

Estado del arte y propuesta metodológica de evaluación del impacto de la generación distribuida

GUSTAVO LUNA*
DIEGO GONZÁLEZ**
EDWIN RIVAS TRUJILLO***

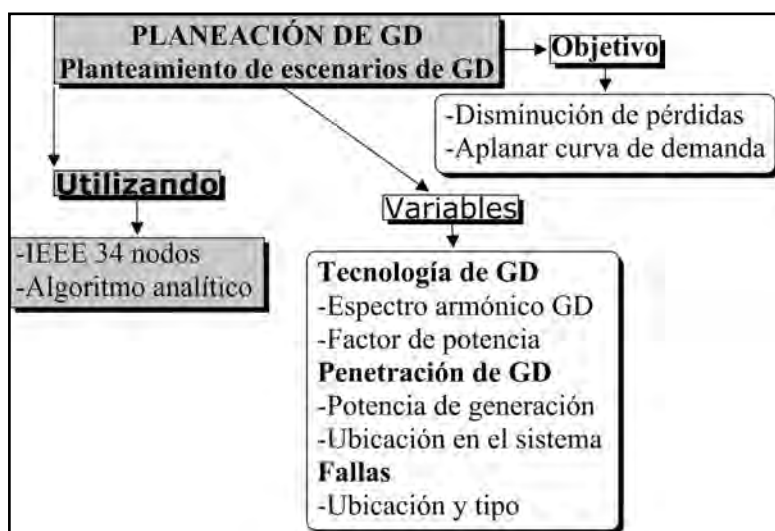
Resumen

En este artículo se presenta el estado del arte referente al impacto de la generación distribuida en las redes diseñadas para este fin. Dicho estado del arte permea la planeación de la demanda, los dispositivos de protección, armónicos e índices de evaluación. Además, se propone una metodología para evaluar el impacto de la generación distribuida, con base en índices normalizados que se soportan en la normativa colombiana, y estándares IEEE que, a su vez, se apoyan en una herramienta de *software* de código abierto.

Palabras clave: distribuida, impacto, índices normalizados, planeación, Open DSS, normativa colombiana.

Abstract

This paper presents the state of art concerning the impact of distributed generation in distribution networks, which pervades demand planning, protection devices, harmonics and evaluation indexes. In addition, is proposed a methodology to assess the



(*) Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: galunar@correo.udistrital.edu.co.

(**) Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: dilgonzalez@correo.udistrital.edu.co.

(***) Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: erivas@udistrital.edu.co.

Fecha de recepción: 27/07/2013 • Fecha de aceptación: 30/09/2013.

impact of distributed generation based on standardized indexes supported in IEEE Colombian legislation supported on tool open source software.

Keywords: distributed, impact, normalized index, planning, OpenDSS, colombian law.

1. Introducción

La generación distribuida (GD) está penetrando de manera acelerada los sistemas de potencia, lo cual, unido al aumento de cargas no lineales, origina cambios en el sistema eléctrico, que a su vez exigen mantener una buena confiabilidad y calidad de energía desde el generador hasta el usuario final (Haan, Nguyen, Kling & Ribeiro, 2011). El incremento no planificado en los niveles de penetración de la GD en las redes de distribución, ha conllevado a que surjan una serie de inconvenientes de índole técnica, entre los cuales se destacan los problemas asociados a pérdidas de potencia, regulación de tensión, aumento de niveles de corriente de falla, así como problemas de calidad de energía, tales como: sobretensión, subtensión, armónicos y huecos de tensión.

En este trabajo se investiga el impacto de las nuevas tecnologías asociadas a la GD; por lo tanto, resulta necesario conocer ¿hasta qué punto la integración de la generación distribuida impacta de manera técnica las redes de distribución, para lo que se evalúan problemas de pérdida de potencia, corrientes de falla, regulación de tensión y fenómenos de calidad de energía, como: sobretensión, subtensión, armónicos y huecos de tensión?

En primera instancia se presenta el estado del arte, el cual muestra los trabajos más representativos asociados con cada uno de los factores involucrados en la formulación del problema y las variables determinantes en la evaluación del impacto de la GD.

Posteriormente, para evaluar el impacto se presenta una propuesta metodológica con base en índices normalizados que se soportan en la normativa colombiana y, a su vez, estándares IEEE apoyados en una herramienta de *software* de código abierto (denominado OpenDSS). Esta herramienta ha sido desarrollada desde mediados

de los noventa por la EPRI (Haan & Nguyen, 2011), con el propósito de crear una plataforma flexible de investigación enfocada inicialmente en la generación distribuida.

2. Estado del arte

Diferentes definiciones de generación distribuida se han formulado; sin embargo, en el ámbito colombiano, la generación distribuida se puede definir como el sistema de generación eléctrica conectado en redes de distribución de media y baja tensión o en usuarios finales, obteniendo su energía de tecnologías de generación de pequeña escala que no superan los 20 MW de capacidad (Ministerio de Minas y Energía, Colombia, 1996).

En un contexto más amplio, las características de mayor relevancia en la generación distribuida, se pueden resumir de la siguiente manera (IEEE, 2003; Fraser, 2002):

- Uso en instalaciones privadas o sistemas de distribución.
- Se conecta, principalmente, en baja y media tensión.
- No contribuyen a servicios complementarios de tensión y frecuencia.
- Capacidades de cientos de kW hasta 10 MW.
- Fuentes de generación o de almacenamiento de energía.

2.1 Planeación de la demanda

La planeación de la demanda tiene como objetivo brindar electricidad al mayor número de usuarios con niveles altos de eficiencia y productividad (Gellings, 2009). En los últimos años han aparecido nuevas tendencias (Figura 1) que fortalecen la planeación de los sistemas eléctricos; es el caso de la inclusión que ha tenido la generación distribuida, junto con el uso racional y eficiente de energía. Al implementar estas nuevas propuestas, se deben tener en cuenta aspectos de vital importancia: la ubicación adecuada de la GD para controlar las pérdidas de potencia, el perfil de tensión y el mejoramiento de las curvas de demanda, las políticas regulatorias con los incentivos y desempeño de mercados (precios).

En la Tabla 1 se muestran los trabajos más representativos en la planeación de la demanda, y relacionados, así mismo, con la generación distribuida que se ha reportado en los últimos años.

Figura 1. Nuevas tendencias en la planeación de la demanda



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Trabajos relevantes en materia de planeación de la demanda

Autores y año	Aspectos relevantes
Wang y Nehrir (2004)	Utilizan métodos analíticos para ubicación óptima de GD. Su principal parámetro es la reducción de pérdidas.
Valero, Ortiz y Senabre (2007)	Recurren a los mapas auto-organizados para determinar el tamaño de la GD y el precio de generación en el mercado eléctrico.
Rahimi e Ipakchi (2010)	Ventajas de la implementación de GD en los sistemas eléctricos (desde el enfoque de las políticas) y beneficios en el marco regulatorio.
Maqbool, Babar y Al-Ammar (2011)	Recurren a la GD para aplanar picos en la curva de demanda; esto, con el fin de mejorar el perfil de tensión y la estructura de precios variables en el mercado eléctrico.
Faria y Vale (2012)	Proponen un método de despacho de GD, el cual opera en los picos de la curva de demanda; además, es óptimo para cumplir las obligaciones de energía de reserva.

Fuente: elaboración propia.

2. 2 Impacto de la GD

Los impactos que tiene la generación distribuida en los sistemas eléctricos son inevitables; su control requiere de esfuerzos por parte de las

empresas de generación y los usuarios finales del servicio de energía eléctrica. Las consecuencias de la implementación de GD se ven reflejadas en fenómenos como: corrientes de cortocircuito, huecos de tensión, armónicos, entre otros (ver Figura 2). El interés en los impactos mencionados anteriormente, hace que la GD sea un concepto importante y atractivo para la investigación.

Figura 2. Impactos de la GD a evaluar en la propuesta



Fuente: elaboración propia.

En las Tablas 2, 3 y 4 se resumen los trabajos más relevantes en términos de los impactos de la GD en las corrientes de corto, los huecos de tensión y armónicos, respectivamente.

Tabla 2. Trabajos relevantes relacionados con corrientes de corto

Autores y año	Aspectos relevantes
Girgis y Brahma (2001)	Muestran cómo el tamaño y la ubicación de la GD aumenta las corrientes de corto, afectando la coordinación de protecciones; esto, debido a que se viola el margen de tolerancia en estos dispositivos.
IEEE Power Engineering Society (2004)	Recalcan la aparición de corrientes de corto bidireccionales en el sistema; por tanto, recomiendan implementar dispositivos adecuados para proteger los sistemas eléctricos.
Martinez y Arnedo (2009)	Explican de qué modo la aparición de una nueva impedancia a causa de GD impacta las corrientes de corto. Como recomendación sugieren reforzar la coordinación de protecciones y los sistemas de puesta a tierra.
Mashau y Kibaara (2011)	Exponen que la implementación de GD solo afecta la zona instantánea de las protecciones; el impacto depende del factor de penetración de la generación.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Trabajos relevantes relacionados con huecos de tensión

Autores y año	Aspectos relevantes
Jahromi, Farjah y Zolghadri (2007)	Reducen la magnitud de los huecos de tensión y la frecuencia de los mismos (Sarfi); lo anterior, mediante el uso de algoritmos genéticos para la ubicación óptima de GD.
Surisunthon y Tayjasantant (2011)	Muestran un impacto positivo en los huecos de tensión; el área de vulnerabilidad y la frecuencia de ocurrencia se reducen.
Zheng, Zhang y Lin (2012)	Exponen que el uso de inversores como tecnología de GD, mejora la magnitud de los huecos de tensión; del mismo modo, concluyen que los nodos afectados son los más cercanos a la instalación del generador.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Trabajos relevantes relacionados con armónicos

Autores y año	Aspectos relevantes
Kadir, Mohamed y Shareef 2009	Analizan la distorsión armónica en tensión THDv, usando varias tecnologías como: generador sincrónico, fotovoltaico y turbina eólica. Se observa que al aumentar el número de generadores se excede el THDv por encima del 5 %.
Brenna, Chiumeo y Gandolfi (2011)	Mediante el uso de inversores trifásicos de segundo nivel, se evalúa la distorsión armónica. Los resultados muestran que el impacto es favorable cuando los inversores se usan en configuración intercalada.
Zhou, X., Liang y Zhou, J. (2012)	Explican la relación que existe entre la distorsión armónica y las cargas RL del sistema; el aumento del número de inversores en el sistema es perjudicial.

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 5 se exponen trabajos representativos relacionados con las variables determinantes en la evaluación del impacto, tales como: factor de potencia, fallas, espectros armónicos y penetración de la GD, que involucra potencia y ubicación de la generación.

Tabla 5. Trabajos representativos de variables de simulación

Autores y año	Aspectos relevantes
Algoritmo analítico y factor de potencia	
Hung y Mithulananthan (2010)	Presentan un algoritmo analítico para la ubicación óptima de GD, teniendo en cuenta las pérdidas y las tecnologías de GD; estas fueron agrupadas en cuatro tipos, dependiendo de su característica de inyección de potencia real y reactiva (factor de potencia).
Factor de potencia y penetración de la GD	
Guo, Lin & Sun(2011)	Proponen un método para evaluar el impacto de la GD en las pérdidas del sistema. El factor de potencia y la ubicación de los generadores al final de las ramas, determinan la reducción de pérdidas.
Quezada, Abbad y Román (2006)	Evalúan el impacto de la GD en función del factor de penetración en las pérdidas de potencia. La reducción de pérdidas se comporta como una curva en. La potencia instalada, el factor de potencia, la ubicación y la dispersión de los generadores, determinan el comportamiento de la curva.
Ubicación y tipo de fallas	
Martínez y Arnedo (2009)	Analizan el impacto de la GD sobre las protecciones y los huecos de tensión producidos por fallas en el sistema. La GD cambia la naturaleza radial de los sistemas, alterando la coordinación de protecciones y las características de los hundimientos de tensión.
Espectros armónicos	
Kadir, Mohamed y Shareef (2009)	Exponen el impacto armónico de la GD sobre los sistemas en baja tensión. Para el desarrollo de la investigación, se usan los espectros armónicos de tres diferentes tecnologías de GD, sobre un sistema IEEE de pruebas con contenido armónico de diferentes cargas.

Fuente: elaboración propia.

2. 3 Índices de evaluación

Para evaluar el impacto de la generación distribuida, los autores (Girgis & Brahma, 2001; Zhou, Liang & Zhou, 2012) analizan el impacto antes y después de la conexión de GD, con el fin de comparar el desempeño del sistema, tomando, así mismo, indicadores como referencia (Sarfi y THD) para evaluar huecos de tensión y armó-

nicos, respectivamente. Los relés de protección se evalúan con base en las curvas de tolerancia.

Es necesario resaltar que otros autores (Bracale, Caramia, Carpinelli, Russo & Verde, 2011; Buitrago & López, 2013) han dado un nuevo paso en la evaluación del impacto, cuando muestran que al normalizar los índices, se garantiza la óptima evaluación de los fenómenos huecos de tensión y armónicos. En la Tabla 6 se exponen algunos trabajos recientes que abordan la temática de los índices de evaluación.

Tabla 6. Trabajos relevantes relacionados con índices de evaluación

Autores y año	Aspectos relevantes
Bracale et al. (2011)	Utilizan la normalización de índices como el THDv y el Sarfi en porcentaje; lo anterior, para determinar la ubicación óptima de GD.
Buitrago & López (2013)	Determinan la mejor ubicación de GD, mediante el uso de índices normalizados como: pérdidas de potencia, perfiles de tensión y cargabilidad de las líneas.

Fuente: elaboración propia.

3. Metodología

Para el caso de estudio, se partirá del sistema de pruebas IEEE de 34 nodos, que es un alimentador real –cuya tensión nominal es de 24.9 kV–, radial y desbalanceado (Kersting, 1991). Sus características lo hacen ideal para las pruebas propuestas, si se toman en cuenta sus similitudes con las redes eléctricas colombianas, con lo cual se pueden adaptar curvas de demanda y espectros armónicos típicos para brindar un amplio escenario de ensayos.

El desarrollo metodológico del proyecto se encuentra estructurado en tres etapas, las cuales incluyen: información, simulación y resultados. En la Figura 3 se presenta la propuesta metodológica que se va a desarrollar.

3.1 Información

Índices normalizados: el órgano regulador en Colombia es la CREG y sus directrices se basan, principalmente, en normas nacionales e internacionales (como IEEE y NTC); en estas

se exponen las definiciones, clasificaciones y límites tolerables de los fenómenos de calidad de potencia para los sistemas eléctricos.

Figura 3. Propuesta metodológica



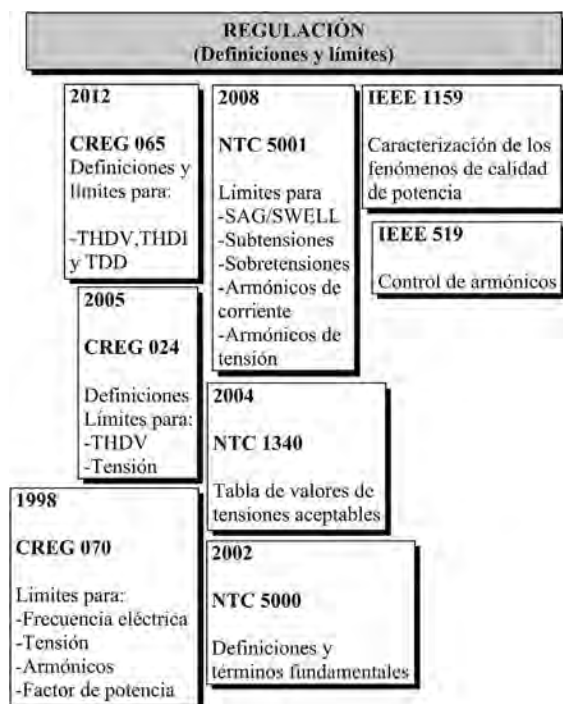
Fuente: elaboración propia.

Para lograr una comparación de la red eléctrica con generación convencional y distribuida, se hará uso de la normalización de los indicadores recopilados en la normativa mencionada. En la Figura 4 se muestran las normas y regulaciones a considerar.

Sobre el sistema de pruebas se pretende evaluar: perfil de tensión, sobretensiones, subtensiones, corrientes de falla, huecos de tensión y armónicos. Cada una de estas variables contiene su definición y sus límites tolerables referenciados en las normas.

Particularmente, los armónicos cuentan con el estándar IEEE 519, en el que se describe una forma de evaluación basada en la presentación de los índices de TDD (Distorsión Total de Demanda – en español) y THD (Distorsión Armónica Total – en español), que pueden ser de tensión o corriente THDV y THDI.

Figura 4. Normativa considerada para normalización de índices



Fuente: elaboración propia.

Cargas típicas y curvas de demanda: estas se dividen en residencial, comercial e industrial, cuyos modelos se asocian a cargas de impedancia, corriente y potencia constante, respectivamente. Las curvas de demanda muestran el comportamiento de cada una de las cargas en un intervalo de tiempo diario.

Los espectros armónicos en el sistema dependen de los elementos eléctricos que componen cada tipo de carga (residencial, comercial e industrial).

Las fuentes armónicas en nodos residenciales corresponden a equipos de iluminación, televisores y ordenadores; en comerciales se encuentra, particularmente, equipos de cómputo; en industriales se halla un fuerte contenido de equipo electrónico como variadores de velocidad e inversores.

Los espectros armónicos de la GD corresponden a la interfaz utilizada por la unidad generadora para su conexión con el sistema; es decir, por los diferentes inversores electrónicos o los espectros propios de las máquinas sincrónicas o asincrónicas.

3. 2 Simulación

Para realizar las simulaciones se tomará como base el sistema IEEE de 34 nodos, sobre el cual resulta necesario plantear varios escenarios de prueba de acuerdo con la planeación de conexión de la GD.

En la Figura 5 se muestra un diagrama de flujo de las pruebas que se van a realizar.

El algoritmo analítico es una herramienta que busca la ubicación óptima de la GD, sustentado en la reducción de pérdidas totales en el sistema. Para aplanar la curva de demanda se empleará la potencia de generación como criterio complementario.

Figura 5. Diagrama de flujo de las pruebas a realizar



Fuente: elaboración propia.

Se tendrán como variables de simulación, los siguientes aspectos: espectros armónicos, factor de potencia, ubicación en el sistema de la GD, potencia de generación y fallas, conforme a lo establecido en el estado del arte.

3. 3 Resultados esperados

Como principales resultados de las simulaciones desarrolladas en los escenarios planteados, se espera observar mejoras en el perfil de tensión, aumento de las corrientes de falla (dependiendo de la ubicación de la GD), reducción en la magnitud de los huecos de tensión y aumento en la distorsión armónica.

4. Conclusión

La revisión bibliográfica muestra un avance significativo en las investigaciones relacionadas con la generación distribuida; sin embargo, es necesario agrupar las diferentes variables para la evaluación del impacto, de modo que ayuden en la tarea de sintetizar el desarrollo de aplicaciones para el diseño y control de los nuevos sistemas eléctricos que aparecerán en el futuro.

La metodología propuesta busca evaluar el impacto de la generación distribuida sobre las redes de distribución, con base en índices normalizados soportados en la normatividad colombiana y los estándares IEEE. ●

Referencias

- Abdul Kadir, A. Mohamed, A. & Shareef, H. (2011, May). *Harmonic impact of different distributed generation units on low voltage distribution system*. Paper presented at the 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) (pp. 1201–1206).
- Bracale, A., Caramia, P., Carpinelli, G., Russo, A. & Verde, P. (2011, July). Site and System Indices for Power-Quality Characterization of Distribution Networks With Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26, 3, 1304–1316.
- Brenna, M., Chiumeo, R. & Gandolfi, C. (2011, June). Harmonic analysis: Comparison between different modulation strategies for three phase inverter connecting Distributed Generation. Paper presented at the 2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP) (pp. 231–236).
- Buitrago, L. & López, J. (2013). Valoración de los impactos técnicos de la generación distribuida en sistemas de energía eléctrica. *Tecnura*, (17), 36.
- Faria, P. & Vale, Z. (2012). Energy and reserve provision dispatch considering distributed generation and demand response. *Innovative Smart Grid*, 1–7.
- Fraser, P. (2002). *Distributed generation in liberalised electricity markets*. Paper presented at the Second International Symposium on Distributed Generation, Power System and Market Aspects.
- Gellings, C. (2009). *The smart grid: enabling energy efficiency and demand response*. Fairmont Press.
- Girgis, A. & Brahma, S. (2001). *Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system*. Power Engineering. Paper presented at the Large Engineering Systems Conference.
- Guo, Y., Lin, Y. & Sun, M. (2011). *The impact of integrating distributed generations on the losses in the smart grid*. Power and Energy Society General Meeting (pp. 1–6).
- Haan, J., Nguyen, P., Kling, W. & Ribeiro, P. (2011). Social interaction interface for performance analysis of smart grids. Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS). *IEEE First International Workshop* (pp. 79–83).
- Hung, D. (2010). Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks. *Energy Conversion, IEEE Transactions*, 25, 3, 814–820.
- IEEE Standards Coordinating Committee 21 (IEEE SCC21). (2003, July). *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, 0, 1 – 16.
- I. P. S. R. Committee. (2004, August). *Impact of distributed resources on distribution relay protection*.
- Jahromi, M., Farjah, E. & Zolghadri, M. (2007, October). *Mitigating voltage sag by optimal allocation of Distributed Generation using Genetic Algorithm*. Paper presented at the 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU. Barcelona.
- Kersting, W. (1991). Radial distribution test feeders. *IEEE Transactions on Power Systems*, (6), 3, 975–985.
- Maqbool, S., Babar, M. & Al-Ammar, E. (2011, December). *Effects of demand elasticity and price variation on load profile*. Paper presented at the IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies - Middle East (pp. 1–5).
- Martínez, J. & Martín-Arnedo, J. (2009, July). *Impact of distributed generation on distribution protection and power quality*. Paper presented at the IEEE Power & Energy Society General Meeting (pp. 1–6).
- Mashau, T. & Kibaara, S. (2011, September). *Impact of Distributed Generation on Protection*

Coordination in a Radial Distribution Feeder.
Paper presented at the 46th International Universities Power Engineering Conference.

Ministerio de Minas y Energía – Colombia. (1996). *Resolución número 086 de 1996.* Bogotá D.C.

Quezada, V., Abbad, J. & Román, T. (2006). Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21, 2, 533–540.

Rahimi, F. & Ipakchi, A. (2010). Demand response as a market resource under the smart grid paradigm. *Smart Grid, IEEE Transactions*, (1), 1, 82–88.

Surisunthon, S. & Tayjasanant, T. (2011, May). *Impacts of distributed generation on voltage sag assessment in distribution systems.* Paper presented at the 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011 (pp. 889–892).

Valero, S., Ortiz, M. & Senabre, C. (2007). Methods for customer and demand response policies selection in new electricity markets. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 1, 104 – 110.

Wang, C. & Nehrir, M. (2004). Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems. *Power Systems, IEEE Transactions*, 19, (4), 2068–2076.

Zheng, L., Zhang, Y. & Lin, L. (2012, March). *Studies on Voltage Sag in Distribution Network Containing Distributed Generations.* Paper presented at the 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (pp. 1–5).

Zhou, X., Liang, J. & Zhou, W. (2012, June). Harmonic impacts of inverter-based distributed generations in low voltage distribution network. Paper presented at the 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG) (pp. 615–620).