

CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO BAJO LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

**JOHANA CATALINA RESTREPO DOMINGUEZ
DIEGO FERNANDO GARZÓN VALENCIA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGIA ELÉCTRICA
PEREIRA
2008**

CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO BAJO LINEAS DE TRANSMISIÓN

**JOHANA CATALINA RESTREPO DOMINGUEZ
DIEGO FERNANDO GARZON VALENCIA**

TRABAJO DE GRADO

**Director
CARLOS ALBERTO RIOS PORRAS
INGENIERO ELECTRICISTA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2008**

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira, 30 de abril de 2008

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al Ingeniero Darío Rodas por su ayuda y colaboración en el desarrollo de este trabajo de grado, igualmente al Ingeniero Carlos Alberto Ríos por sus aportes, sugerencias y paciencia durante la elaboración de este proyecto.

A los demás profesores de Tecnología Eléctrica que nos ayudaron en la formación académica, a Luz M^a por aguantarnos tanto tiempo, y a todos los compañeros que hicieron parte de nuestro logro.

Y por último a nuestras familias que nos apoyaron en el desarrollo de nuestra formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
CAPITULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS.....	14
1.1 LEY DE COULOMB.....	14
1.2 INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO	15
1.3 POTENCIAL Y DIFERENCIA DE POTENCIAL	17
1.4 GRADIENTES DE POTENCIAL EN LINEAS DE TRANSMISION.....	19
1.5 METODO DE LAS IMÁGENES SIMÉTRICAS	20
1.6 CAPACITANCIA DEBIDA A VARIOS CONDUCTORES	22
1.7 VOLTAJES INDUCIDOS EN CIRCUITOS PARALELOS DESENERGIZADOS Y NO ATERRIZADOS	25
CAPITULO 2 CAMPO ELÉCTRICO BAJO LINEAS DE TRANSMISIÓN.....	28
2.1 CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A UN CONDUCTOR SIN CONSIDERAR EL EFECTO TIERRA	28
2.2 CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A UN CONDUCTOR CONSIDERANDO EL EFECTO DE LA TIERRA.....	30
2.3 CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A VARIOS CONDUCTORES CONSIDERANDO EL EFECTO DE LA TIERRA.....	33
2.4 CAMPO ELÉCTRICO A NIVEL DEL SUELO	34
2.5 CAMPO ELÉCTRICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	35
2.5.1 Método Instantáneo.....	35
2.5.2 Método Fasorial	37
2.6 PERFIL DEL CAMPO BAJO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN A UNA ALTURA DETERMINADA	38
2.7 RECOMENDACIONES INTERNACIONALES DE CAMPO ELÉCTRICO MÁXIMO.....	40
2.8 NORMAS NACIONALES DE CAMPO ELÉCTRICO MÁXIMO	41
CAPITULO 3 COMO USAR LOS PROGRAMAS PARA EL CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO O LOS VOLTAJES INDUCIDOS.....	42
3.1 ENTRADA DE DATOS	42
3.2 EJECUCIÓN DEL PROGRAMA	44
3.3 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS	45
3.3.1 Campo eléctrico	45
3.3.2 Voltajes Inducidos.....	46
3.4 ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO O LOS VOLTAJES INDUCIDOS.....	48
CAPITULO 4 SISTEMAS DE PRUEBA Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	49
4.1. CAMPO ELÉCTRICO EN UNA LINEA DE 500 kV	49
4.1.1. Entrada de datOs	50
4.1.2. En un punto genérico	50

4.1.2.1 Disposición de los conductores.....	50
4.1.2.2 Campo eléctrico en el punto $x=0$, ALTURA= 1	51
4.1.2.3 Magnitud del campo eléctrico y ángulo	52
4.1.2.4. Campo eléctrico con el método instantáneo y el fasorial.....	53
4.1.2.5 Perfil del campo eléctrico.....	54
4.1.2.6 Matriz coeficientes de Maxwell	55
4.1.2.7 Matriz de capacitancias	56
4.1.2.8 Cargas en los conductores.....	57
4.1.2.9 Eliminación de cables de guarda.....	58
4.1.2.10 Matriz Creducida1.....	59
4.1.2.11 Reducción de conductores en haz	59
4.1.3 A nivel de tierra.....	60
4.1.4. Perfil del campo eléctrico.....	62
4.1.4.1 Primer caso:.....	62
4.1.4.2 Segundo caso:	62
4.1.4.3. Tercer caso:	63
4.1.4.4 Comparación del perfil del campo eléctrico con las normas y recomendaciones:	64
4.2 CAMPO ELÉCTRICO EN UNA LÍNEA DE 345 kV	65
4.2.1 Resultados	68
4.2.1.1 Disposición de conductores	68
4.2.1.2 Campo eléctrico en el punto $x = 3$ m, ALTURA = 4 m:.....	69
4.2.1.3 Campo eléctrico método fasorial	69
4.2.2 Cálculo de perfil del campo eléctrico.....	71
4.2.2.1 Primer caso:.....	71
4.2.2.2 Segundo caso:	72
4.3 CAMPO ELÉCTRICO EN UNA LÍNEA DE 115 kV	75
4.3.1 Resultados	76
4.3.1.1 Disposición de conductores	76
4.3.1.2 Campo eléctrico en el punto $x=1$, ALTURA= 1	77
4.3.1.3 Perfil del campo eléctrico a una ALTURA de 1 m.....	78
4.4 VOLTAJES INDUCIDOS EN UNA LÍNEA DE 500 kV	79
CONCLUSIONES	82
BIBLIOGRAFIA.....	83
ANEXO 1. PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE CAMPO ELÉCTRICO	84
ANEXO 2. PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LOS VOLTAJES INDUCIDOS.	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Balanza de torsión para demostrar las leyes de Coulomb.....	14
Figura 2. Campo eléctrico de una carga puntual positiva (+ q_p).....	16
Figura 3. Campo eléctrico de una carga puntual negativa (- q_p).....	16
Figura 4. Carga moviéndose entre un punto 1 y el punto 2.....	18
Figura 5. Carga moviéndose entre un punto 2 y el punto 1.....	18
Figura 6. Campos equivalentes debido a un eje cargado y a un conductor cilíndrico (con igual carga).....	20
Figura 7. Campo debido a dos cargas iguales de signo opuesto.....	21
Figura 8. Eliminación de la tierra.....	21
Figura 9. Diferencia de potencial entre dos puntos debido a una carga puntual. ...	22
Figura 10. Diferencia de potencial debido a n conductores.....	23
Figura 11. Imágenes simétricas para cargas i y j.....	23
Figura 12. Conductor paralelo no aterrizado.....	25
Figura 13. Campo en un punto debido a una línea aislada.....	28
Figura 14. Dirección del campo debido a una carga Q positiva.....	29
Figura 15. Campo eléctrico en un punto debido a un conductor considerando el efecto de la tierra.....	30
Figura 16. Campo eléctrico de n líneas de transmisión en un punto.....	33
Figura 17. Campo eléctrico a nivel del suelo.....	34
Figura 18. Campo eléctrico en el punto A en diferentes instantes.....	37
Figura 19. Zona de estudio del perfil del campo.....	39
Figura 20. Línea de transmisión en terrenos no planos.....	39
Figura 21. Configuración de la línea.....	43
Figura 22. Menú para escoger archivo y coordenadas para el perfil del campo eléctrico.....	44
Figura 23. Array Editor con la información de las matrices.....	45
Figura 24. Visualización figuras en el programa.....	46
Figura 25. Forma rectangular.....	46
Figura 26. Forma polar.....	47
Figura 27. Algoritmo para el cálculo de campo eléctrico y voltajes inducidos.....	48
Figura 28. Líneas de transmisión de 500 kV.....	49
Figura 29. Disposición conductores línea de 500 kV.....	51
Figura 30. Campo eléctrico en el punto $x = 0$ m, ALTURA= 1 m.....	52
Figura 31. Magnitud y ángulo geométrico del campo eléctrico.....	52
Figura 32. Campo eléctrico calculado con el método instantáneo.....	53
Figura 33. Campo eléctrico calculado con el método fasorial.....	53
Figura 34. Perfil del campo eléctrico.....	54

Figura 35. Relación entre la componente vertical y horizontal del campo eléctrico a nivel de tierra.....	60
Figura 36. Campo en el punto $x = 0$ m y ALTURA = 0 m	61
Figura 37. Método fasorial.	61
Figura 38. Perfil del campo a una altura de 0 m	62
Figura 39. Perfil del campo a una altura de 4 m	63
Figura 40. Perfil del campo a una altura de 7 m	64
Figura 41. Campo eléctrico máximo para una línea de 500 kV según la CREG, y la ICNRP	65
Figura 42. Torre New York 20 conductores	66
Figura 43. Disposición de conductores.....	68
Figura 44. Campo en el punto $X= 3$ m y ALTURA = 4 m.	69
Figura 45. Campo en el punto $x= 3$ m y ALTURA = 4 m fasorial.....	70
Figura 46. Perfil de campo máximo a una altura = 2 m.....	71
Figura 47 Perfil del campo eléctrico a una ALTURA = 1,70 m.....	72
Figura 48 Perfil del campo eléctrico a una ALTURA = 30 m.	73
Figura 49 Comparación línea NY 20 conductores con las normas.....	74
Figura 50. Línea Yumbo - Juanchito 115 kV	75
Figura 51. Disposición de conductores.....	76
Figura 52. Campo en el punto.....	77
Figura 53. Perfil del campo eléctrico.....	78
Figura 54. Voltajes inducidos en la fase C y los cables de guarda de la línea de 500 kV	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Recomendaciones internacionales de campo eléctrico máximo	40
Tabla 2. Campo máximo permitido por el RETIE y la CREG.....	41
Tabla 3. Ingreso de datos en la hoja de cálculo.....	43
Tabla 4. Datos de entrada línea de 500 kV.....	50
Tabla 5. Matriz de coeficientes de Maxwell	55
Tabla 6. Matriz de capacitancias	56
Tabla 7. Valores de carga de cada uno de los 11 conductores.	57
Tabla 8. Matriz Preducida1	58
Tabla 9. Matriz Creducida1	59
Tabla 10. Matriz Creducida2	59
Tabla 11. Datos de entrada línea New York 20 conductores.....	67
Tabla 12. Datos de entrada línea Yumbo – Juanchito 115 Kv.....	76
Tabla 13. Datos de entrada para el cálculo de voltajes inducidos	80
Tabla 14. Voltajes inducidos en los conductores no aterrizados y no energizados (forma fasorial).....	80
Tabla 15. Voltajes inducidos en los conductores no aterrizados y no energizados (forma rectangular).....	81

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE CAMPO ELÉCTRICO	84
ANEXO 2. PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LOS VOLTAJES INDUCIDOS.	90

SIGLAS DE USO FRECUENTE

CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

RETIE: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.

ICNRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

ACSR: Aluminum Conductor Steel Reinforced.

MATLAB: Es un software de análisis numérico.

NRPB: National Resource Planning Board.

RESUMEN

Este trabajo de grado tiene como enfoque principal el desarrollo de un programa computacional que permita estudiar el comportamiento del campo eléctrico producido bajo las líneas de transmisión teniendo en cuenta diferentes configuraciones y alturas de las estructuras.

Este proyecto se ha desarrollado mediante el software Matlab versión estudiantil, para que arroje los cálculos del campo eléctrico, resuelve cualquier configuración de líneas de transmisión de electricidad, hace reducciones de conductores en haz y de cables de guardia, calcula el perfil del campo eléctrico y tiene la capacidad de realizarse a cualquier altura.

Adicionalmente se desarrolló un programa en el mismo software para calcular voltajes inducidos en líneas paralelas desenergizadas y cables de guarda no aterrizados.

INTRODUCCIÓN

En el mundo moderno la energía eléctrica se ha vuelto indispensable en la vida cotidiana, lo cual lleva a los seres humanos a estar expuestos a campos eléctricos en todo momento, aunque no se ha demostrado que los campos eléctricos son perjudiciales para la salud, se han hecho numerosos estudios incluso por organizaciones tan importantes como la OMS Organización Mundial de la Salud, que ha establecido algunos límites de exposiciones recomendados, también existen recomendaciones internacionales y normas nacionales que recomiendan unos valores máximos para el campo eléctrico.

Este proyecto se ha desarrollado mediante el software Matlab versión estudiantil, que se encarga de calcular el campo eléctrico bajo líneas de transmisión y también calcula voltajes inducidos, este arroja los resultados para cualquier configuración de líneas de transmisión de electricidad.

Entre los objetivos de este trabajo están:

OBJETIVO GENERAL:

Calcular el campo eléctrico producido por diferentes configuraciones de líneas de transmisión.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

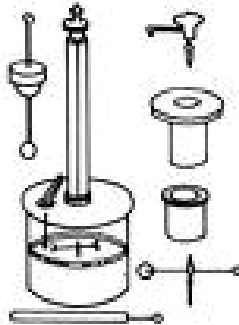
- Identificar los parámetros que influyen en el cálculo del campo eléctrico.
- Desarrollar un programa computacional que permita hallar el campo eléctrico producido por una línea de transmisión.

CAPITULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1 LEY DE COULOMB

Esta ley fue formulada por Charles-Agustín de Coulomb después de que realizó el siguiente experimento: Se dispone una ligera varita de junco barnizado con una esferilla de médula de saúco en uno de sus extremos, estando suspendido el conjunto por un hilo de plata para que pueda oscilar libremente sobre su centro de gravedad; pero de modo que, mediante el giro adecuado de todo el sistema, pueda, a voluntad, establecer contacto con otra carga de igual naturaleza solidariamente fija, de esta forma se electrizan dos esferas pequeñas (una fija y otra móvil, unida a una varilla), luego las tocó brevemente con un objeto ya electrizado. Las cargas de igual signo se reparten entre ambas masas, lo que las obliga a separarse, con el siguiente desplazamiento de la varilla que girara hasta formar un ángulo en el que la torsión del hilo equilibre el valor de la fuerza repulsiva que tiende a separarla de su posición inicial, Figura 1.

Figura 1. Balanza de torsión para demostrar las leyes de Coulomb.



Según los resultados las cargas de igual signo que se reparten entre ambas masas las obliga a separarse, con el posterior desplazamiento de la varilla que gira hasta formar un ángulo α .

Se hizo de nuevo este procedimiento con la mitad de la carga original, lo cual se logró tocando la esferilla fija con otra esfera auxiliar exactamente igual a ella, pero en estado neutro, la electricidad se distribuyó entre las dos en partes iguales quedando solo la mitad de carga en la primera cuando se retiró la esfera auxiliar.

Al repetir el procedimiento original, Coulomb observó que la esfera móvil se desplazaba de nuevo hasta formar un ángulo $\alpha/2$, correspondiente a dicha mitad de electrificación. La fuerza eléctrica es proporcional a la magnitud de las cargas eléctricas.

El experimento igualmente trató el efecto de la distancia sobre la fuerza eléctrica y con él se pudo demostrar que la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de las distancias.

Resumidas ambas conclusiones a través de la experimentación llegó a formular:

$$F = kq_1q_2 / r^2 \quad (1.1)$$

Donde:

k es un coeficiente de proporcionalidad dependiente del medio donde tienen lugar los efectos, así como de las unidades escogidas para efectuar una medición, en el Sistema Internacional de Unidades (S.I), $k = 9 \times 10^9 \text{ (N)(m}^2\text{)/C}^2$.

q_1, q_2 : Carga eléctrica [C]

r: Separación entre cargas [m]

F: Fuerza [N]

1.2 INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO

La región en la cual una carga de prueba (q), experimenta una fuerza eléctrica es llamada campo eléctrico.

Una primera magnitud fundamental es la intensidad de campo eléctrico en un punto, que se designa por el vector \vec{E} , y corresponde a la fuerza que actúa sobre una carga eléctrica positiva (1 Coulomb), situada en dicho punto. Dicha magnitud implica intensidad y sentido de la fuerza, y por tanto es direccional.

$$E = \frac{F}{+q} \quad \text{en} \quad \frac{N}{C} \quad \text{ó} \quad \frac{V}{m}$$

Una carga situada en un campo eléctrico queda sometida a una fuerza proporcional al valor de dicha carga. La carga $+q$ es muy pequeña, y por consiguiente no altera el campo al ser colocado en el punto de medición.

Cerca de una carga puntual (q_p), y ayudados de la ley de Coulomb.

$$E = \frac{F}{q} = \frac{kq_p q}{r^2} \times \frac{1}{q} = \frac{kq_p}{r^2} \quad (1.2)$$

La dirección lleva el sentido de las cargas según sea positiva o negativa. Se puede observar su signo debido a su comportamiento en un campo eléctrico.

Los campos eléctricos pueden existir en el vacío o en el interior de cualquier material en el cual las cargas se mantengan inmóviles, por ejemplo: parafina, o vidrio; por el contrario el campo es cero en el interior de los materiales en los que las cargas pueden moverse libremente, por ejemplo los metales con electrones libres, Figura 2 Y Figura 3. [7].

Figura 2. Campo eléctrico de una carga puntual positiva ($+q_p$)

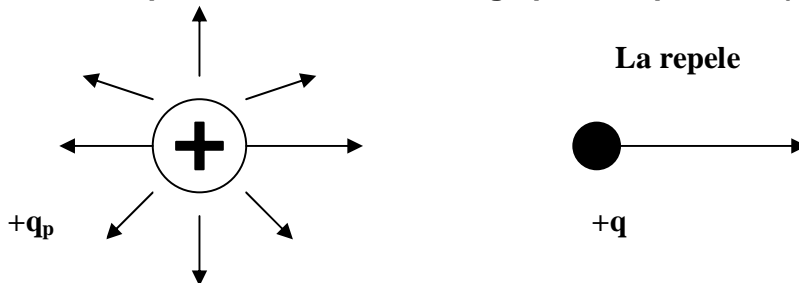
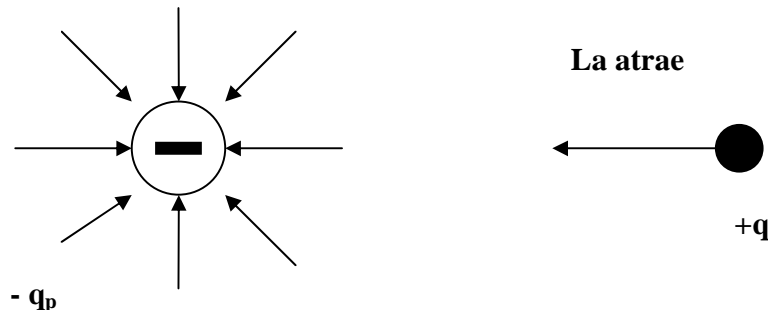


Figura 3. Campo eléctrico de una carga puntual negativa ($-q_p$).



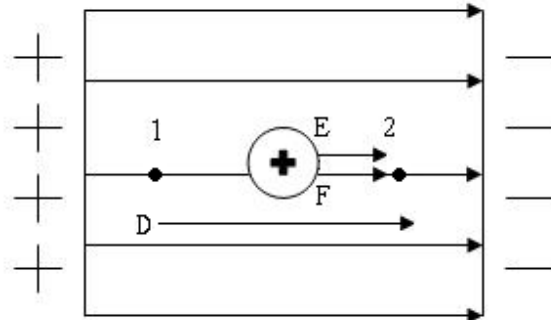
Un campo, entendido este como la interacción entre cuerpos en ausencia de contacto físico y sin medios de sustentación para ello. Los fenómenos de un campo eléctrico son distintos si el medio en que se manifiesta es aislante o conductor. En el primer caso las cargas están sujetas a su núcleo atómico y no pueden moverse libremente a pesar de las fuerzas que aparecen sobre ellas. En este caso el campo es electrostático, Si el campo eléctrico se manifiesta en un medio conductor los electrones libres se mueven bajo aquella acción y aparece la corriente eléctrica. Este resultado parece indicar que en un medio conductor no puede existir campo eléctrico, ya que es relativa la propiedad adquirida por los puntos del espacio en presencia de cargas fijas e invariables en el tiempo. Sin embargo, debe entenderse ahora que el campo eléctrico está producido por cargas constantes en magnitud, no siendo obligatorio que las cargas elementales que constituyen la carga total sean siempre las mismas.

El campo eléctrico se refiere a la influencia que una o más cargas ejercen sobre el espacio que las rodea, de esta forma una vez conocido el campo en un punto no es necesario saber que lo origina para calcular la fuerza sobre una carga u otra propiedad relacionada con él.

1.3 POTENCIAL Y DIFERENCIA DE POTENCIAL

La diferencia de potencial U_{12} entre el punto 1 y el 2 corresponde al trabajo que realizaría una carga positiva si pasase del primer punto al segundo. Para el campo uniforme representado en la Figura 2, la fuerza que actúa sobre la carga es de igual dirección a la del campo eléctrico, tiene el mismo sentido que el movimiento y por tanto la transferencia de energía se realiza desde la carga al exterior; esta hace un trabajo y a cambio de ello pierde energía potencial. Ello significa que al punto 1 le corresponde un potencial más alto que al 2. Se tiene en este caso $V_1 > V_2$. La diferencia de potencial $U_{12} = V_1 - V_2$ es positiva; la carga cede trabajo al exterior, Figura 4.

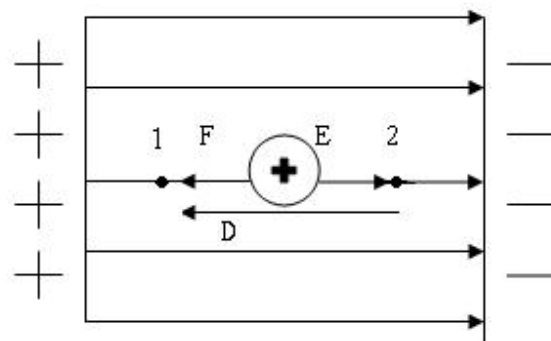
Figura 4. Carga moviéndose entre un punto 1 y el punto 2



La carga unidad pasa de 1 a 2. La fuerza cede trabajo al exterior y la carga pierde energía potencial $V_1 > V_2$.

Cuando la carga de prueba pasa de 2 a 1. La fuerza debida del campo eléctrico se opone al movimiento. La carga absorbe trabajo del exterior aumentando su energía potencial $V_2 < V_1$. La diferencia de Potencial $U_{21} = V_2 - V_1$, **Figura 5**

Figura 5. Carga moviéndose entre un punto 2 y el punto 1



En mecánica se necesita hacer un trabajo contra la fuerza gravitacional para levantar algo a una altura, en forma similar en electricidad se necesita hacer un trabajo para mover, en contra de una fuerza eléctrica, una carga eléctrica (o un objeto cargado eléctricamente); por ejemplo para alejar una carga positiva de una carga negativa se requerirá un fuerza (porque las cargas se atraen); el trabajo realizado será la fuerza q multiplicada por la distancia que se movió. El trabajo **W** realizado por unidad de carga para mover una carga **q** de un punto 1 a un punto 2 en el espacio, se llama diferencia de potencial ΔV entre estos dos puntos; de esta manera:

$$\Delta V = W / q \quad (1.3)$$

Donde ΔV es la diferencia de potencial entre los puntos 1 y 2. La unidad para la diferencia de potencial en el Sistema Internacional es el Voltio (V), 1 V igual a 1 J/C. La diferencia de potencial es una cantidad escalar y es independiente del camino seguido para mover la carga de un lugar a otro.

El potencial eléctrico de un punto es la diferencia de potencial entre ese punto y un punto seleccionado arbitrariamente en el cual el potencial se define como cero. En los circuitos eléctricos que ya se conocen (instalaciones domésticas, equipos electrónicos.), este cero se toma como tierra.

1.4 GRADIENTES DE POTENCIAL EN LINEAS DE TRANSMISION

Gradiente de potencial en líneas de transmisión se conoce como el campo eléctrico en la superficie de un conductor, el gradiente de potencial es necesario para evaluar fenómenos de descarga “corona”. Debido a que la superficie de los conductores no es uniforme, es complicado un cálculo exacto del gradiente en todos los puntos alrededor de él pero se pueden tener los puntos en que es más alto el campo eléctrico y el punto que donde está el menor campo eléctrico. También es utilizado para calcular el gradiente de conductores lisos y cuyo diámetro interior es igual al exterior, ya que no contienen chaqueta de protección aislada.

Dada la posición de los conductores que se presenta en la mayoría de las líneas de transmisión las cargas de cada una de las fases son distintas, dando como resultado que los gradientes que se presentan sobre cada uno de los conductores sea diferente.

En general se tiene:

$$\Delta V = \frac{W}{q} = \left(\frac{F}{q} \right) (L) = -E \Delta L \quad (1.4)$$

L: Distancia [m]

$$E = -\frac{\Delta V}{\Delta L} \quad \text{Cuyas unidades son } \left[\frac{V}{m} \right]$$

$\frac{\Delta V}{\Delta L}$ Esta expresión indica la variación de ΔV en la distancia.

Se llama gradiente de potencial a la dirección de **E** que es opuesta a la dirección en la cual aumenta la diferencia de potencial.

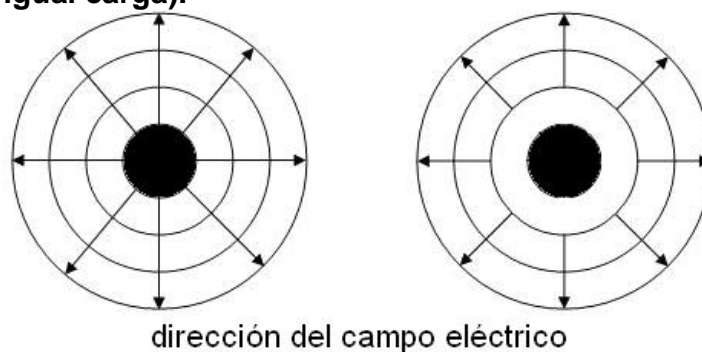
Nota: El aire seco se fragmentará eléctricamente y se ionizará cuando la intensidad del campo eléctrico sea $E = 3 \times 10^6 \left[\frac{V}{m} \right]$

1.5 METODO DE LAS IMÁGENES SIMÉTRICAS

El sistema denominado método de las imágenes, consiste en sustituir superficies límite o separación entre dos dieléctricos por cargas ficticias o cargas de imagen, que den resultados equivalentes.

Sea el campo creado por un eje con carga positiva (+q). Las líneas de fuerza son radiales y las superficies equipotenciales, cilindros concéntricos. Coincidiendo con una de tales superficies equipotenciales se puede disponer un tubo metálico muy delgado sin que el campo resulte modificado. Incluso puede suprimirse el eje cargado y en su lugar disponer la carga (+q) distribuida uniformemente sobre la superficie exterior del tubo. Por tanto, un tubo o un conductor cilíndrico muy largo se comportan igual que un eje cargado, ver en la Figura 6.

Figura 6. Campos equivalentes debido a un eje cargado y a un conductor cilíndrico (con igual carga).



Si en un campo eléctrico cualquiera, se introduce una superficie metálica conductora, infinitamente delgada, coincidiendo exactamente con una superficie equipotencial el campo no se modifica pues las líneas del campo continúan siendo normales a la superficie metálica que une puntos de igual potencial. Tal superficie separa ahora el campo en 2 partes que pasan a ser independientes en el sentido de poder suprimirse una de ellas, subsistiendo la otra parte en su forma original.

En sistemas de transmisión, la tierra afecta la forma del campo eléctrico bajo la línea, la tierra se considera una superficie equipotencial dado que asume su efecto considerando cargas imágenes, Figura 7, estas cargas se ubican con la misma distancia que se tiene desde el conductor real a tierra, pero partiendo de tierra a su interior, también están dadas con signo opuesto del conductor real, Figura 8, [10].

Figura 7. Campo debido a dos cargas iguales de signo opuesto.

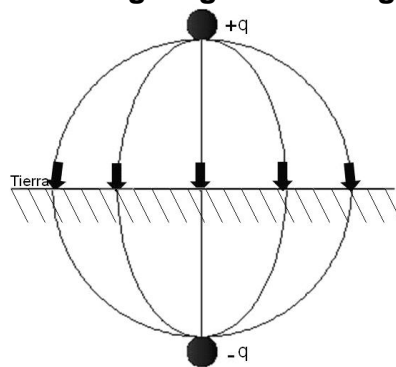
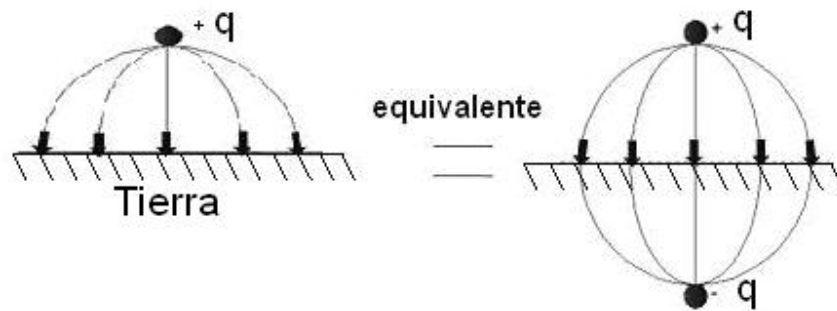


Figura 8. Eliminación de la tierra.



1.6 CAPACITANCIA DEBIDA A VARIOS CONDUCTORES

De acuerdo a la ley de Gauss para los campos eléctricos [9], una carga q produce una diferencia de potencial entre dos puntos dada por:

$$V_{12} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1.5)$$

V_{12} : Voltaje o diferencia de potencial entre el punto 1 y el punto 2.

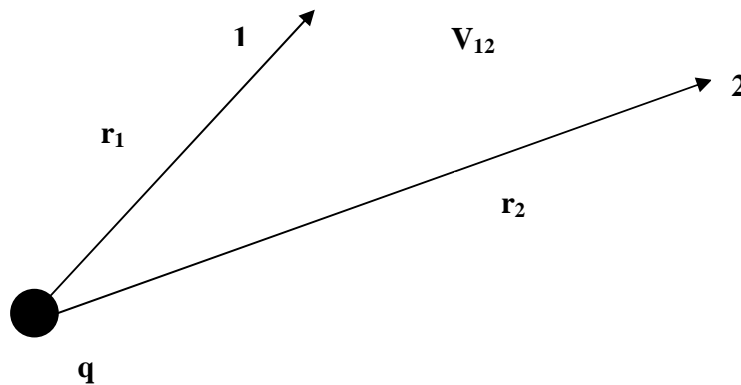
ϵ_0 : $8,854 \times 10^{-12}$ [F/m]

r_1, r_2 : Distancia de la carga al punto donde se mide la diferencia de potencial.

Donde: $\frac{1}{2\pi\epsilon_0} = 18 \times 10^9 \left[\frac{m}{F} \right]$

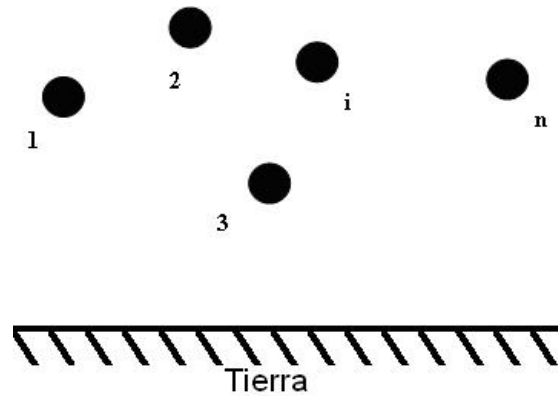
En la Figura 9 se puede observar cómo se da la diferencia de potencial debido a una carga puntual.

Figura 9. Diferencia de potencial entre dos puntos debido a una carga puntual.



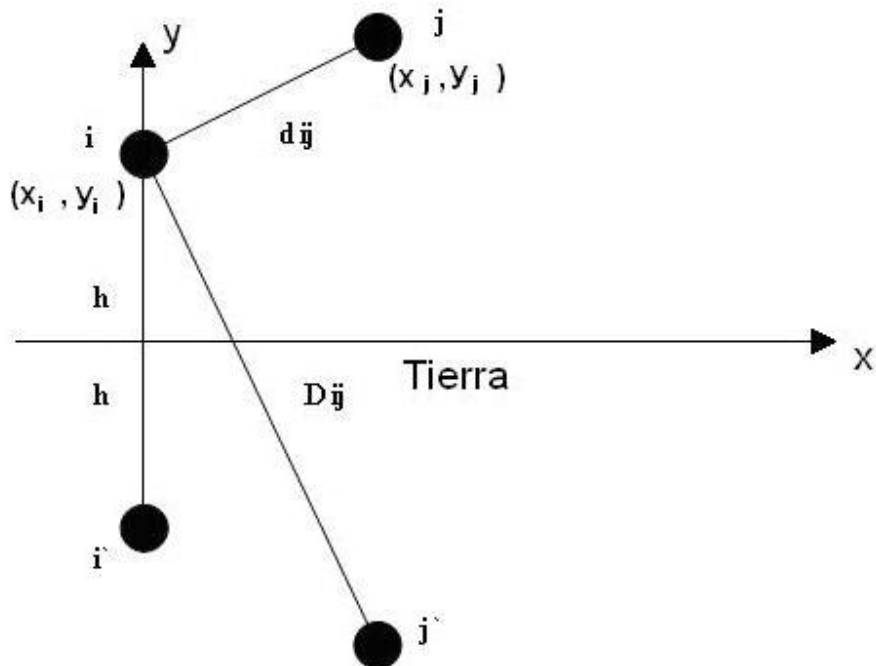
Para el caso de n conductores y teniendo en cuenta el efecto del suelo, Figura 10, la diferencia de potencial por unidad de longitud o potencial eléctrico por unidad de longitud entre un punto genérico y un punto en el infinito, se puede representar en forma matricial [9, 4].

Figura 10. Diferencia de potencial debido a n conductores



Teniendo en cuenta las imágenes de los conductores y el plano de la tierra, se obtiene una diferencia de potencial para n conductores por unidad de longitud, Figura 11, [9]:

Figura 11. Imágenes simétricas para cargas i y j.



$$\boxed{[V] = [P][Q]} \quad \begin{bmatrix} V \\ m \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Donde:

[V]: Vector de voltajes en los conductores reales con dimensión $n \times 1$, [V/m]

[P]: Matriz de coeficientes de potencial o coeficientes de Maxwell con dimensión $n \times n$, [m/F]

[Q]: Vector de las densidades de carga lineales de los conductores reales con dimensión $n \times 1$, [C/m]

Los elementos de la matriz [P] son:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} Ln \frac{2h_i}{r_i} \left[\frac{m}{F} \right] = 18 \times 10^9 Ln \frac{2h_i}{r_i} \left[\frac{m}{F} \right] \quad (1.7)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} Ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \left[\frac{m}{F} \right] = 18 \times 10^9 Ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \left[\frac{m}{F} \right] \quad (1.8)$$

En las cuales:

h_i : Altura del conductor i sobre la tierra.

D_{ij} : Distancia entre el conductor i y la imagen del conductor j , [m]

d_{ij} : Distancia directa entre los conductores i y j , [m]

r_i : Radio del conductor i , [m]

$$D_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j + y_i)^2} [m] \quad (1.9)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} [m] \quad (1.10)$$

Al despejar [Q] de la ecuación 1.6, se tiene:

$$[Q] = [C][V] \quad (1.11)$$

Donde

$$[C] = [P]^{-1} \quad (1.12)$$

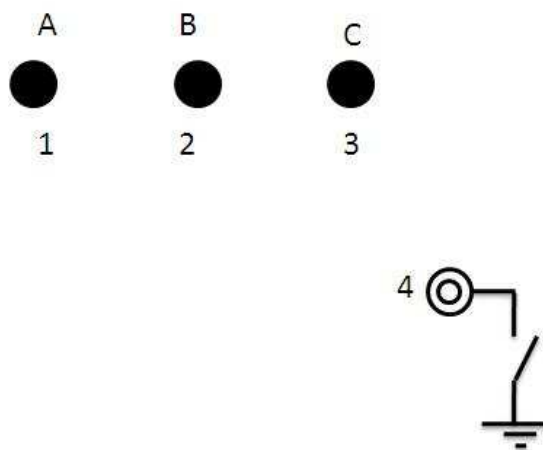
$[C]$: Matriz de capacitancias por unidad de longitud, [F/m]

1.7 VOLTAJES INDUCIDOS EN CIRCUITOS PARALELOS DESENERGIZADOS Y NO ATERRIZADOS

En presencia de un circuito energizado es posible que temporalmente se encuentren circuitos paralelos desenergizados y no aterrizados, en estas condiciones se inducen voltajes en los circuitos paralelos debido a los campos eléctricos producidos por el circuito energizado.

En la Figura 12, se considera que existe un elemento metálico, (tubería, cable de guarda, etc.) no aterrizado que se encuentra paralelo a un circuito trifásico balanceado.

Figura 12. Conductor paralelo no aterrizado



Nota: Los conductores 1, 2, y 3 están energizados para los cuales su designación es **ce**. El elemento metálico 4 no está energizado y su designación es **ne**. Donde: $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ y $V_4 \neq 0$, $I_4 = 0$

Para conformar la matriz de coeficientes de potencial o de Maxwell, primero se enumeran los conductores de cada fase y después, los restantes elementos metálicos no aterrizados.

Luego se halla la matriz $[P]$ como se muestra en la sección 1.6., las dimensiones de la matriz $[P]$ son $(ce+ne) \times (ce+ne)$.

De la ecuación (1.12), la matriz de capacitancia por unidad de longitud es $[C]=[P]^{-1}$ y con ella se puede obtener la matriz de admitancia capacitiva por unidad de longitud:

$$[Y] = j\omega[C] \quad [S/m] \quad (1.13)$$

$$[I] = [Y][V] \quad (A/m) \quad (1.14)$$

Donde $[I]$ es un vector de corrientes por unidad de longitud y $[V]$ es el vector de voltajes por unidad de longitud.

Para la línea de la Figura 12:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

En el caso de los circuitos paralelos desenergizados, la ecuación (1.14) se puede representar como:

$$\begin{bmatrix} [I_{ce}] \\ [I_{ne}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_I] & [Y_{II}] \\ [Y_{III}] & [Y_{IV}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_{ce}] \\ [V_{ne}] \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Donde:

$[I_{ce}]$: Vector de corrientes por unidad de longitud del circuito energizado $[A/m]$, dimensiones $(ce) \times (1)$

$[\mathbf{I}_{ne}]$: Vector de corrientes por unidad de longitud del circuito no energizado, dimensiones $(ne) \times (1)$, sus elementos son iguales a cero.

$[Y_I]$: Submatriz de admitancias capacitivas por unidad de longitud para el circuito energizado, sus dimensiones son $(ce) \times (ce)$

$[Y_{II}]$: Submatriz de admitancias capacitivas por unidad de longitud entre el circuito energizado y el no energizado, dimensiones $(ce) \times (ne)$

$$[Y_{III}] = [Y_{II}]^{traspuesta} \quad (1.16)$$

$[Y_{IV}]$: Submatriz de admitancias capacitivas por unidad de longitud para el circuito desenergizado, con dimensiones $(ne) \times (ne)$

$[\mathbf{V}_{ce}]$: Vector de voltajes por unidad de longitud para el circuito energizado.

$[\mathbf{V}_{ne}]$: Vector de voltajes por unidad de longitud para el circuito no energizado.

En el circuito desenergizado:

$$[\mathbf{I}_{ne}] = [0]$$

De la ecuación (1.15):

$$[\mathbf{I}_{ne}] = [Y_{III}][\mathbf{V}_{ce}] + [Y_{IV}][\mathbf{V}_{ne}]$$

$$[0] = [Y_{III}][\mathbf{V}_{ce}] + [Y_{IV}][\mathbf{V}_{ne}]$$

Y despejando el vector de voltajes en el circuito no energizado se obtiene:

$$\boxed{[\mathbf{V}_{ne}] = -[Y_{IV}]^{-1}[Y_{III}][\mathbf{V}_{ce}]} \quad (1.17)$$

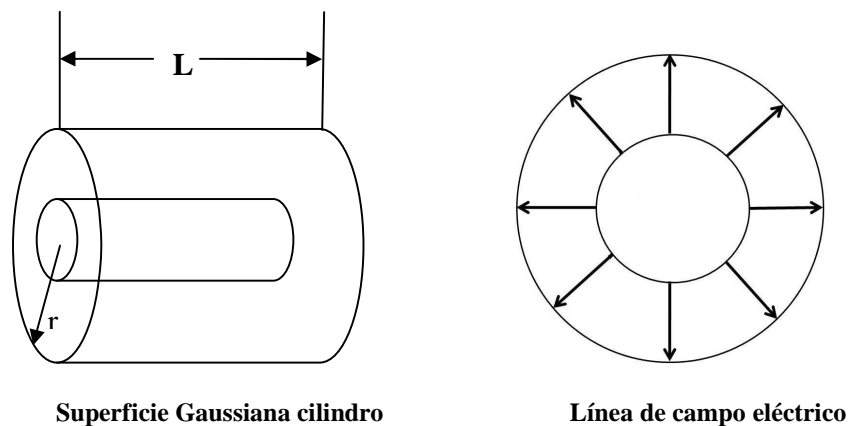
CAPITULO 2 CAMPO ELÉCTRICO BAJO LINEAS DE TRANSMISIÓN

2.1 CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A UN CONDUCTOR SIN CONSIDERAR EL EFECTO TIERRA

Para obtener la intensidad del campo eléctrico bajo las líneas de transmisión es necesario referirse a la ley de Gauss. Esta ley es la que relaciona el flujo eléctrico a través de una superficie abierta o cerrada y la carga eléctrica encerrada en esta superficie. En este tema lo que interesa es un campo eléctrico es el flujo que se mide por el número de líneas de fuerza que atraviesan una superficie.

Para definir el flujo eléctrico se considera una superficie cerrada arbitraria dentro de un campo eléctrico, esta se divide en cuadrados elementales ΔS cada uno de los cuales es lo suficientemente pequeño como para considerarse plano, estos elementos pueden ser representados como vectores $\vec{\Delta S}$ cuya magnitud es la propia área, la dirección es normal a la superficie y el sentido hacia fuera, en cada cuadrado también es posible trazar un vector de campo eléctrico \vec{E} ya que los cuadrados son tan pequeños como se quiera \vec{E} puede considerarse constante en todos los puntos de un cuadrado, Figura 13.

Figura 13. Campo en un punto debido a una línea aislada



Por Gauss [9], la magnitud del campo eléctrico creado por la carga (que esta dada por unidad de longitud), de una línea de transmisión a una distancia r del centro del conductor es:

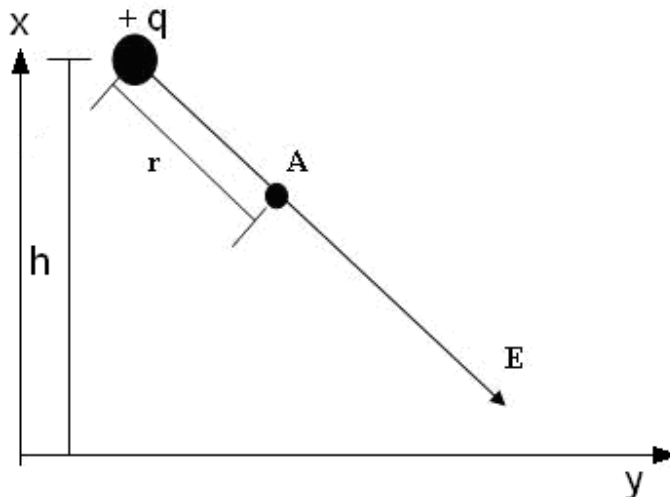
$$E = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \right) (q) \left(\frac{1}{r} \right) \text{ En } \left[\frac{V}{m} \right] \quad (2.1)$$

$$E = k \frac{q}{r} \quad (2.2)$$

Con $k = 18 \times 10^9 \left[\frac{m}{F} \right]$

Para evaluar el campo en un punto genérico A, a una distancia r de la línea de transmisión se utiliza la ecuación (2.2); dicha ecuación da la magnitud del campo. La dirección depende de la naturaleza de la carga, si q es positiva, en una carga puntal de prueba (+ q) ubicada en A, la dirección es como se muestra en la Figura 14, el vector va en dirección desde la carga al punto en cuestión y alejándose de la línea de transmisión.

Figura 14. Dirección del campo debido a una carga Q positiva



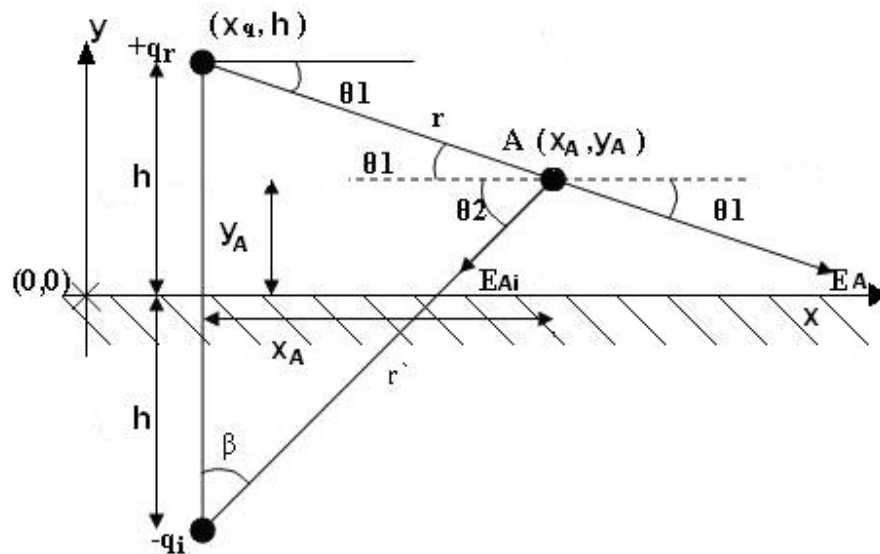
Si q es negativa, la dirección del campo eléctrico \vec{E} se invierte 180° , es decir, se dirige hacia la línea de transmisión.

2.2 CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A UN CONDUCTOR CONSIDERANDO EL EFECTO DE LA TIERRA

Como se estableció en el numeral 1.5, la tierra se puede suprimir y reemplazar su efecto por una carga imagen de signo contrario al de la carga en la línea de transmisión y a una distancia igual a su altura en la otra dirección (“dentro de la tierra”).

En la Figura 15, se calcula el campo eléctrico en un punto cualquiera A debido a un conductor considerando el efecto de la tierra.

Figura 15. Campo eléctrico en un punto debido a un conductor considerando el efecto de la tierra.



$+q_r$: Conductor real.

$-q_i$: Conductor imaginario.

h : Distancia de el conductor a tierra.

E_A : Campo eléctrico producido por la carga real en el punto A.

E_{Ai} : Campo eléctrico producido por la carga imagen en el punto A.

Según la ecuación (2.2), el campo eléctrico en el punto A es:

$$|E_A| = \frac{(k)(q)}{r'} \quad (2.3)$$

El cual es producido por el conductor real.

$$|\vec{E}_{Ai}| = \frac{(k)(q)}{r'} \quad (2.4)$$

El cual es producido por la imagen del conductor.

Las direcciones se muestran en la Figura 15.

$$r = \sqrt{(x_q - x_A)^2 + (h - y_A)^2} \quad (2.5)$$

r es la distancia desde el conductor real a un punto general llamado A.

$$r' = \sqrt{(x_q - x_A)^2 + (h + y_A)^2} \quad (2.6)$$

r' es la distancia desde el conductor imagen a un punto general llamado A.

Descomponiendo horizontal y verticalmente los campos eléctricos y sumando algebraicamente:

$$E_x = |E_A| \cos \theta_1 - |E_{Ai}| \cos \theta_2 \quad (2.7)$$

$$E_y = -|E_A| \sin \theta_1 - |E_{Ai}| \sin \theta_2 \quad (2.8)$$

E_x : Campo eléctrico en el eje horizontal.

E_y : Campo eléctrico en el eje vertical.

$$\cos \theta_1 = \frac{x_A - x_q}{r} \quad (2.9)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{x_A - x_q}{r'} \quad (2.10)$$

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{h - y_A}{r} \quad (2.11)$$

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{h + y_A}{r'} \quad (2.12)$$

Remplazando las ecuaciones (2.9), (2.10) (2.11) y (2.12), en las ecuaciones (2.7) y (2.8):

$$E_x = \frac{(k)(q)}{r} \times \frac{x_A - x_q}{r} - \frac{(k)(q)}{r'} \times \frac{x_A - x_q}{r'}$$

$$E_x = (k)(q)(x_A - x_q) \left\{ \frac{1}{(x_q - x_A)^2 + (h - y_A)^2} - \frac{1}{(x_q - x_A)^2 + (h + y_A)^2} \right\} \quad (2.13)$$

$$E_y = \left(-\frac{(k)(q)}{r} \right) \left(\frac{h - y_A}{r} \right) - \left(\frac{(k)(q)}{r'} \right) \left(\frac{h + y_A}{r'} \right)$$

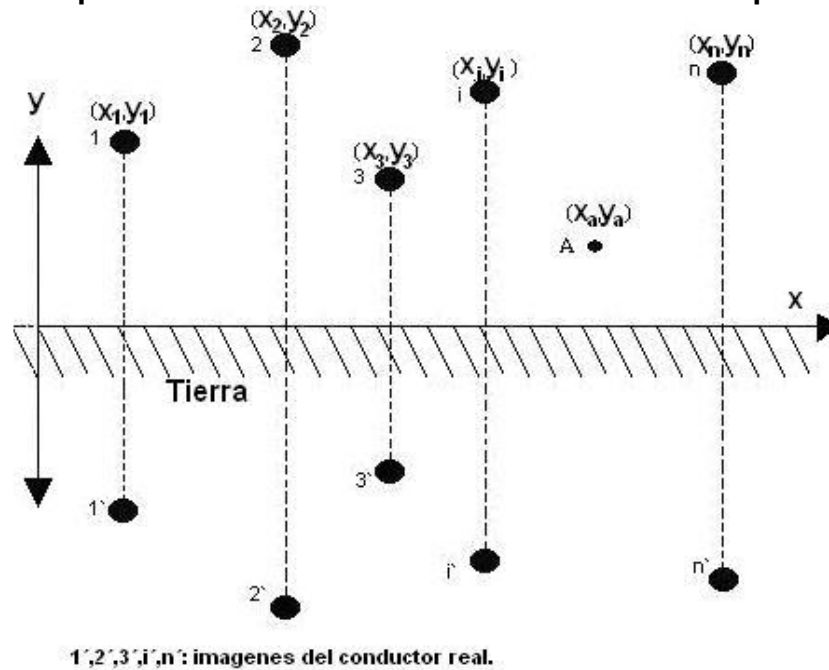
$$E_y = (-k)(q) \left\{ \frac{h - y_A}{r^2} + \frac{h + y_A}{(r')^2} \right\}$$

$$E_y = (-k)(q) \left\{ \frac{h - y_A}{(x_q - x_A)^2 + (h - y_A)^2} + \frac{h - y_A}{(x_q - x_A)^2 + (h - y_A)^2} \right\} \quad (2.14)$$

2.3 CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A VARIOS CONDUCTORES CONSIDERANDO EL EFECTO DE LA TIERRA

Se obtiene el campo eléctrico en un punto general A debido a varios conductores que transportan corriente y considerando el efecto de la tierra, Figura 16.

Figura 16. Campo eléctrico de n líneas de transmisión en un punto.



$$E_{x_i} = (k)(q_i)(x_A - x_i) \left\{ \frac{1}{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2} - \frac{1}{(x_i - x_A)^2 + (y_i + y_A)^2} \right\}$$

Para todos los n conductores, el campo eléctrico total en el eje X, E_x , es:

$$E_x = (k) \sum_{i=1}^n (q_i)(x_A - x_i) \left\{ \frac{1}{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2} - \frac{1}{(x_i - x_A)^2 + (y_i + y_A)^2} \right\} \quad (2.15)$$

El campo eléctrico total en el eje Y, E_y , es:

$$E_y = (-k) \sum_{i=1}^n q_i \left\{ \frac{y_i - y_A}{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2} + \frac{y_i + y_A}{(x_i - x_A)^2 + (y_i + y_A)^2} \right\} \quad (2.16)$$

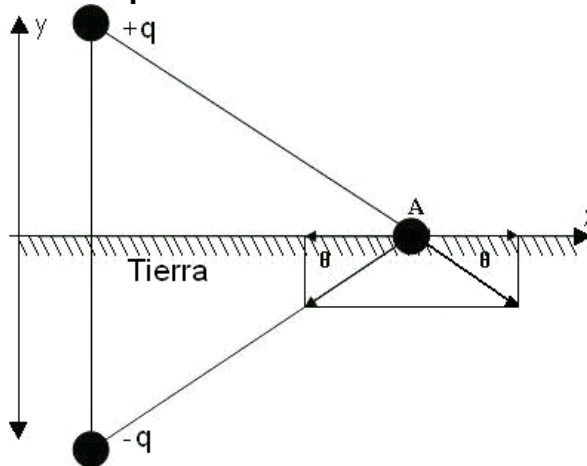
El campo total expresado en forma polar es:

$$E_A = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \angle \text{Tan}^{-1} \frac{E_y}{E_x} \quad (2.17)$$

2.4 CAMPO ELÉCTRICO A NIVEL DEL SUELO

En este caso $Y_A = 0$ y de la ecuación (2.15) se observa que $E_x = 0$ y solo tiene componente E_y , el campo resultante en este caso es solo E_y , Figura 17.

Figura 17. Campo eléctrico a nivel del suelo



Por la simetría que se presenta, las componentes horizontales del campo eléctrico producido por la carga real y su imagen se cancelan ya que tienen dirección opuesta e igual magnitud sin importar el tipo de carga. Las componentes verticales del campo eléctrico se duplican y se dirigen a lo largo del eje vertical.

2.5 CAMPO ELÉCTRICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Si las líneas de transmisión transportan corriente directa, las cargas serán invariables en el tiempo, sus valores son constantes, y así el campo en el punto A dependerá solamente de las coordenadas x_A , y_A ecuaciones (2.15) y (2.16).

Si las líneas de transmisión transportan corriente alterna, las cargas eléctricas varían en función del tiempo (ondas sinusoidales) y por lo tanto el campo eléctrico se puede representar como una función dependiente de las coordenadas y del tiempo (cantidad fasorial).

Existen dos métodos para la solución del campo eléctrico, el primero es utilizando la forma principal en la que se presenta el campo eléctrico, la forma instantánea (método instantáneo), y la segunda es transformando ésta en su forma fasorial (método fasorial).

2.5.1 Método Instantáneo.

La forma de calcular el campo eléctrico con el método instantáneo es obteniéndolo da las ecuaciones (2.15) y (2.16), e incluyendo la variación de la carga con el tiempo, como se muestra a continuación:

$$q_a = |q_m| \cos(\omega t + \phi) [C/m] \quad (2.18)$$

Por ejemplo, si se tiene un circuito trifásico simple con una distribución de cargas así:

$$q_a = |q_m| \cos(\omega t) [C/m] \quad (2.19)$$

$$q_b = |q_m| \cos(\omega t - (2\pi/3)) [C/m] \quad (2.20)$$

$$q_c = |q_m| \cos(\omega t + (2\pi/3)) [C/m] \quad (2.21)$$

Donde:

q_a , q_b , q_c : Cargas eléctricas por unidad de longitud en función del tiempo en cada una de las fases del circuito.

q_m : Carga máxima por unidad de longitud. $[C/m]$

ω : Velocidad angular.

t: Tiempo, [s].

En este caso una vez se fije el punto a estudiar x_A , y_A , y al reemplazar E_X y E_Y se tienen que expresar en función del tiempo:

$$E_X = f_1(t)$$

$$E_Y = f_2(t)$$

Es decir, las componentes x, y varían con el tiempo dado que es un caso de corriente alterna. Donde f_1 y f_2 son funciones sinusoidales de igual frecuencia pero con amplitudes diferentes.

La magnitud del campo resultante para una fase también varía con el tiempo, ecuación (2.17):

$$t = t_a \geq 0 \text{ s}$$

$$E_X(t_a) = f_1(t_a)$$

$$E_Y(t_a) = f_2(t_a)$$

$$E_A = f_3(t) = \sqrt{f_1^2(t_a) + f_2^2(t_a)}$$

En general:

$$E_A = f_3(t) = \sqrt{f_1^2(t) + f_2^2(t)} \quad (2.22)$$

Si la ecuación (2.17) se desarrolla para una de las fases, por ejemplo la fase b, la ecuación tendría la siguiente forma:

De (2.15):

$$E_{x_A} = k \left\{ \begin{aligned} & (q_m) \cos(\omega t) \left[\frac{1}{(x_a - x_A)^2 + (y_a - y_A)^2} - \frac{1}{(x_a - x_A)^2 + (y_a + y_A)^2} \right] + \\ & (q_m) \cos(\omega t - (2\pi/3))(x_A - x_b) \left[\frac{1}{(x_b - x_A)^2 + (y_b - y_A)^2} - \frac{1}{(x_b - x_A)^2 + (y_b + y_A)^2} \right] + \\ & (q_m) \cos(\omega t + (2\pi/3))(x_A - x_c) \left[\frac{1}{(x_c - x_A)^2 + (y_c - y_A)^2} - \frac{1}{(x_c - x_A)^2 + (y_c + y_A)^2} \right] \end{aligned} \right\}$$

De (2.16):

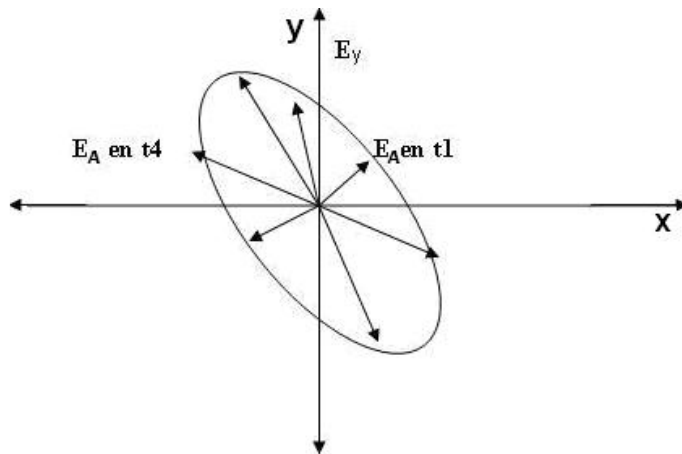
$$E_{x_A} = (-k) \left\{ \begin{aligned} & (q_m) \cos(\omega t) \left[\frac{y_a - y_A}{(x_a - x_A)^2 + (y_a - y_A)^2} - \frac{y_a - y_A}{(x_a - x_A)^2 + (y_a + y_A)^2} \right] + \\ & (q_m) \cos(\omega t - (2\pi/3)) \left[\frac{y_b - y_A}{(x_b - x_A)^2 + (y_b - y_A)^2} - \frac{y_b - y_A}{(x_b - x_A)^2 + (y_b + y_A)^2} \right] + \\ & (q_m) \cos(\omega t + (2\pi/3)) \left[\frac{y_c - y_A}{(x_c - x_A)^2 + (y_c - y_A)^2} - \frac{y_c - y_A}{(x_c - x_A)^2 + (y_c + y_A)^2} \right] \end{aligned} \right\}$$

La forma práctica de resolver es:

Para un tiempo t_1 , se evalúan las cargas con (2.19), (2.20) y (2.21), luego se resuelve E_x y E_y , con (2.15) y (2.16) y se tienen las componentes del campo en un instante. Se repite ahora para un instante de tiempo diferente t_2 , y se obtienen nuevos valores de E_x y E_y , Este procedimiento se repite para tantos tiempos diferentes como se desee.

En forma general, el campo eléctrico total de la ecuación (2.22) en un solo punto tiene la forma de la Figura 18.

Figura 18. Campo eléctrico en el punto A en diferentes instantes.



2.5.2 Método Fasorial

La forma de calcular el campo eléctrico con el método fasorial es obteniéndolo de las ecuaciones (2.15) y (2.16), y representando la ecuación de la carga eléctrica sin variación en el tiempo, como se muestra a continuación:

Para el sistema trifásico circuito simple, las cargas eléctricas se pueden representar en forma fasorial así:

$$\mathbf{q}_a = |q_m / \sqrt{2}| \angle 0 [C/m] \quad (2.23)$$

$$\mathbf{q}_b = |q_m / \sqrt{2}| \angle -120 [C/m] \quad (2.24)$$

$$\mathbf{q}_c = |q_m / \sqrt{2}| \angle 120 [C/m] \quad (2.25)$$

Se reemplaza (2.23), (2.24) y (2.25) en las ecuaciones (2.15) y (2.16) y se obtienen E_x y E_y , en forma de fasor. Y para llevar al tiempo se realizan las siguientes operaciones:

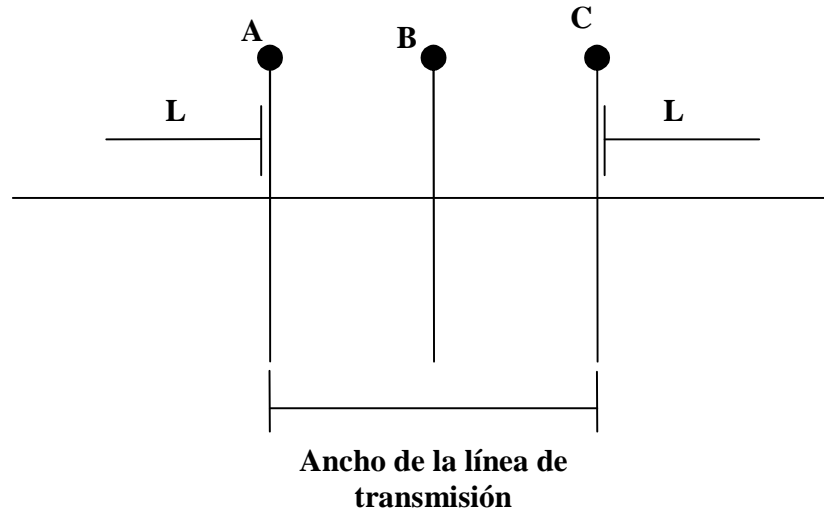
$$E_x(t) = E_x \sqrt{2} \cos(\omega t + \phi_1) \quad (2.26)$$

$$E_y(t) = E_y \sqrt{2} \cos(\omega t + \phi_2) \quad (2.27)$$

2.6 PERFIL DEL CAMPO BAJO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN A UNA ALTURA DETERMINADA

Cuando una línea de transmisión transporta corrientes sinusoidales, se producen unos campos eléctricos máximos a una altura determinada, lo cual se conoce como perfil del campo eléctrico y para hallarlo se resuelven las ecuaciones (2.15) y (2.16), para un punto determinado (x_i, h) , se resuelve por el método fasorial como se muestra en el numeral 2.5.2, buscando su amplitud máxima. El proceso se repite para otros puntos del mismo trayecto, que cubran todo el ancho de la línea de transmisión, Figura 19.

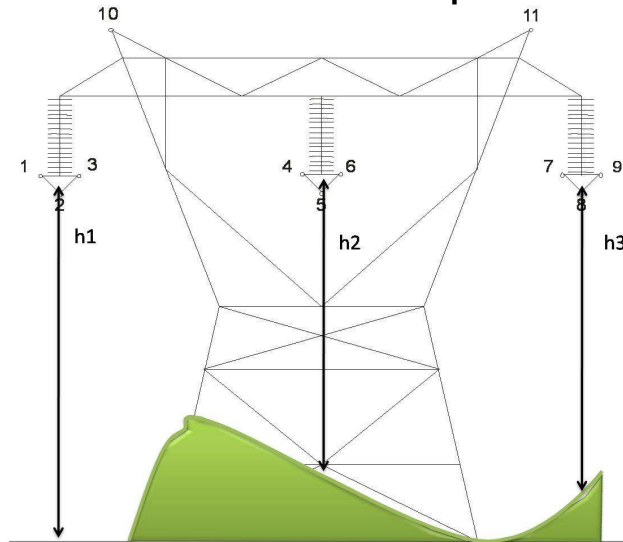
Figura 19. Zona de estudio del perfil del campo



A, B, C: Conductores o fases de la línea
L: servidumbre de la línea [m]

Si a lo ancho de la línea de transmisión se presentan terrenos con ondulaciones o pendientes, el perfil del campo eléctrico debe ser calculado para varias alturas distintas, Figura 20.

Figura 20. Línea de transmisión en terrenos no planos



2.7 RECOMENDACIONES INTERNACIONALES DE CAMPO ELÉCTRICO MÁXIMO

A pesar de que a nivel mundial todas las investigaciones concluyen en que no hay evidencia científica suficiente como para concluir que los campos eléctricos a baja frecuencia o industriales afectan la salud humana, han surgido una serie de recomendaciones por organizaciones tan importantes como la ICNIRP (International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection), las cuales generaron algunos límites recomendados para la exposición a campos eléctricos tanto a nivel de trabajadores y del público en general, Tabla 1. [5].

Tabla 1. Recomendaciones internacionales de campo eléctrico máximo

NORMA	CAMPO ELECTRICO MAXIMO (kV/m)	
International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection	8,333	Trabajadores
	4,167	Público En General
European Prestandar ENV 50166-1 (1995)	25	Trabajadores
	10	Público En General
National Resources Planning borrad NRPB, Reino Unido	12	Trabajadores
	12	Público En General
American Conference Of Governmental Industrial Hygienists	25	Trabajadores

2.8 NORMAS NACIONALES DE CAMPO ELÉCTRICO MÁXIMO

A nivel nacional, el gobierno colombiano expidió algunas normas como las publicadas en el RETIE, el cual define en su Artículo 14 los valores límites de los campos eléctricos y en la CREG 098-2000, en la que se establecen los límites del campo eléctrico en las servidumbres de las líneas eléctricas, Tabla 2. [2, 8].

Tabla 2. Campo máximo permitido por el RETIE y la CREG

NORMA	CAMPO ELECTRICO MAXIMO
RETIE	10 kV/m
CREG	5 kV/m

CAPITULO 3 COMO USAR LOS PROGRAMAS PARA EL CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO O LOS VOLTAJES INDUCIDOS

En este capítulo se explica cómo utilizar los programas desarrollados en el software Matlab versión estudiantil, para el cálculo del campo eléctrico o los voltajes inducidos.

Primero, se debe grabar el código fuente de los programas que está en los anexos 1 (campos eléctricos) y 2 (voltajes inducidos), como dos archivos script con extensión punto m (**campos.m y voltajes.m**) en el directorio Work de Matlab. Segundo, se deben ingresar los datos de las líneas como se muestra en la siguiente sección.

3.1 ENTRADA DE DATOS

Para calcular el campo eléctrico o los voltajes inducidos para una configuración de línea como la que aparece en la Figura 21, donde A, B y C representan las fases y W el cable de guarda, es necesario crear en Excel una hoja de cálculo y grabarla en el directorio Work de Matlab como un archivo con extensión punto xls (**Datos_Lineas.xls**). En la Tabla 3, se muestra la información de la hoja de cálculo que debe digitarse, Figura 21.

Figura 21. Configuración de la línea

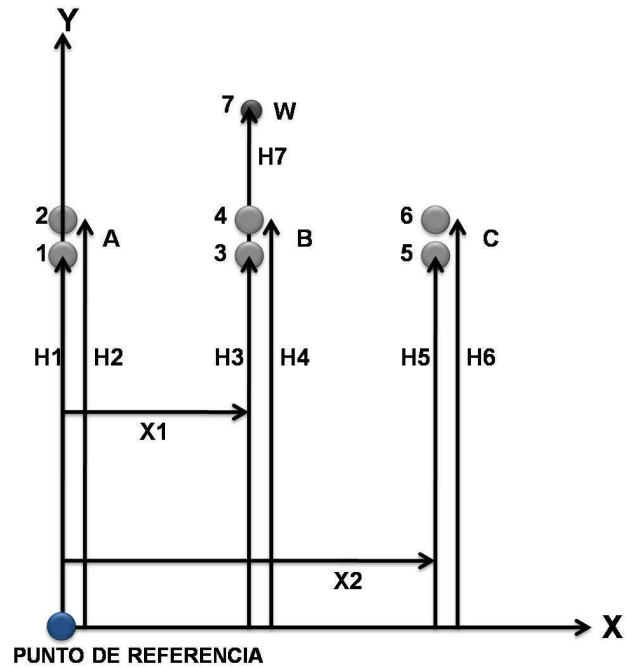


Tabla 3. Ingreso de datos en la hoja de cálculo

CONDUCTOR	COORDENADA X (m)	RADIO FISICO (m)	ALTURA SOBRE TIERRA (m)	FASE	MAGNITUD VOLTAJE DE FASE (kV)	ANGULO DE FASE
1	0		H1	1 (A)		
2	0		H2	1 (A)		
3	X1		H3	2 (B)		
4	X1		H4	2 (B)		
5	X2		H5	3 (C)		
6	X2		H6	3 (C)		
7	X1		H7	0 ó -1 (W)		

Donde:

- CONDUCTOR: Enumeración de los conductores de la línea, primero se enumeran todos los conductores de las fases y por último los cables de guarda (elementos no energizados).

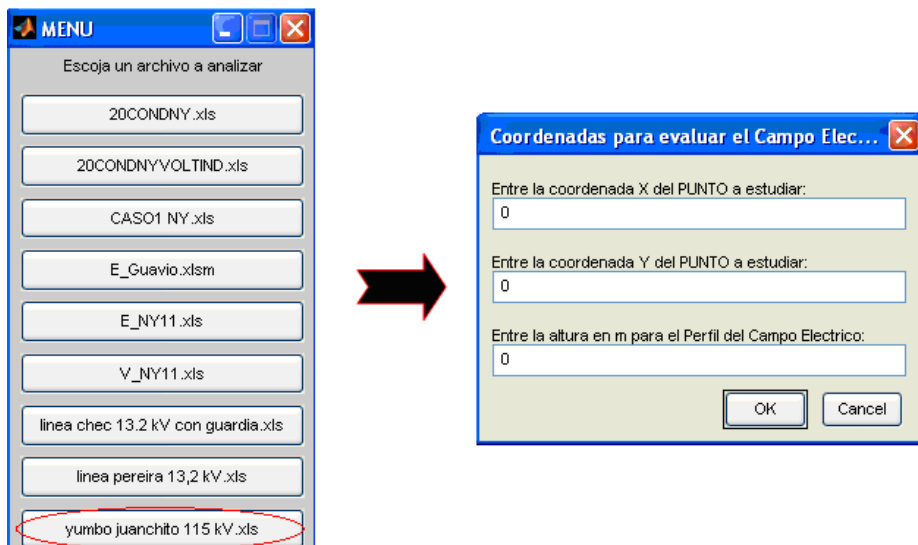
- COORDENA X (m): Distancia horizontal desde el punto de referencia hasta donde se encuentre ubicado el conductor.
- RADIO FISICO (m): Es suministrado por el fabricante de los conductores.
- ALTURA SOBRE TIERRA (m): Distancia que existe desde la tierra hasta el conductor.
- FASE: Se usa un número para indicar a que fase corresponde cada conductor. Por ejemplo, fase A = 1, fase B = 2, fase C = 3 y cable de guarda (W) es 0 (para el cálculo del campo eléctrico) o -1 (para el cálculo de voltajes inducidos)
- MAGNITUD VOLTAJE DE FASE (kV): Tensión de operación de la línea.
- ANGULO DE FASE: El desfase que existe entre los voltajes de fase.

3.2 EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

En la ventana de comandos de Matlab (Command Window), digitar el nombre del programa que se desee ejecutar: **campos.m o voltajes.m**

El programa automáticamente muestra un cuadro de diálogo con los nombres de las bases de datos de las líneas que se desean simular (**Datos_Lineas.xls**), Figura 22.

Figura 22. Menú para escoger archivo y coordenadas para el perfil del campo eléctrico

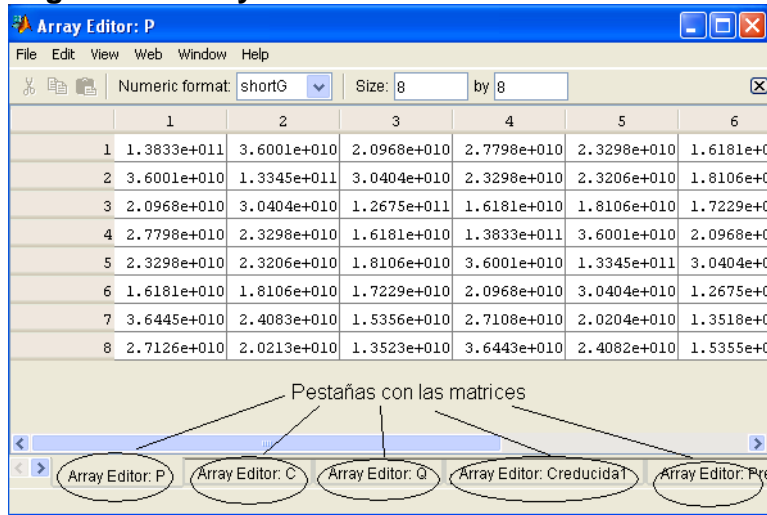


3.3 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS

3.3.1 Campo eléctrico

Al dar clic en **OK** en el cuadro de dialogo de las coordenadas para evaluar el campo eléctrico, Figura 22, el programa computa las matrices: coeficiente de potencial [P], capacitancia [C] por unidad de longitud, carga eléctrica por unidad de longitud [Q], capacitancia reducida, Figura 23.

Figura 23. Array Editor con la información de las matrices



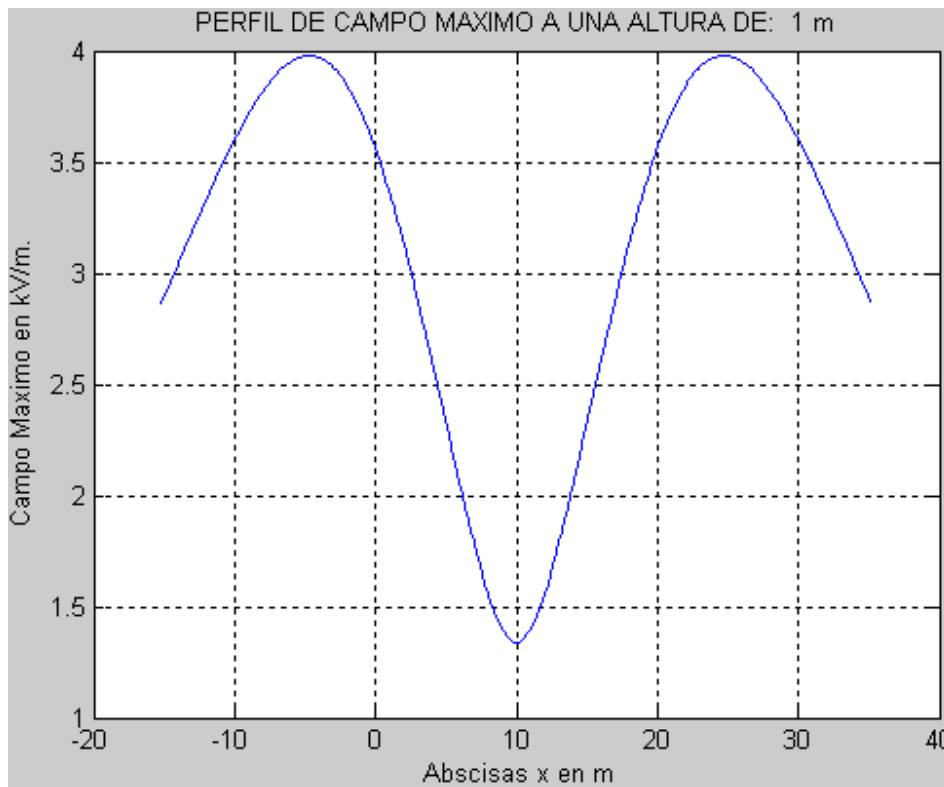
The screenshot shows the 'Array Editor: P' window. The main area displays an 8x6 matrix of numerical values in scientific notation. Below the matrix is a tabbed interface with five tabs: 'Array Editor: P', 'Array Editor: C', 'Array Editor: Q', 'Array Editor: CReducida1', and 'Array Editor: Pre'. A label 'Pestañas con las matrices' points to these tabs.

	1	2	3	4	5	6
1	1.3833e+011	3.6001e+010	2.0968e+010	2.7798e+010	2.3298e+010	1.6181e+010
2	3.6001e+010	1.3345e+011	3.0404e+010	2.3298e+010	2.3206e+010	1.8106e+010
3	2.0968e+010	3.0404e+010	1.2675e+011	1.6181e+010	1.8106e+010	1.7229e+010
4	2.7798e+010	2.3298e+010	1.6181e+010	1.3833e+011	3.6001e+010	2.0968e+010
5	2.3298e+010	2.3206e+010	1.8106e+010	3.6001e+010	1.3345e+011	3.0404e+010
6	1.6181e+010	1.8106e+010	1.7229e+010	2.0968e+010	3.0404e+010	1.2675e+011
7	3.6445e+010	2.4083e+010	1.5356e+010	2.7108e+010	2.0204e+010	1.3518e+010
8	2.7126e+010	2.0213e+010	1.3523e+010	3.6443e+010	2.4082e+010	1.5355e+010

Además, como se muestra en la Figura 24, el software desarrollado traza las figuras de:

- Disposición de conductores
- Campo eléctrico en un punto
- Magnitud y ángulo del campo eléctrico en el punto de prueba
- Campo eléctrico según el método instantáneo
- Campo eléctrico según el método fasorial
- Perfil del campo eléctrico

Figura 24. Visualización figuras en el programa



3.3.2 Voltajes Inducidos

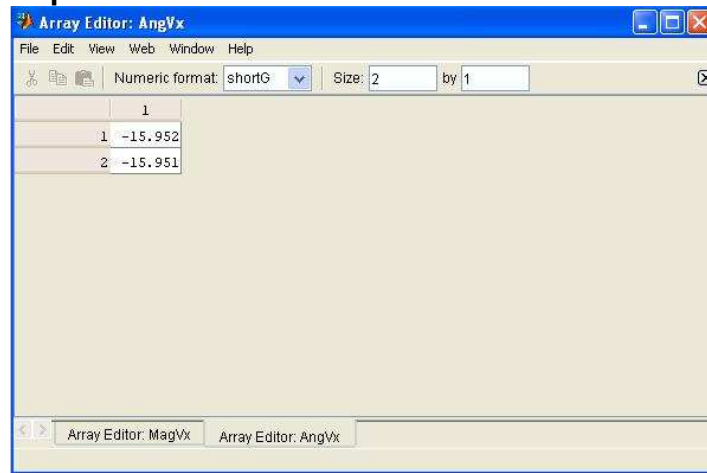
Primero, cuando el cable de guarda no esté aterrizado o las fases no estén energizadas, en la columna Fase de la hoja de cálculo en Excel (Tabla 3) se digita el valor de -1 y estos conductores se ubican al final de la tabla.

En segundo lugar se siguen los pasos descritos en este capítulo y se ejecuta el script **voltajes.m**. Esto permite mostrar los voltajes inducidos en los conductores marcados con (-1), los resultados se visualizarán en coordenadas rectangular y polar, como se muestra en la Figura 25 y la Figura 26.

Figura 25. Forma rectangular

$V_x =$
$-23,172 + 36,243i$
$42,974 - 1,945i$

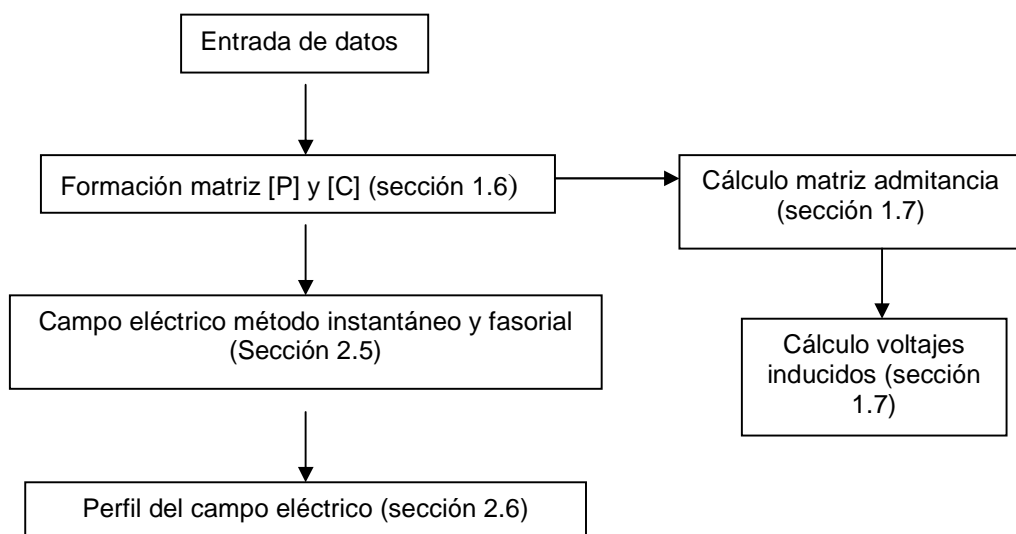
Figura 26. Forma polar



3.4 ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO O LOS VOLTAJES INDUCIDOS.

El algoritmo seguido para el cálculo del campo eléctrico o los voltajes inducidos se muestra en la Figura 27.

Figura 27. Algoritmo para el cálculo de campo eléctrico y voltajes inducidos



CAPITULO 4 SISTEMAS DE PRUEBA Y ANALISIS DE RESULTADOS

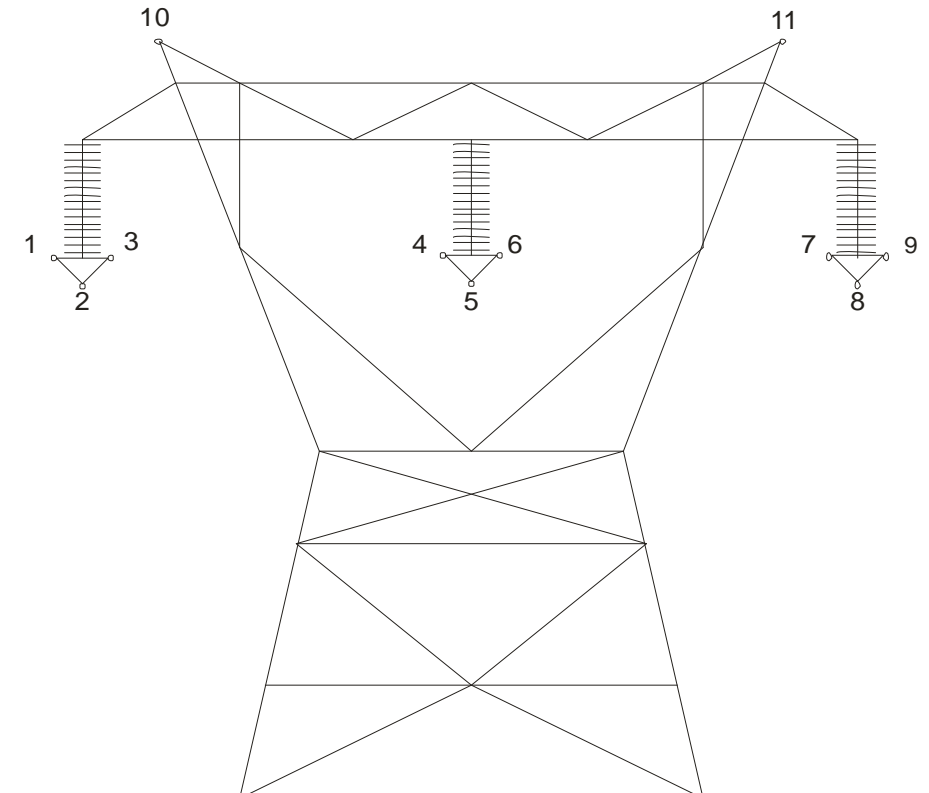
Se escogieron tres sistemas diferentes para analizar el comportamiento del campo eléctrico: en el primero se consideró una línea de 500 kV; en el segundo se tomó un sistema de 20 conductores a 345 kV, y por último se simuló una línea de 115 kV.

El efecto de los voltajes inducidos fue probado en los cables de guarda y una fase del circuito de 500 kV.

4.1. CAMPO ELÉCTRICO EN UNA LINEA DE 500 kV

Esta línea contiene 11 conductores, de los cuales 9 son de 3-954 kcmil, ACSR, y dos son los hilos de guarda, Figura 28, [9].

Figura 28. Líneas de transmisión de 500 kV



4.1.1. Entrada de datos

Se introdujeron los datos de la Tabla 4.

Tabla 4. Datos de entrada línea de 500 kV

CONDUCTOR	COORDENADA x (m)	RADIO FISICO (m)	ALTURA SOBRE TIERRA (m)	FASE	VOLTAJE (kV): (Fase - tierra)	ANGULO DE FASE
1	-0,200	0,015 190	20,173	1	288,700	0
2	0	0,015 190	19,827	1	288,700	0
3	0,200	0,015 190	20,173	1	288,700	0
4	9,800	0,015 190	20,173	2	288,700	240
5	10	0,015 190	19,827	2	288,700	240
6	10,200	0,015 190	20,173	2	288,700	240
7	19,800	0,015 190	20,173	3	288,700	120
8	20	0,015 190	19,827	3	288,700	120
9	20,200	0,015 190	20,173	3	288,700	120
10	3	0,004 750	29	0	0	0
11	17	0,004 750	29	0	0	0

4.1.2. En un punto genérico

4.1.2.1 Disposición de los conductores

Se puede observar en la Figura 29 cómo es la disposición de los conductores que se van a analizar. En él se puede observar el punto de referencia (punto azul), que sirve de base para conocer la distancia de los otros conductores (punto verde).

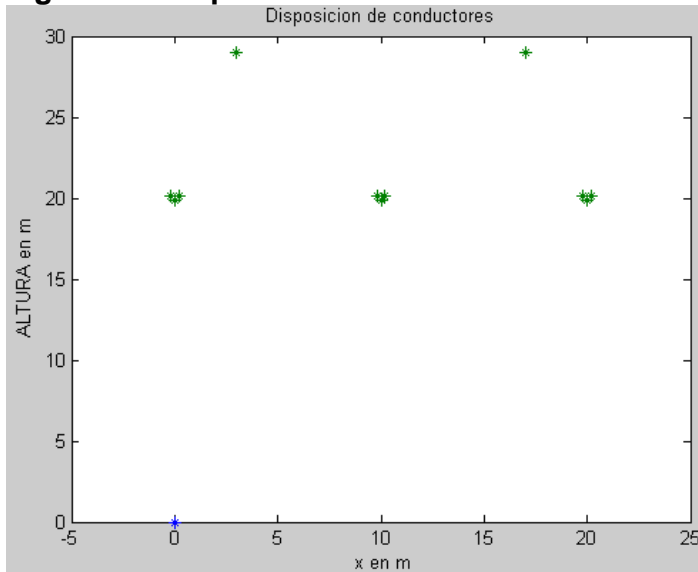
El punto en el que fue analizado el campo eléctrico tiene las siguientes coordenadas:

- $x = 0$ m

- ALTURA= 1 m

Lo que indica es que el punto está ubicado a 1 m de altura y 0 m de a partir del punto de referencia, según a necesidad del usuario.

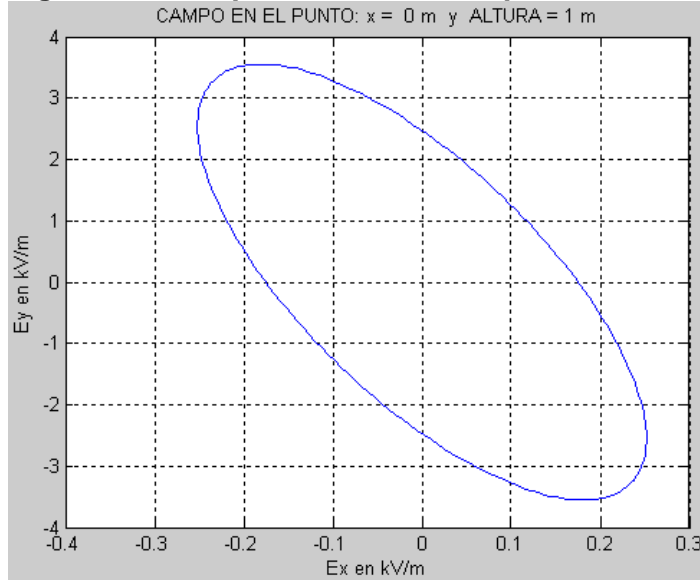
Figura 29. Disposición conductores línea de 500 kV



4.1.2.2 Campo eléctrico en el punto $x=0$, ALTURA= 1

En la Figura 30 se muestra que el campo eléctrico en un punto cualquiera diferente de la tierra varía en función del tiempo, lo cual genera como resultado una elipse (sección 2.5).

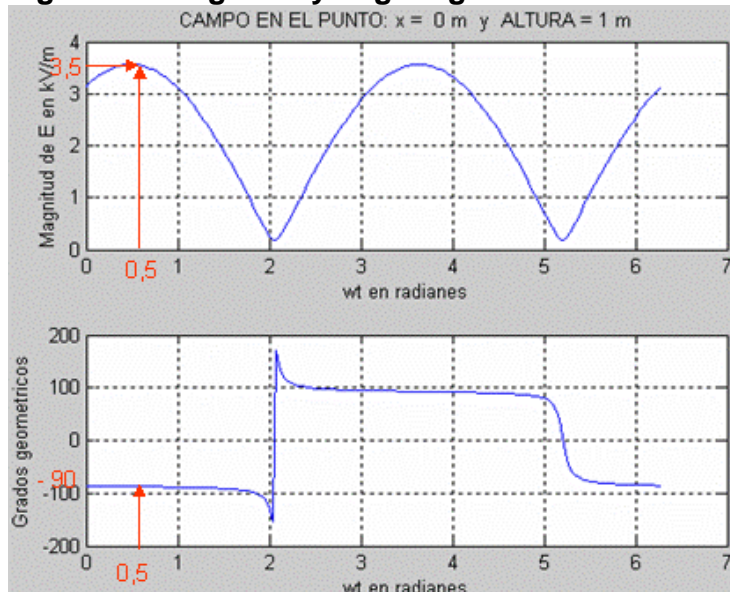
Figura 30. Campo eléctrico en el punto $x = 0$ m, ALTURA= 1 m



4.1.2.3 Magnitud del campo eléctrico y ángulo

En la Figura 31 se puede observar el vector del campo eléctrico representado en magnitud y ángulo respecto al eje horizontal (ángulo geométrico). Así por ejemplo a los 0,5 radianes la magnitud es igual a 3,5 kV/m a un ángulo de -90 grados.

Figura 31. Magnitud y ángulo geométrico del campo eléctrico



4.1.2.4. Campo eléctrico con el método instantáneo y el fasorial

En la Figura 32 y en la Figura 33 se visualiza el campo eléctrico usando los métodos instantáneo y fasorial para $x = 0$ m y ALTURA = 1 m. En las figuras se puede observar que los resultados por los dos métodos son iguales.

Figura 32. Campo eléctrico calculado con el método instantáneo

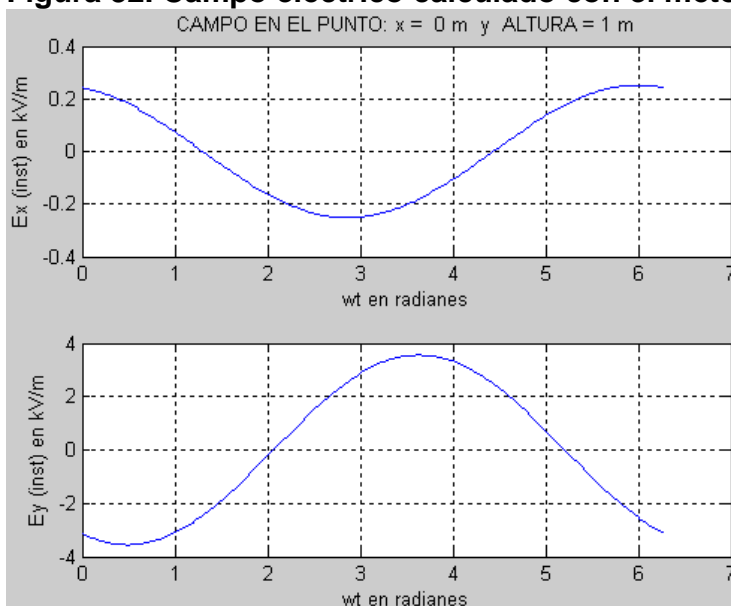
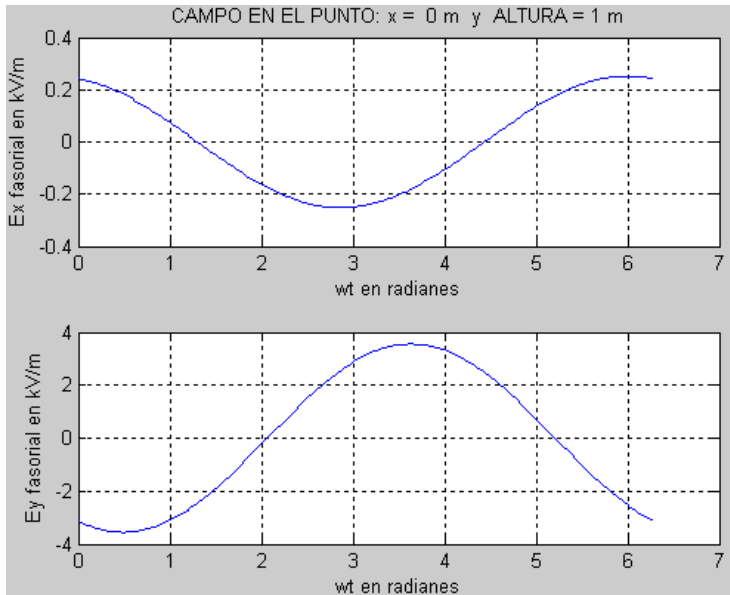


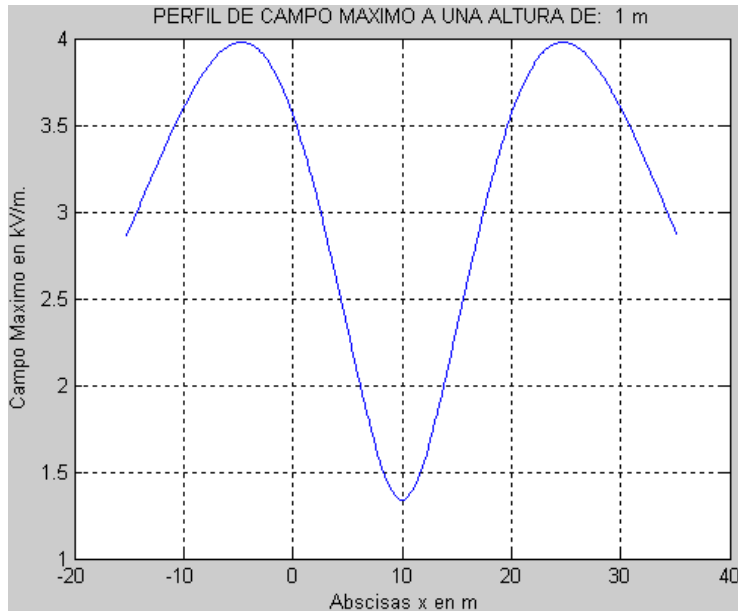
Figura 33. Campo eléctrico calculado con el método fasorial



4.1.2.5 Perfil del campo eléctrico

La Figura 34 muestra el perfil del campo eléctrico para una servidumbre de 15 m. Para una altura de 1 m, los picos máximos del campo eléctrico se presentan en la zona de servidumbre a una distancia horizontal de 5 m de los conductores de los extremos, su valor es de 3,9 kV/m. El valor mínimo se presenta exactamente debajo del conductor del centro con un valor de 1,30 kV/m.

Figura 34. Perfil del campo eléctrico



Comparando estos resultados con las normas y recomendaciones tanto nacionales como internacionales (sección 2.7 y 2.8), se encuentra que aunque no supera ninguno de los márgenes establecidos si se encuentra muy cerca del umbral sugerido por la ICNIRP la cual propone un campo eléctrico máximo de 4,167 kV/m para el público en general.

4.1.2.6 Matriz coeficientes de Maxwell

En esta matriz se muestran los coeficientes de Maxwell [P], se factorizó el valor 1×10^{11} .

Tabla 5. Matriz de coeficientes de Maxwell

1,417	0,827	0,829	0,256	0,251	0,249	0,145	0,143	0,143	0,298	0,178
0,827	1,414	0,827	0,257	0,253	0,251	0,146	0,143	0,143	0,291	0,177

0,829	0,827	1,417	0,263	0,257	0,256	0,148	0,146	0,145	0,300	0,181
0,256	0,257	0,263	1,417	0,827	0,829	0,256	0,251	0,249	0,268	0,264
0,251	0,253	0,257	0,827	1,414	0,827	0,257	0,253	0,251	0,261	0,261
0,249	0,251	0,256	0,829	0,827	1,417	0,263	0,257	0,256	0,264	0,268
0,145	0,146	0,148	0,256	0,257	0,263	1,417	0,827	0,829	0,181	0,300
0,143	0,143	0,146	0,251	0,253	0,257	0,827	1,414	0,827	0,177	0,291
0,143	0,143	0,145	0,249	0,251	0,256	0,829	0,827	1,417	0,178	0,298
0,289	0,291	0,300	0,268	0,261	0,264	0,181	0,177	0,178	1,691	0,260
0,178	0,177	0,181	0,264	0,261	0,268	0,300	0,291	0,298	0,260	1,691

4.1.2.7 Matriz de capacitancias

El resultado de invertir la matriz [P], da como resultado la matriz capacitancias [C], también de 11*11, y al igual que en el caso anterior se factorizó el valor 1×10^{-10}

Tabla 6. Matriz de capacitancias

0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,045	0,045	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,005	0,002
-	0,126	-	-	-	-	-	-	-	-	-

0,045		0,045	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,004	0,002
-	-	0,126	-	-	-	-	-	-	-	-
0,045	0,045		0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,005	0,002
-	-	-	0,126	-	-	-	-	-	-	-
0,002	0,003	0,003		0,044	0,044	0,002	0,002	0,002	0,004	0,003
-	-	-	-	0,126	-	-	-	-	-	-
0,002	0,002	0,002	0,044		0,044	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003
-	-	-	-	-	0,126	-	-	-	-	-
0,002	0,002	0,002	0,044	0,044		0,003	0,003	0,002	0,003	0,004
-	-	-	-	-	-	0,126	-	-	-	-
0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003		0,045	0,045	0,002	0,005
-	-	-	-	-	-	-	0,126	-	-	-
0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,045		0,045	0,002	0,004
-	-	-	-	-	-	-	-	0,125	-	-
0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,045	0,045		0,002	0,005
-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,065	-
0,005	0,004	0,005	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002		0,006
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,065
0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004	0,005	0,004	0,005	0,006	

4.1.2.8 Cargas en los conductores

Estos son los valores de las cargas de cada uno de los 11 conductores, estos se comportan como fasores ya que el voltaje se expresó de esta forma, se factorizó el valor 1×10^{-8} .

Tabla 7. Valores de carga de cada uno de los 11 conductores.

$0,116\ 000 + 0,010\ 600i$
$0,117\ 400 + 0,011\ 800i$
$0,119\ 000 + 0,012\ 900i$
$-0,067\ 000 - 0,109\ 900i$
$-0,064\ 300 - 0,111\ 300i$
$-0,061\ 600 - 0,113\ 000i$

-0,048 300+ 0,109 5i
-0,048 500 + 0,105 800i
-0,048 800 + 0,013 600i
-0,019 500 + 0,013 600i
0,021 500 – 0,010 100i

4.1.2.9 Eliminación de cables de guarda

Al eliminar los dos cables de guarda, se obtiene como resultado la matriz P reducida1. Se factorizó el valor 1×10^{11} .

Tabla 8. Matriz Preducida1

1,354	0,766	0,765	0,190	0,187	0,184	0,092	0,090	0,090
0,766	1,353	0,765	0,193	0,190	0,187	0,093	0,091	0,090
0,765	0,765	1,352	0,197	0,193	0,190	0,094	0,093	0,092
0,190	0,193	0,197	1,344	0,756	0,756	0,190	0,187	0,184
0,187	0,190	0,193	0,756	1,344	0,756	0,193	0,190	0,187
0,184	0,187	0,190	0,756	0,756	1,344	0,197	0,193	0,190
0,092	0,093	0,094	0,190	0,193	0,197	1,352	0,765	0,765
0,090	0,091	0,093	0,187	0,190	0,193	0,765	1,353	0,766
0,090	0,090	0,092	0,184	0,187	0,190	0,765	0,766	1,354

4.1.2.10 Matriz Creducida1

Cuando se invierte Preducida1 se obtiene Creducida1. Se factorizó el valor 1×10^{-10}

Tabla 9. Matriz Creducida1

0,125	-0,044	-0,044	-0,002	-0,002	-0,002	-0,001	-0,001	-0,001
-0,044	0,125	-0,044	-0,002	-0,002	-0,002	-0,001	-0,001	-0,001
-0,044	-0,044	0,125	-0,002	-0,002	-0,002	-0,001	-0,001	-0,001
-0,002	-0,002	-0,002	0,126	-0,044	-0,044	-0,002	-0,002	-0,002
-0,002	-0,002	-0,002	-0,044	0,126	-0,044	-0,002	-0,002	-0,002
-0,002	-0,002	-0,002	-0,044	-0,044	0,126	-0,003	-0,002	-0,002
-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,003	0,125	-0,044	-0,044
-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,002	-0,044	0,125	-0,044
-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,002	-0,044	-0,044	0,125

4.1.2.11 Reducción de conductores en haz

En algunos sistemas se encuentra que varios conductores hacen parte de la misma fase, en este caso la línea era de 11 conductores de los cuáles dos son hilos de guardia, y los otros 9 hacen parte de tres fases; lo que quiere decir que por cada fase hay tres conductores en haz.

El resultado obtenido a continuación se logra al reducir los tres conductores en uno solo y se denomina Creducida2, se factoriza el término 1×10^{-10}

Tabla 10. Matriz Creducida2

0,108 700	-0,020 500	-0,006 300
-0,020 500	0,113 200	-0,020 500
-0,006 300	-0,020 500	0,108 700

4.1.3 A nivel de tierra

Se calculó el campo eléctrico en el punto $x = 0$ m y ALTURA = 0 m (nivel de tierra).

En la Figura 35, se puede observar que para todo instante de tiempo cuando el campo eléctrico es medido a nivel de tierra ya no se genera una elipse sino una línea vertical.

La magnitud del campo eléctrico tiene la forma de una onda sinusoidal rectificadora y alcanza valores mínimos cada 3,14 rad/s, el ángulo del vector de campo eléctrico cambia de polaridad cada 3,14 rad/s con valores entre -90° y 90° . Ver la Figura 36.

En la Figura 37, se observa que la componente horizontal del campo eléctrico vale cero y que la componente vertical tiene un comportamiento sinusoidal.

Figura 35. Relación entre la componente vertical y horizontal del campo eléctrico a nivel de tierra

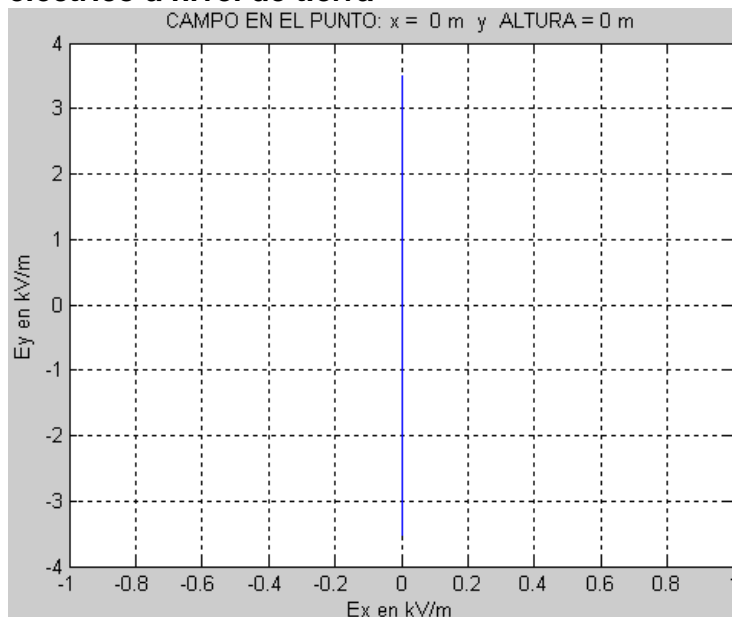


Figura 36. Campo en el punto $x = 0$ m y ALTURA = 0 m

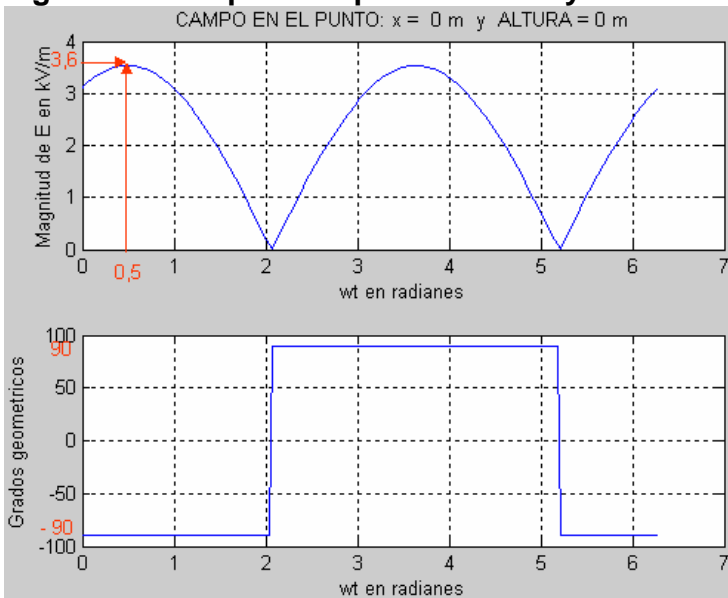
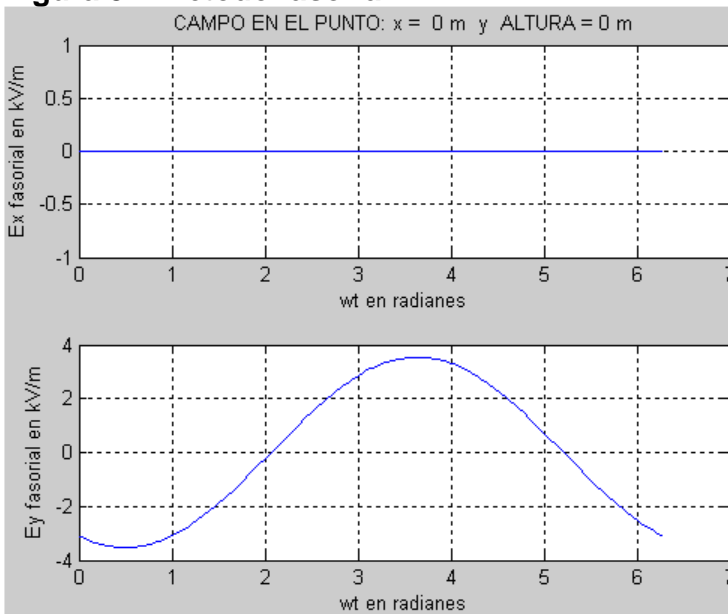


Figura 37. Método fasorial.



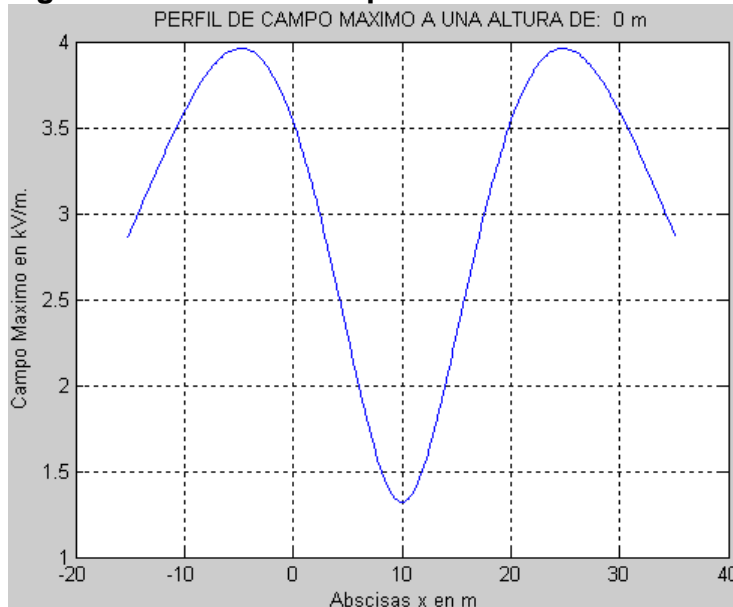
4.1.4. Perfil del campo eléctrico

Se traza el perfil del campo eléctrico para las alturas de 0 m, 4 m y 7 m.

4.1.4.1 Primer caso:

En este caso se toma como punto de referencia la tierra (0 m), en la Figura 38 se puede observar que los picos más altos ocurren a los 5 m a la izquierda de la línea y a los 25 m a la derecha partiendo del punto de referencia.

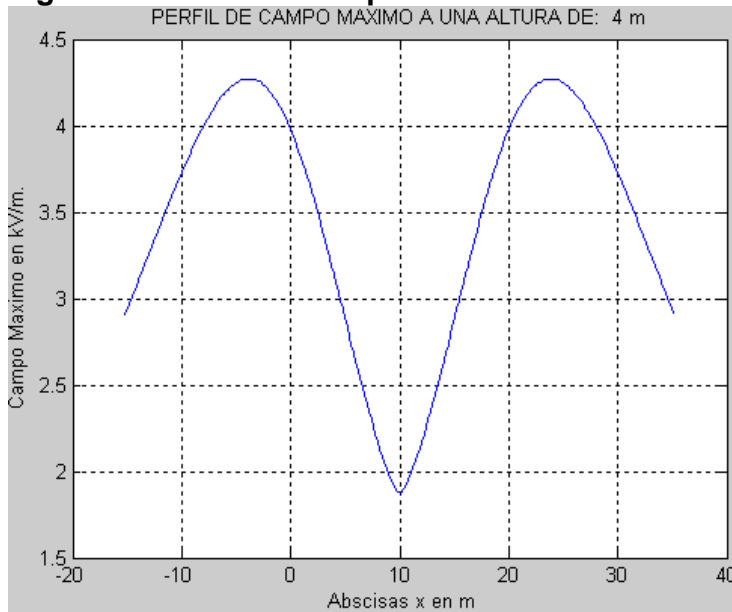
Figura 38. Perfil del campo a una altura de 0 m



4.1.4.2 Segundo caso:

En este caso se nota que al aumentar la altura del punto a analizar el campo eléctrico crece sustancialmente como se muestra en la Figura 39, pero al mismo tiempo se encuentra que los picos más altos ocurren en los mismos sitios que ocurren en el primer caso.

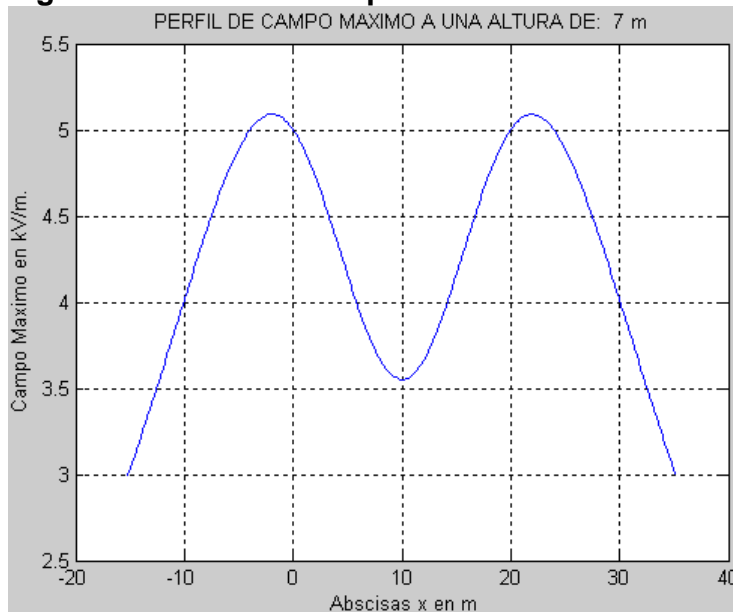
Figura 39. Perfil del campo a una altura de 4 m



4.1.4.3. Tercer caso:

Para esta altura es mucho más claro el aumento del campo eléctrico, ya que pasó de 4 kV/m a nivel de tierra, a 5,2 kV/m a una altura de 7 m como se muestra en la Figura 40, pero es importante tener en cuenta que los picos máximos y mínimos se mantienen prácticamente en los mismos sectores.

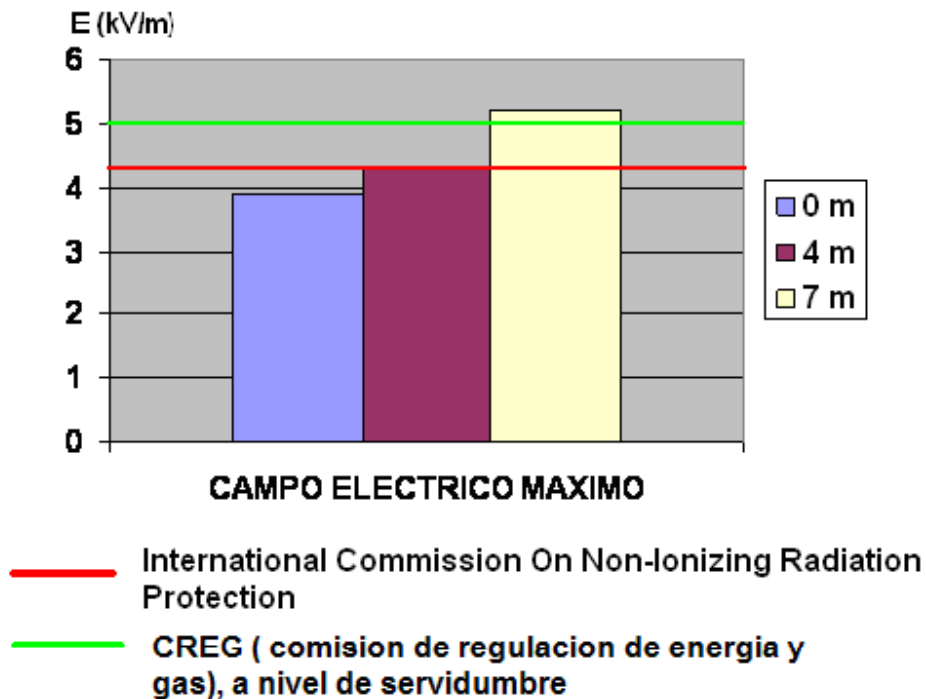
Figura 40. Perfil del campo a una altura de 7 m



4.1.4.4 Comparación del perfil del campo eléctrico con las normas y recomendaciones:

En esta comparación se observa que dos de las pruebas supera el margen, estas son las previstas por la ICNIRP y por la CREG, esta la produjo el ejemplo medido a 7 m de altura, y esto sucede pues a mayor altura el campo eléctrico tiende aumentar en la misma proporción, sin embargo no es tan grave para la primera recomendación ya que el límite que se supero es el de 4,167 kV/m, y este solo aplica para el público en general, pero para la segunda es diferente ya que la CREG establece un limite de 5 Kv/m en la servidumbre y esta la supera en un 2%. Ver Figura 41.

Figura 41. Campo eléctrico máximo para una línea de 500 kV según la CREG, y la ICNRP



4.2 CAMPO ELÉCTRICO EN UNA LÍNEA DE 345 kV

LÍNEA NEW YORK 20 CONDUCTORES

Los cuales se dividen de la siguiente forma: seis fases en dos circuitos paralelos, contienen dos conductores cada uno; otras seis fases (las del centro de la torre), solo contienen un conductor cada una, y dos hilos de guardia, Figura 42.

Se muestra un ejemplo con una configuración de conductores más compleja. En la cual se analizan los perfiles del campo eléctrico con dos alturas diferentes.

Figura 42. Torre New York 20 conductores

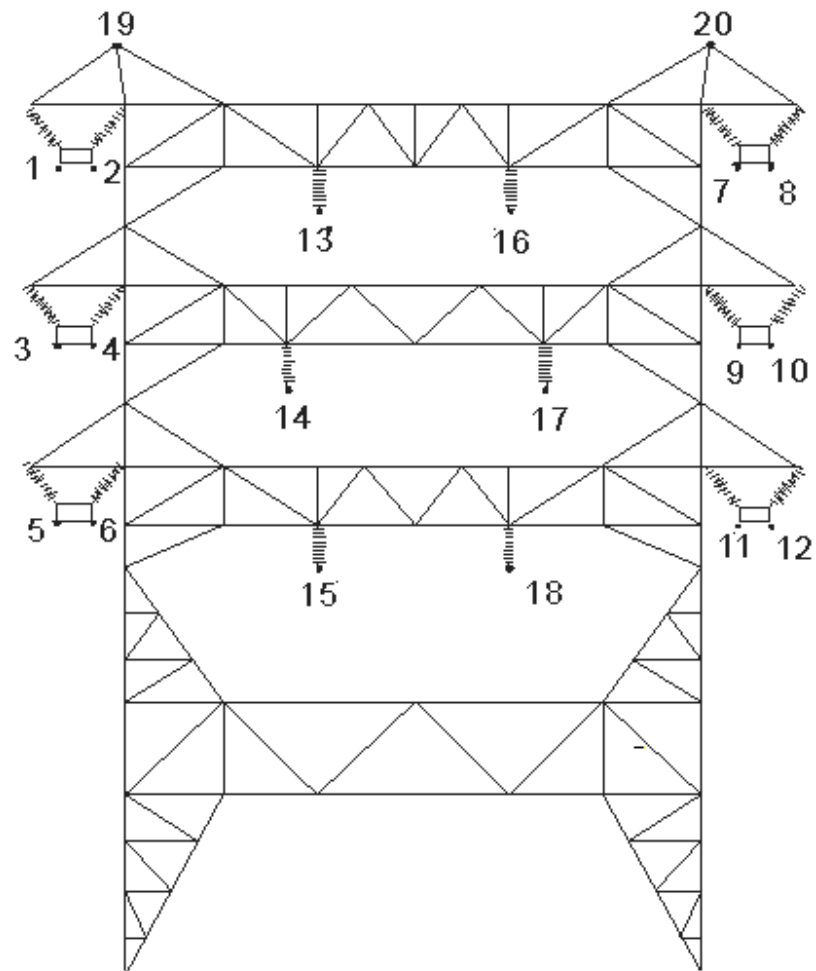


Tabla 11. Datos de entrada línea New York 20 conductores

CONDUCTOR	COORDENADA X (m)	RADIO FISICO (m)	ALTURA SOBRE TIERRA (m)	FASE	MAGNITUD VOLTAJE DE FASE (kV):	ANGULO DE FASE
1	-2,900	0,015 820	32,560	1	199,200	120
2	-2,440	0,015 820	32,560	1	199,200	120
3	-2,900	0,015 820	25,860	2	199,200	240
4	-2,440	0,015 820	25,860	2	199,200	240
5	-2,900	0,015 820	19,150	3	199,200	0
6	-2,440	0,015 820	19,150	3	199,200	0
7	19,200	0,015 820	32,560	4	199,200	0
8	19,660	0,015 820	32,560	4	199,200	0
9	19,200	0,015 820	25,860	5	199,200	240
10	19,660	0,015 820	25,860	5	199,200	240
11	19,200	0,015 820	19,150	6	199,200	120
12	19,660	0,015 820	19,150	6	199,200	120
13	5,130	0,019 100	31,010	7	79,700	120
14	4,370	0,019 100	24,310	8	79,700	240
15	5,130	0,019 100	17,600	9	79,700	0
16	11,630	0,019 100	31,010	10	79,700	0
17	12,390	0,019 100	24,310	11	79,700	240
18	11,630	0,019 100	17,600	12	79,700	120
19	-1,070	0,006 930	37,490	0	0	0
20	17,830	0,006 930	37,490	0	0	0

4.2.1 Resultados

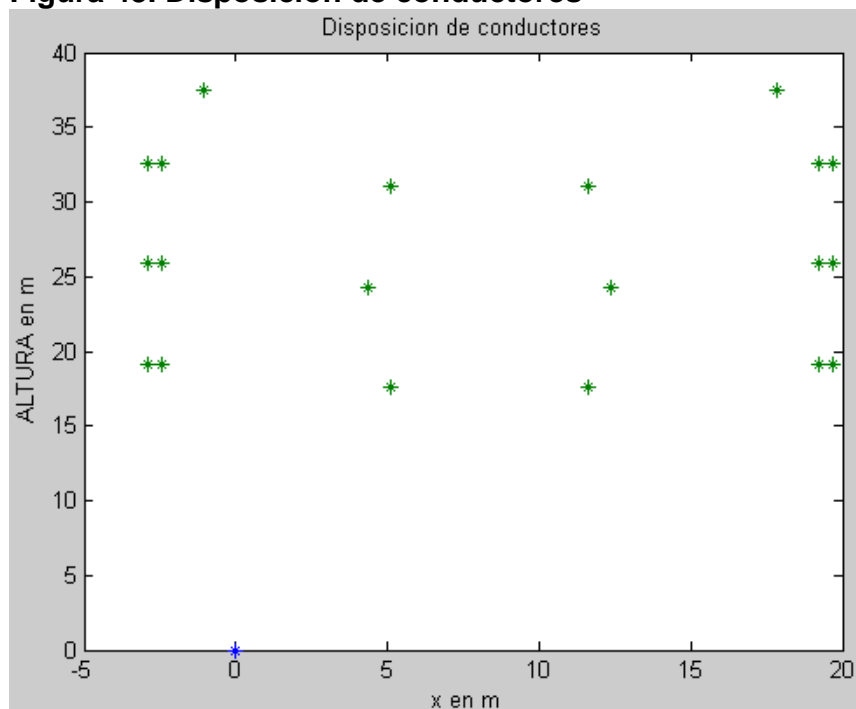
4.2.1.1 Disposición de conductores

Se puede observar en la Figura 43 la disposición de los conductores en la torre. Y a la vez se comprueba que una vez ingresados los datos de la manera correcta no debe existir ningún impedimento para resolver cualquier problema

Para el ejemplo se toma como referencia las siguientes coordenadas, pero se recuerda que en el programa estas se pueden modificar en cualquier momento dependiendo de la necesidad del usuario.

- $x=3$
- ALTURA= 4

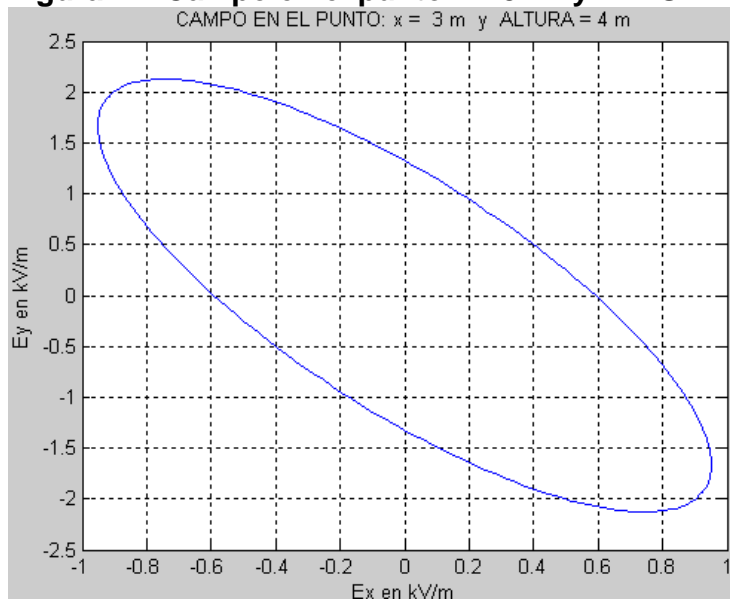
Figura 43. Disposición de conductores



4.2.1.2 Campo eléctrico en el punto $x = 3$ m, ALTURA = 4 m:

En la Figura 44 se demuestra que el campo eléctrico en un punto cualquiera diferente de la tierra y en varios instantes de tiempo da una elipse. Lo que quiere decir es que existen componentes tanto en E_x como en E_y .

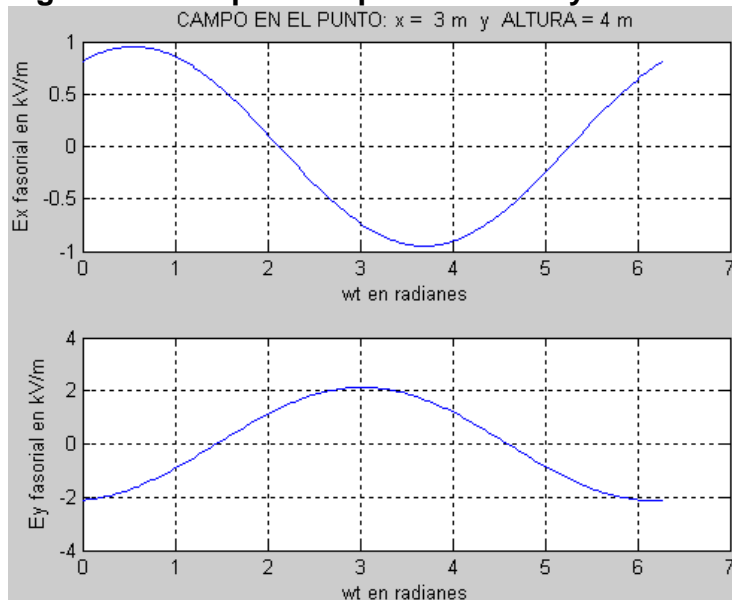
Figura 44. Campo en el punto $X= 3$ m y ALTURA = 4 m.



4.2.1.3 Campo eléctrico método fasorial

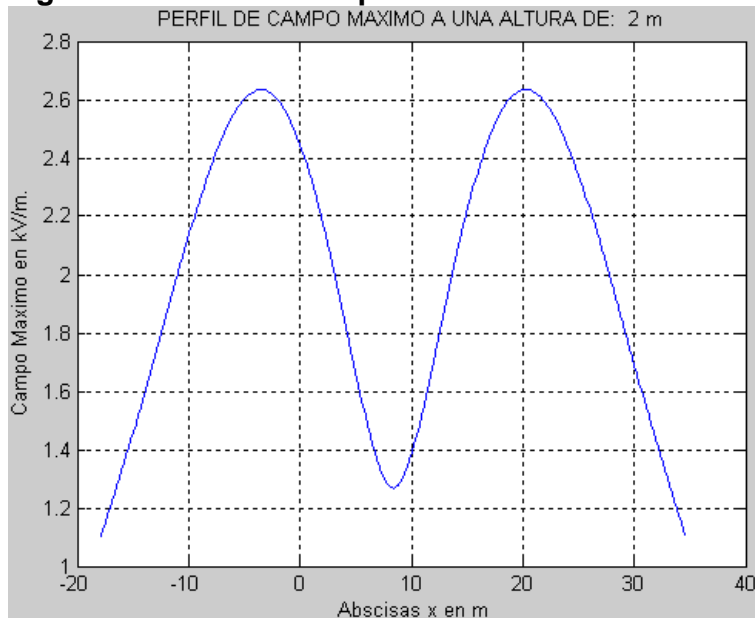
Como se menciona en el programa se puede trabajar con dos métodos, el fasorial y el instantáneo; sin embargo en el anterior ejemplo se demostró que por cualquiera de los dos se genera el mismo resultado, así que solo se mostrara el resultado del campo eléctrico con el método fasorial, y a la vez el ejemplo demuestra como es el comportamiento del campo eléctrico en cada uno de los ejes y en cada instante de tiempo, Figura 45.

Figura 45. Campo en el punto $x= 3$ m y ALTURA = 4 m fasorial



La Figura 46 muestra como es el perfil del campo eléctrico, se toma como base para esta simulación una altura de 2 m, el cual da como resultado el campo eléctrico en todo el ancho de la línea; arrojando como resultado dos picos máximos con un valor aproximado de 2,65 kV/m a los 20 m a la derecha del sistema y 3 m a la izquierda de la misma, de igual forma se encuentra un valor mínimo que es de alrededor de 1,8 kV/m a los 9 m desde el punto de referencia.

Figura 46. Perfil de campo máximo a una altura = 2 m.



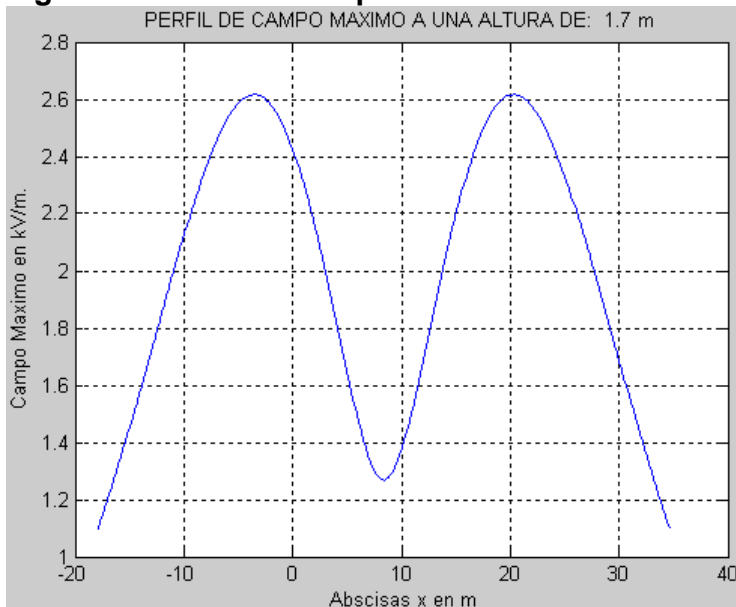
4.2.2 Cálculo de perfil del campo eléctrico

Es analizada en la misma línea de 20 conductores, lo único que varía es la altura, con el fin de obtener varios resultados que servirán para comparar con las normas respectivas y de esta forma conocer si estas se cumplen

4.2.2.1 Primer caso:

En este primer caso se toma una altura de 1,70 m, debido que esta es la altura promedio de un ser humano; y es a esta altura donde es más frecuente la exposición a los campos eléctricos, Figura 47.

Figura 47 Perfil del campo eléctrico a una ALTURA = 1,70 m.

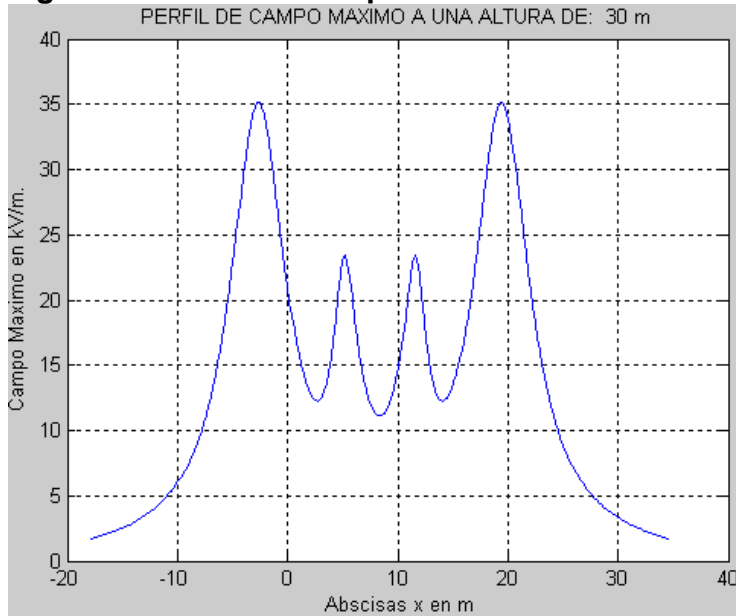


Como resultado se tiene que a una altura de 1,70 m como ha sido una constante en los casos analizados los picos más altos se encuentran en las vecindades de las líneas con un campo eléctrico aproximado de 2,62 kV/m, y el mínimo se ubica en el centro del sistema con 1,3 kV/m.

4.2.2.2 Segundo caso:

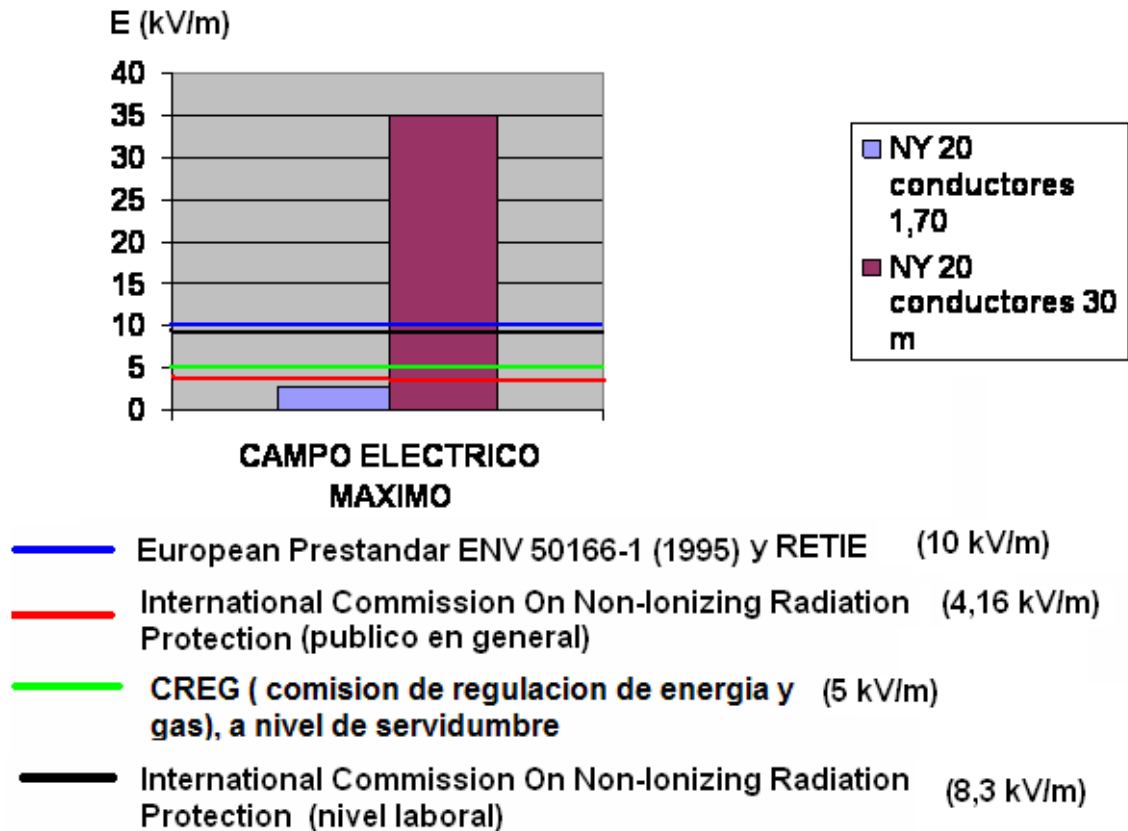
En este segundo ejemplo se toma una altura mayor, con el fin de simular un caso atípico pero que de igual forma demuestra el correcto funcionamiento del programa en donde se encuentra que a mayor altura, mayor es el campo, Figura 48.

Figura 48 Perfil del campo eléctrico a una ALTURA = 30 m.



Para este sistema y a una altura de 30 m es claramente visible que el campo eléctrico se eleva de una forma sustancial, muestra 4 picos de los cuales dos se encuentran en la vecindad del sistema y muestra un campo máximo de 35 kV/m, y dos picos menores dentro del sistema pero que tiene un campo considerable de alrededor de 24,5 k V/m, Figura 49.

Figura 49 Comparación línea NY 20 conductores con las normas



Se ve que a nivel del público en general no tiene incidencia, esto se comprueba ya que a una altura de 1,70 m que es la altura promedio de un ser humano quedó muy por debajo de los límites establecidos, pero el segundo caso sobrepasa todas las normas y recomendaciones tanto a nivel de público en general como a nivel laboral.

4.3 CAMPO ELÉCTRICO EN UNA LÍNEA DE 115 Kv

YUMBO - JUANCHITO 115 kV

Con este ejemplo se pretende analizar una línea de transmisión de energía más común en nuestro entorno, con el fin de analizar el resultado que arroje el perfil del campo eléctrico para comparar con las normas.

Este sistema es de 115 kV, doble circuito. Que contiene 6 conductores AASC 927 Kcmil 26/7 y dos cables de guardia ACSR ubicados en la parte superior, Figura 50. [9].

Figura 50. Línea Yumbo - Juanchito 115 kV

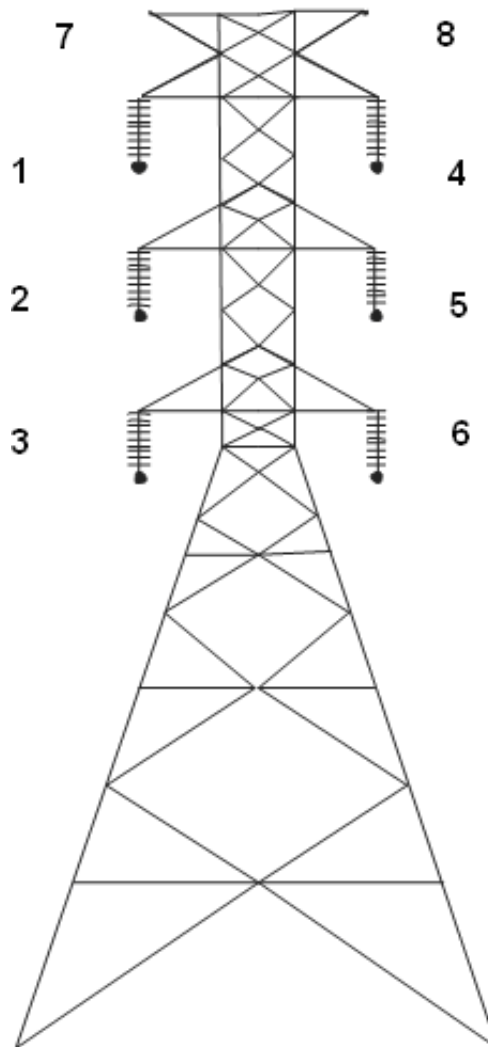


Tabla 12. Datos de entrada línea Yumbo – Juanchito 115 Kv

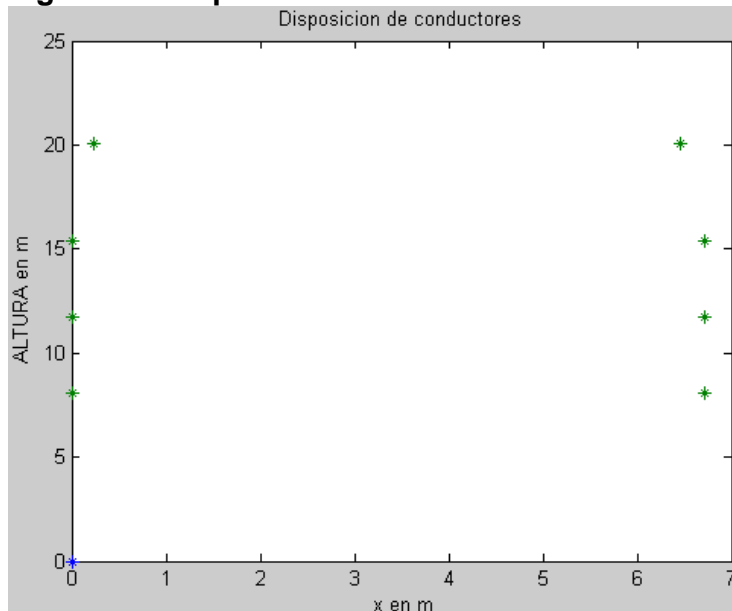
CONDUCTOR	COORDENADA X (m)	RADIO FISICO (m)	ALTURA SOBRE TIERRA (m)	FASE	VOLTAJE (kV): (Fase - tierra)	ANGULO
1	0	0,014	15,390	1	66,390	0
2	0	0,014	11,730	2	66,390	240
3	0	0,014	8,080	3	66,390	120
4	6,710	0,014	15,390	4	66,390	0
5	6,710	0,014	11,730	5	66,390	240
6	6,710	0,014	8,080	6	66,390	120
7	0,240	0,004	20,050	0	0	0
8	6,460	0,004	20,050	0	0	0

4.3.1 Resultados

4.3.1.1 Disposición de conductores

En la Figura 51, se puede observar la forma en la que se distribuyen las líneas en el sistema, el punto azul que está en cero es la referencia; y los verdes serian los conductores.

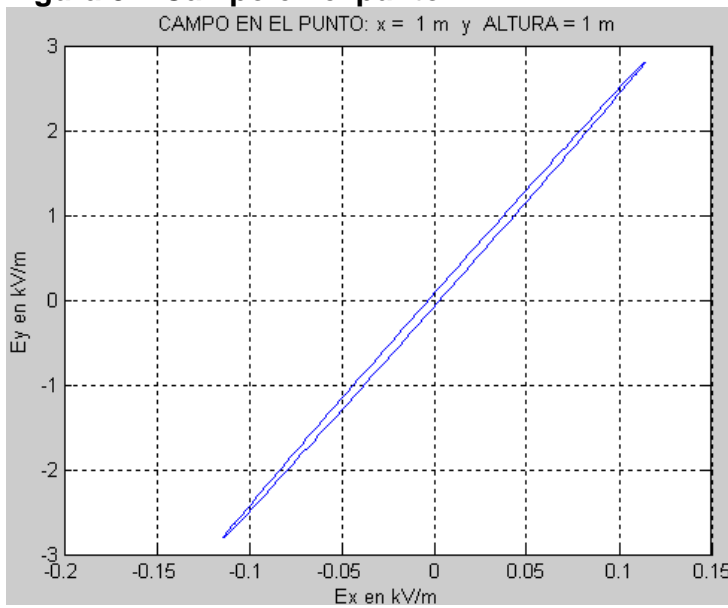
Figura 51. Disposición de conductores



4.3.1.2 Campo eléctrico en el punto $x=1$, ALTURA= 1

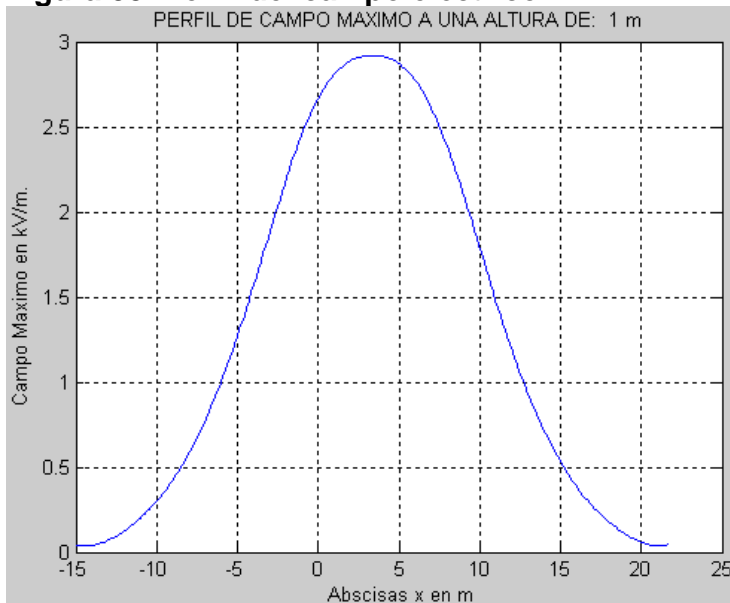
En la Figura 52 se puede ver el campo eléctrico generado por la línea en el punto $x= 1$, ALTURA=1; el cual se escogió para este ejemplo arbitrariamente. Igual que en los casos anteriores se genera una elipse; la cual se genera al enfrentar los resultados E_x y E_y en función del tiempo, Figura 52.

Figura 52. Campo en el punto.



4.3.1.3 Perfil del campo eléctrico a una ALTURA de 1 m

Figura 53. Perfil del campo eléctrico



Es importante notar que en esta línea el pico más alto se produce en el centro del sistema; y no como en los casos anteriores en donde los picos más grandes se acumulaban en la servidumbre, esto demuestra que no para todos los casos es igual y que el resultado depende de la geometría de la línea. El valor de campo eléctrico es muy considerable pues está alrededor de los 2,8 kV/m, considerando que es un sistema con una tensión menor a la de los ejemplos anteriores.

4.4 VOLTAJES INDUCIDOS EN UNA LÍNEA DE 500 kV

Para la línea de 500 kV se calculan los voltajes inducidos en la fase C (conductores 7, 8 y 9) y los cables de guarda (conductores 10 y 11), el ingreso de los datos en la hoja de cálculo en Excel debe hacerse como se muestra en la Tabla 13.

CONDUCTOR	COORDENADA X (m)	RADIO FISICO (m)	ALTURA SOBRE TIERRA (m)	FASE	VOLTAJE (kV): (Fase - tierra)	ANGULO
1	-0,2	0,015 190	20,173	1	288,7	0
2	0	0,015 190	19,827	1	288,7	0
3	0,2	0,015 190	20,173	1	288,7	0
4	9,8	0,015 190	20,173	2	288,7	240
5	10	0,015 190	19,827	2	288,7	240
6	10,2	0,015 190	20,173	2	288,7	240
7	19,8	0,015 190	20,173	-1	0	0
8	20	0,015 190	19,827	-1	0	0
9	20,2	0,015 190	20,173	-1	0	0
10	3	0,004 750	29	-1	0	0
11	17	0,004 750	29	-1	0	0

Figura 54. Voltajes inducidos en la fase C y los cables de guarda de la línea de 500 kV

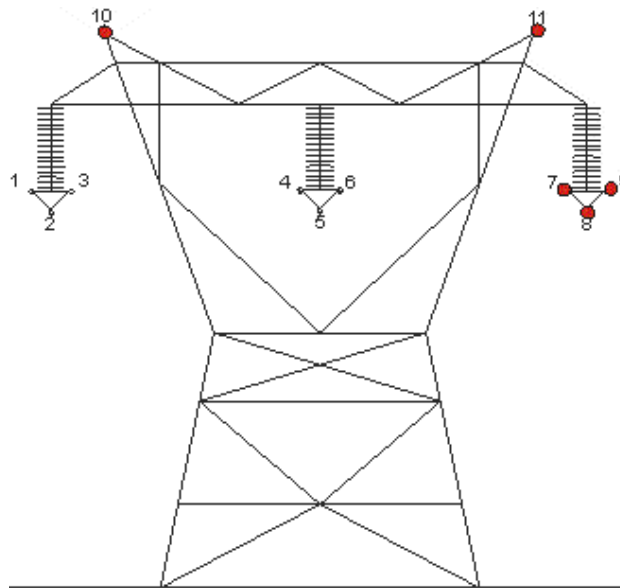


Tabla 13. Datos de entrada para el cálculo de voltajes inducidos

CONDUCTOR	COORDENADA X (m)	RADIO FISICO (m)	ALTURA SOBRE TIERRA (m)	FASE	VOLTAJE (kV): (Fase - tierra)	ANGULO
1	-0,2	0,015 190	20,173	1	288,7	0
2	0	0,015 190	19,827	1	288,7	0
3	0,2	0,015 190	20,173	1	288,7	0
4	9,8	0,015 190	20,173	2	288,7	240
5	10	0,015 190	19,827	2	288,7	240
6	10,2	0,015 190	20,173	2	288,7	240
7	19,8	0,015 190	20,173	-1	0	0
8	20	0,015 190	19,827	-1	0	0
9	20,2	0,015 190	20,173	-1	0	0
10	3	0,004 750	29	-1	0	0
11	17	0,004 750	29	-1	0	0

Estos resultados corresponden a la magnitud y ángulo en el caso polar, que le corresponde a cada uno de los conductores, en el orden en que están enumerados en los datos de entrada.

Tabla 14. Voltajes inducidos en los conductores no aterrizados y no energizados (forma fasorial)

MagV x	AngVx
58,516	- 98,489
57,394	- 98,460
56,878	- 98,176
64,190	- 50,708
57,329	- 89,204

Donde

MagVx: Magnitud del voltaje inducido calculado por el programa (kV)

AngVx: Ángulo del voltaje inducido calculado por el programa (grados)

Tabla 15. Voltajes inducidos en los conductores no aterrizados y no energizados (forma rectangular)

Vx
-8,637 -57,874i
-8,443 -56,769i
-8,088 -56,2996i
40,649 – 49,678i
0,796 -57,323i

Vx: Voltaje inducido calculado por el programa en coordenada rectangular (kV)

CONCLUSIONES

- Se diseñó un programa en Matlab, el cual tiene la capacidad de calcular el campo eléctrico para distintas alturas, configuraciones y niveles de tensión de líneas de transmisión. Además, permite hallar los voltajes inducidos en elementos conductores no energizados.
- A pesar que el campo eléctrico depende de la geometría del sistema que se este estudiando, para los casos analizados con el software, fue muy frecuente que el campo eléctrico máximo se concentrara en la servidumbre de la línea muy cerca de los conductores a los extremos de la línea de transmisión.
- Fue muy frecuente encontrar los valores mínimos del campo eléctrico máximo, en el centro del sistema muy cerca al nivel de tierra y debajo de los conductores centrales. en el único caso que no se presento esta constante fue en la línea de transmisión de 115 kV, la cual dio su pico máximo en el centro del sistema.
- En el caso de las líneas analizadas, el dato que se estudió fue el perfil del campo eléctrico; esto con el fin de determinar en muchos puntos cual era el máximo valor del campo eléctrico a una altura determinada. Con este dato se pudo concluir que los niveles de campo eléctrico en algunas ocasiones sobrepasan los límites propuestos en las normas y recomendaciones a nivel nacional e internacional, pero esto solo sucede en alturas mayores de 7 m.
- Los márgenes que manejan las organizaciones tanto internacionales como nacionales, a nuestro criterio son demasiado amplios ya que como se pudo comprobar con los resultados que arrojó el software es muy difícil que una línea de transmisión a una altura normal alcance estos picos tan altos, y de igual manera aunque no esté comprobado sigue la inquietud de si perjudica o no la salud humana, se debe recordar que en algunos países actualmente se llevan adelantos sobre el tema como en el caso de Italia, en donde el senado se encuentra en la discusión de reducir los límites considerablemente, aunque esto traiga como consecuencia los altos gastos por parte de las empresas prestadoras del servicio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] APRENDA MATLAB COMO SI ESTUVIERA EN PRIMERO. Universidad de Navarra. Disponible en:
<<http://www.tecnun.es/asignaturas/Informat1/AyudaInf/Index.htm>>
- [2] CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas), resolución 098-2000.
- [3] ENSEÑAT Alfonso, Electrotecnia general, Tomo I. Teoría de los campos. Editorial Labor S.A.
- [4] ESCOBAR GONZÁLEZ, Francisco Javier. Introducción a las líneas de transmisión. Libro guía. Universidad Tecnológica De Pereira, 2004
- [5] LA EXPERIENCIA EN COLOMBIA SOBRE LOS CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS, Disponible en:
<<http://www.uninorte.edu.co>>, Artículo: Ponencias, CONT_ELECTRO, Barranquilla, abril de 2007.
- [6] LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y LA SALUD PÚBLICA: LAS FRECUENCIAS EXTREMADAMENTE BAJAS (ELF), Disponible en:
<<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs205/es/index.html>>.
- [7] MARTIN ROMERO, Juan, Electricidad, Editorial Sopena. Colombia 1969.
- [8] RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas), Artículo 14 numeral 14.4. Disponible en Internet: <<http://www.cidet.com.co>>
- [9] RODAS, Darío Eliécer y ESCOBAR, Francisco Javier. Parámetros matriciales en líneas de transmisión. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, agosto de 1989.
- [10] TORRES Álvaro, Parámetros Matriciales de Líneas de Transmisión. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira 1989.
- [11] TRANSMISSION LINE REFERENCE BOOK 345 kV and above, Segunda edición, 1984.
- [12] IX ENCUENTRO REGIONAL LATINO – AMERICANO DEL CIGRÉ. Exposición a campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial y sus posibles efectos en la salud humana. 21 al 31 de mayo de 2001.

ANEXO 1. PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE CAMPO ELÉCTRICO

```
% Trabajo de grado: Campo Electrico en LT energizadas y guardas aterrizados.
% Los datos en Excell segun plantilla, archivo en carpeta work de Matlab
% Los guardas en las últimas posiciones
% A guardas aterrizados coloquales 0 V y numero de fase 0
% Referencia para alturas la tierra y sera altura equivalente
% Unidades: distancias en m y voltajes en kV (fase - tierra).
% Asi las cargas dan en kC/m
clc;
clear all;
f=60;
w=2*pi*f;
wt=0:2*pi/200:2*pi;
t=wt/w;

% entrada de datos no utilizada
%caso=input(' Archivo - entre comillas - a estudiar: ');
%datos=xlsread(caso);

% entrada de datos finalmente utilizada
a=dir('*.xls'); kk=menu('Escoja un archivo a analizar',a.name);
datos=xlsread(a(kk).name);

%XW=input('Coordenada x de punto donde se calcula el campo E: ');
%YW=input('Altura y del punto donde se calcula el campo E: ');
%altura=input('Altura en m del perfil del campo maximo : ');
prompt={'Entre la coordenada x del PUNTO a estudiar:', 'Entre la coordenada y del PUNTO a estudiar:', 'Entre la altura en m para el Perfil del Campo Electrico:'};
def={'0', '0', '0'};
digTitle = 'Coordenadas para evaluar el Campo Electrico ';
lineNo=1;
answer=inputdlg(prompt,digTitle,lineNo,def);
XW=str2num(answer{1});
YW=str2num(answer{2});
altura=str2num(answer{3});

nc=max(datos(:,1));
X=[datos(:,2)];
R=[datos(:,3)];
H=[datos(:,4)];
FASE=[datos(:,5)];
```

```

VOLT=[datos(:,6)];
ANG=[datos(:,7)];
V=VOLT.*(cos(ANG*pi/180)+i*sin(ANG*pi/180));

% Nota pude usar i como el imaginario pues aun no lo uso en for, despues
% no y tampoco el j
figure;
plot(0,0,'*',X,H,'*');xlabel(' x en m');ylabel(' ALTURA en m');
title('Disposicion de conductores');

% diagonal principal de P , P en m/F
for j=1:nc
P(j,j)=(1/(2*pi*8.8542*1e-12))*log(2*H(j)./R(j));
end

% elementos fuera de la diagonal
for i=1:(nc-1)
for j= i+1:nc
dr=sqrt((X(i)-X(j)).^2+(H(i)-H(j)).^2);
dp=sqrt((X(i)-X(j)).^2+(H(i)+H(j)).^2);
P(i,j)=(1/(2*pi*8.8542*1e-12))*log(dp/dr);
P(j,i)=P(i,j);
end
end

% C en F/m
C=inv(P);
Q=C*V;

% si V (fase-tierra) en kV, Q en kC/m
open('P');
open('C');
open('Q');

% E = (1/(2*pi*eo))*Q/r de cada carga individual,
% Debera sumar las imagenes tambien. Unidades: kV/m para E pues asi las
% trae las cargas

%q en funcion del tiempo, dara matriz
q=zeros(nc,length(wt));
for i=1:nc,

```

```

    alfa=angle(Q(i));
    q(i,:)=abs(Q(i))*sqrt(2)*cos(wt+alfa);
end

% k = 1/(2*pi*eo) y eo = 8.8542e-12 F/m
k=1.797507884e10;

xs=num2str(XW);
ys=num2str(YW);
texto=['CAMPO EN EL PUNTO: x = ' xs ' m y ALTURA = ' ys ' m'];

ys2=num2str(altura);
texto2=['PERFIL DE CAMPO MAXIMO A UNA ALTURA DE: ' ys2 ' m'];

EXW=0;
EYW=0;
for i= 1:nc,
    rcuad= (XW-X(i))^2+(YW-H(i))^2;
    rpcuad=(XW-X(i))^2+(YW+H(i))^2;
    EXW=EXW + k*q(i,)*(XW-X(i))/rcuad -k*q(i,)*(XW-X(i))/rpcuad;
    EYW=EYW - k*q(i,)*(H(i)-YW)/rcuad -k*q(i,)*(YW+H(i))/rpcuad;
end

%En cada t, se forma un complejo espacial (Vector)

EWTOTAL=EXW + sqrt(-1)*EYW;
figure;
plot(EXW,EYW);grid;xlabel('Ex en kV/m');ylabel('Ey en kV/m');title(texto);
figure;
subplot(2,1,1),plot(wt,abs(EWTOTAL));grid;xlabel('wt en
radianes');ylabel('Magnitud de E en kV/m');title(texto);
subplot(2,1,2),plot(wt,angle(EWTOTAL)*180/pi);grid;xlabel('wt en
radianes');ylabel('Grados geometricos');
figure;
subplot(2,1,1),plot(wt,EXW);xlabel('wt en radianes');ylabel('Ex (inst) en
kV/m');grid;title(texto);
subplot(2,1,2),plot(wt,EYW);xlabel('wt en radianes');ylabel('Ey (inst) en kV/m');grid;

% Importante el maximo tambien
[Emax1,ind]=max(abs(EWTOTAL));
wtmax1=wt(ind);

% Solucion Fasorial

```

```

%Q como fasores

EXWF=0;
EYWF=0;
for i= 1:nc,
    rcuad= (XW-X(i))^2+(YW-H(i))^2;
    rpcuad=(XW-X(i))^2+(YW+H(i))^2;
    EXWF=EXWF + k*Q(i)*(XW-X(i))/rcuad -k*Q(i)*(XW-X(i))/rpcuad;
    EYWF=EYWF - k*Q(i)*(H(i)-YW)/rcuad -k*Q(i)*(YW+H(i))/rpcuad;
end

EXFASOR2t=abs(EXWF)*sqrt(2)*cos(wt+angle(EXWF));
EYFASOR2t=abs(EYWF)*sqrt(2)*cos(wt+angle(EYWF));
Ettotal2t=EXFASOR2t+sqrt(-1)*EYFASOR2t;

% graficas segun metodo fasorial
figure;
subplot(2,1,1),plot(wt,EXFASOR2t);xlabel('wt en radianes');ylabel('Ex fasorial en
kV/m');grid;title(texto);
subplot(2,1,2),plot(wt,EYFASOR2t);xlabel('wt en radianes');ylabel('Ey fasorial en
kV/m');grid;

% Y ahora para muchos puntos bajo la LT, pero de la misma altura

rango = max(X)+15 - (min(X)-15);
Xvar=min(X)-15:rango/250:max(X)+15;
% la altura se pidio antes

for i=1:length(Xvar),

EXWF(i)=0;
EYWF(i)=0;
for m = 1:nc,
    rcuad(i)= (Xvar(i)-X(m))^2+(altura-H(m))^2;
    rpcuad(i)=(Xvar(i)-X(m))^2+(altura+H(m))^2;
    EXWF(i)=EXWF(i) + k*Q(m)*(Xvar(i)-X(m))/rcuad(i) -k*Q(m)*(Xvar(i)-
X(m))/rpcuad(i);
    EYWF(i)=EYWF(i) - k*Q(m)*(H(m)-altura)/rcuad(i) -k*Q(m)*(altura +
H(m))/rpcuad(i);
end

EXFASOR2t(i,:)=abs(EXWF(i))*sqrt(2)*cos(wt+angle(EXWF(i)));
EYFASOR2t(i,:)=abs(EYWF(i))*sqrt(2)*cos(wt+angle(EYWF(i)));

```

```

    Etotal2t(i,:)=EXFASOR2t(i,:)+sqrt(-1)*EYFASOR2t(i,:);
    Emaxtotal(i)=max(abs(Etotal2t(i,:)));
end
figure;
plot(Xvar,Emaxtotal);grid;xlabel(' Abscisas x en m');ylabel(' Campo Maximo en
kV/m. ');title(texto2);

% utilidades adicionales:
% Eliminacion de cables de guarda aterrizados
for i=1:nc
    if FASE(i)==0
        corte = i;
        break;
    end
end

Creducida1=[C(1:corte-1,1:corte-1)];
Preducida1=inv(Creducida1);
open('Creducida1');
open('Preducida1');

% Eliminacion de conductores en haz

nfe=max(FASE);
Creducida2=zeros(nfe,nfe);
nroc2=length(Creducida1);
for i=1:nroc2,
    k=FASE(i);
    for j=1:nroc2,
        l=FASE(j);
        Creducida2(k,l)=Creducida2(k,l)+Creducida1(i,j);
    end
end;

open('Creducida2');

% Voltajes reducidos
for i=1:nroc2,
    k=FASE(i);
    Vred(k)=V(i);
end

```



```
Vreducido=conj(Vred);  
Qreducida=Creducida2*Vreducido;
```

```
open('Vreducido');  
open('Qreducida');
```

ANEXO 2. PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LOS VOLTAJES INDUCIDOS.

```
% Programa Voltajes inducidos
% Datos parecidos al de Campo Eléctrico, a los conductores no aterrizados y no
% energizados asignarles como No fase = -1 y ubicarlos bien al final
% Frecuencia para Admitancias es 60 Hz,

clc;
clear all;
f = 60;
w = 2*pi*f;

% Entrada de datos no utilizada
%casoinduc = input(' Archivo - entre comillas - para ver Voltajes inducidos:...');
%datos2 = xlsread(casoinduc);

% Entrada de datos finalmente utilizada
a = dir('*.xls'); kk = menu('Escoja un archivo a analizar',a.name);
datos2 = xlsread(a(kk).name);

nc2 = max(datos2(:,1));
X2 = [datos2(:,2)];
R2 = [datos2(:,3)];
H2 = [datos2(:,4)];
FASE2 = [datos2(:,5)];
VOLT2 = [datos2(:,6)];
ANG2 = [datos2(:,7)];
V2 = VOLT2.*(cos(ANG2*pi/180) + sqrt(-1)*sin(ANG2*pi/180));

% Diagonal principal de P2, P2 en m/F
for j=1:nc2
P2(j,j) = (1/(2*pi*8.8542*1e-12))*log(2*H2(j)./R2(j));
end

% Elementos fuera de la diagonal
for i=1:(nc2-1)
for j= i+1:nc2
```

```

dr2 = sqrt((X2(i)-X2(j)).^2 + (H2(i)-H2(j)).^2);
dp2 = sqrt((X2(i)-X2(j)).^2 + (H2(i)+H2(j)).^2);
P2(i,j) = (1/(2*pi*8.8542*1e-12))*log(dp2/dr2);
P2(j,i) = P2(i,j);
end
end
% C en F/m
C2 = inv(P2);
Y2 = sqrt(-1)*w*C2;

for i= 1:nc2;
if FASE2(i) == -1
corte2 = i;
break;
end
end

YI = [Y2(1:corte2-1,1:corte2-1)];
YII = [Y2(1:corte2-1,corte2:nc2)];
YIII = [Y2(corte2:nc2,1:corte2-1)];
YIV = [Y2(corte2:nc2,corte2:nc2)];

Vener = V2(1:corte2-1);

% La solución da en kV

Vx = -inv(YIV)*YIII*Vener
MagVx = abs(Vx)
AngVx = angle(Vx)*180/pi
open('MagVx');
open('AngVx');

```