



Comité Nacional Venezolano

II CONGRESO VENEZOLANO DE REDES Y ENERGÍA ELÉCTRICA

Junio 2009

C6-102

IMPACTO DEL MODO DE INTEGRACIÓN DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA REGULACIÓN DE VOLTAJE Y PÉRDIDAS DE POTENCIA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

F. González-Longatt* A. Hernández* F. Guillen*
R. Terán** C. Peraza*** E. Gavorskis*

* Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Maracay, 2122, Venezuela. Grupo de Investigaciones Avanzadas en Energía Eléctrica, giaELEC, <http://www.giaelec.org>

** Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Eléctrica, Valencia, Venezuela

*** Instituto Tecnológico Valencia, Departamento de Eléctrica, Valencia, Venezuela

RESUMEN

La posible integración de la generación distribuida en las redes eléctricas, ha creado la necesidad de utilizar técnicas de optimización, para determinar tanto la capacidad de generación distribuida como la localización de estos generadores dentro de una red existente, a fin de no violar las restricciones técnicas impuestas por estas redes. Por tal razón, este trabajo se estudia el impacto del modo de integración de la generación distribuida en la regulación de voltaje y pérdidas de potencia de la red de distribución, todo esto haciendo uso de una herramienta computacional “LoptiGD” para la ubicación óptima de fuentes de generación. En esta investigación, se presentan algunos criterios de integración que pueden ser considerados para instalar generación distribuida en un sistema eléctrico y se emplean los indicadores clásicos para medir el impacto de dicha integración. Además se presentan las simulaciones de un sistema de 15 barras, en el cual se utilizó el criterio de integración por prioridad de carga y se muestran los análisis de resultados de las simulaciones y las conclusiones alcanzadas.

PALABRAS-CLAVE

Generación Distribuida, Impacto, Pérdidas, Regulación de Voltaje, Simulación, Ubicación óptima.

1. Introducción

En la actualidad se disponen de tecnologías que permiten la generación de electricidad, empleando plantas clasificadas como relativamente pequeñas comparada con la generación convencional, y sus costos son menores por cada MW generado [1]. Típicamente, estas tecnologías constituyen un sistema de generación comúnmente llamado generación distribuida. La generación distribuida es considerada como una fuente de potencia eléctrica conectada al sistema eléctrico, en un punto muy cercano o en la ubicación del consumidor ya sea del lado de éste o de la red, que es suficientemente pequeño comparado con las plantas centralizadas [2].

La integración de la generación distribuida en redes, puede tener un impacto significativo en la operación de equipos y sistemas en términos de funcionamiento de estado estable, régimen dinámico, confiabilidad, calidad de la energía, estabilidad y seguridad, tanto para los consumidores como para los suplidores de energía [1]. Este impacto puede manifestarse, tanto en forma positiva como negativa, dependiendo de la red, la tecnología empleada como generación distribuida y las características de la carga.

Una vez que se integra la generación distribuida en una determinada red, los flujos de potencia pueden ser modificados, pudiendo incluso cambiar de dirección. Esto puede conducir a un número importante de problemas, que pueden afectar varios aspectos: técnicos y económicos.

La posible integración de la generación distribuida, han creado la necesidad de utilizar técnicas para optimizar tanto la capacidad de generación distribuida como la localización de estos generadores dentro de una red existente [3], con el objetivo de no violar las restricciones impuestas por tales redes.

Las restricciones que deben ser consideradas en la elección de la capacidad y la localización de la generación distribuida, incluyen consideraciones técnicas y económicas [3], [4]. Las consideraciones técnicas incluyen la adecuación de la potencia inyectada por parte de la fuente de generación distribuida en la red, a fin de no modificar los niveles de voltaje para garantizar tanto la seguridad como la calidad del suministro de energía, además de no crear pérdidas adicionales de potencia al sistema, no violar los niveles de cortocircuito de la red y de los equipos conectados en ella.

Las consideraciones económicas incluyen entre otras; el costo de la generación distribuida [3], los costos de instalación, los gastos de funcionamiento, los ingresos y las expectativas del valor de la reducción de pérdidas de potencia en la red.

En este contexto, en esta investigación se realizó una evaluación del efecto que tiene la localización óptima de las fuentes de generación distribuida sobre el perfil de voltaje y las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico, haciendo uso de simulaciones computarizadas sobre ciertas redes de prueba.

2. Criterios de Integración de la Generación Distribuida

Actualmente, existe una significativa incertidumbre en el modo en que la generación distribuida, va a ir integrándose en los sistemas eléctricos de potencia [5]. Es por ello, que para establecer las barras en que la generación distribuida ha de ser instalada se deben definir criterios de integración.

En vista de la inexistencia de un acuerdo en los aspectos mencionados, en esta investigación se han adoptado una serie de consideraciones a fin de definir tres (3) criterios de integración de las fuentes de generación distribuida, los cuales consideran las barras en las que ha de ser instalada dichas unidades: Criterio I: Prioridad de Carga, Criterio II: Iniciativas del Consumidor, Criterio III: Consideraciones de la Red.

– *Criterio I: Prioridad de Carga*

Un enfoque empleado en la integración de la generación distribuida, se basa en que la instalación es empleada para cubrir parte de la carga local y exportar. Y esto resulta atractivo especialmente en el caso de los consumidores con gran demanda de potencia. La primera barra donde se integra generación distribuida será la que posee mayor demanda y la última es la barra donde hay menor demanda [5].

– *Criterio II: Iniciativas del Consumidor*

La localización de las unidades de generación distribuida, depende de las necesidades del consumidor del servicio eléctrico, y de su ubicación dentro de la red. Esto hace que las consideraciones de integración en relación a las barras en donde colocar la generación distribuida sea complejo, ya que se desconoce el número de consumidores que desean instalar generación distribuida para servir su carga y su ubicación dentro de la red. Además, cada consumidor puede integrar las unidades de forma: (i) No coordinada, (ii) Desorganizada, (iii) No predecible. Estos aspectos indican que las unidades se integran en el sistema de acuerdo a un fenómeno aleatorio. Por lo tanto para realizar este estudio, se integraron las unidades de generación distribuida según un orden aleatorio.

– *Criterio III: Restricciones de la Red*

Este criterio considera un estudio en los niveles del voltaje para ubicar las unidades de generación distribuida y se basa en realizar un análisis previo de sensibilidades individuales de voltajes ante inyecciones de potencia activa. Para ello, el orden de prioridad de despacho en las barras se realiza en las barras que son más sensibles a inyección de potencia, por lo tanto las últimas barras donde será instalada la generación distribuida son aquellas menos sensibles a inyección de potencia.

3. Indicador de Integración

– *Nivel de Dispersión*

El nivel de dispersión de la generación distribuida es la relación del número de barras en los cuales existe generación distribuida (*#BarrasGD*) y el número de barras en los cuales existe el consumo de potencia (*#BarrasCarga*).

$$ND = \frac{\# BarrasGD}{\# BarrasCarga} \times 100\% \quad (1)$$

Cuando el nivel de dispersión es 0.0%, sólo se considera la generación centralizada, y 100.0% significa que todas las barras con carga poseen generación distribuida (*#BarrasGD = #BarrasCarga*) [7].

4. Caso de estudio

Las redes de prueba utilizadas en las simulaciones para evaluar el efecto de la ubicación óptima de las fuentes de generación distribuida sobre las pérdidas de potencia y la regulación de voltaje fueron redes de distribución trifásicas. Se seleccionó la red de prueba Kumamoto, Japón presentada en [9]. Las unidades de generación distribuida utilizadas para las simulaciones, con el fin de alcanzar el objetivo final de esta investigación fueron máquinas sincrónicas de 7.801MVA a 13.8kV.

Se realizaron distintas simulaciones para los tres (3) criterios de integración definidos, estas máquinas fueron utilizadas en modo generador. Los factores de potencia en que fueron operadas las unidades de generación distribuida para todas las simulaciones son: (i) Factor de potencia unitario (Sin capacidad de generar reactivos), (ii) Factor de potencia 0.8 y 0.9 consumiendo reactivos, y (iii) Factor de potencia 0.8 y 0.9 generando reactivos.

5. Resultados de las simulaciones de ubicación óptima

Por consideraciones de espacio sólo serán mostrados los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para determinar la ubicación óptima utilizando la herramienta computacional denominada *LoptiGD*, desarrollada en [11], considerando el Criterio I y la red de prueba de Kumamoto, Japón [9].

Para determinar la ubicación óptima, se consideró una integración creciente de la generación distribuida, es decir para cada simulación se integró una nueva unidad de generación distribuida en la barra que resultó ser prioridad de integración de acuerdo al criterio seleccionado.

Considerando el Criterio I, el orden de integración de las unidades en las barras del sistema de prueba resultó ser: 11, 4, 7, 3, 5, 8, 10, 9, 2, 14, 15, 12, 6, 13. Este orden, significa que la Barra 11, es la que posee mayor demanda de carga y la Barra 13 posee la menor demanda de carga conectada. La ubicación

óptima fue determinada considerando la primera unidad de generación distribuida conectada en la barra 11, posteriormente se consideró unidades conectadas en la barra 11 y 4, seguidamente en las barras 11, 4 y 7, y así sucesivamente hasta considerar todas las barras del sistema.

6. Criterio I: Prioridad de Carga

– Unidades con factor de potencia unitario

En la Fig. 1, se muestran los resultados obtenidos de la ubicación óptima, con factor de potencia unitario para todos los niveles de dispersión considerados.

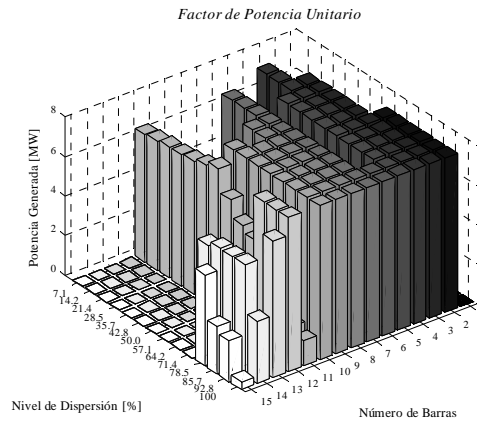


Fig. 1. Resultado de ubicación óptima (P_{GDi}) de las unidades de generación distribuida $fp=1$: Red 1, Criterio I.

En el proceso de optimización se desea maximizar la capacidad instalada de generación distribuida sin que se violen las restricciones impuestas. En este sentido, se tiene que la ubicación óptima de las unidades de generación considerando factor de potencia unitario, es posible en todas las barras del sistema (Fig 1). En la mayoría de estas barras, los resultados obtenidos son iguales a la potencia nominal de la unidad de generación distribuida (7.801MW)

– Unidades de generación distribuida consumiendo reactivos

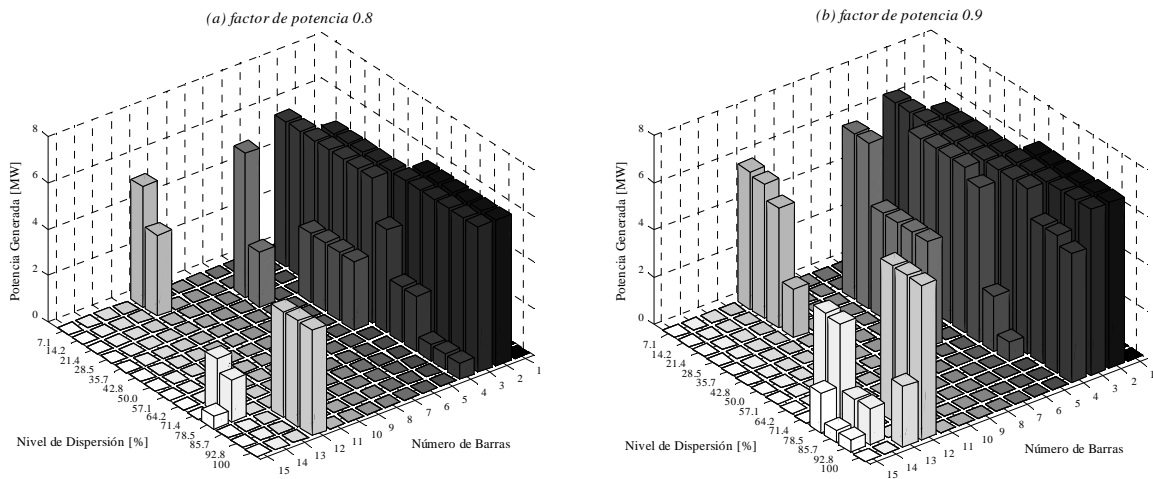


Fig. 2. Resultado de ubicación óptima (P_{GDi}) de las unidades de generación distribuida consumiendo reactivos: Red 1, Criterio I.

En la Fig. 2, se muestran los resultados obtenidos de la potencia activa a ser generada por la unidad de generación distribuida consumiendo reactivos, con factor de potencia 0.8 y 0.9 mediante el proceso de optimización para todos los niveles de dispersión considerados.

En la Fig. 2.b (factor de potencia 0.9), se percibe que la potencia generada en las barras es mayor en comparación con la mostrada en la Fig 2.a (Factor de potencia 0.8). Además se observa que existen algunas barras con potencia generada igual a cero, lo que significa que no es necesario conectar generación distribuida para lograr la optimización.

– *Unidades de generación distribuida generando reactivos*

En la Fig. 3, se muestran los resultados obtenidos de la potencia activa a ser generada por la unidad de generación distribuida entregando reactivos a factor de potencia 0.8 y 0.9, mediante el proceso de ubicación óptima para todos los niveles de dispersión considerados.

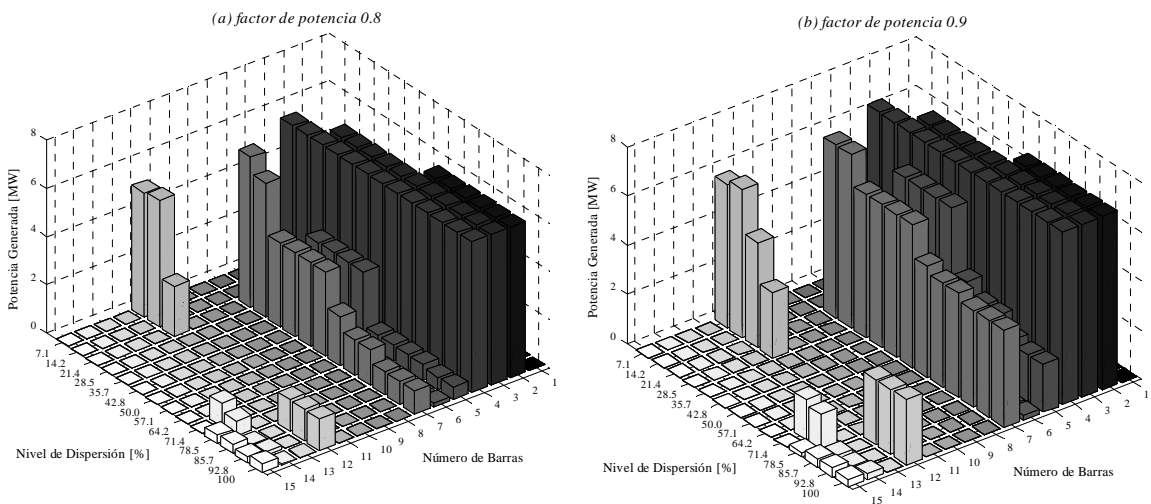


Figura 3. Resultado de ubicación óptima (P_{GDi}) de las unidades de generación distribuida generando reactivos: Red 1, Criterio I

7. Efecto de la ubicación Óptima y la regulación de voltaje

Una vez obtenida la ubicación óptima de las fuentes de generación distribuida, para cada factor de potencia considerado, se procede a realizar un estudio de régimen estacionario en la red de prueba, inyectando la potencia activa (P_{GDi}) con cada factor de potencia. Esto, con el fin de evaluar el efecto en las pérdidas de potencia y la regulación del voltaje.

Para evaluar el impacto de la ubicación óptima de las fuentes de generación distribuida sobre esta red de prueba, se utilizó el indicador global del perfil de voltaje. El cual considera el caso en que no es instalada generación distribuida (caso base). En la Fig 4, se observa comportamientos similares del índice global del perfil de voltaje para las unidades de generación distribuida generando reactivos para factores de potencia 0.8 y 0.9. Para estos factores de potencia, se percibe que al aumentar el nivel de dispersión los voltajes tienden a 1.05 p.u, debido a que esta fue una restricción impuesta en el proceso de ubicación óptima.

Reconociendo que el índice del perfil de voltaje, es un indicador global que oculta valores extremos, ya que significa el comportamiento general (promedio) de los perfiles de voltajes de todas las barras de la red, con la integración de la generación distribuida, se observa que los resultados superan el límite impuesto como restricción en el voltaje (1.05 p.u), pero esto no sucede para todas las barras del sistema.

Es importante destacar que sólo para ciertas barras (barras más sensibles 14 y 15) se observó que límite máximo en el voltaje es superado, ya que durante la optimización se realiza una *aproximación lineal* de las características de sensibilidades, y con estos resultados se calcula la ubicación óptima. Sin embargo la relación entre la potencia activa y los perfiles de voltaje es no lineal.

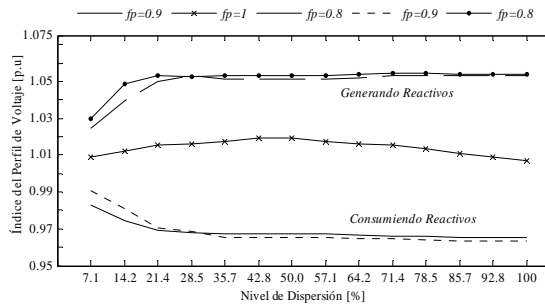


Fig. 4. Índice de perfil de voltaje [p.u] para cada nivel de dispersión, considerando distintos modos de control de reactivos. Criterio I. Red 1.

Para el caso donde las unidades de generación distribuida consumen potencia reactiva, se observa que los voltajes de barra disminuyen a medida que aumenta el nivel de dispersión. Estos voltajes tienden al valor de 0.95 p.u, que fue el límite impuesto en el voltaje mínimo para determinar la ubicación óptima.

Se observa la mejor regulación del voltaje para factor de potencia igual a la unidad considerando todos los niveles de dispersión. Para este caso, se nota que los voltajes se mantienen cercanos al valor nominal de la red (1.0 p.u).

8. Efecto sobre las Pérdidas

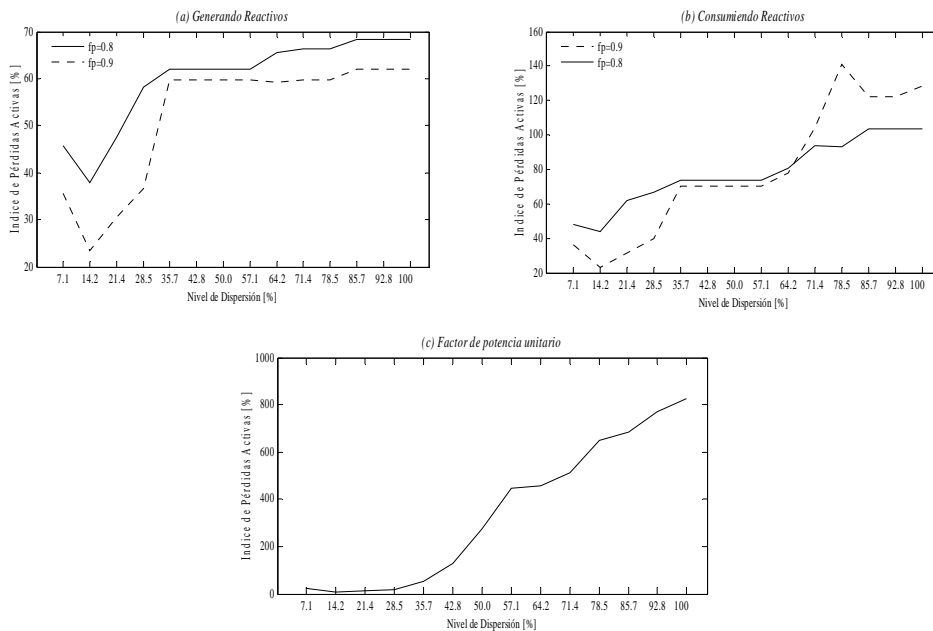


Figura 5. Índice de pérdidas totales de potencia activa [%], para cada nivel de dispersión, considerando distintos modos de control de reactivos. Criterio I. Red 1.

Se utilizó los indicadores de pérdidas de potencia activa y reactiva para evaluar el impacto de la ubicación óptima de las fuentes de generación distribuida sobre la red de prueba considerada. En la Figura 5, se muestra el comportamiento del índice de pérdidas de potencia activa.

En la Figura 5(a), se observa mejores comportamiento en las pérdidas de potencia activa para niveles de dispersión bajos, pero para niveles de dispersión ideales las pérdidas aumentan.

Cuando el índice de pérdidas activas es mayor a 100%, significa que las pérdidas totales del sistema aumentan con la integración de generación distribuida en comparación con el caso donde el sistema no posee instaladas estas unidades.

En este caso se observa en la Figura 5(a), que las pérdidas de potencia activa disminuyen para todos los niveles de dispersión.

Se observa mejores comportamientos en las pérdidas de potencia activa con las unidades generando reactivos para factor de potencia 0.9, se percibe que las pérdidas son mínimas para el nivel de dispersión igual a 14.2 %.

También se nota en la Figura 5(a), que para ciertos niveles de dispersión (35.7%, 42.8%, 50.0% y 57.1%), las pérdidas de potencia se mantienen constantes, debido a que para estos casos el nivel de penetración es el mismo, ya que la generación distribuida en algunas barras del sistema de prueba es limitada por las restricciones impuestas por la red.

En la Figura 5(b), se observa que las unidades de generación consumiendo potencia reactiva, las pérdidas totales de potencia activa aumentan a medida que el nivel de dispersión incrementa, e incluso el valor obtenido para estos niveles de dispersión ideal supera el 100%, el cual indica que las pérdidas obtenidas son mayores que las obtenidas en el caso base.

Sin embargo, se alcanzó que las pérdidas son mínimas considerando factor de potencia 0.9, y para nivel de dispersión de 14.2%

De manera general, se observan mejores comportamientos de las pérdidas de potencia activa para factores de potencia cercanos a la unidad y para niveles de dispersión bajos.

Esto es evidente, en la Figura 5(c), donde se han obtenido las pérdidas mínimas en comparación con todos los casos simulados, considerando factor de potencia unidad.

9. Conclusiones

En esta investigación, se determinó la ubicación óptima de las unidades empleadas como generación distribuida en redes de prueba, para cada criterio de integración definido (Prioridad de Carga, Iniciativas del Consumidor y Consideraciones de la Red), considerando diferentes modos de control de reactivos y distintos factores de potencia.

Las analogías o semejanzas encontradas en la aplicación de estos criterios de integración, en relación al cálculo de ubicación óptima de las unidades de generación distribuida son:

- Siempre se maximiza la capacidad de generación distribuida en las barras menos sensibles a inyecciones de potencia activa. Típicamente, estas barras se encuentran próximas a la generación centralizada.
- A medida que incrementa el nivel de dispersión, la capacidad de total de potencia activa generada por las unidades incrementa.
- En las barras menos sensibles a inyecciones de potencia, la capacidad de generación distribuida se ve limitada por la restricción en el voltaje, ya que estas encuentran un límite de inyección de potencia para no violar esta restricción.

Por otra parte, se tiene que las diferencias encontradas en la aplicación de estos criterios de integración, en relación al cálculo de ubicación óptima de las unidades de generación distribuida radica en:

- El orden en que se integran las unidades en las barras del sistema es diferente para cada criterio de integración, según este orden se determina la ubicación óptima.
- Dependiendo del orden de prioridad de integración, se limita la capacidad de generación distribuida en algunas barras donde se conectan estas fuentes, considerando las condiciones de operación de las unidades y las restricciones técnicas impuestas en el proceso de optimización.

Por otra parte, al integrar las fuentes de generación distribuida en estos sistemas de prueba, sin capacidad de generar reactivos (factor de potencia unitario), se observó que la ubicación óptima es posible en casi todas las barras de estos sistemas, ya que no son violadas las restricciones impuestas en el proceso de optimización. Este resultado fue obtenido para cada criterio de integración.

La restricción en el voltaje hace que se maximice la capacidad de generación en todas las barras para esta condición de operación de las unidades. Los perfiles de voltaje se mantienen cercanos al valor nominal de la red (1.0 p.u), entonces a mejor factor de potencia se tendrá mejores perfiles de voltaje.

Con la operación de las unidades de generación distribuida consumiendo y generando reactivos, se observó que existen barras donde se limita la ubicación óptima de las unidades de generación distribuida, debido a los límites impuestos en el voltaje (0.95 p.u y 1.05 p.u). Esto es importante, para que el sistema se mantenga en regulación.

Con la evaluación de la ubicación óptima sobre los atributos del sistema, los perfiles de voltaje de los sistemas de distribución mejoran, pero el comportamiento de las pérdidas totales del sistema para niveles de dispersión bajos, depende del orden de prioridad de integración en las barras de la red, ya que de acuerdo a esto, las pérdidas pueden aumentar o disminuir, por esta razón es necesario definir el modo de integración de las unidades y evaluar en que combinación de barras es óptimo integrar generación distribuida.

Para niveles de dispersión ideales las pérdidas activas aumentan, para cualquier modo de control de reactivos. Lo contrario sucede con las pérdidas reactivas que obtiene sus valores mínimos.

10. Referencias Documentales

- [1] F. González Longatt F “Impact of Distributed Generation over Power Losses on Distribution System”. *9th International Conference, Electrical Power Quality and Utilisation*, Barcelona, España 9-11 Octubre 2007.
- [2] F. González Longatt. “Review of the Distributed Generation: Attempt of Unification”. *Presentado en el International Conference on Renewable Energy and Power Quality*. Zaragoza. España, 2005.
- [3] T. Khoa, P. Binh, and H. Tran, “Optimizing Location and Sizing of Distributed Generation in Distribution Systems” *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela, 2006*
- [4] Andrew Keane; Mark O’Malley. “Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks”. *IEEE Transactions on Power Systems* Volume 20, Issue 3, Aug. 2005 Page(s): 1640 – 1646.
- [5] F. González Longatt F “Aspectos de Regulación de la Integración de la Generación Distribuida”. *Grupo de Investigaciones Avanzadas en Energía Eléctrica*, Maracay Venezuela, Enero 2008, Disponible en: www.giaelec.org
- [6] Luis F. Ochoa, *Student Member, IEEE*, Antonio Padilha-Feltrin, *Member, IEEE*, and Gareth P. Harrison, *Member, IEEE*. Evaluating Distributed Generation Impacts With a Multiobjective Index. *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 21, No. 3, July 2006
- [7] Caisheng Wang, M. Hashem Nehrir, *Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems*.
- [8] P. Chiradeja and R. Ramakumar, “An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 19, No. 4, December 2004
- [9] S. Li, Tomsovic, and T. Hiyama, “Load Following functions using distributed energy resources”, *Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting*, Seattle. July 2000

- [10] Ocque L., “Método Grafo-Orientado Aplicado al flujo de Carga Trifásico en Redes Radiales de Distribución. *Trabajo Especial de Grado para Optar al Título de Magíster en Ingeniería Eléctrica, Universidad Simón Bolívar*, Caracas, Venezuela. 2006.
- [1] Marchena W, Ornelas C, “Desarrollo de una Herramienta Computacional en MATLABTM para la Localización Óptima de Fuentes de Generación Distribuida en Redes de Distribución” *Trabajo especial de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electricista, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional*, Maracay, Venezuela. 2006.