

**Localización Óptima de Generación Distribuida en  
Sistemas de Distribución Trifásicos con Carga Variable en  
el Tiempo Utilizando el Método de Monte Carlo**

**MEMORIA**

**Autor:** Luis Gerardo Guerra Sánchez

**Director:** Juan Antonio Martínez Velasco

**Convocatòria:** Semestre Primavera Curso 2011-2012



**Màster Interuniversitari UB-UPC  
d'Enginyeria en Energia**

## **1. Introducción**

La localización óptima de un generador distribuido es un aspecto clave para garantizar que la introducción de generación distribuida en los sistemas eléctricos de potencia tenga éxito. Hasta la fecha se ha desarrollado una gran variedad de metodologías para determinar dicha localización óptima. Algunos de estos métodos utilizan enfoques analíticos que incluyen simplificaciones, mientras que otros utilizan algoritmos de gran complejidad. La exactitud de los resultados obtenidos depende mucho del método utilizado, por lo que todavía hoy es necesario mejorar los métodos desarrollados de forma que se mejoren su precisión, sean relativamente simples de implementar, y eficientes.

El objetivo del presente Proyecto de Fin de Master es el desarrollo e implementación de un método de localización óptima de generadores distribuidos utilizando varias herramientas de simulación así como otros paquetes de software que permitan el post-procesamiento de datos. El método debería ser exacto, manejar sistemas que incluyan modelos reales, y además eficiente por lo que respecta al tiempo necesario para obtener resultados.

## **2. OpenDSS**

OpenDSS es un software de simulación de sistemas de distribución de energía eléctrica, desarrollado por EPRI (Electric Power Research Institute) desde hace más de 10 años. El resultado de este esfuerzo ha quedado plasmado en un programa de simulación en el dominio de la frecuencia con las funcionalidades propias de los simuladores comerciales así como nuevas herramientas que tienen en cuenta futuras necesidades relacionadas con los esfuerzos de modernización de las redes actuales. El programa fue originalmente pensado como una herramienta para el análisis de la interconexión de generación distribuida, pero su continua evolución ha llevado al desarrollo de otras funcionalidades que son perfectas por ejemplo para estudios de eficiencia en el suministro de energía y estudios de armónicos.

Puede accederse al programa tanto a través de una aplicación independiente como del COM server. La aplicación independiente cuenta con una interfaz de usuario básica, aunque completamente funcional, que permite interactuar con el programa; mientras que el COM server permite conectar el OpenDSS con otros programas tales como MATLAB de Mathworks, proporcionando de esa manera una gran capacidad de análisis de la información.

## **3. Localización óptima de generación distribuida**

En los últimos años se ha realizado un gran esfuerzo dentro del sector eléctrico por desarrollar métodos que permitan determinar la ubicación óptima de generadores distribuidos dentro una red de distribución. Se trata de un problema de optimización multi-objetivo con múltiples restricciones, para el que se han desarrollado un elevado número de métodos, entre las cuales merecen especial mención la regla de los 2/3, métodos analíticos, flujo de cargas óptimo, algoritmos genéticos y metaheurísticos.

## **4. Localización óptima de un generador distribuido utilizando el método de Monte Carlo**

El estudio desarrollado en este trabajo está basado en el método de Monte Carlo, y busca optimizar tanto la ubicación como la potencia de un generador distribuido, el cual inyecta únicamente potencia activa con el objetivo de minimizar las pérdidas del sistema. La idea detrás de este método consiste en generar aleatoriamente valores para la posición y la potencia del generador distribuido, resolver el sistema y calcular las pérdidas totales para cada caso. Con el análisis de un número determinado de casos sería posible, utilizando algoritmos de interpolación multivariable, encontrar la combinación de posición y potencia que reduzca las pérdidas a un mínimo. Se debería generar un número suficiente de pares posición-potencia para que las conclusiones obtenidas fueran realistas. Una de las ventajas del método desarrollado es la utilización de OpenDSS como herramienta de simulación; lo que permite no solo realizar estudios tipo snapshot sino también estudios que utilicen curvas de carga que varían con el tiempo, permitiendo de esta forma optimizar la potencia y la ubicación del generador para que las pérdidas totales de energía a lo largo de un periodo de tiempo sean mínimas. Los estudios que utilizan curvas de carga que varían a lo largo del tiempo presentan un mayor valor que aquellos que solo consideran cargas constantes, ya que resulta obvio que en los sistemas reales las cargas presentan un comportamiento variable en el

tiempo. Por otro lado, el post-procesamiento de la información generada por OpenDSS permite descartar casos que no cumplan con restricciones de carácter técnico. El procedimiento seguido por el método es el siguiente:

1. Se generan valores aleatorios de posición y potencia para el generador, asignándole además una curva de carga al mismo.
2. Se calcula el flujo de cargas para cada caso. Se descartan aquellos casos que no cumplan con alguna de las siguientes restricciones:
  - La tensión en al menos un bus se encuentra fuera de los límites aceptables
  - Uno o más elementos del sistema trabajan por encima de su capacidad nominal.

Adicionalmente puede considerarse la no presencia de flujo inverso como una condición que debe ser cumplida en todo momento.

3. Se termina el proceso al alcanzar un número determinado de simulaciones.
4. Se crean los archivos personalizados para el post-procesamiento de la información.
5. Se generan curvas basadas en la información obtenida de los archivos personalizados, y se determinan los valores óptimos de posición y potencia.

#### 4.1. Implementación del método

Para implementar el presente método se ha decidido utilizar Matlab para generar las variables aleatorias, controlar a OpenDSS (encargado de realizar las simulaciones), recopilar la información acerca del sistema de energía eléctrica (tensiones, pérdidas, sobrecargas, etc.) y generar archivos personalizados de salida. La Figura 1 muestra un esquema del diagrama de bloques del proceso implementado. Las curvas de carga correspondientes al generador distribuido serían generadas utilizando herramientas de software externas a Matlab y OpenDSS, al igual que la generación de gráficos y algoritmos de interpolación.

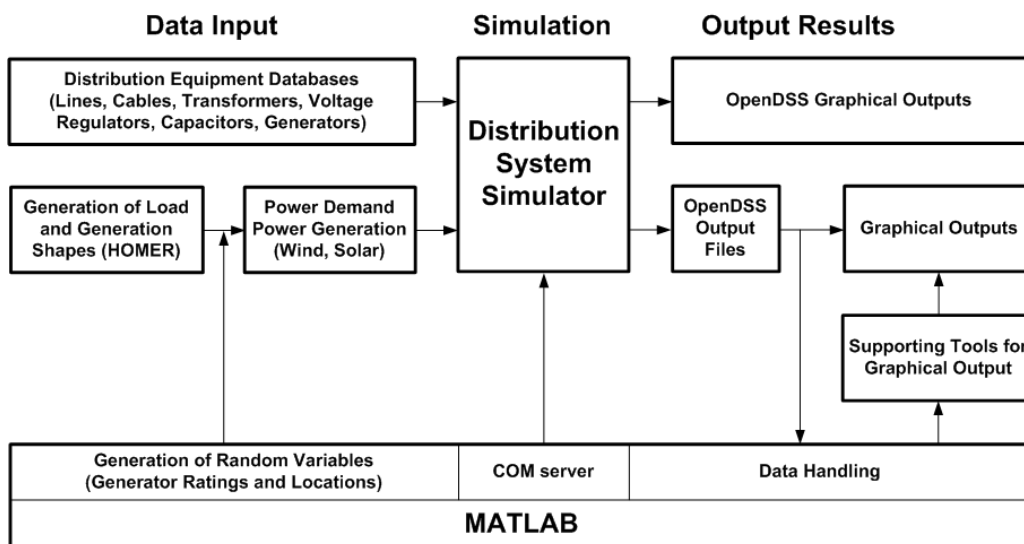


Figura 1: Diagrama de bloques del proceso

## 4.2. Red de estudio

La red de potencia utilizada en este estudio consiste en un alimentador único que parte de un transformador trifásico, y que está formado por tramos de línea uniformemente espaciados, encontrándose una carga puntual al final de cada tramo; todas las cargas que se encuentran a lo largo del alimentador son idénticas. De esta forma el circuito aproximadamente se comporta como una red con carga uniformemente distribuida. La Figura 2 muestra el esquema unifilar de la red estudiada en este trabajo.

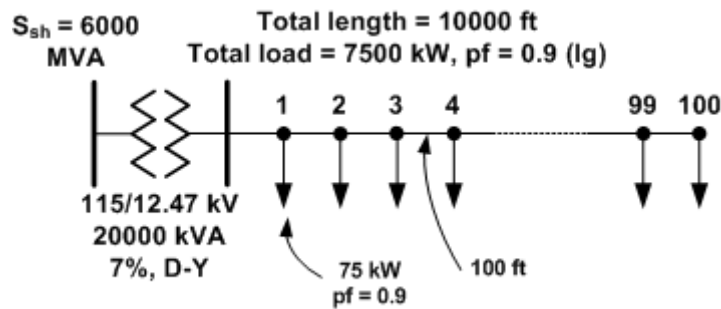


Figura 2: Diagrama unifilar de la red radial con carga distribuida

## 4.3. Localización óptima de un generador distribuido con carga constante

Esta parte del estudio se ha realizado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- OpenDSS trabajará en modo *snapshot*
- Las demandas son constantes
- El objetivo es minimizar las pérdidas de potencia activa

En la implementación del método se han simulado 1000 casos con el fin de alcanzar el objetivo propuesto; se considera un número suficientemente grande como para proporcionar resultados correctos. La Figura 3 muestra los resultados obtenidos; concretamente la variación de las pérdidas de potencia activa del sistema en función de la potencia nominal del generador y de la distancia respecto al origen del alimentador donde se encuentra localizado dicho generador. La superficie muestra la existencia de una combinación única de potencia-distancia para la cual las pérdidas del sistema son mínimas. Además, se puede observar que si se asume un valor de potencia determinado existe una distancia específica para la cual las pérdidas son reducidas a un mínimo para dicha potencia; de la misma forma para cada valor de distancia existiría un valor de potencia para el cual las pérdidas serían mínimas. La Tabla 1 muestra un resumen de los resultados más importantes de esta parte del estudio.

Potencia óptima (kW)	Distancia óptima (pies)	Pérdidas óptimas (kW)
5280	6504	29.37

Tabla 1: Resultados método localización óptima

El valor de potencia óptima encontrado por el método representa el 70.4% de la carga total del sistema, mientras que la distancia óptima es aproximadamente el 65% de la distancia total del alimentador. Dichos valores corroboran los resultados esperados a partir de la regla de los 2/3, aún cuando dichos valores no se ajustan perfectamente a los valores teóricos, ya que debemos de recordar que dicho análisis es realizado teniendo en cuenta modelos monofásicos y algunas simplificaciones.

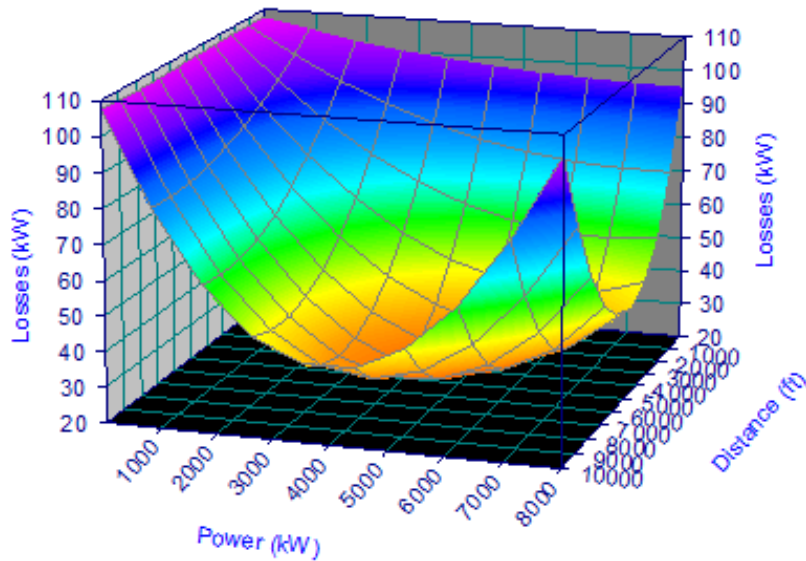


Figura 3: Pérdidas de potencia en función de Potencia-Distancia (1000 casos)

#### 4.4. Localización óptima de un generador distribuido con carga variable en el tiempo

El procedimiento seguido para determinar la localización óptima de un generador distribuido con carga dependiente del tiempo varía ligeramente respecto al utilizado con carga constante. Varios aspectos se deben de tener en cuenta:

- OpenDSS trabajará en modo *time*
- Se utilizarán las curvas de carga en todos los nudos del sistema
- Se minimizarán las pérdidas de energía en kWh
- Se tendrán en cuenta restricciones técnicas de tensión y sobrecarga para descartar combinaciones potencia-distancia

La Figura 4 muestra la variación de las pérdidas anuales de energía en función de la potencia y la distancia respecto al origen del alimentador donde se encuentra instalado el generador utilizando la información generada en una simulación que ha tenido en cuenta 1000 casos de prueba. La forma de la superficie presenta un comportamiento muy parecido a la encontrada para el caso con carga constante, por lo que algunas de las características discutidas anteriormente también son válidas. Por ejemplo, existe una única combinación potencia-distancia que minimiza las pérdidas. A pesar de esto, la superficie de pérdidas de energía presenta una diferencia respecto a la de pérdidas de potencia: a medida que la potencia aumenta a un nivel cercano a la potencia nominal de la carga instalada y la distancia se acerca a la distancia total del alimentador, la curva deja de crecer y presenta un comportamiento aproximadamente constante, lo que implica que para valores cercanos a los valores máximos permitidos tanto para potencia como distancia las diferencias en las pérdidas son casi despreciables. Para el presente caso la uniformidad de la curva también se debe a que se ha utilizado el mismo patrón de generación para todas las posiciones posibles, ya que si consideráramos cambios en dicho patrón según la posición del generador sería muy probable que la curva presentara irregularidades en su comportamiento. La Tabla 2 muestra un resumen de los resultados más importantes de esta parte del estudio.

Potencia óptima (kW)	Distancia óptima (pies)	Pérdidas óptimas (kWh)
4640	6553	134740

Tabla 2: Resultados método de localización óptima

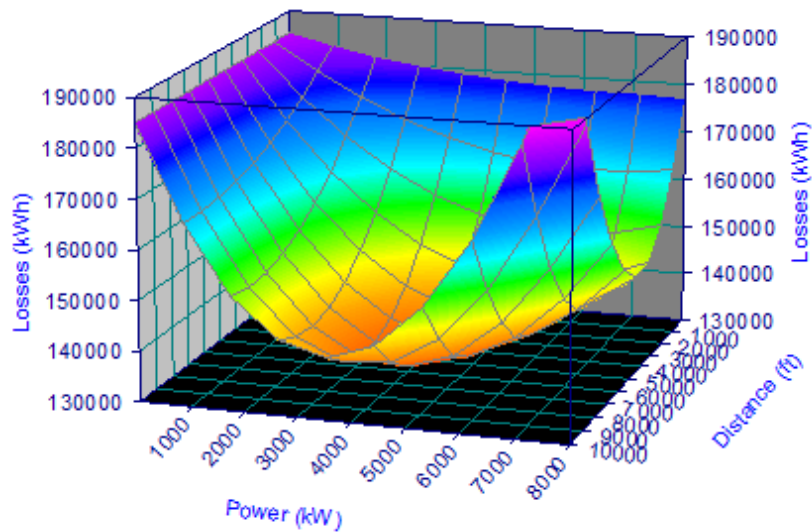


Figura 4: Pérdidas de energía en función de Potencia-Distancia (1000 casos)

El uso de curvas de carga implica que para cada momento existe una potencia y distancia diferentes que reducen las pérdidas a un mínimo. Sin embargo, debido a que es imposible cambiar la potencia nominal y la posición del generador distribuido, la potencia y posición óptimas serían aquellas que en promedio reduzcan al máximo las pérdidas de energía. Respecto a los valores obtenidos a partir de las simulaciones se observa una diferencia notable en el valor de potencia nominal del generador distribuido respecto a los obtenidos con carga constante, mientras que la distancia óptima no presenta mayor diferencia. Los valores óptimos de potencia y distancia obtenidos utilizando curvas de carga prueban que para dicho caso la regla de los 2/3 no es válida, precisándose por tanto de un estudio específico para cada sistema en estudio.

## 5. Conclusiones

- La utilización del método de Monte Carlo ha permitido optimizar tanto la potencia nominal del generador distribuido como su posición dentro del sistema estudiado.
- La selección de OpenDSS como herramienta de simulación presenta ventajas evidentes, ya que ha permitido por un lado llevar a cabo estudios con carga constante (tipo *snapshot*), y por otro, estudios que tienen en cuenta cargas que varían con el tiempo (*anuales*), lo que proporciona un valor agregado al contemplar condiciones más reales para el sistema. Además, los modelos de los elementos de red utilizados por OpenDSS permiten analizar sistemas complejos con características reales.
- La determinación de la localización óptima de un generador distribuido ha permitido comprobar que la regla de los 2/3 es válida cuando se trabaja con alimentadores radiales con carga uniformemente distribuida y que no varía con el tiempo. Sin embargo, los resultados obtenidos utilizando cargas dependientes del tiempo muestran que para este escenario dicha regla no es válida y que es necesario llevar a cabo un estudio individual para cada sistema con el objetivo de determinar la localización óptima de un generador distribuido.