



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

Desarrollos de modelos en elementos finitos (MEF) para el estudio de los efectos de campos electromagnéticos (CEMs) en la salud.

English tittle:

Development of finite element models (FEM) to study the effects of electromagnetic fields (EMFs) on health.

Autor/es

Pablo Sedano Sánchez

Director/es

Antonio Usón Sardaña

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2016

Desarrollos de modelos en elementos finitos (MEF) para el estudio de los efectos de campos electromagnéticos (CEMs) en la salud.

RESUMEN

Este trabajo se dedica al cálculo mediante el método de los elementos finitos (MEF) de los campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas aéreas de alta tensión, para posteriormente contrastarlos con los publicados en los artículos científicos y compararlos con aquellos valores recomendados por las autoridades sanitarias como límites admisibles para seres vivos.

Para determinar los valores de campo eléctrico E (V/m) y campo magnético B (T) se emplea el programa FEMM, que permite el cálculo de estas magnitudes en dos dimensiones.

Como referencia de valores máximos admisibles en seres vivos, y en particular seres humanos, se han escogido los publicados por la Comisión Internacional de Protección Contra la Radiación No Ionizante, ICNIRP.

Se incluye un modelo de una línea de alta tensión de 400 kV cercana a la población de Andorra (Teruel), que puede ser empleado en actividades docentes de la asignatura "Líneas Eléctricas" del grado de Ingeniería Eléctrica.

Development of finite element models (FEM) to study the effects of electromagnetic fields (EMFs) on health.

ABSTRACT

This work is dedicated to the calculation using the finite element method (FEM) of electromagnetic fields generated by overhead power lines, contrasting them with the published in scientific articles and comparing them with those values recommended by health authorities as allowable limits for living beings.

To determine the values of electric field E (V/m) and magnetic field B (T) the FEMM program is used, which allows the calculation of these quantities in two dimensions.

As Maximum permissible reference values in living beings, and human beings in particular, have been chosen the published by the International Commission on Non-ionizing Radiation Protection, ICNIRP.

A model of a high-voltage line 400 kV near the town of Andorra (Teruel) is included, which can be used in teaching activities of the subject "Power Lines" from the Electrical Engineering degree.



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. _____,

con nº de DNI _____ en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
_____, (Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, _____

Fdo: _____

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVO	2
3.	DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA	3
4.	VALIDACIÓN DE HERRAMIENTA	5
4.1.	Modelo R. Moreno	6
4.1.1.	Descripción	6
4.1.2.	Distribución de campos	6
4.1.3.	Gráfica de campos	7
4.2.	Modelo N°1 C. Garrido	8
4.2.1.	Descripción	8
4.2.2.	Distribución de campos	8
4.2.3.	Gráficas de campo	9
4.3.	Modelo N°2 C. Garrido	10
4.3.1.	Descripción	10
4.3.2.	Distribución de campos	10
4.3.3.	Gráficas de campo	11
4.4.	Modelo L12 EMFs.	12
4.4.1.	Descripción	12
4.4.2.	Distribución de campos eléctricos	12
4.4.3.	Gráficas de campo	13
4.5.	Conclusiones.....	14
4.5.1.	Campos magnéticos.	14
4.5.2.	Campos eléctricos	14
5.	MODELO DE LÍNEA ESCOGIDO	15
5.2.	Análisis de campos	17
5.2.1.	Campos Eléctricos	17
5.2.2.	Punto de máxima exposición.	17
5.2.3.	Análisis de distribución campos	19
5.3.	Campos Magnéticos	21
5.3.1.	Punto de máxima exposición.	21
5.3.2.	Análisis de valores del campo magnético	23

5.4.	Estudio de los efectos biológicos campos obtenidos.....	26
5.4.1.	Campos Eléctricos	26
5.4.2.	Campos Magnéticos	27
6.	CONCLUSIÓN	28
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	29

Lista de figuras

Figura 3.1.	Interface del programa FEMM.	3
Figura 4.1.	Distribución de campo magnético del modelo R. Moreno.	6
Figura 4.2.	Gráfica de campo magnético del modelo R. Moreno.	7
Figura 4.3.	Distribución de campo magnético del modelo N°1 C. Garrido.....	8
Figura 4.4.	Gráfica de campo magnético del modelo N°1 C. Garrido.....	9
Figura 4.5.	Distribución de campo magnético del modelo N°2 C. Garrido.....	10
Figura 4.6.	Gráfica de campo magnético del modelo N°2 C. Garrido.....	11
Figura 4.7.	Distribución líneas de equipotenciales del modelo L12 EMFs.	12
Figura 4.8.	Distribución de campo eléctrico del modelo L12 EMFs.	13
Figura 4.9.	Gráfica de campo eléctrico del modelo L12 EMFs.	13
Figura 5.1.	Imagen de la línea en Mapa de la red, Sector 09.....	15
Figura 5.2.	Imagen de la línea en Mapa de satélite.	15
Figura 5.3.	Geometría de la línea Andorra-Aragón.	16
Figura 5.4.	Gráfica del campo eléctrico. Valor instantáneo máximo en los conductores de la fase a-a'	17
Figura 5.5.	Gráfica del campo eléctrico. Valor instantáneo máximo en los conductores de la fase b-b'	18
Figura 5.6.	Gráfica del campo eléctrico. Valor instantáneo máximo en los conductores de la fase c-c'	18
Figura 5.7.	Distribución del campo eléctrico.....	19
Figura 5.8.	Campo eléctrico a la altura de la cabeza (1,8 m)	20
Figura 5.9.	Gráfica del campo magnético. Valor instantáneo máximo en los conductores de la fase a-a'	21
Figura 5.10.	Gráfica del campo magnético. Valor instantáneo máximo en los conductores de la fase b-b'	22
Figura 5.11.	Gráfica del campo magnético. Valor instantáneo máximo en los conductores de la fase c-c'	22
Figura 5.12.	Distribucion campo alrededor del cuerpo.....	23

Figura 5.13. Gráfica del campo magnético en la cabeza.....	24
Figura 5.14. Grafica de límites de exposición a campo eléctrico según la ICNIRP.	26
Figura 5.15. Graficas de límites de exposición a campo magnético según la ICNIRP.	27

Lista de tablas

Tabla 5.1. Campo eléctrico a la altura de la cabeza (1,8 m).....	19
Tabla 5.2. Campo magnético a la altura de la cabeza (1,8 m).	23
Tabla 5.3. Campo inducido en el interior de la cabeza.	25

1. INTRODUCCIÓN

Los campos electromagnéticos (CEM) ocurren en la naturaleza y por lo tanto siempre han estado presentes en la tierra. Sin embargo, durante el siglo XX, la exposición ambiental a fuentes de CEM hechas por el hombre, se ha incrementado sin parar, debido a la demanda de la electricidad y los cambios de prácticas laborales y conductas sociales. Todos estamos expuestos a una mezcla compleja de campos eléctricos y magnéticos producidos por las líneas de Alta Tensión que dan suministro eléctrico a todo el mundo.¹

El incremento en los últimos años de la preocupación por los posibles efectos que pudieran tener los campos magnéticos, producidos por las líneas eléctricas de alta tensión en los seres vivos, ha originado multitud de estudios e informes para esclarecer esta posible fuente “productora” de enfermedades. La guía presentada por la Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) de 1998, que se centra en el rango de frecuencia de 1 Hz a 1 MHz, que incluye la frecuencia de la red eléctrica de 50 Hz, recomienda los límites de exposición para evitar efectos nocivos en el funcionamiento del sistema nervioso (el único efecto que ha sido demostrado inequívocamente con evidencia científica)[1]. Sin embargo, hoy en día la controversia se centra en otros posibles efectos nocivos, sospechosos pero no comprobados inequívocamente, sobretodo un posible vínculo entre las exposiciones a los campos magnéticos y cáncer.²

Por ello puede resultar de utilidad, para futuros diseños de líneas de transporte de energía eléctrica, emplear una herramienta de cálculo como es el método de elementos finitos, para el cálculo de la distribución y magnitud del campo magnético generado por las líneas eléctricas. De esta forma, se podrá prever si la línea genera un campo magnético superior a los niveles que recomiendan las directrices ICNIRP sobre la limitación de exposición de los campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo.

¹ Fragmento obtenido de “Campos electromagnéticos y salud pública: la evidencia presente”

² Fragmento obtenido de “Estudio de la distribución e intensidad de los campos magnético y eléctrico entorno a líneas eléctricas de alta tensión. Particularización para líneas de 220 y 400 kV”

2. OBJETIVO

El objetivo de este estudio es el de realizar modelos de líneas de Alta Tensión de nuestro entorno haciendo uso del programa de cálculo en de campos electromagnéticos mediante el método de elementos finitos (MEF), en concreto con el programa "FEMM", para obtener el valor de la intensidad del campo eléctrico (módulo de E en V/m) y del campo magnético (módulo de B en T) originados en lugares próximos a líneas de eléctricas de alta tensión y en donde puede existir actividades humanas..

Posteriormente se observaran los resultados obtenidos, centrando el interés en la cantidad de campo que alcanza a un modelo de cuerpo humano situado debajo de la línea. Estas observaciones se compararan con distintos estudios de la bibliografía, que tratan sobre los efectos que pueden resultar debidos a las exposiciones a distintos niveles de campo, tanto eléctrico como magnético.

Previamente se habrá realizado una serie de validaciones en la que se diseñaran distintos modelos de líneas de Alta Tensión, y se compararan con medidas reales de campo para poder así cerciorarnos de que el cálculo de campo del programa FEMM es suficientemente veraz, y las conclusiones de estudio son adecuadas y de confianza.

Este estudio también pretende demostrar que el programa FEMM posee la utilidad y fiabilidad suficiente como para ser empleado como recurso didáctico en una de las sesiones prácticas asociadas a la asignatura de Líneas Eléctricas del Grado de Ingeniería Eléctrica.

3. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA

FEMM es un conjunto de programas para la resolución de problemas electromagnéticos de baja frecuencia en dos dimensiones. En lo que se refiere al presente proyecto, se ha utilizado la versión FEMM 4.2 de libre distribución creada por el profesor Dr. D.C. Meeker. El programa aborda problemas magnetoestáticos lineales y no lineales, problemas de electrostática lineales, problemas magnéticos no lineales con armónicos y problemas de flujo de calor en estado estacionario.[2]

FEMM se divide en tres partes:

- **Soporte interactivo** (femm.exe). Figura 3.1. Este programa es un interfaz de múltiples documentos de pre-procesado y un post-procesador para los diversos tipos de problemas resueltos por FEMM. Contiene una interfaz CAD en el que se traza la geometría del problema a resolver y que también sirve para definir las propiedades del material y las condiciones de contorno. Usando una herramienta como Autocad, se puede crear un archivo DXF para después importarlo directamente a femm.exe y facilitar la creación del modelo. Las soluciones de campo se pueden visualizar en forma de curvas de nivel y planos de densidad. El programa también permite al usuario inspeccionar el campo en puntos arbitrarios, así como evaluar un número de diferentes integrales y planos de interés a lo largo de los contornos definidos por el usuario.

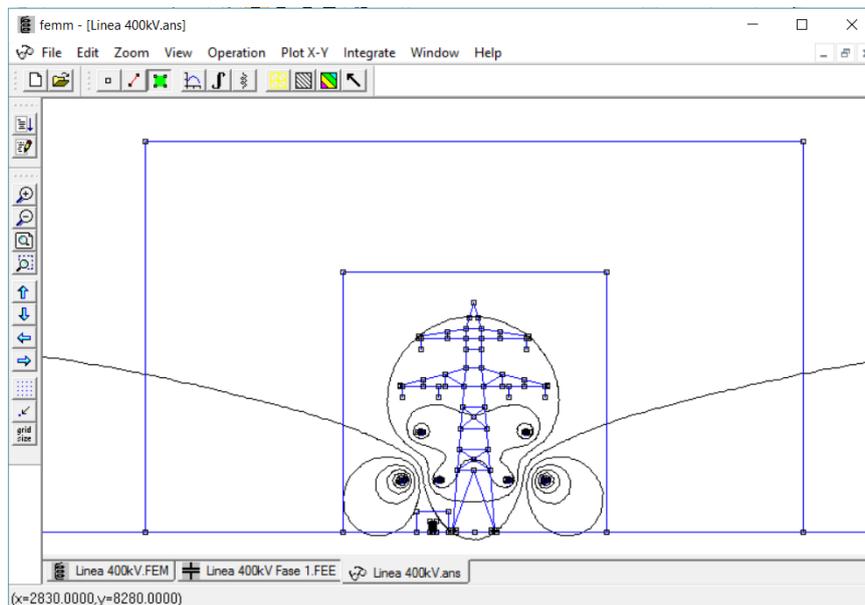


Figura 3.1. Interface del programa FEMM.

- **Triangle.exe.** Este programa discretiza la región solución en un gran número de triángulos cuyo tamaño se puede variar para ganar o restar precisión al cálculo, una parte vital del proceso de elementos finitos.

- **“Solvers”**. Cada módulo de cálculo toma un conjunto de archivos de datos que describen el problema y resuelve las ecuaciones diferenciales parciales pertinentes para obtener valores para el campo deseado en todo el dominio de la solución.

Tanto para el caso del estudio magnético como para el electrostático, se han realizado los siguientes pasos.

1. Diseño del modelo en Autocad, creando un archivo .dxf para importarlo posteriormente en FEMM.
2. Importación del archivo .dxf y definición de las características principales del modelo, como las unidades de la simulación (cm) y para el caso magnético, la frecuencia de la corriente (50 Hz)
3. Definición de los materiales a usar:
 - Magnético: Permeabilidad relativa y conductividad.
 - Electrostático: Permitividad relativa.
4. Definición de cargas:
 - Magnético: Corriente que circula por cada fase.
 - Electrostático: valores de tensiones de cada fase, de tierra, del sujeto y del contorno.
5. Descomposición del modelo usando triangle.exe.
6. Realizar el análisis.
7. Tomar datos de la solución ya sea a partir de puntos determinados dentro del dominio, como obteniendo una gráfica.

4. VALIDACIÓN DE HERRAMIENTA

Para la validación de la herramienta se han seleccionado una serie de modelos que han sido estudiados en la realidad y que pueden servir de comparación con los resultados que se obtengan introduciendo los datos de dichos modelos en el programa FEMM.

Los modelos elegidos son:

- El estudio realizado por R. Moreno, J.A. Güemes e I. Pico llamado “Análisis del campo magnético en una línea eléctrica de AT” .[3]
- El trabajo realizado por Carlos Garrido, Antonio F. Otero y Jose Cidras, titulado “Campos magnéticos provenientes de dispositivos eléctricos y líneas de Alta Tensión” [4]
- Línea L12, medidas que recoge la página EMFs.info. [5]

Los resultados de estas validaciones no deben porqué ser iguales, ya que a la hora de realizar las medidas en la realidad, existen una gran variedad de factores que no se han tenido en cuenta como por ejemplo la humedad del aire, que afectan al resultado de estas mediciones y debido a su complejidad resulta muy complicado aplicarlo en los modelos de la simulación.

Sin embargo, los resultados deben mantenerse dentro de unos límites aceptables para validar la herramienta.

4.1. Modelo R. Moreno

4.1.1. Descripción

En este modelo se ha usado una línea eléctrica de alta tensión de 3ª categoría, de 30 kV y doble circuito con un conductor de aluminio-acero LA-180. La configuración de la línea es tipo barril siendo la altura del conductor más bajo en el centro del vano de 12 m.

El cálculo en el modelo se ha realizado para una intensidad de corriente de 50 A por circuito. Para hacer que el modelo sea correcto, las intensidades de corriente deben estar desfasadas 120º, por lo que se toma un valor instantáneo de:

- $Fase\ 1 = 50\ A \cdot \sqrt{2} = 70,709\ A$
- $Fase\ 2 = -(50\ A \cdot \sqrt{2})/2 = -35,36\ A$
- $Fase\ 3 = -(50\ A \cdot \sqrt{2})/2 = -35,36\ A$

4.1.2. Distribución de campos

Una vez realizado el modelo e introducidos todos los parámetros el resultado mediante el MEF es el siguiente:

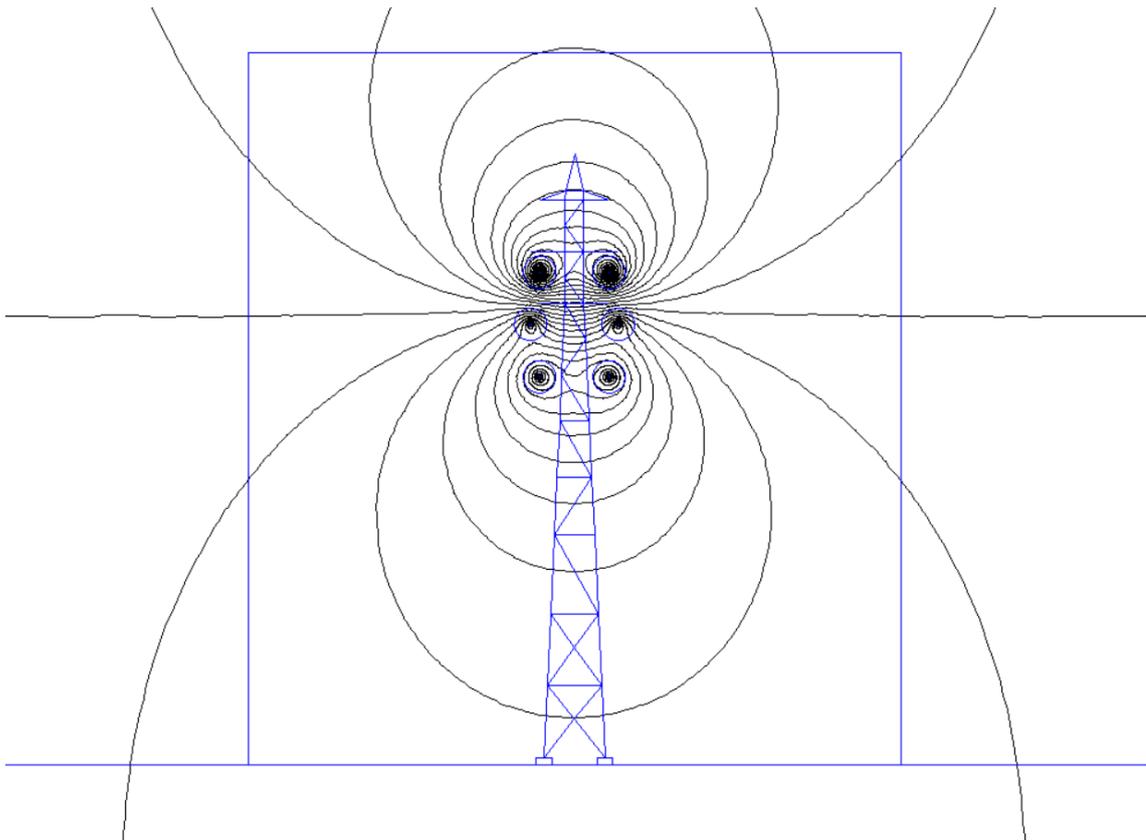


Figura 4.1. Distribución de campo magnético del modelo R. Moreno.

4.1.3. Gráfica de campos

A partir de este cálculo de campos magnéticos podemos obtener los distintos valores de densidad de flujo magnético a lo largo de una línea a 1,20 m del suelo a 25 m del centro de la torre por ambos lados y compararlos con los valores medidos:

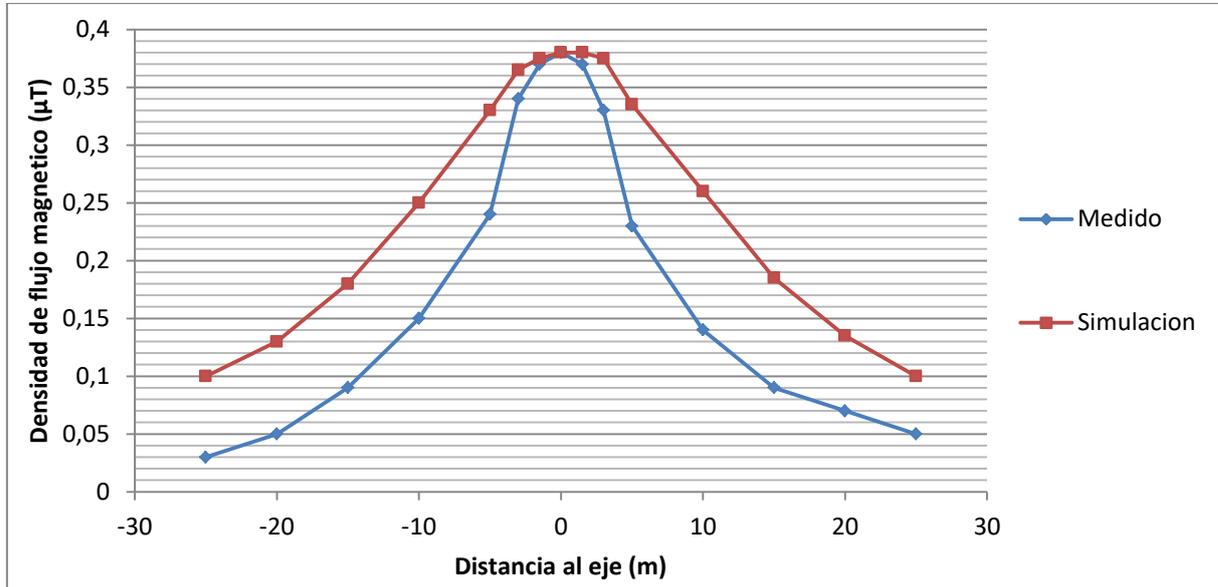


Figura 4.2. Gráfica de campo magnético del modelo R. Moreno.

El error porcentual se acrecienta conforme nos alejamos del centro de la línea, llegando a alcanzar valores de error $\xi(\%)$ del 85 %, pero en la zona situada justo debajo de la línea este error se reduce, alcanzando valores del 7,35%, llegando prácticamente al 0 %.

4.2. Modelo N°1 C. Garrido

4.2.1. Descripción

El ejemplo elegido en este caso es una aérea de primera categoría de Alta Tensión de 132 kV. Las medidas de estas líneas se realizaron a una altura de 1 metro del suelo usando gaussímetros. Se trata de una línea de doble circuito. Los conductores más cercanos al suelo estaba a una distancia de 9,12 m, la separación con respecto al centro de la torre es de 3, 3,3 y 2,8 m en cada fase y la distancia vertical entre conductores es de 4 m. La disposición de las fases (L1, L2 y L3) es la misma en ambos circuitos.

Existe una diferencia en el valor eficaz de la intensidad de corriente eléctrica de intensidad entre ambos circuitos de 91 A y 104 A.

Como en el caso anterior hemos realizado un cálculo de la intensidad instantánea que habría en cada circuito.

Circuito A

- $Fase\ 1A = 104\ A \cdot \sqrt{2} = 147,08\ A$
- $Fase\ 2A = -(104\ A \cdot \sqrt{2})/2 = -73,54\ A$
- $Fase\ 3A = -(104\ A \cdot \sqrt{2})/2 = -73,54\ A$

Circuito B

- $Fase\ 1B = 91\ A \cdot \sqrt{2} = 128,69\ A$
- $Fase\ 2B = -(91\ A \cdot \sqrt{2})/2 = -64,35\ A$
- $Fase\ 3B = -(91\ A \cdot \sqrt{2})/2 = -64,35\ A$

4.2.2. Distribución de campos

Una vez realizado el modelo, el resultado del cálculo numérico mediante el MEF es el mostrado en la Fig. 4.3, donde se observan las líneas de campo magnético B en el entorno de la línea.

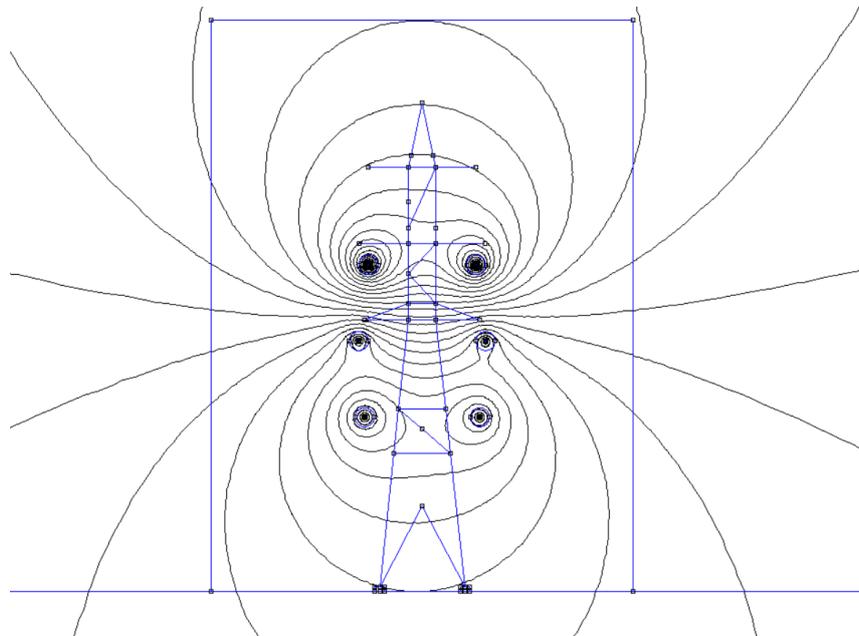


Figura 4.3. Distribución de campo magnético del modelo N°1 C. Garrido.

4.2.3. Gráficas de campo

Si observamos en una gráfica los valores de los campos a 1 m del suelo y a 50 m del centro de la torre por ambos lados y los comparamos con los valores medidos, podremos ver en la figura 4.4 que la diferencia entre ambas graficas es muy reducida.

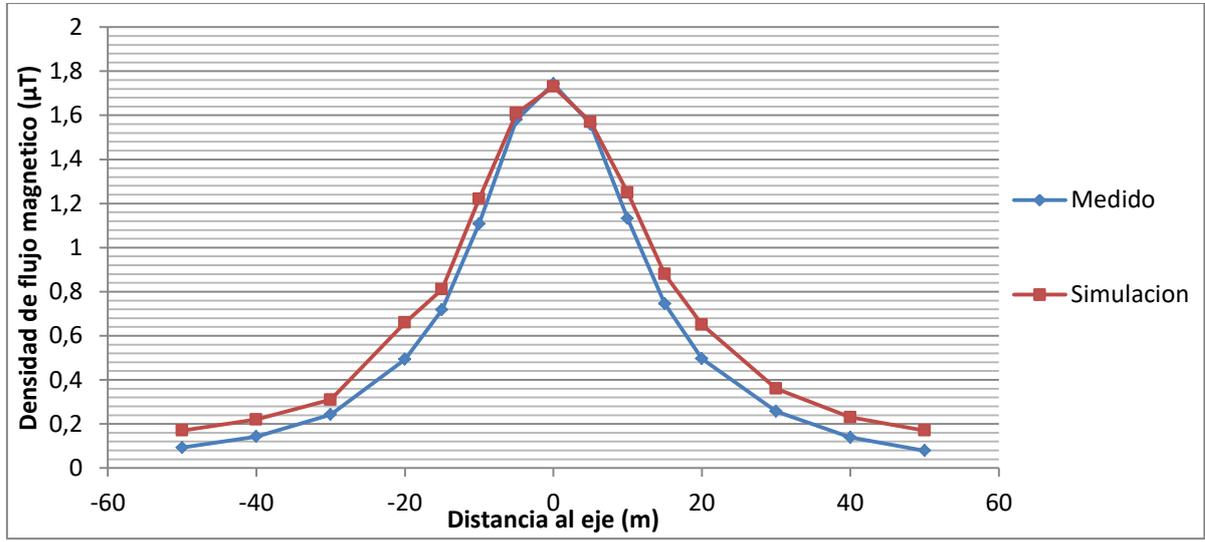


Figura 4.4. Gráfica de campo magnético del modelo N°1 C. Garrido.

En este caso el error porcentual entre gráficas se reduce mucho llegando a un error máximo del 33 %, con un error mínimo en el centro de la línea de $\xi(\%) = 0,74 \%$.

4.3. Modelo N°2 C. Garrido

4.3.1. Descripción

En este otro modelo de C.Garrido se ha usado una línea de un solo circuito simple cuyas fases están dispuestas en horizontal. Esta línea antiguamente había sido prevista para una tensión nominal de 220 kV pero que actualmente da un servicio de 132 kV. La distancia entre fases es de 7.8 m y la altura de los cables es de 12,12 m con respecto al suelo. La distancia de la medida es la misma que en el anterior, a 1 m del suelo.

Con el mismo patrón que antes, procedemos a obtener las intensidades instantáneas de cada fase, sabiendo que la intensidad eficaz que circula por los conductores de la línea es de 482 A por fase:

- $Fase\ 1 = 482\ A \cdot \sqrt{2} = 681,65\ A$
- $Fase\ 2 = -(482\ A \cdot \sqrt{2})/2 = -340,83\ A$
- $Fase\ 3 = -(482\ A \cdot \sqrt{2})/2 = -340,83\ A$

4.3.2. Distribución de campos

En la Fig. 4.5 se observa la distribución de líneas de campo magnético obtenida mediante el MEF.

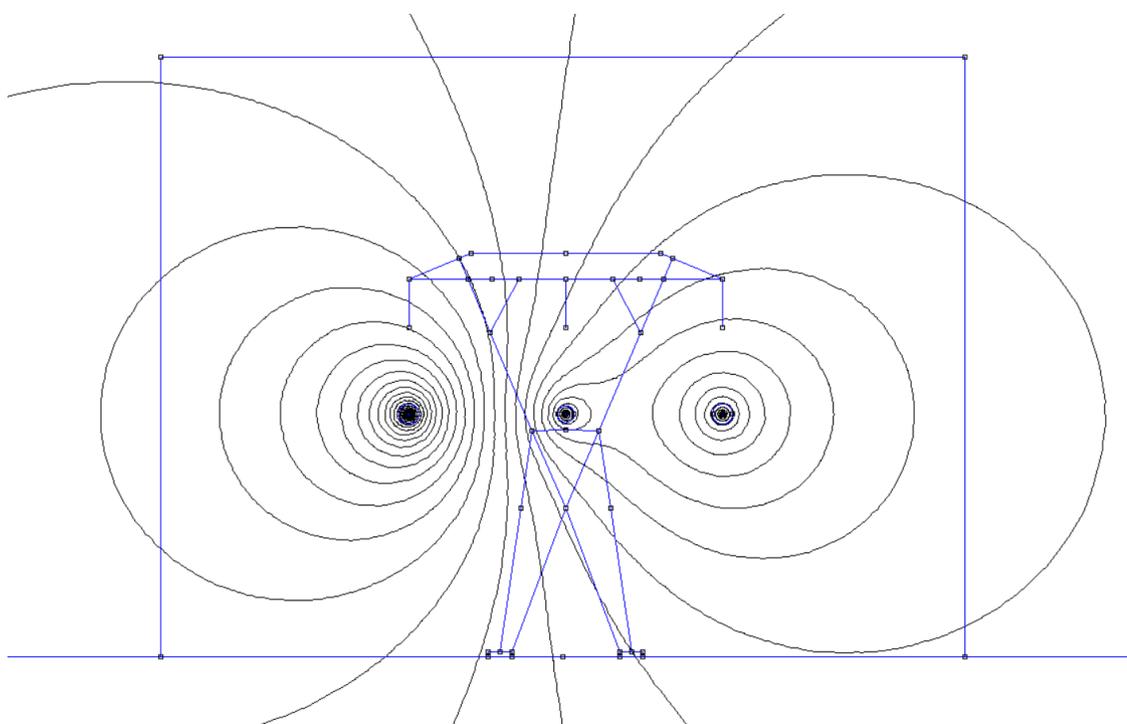


Figura 4.5. Distribución de campo magnético del modelo N°2 C. Garrido.

4.3.3. Gráficas de campo

La gráfica de los valores de los campos magnéticos a 1 m del suelo y a 50 m del centro de la torre por ambos lados obtenidos de la simulación y las medidas reales se muestran en la figura 4.6.

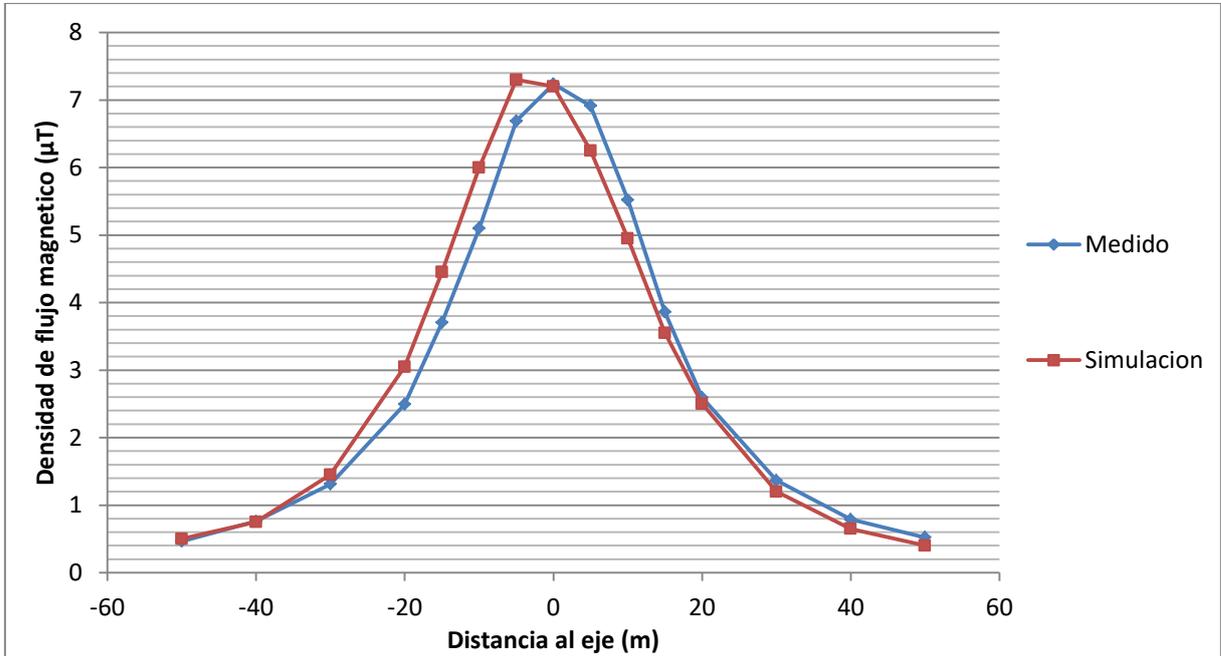


Figura 4.6. Gráfica de campo magnético del modelo N°2 C. Garrido.

La grafica de la figura 4.6 nos muestra una asimetría en el caso de los valores de la simulación, dando un error porcentual máximo de $\xi(\%) = 9,11\%$.

4.4. Modelo L12 EMFs.

4.4.1. Descripción

En la página de EMFs existen varias medidas de líneas de alta tensión con distintos valores de tensión. Para la validación de la simulación electrostática se ha elegido una línea de 400 kV, en concreto la que denominan como L12, que es la que más información ofrecía para realizar el modelo. La medida se ha realizado a 1 m y los cables más próximos al suelo se encuentran a 7,6 m de altura. La separación de los conductores con respecto del centro de la línea son 6, 5,72 y 5,49 m y la separación entre conductores es de aproximadamente 9 m.

Como la línea cuenta con 400 kV de tensión de línea, la tensión con respecto a la tierra será la tensión de fase, que es 230 kV.

Al igual que en los casos magnéticos, realizaremos una distribución de tensiones instantáneas entre las fases:

- $Fase\ 1 = 230\ kV \cdot \sqrt{2} = 325,27\ kV$
- $Fase\ 2 = -(230\ kV \cdot \sqrt{2})/2 = -162,63\ kV$
- $Fase\ 3 = -(230\ kV \cdot \sqrt{2})/2 = -162,63\ kV$

4.4.2. Distribución de campos eléctricos

El resultado del cálculo numérico para la simulación electrostática se muestra en la Fig. 4.7, donde se observan las líneas equipotenciales en el entorno de los conductores en tensión. El vector intensidad de campo eléctrico es perpendicular a las líneas equipotenciales, y su sentido es de mayor a menor potencial.

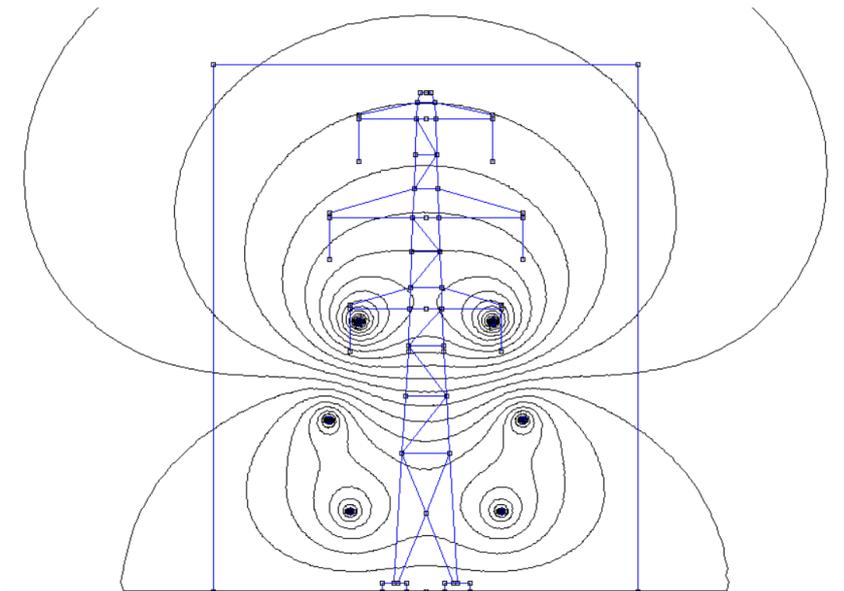


Figura 4.7. Distribución líneas de equipotenciales del modelo L12 EMFs.

En la Fig. 4.8 se muestra el módulo del vector intensidad de campo E (V/m)

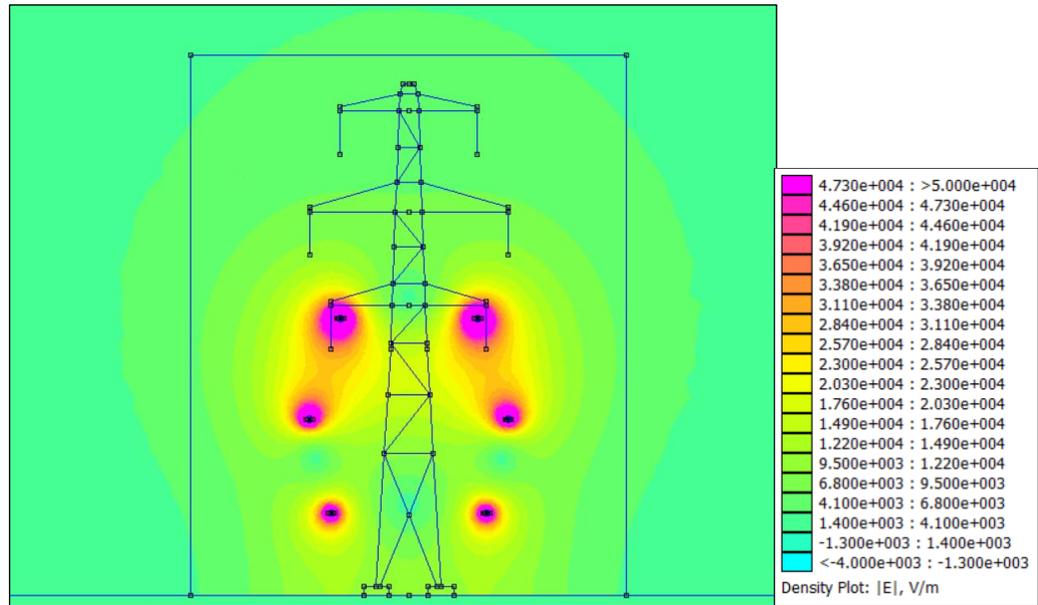


Figura 4.8. Distribución de campo eléctrico del modelo L12 EMFs.

4.4.3. Gráficas de campo

La gráfica de los valores del módulo del vector intensidad de campo eléctrico E a 1 m de suelo y a 50 m del centro de la torre por ambos lados junto con medidas reales se muestra en la Fig. 4.9.

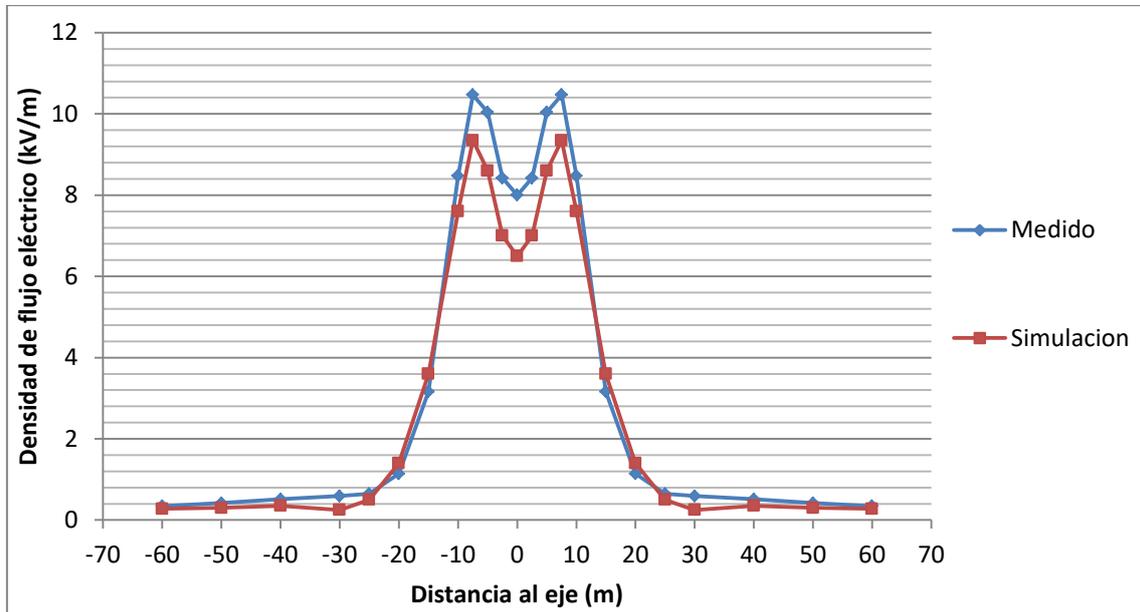


Figura 4.9. Gráfica de campo eléctrico del modelo L12 EMFs.

La comparativa de los valores medidos y los simulados muestran un aumento del error en la zona más próxima a la línea, alcanzando el error máximo en el centro, de valor $\xi(\%) = 18,75\%$.

4.5. Conclusiones

4.5.1. Campos magnéticos.

Como se ha podido observar, la comparativa de gráficas nos muestra unos resultados bastante satisfactorios. En el caso del modelo R. Moreno sí que existe cierta diferencia entre ambas graficas pero esta solo es preocupante a partir de los 5 metros de distancia con respecto al eje de la torre, alcanzando errores máximos del 85 %. Por tanto para el estudio posterior podría ser aceptable.

En los dos casos de C. Garrido estas diferencias entre graficas casi desaparecen, aunque se observa una ligera divergencia entre las gráficas correspondientes al modelo nº 2, dando errores de hasta un 9,11 %, que considero debidas a la asimetría en los valores de intensidad de corrientes introducidas en la simulación, diferencia que es despreciable ya que estamos hablando de corrientes instantáneas y la forma de la campana varía constantemente manteniéndose dentro de unos márgenes.

Estos resultados me permiten validar la herramienta FEMM en su aplicación al cálculo de los campos EM, teniendo en cuenta que los errores observados en la zona más cercana a la línea, entre mis modelos y los de la bibliografía no superan el 9,11%.

4.5.2. Campos eléctricos

En el caso de la herramienta para la simulación de los campos eléctricos, se puede observar en la figura 4.9, que a pesar de que existe cierta desviación de los valores medidos y los valores simulados, los errores no superan el 18,75%. Estas diferencias se pueden deber a que a la hora de medir, las circunstancias climatológicas como por ejemplo la humedad, han podido variar la permitividad del aire o afectar en la lectura de los instrumentos.

Como en el caso de las simulaciones magnetostáticas, los errores están dentro de un intervalo aceptable para considerar la herramienta como válida para aplicarla en el estudio objeto de mi trabajo.

5. MODELO DE LÍNEA ESCOGIDO

5.1. Descripción de la línea

La línea escogida para analizar una central térmica de Andorra y la subestación de Aragón, concretamente el tramo de línea que cruza por encima de la N-232, conocida como Carretera de Castellón, en el kilómetro 153.



Figura 5.1. Imagen de la línea en Mapa de la red, Sector 09.

Como se observa en la figura 5.2 la distancia de este tramo es de 400 m y pasa por encima de la vía aproximadamente a 78 m de la torre más al norte.

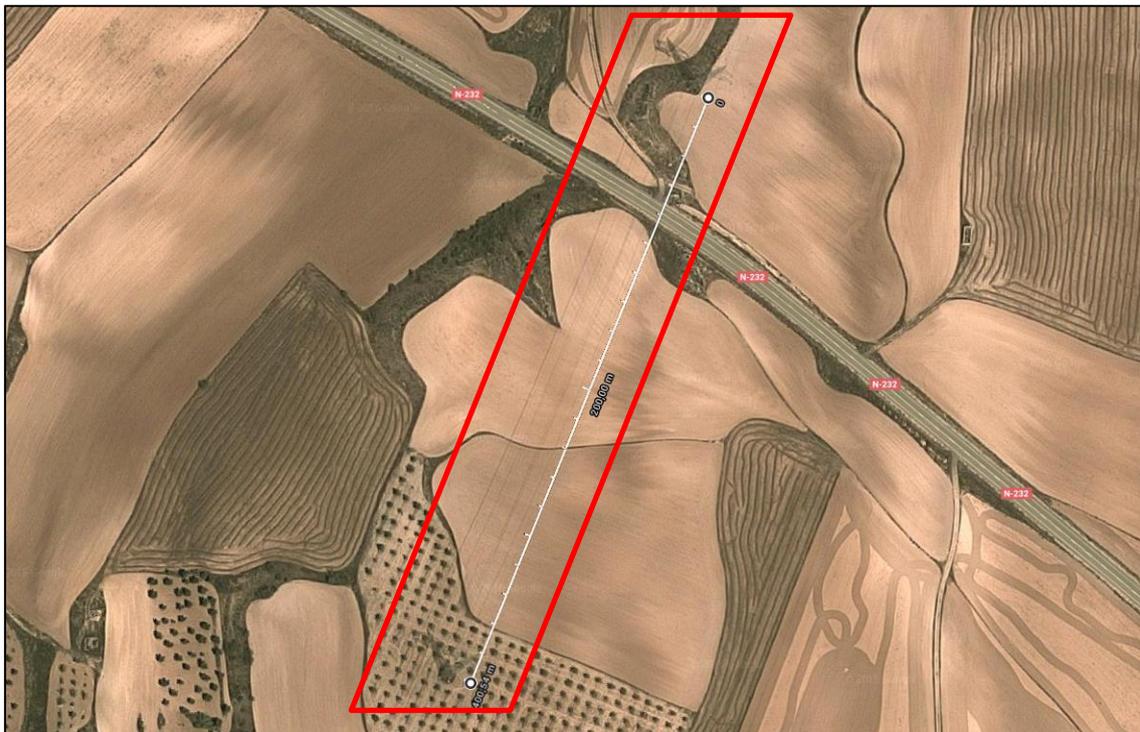


Figura 5.2. Imagen de la línea en Mapa de satélite.

Como se puede ver en la figura 5.1 del mapa obtenido de Red Eléctrica Española [6], se trata de una línea de 400 kV de doble circuito, además sabemos que se tratan de circuitos dúplex, con una corriente eficaz de 512 A por cada cable (4 cables por fase). Haciendo uso de la fórmula de la catenaria y sabiendo que la altura mínima de un conductor de 400 kV (categoría especial) con respecto a una carretera es de 7,5 m según el Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión [7], se puede prever una altura de 10 metros del cable más cercano al suelo a la altura de la carretera.

En la figura 5.3 se recogen las distancias entre los cables del modelo a simular, tanto las distancias entre conductores como la distancia al suelo en el punto que cruza con la carretera.

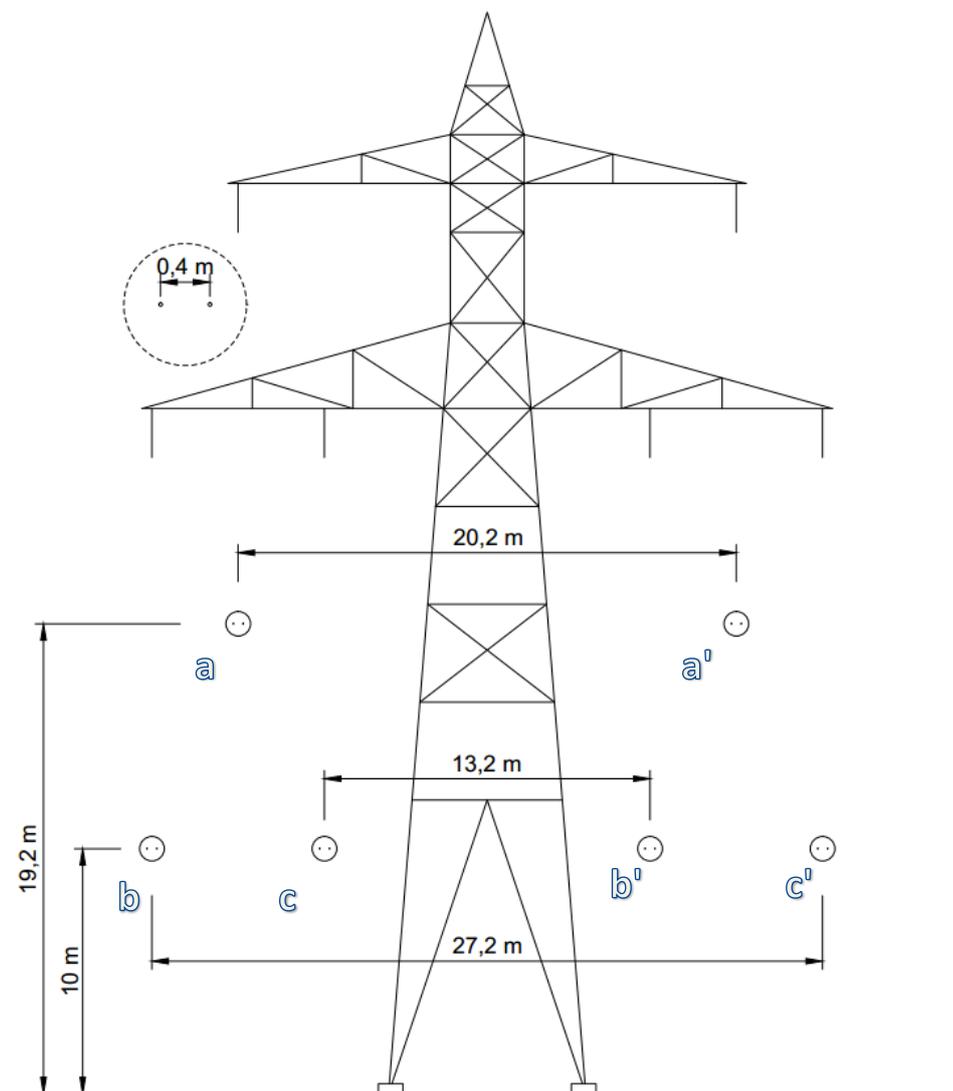


Figura 5.3. Geometría de la línea Andorra-Aragón.

5.2. Análisis de campos

Tanto para el caso de los campos eléctricos, como el caso de los campos magnéticos, se dividirán en dos partes, en la primera se analizará la distribución de los campos para decidir en qué punto se deberá colocar el cuerpo humano para que esté en el peor de los casos posibles y éste se vea afectado por campos más intensos. En el segundo apartado analizaremos los campos que rodean el cuerpo y obtendremos sus distintos valores que más tarde estudiaremos.

5.2.1. Campos Eléctricos

Los campos eléctricos de frecuencia baja influyen en el organismo, como en cualquier otro material formado por partículas cargadas. Cuando los campos eléctricos actúan sobre materiales conductores, afectan a la distribución de las cargas eléctricas en la superficie. Provocan una corriente que atraviesa el organismo hasta el suelo.

5.2.2. Punto de máxima exposición.

En la simulación se ha supuesto para una de las fases un valor pico de tensión de 325,27 kV, que es valor pico de la tensión de fase, tensión que existe entre el cable y el suelo, que se tomará como valor nulo. Para las otras dos fases se ha tomado un valor de -162,63 kV, valor que tendrían en el mismo instante que se da el pico anterior y que le corresponde la mitad de tensión y con un valor negativo. Se han simulado 3 opciones distintas, en las cuales en cada caso se le ha dado el valor de pico positivo a una de las 3 fases.

Los resultados de las medidas de campo de estas simulaciones se han realizado a 180 cm del suelo y una vez obtenidos se han realizado gráficas para poder decidir en cuál es la situación más desfavorable.

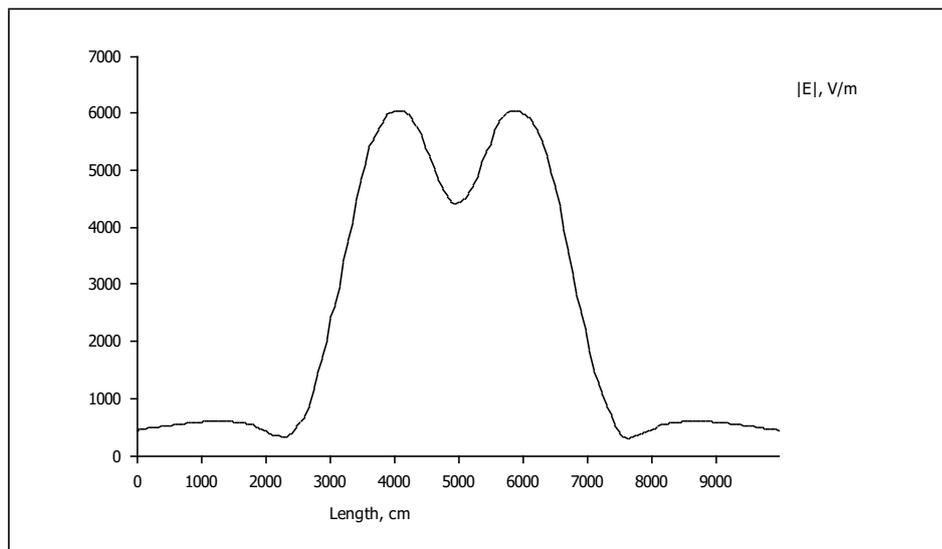


Figura 5.4. Gráfica del campo eléctrico. Valor instantáneo máximo en los conductores de la fase a-a'

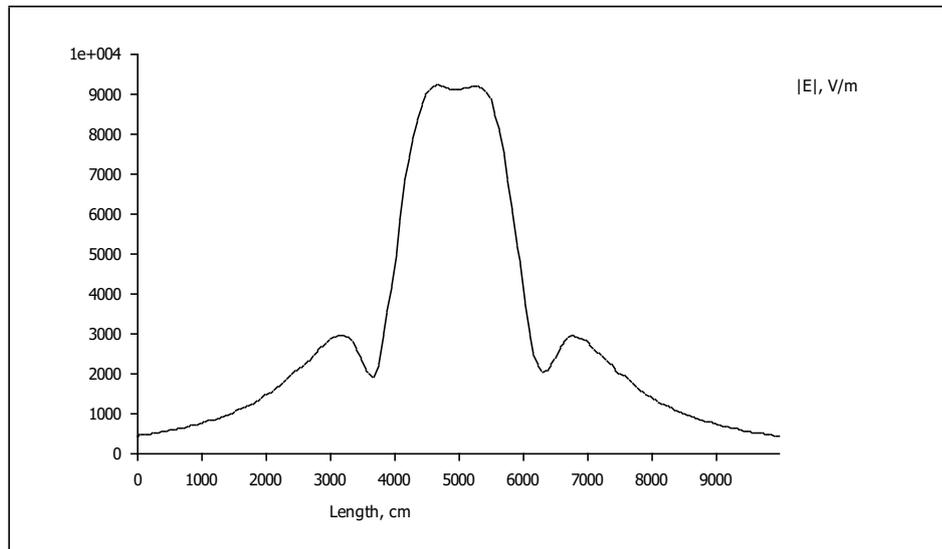


Figura 5.5. Gráfica del campo eléctrico. Valor instantáneo máximo en los conductores de la fase b-b'

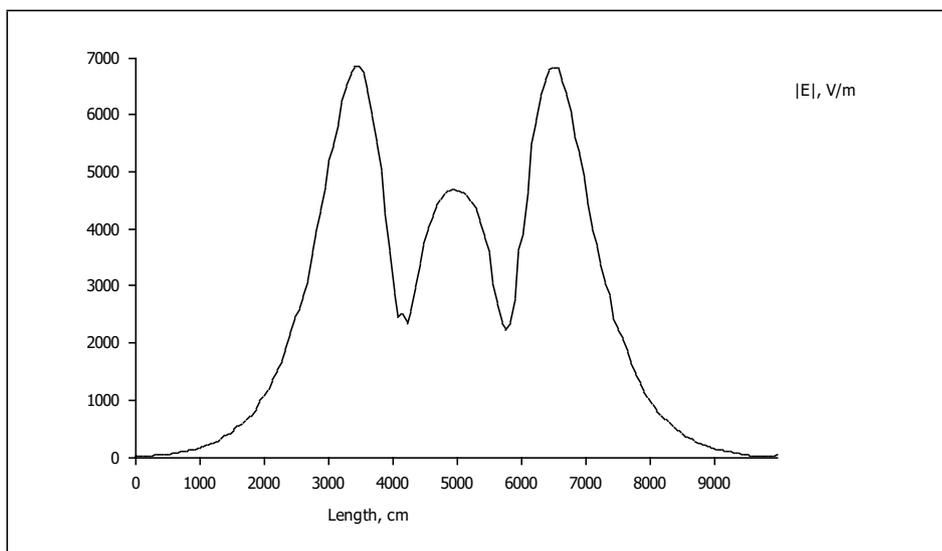


Figura 5.6. Gráfica del campo eléctrico. Valor instantáneo máximo en los conductores de la fase c-c'

Como se puede observar en las gráficas anteriores, el pico más alto de campo eléctrico corresponde al de la gráfica de la figura 5.5, en el cual el valor de tensión de 325,27 kV corresponde a la pareja de conductores b-b' y que tiene más de 9 kV/m como máximo valor de campo eléctrico, situado en la zona justo en el centro de la línea.

5.2.3. Análisis de distribución campos

Una vez decidido donde se debe colocar el cuerpo humano se puede proceder a realizar la simulación. Los valores de permitividad de aire son prácticamente los mismos que los del vacío por tanto su permitividad relativa se tomara como 1. En la figura 5.7 se puede apreciar la distribución de campo eléctrico alrededor de la línea.

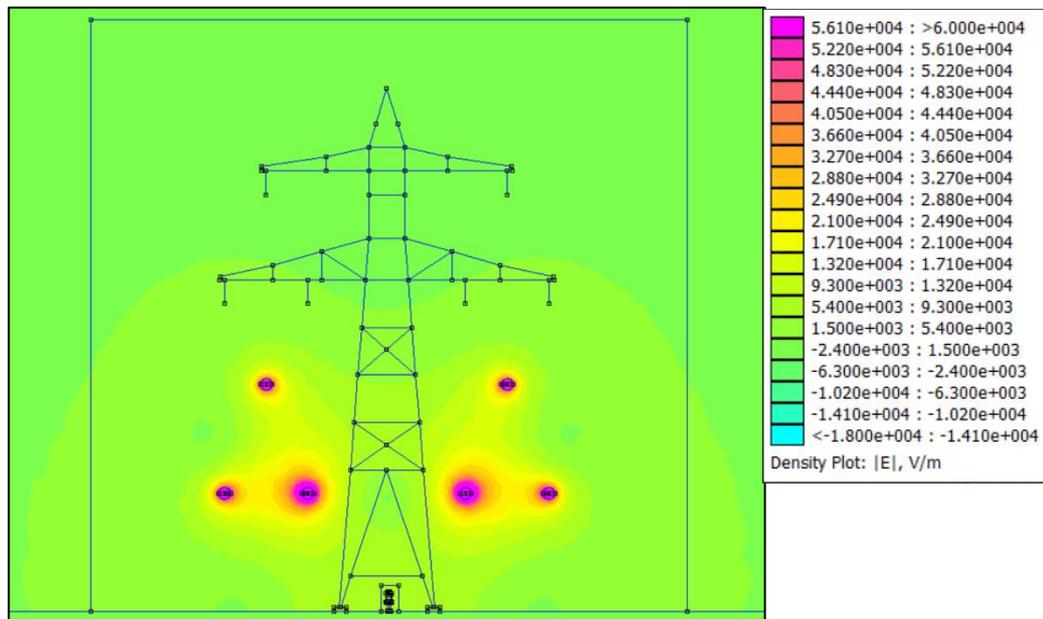


Figura 5.7. Distribución del campo eléctrico.

Para obtener el valor eficaz del vector intensidad de campo E en un punto determinado, realicé 12 simulaciones en instantes de un ciclo de 50 Hz (20 ms). Los valores tanto de tensión por fase como de campo eléctrico se han recogido en la tabla 5.1 y aparecen plasmadas en la gráfica de la figura 5.8.

t(s)	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (kV)	E (V/m)
0	325,269119	-162,63456	-162,63456	4420,18
0,00166667	281,69132	-281,69132	9,2149E-14	7804,5
0,00333333	162,63456	-325,269119	162,63456	9097,66
0,005	1,9925E-14	-281,69132	281,69132	7953,07
0,00666667	-162,63456	-162,63456	325,269119	4676,25
0,00833333	-281,69132	-5,9775E-14	281,69132	151,677
0,01	-325,269119	162,63456	162,63456	-4421,79
0,01166667	-281,69132	281,69132	-1,2452E-13	-7805,57
0,01333333	-162,63456	325,269119	-162,63456	-9098,71
0,015	-5,9775E-14	281,69132	-281,69132	-7953,07
0,01666667	162,63456	162,63456	-325,269119	-4677,23
0,01833333	281,69132	9,9626E-14	-281,69132	152,033
0,02	325,269119	-162,63456	-162,63456	4420,18

Tabla 5.1. Campo eléctrico a la altura de la cabeza (1,8 m).

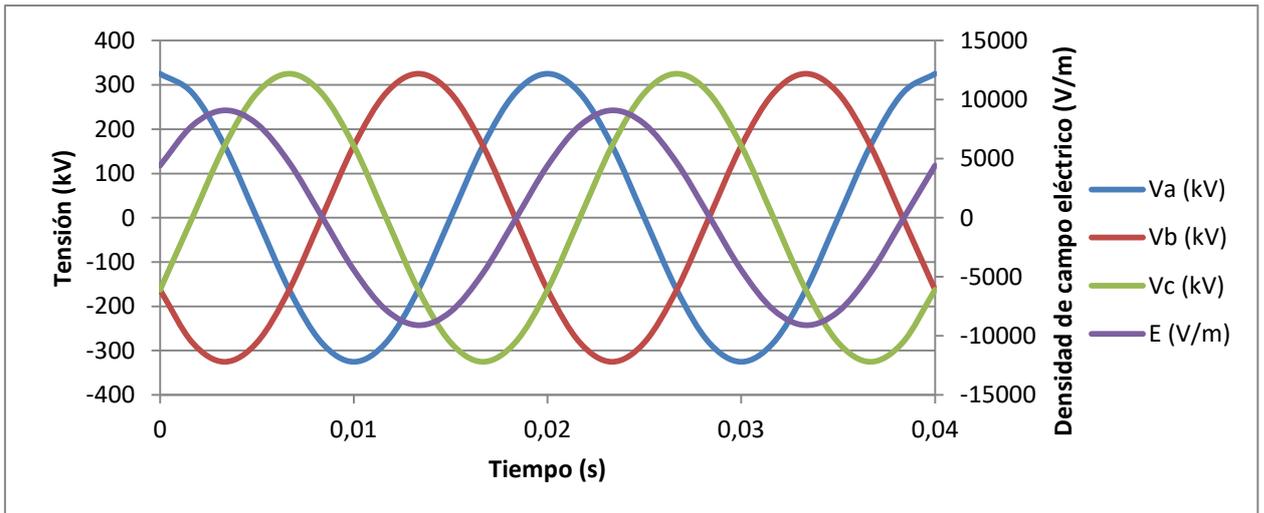


Figura 5.8. Campo eléctrico a la altura de la cabeza (1,8 m)

Para obtener el valor eficaz de campo usando los valores de la tabla 5.1, se utiliza la siguiente formula:

$$RMS_E = \sqrt{\frac{\sum_{t=0} E_t^2}{N}} \quad (1)$$

donde N es el número de valores de campo eléctrico obtenidos. El valor eficaz de campo eléctrico resultante es 6434,11 V/m.

Este valor de campo eléctrico se ajusta a los valores que se recogen en la bibliografía, que son del orden de los kV/m.

5.3. Campos Magnéticos

Los campos magnéticos de frecuencia baja inducen corrientes circulantes en el organismo. La intensidad de estas corrientes inducidas depende de la intensidad del campo magnético exterior y su frecuencia. El campo eléctrico inducido es el causante de la circulación de esas corrientes. Si este campo eléctrico inducido debido a la ley de Faraday es suficientemente intenso, las corrientes podrían estimular los nervios y músculos o afectar a otros procesos biológicos.

5.3.1. Punto de máxima exposición.

Para situar el cuerpo en el punto donde se vea más afectado por los campos, se realizará un estudio previo en el cual se contemplarán tres casos de distribución de carga, con el pico de corriente en cada una de las fases. El pico correspondiente a la corriente eficaz prevista de 512 A es igual a 724,07 A, y las otras dos fases tomarán el valor de -362,04 A, correspondiente al mismo instante de tiempo.

El valor del vector B se ha calculado a una altura de 180 cm del suelo y posteriormente se ha introducido en las tres gráficas siguientes.

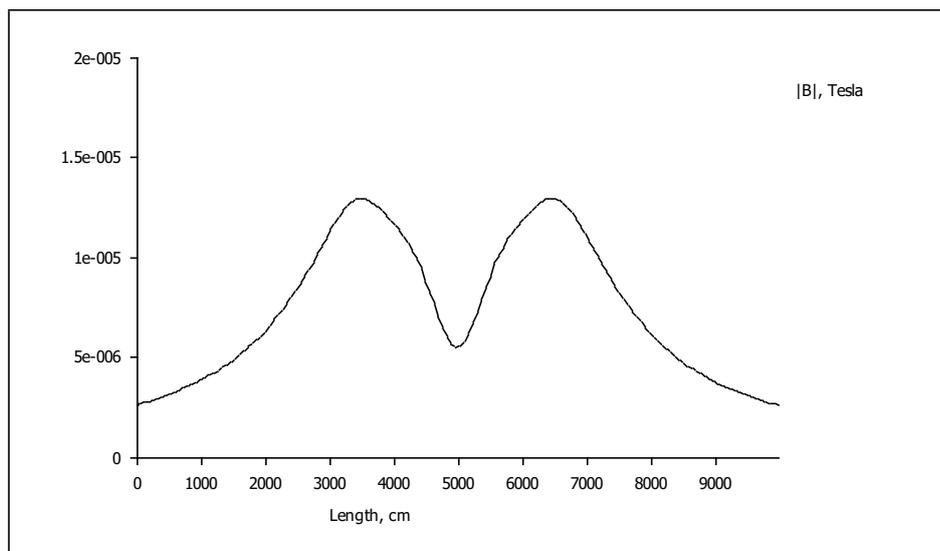


Figura 5.9. Gráfica del campo magnético. Valor instantáneo máximo en los conductores de la fase a-a'

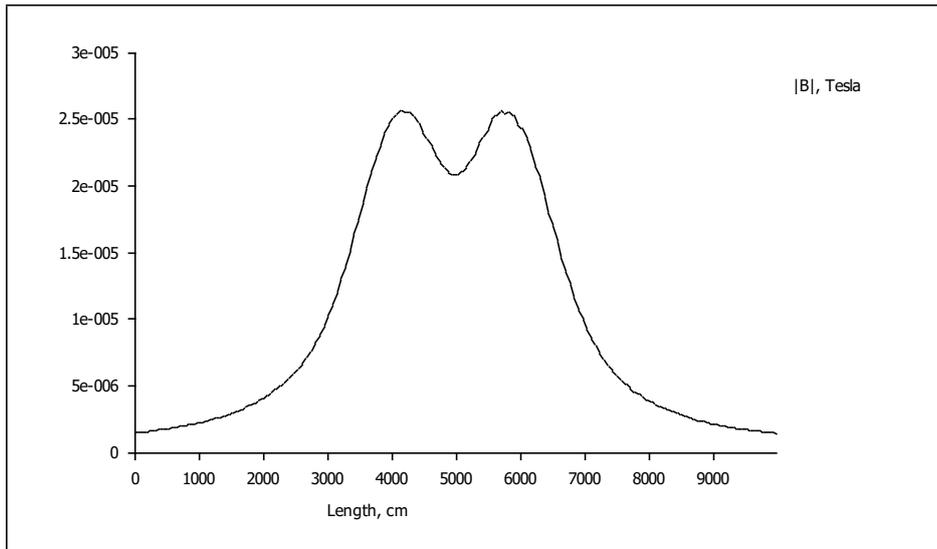


Figura 5.10. Gráfica del campo magnético. Valor instantáneo máximo en los conductores de la fase b-b'

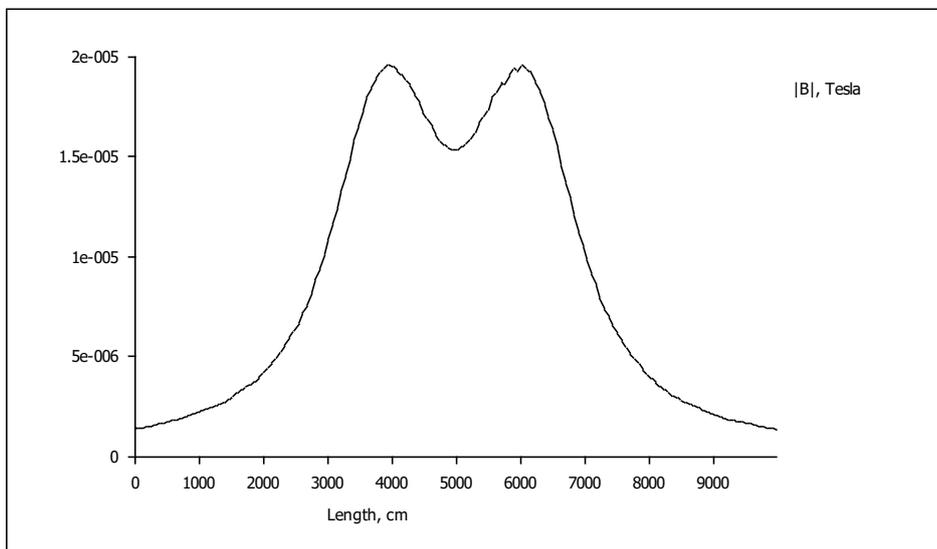


Figura 5.11. Gráfica del campo magnético. Valor instantáneo máximo en los conductores de la fase c-c'

Si se observa la gráfica de la figura 5.10, se puede apreciar que el punto de máxima exposición se sitúa a aproximadamente a 10 m del centro de la línea, con un valor máximo de 25 μ T. Puede que este valor se llegue a superar pero da una idea aproximada del punto que se debe escoger para el estudio.

5.3.2. Análisis de valores del campo magnético

Una vez situado la persona a 10 m del centro de la línea, se procede a completar la simulación con el resto de parámetros. Según Biomedical Physics & Engineering Express [8] y la Escuela de Formación Básica FCEIA [9], la conductividad de los tejidos del cuerpo humano es de aproximadamente 0,2 S/m y la permeabilidad magnética de los tejidos es prácticamente la misma que la del vacío.

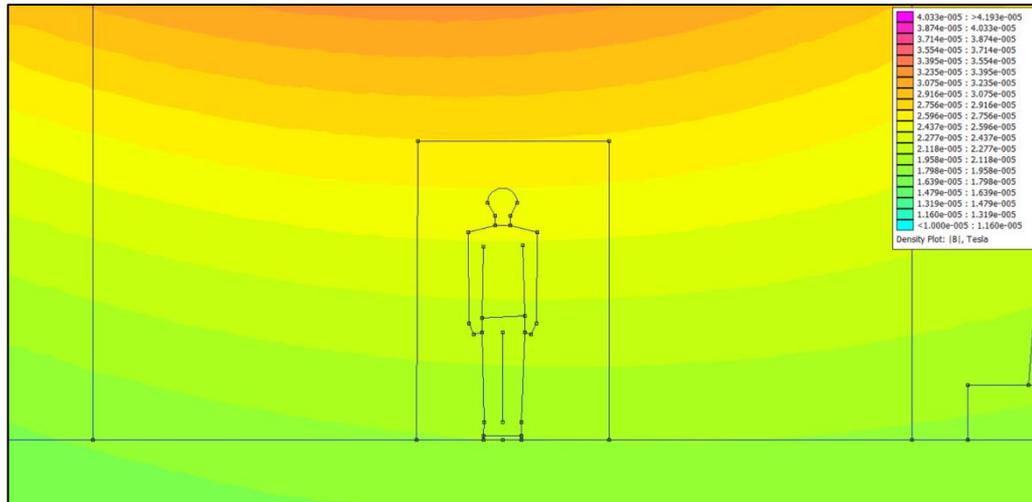


Figura 5.12. Distribución campo alrededor del cuerpo.

Para la obtención de un valor de campo magnético que sea más real, se ha realizado una serie de cambiar repitiendo lo corregido anteriormente a la altura de la cabeza del sujeto, a 1,8 m del suelo, dándole a las fases 12 valores instantáneos de corriente a lo largo de un ciclo. Se ha tomado como instante 0 aquel en el que el pico de corriente pertenece a la pareja de cables b-b' (724,07 A). Estos resultados se recogen en la tabla 5.2 y se han plasmado en la gráfica de la figura 5.13.

t(s)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	B (μ T)
0	724,077344	-362,038672	-362,038672	10,7958
0,00166667	627,069374	-627,069374	2,0513E-13	19,8494
0,00333333	362,038672	-724,077344	362,038672	25,5167
0,005	4,4355E-14	-627,069374	627,069374	25,1146
0,00666667	-362,038672	-362,038672	724,077344	18,8257
0,00833333	-627,069374	-1,3307E-13	627,069374	9,8142
0,01	-724,077344	362,038672	362,038672	-10,8016
0,01166667	-627,069374	627,069374	-2,772E-13	-19,8494
0,01333333	-362,038672	724,077344	-362,038672	-25,5165
0,015	-1,3307E-13	627,069374	-627,069374	-25,1272
0,01666667	362,038672	362,038672	-724,077344	-18,8022
0,01833333	627,069374	2,2178E-13	-627,069374	-9,8217
0,02	724,077344	-362,038672	-362,038672	10,7958

Tabla 5.2. Campo magnético a la altura de la cabeza (1,8 m).

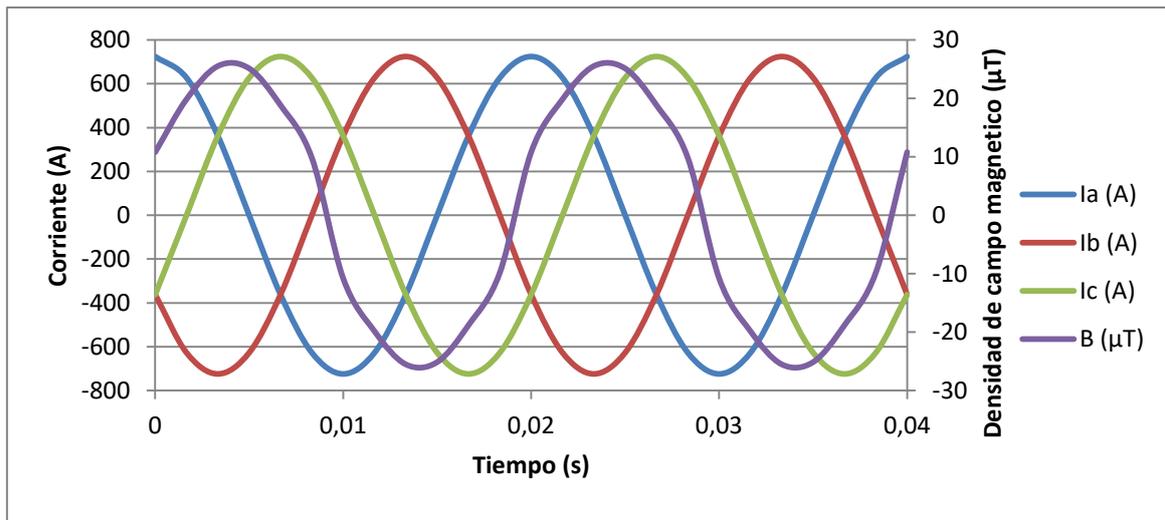


Figura 5.13. Gráfica del campo magnético en la cabeza.

Para obtener el valor eficaz de campo usando los valores de campo de la tabla 5.2, usaremos la siguiente formula:

$$RMS_B = \sqrt{\frac{\sum_{t=0} B_t^2}{N}} \quad (2)$$

donde N son el número valores calculados (12). El valor eficaz de del módulo del vector densidad de flujo magnético resultante es 19,335 μT .

Los resultados obtenidos para el módulo del campo magnético son del mismo orden que los encontrados en la bibliografía, del orden de las decenas de microTeslas, para estos valores de corriente.

Como ya he indicado anteriormente, en el caso de los campos magnéticos hay que tener más en cuenta las corrientes que se inducen en el interior del cuerpo, ya que están asociadas a campos eléctricos en el interior del cuerpo. El campo eléctrico inducido se calcula mediante la ley de Ohm:

$$|\vec{J}| = \sigma \cdot |\vec{E}| \quad (3)$$

donde σ es la conductividad de los tejidos (0,2 S/m), J es el módulo de la densidad de corriente inducida (A/m²) y E es el módulo del campo magnético inducido (V/m)

Los valores de corriente inducida y campo eléctrico interno se recogen en la tabla 5.3.

t(s)	Modulo (A/m²)	E inducido (mV/m)
0	6,22E-03	31,1
0,00166667	7,25E-04	3,63
0,00333333	6,24E-03	31,2
0,005	5,88E-04	2,94
0,00666667	6,20E-03	31
0,00833333	1,49E-04	0,747
0,01	6,22E-03	31,1
0,01166667	7,25E-04	3,63
0,01333333	6,25E-03	31,2
0,015	5,94E-04	2,97
0,01666667	6,20E-03	31
0,01833333	1,51E-04	0,755
0,02	6,22E-03	31,1

Tabla 5.3. Campo inducido en el interior de la cabeza.

El valor eficaz del campo eléctrico interno inducido por la variación temporal del campo magnético, procedente de las corrientes eléctricas circulando por los cables de la línea, es igual a 22,086 mV/m.

5.4. Estudio de los efectos biológicos campos obtenidos

5.4.1. Campos Eléctricos

Lo campos eléctricos obtenidos en el caso de la línea Andorra-Aragón expuestos en la gráfica de la figura 5.8, tienen un pico de 9098,71 V/m y un valor eficaz de 6434,11 V/m. Ahora debemos observar si estos valores están dentro de los límites recomendados de la ICNIRP, los cuales pueden verse en la gráfica de la figura 5.14, que son del orden de 10 kV/m para casos de trabajadores y de 5 kV/m para el público en general.

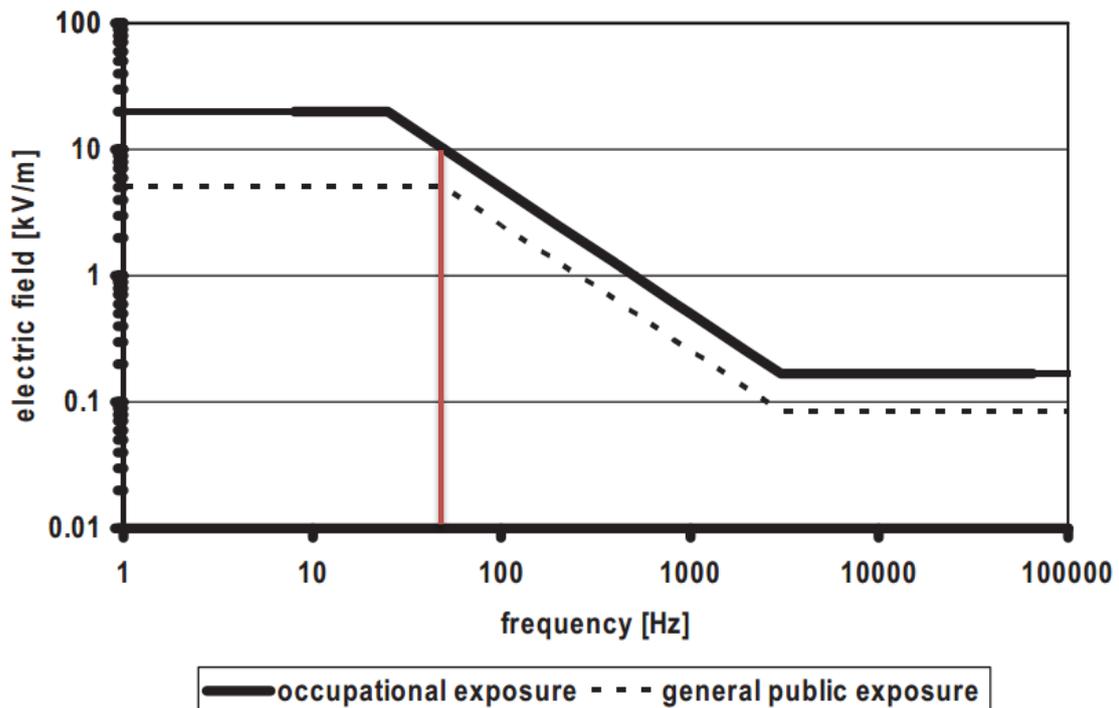


Figura 5.14. Gráfica de límites de exposición a campo eléctrico según la ICNIRP.

Los valores de campo no se superan para el caso de trabajadores, pero no es así en el caso del público en general. En el informe de la ICNIRP se habla de estudios a voluntarios en los cuales cuentan cómo el 10% de los voluntarios llegaron a tener una percepción molesta dentro de valores de 2 a 5 kV/m y el 5% desde 15 a 20 kV/m. Para nuestro caso solo serían aplicables los valores de campo si el sujeto fuera en moto o en bicicleta ya que un coche se comportaría como una jaula de Faraday y apantallaría el campo eléctrico.

5.4.2. Campos Magnéticos

Para el caso de los campos magnéticos, los valores límite que recomienda la ICNIRP son de 1000 μT para el caso de los trabajadores y de 200 μT para el público en general, muy lejos de los valores obtenidos en el modelo de la línea Andorra-Aragón, cuyo valor eficaz no llega a los valor 20 μT .

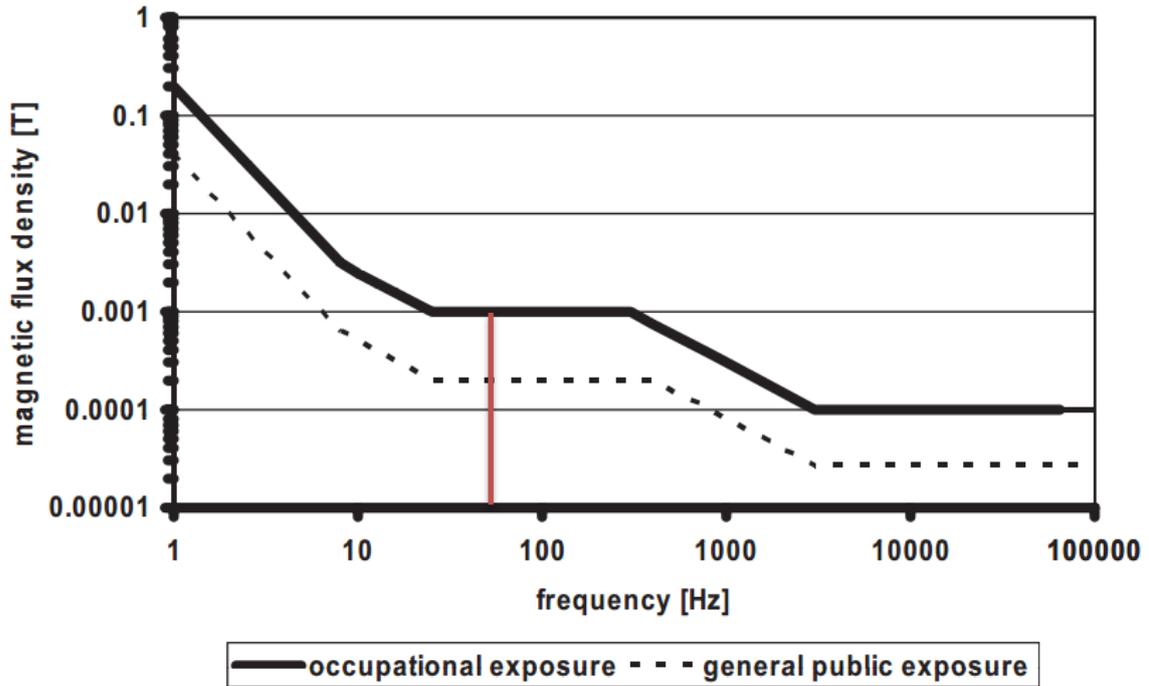


Figura 5.15. Gráficas de límites de exposición a campo magnético según la ICNIRP.

En todo caso, se debe tener en cuenta también el campo eléctrico inducido por este campo magnético exterior. La ICNIRP lo limita a un máximo de 50 mV/m a fin de evitar la inducción de fosfenos en la retina y evitar la aparición de una luz débil y parpadeante en la periferia del campo visual. En este caso en cuestión, como el valor eficaz de campo inducido del modelo es de 22,086 mV/m, no se supera dicho límite. Estas restricciones también deberían evitar los posibles efectos transitorios en la función cerebral. Estos efectos no se consideran efectos adversos para la salud, sin embargo, la ICNIRP reconoce que puede ser molesto en algunas circunstancias profesionales y deben evitarse.

6. CONCLUSIÓN

A lo largo de este documento se han descrito los resultados de simulaciones numéricas de modelos de líneas aéreas de alta tensión de diferentes tensiones nominales, geometrías de conductores y alturas de los apoyos.

Los valores obtenidos en estas simulaciones para el módulo de campo eléctrico E (V/m) y el módulo del campo magnético B (T) se han contrastado con los valores de mediciones reales obtenidos de la bibliografía, pudiendo así verificar la validez de esos modelos resueltos mediante el método de elementos finitos usando el programa en dos dimensiones FEMM.

La simulación realizada con el modelo de la línea de estudio de 400 kV me ha permitido obtener una serie de resultados para el campo eléctrico y el campo magnético que he comparado con los publicados por la ICNIRP. De dicha comparación he podido concluir que los valores de campos procedentes de la línea están dentro de los límites recomendados y no presentan un peligro para la salud.

Los resultados de este trabajo pueden ser utilizados en el futuro como parte de sesiones prácticas en la asignatura de Líneas Eléctricas del Grado de Ingeniería Eléctrica, y avalan al programa FEMM como herramienta docente para realizar estudios de campos electromagnéticos en dicha asignatura.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields 1 Hz - 100 kHz). (2010)
2. User's manual Finite elements method magnetic, dmeeker@ieee.org, D. Meeker, (2010).
3. R. Moreno, J.A. Güemes e I. Pico, "Análisis del campo magnético en una línea eléctrica de AT", E.U.I.T.I. Universidad del País Vasco. (2005)
4. Carlos Garrido, Antonio F. Otero y Jose Cidras, titulado "Low-Frequency Magnetic Fields From Electrical Appliances and Power Lines", IEEE Trans. Power Delivery. (2003)
5. EMFs.info Electric and magnetic fields and health. (2016)
6. Web de Red Eléctrica Española, "<http://www.ree.es/es/actividades/gestor-de-la-red-y-transportista/mapas-de-la-red>".
7. Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión. Última actualización a 26 de agosto de 2010
8. Biomedical Physics & Engineering Express (2015)
9. Reinaldo Welti "La interacción de campos electromagnéticos de extremadamente baja frecuencia con sistemas biológicos", Escuela de Formación Básica FCEIA. (1999)