

Cálculo del Campo Eléctrico en Subestaciones de Corriente Alterna mediante el Método de Simulación de Cargas

Tomás Ávila Araya

Resumen—Con el desarrollo constante de nuevas fuentes de energía y la incorporación de nuevos tipos de generación a la matriz energética del país, los niveles de voltaje en el país deben empezar a subir por efecto de nuevas líneas de transmisión y la posible interconexión SIC-SING.

Por lo anterior, también es importante considerar que es factible que de acuerdo a esto se produzca un aumento en las instalaciones de las empresas de transmisión y distribución, de modo que es importante poder estudiar el impacto ambiental que se producirán con dichas instalaciones. Este trabajo presenta y utiliza el método de simulación de cargas para calcular el campo eléctrico en una instalación transformadora. Se describe el programa hecho en la herramienta *MATLAB*¹, para la medición y el cálculo del campo eléctrico en una subestacion de corriente alterna.

Palabras Claves—Campo Eléctrico, Método de Simulación de Cargas, *MATLAB*, Subestaciones AC.

I. INTRODUCCIÓN

EN las subestaciones de corriente alterna es necesario poder medir una serie de parámetros que logren el buen funcionamiento de los equipos, además de cumplir con los requerimientos técnicos especificados legalmente.

Las herramientas de simulación y la tecnología hoy en día nos permiten hacer mediciones que permitan dimensionar el tamaño y capacidad nominal de los equipos. El presente trabajo explica y proporciona un software que muestra, en vista real, el perfil del campo eléctrico en una subestación de corriente alterna.

II. MÉTODO DE SIMULACIÓN DE CARGAS

El método de cargas equivalentes consiste en reemplazar las cargas reales por elementos de carga ficticia de manera discreta. El modelamiento de ellas está condicionado al cumplimiento de las condiciones de borde, que indica que el potencial producido por los elementos debe ser igual al potencial del conductor.

Usando la propiedad de superposición, es posible determinar el potencial producido por n elementos de carga, sean estos iguales o distintos. Cada valor quedará representado por q_i y su respectivo coeficiente de potencial asociado será $P(\vec{r}, \vec{r}_{q_i}) \cdot q_i$. Finalmente el potencial se determina con la siguiente expresión:

$$V(\vec{r}) = \sum_{i=1}^n P(\vec{r}, \vec{r}_{q_i}) \cdot q_i \quad (1)$$

Luego de obtener los potenciales en cada uno de los elementos, se obtiene un sistema de ecuaciones para las cargas, por ende, es factible determinar la carga de cada una de ellas a través de la expresión:

$$[Q] = [P]^{-1} \cdot [V] \quad (2)$$

Cabe notar que al estar trabajando con corriente alterna dichas matrices tendrán valores complejos.

III. APLICACIÓN DEL MÉTODO MEDIANTE ESFERAS

El método de simulación de cargas puede considerar diversos tipos de formas geométricas para su desarrollo, este trabajo considerará cargas esféricas. Es importante que esta sustitución tome en cuenta una distribución uniforme de la carga total en su superficie, de modo de hacer más representativa la modelación.

El punto de contorno que se elige se ubica sobre la superficie de la esfera, donde al evaluar su potencial sea idéntico al de ella.

En la siguiente figura se visualiza la representación de 3 esferas dentro de una barra.

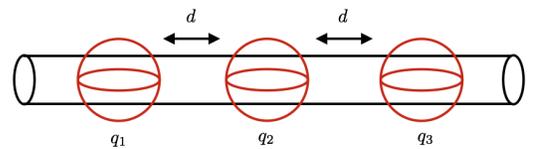


Figura 1. Representación de 3 esferas dentro de una barra.

Si se tiene una carga puntual con vector posición \vec{r}_{q_i} . El coeficiente de potencial en el punto $\vec{r} = (x, y, z)$ a una distancia $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ de la carga puntual viene dado por la ecuación:

$$P_i(\vec{r}, \vec{r}_{q_i}) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_i^3(x, y, z)} \quad (3)$$

El cálculo del campo eléctrico y del potencial, para n cargas con sus respectivas imágenes con referencia en el suelo, se puede hacer mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_x = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^3(x, y, z)} - \frac{1}{d_i'^3(x, y, z)} \right) (x - x_i) q_i \quad (4)$$

$$E_y = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^3(x, y, z)} - \frac{1}{d_i'^3(x, y, z)} \right) (y - y_i) q_i \quad (5)$$

¹Probado en la version R2012a.

$$E_z = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{z - z_i}{d_i^3(x, y, z)} - \frac{z + z_i}{d_i'^3(x, y, z)} \right) q_i \quad (6)$$

El punto de contorno tendrá una potencia equivalente al cual se encuentra ubicado el conductor. Dicha ubicación debe ser elegida convenientemente sobre la superficie de una esfera de radio R cuando se simule con este objeto geométrico.

En el caso de este trabajo, se simula una barra de largo 32 metros, de radio r y a una altura h del suelo a través de esferas. El criterio para determinar el radio de estas consiste en igualar las capacidades de línea y esfera de simulación [2]. La carga que sea capaz de contener la esfera será aproximadamente igual a la carga contenida por el segmento de barra simulado.

Las ecuaciones para los coeficientes de potencial serán las siguientes:

$$P_{ii} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{2 \cdot h} \right) \quad (7)$$

Donde R es:

$$R = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \left(\frac{(2 \cdot \sqrt{\frac{L^2}{4} + r^2} + L) \cdot (2 \cdot \sqrt{\frac{L^2}{4} + h^2} - L)}{(2 \cdot \sqrt{\frac{L^2}{4} + r^2} - L) \cdot (2 \cdot \sqrt{\frac{L^2}{4} + h^2} + L)} \right) \quad (8)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{d_i(x, y, z)} - \frac{1}{d_i'(x, y, z)} \right) \quad (9)$$

IV. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO

1. Se definen las superficies equipotenciales que serán modeladas y los elementos de carga a utilizar en tipo, ubicación y dimensiones.
2. Definición de los puntos de contorno y evaluación de los coeficientes de potencial: Se seleccionan los puntos de contorno de acuerdo al modelo empleado y junto a ello se relacionan los elementos de carga con su contorno respectivo.
3. Formación del sistema de ecuaciones para determinar el vector de carga
4. Cálculo del campo eléctrico en una malla de puntos simulando una superficie real
5. Presentación del gráfico

V. PRESENTACIÓN DEL MODELAMIENTO

La simulación de la barra trifásica será realizada con elementos tipo esfera. Para ello, el largo de la barra será dividido por la cantidad de esferas que se deseen más 1, de modo de poder ubicar de manera equidistante las esferas una de otra a lo largo de las fases.

Luego de lo anterior, es necesario determinar el radio equivalente de cada una de las esferas, para ello se utiliza la ecuación (8).

Posteriormente es necesario determinar la matriz de coeficientes de potencial, lo que se logra de acuerdo a las ecuaciones (7) y (9).

Cabe mencionar que dependiendo del número de esferas, distintos serán los valores de carga obtenidos, dado que los coeficientes de potencial también cambiarán por el efecto de

las nuevas posiciones de los elementos a lo largo de la barra. Luego se procede a calcular el campo eléctrico en cada uno de los puntos de la malla mediante las ecuaciones (4) (5) y (6).

La disposición de la barra en el espacio se muestra en la siguiente imagen:

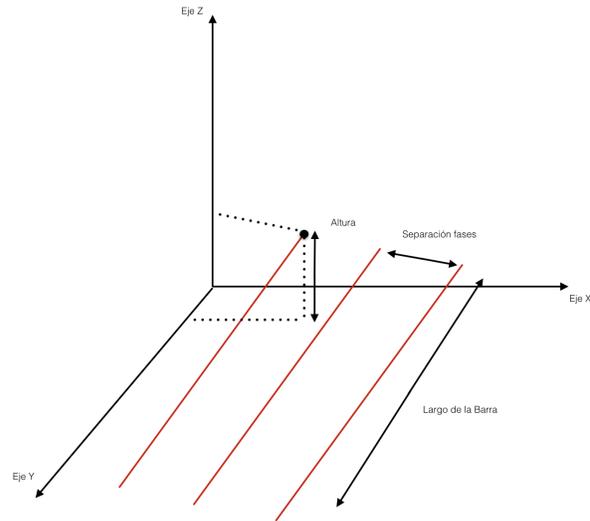


Figura 2. Disposición de la barra en el espacio.

VI. INTERFAZ DEL PROGRAMA

El programa cuenta con un menú que permite ingresar las siguientes variables como datos de entrada:

1. Tensión de Operación
2. Separación entre las fases
3. Cantidad de esferas a simular
4. Numero de puntos de simulación
5. Altura de la medición
6. Radio de la barra
7. Altura de la barra

```

Bienvenido al software de cálculo de Campo Eléctrico en Subestaciones AC
Ingrese el numero de esferas a introducir en la barra
40
Ingrese separacion entre fases en metros
6
Ingrese altura de la barra en metros
10
Ingrese la cantidad de puntos de simulación
40
Ingrese la altura del punto donde desea calcular el campo eléctrico en metros
1
Ingrese el radio del conductor en metros
0.02
Ingrese la tensión de operación de la subestación en KV
500
El Campo Eléctrico Máximo en la subestación es de 1.307560e+01 kV/m

```

Figura 3. Menú del Programa

VII. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Para mostrar los resultados Obtenidos en el programa, es necesario poder especificar algunas consideraciones:

1. La altura de una persona es comúnmente 171 cm de alto [3], luego se harán mediciones a 1 m del suelo.
2. Se estudiará la variación del campo eléctrico en la subestación de acuerdo al aumento del voltaje, se debe visualizar el aumento o disminución de este parámetro en la medida que se varía, se estudiarán subestaciones de 500, 220 y 66 kV.
3. Se estudiará la variación del campo eléctrico en la subestación de acuerdo al aumento en la separación de las fases. Veremos como aumenta el campo eléctrico en la medida que se incrementa la distancia mencionada.
4. Se considerará una barra con un radio de 0.02 metros y una altura de barra de 10 metros.

Cuadro I

CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO AL CAMBIO EN LA TENSIÓN DE OPERACIÓN A 1 METRO DE ALTURA CON 6 METROS DE SEPARACIÓN ENTRE FASES

Tensión(kV)	Nº de Esferas	$E_m \frac{kV}{m}$	Error con respecto a [4](%)
500	40	13.075	2.815
220	40	5.7533	2.783
66	40	1.726	2.486

Se observa que los errores de simulación son mínimos, por ende el programa de valida desde ese punto de vista.

Cuadro II

CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO AL CAMBIO EN LA SEPARACIÓN DE FASES EN UNA S/E DE 500 kV

Separación (m)	Nº de Esferas	$E_m \frac{kV}{m}$	Error con respecto a [4](%)
4	40	9.3844	20.81
6	40	13.0756	2.815
8	40	15.4642	5.56

El programa presenta variaciones grandes frente a separaciones de fases pequeñas, mientras que para separaciones reales de barras presenta errores bajos al 10%.

Las simulaciones del Campo Eléctrico en las subestaciones se muestran a continuación, tomando en cuenta los valores obtenidos en el Cuadro I.

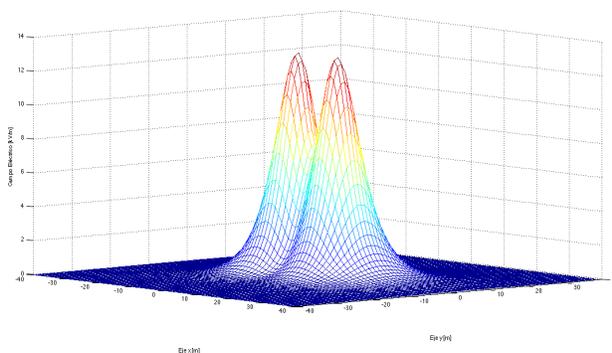


Figura 4. Campo Eléctrico en una Subestación de 500 kV

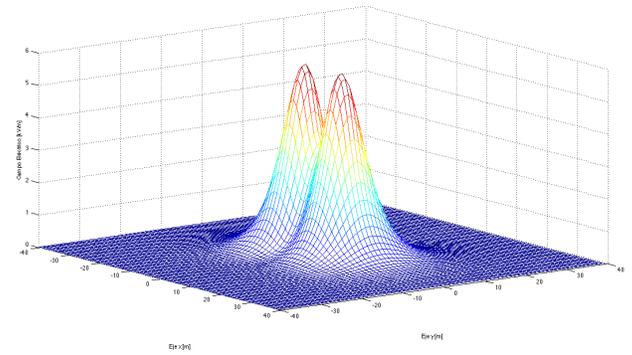


Figura 5. Campo Eléctrico en una Subestación de 220 kV

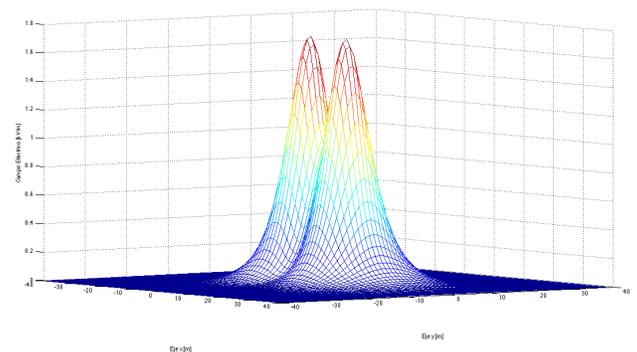


Figura 6. Campo Eléctrico en una Subestación de 66 kV

VIII. LIMITACIONES DEL PROGRAMA

1. La innovación empleada para el algoritmo usado para calcular los coeficientes de potencial permite un cálculo de ellos junto con el campo eléctrico que hace que el largo de la barra deba ser fijo, se han usado en trabajos anteriores algoritmos similares en excel pero en matlab se consideraron usos de algoritmos con menos tiempo de cálculo.
2. Frente a lo anterior, no es posible calcular de manera expedita el campo para configuraciones de más de una barra en una subestación.

IX. DESAFÍOS FUTUROS

1. Incluir un algoritmo que incluya como opción de entrada un largo de barra variable hasta 50 m
2. Determinar el campo eléctrico para configuraciones de más de una barra
3. Considerar la estructura completa de la subestación.
4. Mejorar la precisión del programa frente a separaciones de fases.

X. CONCLUSIONES

1. El campo eléctrico calculado en tres dimensiones dentro de subestaciones de corriente alterna depende de la distancia entre fases, la tensión de operación del sistema y la altura de simulación.
2. El campo eléctrico dentro de una subestacion aumenta de acuerdo a la tensión a la que esté trabajando.
3. Si la separación entre fases aumenta, la intensidad del campo eléctrico también lo hace.
4. El programa es validado con porcentajes de error mínimos frente a variaciones de tensión de acuerdo a [4].
5. Se generan porcentajes de error de acuerdo a los métodos de simulación de carga que se utilicen, el presente trabajo ocupó método esférico, mientras que el trabajo de validación usó segmentos de línea para hacer una simulación más precisa.

REFERENCIAS

- [1] Dr. Luis Ortiz Navarrete *Aspectos Ambientales en el Proyecto de Líneas Eléctricas*, Noviembre de 2002
- [2] Pedro Torrent Fariás *Cálculo del Campo Eléctrico en Subestaciones de Alta Tensión Considerando Configuraciones Simples de Barras Trifásicas*, Memoria en conformidad a obtener el título de Ingeniero Civil en Electricidad, Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2010.
- [3] <http://www.24horas.cl/tendencias/ciencia/chilenos-son-10-centimetros-mas-altos-que-hace-un-siglo-1050068>, Noticia 24 horas sobre incremento de alturas en Chile
- [4] Essam M. Shaalan, Samy M. Ghania, Sayed A. Ward *Analysis of Electric Field inside HV Substations using Charge simulation method in three dimensional*, 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena

Agradecimientos a mi compañero Diego Echiburú Acuña por su ayuda en los momentos difíciles durante este trabajo y su apoyo para llevar a cabo la programación de este software.