



Metodología para la Ubicación Óptima de Fuentes de Generación Distribuida empleando Programación Lineal

F. Gonzalez-Longatt¹, C Ornelas¹, W. Marchena¹, F. Guillen¹, A. Hernandez¹
¹Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional

RESUMEN

El objetivo de este artículo es mostrar una metodología que permita determinar la localización óptima de fuentes de generación en redes eléctricas, orientado en el objetivo de determinar el mayor aprovechamiento de la capacidad total de generación disponible en la red. La metodología mostrada en este artículo, parte de conocer las condiciones de balance generación-carga, para un estado inicial de la red en el que solo se considera generación centralizada. Luego se procede a efectuar un análisis de sensibilidad en las barras para condiciones operativas de régimen estacionario y en condiciones de falla: se determinan las sensibilidades individuales de voltajes en las barras ante las distintas inyecciones de potencias y las interdependencias de voltajes; y luego se determina la dependencia de los niveles de cortocircuitos en la barra con generación centralizada ante las inyecciones de potencias realizadas en el resto de las barras que conforman a la red, junto con las interdependencias de los niveles de cortocircuito. Se plantea la función objetivo que persigue maximizar la sumatoria de la capacidad de generación de las fuentes de generación distribuida (FGD). Y se proceden a definir el conjunto de restricciones: (1) restricción por capacidad de corriente máxima del conductor que conecta la FGD con la red, (2) restricción de niveles de cortocircuito en la barra, (3) restricción en la relación de niveles de cortocircuito, (4) restricción de regulación de voltaje las barras ante las inyecciones de potencia por parte de las FGD, (5) restricción correspondiente a los límites del recurso de energía disponible e iniciativas del cliente. Finalmente, el problema de optimización es resuelto aplicando programación lineal. La metodología propuesta para la localización óptima de FGD fue implementada en un programa empleando rutinas ya ampliamente probadas para programación lineal, y este programa se empleó para efectuar simulaciones sobre redes de prueba. En este artículo se muestran los resultados de las simulaciones, donde se evidencia el correcto desempeño de la metodología planteada.

PALABRAS CLAVE

Fuente de generación distribuida, ubicación óptima de generación, programación lineal.

INTRODUCCIÓN

La generación distribuida comprende pequeñas unidades de generación de electricidad que pueden estar ubicadas en puntos muy cercanos a los consumidores, del lado de éste o de la red de distribución [3]. La tecnología utilizada por éstas generalmente incluye motores pequeños, incluyendo micro turbinas, celdas de combustible y módulos fotovoltaicos, es decir, se busca la utilización de recursos renovables como fuente primaria de energía, a fin de cumplir con el protocolo de Kyoto en la reducción de las emisiones de gases y el efecto invernadero en el medio ambiente [4].

La generación distribuida es una realidad en buena cantidad de países del mundo, posee ventajas como: Brinda al sistema de distribución una mayor flexibilidad, hace posible posponer las extensiones de líneas de transmisión y distribución, permite un mejor y más uniforme despacho de carga, reduce la magnitud de la capacidad de reserva requerida y para los usuarios representa un servicio más confiable y de mejor calidad. Algunos detractores, sin embargo agumentan algunos aspectos en contra de la generación distribuida: genera armónicas en el caso de emplear interfaces con inversores, complica la operación de los dispositivos reguladores de voltaje, incrementa el riesgo de presencia de ferresonancia, introduciendo flickers desde la generación, y afecta las coordinaciones de protecciones.

En tal sentido la conexión de generación distribuida en los sistemas eléctricos genera una serie de situaciones potencialmente problemáticas.

En particular las redes de distribución no son usualmente diseñadas para la conexión de dispositivos de generación de potencia, ya que estos sistemas son de tipo radial, cuyo flujo de potencia es unidireccional; sin embargo al integrar la generación distribuida el suministro de energía eléctrica puede fluir en forma bidireccional, presentando inconvenientes [3]. Es evidente que entre los problemas que surgen al integrar la generación distribuida en las redes tradicionales, esta su localización.

En gran forma el impacto (positivo o negativo) que tiene la generación distribuida depende de la magnitud y ubicación de las fuentes. El problema de búsqueda de la localización óptima de fuentes de generación distribuida, ha sido ya estudiado y desarrollado mediante distintas metodologías, tratadas en [5], [6], [7].

Sin embargo, es evidente la falta de consistencia que han tenido las metodologías antes indicadas, puesto que no tratan en conjunto todas las restricciones técnicas a ser consideradas para el logro de una localización óptima de fuentes de generación distribuida [2].

En este artículo tiene por objetivo mostrar una metodología alternativa obtener la localización óptima de fuentes de generación distribuida en cualquier red de distribución eléctrica, donde este algoritmo se fundamenta en la maximización de una función objetivo la cual representa la capacidad de generación distribuida sujeta a las siguientes restricciones técnicas: restricción térmica, posición de los equipos, efecto de sobrevoltaje, recursos de energía disponible e iniciativa del cliente. La metodología mostrada parte de conocer las condiciones de balance generación-carga, para un estado inicial de la red en el que solo se considera generación centralizada.

METODOLOGÍA DE UBICACIÓN OPTIMA

Esta metodología asegura el uso óptimo de los recursos existente en la red, de modo que ayuda a cumplir ese objetivo en una manera efectiva. Una localización de GD existe para cada sección de la red. La capacidad de generación debería ser localizada a lo largo de las barras que en ningún caso violan las restricciones técnicas y la capacidad de generación es maximizada. De

tal modo, la función objetivo de este problema de optimización se encuentra representada por la siguiente ecuación, la cual es maximizar la sumatoria de la capacidad de generación de la FGD (P_{GD}) inyectada en la i -ésima barra de la red, ésta será medida en unidades reales de potencia activa (MW).

$$J = \sum_{i=1}^N P_{GD_i} (MW) \quad (1)$$

Donde:

P_{GD_i} : Capacidad de generación distribuida en la i -ésima barra de la red
 N : Número de barras en la red.

A continuación se discuten cada una de las restricciones técnicas a la que es sometida la función objetivo planteada en la resolución del problema de ubicación óptima de fuentes de generación distribuida.

Restricción Térmica

Esta corresponde a la restricción correspondiente a la capacidad de corriente que tendrá el conductor que conecta la FGD con la red. Y así mismo para el caso en que sea requerido un transformador, para los casos en que se trate de un generador con tensión nominal menor o mayor a la que este operando la red de distribución. Esto es, la corriente que fluya desde la FGD hacia la barra de la red, no debe ser mayor a la corriente nominal que puede soportar el conductor que las conecte.

$$I_i \leq I_i^{nominal} \quad (2)$$

Donde:

I_i : Corriente que fluye desde el generador i a la barra i
 $I_i^{nominal}$: Corriente nominal de la línea entre el generador i y la barra i .

Bajo condiciones normales de voltaje y factor de potencia, la corriente de la línea puede ser directamente lograda por la potencia activa que circula por esa línea.

Restricción Correspondiente a los Niveles de Cortocircuito

Esta representa, el nivel de corriente de cortocircuito que asegura que no viole los límites de los equipos asociados al aumentar la capacidad de generación instalada, [4]. El nivel de cortocircuito más elevado será el que se obtendrá en la barra de generación centralizada, por lo que podrá ser visto que las barras de la red que se encuentren próximas a ésta encontrarán su capacidad limitada. La restricción viene dada por, [4]:

$$SCL_{Tx} < SCL_{nominal} \quad (3)$$

Donde:

SCL_{Tx} : Es el nivel de cortocircuito en la barra de referencia.
 $SCL_{nominal}$: Representa el valor de corriente a la que el interruptor de barra puede operar de forma segura bajo condición de falla.

A fin de realizar la relación de esta restricción con la variable de potencia generada por la generación distribuida (P_{GD}) a maximizar por parte de la función objetivo, las contribuciones del nivel de cortocircuito por parte de la generación en cada una de las barras, son combinadas y formalizadas en la siguiente ecuación algebraica, [4], en la cual puede observarse claramente la linealidad presente.

$$\sum_{j=1}^N \delta_{jTX} P_{GD_j} + \alpha_{TX} \leq SCL_{nominal} \quad (4)$$

Donde:

δ_{jTx} : Es la dependencia del nivel de cortocircuito en la barra de referencia para inyecciones de potencia en la j -ésima barra de la red.

P_{GDj} : Potencia inyectada desde la barra j -ésima.

α_{Tx} : Valor inicial de SCL en la barra de referencia sin generación presente.

$SCL_{nominal}$: Representa el valor de corriente a la que el interruptor (kA), de barra puede operar de forma segura bajo condición de falla.

Restricción correspondiente a la proporción de potencia de la FGD

Esta representa la P_{GD} (MW) en cada una de las barras al nivel de cortocircuito en cada barra SCL (MVA_{CC}). Este da una indicación de la variación que sufre la pendiente del voltaje cerca de la generación en caso de una interrupción del alimentador, [4].

$$\frac{P_{GD_i}}{SCL_i \cos \phi} \times 100 \leq 10\%; i \forall N \quad (5)$$

Donde:

SCL_i : Se refiere al nivel de cortocircuito en la i -ésima barra.

$\cos \phi$: Factor de potencia del generador.

El nivel de cortocircuito para la i -ésima barra de la red con respecto a cada valor de P_{GD} inyectado por parte de las FGD, es mostrada, en la siguiente ecuación, [4], es importante destacar, que este cálculo de cortocircuito corresponde al realizado a fin de obtener las contribuciones del SCL (MVA_{CC}) de generación en cada una de las barras de la red, representadas por el parámetro δ_{ji} (MVA_{CC}), destacando que los valores de este parámetro para las barras donde está inyectándose potencia por parte de la FGD no serán considerados, [4].

$$SCL_i = \alpha_i + \sum_{j=1}^N \delta_{ji} \times P_{GDj}; i \neq j \quad i \forall N \quad (6)$$

Sustituyendo (5) en (6). Se tiene la restricción que representara al SCR , lo cual puede observarse que al igual que el resto de las restricciones, presenta la característica de linealidad, así como también su relación con la variable a ser maximizada P_{GD} .

$$P_{GD_i} - 0.1 \cos \phi \sum_{j=1}^N \delta_{ji} P_{GDj} \leq 0.1 \cos \phi \times \alpha_i \quad (7)$$

Donde:

P_{GD_i} : Potencia inyectada por la FGD en la i -ésima barra de la red.

$\cos \phi$: Factor de potencia del generador.

δ_{ji} : Interdependencias de los niveles de cortocircuito.

α_i : Valor del nivel de cortocircuito (MVA_{CC}), en la i -ésima barra de la red sin considera conexión de FGD.

Restricción correspondiente a las variaciones de tensión en las barras de la red ante las inyecciones de potencia por parte de las FGD

El incremento del flujo de potencia activa sobre las redes de distribución, tienen un gran impacto sobre el nivel de voltaje, esto debido a que el elemento resistivo en las líneas de las redes de distribución son mas altas que en otras líneas, [4]. Esto conduce a presentarse una proporción X/R de aproximadamente 1, mas que el valor típico de 5 en líneas de transmisión. Visto esto, debe mantenerse entonces el voltaje bajo unos límites estándar en cada barra de la red, [4], por lo que por medio de la restricción mostrada a continuación, se ve tratado tal punto.

$$V_{\min i} \leq V_i \leq V_{\max i}, i \forall N \quad (8)$$

Donde:

$V_{\min i}$: Limite de voltaje mínimo en la i -ésima barra de la red.

V_{max} : Limite de voltaje máximo en la i -ésima barra de la red.

A fin de relacionar esta restricción correspondiente al efecto que presenta la inyección de potencia por parte de las FGD (P_{GD}), sobre los perfiles de voltaje obtenidos una vez aplicado el flujo de potencia, se evidencia lo explicado en el cálculo automatizado del flujo de potencia, donde se trató el incremento que sufre el voltaje a medida de que la potencia que es inyectada aumenta. Esto es examinado, obteniendo los resultados de los parámetros μ_i, μ_{ji} . Combinando las características tratadas para obtener la relación de la potencia con el efecto de subida del voltaje, la restricción representativa a este estudio puede ser formalizada de la siguiente forma, [4]:

$$\mu_i P_{GD_i} + \beta_i + \sum_{j=1}^N \mu_{ji} P_{GD_j} \leq V_{max_i} \quad i \neq j, i \forall N \quad (9)$$

Donde:

μ_i : Dependencia del nivel de voltaje en la barra i respecto a la potencia inyectada en la barra i .

β_i : Se refiere al valor inicial de voltaje en la barra i sin generación conectada.

μ_{ji} : Se refiere a la dependencia del nivel de voltaje en la barra i respecto a la potencia inyectada en la barra j .

Restricción correspondiente a los límites del recurso de energía disponible e iniciativas del cliente

Todas las barras presentes en la red no pueden tener un recurso substancial de energía disponible. Esto puede ser contrarrestado añadiendo para cada barra de la red una restricción que limite la localización del recurso de energía disponible en cada barra, [4].

De modo que la ecuación de la restricción es realizada de la siguiente forma:

$$P_{instalada_i} \leq P_{GD_i} \leq P_{disponible_i}, i \forall N \quad (10)$$

Donde:

$P_{instalada_i}$: Es la generación existente en la i -ésima barra.

$P_{disponible_i}$: Es el recurso de energía disponible en la i -ésima barra.

SIMULACIÓN Y RESULTADOS

La metodología propuesta en la sección anterior para la solución del problema de ubicación óptima de fuentes de generación distribuida es resumida en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 1.

Un programa en Matlab™ fue codificado a fin de implementar la metodología descrita en este artículo; recibe el nombre de *LoptiGD*, siendo su principal objetivo la Localización óptima de Generación Distribuida. Para el calculo de las restricciones, se automatizo un proceso, en donde se implemento una rutina para el calculo de flujo de potencia que aplica del método de Newton Raphson, y novedoso en este es que se considera la presencia de generadores asincrónicos, bajo la aplicación del método RX, [12], y PQs, [13]. Así mismo se incluyo los modelos adecuados para considerar la dependencia de voltaje en cada una de las cargas estáticas presentes en la red, por medio de la representación de éstas por el modelo polinomial, [14]. De igual modo, se implementó una rutina para cálculo de cortocircuito considerado los modelos detallados para la maquina sincrónica y asincrónica. El problema de optimización formulado en el programa es resuelto a través de la técnica de programación lineal, y para ello se empleo la caja de herramientas de optimización que brinda MATLAB™, sientio todas las restricciones de una

característica lineal o aproximadamente lineal con respecto al incremento de las inyecciones de potencia realizado por parte de las FGD, [4].

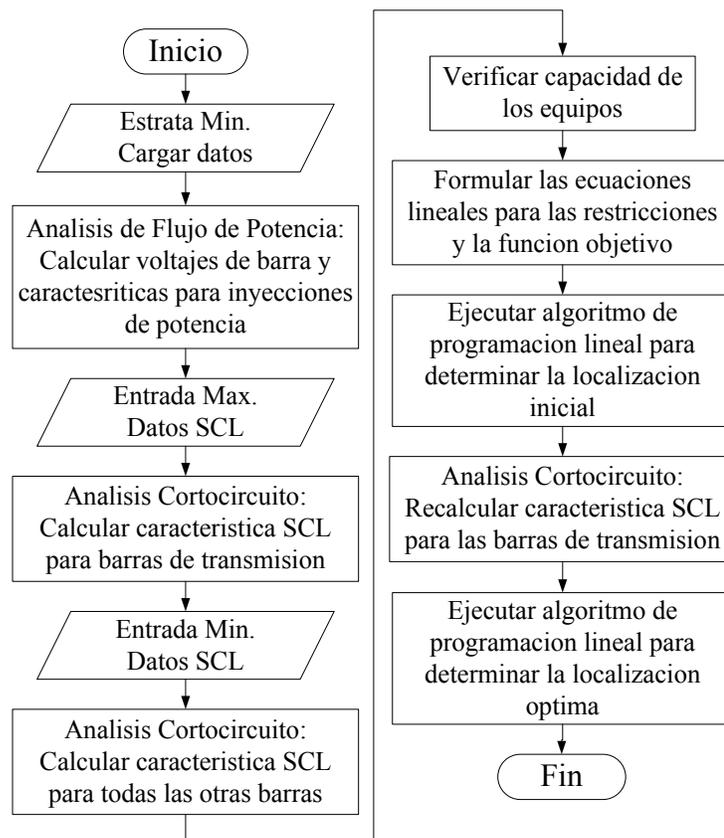


Figura 1. Metodología de Ubicación Óptima de Generación Distribuida

A fin de evaluar la efectividad de la metodología de optimización de fuentes de generación distribuida se considero una red de prueba. Se considero la red de Kumamoto de Japón, presentada en [15], y que se muestra en la Figura 2 y sus datos se relacionan en la Tabla 1. Esta red es un típico circuito de distribución, de medio voltaje con un total de 15 barras, 14 de ellas con carga.

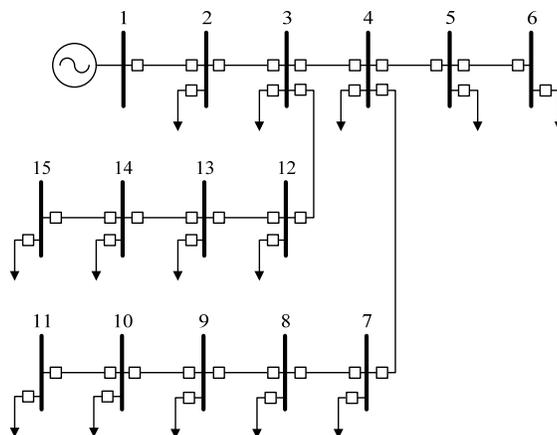


Figura 2. Caso de Prueba: Sistema de Distribución de Kumamoto [15]

Tabla 1. Datos de Líneas y Cargas de l Sistema de Distribución de Kumamoto [15]

| <i>Nodo de Inicio</i> | <i>Nodo Final</i> | <i>R (p.u)</i> | <i>X (p.u)</i> | <i>B (p.u)</i> | <i>P_{load} (p.u)</i> | <i>Q_{load} (p.u)</i> |
|-----------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 2 | 0.00315 | 0.075207 | 0.00000 | 0.02080 | 0.0021 |
| 2 | 3 | 0.00033 | 0.001849 | 0.00150 | 0.04950 | 0.0051 |
| 3 | 4 | 0.00667 | 0.030808 | 0.03525 | 0.09580 | 0.0098 |
| 4 | 5 | 0.00579 | 0.014949 | 0.00250 | 0.04420 | 0.0045 |
| 5 | 6 | 0.01414 | 0.036547 | 0.00000 | 0.01130 | 0.0012 |
| 4 | 7 | 0.00800 | 0.036961 | 0.03120 | 0.06380 | 0.0066 |
| 7 | 8 | 0.00900 | 0.041575 | 0.00000 | 0.03230 | 0.0033 |
| 8 | 9 | 0.00700 | 0.032346 | 0.00150 | 0.02130 | 0.0022 |
| 9 | 10 | 0.00367 | 0.01694 | 0.00350 | 0.02800 | 0.0029 |
| 10 | 11 | 0.00900 | 0.041575 | 0.00200 | 0.21700 | 0.0022 |
| 3 | 12 | 0.02750 | 0.127043 | 0.00000 | 0.01320 | 0.0014 |
| 12 | 13 | 0.03150 | 0.081405 | 0.00000 | 0.00290 | 0.0003 |
| 13 | 14 | 0.03965 | 0.102984 | 0.00000 | 0.01610 | 0.0016 |
| 14 | 15 | 0.01061 | 0.004153 | 0.00000 | 0.01390 | 0.0014 |

Bus voltage = 11.432kV, Base MVA = 30 MVA

Optimización para la red de prueba, empleando Generadores Sincrónicos como FGD.

En la red se prueba se ha supuesto la conexión de FGD en tres de las barras existentes en la red, siendo estas las barras: 2, 7 y 15; la generación considerada esta basada en unidades que emplean generadores sincrónicos directamente conectados a la red.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la localización óptima de fuentes de generación distribuida con generadores sincrónicos conectados en las barras 2, 7 y 15, por parte de LoptiGD:

```

Programa de Localización Óptima de F.G.D. LoptiGD 1.1.0
-----
Estudio de optimización para la red: "Red_De_Kumamoto.xls"
Se consideraron para el estudio generadores sincrónicos

Resultados de la optimización:

Barra      P [MW]
  2         15.54713
  7         12.27475
  15        2.49736
-----
Potencia total generada: 30.31925 MW
-----
Condición de salida del algoritmo de optimización:
Condición de optimización de primer orden satisfecho para la tolerancia especificada.
    
```

Para evaluar la velocidad de los resultados se ha escogido tres escenarios:

Escenario 1: Caso Base.

Escenario 2: Aumento en el 10% de la potencia aparente obtenida en el caso base.

Escenario 3: Disminución en el 10% de la potencia aparente obtenida en el caso base.

La idea de efectuar simulaciones en estos escenarios es verificar si la solución alcanzada es optima para ello se evalúan de forma individual cada una de las restricciones.

Los tres escenarios han sido evaluados de manera individual, en la Tabla 2, se muestra el valor de las potencias generadas por cada una de las unidades de generación distribuida en cada escenario.

Tabla 2. Potencia Generada por cada unidad de Generación Distribuida (P_{GD_i})

| Escenario 1 | | Escenario 2 | | Escenario 3 | |
|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| P (MW) | Q (MW) | P (MW) | Q (MW) | P (MW) | Q (MW) |
| 15.5471 | 7.5298 | 17.1018 | 8.2827 | 13.9923 | 6.7768 |
| 12.2748 | 5.94495 | 13.5022 | 6.5393 | 11.0473 | 5.3504 |
| 2.4974 | 1.20954 | 2.7471 | 1.3304 | 2.2476 | 1.0885 |

Tabla 3. Perfil de Voltajes de Barra

| Barra | Sin GD | | Escenario 1 | | Escenario 2 | | Escenario 3 | |
|-------|-----------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|
| | V [p.u] | Angulo [Grados] | V [p.u] | Angulo [Grados] | V [p.u] | Angulo [Grados] | V [p.u] | Angulo [Grados] |
| 1 | 1.0000 | 0 | 1.0000 | 0 | 1.0000 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 0.9974 | -2.74693 | 1.0383 | 1.47776 | 1.0418 | 1.88165 | 1.0347 | 1.07102 |
| 3 | 0.9973 | -2.81255 | 1.0387 | 1.4613 | 1.0423 | 1.86968 | 1.035 | 1.07102 |
| 4 | 0.994 | -3.73687 | 1.0445 | 1.21044 | 1.0489 | 1.67965 | 1.04 | 0.73733 |
| 5 | 0.9936 | -3.78351 | 1.0441 | 1.16817 | 1.0485 | 1.63773 | 1.0396 | 0.6947 |
| 6 | 0.9934 | -3.8065 | 1.0439 | 1.14735 | 1.0483 | 1.61709 | 1.0394 | 0.6737 |
| 7 | 0.9908 | -4.51846 | 1.0518 | 1.21467 | 1.0571 | 1.75368 | 1.0463 | 0.67042 |
| 8 | 0.9876 | -5.24339 | 1.0488 | 0.57123 | 1.0542 | 1.11675 | 1.0433 | 0.02024 |
| 9 | 0.9855 | -5.74996 | 1.0469 | 0.12193 | 1.0523 | 0.672 | 1.0414 | -0.4338 |
| 10 | 0.9845 | -5.99473 | 1.046 | -0.09503 | 1.0514 | 0.45726 | 1.0405 | -0.65306 |
| 11 | 0.9824 | -6.52849 | 1.044 | -0.56784 | 1.0495 | -0.0107 | 1.0385 | -1.13091 |
| 12 | 0.9953 | -3.1434 | 1.0439 | 1.65757 | 1.0481 | 2.11378 | 1.0396 | 1.1977 |
| 13 | 0.994 | -3.29249 | 1.0483 | 1.81077 | 1.053 | 2.29418 | 1.0434 | 1.32323 |
| 14 | 0.9925 | -3.46502 | 1.0482 | 1.0539 | 1.0593 | 2.53513 | 1.0484 | 1.49606 |
| 15 | 0.9923 | -3.46707 | 1.4035 | 1.0551 | 1.0606 | 2.51639 | 1.0494 | 1.48006 |

De los resultados de los perfiles de voltaje en la Tabla 3, puede verificarse a través de estos, que los valores obtenidos todos tienen valores inferiores a 1.05 p.u, puesto que este fue el valor que les fue indicado como límite, y por ende limitaría la potencia inyectada por parte de las FGD.

Se evalúa la restricción correspondiente a los Niveles de Cortocircuitos, SCL (kA); donde el $SCL_{nominal}$ será 20 kA, tomado como un valor típico para el tipo de red de prueba considerada y el cual representa el valor de corriente a la que el interruptor (kA), de barra puede operar de forma segura bajo condición de falla. Sustituyendo cada uno de los parámetros y variables descritas en la ecuación (4) mostrada a continuación:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_4 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \delta_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{GD2} \\ P_{GD3} \\ P_{GD4} \\ \vdots \\ P_{GDn} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} SCL_{nominal2} - \alpha_{TX} \\ SCL_{nominal3} - \alpha_{TX} \\ SCL_{nominal4} - \alpha_{TX} \\ \vdots \\ SCL_{nominaln} - \alpha_{TX} \end{bmatrix}$$

Los resultados de evaluar esta restricción son mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Evaluación restricción, SCL (kA)

| Barra | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 | Limite |
|-------|-------------|-------------|-------------|------------|
| | A·x | | | b |
| 2 | 2.70519 | 2.9757 | 2.4346 | |
| 7 | 1.5552 | 1.7107 | 1.3996 | 11.4938 kA |
| 15 | 1.4035 | 0.1543 | 0.1263 | |

La Restricción correspondiente al SCL (MVACC) se evalúa considerando el valor del nivel de cortocircuito el valor de correspondientes al factor de potencia correspondiente a la máquina sincrónica empleada, que para el proceso de optimización desarrollado fue la misma y es mostrada en el anexo B, siendo este 0.9. De modo que sustituyendo cada uno de los parámetros y variables descritas en la ecuación (5) mostrada:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{0.1 \cos \phi_1} & -\delta_{32} & -\delta_{42} & \cdots & -\delta_{n2} \\ -\delta_{23} & \frac{1}{0.1 \cos \phi_2} & -\delta_{43} & \cdots & -\delta_{n3} \\ -\delta_{24} & -\delta_{34} & \frac{1}{0.1 \cos \phi_3} & \cdots & -\delta_{n4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\delta_{2n} & -\delta_{3n} & -\delta_{4n} & \cdots & \frac{1}{0.1 \cos \phi_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{GD2} \\ P_{GD3} \\ P_{GD4} \\ \vdots \\ P_{GDn} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix}$$

Los resultados de evaluar esta restricción son mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Evaluación restricción, SCL (MVA_{CC})

| Barra | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 | Limite |
|-------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
| | A·x | | | b |
| 2 | 118.4644 | 130.3112 | 106.6172 | 118.47618 |
| 7 | 91.3915 | 100.5298 | 82.2524 | 91.971 |
| 15 | 11.0339 | 12.1369 | 9.9299 | 50.6062 |

Para la restricción correspondiente a las variaciones de voltaje en las barras de la red ante las inyecciones de potencia realizada por la conexión de las FGD: se ha considerado que el V_{max} corresponderá a 1.05 p.u, y los valores correspondientes a los β_i , son los obtenidos en el flujo de potencia obtenido inicialmente sin realizar la conexión de FGD, destacando que para la evaluación a realizar, serán presentados en unidades reales, (kV). De modo que sustituyendo cada uno de los parámetros y variables descritas en la ecuación (9) mostrada:

$$\begin{bmatrix} \mu_2 & \mu_{32} & \mu_{42} & \cdots & \mu_{n2} \\ \mu_{23} & \mu_3 & \mu_{43} & \cdots & \mu_{n3} \\ \mu_{24} & \mu_{34} & \mu_4 & \cdots & \mu_{n4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{2n} & \mu_{3n} & \mu_{4n} & \cdots & \mu_n \end{bmatrix}_{n \times n} \cdot \begin{bmatrix} P_{GD2} \\ P_{GD3} \\ P_{GD4} \\ \vdots \\ P_{GDn} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} V_{\max 2} - \beta_2 \\ V_{\max 3} - \beta_3 \\ V_{\max 4} - \beta_4 \\ \vdots \\ V_{\max n} - \beta_n \end{bmatrix}$$

Los resultados de evaluar esta restricción son mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Evaluación restricción correspondiente a las variaciones de voltaje en las barras

| <i>Barra</i> | <i>Escenario 1</i> | <i>Escenario 2</i> | <i>Escenario 3</i> | <i>Limite</i> |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| | A·x | A·x | A·x | b |
| 2 | 0.4512 | 0.4963 | 0.406 | 0.6013 |
| 7 | 0.6762 | 0.7438 | 0.6086 | 0.6767 |
| 15 | 0.6591 | 0.7261 | 0.5941 | 0.6596 |

Una vez tratados cada uno de los escenarios planteados para el proceso de optimización desarrollado empleando la conexión de GS como FGD, donde para ellos fueron desarrolladas las distintas restricciones, puede apreciarse como para el escenario 2 es que se presencia una violación por parte de estas, lo cual era de esperarse pues al realizársele un aumento a la potencia obtenida por la optimización (Caso Base) los valores establecidos por el V_{max} se verían violados, en caso contrario pudo constatarse que cuando se disminuye la potencia por debajo del valor obtenido, tratado en el escenario 3, los valores que arrojan las evaluaciones de las restricciones no superan a ninguno de los establecidos por las restricciones, mas sin embargo se aprecia claramente que no superan a los obtenidos para el caso base, destacando que a pesar de que no viola ninguna de las restricciones, no se cuenta con el valor máximo de la capacidad de generación posible a ser conectada a la red (función objetivo), por lo que finalmente se concluye que este resultado al igual que el evaluado en el escenario 2 no representan el óptimo, y de que el obtenido para el caso base ciertamente arroja el resultado para el cual tanto la función objetivo como sus respectivas restricciones son alcanzadas óptimamente.

CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una metodología alterna para la ubicación de fuentes de generación distribuida en sistemas eléctricos de potencia. Se basa en plantear una función objetivo que maximiza la sumatoria de la capacidad de generación de las fuentes de generación distribuida (FGD); y esta es resuelta juntos con: (1) restricción por capacidad de corriente máxima del conductor que conecta la FGD con la red, (2) restricción de niveles de cortocircuito en la barra, (3) restricción en la relación de niveles de cortocircuito, (4) restricción de regulación de voltaje las barras ante las inyecciones de potencia por parte de las FGD, (5) restricción correspondiente a los límites del recurso de energía disponible e iniciativas del cliente. La formulación del problema de optimización lleva a la forma lineal. La metodología propuesta para la localización óptima de FGD fue implementada en un programa empleando rutinas ya ampliamente probadas para programación lineal, y este programa se empleo para efectuar simulaciones sobre redes de prueba mostrando para una red de ejemplo su adecuado desempeño.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. González Longatt F. “Generación Distribuida (GD): Nuevo Paradigma de la Industria Eléctrica, Efecto sobre las Pérdidas, la Energía Reactiva y la Tensión”. II Jornadas de Ingeniería Eléctrica JIELECT 2003. Puerto Ordaz Venezuela, 2003.
- [2] F. González Longatt F. “Fuentes de Energía Distribuida, Tecnologías Disponibles”. Trabajo de Ascenso a la Categoría de Agregado de la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada. Maracay. Venezuela, 2004.
- [3] 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.
- [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] A. Wallace and G. Harrison, “Planning for optimal accommodation of dispersed generation in distribution networks,” in Proc. CIRED 17th Int. Conf. Elect. Distrib. Barcelona, Spain, May 2003.
- [6] B. Kuri, M. Redfern, and F. Li, “Optimization of rating and positioning of dispersed generation with minimum network disruption,” in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting, Denver, CO, Jun. 2004, pp. 2074–2078.
- [7] W. El-khaltam, K. Bhattacharya, Y. Hegazy, and M. M. A. Salama, “Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 3, pp. 1674–1684, Aug. 2004.
- [8] Treballe D. La Generación Distribuida en España. Trabajo Especial de Grado, para optar por el título de Master en Gestión Técnica y Económica en el Sector Eléctrico en la Pontificia Universidad Comillas de Madrid. Madrid, España, 2006.
- [9] Singiresu S. Rao. “ENGINEERING OPTIMIZATION Theory and Practice”. By John Wiley & Sons, Inc., Wiley Eastern Limited, Publishers, and New Age International Publishers, Ltd. Third edition. 1996.
- [10] Página Personal de Ramón Medina (Online) Disponible en: http://www.ramonmedina.name/files/todec_g.pdf
- [11] Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo García y Natalia Alguacil “Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia”. 20 de febrero de 2002.
- [12] J. Cidras. A. Martinez, J.A. Pecas Lopes, and P. Marciel. "Modeling of nonlinear admittances in Load Flow Analysis". In Proceedings of IEAC, 1992.
- [13] J.A Pecas Lopes, F.P. Maciel, and J. Cidras, "Simulations of MV distribution networks with asynchronous local generation sources". In Proceedings of IEEE Melecom 91, June 1991.
- [14] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. “Standards Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No.3, Augt 1995.
- [15] Li, K. Tomsovic, and T. Hiyama, "Load Following Functions Using Distributed Energy Resources," *Proceedings of the 2000 IEEE PES Summer Meeting*, Seattle, July 2000, pp. 1756-1761.