléctricas se han propuesto cuatro índices, que valoran las pérdidas activas, pérdidas reactivas, perfil de tensiones y congestión. Los índices son adimensionales y comparan la operación de la red con y sin GD. Estos índices representan una herramienta para el soporte de decisiones del operador de la red. Para valorar el impacto de la GD se consideran dos redes de prueba, de 13 y 34 barras. En los ejemplos presentados se realiza

una evaluación exhaustiva considerando todas las posibles ubicaciones de la GD y se analiza su impacto bajo varios modos de operación. Los resultados muestran que, si bien la GD puede contribuir al mejoramiento del perfil de tensiones y a la reducción de pérdidas, una ubicación y dimensionamiento inapropiada de esta, puede ocasionar aumento en las pérdidas y problemas de congestión en la red.

ABSTRACT

An assessment of the technical impacts of distributed generation (DG) on electric power systems

is presented in this paper. In order to quantify the impacts of DG on electric networks, four indices have been proposed, which assess aspects such as active power losses, reactive power losses, voltage profile and congestion. These indices are dimensionless and compare the network operation with and without DG. Such indices represent a decision-supporting tool for the network operator. To evaluate the impact of DG on the network,

two testing systems of 13 and 34 busses are considered. An exhaustive evaluation considering all possible DG locations is presented. The potential impact is analyzed under several operation modes. Results show that while the DG can contribute to the improvement of voltage profile and power loss reduction, an inappropriate location and sizing of it may lead to an increase in power losses and congestion in the network.

* * *

1. INTRODUCCIÓN

Debido a las economías de escala, la industria eléctrica se ha caracterizado por la presencia de grandes centrales. Dadas las disposiciones geográficas de los recursos como agua, carbón, gas o petróleo, las grandes centrales productoras de electricidad no son construidas, necesariamente, cerca de los centros de consumo. Esto hace que sea ineludible el transporte de la energía eléctrica a través de un complejo sistema de transmisión. En los últimos años, una multitud de eventos ha creado un nuevo ambiente en la infraestructura del sector eléctrico. En este nuevo escenario, es más común la presencia de pequeños generadores ubicados cerca de los consumidores o en la red de distribución. Este tipo de generación es conocida como generación distribuida (GD) [1], [2]. Las unidades de GD pueden usar recursos renovables o no renovables para la producción de electricidad. Las tecnologías que usan recursos renovables incluyen: eólica, solar fotovoltaica, generación con biomasa y microcentrales hidráulicas. Las tecnologías que usan recursos no renovables incluyen: motores de combustión interna, turbinas a gas, microturbinas y celdas de combustible [2]. Los principales factores que han llevado a un renovado interés por el desarrollo y uso de GD se enuncian a continuación [3]:

- La desregulación del sector eléctrico.

- Avances tecnológicos en la generación de electricidad a pequeña escala.
- Rápido incremento de la demanda en algunos sectores.
- Restricciones medioambientales que dificultan la construcción de grandes centrales y nuevos corredores de líneas de transmisión.
- Conocimiento de las posibilidades que brinda la GD para mejorar la seguridad en el suministro de energía.
- Una renovada conciencia ecológica.

Debido a los factores mencionados anteriormente, el uso de la GD se ha fomentado a través de políticas energéticas en muchos países [4]. En este contexto, los impactos de la GD han sido objeto de diferentes estudios; tales estudios, abordan la influencia de la GD en el control de tensiones [5] - [7], las pérdidas [8] - [10], la confiabilidad del sistema [11], la estabilidad [12], la calidad de la potencia [13] y el potencial de la GD para proveer servicios auxiliares [14]. Uno de los tópicos abordados en estos estudios es el moldeamiento de la DG en las ecuaciones de flujo de carga en redes de distribución. En este sentido, dependiendo de su tecnología e interfaz con la red, la GD puede ser modelada como una inyección de potencia negativa (barra de carga o PQ) o como una barra de generación (barra PV) [15] -[16]. En ambos casos, la red de transmisión pasa de ser una red

pasiva con flujos unidireccionales a una red activa con varias fuentes de generación y posibles flujos bidireccionales. Las principales ventajas de implementación de la GD incluyen:

- Mejoramiento del perfil de tensiones.
- Reducción de emisiones de CO₂.
- Reducción de las pérdidas activas y reactivas.
- Reducción en los picos de carga.
- Aplazamiento de inversiones en expansión de la red.
- Mejoramiento en los niveles de confiabilidad.
- Alivio de congestión en la red.

A pesar de las ventajas mencionadas anteriormente, un inadecuado dimensionamiento y ubicación de la GD puede causar inconvenientes en las redes de energía eléctrica, como: aumento en las pérdidas activas y reactivas, problemas con la coordinación de protecciones, aumento de los niveles de corriente de corto circuito, e inclusive congestión de la red [3]. Adicionalmente, las tecnologías de GD que dependen de recursos renovables, como la energía eólica y solar fotovoltaica, introducen una fuente adicional de incertidumbre en el planeamiento de la operación de la red. Bajo este escenario, es de gran importancia contar con herramientas que permitan cuantificar los impactos de la GD. Estas herramientas pueden servir de soporte en la toma de decisiones al operador de la red, de tal manera que se obtengan los máximos beneficios de la GD y se minimicen sus problemas potenciales. Este artículo pretende hacer un aporte en ese sentido. Para ello, se han considerado cuatro índices que cuantifican: las pérdidas de potencia activa, las pérdidas de potencia reactiva, el perfil de tensiones y el nivel de congestión en la red. Por simplicidad se ha considerado un modelo monofásico de la red y se ha abordado el problema de flujo de carga de forma determinista. Para

calcular los flujos de carga con GD esto se utilizó el software Matpower [17].

2. METODOLOGÍA PARA CUANTIFICAR EL IMPACTO DE LA GD

Los índices relacionados en esta sección indican el impacto de la GD en las pérdidas activas y reactivas, el perfil de tensiones y la congestión de la red. Otro tipo de índices, como el impacto en la confiabilidad y en las corrientes de corto circuito, no son considerados, dado que requieren un modelo más detallado de la red de distribución y de sus diferentes elementos. Los índices se han desarrollado de forma tal que comparan la operación de la red con y sin GD. Todos los índices son adimensionales y están pensados para ser incorporados en un trabajo posterior que involucre la búsqueda de la ubicación más conveniente de la GD en los sistemas de distribución. Los índices descritos en este artículo representan una herramienta que puede ayudar en la toma de decisiones al planeador de la red.

2.1 Índices de pérdidas activas y reactivas

La reducción de pérdidas, tanto activas como reactivas, es un tema que ha sido ampliamente estudiado en la literatura especializada [8] - [10]. Una de las ventajas de la GD, radica en que ésta puede contribuir en la reducción de pérdidas y, de esta forma, contribuir a prestar un servicio de mayor calidad. Sin embargo, varios estudios han demostrado que la ubicación y dimensionamiento inapropiados de la GD puede resultar en un aumento de las pérdidas [3], [9]. Los índices propuestos a continuación buscan medir la relación entre las pérdidas activas y reactivas, con y sin generación distribuida, y están dados mediante las ecuaciones (1) y (2). Un valor positivo de estos índices indica que la GD ha contribuido en la reducción de pérdidas, por otro lado, un valor negativo indica que las pérdidas con GD son ma-

yores que las pérdidas sin GD y, por lo tanto, la GD tiene un impacto negativo en el sistema. Finalmente, si el índice es igual a cero, indica que las pérdidas con y sin GD son iguales.

$$IP = 1 - \frac{\sum_{l=1}^L P_l^{loss} \text{ con GD}}{\sum_{l=1}^L P_l^{loss} \text{ sin GD}} \quad (1)$$

$$IQ = 1 - \frac{\sum_{l=1}^L Q_l^{loss} \text{ con GD}}{\sum_{l=1}^L Q_l^{loss} \text{ sin GD}} \quad (2)$$

Donde IP e IQ representan los índices de pérdidas activas y reactivas, respectivamente. L representa el conjunto de ramas de la red (líneas y transformadores). Finalmente, P_l^{loss} y Q_l^{loss} representan las pérdidas activas y reactivas en la línea l , respectivamente.

2.2 Índice de tensiones

La GD puede contribuir en el mejoramiento del perfil de tensiones. Sin embargo, al igual que con las pérdidas, el impacto en el perfil de tensiones depende de su ubicación y dimensionamiento. En términos generales, cuando la GD está ubicada cerca de grandes demandas, ésta contribuye al mejoramiento del perfil de tensiones, por el contrario, cuando la GD se encuentra ubicada lejos de las grandes demandas, o cuando se trata de generación eólica que tiene picos de producción en horas de demanda baja, ésta puede deteriorar el perfil de tensiones.

El siguiente índice muestra la relación entre la tensión promedio del sistema con y sin GD. Un valor positivo de este índice indica que la GD ha mejorado el perfil de tensiones, un valor negativo indica que la GD ha empeorado el perfil de tensiones, y finalmente, un valor igual a cero indica que las tensiones, en promedio, son iguales con y sin GD.

$$IV = \frac{\sum_{i=1}^N |V_i \text{ con GD}|}{\sum_{i=1}^N |V_i \text{ sin GD}|} - 1 \quad (3)$$

Donde IV representa el índice de tensiones, V_i significa la tensión en el nodo i del sistema, y N significa el número de barras de la red ver ecuación (3).

2.3 Índice de congestión

Un adecuado planeamiento y operación de la GD puede ayudar a aliviar la congestión en las líneas de distribución. El índice de congestión, propuesto en este caso, muestra la relación entre los flujos de potencia aparente con y sin GD. De este modo, se puede determinar el impacto de la GD en los niveles de congestión del sistema. Si este índice es positivo, indica que la GD ha contribuido en la reducción de los flujos en las líneas, aliviando así posibles problemas de congestión. Si este índice es negativo, indica que los flujos en las líneas han aumentado debido a la presencia de GD. Finalmente, si este índice es igual a cero indica que, en promedio, los flujos en las líneas con y sin GD son iguales, ver ecuación (4).

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i,j \in L} |Flujo_{ij} \text{ con GD}|}{\sum_{i,j \in L} |Flujo_{ij} \text{ sin GD}|} \quad (4)$$

Donde IC representa el índice de congestión, $Flujo_{i,j}$ representa la potencia aparente entre los nodos i , j y L representa el conjunto de ramas de la red (líneas y transformadores).

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para mostrar el comportamiento de los índices y el impacto de la GD, se realizaron diferentes pruebas con sistemas de distribución de 13 y 34 barras. Para cada sistema se calcularon los índi-

ces considerando varios modos de operación de la GD: con factor de potencia unitario, con factor de potencia en atraso y con factor de potencia en adelanto. Adicionalmente, se hizo una evaluación exhaustiva para identificar la mejor ubicación de la GD en la red en función de los índices mencionados. En este caso a cada índice se le ha dado igual importancia.

3.1 Sistema de distribución de 13 barras

La figura 1 ilustra un sistema de distribución de 13 barras correspondiente a un sistema real de la ciudad de Teherán. Los datos de este sistema han

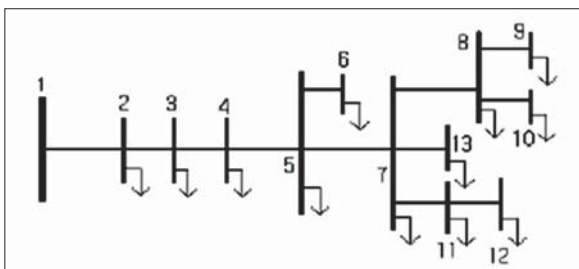


Figura 1. Sistema de distribución de 13 barras

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Datos de línea del sistema de distribución de 13 barras

Línea envío-recibo	R[Ohm]	X[Ohm]
1-2	0,000176	0,00138
2-3	0,000176	0,00138
3-4	0,00045	0,00035
4-5	0,00089	0,00069
5-6	0,000116	0,00035
5-7	0,00073	0,00091
7-8	0,00074	0,00073
8-9	0,00093	0,00058
8-10	0,00063	0,00093
7-11	0,00063	0,0005
11-12	0,00068	0,00053
7-13	0,00062	0,00053

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Datos de barra del sistema de distribución de 13 barras

Barra	Demanda Activa [kW]	Demanda Reactiva [KVAR]
1	0	0
2	890	468
3	628	470
4	1112	764
5	636	378
6	474	344
7	1342	1078
8	920	292
9	766	498
10	662	480
11	690	186
12	1292	554
13	1124	480

Fuente: elaboración propia.

sido tomados de la referencia [18], y se muestran en las tablas 1 y 2. Se puede observar que la mayor demanda se encuentra ubicada en el nodo 7.

3.1.1 Test 1. Considerando solo generación de potencia activa

Inicialmente, los índices propuestos son calculados considerando un generador distribuido con una capacidad de 6 MW y operando a factor de potencia unitario. La figura 2 muestra los índices considerando todas las posibles ubicaciones del generador distribuido. Se puede observar que todos los índices son positivos, lo que indica que la GD contribuye a la reducción de pérdidas, reduce los flujos en las líneas y mejora el perfil de tensión. En este caso, se encontró que la mejor ubicación de la GD es la barra 8.

3.1.2 Test 2. Considerando factor de potencia capacitivo

En este caso, se considera un generador distribuido que entrega potencia activa de 6 MW y potencia reactiva capacitiva de 4.5 MVAR. La figura

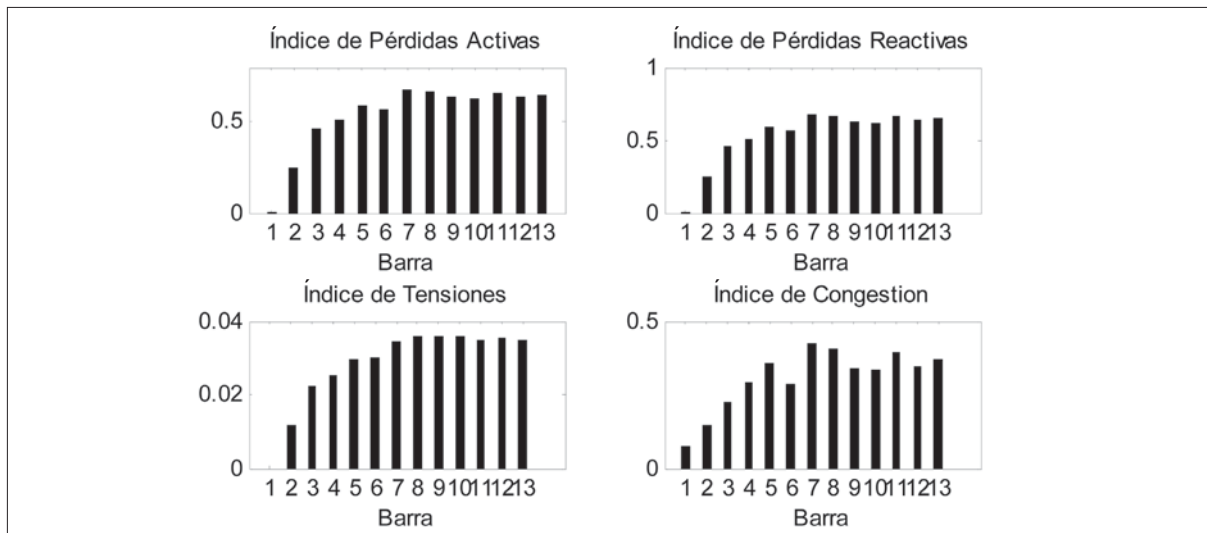


Figura 2. Índices para el sistema de trece barras. Test 1

Fuente: elaboración propia.

3 muestra los índices considerando todas las posibles ubicaciones del generador distribuido. Se puede observar que todos los índices son positivos, y son mayores que los obtenidos en el ítem anterior. Esto significa que, cuando la GD inyecta potencia reactiva capacitiva en este sistema, puede contribuir aún más al adecuado funcionamiento de la red. En este caso, se encontró que la mejor ubicación de la GD es la barra 8.

3.1.3 Test 3. Considerando factor de potencia inductivo

En este caso, se considera un generador distribuido que entrega potencia activa de 6 MW y potencia reactiva inductiva de 4.5 MVAR. La figura 4 muestra los índices considerando todas las posibles ubicaciones del generador distribuido. Se puede observar que, para algunas ubicaciones,

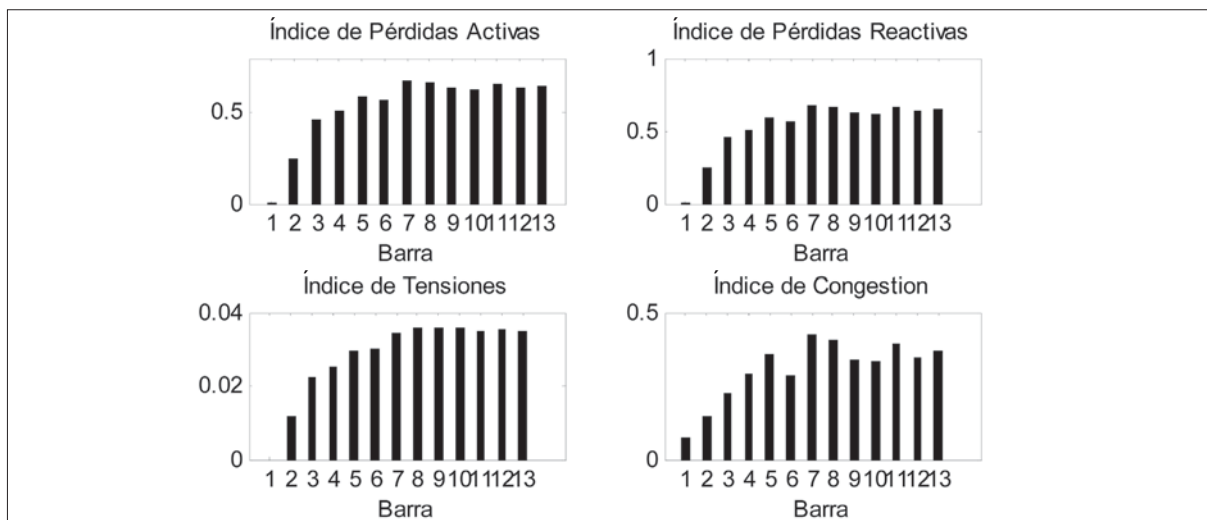


Figura 3. Índices para el sistema de trece barras. Test 2

Fuente: elaboración propia.

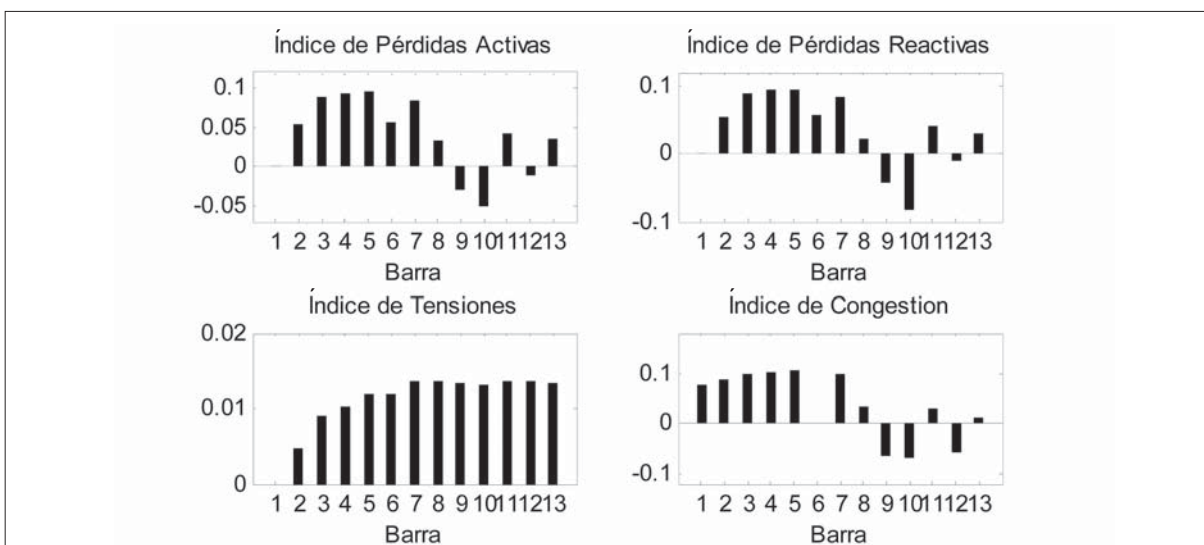


Figura 4. Índices para el sistema de trece barras. Test 3

Fuente: elaboración propia.

los índices de pérdidas y congestión son negativos. Esto significa que una ubicación inapropiada de la GD (por ejemplo, en la barra 10) puede aumentar las pérdidas, tanto activas como reactivas y, además, puede sobrecargar algunas líneas. En este caso se encontró que la mejor ubicación de la GD es la barra 5.

3.2 Sistema de distribución de 34 barras

La figura 5 ilustra un sistema de distribución de 34 barras. Los datos de este sistema son presentados en la tabla 3, datos que están dados en p.u.

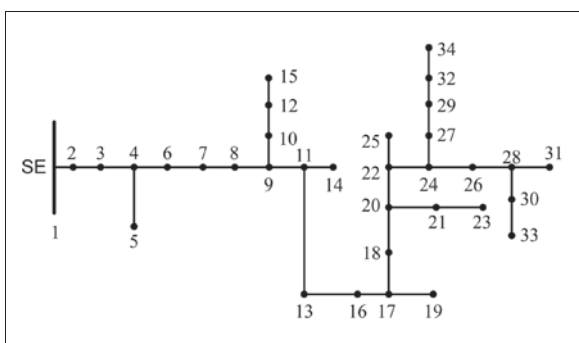


Figura 5. Sistema de distribución de 34 barras

Fuente: elaboración propia.

usando una potencia base de 10MW. La figura 6 ilustra la distribución de la demanda en la red. Se puede observar que las mayores demandas se encuentran ubicadas en los nodos finales. A conti-

Tabla 3. Datos de línea del sistema de distribución de 34 barras

Línea	R	X	Línea	R	X
1-2	0,0043	0,0040	17-18	0,0128	0,0106
2-3	0,0029	0,0021	18-20	0,0006	0,0006
3-4	0,0280	0,0228	20-21	0,0087	0,0062
4-5	0,0006	0,0005	20-22	0,0117	0,0117
4-6	0,0060	0,0060	21-23	0,0012	0,0006
6-7	0,0016	0,0015	22-25	0,0006	0,0005
7-8	0,0126	0,0094	22-24	0,0012	0,0007
8-9	0,0005	0,0005	24-26	0,0173	0,0107
9-10	0,0122	0,0122	24-27	0,0061	0,0061
9-11	0,0312	0,0283	26-28	0,0006	0,0005
10-12	0,0143	0,0108	28-30	0,0007	0,0006
12-15	0,0157	0,0107	30-33	0,0061	0,0055
11-14	0,0061	0,0062	28-31	0,0116	0,0076
11-13	0,0126	0,0106	27-29	0,0022	0,0022
13-16	0,0028	0,0018	29-32	0,0062	0,0067
16-17	0,0062	0,0061	32-34	0,0078	0,0056
17-19	0,0170	0,0171			

Fuente: elaboración propia.

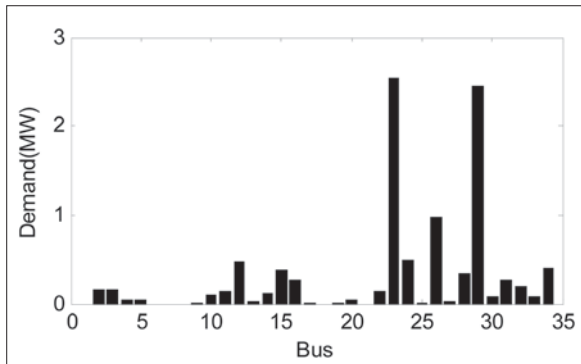


Figura 6. Distribución de la demanda en la red de 34 barras

Fuente: elaboración propia.

nuación se presentan varias pruebas considerando diferentes modos de operación de la GD.

3.2.1 Test 1. Considerando solo generación de potencia activa

En este caso, se considera un generador distribuido con capacidad de 6 MW y operando a factor de potencia unitario. La figura 7 muestra los índices

considerando todas las posibles ubicaciones del generador distribuido. Se puede observar que todos los índices son positivos, y aumentan en la medida en que el generador se ubica en las barras más alejadas. En este caso, se encontró que la mejor ubicación de la GD es la barra 29.

3.2.2 Test 2. Considerando factor de potencia capacitivo

En este caso, se considera un generador distribuido que entrega potencia activa de 6 MW y potencia reactiva capacitiva de 4.5 MVAR. La figura 8 muestra los índices, considerando todas las posibles ubicaciones del generador distribuido. Se puede observar que todos los índices son positivos, y son mayores que los obtenidos en el ítem anterior. Además, los índices son mayores cuando la GD es ubicada en las barras más alejadas de la subestación. En este caso, se encontró nuevamente que la mejor ubicación de la GD es la barra 29.

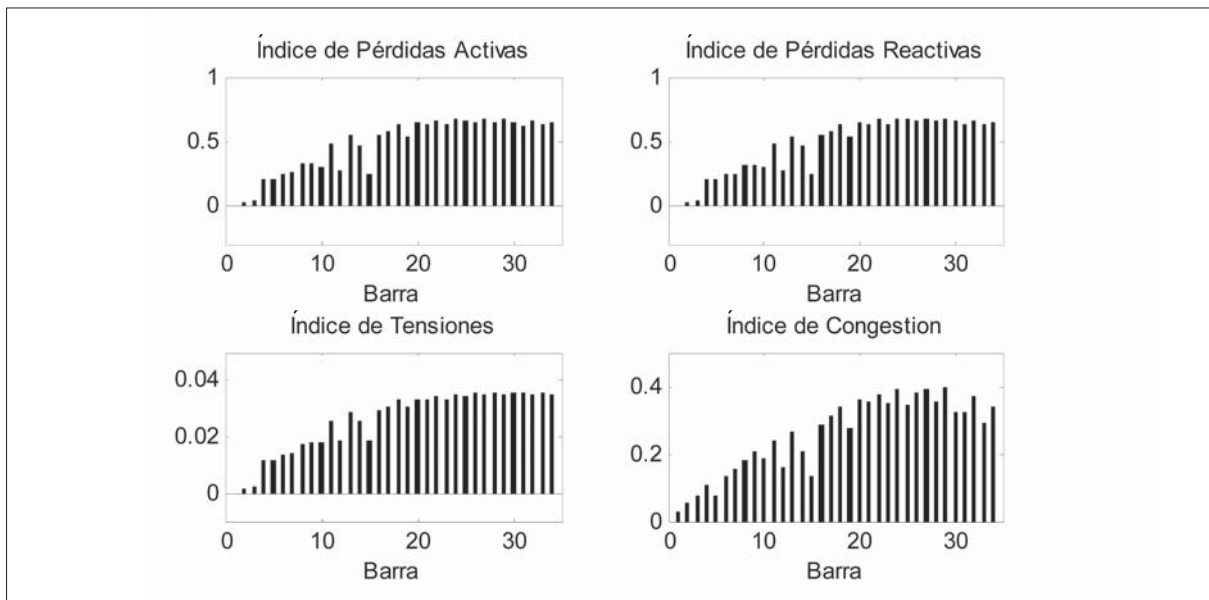


Figura 7. Índices para el sistema de 34 barras. Test 1

Fuente: elaboración propia.

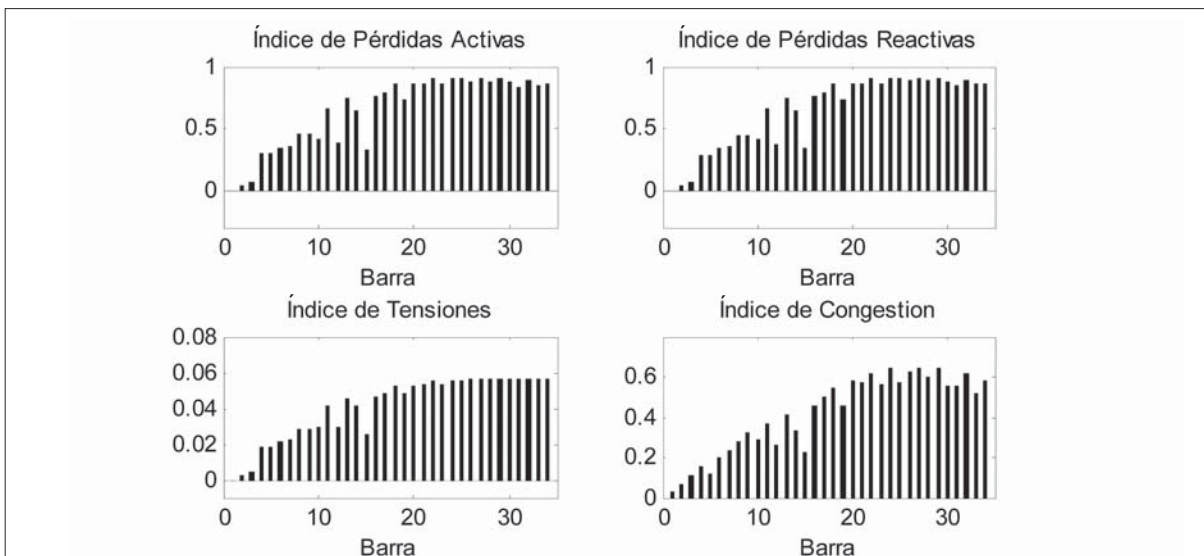


Figura 8. Índices para el sistema de 34 barras. Test 2
Fuente: elaboración propia.

3.2.3 Test 3. Considerando factor de potencia inductivo

En este caso, se considera un generador distribuido que entrega potencia activa de 6 MW y potencia reactiva inductiva de 4.5 MVAR. La figura 9 muestra los índices considerando todas las po-

sibles ubicaciones del generador distribuido. Se puede observar que, para varias ubicaciones, los índices de pérdidas y congestión son negativos. Por otro lado, los únicos índices que se mantienen positivos son los relacionados con el perfil de tensiones, sin embargo, los valores de estos índices son muy pequeños, comparados con los

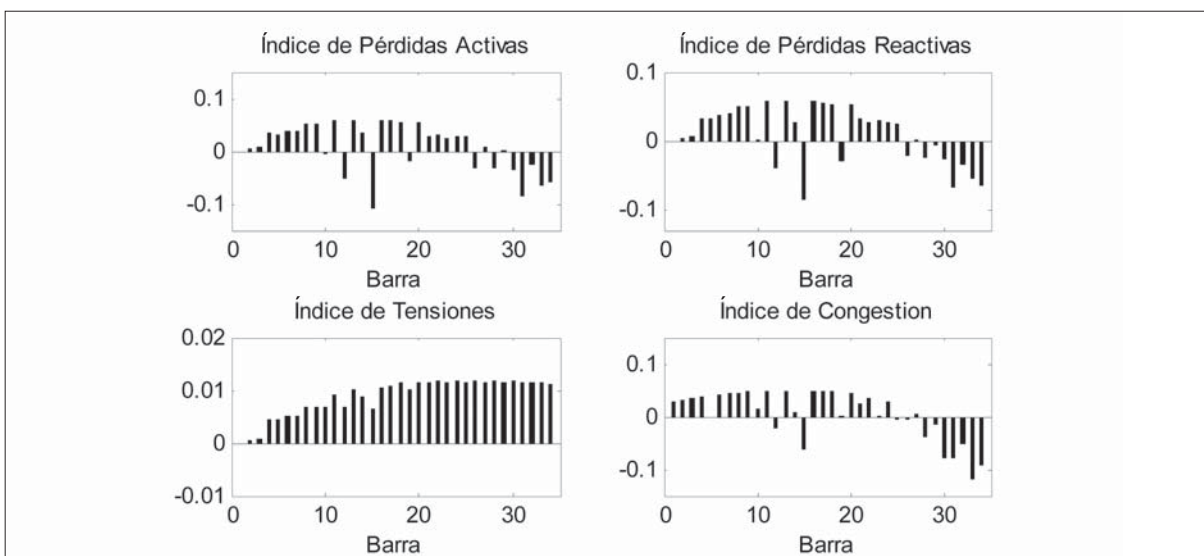


Figura 9. Índices para el sistema de 34 barras. Test 3
Fuente: elaboración propia.

obtenidos en los ítems anteriores (ver figura 7 y figura 8). En este caso, se encontró que la mejor ubicación de la GD es la barra 16.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presentaron diferentes índices para cuantificar el impacto de la GD en las pérdidas activas, pérdidas reactivas, perfil de tensiones y congestión en la red. Las pruebas realizadas en sistemas de 13 y 34 barras, indican claramente que la GD puede reducir las pérdidas activas y reactivas, mejorar el perfil de tensiones y aliviar la congestión en el sistema. Sin embargo, pudo comprobarse que la GD no siempre tiene efectos positivos en el sistema, pues su impacto depende de su ubicación, dimensionamiento y modo de operación. En particular, se pudo observar que los

índices son mayores cuando la GD operaba suministrando potencia reactiva al sistema.

En las pruebas realizadas, se observó que los índices de potencia activa y reactiva son dominantes, es decir, sus órdenes de magnitud son mayores que los índices de tensión y congestión. En consecuencia, si los índices propuestos son utilizados como señales para ubicar GD, es necesario utilizar factores de peso con el fin de compensar las diferencias en los órdenes de magnitud, y de esta forma, hacer que el mejoramiento en perfil de tensiones y el alivio en la congestión tengan una importancia relativa similar a la reducción de pérdidas.

En un trabajo futuro se pretende introducir los índices propuestos en un problema de optimización con el fin de determinar la ubicación óptima de la GD.

REFERENCIAS

- [1] T. Ackermann, G. Anderson and L. Söder, "Distributed generation: a definition", *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 71, pp. 119-128, Oct. 2004.
- [2] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen and G. Strbac, "Embedded Generation", *London, U.K.: IEE Power and Energy Series 31, Inst. Elect. Eng.*, 2000.
- [3] R. C. Dugan and T. E. McDermott, "Distributed generation," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, Vol. 8, pp.19-25, April 2002.
- [4] R. Moreno, G. Strbac, F. Porrua, S. Mocarquer and B. Bezerra, "Making room for the boom", *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 8, No. 5, pp. 36-46, Sept/Oct., 2010.
- [5] J. A. P. Lopes and A. Madureira, "A voltage control optimization for distribution networks with DG and microgrids", in *Optimization Advances in Electric Power Systems*, Vol. 1, New York: Nova Science Publishers, 2008, pp. 87-150.
- [6] T. Niknam, A. M. Ranjbar and A. R. Shirani, "Impact of distributed generation on volt/var control in distribution networks", *Proceedings of the IEEE Power Tech Conference*, Vol. 3 pp 1-7 Bolonia, Italy, 2003.
- [7] C. Borges and M. Falcão, "Optimal distributed generation allocation for reliability, losses and voltage improvement", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 28, pp. 413-420, July 2006.
- [8] V. H. M. Quezada, J. R. Abbad and T. G. S. Román, "Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 21, pp. 533-540, May 2006.

- [9] L. F. Ochoa, A. Padilha-Feltrin and G.P. Harrison, "Evaluating distributed generation impacts with a multiobjective index", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 21, pp. 1452-1458, July, 2006.
- [10] P. Chiradeja, "Benefit of distributed generation: a line loss reduction analysis", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, pp. 1-5, 2005.
- [11] R. E. Brown, "Reliability benefits of distributed generation on heavily loaded feeders", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-4, 2007.
- [12] A. M. Azmy and I. Erlich. "Impact of distributed generation on the stability of power systems", *Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 2 pp. 1056-1063, Jun., 2005.
- [13] M. I. Marei, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, "A novel control algorithm for the DG interface to mitigate power quality problems", *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 19, No. 3, pp. 1384-1392, Jul. 2004.
- [14] G. Joos, B. T. Ooi, D. McGillis, F. D. Galiana and R. Marceau, "The potential of distributed generation to provide ancillary services", *IEEE Power Engineering Society Meeting*, Vol. 3 pp. 1762-1767, July 2000.
- [15] S. Khushalani, J. M. Solanki, and N. N. Schulz, "Development of three-phase unbalanced power flow using PV and PQ models for distributed generation and study of the impact of DG models", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 22, pp. 1019-1025, August 2007.
- [16] J. H. Teng, "Modelling distributed generation in three-phase distribution flow", *IET Gen. Trans. & Dist.*, Vol. 2 pp. 330-340, July, 2008.
- [17] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez and R. J. Thomas, "MATPOWER's extensible optimal power flow architecture", *Proc. 2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-7, July, 2009.
- [18] Y. Alinejad-Beromi, M. Sedighzadeh and M. Sadighi, "A particle swarm optimization for siting and sizing of distributed generation in distribution network to improve voltage profile and reduce THD and losses", 43th International Universities Power Engineering Conference, pp. 1-5, 2008.