



Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Trabajo de Fin de Grado

Estudio de la Contaminación

**Electromagnética producida por Líneas de
Alta Tensión y su relación con los parámetros
que definen la línea**

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: Luis Efrén Sosa Morales

Tutor: Juan Carlos Guerra García

Cotutora: Silvia Alonso Pérez

Fecha: Julio de 2023

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, me han apoyado en la realización del grado. Su apoyo ha sido fundamental en este proceso y me ha brindado la motivación y la confianza necesarias para alcanzar este logro académico, que se representa en este trabajo fin de grado.

A mi familia, por ser mi pilar y brindarme un apoyo constante a lo largo de este camino. Gracias por estar siempre presentes, por alentarme en los momentos difíciles y por compartir mi alegría en los logros alcanzados. Vuestra presencia ha sido fundamental para mi desarrollo y éxito

A mis compañeros y amigos, por su colaboración, ánimo y por compartir conmigo grandes momentos durante esta etapa.

A los profesores y profesoras de la Universidad de La Laguna, por su dedicación, conocimientos y orientación, que han enriquecido mi formación académica a lo largo de todo el grado.

A mis tutores, Juan Carlos y Silvia, por su orientación, paciencia y apoyo durante todo el estudio y desarrollo de este trabajo fin de grado. Su experiencia y compromiso han sido importante, guiándome en cada paso y facilitándome del material necesarias para alcanzar mis metas

A todas las personas que han contribuido de alguna manera a mi crecimiento personal y académico, a través de sus palabras de aliento, consejos y críticas constructivas. Mi más sincero agradecimiento por ser parte de este importante logro.

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1. CONTAMINACIÓN ELECTROMAGNÉTICA. PROBLEMÁTICA ACTUAL	9
2. OBJETIVOS	10
2.1. OBJETIVOS GENERALES	10
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. MARCO TEÓRICO	11
3.1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA	11
3.2. CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	14
3.3. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	17
3.4. CAMPO CERCANO Y CAMPO LEJANO	19
3.5. TECNOLOGÍAS GENERADORAS DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS.....	20
3.6. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	22
3.6.1. LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN (LAT).....	24
3.6.2. ZONA DE SERVIDUMBRE DE LAT	28
3.7. CAMPOS EM Y SALUD	30
3.8. NORMATIVA	32
3.8.1. CONCEPTOS GENERALES DE APLICACIÓN EN LA NORMATIVA	32
3.8.2. NORMATIVA INTERNACIONAL.....	34
3.8.3. NORMATIVA NACIONAL.....	35
4. MARCO METODOLÓGICO	36
4.1. CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS GENERADO POR LAS LAT	36
4.1.1. ECUACIONES ANALÍTICAS EN CONFIGURACIONES SIMPLES	36
4.1.2. MÉTODO DE SIMULACIÓN DE CARGAS	37
4.1.3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	39
4.1.4. MÉTODO DE LA LEY DE BIOT-SAVART EN CONDUCTORES TRIFÁSICOS (CRMAG+)	41
4.1.5. ECUACIONES APROXIMADAS	41
4.2. INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE MITIGACIÓN.....	44
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
5.1. RESULTADOS CON ECUACIONES APROXIMADAS.....	46
5.1.1. CONFIGURACIÓN EN DELTA	46
5.1.2. CONFIGURACIÓN HORIZONTAL	49
5.1.3. CONFIGURACIONES DE DOBLE CIRCUITO (BAJA REACTANCIA Y SUPER BUNDLE).....	52
5.2. SIMULACIÓN CON CRMAG+	54
6. CONCLUSIONES / CONCLUSIONS	58
6.1. CONCLUSIONES.....	58
6.2. CONCLUSIONS	59
7. BIBLIOGRAFÍA	61
ANEXOS	65
ANEXO I: TABLAS DE PROPIEDADES DE CONDUCTORES DE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN ..	66
ANEXO II: TABLAS DE RESULTADOS.....	71
ANEXO III: SIMULACIÓN CON CRMAG+	90
ANEXO IV: SIMULACIÓN CON FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS.....	100

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. EVOLUCIÓN DE LA EXPOSICIÓN DIARIA MÁXIMA TÍPICA A LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y NIVELES MÁXIMOS PERMITIDOS SEGÚN LAS NORMAS DE LA INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP DE SUS SIGLAS EN INGLÉS).	9
FIGURA 2. RED ELÉCTRICA EN DC CREADAS POR EDISON, OBTENIDA DE VIRTUAL NEW YORK CITY.....	13
FIGURA 3. LÍNEAS Y SUPERFICIES DE CAMPO ELÉCTRICO GENERADAS POR UNA CARGA POSITIVA (IZQUIERDA) Y UNA CARGA NEGATIVA (DERECHA).	14
FIGURA 4. LÍNEAS Y SUPERFICIES DE CAMPO MAGNÉTICO GENERADAS POR UN IMÁN (IZQUIERDA) Y POR UN CONDUCTOR POR EL QUE PASA UNA CORRIENTE (DERECHA).	14
FIGURA 5. FORMA EN LA QUE SE OSCILAN LOS CAMPOS E Y B CON LA DIRECCIÓN DE PROPAGACIÓN, OBTENIDA DEL LIBRO UNIVERSITY PHYSICS VOL. 2 [10].	15
FIGURA 6. PARÁMETROS DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA.	16
FIGURA 7. REGIONES DE CAMPO DE UNA FUENTE GENERADORA DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS.	19
FIGURA 8. A) MAPA DE LA COMPLEJA RED ELÉCTRICA EUROPEA CON TENSIONES ENTRE 150 kV Y 750 kV [12]. B) ESQUEMA DE LA RED ELÉCTRICA CON LAS DISTINTAS ACTIVIDADES PRESENTES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL, OBTENIDA DEL EOI [13].....	22
FIGURA 9. MAPA DE LA RED ELÉCTRICA DE TENERIFE CON SUS SINGULARIDADES PROPIAS, MODIFICADA DE REE.	24
FIGURA 10. ELEMENTOS PRINCIPALES DE UNA TORRE DE TRANSMISIÓN, REPRESENTADA EN UNA LAT DE DOBLE CIRCUITO.	25
FIGURA 11. TORRES DE DISTRIBUCIÓN EN DISTINTAS UBICACIONES DE TENERIFE CON LAS CONFIGURACIONES DE CIRCUITOS SIMPLES, DE IZQUIERDA A DERECHA, CONFIGURACIÓN EN BANDERA, DELTA Y HORIZONTAL.	26
FIGURA 12. DISTINTAS CONFIGURACIONES DE DOBLE CIRCUITO UTILIZADAS EN LA RED DE TRANSPORTE. LOS COLORES INDICAN LAS FASES.	27
FIGURA 13. REPRESENTACIÓN LATERAL DE UNA TORRE PARA MOSTRAR EL VANO Y LA FLECHA.	27
FIGURA 14. REPRESENTACIÓN DE LA ZONA DE SERVIDUMBRE ALREDEDOR DE LA LAT.	28
FIGURA 15. LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO PARA UN CONDUCTOR SUSPENDIDO UNA ALTURA H SOBRE TIERRA.	37
FIGURA 16. A) MODELO DE CONDUCTOR SIMPLE PARA CALCULAR LA INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO EN EL PLANO YZ [33]. B) MODELO DE CONDUCTOR SIMPLE PARA CALCULAR LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO EN EL PLANO YZ [33].	38
FIGURA 17. EJEMPLO DEL MALLADO QUE REALIZA EL PROGRAMA FEMM ANTES DE SIMULAR PARA CADA UNA DE LAS CONFIGURACIONES CREANDO PEQUEÑOS TRIÁNGULOS.	39
FIGURA 18. FLUJO DEL CAMPO MAGNÉTICO B PARA LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES.	40
FIGURA 19. DIFERENCIAS EN LA DISPOSICIÓN DE LAS FASES PARA CADA CONFIGURACIÓN DE DOBLE CIRCUITO.	44

FIGURA 20. FLUJO DEL CAMPO MAGNÉTICO CON DISTINTA SEPARACIÓN ENTRE CONDUCTORES UTILIZANDO EL SOFTWARE FEMM.	45
FIGURA 21. VARIACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO CON LA ALTURA RESPECTO AL SUELO Y AL CONDUCTOR, MODIFICADO DE EMFs.INFO [41].	45
FIGURA 22. REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA DE LA CONFIGURACIÓN DELTA.	46
FIGURA 23. CAMPO MAGNÉTICO CON LAS DOS ECUACIONES APROXIMADAS EN EL CONDUCTOR 147-AL1/34-ST1A (45 kV) PARA LA CONFIGURACIÓN DELTA.	47
FIGURA 24. FLUJO DEL CAMPO MAGNÉTICO PARA LA CONFIGURACIÓN DELTA ELABORADO CON FEMM EN EL CONDUCTOR 147-AL1/34-ST1A A UNA ALTURA DE 8 METROS Y CON DISTANCIA ENTRE FASES DE 1,5 METROS.	47
FIGURA 25. VALORES DEL CAMPO MAGNÉTICO PARA LA CONFIGURACIÓN DELTA CON DISTINTAS ALTURAS Y DISTANCIAS ENTRE FASES EN EL CONDUCTOR 147-AL1/34-ST1A (45 kV).	48
FIGURA 26. VALORES DE LA DIFERENCIA DEL CAMPO MAGNÉTICO EN $x=0$ M Y $x=10$ M RESPECTO A LA ALTURA DE LA LÍNEA Y PARA LA CONFIGURACIÓN DELTA CON EL CONDUCTOR 147-AL1/34-ST1A (45 kV).	49
FIGURA 27. REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA DE LA CONFIGURACIÓN HORIZONTAL.	49
FIGURA 28. CAMPO MAGNÉTICO CON LAS DOS ECUACIONES APROXIMADAS EN EL CONDUCTOR 147-AL1/34-ST1A PARA LA CONFIGURACIÓN HORIZONTAL.	50
FIGURA 29. FLUJO DEL CAMPO MAGNÉTICO PARA LA CONFIGURACIÓN HORIZONTAL ELABORADO CON FEMM, EN EL CONDUCTOR 147-AL1/34-ST1A A UNA ALTURA DE 8 METROS Y CON DISTANCIA ENTRE FASES DE 1,5 METROS.	50
FIGURA 30. VALORES DEL CAMPO MAGNÉTICO PARA LA CONFIGURACIÓN HORIZONTAL CON DISTINTAS ALTURAS Y DISTANCIAS ENTRE FASES EN EL CONDUCTOR 147-AL1/34-ST1A (45 kV).	51
FIGURA 31. VALORES DE LA DIFERENCIA DEL CAMPO MAGNÉTICO EN $x=0$ M Y $x=10$ M RESPECTO A LA DISTANCIA ENTRE FASES Y PARA LA CONFIGURACIÓN HORIZONTAL CON EL CONDUCTOR 147-AL1/34-ST1A (45 kV).	51
FIGURA 32. REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA DE LA CONFIGURACIÓN DE DOBLE CIRCUITO SUPER-BUNDLE (IZQUIERDA) Y DE BAJA REACTANCIA (DERECHA).	52
FIGURA 33. CAMPO MAGNÉTICO CON LAS DOS ECUACIONES APROXIMADAS EN EL CONDUCTOR 806-AL1/56-ST1A PARA LA CONFIGURACIÓN SUPER-BUNDLE Y BAJA REACTANCIA.	52
FIGURA 34. CAMPO MAGNÉTICO DE LAS CONFIGURACIONES EN SUPER-BUNDLE (REPRESENTADOS EN COLORES AZULES) Y BAJA REACTANCIA (REPRESENTADO EN COLORES VERDES) PARA DISTINTOS ARMADOS Y ALTURAS, CON UN CONDUCTOR 806-AL1/56-ST1A (LA 860) 220 kV.	53
FIGURA 35. RECORRIDO DE LA LÍNEA AÉREA QUE UNE LA SUBESTACIÓN DE LAS CALETILLAS CON LA SUBESTACIÓN DEL ROSARIO	54
FIGURA 36. REPRESENTACIÓN 3D DEL VANO Y EL TERRENO DEL TRAMO 10.	55
FIGURA 37. A) CAMPO MAGNÉTICO EN EL VANO 10. B) CORTE EN EL EJE X EN EL PUNTO DONDE EL CAMPO MAGNÉTICO ES MÁXIMO PARA EL VANO 10.	56
FIGURA 38. SUPERFICIE DEL CAMPO MAGNÉTICO PARA EL VANO 10 CON LA CONFIGURACIÓN DE BAJA REACTANCIA.	57

LISTA DE TABLAS

TABLA I. ZONAS DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y SUS INTERVALOS DE FRECUENCIA.	18
TABLA II. BANDAS DE FRECUENCIAS PARA LAS TRES ZONAS (SUBRADIO, RADIOFRECUENCIAS Y MICROONDAS) NOMENCLATURA Y FRECUENCIAS DE LAS DISTINTAS BANDAS SEGÚN UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES.	18
TABLA III. DISTANCIAS MÍNIMAS PARA EL CAMPO LEJANO SEGÚN LA FRECUENCIA.....	20
TABLA IV. PRINCIPALES TECNOLOGÍAS GENERADORAS DE CEM EN LAS DIFERENTES ZONAS DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.	21
TABLA V. PRINCIPALES DISTANCIAS MÍNIMAS Y FÓRMULAS QUE SE RECOGE EN LA ITC-LAT-07 PARA GARANTIZAR SEGURIDAD FRENTE AL RIESGO DE DESCARGA ELÉCTRICA	29
TABLA VI. CLASIFICACIÓN DE LA ICNIRP DE LOS EFECTOS EN LA SALUD SEGÚN LA FRECUENCIA	30
TABLA VII. CLASIFICACIÓN DE LOS CARCINÓGENOS INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER	31
TABLA VIII. RESTRICCIONES BÁSICAS A CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS DE LA ICNIRP ...	34
TABLA IX: NIVELES DE REFERENCIAS PARA LA EXPOSICIÓN OCUPACIONAL DEL ICNIRP	35
TABLA X. NIVELES DE REFERENCIAS PARA LA EXPOSICIÓN AL PÚBLICO GENERAL DEL ICNIRP .	35
TABLA XI. ECUACIONES APROXIMADAS PARA EL CAMPO MAGNÉTICO QUE SE UTILIZARAN.	43
TABLA XII. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN CADA UNO DE LOS VANOS CON CRMAG+.	55

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS

CEM: Campo Electromagnético

OEM: Onda Electromagnética

CE: Campo Eléctrico

CM: Campo Mecánico

ELF: Extremely Low Frequency

LAT: Líneas de Alta Tensión

TFG: Trabajo Fin de Grado

IARC: International Agency for Research on Cancer

APCE: Asamblea Parlamentaria del Consejo de Europa

NIEHS: National Institute of Environmental Health Sciences

ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

DC: Corriente Continua

AC: Corriente Alterna

EM: Electromagnética

EEM: Espectro Electromagnético

REE: Red Eléctrica de España

Resumen

La contaminación electromagnética producida por los sistemas de generación y transporte de energía eléctrica es un tema de gran preocupación debido a sus posibles efectos sobre la salud y el medio ambiente, como sugieren algunos estudios actuales. La energía eléctrica es llevada desde las centrales de producción hasta el consumidor a través de redes de transporte de diferentes voltajes y a frecuencias industriales (50 o 60 Hz, dependiendo del país). Dentro de estas redes son de especial importancia las líneas de alta tensión (LAT) porque generan campos eléctricos y magnéticos relativamente intensos en las cercanías de las mismas. A frecuencias industriales la componente del campo eléctrico y magnético se encuentran desacopladas, debiendo estudiarse ambos campos por separado al no comportarse como una onda electromagnética radiada. El estudio analítico de estos campos es complejo y sólo es posible llevarlo a cabo en ciertas configuraciones simples o ideales. En los casos reales este estudio se realiza mediante diferentes metodologías que hacen uso de técnicas computacionales (método de elementos finitos, método de simulación de cargas, etc.) o mediante el uso de ecuaciones aproximadas. Tanto unas como otras han servido para el desarrollo de un campo de estudio denominado “Técnicas de Mitigación”, centrado en la optimización del diseño de las líneas de transmisión de alto voltaje con el fin de reducir el impacto negativo de los campos eléctricos y magnéticos, así como en la necesidad de verificar el cumplimiento de los valores máximos permitidos en la normativa. Algunas de estas técnicas de mitigación se centran en la modificación de los parámetros de la propia línea, tales como la altura de los conductores al suelo, la distancia entre fases, el tipo de configuración, etc.

En este trabajo se ha analizado la dependencia de los campos electromagnéticos generados por LAT en función de algunos de estos parámetros, para lo cual se han utilizado tanto ecuaciones aproximadas como modelos computacionales como el FEMM o el CRMag+. En base a los resultados obtenidos podemos concluir que los parámetros que definen la línea tienen una gran influencia sobre los CEM generados en sus proximidades, mostrando todos los casos reales analizados valores que están muy por debajo de los valores límite que se establecen en la normativa. No obstante, los campos electromagnéticos serán un tema de debate en el futuro ya que estudios recientes muestran distintos efectos en la salud.

Abstract

The electromagnetic pollution caused by electric power generation and transmission systems is a matter of great concern due to its potential effects on health and the environment, as suggested by some recent studies. Electric power is transported from power plants to consumers through transmission networks operating at different voltages and industrial frequencies (50 or 60 Hz, depending on the country). High-voltage power lines (HVPL) within these networks are particularly important as they generate relatively strong electric and magnetic fields in their vicinity. At industrial frequencies, the electric and magnetic field components are decoupled, requiring separate analysis as they do not behave like radiated electromagnetic waves. The analytical study of these fields is complex and can only be conducted under certain simple or ideal configurations. In real-world cases, this study is carried out using various methodologies that employ computational techniques (such as the finite element method, load simulation method, etc.) or approximate equations. Both approaches have contributed to the development of a field of study known as "Mitigation Techniques," which focuses on optimizing the design of high-voltage transmission lines to reduce the negative impact of electric and magnetic fields, as well as ensuring compliance with maximum permissible values specified by regulations.

Some of these mitigation techniques focus on modifying the parameters of the power line itself, such as the height of the conductors above the ground, the distance between phases, the configuration type, etc. In this study, the dependence of electromagnetic fields generated by HVPL on some of these parameters has been analyzed using both approximate equations and computational models such as FEMM or CRMag+. Based on the results obtained, we can conclude that the parameters defining the power line have a significant influence on the electromagnetic fields generated in their vicinity. All the analyzed real-world cases show values well below the limit values established by regulations. However, electromagnetic fields will continue to be a topic of debate in the future due to various recent studies indicating different health effects.

1. Contaminación electromagnética. Problemática actual.

Los campos electromagnéticos (CEM, o EMF en inglés) de origen natural existen desde la formación del planeta Tierra. Sin embargo, a partir de la “Revolución Industrial” (mediados del siglo XVIII) y con el desarrollo de nuevas tecnologías, el ser humano ha introducido en su entorno energía electromagnética que no se encuentra de forma natural. A estos campos se les conocen como campos electromagnéticos “exógenos” y son los que se asocian con la contaminación electromagnética.

El incremento de estos campos exógenos ha propiciado que los niveles de energía electromagnética aumenten sin parar por encima de los niveles naturales que se registran en el planeta. En la actualidad podemos encontrar CEM artificiales en todo el espectro electromagnético como puede verse en la figura 1 [1].

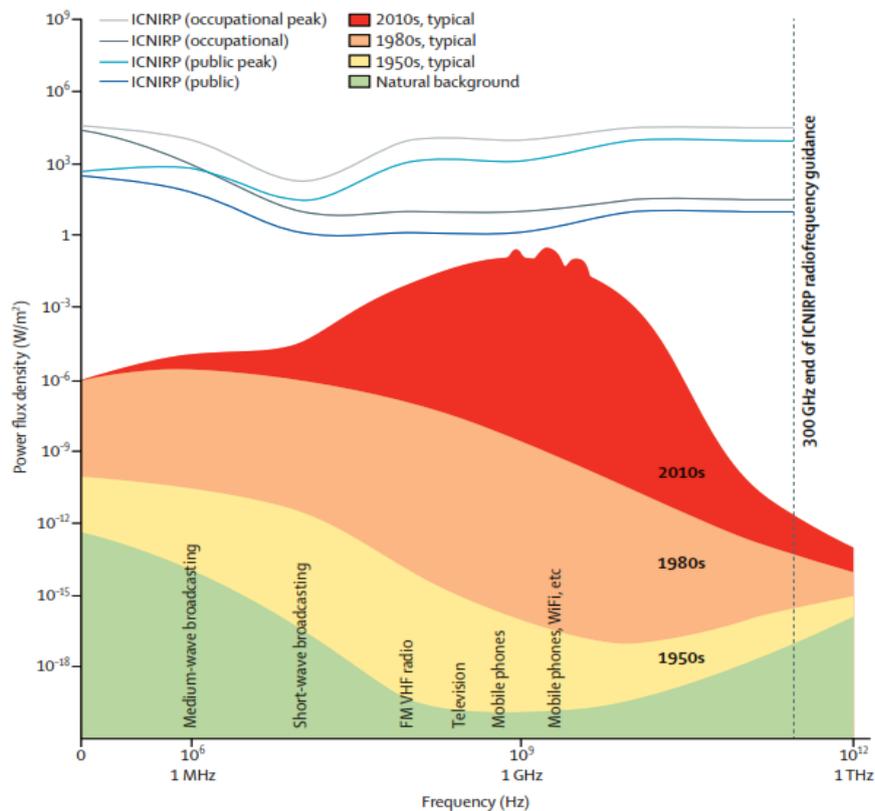


Figura 1. Evolución de la exposición diaria máxima típica a la radiación electromagnética y niveles máximos permitidos según las normas de la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP de sus siglas en inglés).

La zona del espectro electromagnético donde más se han incrementado los niveles de radiación electromagnética son las bandas de radiofrecuencia y microondas (3 KHz – 300 GHz), debido principalmente al desarrollo de las tecnologías relacionadas con las comunicaciones inalámbricas (especialmente la telefonía móvil), aunque a frecuencias inferiores los incrementos también son muy importantes. En la zona denominada subradio (hasta los 3 KHz) nos encontramos las frecuencias industriales, producidas principalmente por la generación y suministro de energía eléctrica, que serán el objeto de nuestro estudio.

Podemos observar en la figura 1 que, para la última década que analiza este estudio, 2010, el incremento de los niveles de radiación electromagnética roza en algunas zonas los límites que establece la normativa para la exposición a estos CEM (normativa que se analizará con cierto detalle en el apartado 3.5). Dado que han pasado 13 años y desde entonces han aparecidos nuevas tecnologías como relojes inteligentes, tecnología 5G, vehículos eléctricos, gafas de realidad virtual o electrodomésticos inteligentes, nos hace pensar que probablemente los niveles de radiación superan hoy en día a las limitaciones en muchos lugares del espectro. Por ello, es primordial establecer nuevas medidas de evaluación y limitación a la exposición a este tipo de contaminación. Pese a existir estudios que argumentan científicamente que la exposición prolongada a estos campos de poca energía puede provocar efectos negativos en la salud, la falta de estudios a largo plazo y el escaso conocimiento de la interacción de los campos con la materia viva, hace que hoy en día la contaminación electromagnética siga siendo un problema de debate.

2. Objetivos

2.1. Objetivos generales

Estudiar los campos electromagnéticos generados por líneas de alta tensión para diferentes configuraciones de línea desde la perspectiva que se persigue en las llamadas “técnicas de mitigación” y de la normativa específica para la protección de la salud humana.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre los efectos conocidos de los campos eléctricos y magnéticos sobre la materia viva y la normativa específica sobre valores máximos permitidos que se deriva de estos estudios.
- Estudiar diferentes topologías de LAT existentes en el sistema de transporte de energía eléctrica del estado español y específicamente en la Comunidad de Canarias.
- Analizar las ecuaciones analíticas y aproximadas que nos van a permitir calcular los campos \mathbf{E} y \mathbf{B} generados por cada una de las topologías descritas.
- Obtener los valores de los campos generados para las topologías de LAT usadas en Canarias en función de los parámetros de la línea, mediante el uso de ecuaciones aproximada y con el apoyo de otras técnicas computacionales.
- Analizar los resultados desde el punto de vista de la normativa.

3. Marco Teórico

En este apartado se desarrollarán brevemente algunos conceptos teóricos fundamentales relacionados con los campos electromagnéticos. Se analizarán algunas de las tecnologías que introducen energía EM en el medio, centrándonos en las relacionadas con el transporte de energía eléctrica. Y por último se presentarán los efectos conocidos de los campos EM sobre la salud a partir de los cuales se ha desarrollado la normativa vigente respecto de los valores máximos permitidos.

3.1. Breve Reseña Histórica

Normalmente se asocia a Tales de Mileto y a los antiguos griegos (siglo VII a.C.) el descubrimiento del electromagnetismo, conocedores en su época de los fenómenos magnéticos y eléctricos [2]. Sin embargo, no fue hasta el siglo XVII cuando se empezaron a realizar estudios más sistemáticos y de forma separada sobre estos dos fenómenos. El físico inglés William Gilbert publicó en 1600 un trabajo en el que describía sus observaciones y experimentos sobre imanes y magnetismo. En este trabajo consiguió demostrar que la Tierra actúa como un imán gigante [3]. Unos 70 años después, el físico alemán Otto von Guericke inventó la primera máquina electrostática que permitía generar cargas eléctricas mediante la fricción de diferentes materiales, atrayendo así pequeños

objetos metálicos [4]. Ya en el siglo XVIII, el científico inglés Stephen Gray, demostró que la electricidad se puede transmitir por un hilo metálico, lo que le permitió distinguir entre materiales aislantes y conductores. A mediados de este siglo, Benjamin Franklin propuso su teoría de la electricidad en la que defendía que esta se debía a la presencia de cargas positivas y negativas. Esta idea había sido propuesta años antes por el científico francés Charles François de Cisternay Du Fay, pero él consideraba las cargas como dos tipos de electricidad diferentes y no como un solo fluido eléctrico con dos estados de electrización [3]. Unos años más tarde otros científicos como Joseph Priestley, Charles de Coulomb o Carl Friedrich Gauss continuaron haciendo grandes avances, dejándonos distintas fórmulas y leyes que se utilizan hoy en día.

En 1820, el experimento del físico danés Hans Christian Oersted supuso uno de los sucesos más importantes en la historia de la electricidad. Oersted colocó una aguja magnética cerca de un conductor por el que circulaba una corriente eléctrica. Al realizar esto observó que la aguja magnética se desviaba de su posición original y se orientaba en una dirección perpendicular al conductor. Este fenómeno le hizo llegar a la conclusión de que los fenómenos eléctricos y magnéticos estaban relacionados. El descubrimiento de este suceso fue clave para futuros trabajos de científicos, como los de Michael Faraday con su ley de inducción o André-Marie Ampere con la conocida ley de Ampere. [3]. Sin embargo, el primero que consiguió demostrar cómo estaban relacionados estos dos fenómenos fue el matemático James Clerk Maxwell en su libro titulado *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. En este título, se recogen las ecuaciones que llevan su propio nombre donde demuestra que los campos eléctricos y magnéticos se propagan juntos a través del espacio a la velocidad de la luz [5].

A finales del siglo XIX, la generación de la energía eléctrica se realizaba mediante la quema de combustibles fósiles y se utilizaba principalmente para la iluminación eléctrica. Estas primeras centrales se instalaban cerca de las urbes, pero con el aumento de la población y de la demanda se tuvieron que desplazar a zonas alejadas de los centros de consumo. El primero que intentó transportar la electricidad a largas distancias fue Thomas Edison quien en la década de 1880 crearía su propia empresa y construiría una central eléctrica, con la cual enviaría energía mediante la corriente continua y a través de cables subterráneos a más

de 50 casas de Nueva York. Sin embargo, debido a las pérdidas en la transmisión por la naturaleza de la corriente continua (DC), Edison no pudo satisfacer la demanda. Unos años más tarde inauguró el primer sistema de transmisión eléctrica que empleaba cables aéreos (Fig. 2) [6].

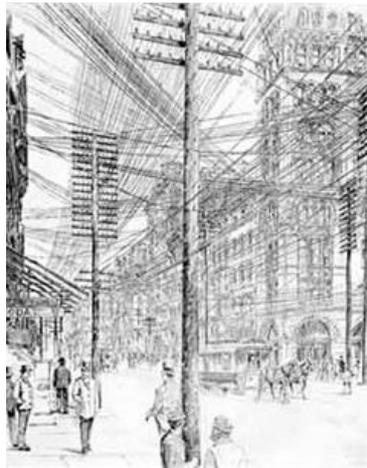


Figura 2. Red eléctrica en DC creadas por Edison, obtenida de Virtual New York City.

Nikola Tesla que había trabajado con Edison, desarrolló un sistema de generación, distribución y transmisión de energía eléctrica a partir de la corriente alterna (AC). Tesla descubriría que la corriente alterna tenía la capacidad de transmitirse a lo largo de grandes distancias con apenas pérdidas, a diferencia de la corriente continua, lo que la hacía mucho más eficiente. Si bien es cierto que Tesla tenía como objetivo la transmisión de la electricidad de forma inalámbrica a larga distancia, hoy en día su planteamiento sigue siendo objeto de estudio y experimentación en todo el planeta sin lograrse un sistema con esas características. Además, estableció las bases para considerar la corriente alterna como el estándar para la distribución de energía en todo el mundo [7].

En 1891 el estadounidense y empresario George Westinghouse creó su propia empresa para desarrollar y producir un sistema de generación y distribución de energía a gran escala. Para ello Westinghouse compró la patente de corriente alterna de Tesla y comenzó a construir centrales eléctricas y líneas de alta tensión por todo Estados Unidos [8].

3.2. Campo eléctrico y magnético. Ondas electromagnéticas

El término “campo” se asocia generalmente a aquella región del espacio donde una cierta magnitud toma un valor determinado para cada instante del tiempo y se representa con líneas y superficies de campo. El campo eléctrico \mathbf{E} se puede definir por tanto como aquella región del espacio donde existe una fuerza eléctrica y el campo magnético \mathbf{B} cuando la fuerza es magnética (Fig. 3 y 4) [9].

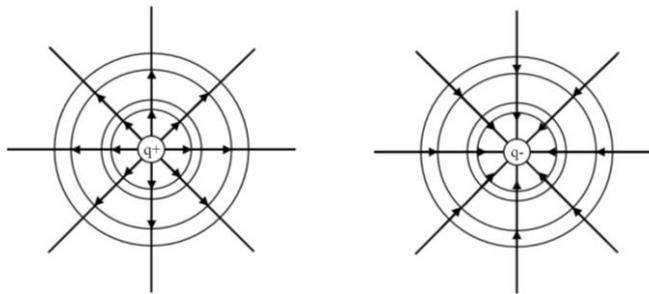


Figura 3. Líneas y superficies de campo eléctrico generadas por una carga positiva (izquierda) y una carga negativa (derecha).

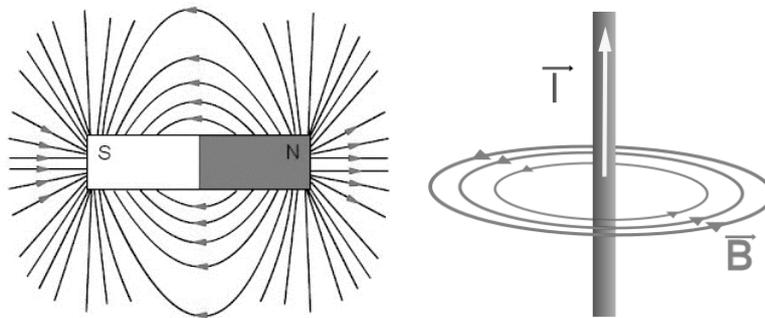


Figura 4. Líneas y superficies de campo magnético generadas por un imán (izquierda) y por un conductor por el que pasa una corriente (derecha).

Dependiendo de si el valor del campo es variable con el tiempo, o por el contrario constante, tendremos campos estáticos o variables. Los campos eléctricos estáticos se generan a partir de cargas que se encuentran en reposo sin la presencia de una corriente eléctrica, mientras que los campos magnéticos estáticos son los que se generan en presencia de corriente continua o por imanes permanentes.

Los CEM están asociados con los campos eléctricos y magnéticos variables, los cuales, a frecuencias altas, se pueden propagar como una onda, onda electromagnética OEM, que transporta energía y donde el campo eléctrico y el magnético son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación (Fig. 5) [10].

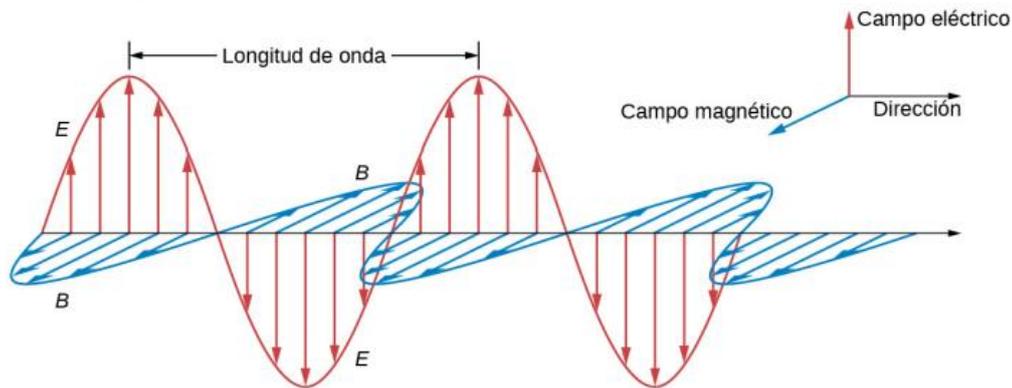


Figura 5. Forma en la que se oscilan los campos **E** y **B** con la dirección de propagación, obtenida del libro University Physics Vol. 2 [10].

Los principales parámetros que caracterizan a las OEM son: frecuencia y longitud de onda, amplitud, velocidad y energía transportada.

- Frecuencia y longitud de onda: la frecuencia de una OEM se mide en Hertz y hace referencia a la cantidad de ciclos que la onda puede completar en un segundo. Por otro lado, la longitud de onda es la distancia que hay entre puntos consecutivos que se encuentran en el mismo estado de oscilación. Para su representación se suele utilizar la letra griega λ y su unidad de medida son los metros. La frecuencia y la longitud de onda se relacionan con la ecuación 1.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde v es la velocidad en el medio (suele representarse con la letra c para referirnos a la velocidad de la luz en el vacío) y f es la frecuencia.

Además, a través de la relación de Planck–Einstein se puede asociar la frecuencia con la energía según la ecuación 2.

$$E = hf \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde E es la energía y $h \cong 6,626 \cdot 10^{-34} \frac{J}{s}$ es la constante de Planck.

De esta expresión se deduce que cuanto mayor es la frecuencia mayor será la energía de la onda.

- **Amplitud:** es el valor máximo que toma la oscilación de la onda y que mide la intensidad de los campos E y B . Esta magnitud varía dependiendo de la energía que se transmita a través de la onda, pero no tiene por qué tener una relación directa con la frecuencia o longitud de onda. La amplitud de E se mide en V/m y la de B en T (teslas).

En la figura 6 se pueden ver los distintos parámetros mencionados.

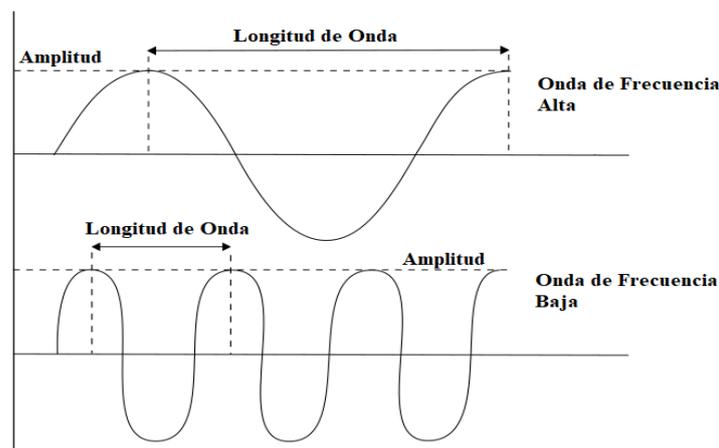


Figura 6. Parámetros de una onda electromagnética.

- **Velocidad:** las OEM pueden atravesar el espacio a la velocidad de la luz, la cual se podría aproximar a 300.000 km/s tal y como se ve en la ecuación 3.

$$v_0 = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

en donde ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío y μ_0 permeabilidad magnética en el vacío.

- **Energía transportada por una OEM:** la energía de este tipo de ondas depende de los campos eléctricos y magnéticos, pero a diferencia de otras ondas hay energía en una OEM tanto si es absorbida como si no lo es. Además, tienen la capacidad de transferir energía a

los objetos ubicados en su trayectoria. La energía transportada por una OEM viene dada por el vector de Poynting definida en la ecuación 4.

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde \mathbf{E} y \mathbf{B} son vectores del campo eléctrico y magnético respectivamente.

La intensidad de la OEM es el módulo del vector de Poynting (Ec.5) [10].

$$|S| = \frac{EB}{\mu_0} = \frac{E^2}{\mu_0 c} = \frac{cB^2}{\mu_0} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Además, las OEM a diferencia de otros tipos de ondas como podría ser el sonido, tienen la capacidad de propagarse sin la necesidad de un medio material, por lo que pueden propagarse en el vacío.

3.3. Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético (EEM) o espectro de frecuencias, abarca todo el rango posible de frecuencias de las ondas electromagnéticas. Este rango de frecuencias va desde los campos estáticos ($f=0$ Hz) hasta los exahercios (EHz) donde se encuentran por ejemplo los rayos gamma. El EEM se divide en dos regiones principales, diferenciadas por los efectos producidos por los CEM. Estas dos regiones son:

- Región de radiación no ionizante: abarca todas las bandas entre el subradio y la luz visible. Este tipo de radiación no tiene energía suficiente para ionizar átomos, es decir, arrancar electrones. Sin embargo, pueden generar calor en los tejidos provocando distintas respuestas fisiológicas.
- Región de radiación ionizante: engloba a la luz ultravioleta, rayos X y los rayos gamma. Son OEM de muy alta frecuencia, con la suficiente energía como para ser capaces de producir la ionización de un átomo y romper los enlaces atómicos que mantienen las moléculas unidas en las células, pudiendo producir efectos nocivos en los organismos.

Estas dos regiones suelen subdividirse en otras atendiendo a criterios como los usados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), Tabla I.

Tabla I. Zonas del espectro electromagnético y sus intervalos de frecuencia.

TIPO DE RADIACIÓN	ZONA DEL ESPECTRO	FRECUENCIAS
Radiación No Ionizante	Campos estáticos	0 Hz
	Subradio	0 Hz a 3 kHz
	Radiofrecuencias	3 kHz a 300 MHz
	Microondas	300 MHz a 300 GHz
	Infrarrojos	300 GHz a 400 THz
	Visible	400 THz a 790 THz
Radiación Ionizante	Ultravioleta	790 THz a 30 PHz
	Rayos X	30 PHz a 30 EHz
	Rayos gamma	Mayores a 30 EHz

De la Tabla I podemos seguir subdividiendo para las radiaciones no ionizantes, que son las que nos interesa en el estudio, obteniendo entonces las bandas de frecuencias de la Tabla II.

Tabla II. Bandas de Frecuencias para las tres zonas (Subradio, radiofrecuencias y microondas) Nomenclatura y frecuencias de las distintas bandas según Unión Internacional de Telecomunicaciones.

ZONA DEL ESPECTRO	BANDAS	FRECUENCIAS
Subradio	ELF	0 Hz a 3 kHz
Radiofrecuencias	VLF	3 kHz a 30 kHz
	LF	30 kHz a 300 kHz
	MF	300 kHz a 3 MHz
	HF	3 MHz a 30 MHz
	VHF	30 MHz a 300 MHz
Microondas	UHF	300 MHz a 3 GHz
	SHF	3 GHz a 30 GHz
	EHF	30 GHz a 300 GHz

En este TFG la banda que nos interesa es la de frecuencias extremadamente bajas (ELF de sus siglas en inglés) que es donde se encuentran las frecuencias industriales. Estas las veremos en mayor profundidad en el apartado 3.5 cuando hablemos de tecnologías generadoras de dichos campos.

3.4. Campo Cercano y Campo Lejano

Un concepto importante cuando se estudian los campos electromagnéticos antrópicos son los términos de “campo cercano” y de “campo lejano”. El comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos varía dependiendo de la distancia de la fuente generadora. En las proximidades a la fuente generadora, las componentes eléctricas (E) y magnética del campo (B) no están acopladas y en ciertas zonas del espacio puede existir una componente y no la otra. Es lo que conocemos como “**campo cercano**”. En este caso se debe medir E y B por separado y su relación mutua depende del tipo de fuente y la distancia entre el generador y el punto de observación. Por otro lado, lejos de la fuente generadora, nos encontramos bajo las condiciones de “**campo lejano**”, en donde los campos E y B se acoplan formando una onda electromagnética radiante que verifica las ecuaciones de Maxwell [11]. En la figura 7 se representa una analogía de los conceptos de campo cercano y lejano: cerca de la fuente generadora (EMI), los campos E y B están desacoplados (aproximación de campo cercano) y a medida que nos alejamos las componentes E y B se van acoplando (aproximación de campo lejano).

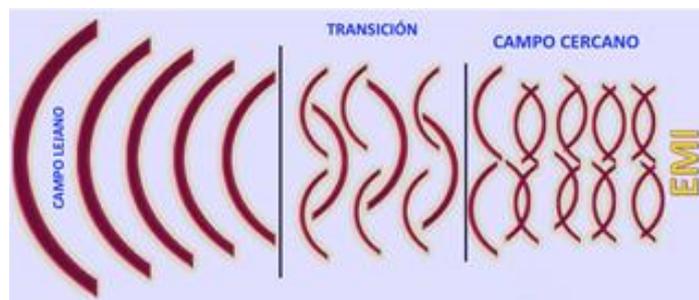


Figura 7. Regiones de campo de una fuente generadora de campos electromagnéticos.

La zona de separación entre campo cercano y lejano se establece en función de criterios que tienen que ver con la frecuencia de los campos, tal como se muestra en la Tabla III.

Tabla III. Distancias mínimas para el campo lejano según la frecuencia.

FRECUENCIA (Hz)	DISTANCIA MÍNIMA CAMPO LEJANO
50 Hz	18000 km
1 kHz	900 km
32 kHz	28,1 km
100 kHz	9 km
1 MHz	900 m
27,12 MHz	33,2 m
100 MHz	9 m
150 MHz	6 m
900 MHz	1 m
1 GHz	90 cm

Por tanto, podemos decir que los campos de frecuencias bajas no se acoplan formando una OEM, mientras que, los campos de frecuencias altas se comportan como una OEM radiada.

3.5. Tecnologías generadoras de campos eléctricos y magnéticos

En la actualidad encontramos una gran cantidad de tecnologías que generan campos eléctricos y magnéticos en todas las bandas de frecuencia. Todas estas tecnologías introducen energía electromagnética en el medio muy por encima de la presente de forma natural (Fig.1).

- Subradio ($0 \text{ Hz} < f < 3 \text{ kHz}$): los campos antrópicos generados en esta zona del espectro se deben en su gran mayoría a las tecnologías relacionadas con la generación y suministro de energía eléctrica, aunque también a otras como antenas de radiodifusión modulada o electrodomésticos. La frecuencia de los campos objeto de estudio en este TFG, frecuencias de 50 o 60 Hz, se sitúan en esta región. A estas frecuencias, que son las frecuencias de trabajo de los sistemas de producción y distribución de energía eléctrica que se usa para alimentar a la mayoría de los electrodomésticos, maquinarias y dispositivos electrónicos, se las denomina “frecuencias industriales”. La frecuencia de 50 Hz es la más utilizada en

Europa, África, Oceanía y Asia, mientras que la frecuencia de 60 Hz se utiliza mayormente en los países de América. La importancia de la electricidad ha llevado a que en el planeta sean pocos los lugares que se encuentran sin fuentes exógenas de frecuencias extremadamente bajas.

- Radiofrecuencia ($3\text{kHz} < f < 300\text{MHz}$): en esta banda la principal fuente generadora de CEM son las emisoras de radio y televisión, ya que las fuentes de esta banda se utilizan principalmente en la radiocomunicación a través de ondas hertzianas.
- Microondas ($300\text{MHz} < f < 300\text{GHz}$): Utilizada en la actualidad principalmente por las distintas tecnologías de telefonía móvil y que supone actualmente sin duda la fuente generadora de CEM más grande superando por mucho las presentes de forma natural en esta banda.

En la Tabla IV se presenta un resumen de las distintas tecnologías que generan campos en cada banda de frecuencia.

Tabla IV. Principales tecnologías generadoras de CEM en las diferentes zonas del espectro electromagnético.

ZONA DEL ESPECTRO		TECNOLOGÍAS
Campos Estáticos		Resonancia magnética.
Subradio	ELF	Sistema de generación, producción y transmisión de electricidad.
Radiofrecuencias	VLF	Antenas moduladas, monitores y sistemas antirrobo.
	LF	Pantallas y monitores, cocinas de inducción y comunicaciones marinas
	MF	Radioteléfonos marinos y radiodifusión AM.
	HF	Antenas de radioaficionados, aparatos quirúrgicos y sistemas antirrobo.
	VHF	Antenas de radiodifusión, antenas de televisión y sistemas antirrobo.
Microondas	UHF	Teléfonos móviles, bases de telefonía móvil, hornos de microondas y sistemas antirrobo, Wi-Fi.
	SHF	Antenas de satélite, radares, Wi-Fi.
	EHF	Antenas de radionavegación, radares y antenas de radiodifusión.
Infrarrojos		Lámparas, sistemas de visión nocturna, equipos de soldadura y sistemas de comunicación por infrarrojos.
Visible		Contaminación lumínica
Ultravioleta		Sistemas de purificación de aire y agua, láser UV y sistemas de esterilización
Rayos X		Sistemas de radiodiagnóstico
Rayos Gamma		Residuos Nucleares

3.6. Sistema de distribución de energía eléctrica

La electricidad es una fuente de energía fundamental para nuestra sociedad. Es suministrada a través de una compleja red eléctrica compuesta por diferentes etapas como la generación de la energía eléctrica, el transporte y la distribución (Fig. 8).

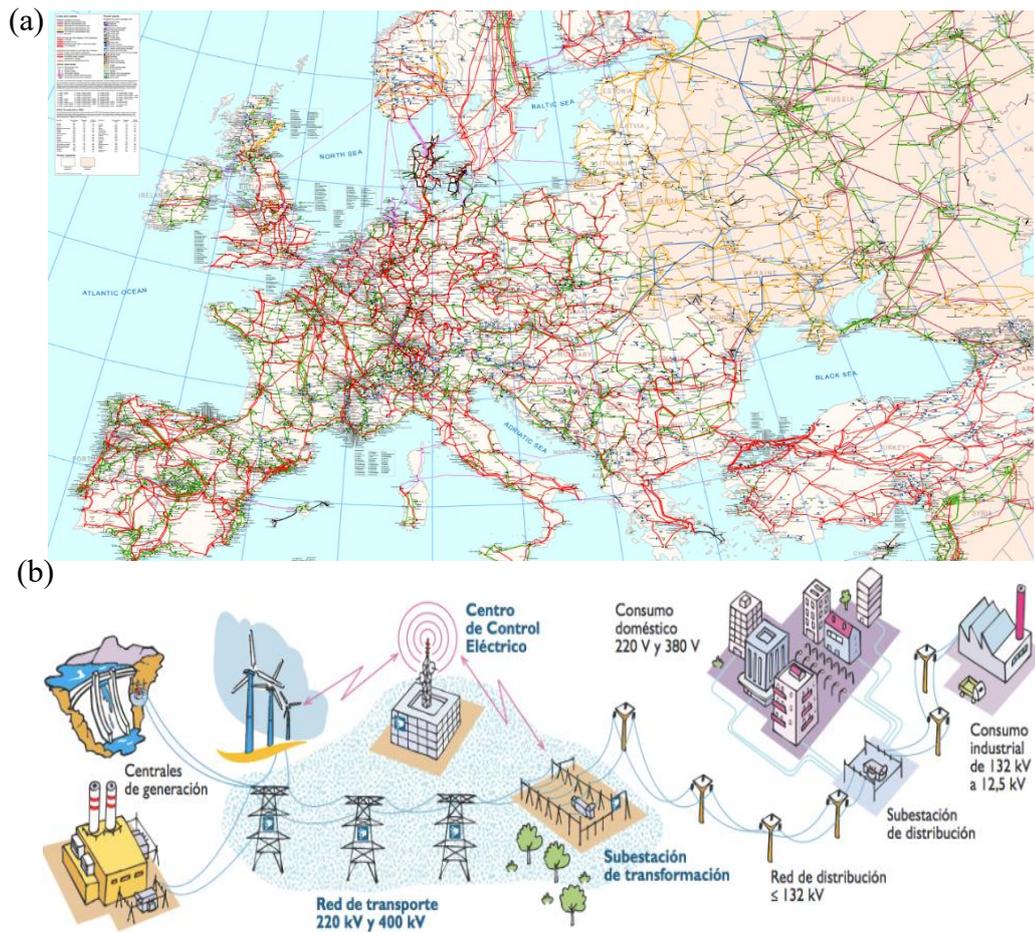


Figura 8. a) Mapa de la compleja red eléctrica europea con tensiones entre 150 kV y 750 kV [12]. b) Esquema de la red eléctrica con las distintas actividades presentes en el sistema eléctrico español, obtenida del EOI [13]

En el sistema eléctrico diferenciamos tres actividades principales (Fig. 8,b):

- Generación: incluye a las centrales eléctricas, parques fotovoltaicos, parques eólicos y cualquier central en la que se genere electricidad.

- Transporte: compuesto por las líneas aéreas y/o subterráneas de alta tensión (LAT) que transfieren la electricidad a las subestaciones (220 – 400 kV).
- Distribución: formado por las líneas aéreas y/o subterráneas de baja tensión, así como los centros de transformación.

El sistema eléctrico español está gestionado por Red Eléctrica de España (REE) y comenzó en la década de 1870 con la creación de las primeras centrales eléctricas para la electrificación industrial y años más tarde para el alumbrado público. Desde entonces el sistema español de transporte y distribución de energía eléctrica ha crecido extendiéndose por miles de kilómetros [14]. El Real Decreto 223/2008, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión indica que se diferencia la AT en cuatro categorías [15]:

- *Categoría Especial*: cuando la tensión nominal es igual o superior a 220 kV. Las tensiones normalizadas son entre 220 y 240 kV.
- *Primera Categoría*: cuando la tensión nominal es superior a 66 kV e inferior a 220 kV. Las tensiones normalizadas son 110, 130 y 150 kV.
- *Segunda Categoría*: la tensión nominal es superior 30 kV e inferior a 66 kV. Las tensiones normalizadas son 45 y 66 kV.
- *Tercera Categoría*: es la categoría que se denomina muchas veces como Media Tensión (MT), la tensión nominal es superior a 1 kV e inferior a 30 kV.

En Canarias la red eléctrica presenta algunas diferencias y peculiaridades respecto al territorio peninsular y europeo. Actualmente el sistema eléctrico canario cuenta con seis sistemas eléctricamente aislados, pequeños y débilmente mallados, por lo que es menos estable y seguro en caso de caída, avería u otro problema en la red [16]. Está formado por:

1. Líneas y subestaciones de tensión igual o superior a 66 kV y hasta los 220 kV.
2. Enlaces eléctricos entre islas.
3. Transformadores de 220/132/66 kV.

En el caso concreto de la isla de Tenerife cuenta con una red en anillo de 66 kV, una conexión subterránea con la Gomera y una línea de transporte de 220 kV entre Granadilla y Candelaria como se muestra en la Figura 9.

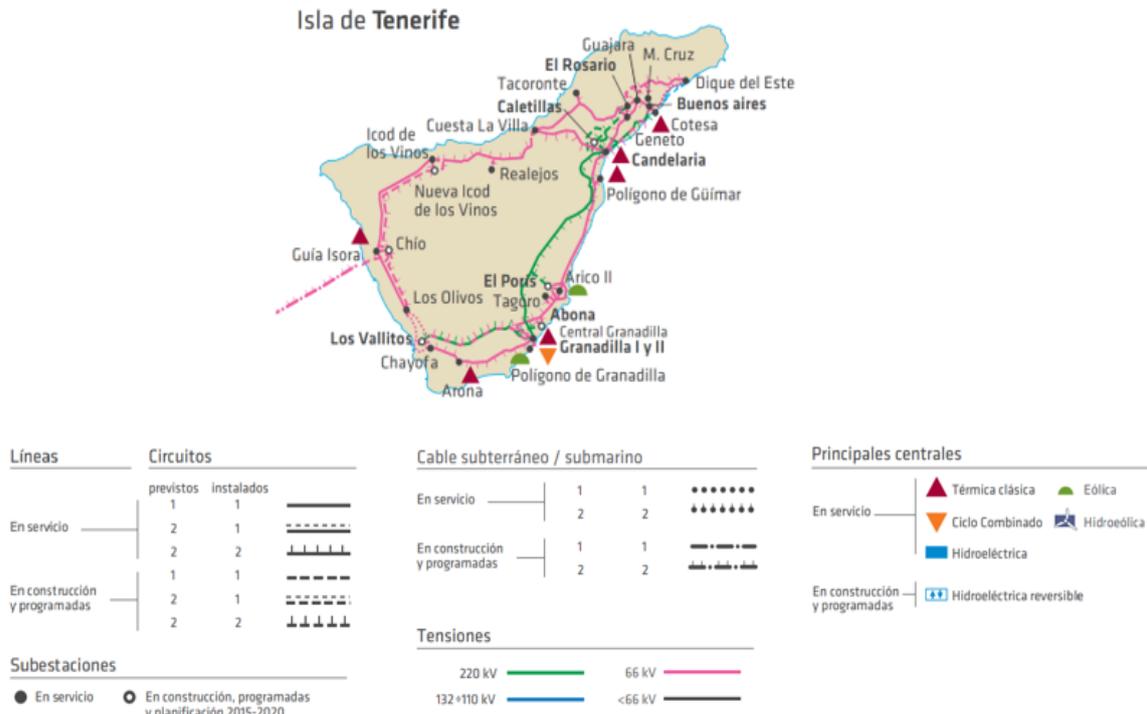


Figura 9. Mapa de la red eléctrica de Tenerife con sus singularidades propias, modificada de REE.

3.6.1. Líneas de Alta Tensión (LAT)

Uno de los elementos importantes del sistema de distribución y transporte de energía eléctrica desde el punto de vista medioambiental son las LAT por motivos diversos, tales como su influencia en el paisaje o por los intensos campos eléctricos y magnéticos que generan en sus cercanías. Para la distribución de la energía eléctrica se usa un sistema de tres cables (aislados entre sí y del suelo), denominado sistema trifásico, por el que circulan corrientes con intensidades y frecuencias iguales y que están desfasadas entre sí 120° . Este sistema está comprobado ser el más eficiente y económico para el transporte de energía eléctrica. Como elementos principales de una LAT nos encontramos con las torres o torretas, que son estructuras de gran altura con la función de servir de soporte de las líneas de transmisión de energía eléctrica. Los principales elementos que componen una torre son (Fig.10):

- Crucetas: encargada de unir la estructura principal (torre) con los conductores y aislantes.
- Aisladores: elementos de unión que aíslan los conductores de la torre impidiendo el paso de la corriente.
- Conductores: cables desnudos de cobre o de aluminio reforzados con acero que transportan la electricidad.
- Conductor de guarda: cable sin tensión que genera un equipotencial de tierra en toda la línea reduciendo la resistencia de tierra.

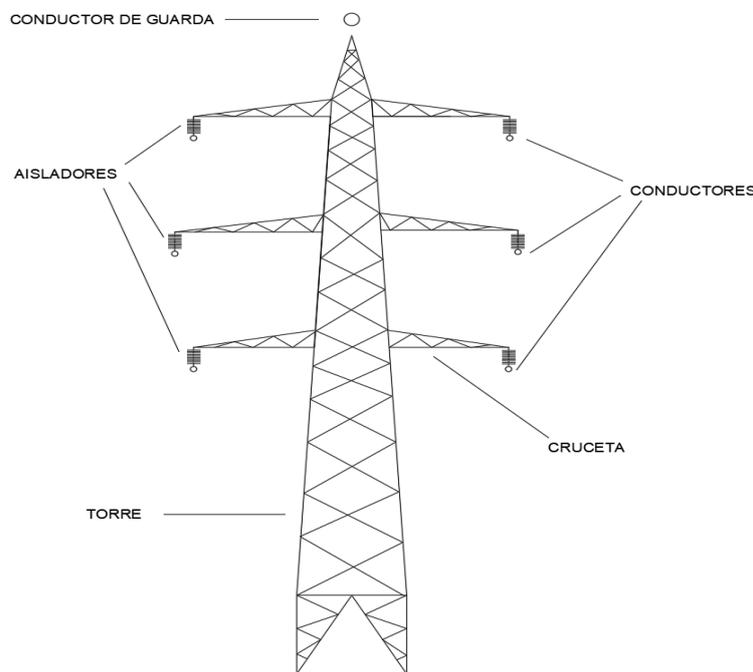


Figura 10. Elementos principales de una torre de transmisión, representada en una LAT de doble circuito.

Estas estructuras pueden ser de formas y dimensiones muy variadas y se pueden clasificar de distintas formas, atendiendo al ángulo de desplazamiento, es decir, el ángulo que forman los conductores de la línea de transmisión con respecto a la torre, según la fuerza aplicada por el conductor a los enlaces transversales o en función del número de circuitos. Este último criterio de clasificación será el elegido para llevar a cabo las simulaciones y cálculos que realizaremos en este trabajo.

Según el número de circuitos podemos distinguir:

- Torres de circuito sencillo.- Se caracterizan por tener solamente un circuito (tres cables) y presentar las estructuras más simples. Por lo general se suelen utilizar para la distribución de la electricidad con tensiones inferiores a 66 kV. También se pueden encontrar en líneas de transporte, aunque no es tan frecuente. Podemos encontrar distintas configuraciones en torres eléctricas de un único circuito, siendo las más comunes la configuración horizontal, la configuración delta o triángulo y la configuración en bandera (Fig. 11).



Figura 11. Torres de distribución en distintas ubicaciones de Tenerife con las configuraciones de circuitos simples, de izquierda a derecha, configuración en bandera, delta y horizontal.

Torre de doble circuito.- A diferencia de las torres de circuito sencillo, están diseñadas para transportar más de un circuito (Fig. 12). Son las estructuras más comunes que podemos encontrar en el transporte de la electricidad ya que aumentan la capacidad de transmisión de energía y mejoran la fiabilidad. Cada uno de los circuitos puede funcionar independientemente en caso de avería y su principal ventaja es que pueden duplicar la energía transportada sin la necesidad de construir dos líneas, ahorrando costes de construcción y mantenimiento. Las líneas de doble circuito pueden admitir además configuraciones diferentes en función de la disposición de las fases en los dos circuitos, como por ejemplo la configuración llamada “super-bundle” en la que las fases están distribuidas de igual forma en ambos circuitos, o la de llamada de “baja reactancia” en la que las fases no están igualmente distribuidas en los dos circuitos.

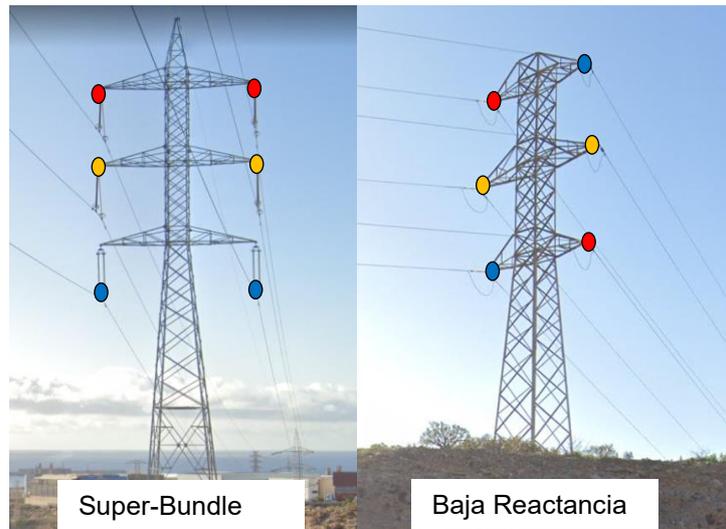


Figura 12. Distintas configuraciones de doble circuito utilizadas en la red de transporte. Los colores indican las fases.

Cuando se estudian los CEM producidos por líneas de transporte, hay que tener en cuenta que estos campos serán máximos en el punto más próximo al suelo del tendido. Por ello, suele ser de interés tener en consideración la curvatura que se forma en la línea de transmisión entre dos torres. Esta curvatura es debido a la acción combinada de la tensión eléctrica y del propio peso del cable teniendo forma de catenaria. En la catenaria aparecen dos conceptos, el vano y la flecha. Por un lado, definimos vano como la distancia que hay entre los dos puntos de amarres del conductor. Por otro lado, llamamos flecha a la distancia entre el punto más bajo de la curva y la línea recta que uniría los dos amarres tal y como vemos en la figura 13.

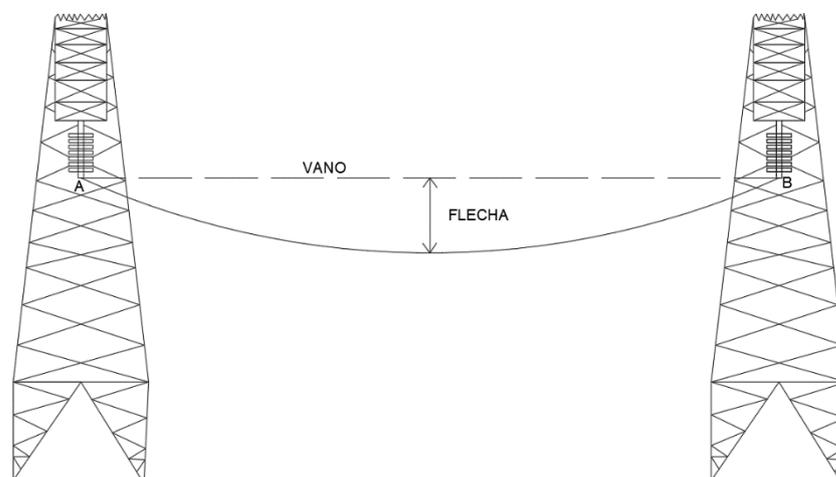


Figura 13. Representación lateral de una torre para mostrar el vano y la flecha.

3.6.2. Zona de servidumbre de LAT

Cuando se construyen líneas de alta tensión o un edificio en las proximidades de una LAT, existen unas regulaciones que indican las distancias mínimas que las líneas aéreas pueden estar de otras edificaciones. Este área o franja de seguridad se le conoce como zona de servidumbre (Fig. 14) y establece la zona a lo largo de la LAT donde queda prohibida la construcción de nuevos edificios y además limita las distintas actividades que se pueden hacer en esta zona.

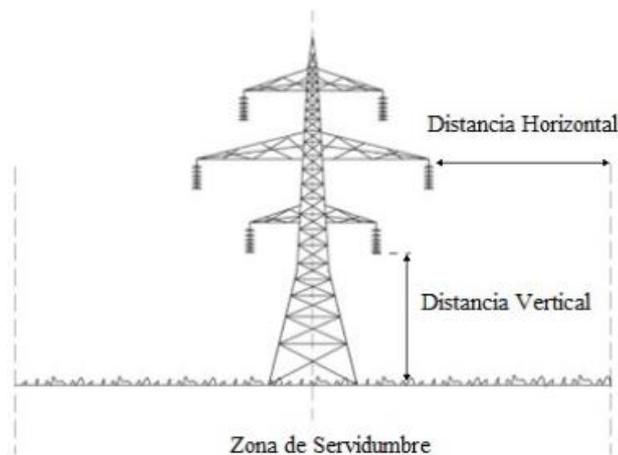


Figura 14. Representación de la zona de servidumbre alrededor de la LAT.

Esta distancia de seguridad que se deja en ambos de la línea dependerá principalmente de la tensión y viene recogido en el apartado 5 de la Instrucción Técnica Complementaria número 7 al Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión (ITC-LAT-07) [17]. A lo largo de los distintos subapartados del apartado 5 se establecen unas distancias mínimas para evitar descargas eléctricas que varían según distintas situaciones, en la Tabla V se muestra en forma de resumen algunas de las distancias mínimas que se recogen en la ITC-LAT-07.

Se puede hablar también de servidumbre de paso para líneas subterráneas, la cual comprende la ocupación del subsuelo para la instalación de cables conductores de alta tensión, a la profundidad y con las demás características que marque la legislación urbanística aplicable.

Tabla V. Principales distancias mínimas y fórmulas que se recoge en la ITC-LAT-07 para garantizar seguridad frente al riesgo de descarga eléctrica

Tipo de distancia	Fórmulas	Valores mínimos
Distancia vertical a terrenos, caminos, sendas y a cursos de agua no navegables	$D_{add} + D_{el} = 5,3 + D_{el}$	6 metros 7 metros en explotaciones ganaderas y agrícolas
Distancia vertical a otras líneas eléctricas aéreas o de telecomunicación	$D_{add} + D_{el} = 1,5 + D_{el}$	De 2 a 7 metros dependiendo de la tensión
Distancia horizontal a otras líneas eléctricas aéreas o de telecomunicación	-	1,5 veces la altura del apoyo más alto
Distancia vertical a carreteras	$D_{add} + D_{el}$	7 metros
Distancia horizontal a carreteras	-	(Recomendación NTP 73) Carretera vecinal 15 metros Carretera local 25 metros Carretera comarcal 25 metros Carretera nacional 25 metros Autopista 50 metros
Distancia vertical a tranvías	$D_{add} + D_{el} = 3,5 + D_{el}$	4 metros
Distancia horizontal a árboles y bosques	$D_{add} + D_{el} = 1,5 + D_{el}$	2 metros
Distancia horizontal a edificios, construcciones y zonas urbanas	$D_{add} + D_{el} = 3,3 + D_{el}$	5 metros

En donde D_{add} y D_{el} son distancias definidas en el apartado 5.2 de la ITC-LAT-07 que varían según la tensión de la línea. Además, en el caso que el uso de la fórmula de un valor superior a la distancia mínima será este el que se establezca cómo el mínimo.

3.7. Campos EM y Salud

En las últimas décadas, la preocupación e interés sobre cómo afectan los CEM a la salud se han incrementado, todo ello a raíz de que las nuevas tecnologías que el ser humano ha desarrollado introducen valores de energía electromagnética muy por encima de los niveles naturales. Sin embargo, pese a haber estudios que aseguran que la exposición humana a estos campos es perjudicial para la salud, actualmente no se le suele dar importancia a estos campos electromagnéticos no ionizantes, ya que no hay unanimidad sobre los efectos que producen.

La Comisión internacional para la protección frente a las radiaciones no ionizantes (ICNIRP de sus siglas en inglés) en 2004 elaboró un informe en el que pone de manifiesto las posibles interacciones de los CEM con los seres humanos, llegando a la conclusión de que había cinco mecanismos de acoplamiento entre el campo electromagnético y el cuerpo humano [18].

- Acoplamiento a campos eléctricos de baja frecuencia.
- Acoplamiento a campos magnéticos de baja frecuencia.
- Absorción de energía de los campos electromagnéticos.
- Corrientes de contacto por diferencia de potencial
- Acoplamiento a los CEM de dispositivos médicos adheridos o implantados en un individuo

Además, la propia ICNIRP clasificó los efectos que pueden tener en la salud la interacción con estos campos no ionizantes dependiendo de la frecuencia del campo (Tabla VI).

Tabla VI. Clasificación de la ICNIRP de los efectos en la salud según la frecuencia

Frecuencia	Efectos en la salud
0 Hz a 100 kHz	Efectos no térmicos
100 KHz a 10 MHz	Efectos térmicos y no térmicos
10 MHz a 300 GHz	Efectos térmicos

Efectos no Térmicos.- Se producen cuando la intensidad o energía de la onda no es lo suficientemente grande como para elevar la temperatura por encima de la del sistema biológico, pero estar expuesto en un intervalo de tiempo lo suficientemente largo puede provocar efectos en la salud. En estos casos el principal motivo por el que se transmiten estos efectos es por la inducción de corriente eléctricas en los tejidos. Estos efectos no térmicos son los que más discusión presentan ya que no hay unanimidad sobre sus efectos a largo plazo, aunque algunas investigaciones sugieren que algunos efectos posibles son: leucemia infantil, cáncer cerebral, infertilidad y problemas neurológicos.

Efectos Térmicos.- A diferencia de los efectos no térmicos, estos se producen cuando la frecuencia del campo es muy elevada y provoca un calentamiento en el sistema biológico. Los mecanismos de calentamiento pueden ser por rotación dipolar o por conducción iónica. Independientemente del mecanismo, estos efectos térmicos tienen un gran impacto en la salud. Cuando se eleva la temperatura en una parte de un organismo vivo, si este no puede reducir la temperatura o compensarla mediante sus mecanismos de autorregulación, se produce en el ser vivo un estrés térmico que puede provocar daños como quemaduras, enrojecimiento, dolor, fatiga, mareos, deshidratación, pérdida de visión e infertilidad entre otros [19][20].

En el año 2002 la International Agency for Research on Cancer (IARC) informaría de que los CEM de frecuencias extremadamente bajas suponen un posible cancerígeno perteneciente al grupo 2B como vemos en la Tabla VII. Más tarde, en 2011, la IARC clasificó a los campos de radiofrecuencia como posiblemente cancerígenos para los humanos [21][22].

Tabla VII. Clasificación de los carcinógenos International Agency for Research on *Cancer*

Grupo 1	Cancerígenos para el hombre
Grupo 2A	Alta probabilidad cancerígena
Grupo 2B	Baja probabilidad cancerígena
Grupo 3	No clasificable
Grupo 4	No es cancerígena

Desde que la ICNIRP estableció las primeras medidas y recomendaciones en la década de 1990 hasta la actualidad, son numerosos los estudios e investigaciones que exponen diferentes efectos en la salud debidos a la radiación no ionizante. En 2011 la Asamblea Parlamentaria del Consejo de Europa (APCE) publicó en la resolución 1815 un informe en el que recoge una serie de recomendaciones para reducir la exposición a estos campos en niños y jóvenes como medida de precaución [23]. Otros informes de la Comisión Europea reconocen que puede haber personas más sensibles a la exposición a estos campos [24]. El National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS) en sus investigaciones sobre CEM abordan temas como el cáncer, el alzhéimer y la infertilidad [25].

A finales del 2022 se aprobó el programa europeo de NextGEM en el que, durante los próximos cuatro años, se buscará conseguir conocimientos que identifiquen las medidas de control adecuadas para garantizar la seguridad de los ciudadanos de la Unión Europea con el uso de las nuevas tecnologías generadoras de CEM, como el 5G. Este proyecto también tendrá como objetivo desarrollar y validar herramientas que sirvan para la evaluación de riesgo de CEM [26].

3.8. Normativa

Dada la importancia de los posibles efectos de estos nuevos campos electromagnéticos en la salud, se han establecido diferentes normativas y recomendaciones a la exposición a los mismos. En los siguientes puntos en los que se divide este apartado se recogen algunos conceptos importantes que se incluye en la normativa, así como las recomendaciones y normativas internacionales y nacionales.

3.8.1. Conceptos generales de aplicación en la normativa

En la mayoría de los casos los parámetros que utilizamos para caracterizar los campos electromagnéticos que han sido mencionados anteriormente no son una buena opción para indicar la capacidad que tiene un campo electromagnético de interactuar con los tejidos biológicos. Para ser más precisos con la caracterización del daño que producen estas interacciones en los tejidos biológicos, se suelen utilizar otros tipos de parámetros que llamamos magnitudes dosimétricas. Estos parámetros son los utilizados en las mayorías de

normativas y recomendaciones que distintas instituciones hacen con el fin de garantizar la seguridad de la población ante la exposición a esta radiación.

De forma general los parámetros y conceptos más significativos que se utilizan son:

- *Densidad de potencia*: es la potencia radiante por unidad de área entre los campos eléctricos y magnéticos. Su unidad de medida es watts por metro cuadrado $\left(\frac{W}{m^2}\right)$.
- *SAR (Specific Energy Absorption Rate)*: traducido como la tasa de absorción específica, se puede definir como la cantidad de potencia que se absorbe por unidad de masa del tejido biológico y se expresa en watts por kilogramo $\left(\frac{W}{kg}\right)$.
- *SA (Specific Energy Absorption)*: la absorción específica de energía se define como la energía que es absorbida por el tejido por unidad de masa. Se expresa en julio por kilogramo $\left(\frac{J}{kg}\right)$.
- *Densidad de corriente inducida*: es la cantidad de corriente que se induce por superficie de medida. Sus unidades son amperios por metro cuadrado $\left(\frac{A}{m^2}\right)$.
- *Exposición controlada u ocupacional*: hace referencia a si los sujetos expuestos a la radiación son conscientes de su exposición y pueden tomar medidas de seguridad. Generalmente son trabajadores conocedores de los campos electromagnéticos a los que están expuestos en su actividad laboral y pueden tomar las precauciones apropiadas.
- *Exposición no controlada o de público general*: hace referencia a la exposición en individuos de edades y condiciones diferentes, en la que la exposición en la mayoría de los casos no es voluntaria y no se es consciente de su exposición.
- *Restricciones Básicas*: se definen en función de los estudios científicos e indican las limitaciones de la exposición a los campos por los efectos comprobados de peligrosidad en la salud.
- *Niveles de Referencia*: indican los niveles en donde las restricciones básicas se cumplen. Se utilizan a la hora de evaluar una fuente de radiación comparando los valores medidos con los de referencia.

3.8.2. Normativa Internacional

Las directrices internacionales en la que se han basado muchos países a la hora de realizar sus normativas y recomendaciones son las que publicó la Comisión Internacional para la Protección Frente a Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) en la década de los noventa. La ICNIRP desde entonces ha realizado varias actualizaciones a esta normativa, siendo la más reciente la de 2020. Esta nueva versión supuso grandes cambios, ya que incluyó todo el espectro electromagnético y no solo las frecuencias industriales y altas frecuencias como la versión de los años 1990. Además, añadió recomendaciones para tecnologías como la radio AM, Wi-Fi, Bluetooth y los teléfonos móviles incluyendo el 5G. El principal objetivo de la ICNIRP es establecer unas recomendaciones para limitar la exposición de los campos electromagnéticos. En su informe se recogen distintos experimentos y resultados de efectos directos e indirectos de la exposición a estos campos y se establecen unas restricciones básicas (Tabla VIII) y unos niveles de referencia que son diferentes para el caso de exposición ocupacional (Tabla IX) y exposición del público en general (Tabla X).

Tabla VIII. Restricciones básicas a campos eléctricos y magnéticos de la ICNIRP

Características de la exposición	Rango de Frecuencias	Densidad de Corriente para cabeza y tronco (mA m^{-2}) (rms)	SAR promedio en todo el cuerpo (Wkg^{-1})	SAR localizado cabeza y tronco (Wkg^{-1})	SAR localizado (extremidades) (Wkg^{-1})
Exposición ocupacional	Hasta 1 Hz	40	-	-	-
	1-4 Hz	40/f	-	-	-
	4 Hz – 1kHz	10	-	-	-
	1 – 100 kHz	F/100	-	-	-
	100 kHz – 10 MHz	F/100	0,4	10	20
	10 MHz – 10 GHz	-	0,4	10	20
Exposición al público en general	Hasta 1 Hz	8	-	-	-
	1-4 Hz	8/f	-	-	-
	4 Hz – 1kHz	2	-	-	-
	1 – 100 kHz	F/500	-	-	-
	100 kHz – 10 MHz	F/500	0,08	2	4
	10 MHz – 10 GHz	-	0,08	2	4

Tabla IX: Niveles de referencias para la exposición ocupacional del ICNIRP

Frequency range	E-field strength (V m ⁻¹)	H-field strength (A m ⁻¹)	B-field (μT)	Equivalent plane wave power density S_{eq} (W m ⁻²)
up to 1 Hz	—	1.63×10^5	2×10^5	—
1–8 Hz	20,000	$1.63 \times 10^5/f^2$	$2 \times 10^5/f^2$	—
8–25 Hz	20,000	$2 \times 10^4/f$	$2.5 \times 10^4/f$	—
0.025–0.82 kHz	$500/f$	$20/f$	$25/f$	—
0.82–65 kHz	610	24.4	30.7	—
0.065–1 MHz	610	$1.6/f$	$2.0/f$	—
1–10 MHz	$610/f$	$1.6/f$	$2.0/f$	—
10–400 MHz	61	0.16	0.2	10
400–2,000 MHz	$3f^{1/2}$	$0.008f^{1/2}$	$0.01f^{1/2}$	$f/40$
2–300 GHz	137	0.36	0.45	50

Tabla X. Niveles de referencias para la exposición al público general del ICNIRP

Frequency range	E-field strength (V m ⁻¹)	H-field strength (A m ⁻¹)	B-field (μT)	Equivalent plane wave power density S_{eq} (W m ⁻²)
up to 1 Hz	—	3.2×10^4	4×10^4	—
1–8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	—
8–25 Hz	10,000	$4,000/f$	$5,000/f$	—
0.025–0.8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	—
0.8–3 kHz	$250/f$	5	6.25	—
3–150 kHz	87	5	6.25	—
0.15–1 MHz	87	$0.73/f$	$0.92/f$	—
1–10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$	—
10–400 MHz	28	0.073	0.092	2
400–2,000 MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$	$f/200$
2–300 GHz	61	0.16	0.20	10

La Unión Europea por su parte publicó la recomendación del Consejo de la Unión Europea 1999/519/CE del 12 de julio de 1999 en la que adopta las directrices de la ICNIRP y establece las limitaciones de exposición de la población general a campos electromagnéticos [27]. Ya en los años 2000 la Unión Europea publicó la Directiva 2004/40/CE, la cual ha sufrido modificaciones y correcciones en los últimos años, que trata sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los campos electromagnéticos. Esta Directiva, además de recomendaciones, también establece valores límites para la exposición a estos campos, fija los niveles de referencias y establece distintos requisitos para la evaluación y medición de los campos electromagnéticos [28].

3.8.3. Normativa Nacional

En España las recomendaciones que realizó la Unión Europea se recogen en los siguientes Reales Decretos:

- Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas [29].
- Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23. En este Real Decreto hay un apartado dentro de la ITC-RAT 14 que limita los campos magnéticos en la proximidad de una instalación de alta tensión [30].
- Real Decreto 299/2016, de 22 de julio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos [31].

4. Marco Metodológico

4.1. Campos Eléctricos y Magnéticos generado por las LAT

Tal como se ha comentado con anterioridad, para las frecuencias de trabajo de las LAT nos encontramos en condiciones de campo cercano, por lo que los campos **E** y **B** están desacoplados, no formándose una OEM radiada, por lo que las ecuaciones de Maxwell no se cumplen de manera exacta. En este caso, el estudio analítico de estos campos sólo es posible resolverlo para ciertas configuraciones simples o idealizadas. Para configuraciones más complejas se han desarrollado metodologías que hacen uso de técnicas computacionales (método de simulación de cargas, método de elementos finitos, método de Monte Carlo, etc.) o mediante el uso de ecuaciones aproximadas y siempre con condiciones que simplifiquen los parámetros del entorno en el que se puede encontrar la línea (terreno, árboles y vegetación, estructuras de soporte, etc.).

4.1.1. Ecuaciones analíticas en configuraciones simples

Como ejemplo de un caso sencillo que permite calcular de manera simple el campo eléctrico y el magnético tenemos el de una línea monofásica, de longitud infinita por la que circula una intensidad de corriente I y suspendido paralelamente a tierra a una distancia h (Fig. 15).

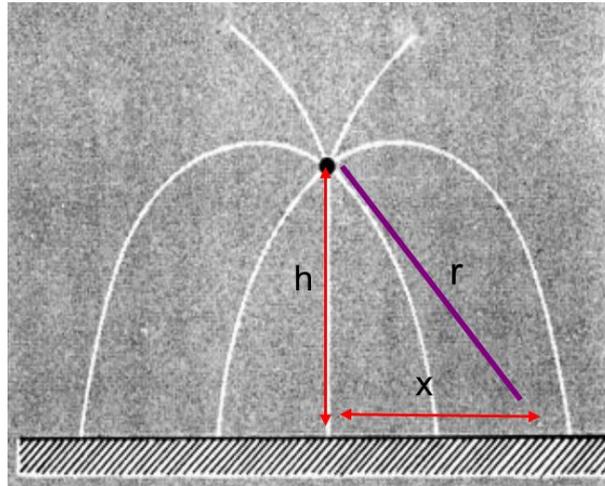


Figura 15. Líneas de campo eléctrico para un conductor suspendido una altura h sobre tierra.

Para este caso simple los módulos del campo \mathbf{E} y \mathbf{B} vendrán dados por las ecuaciones 6 y 7.

$$E = \frac{2V}{\ln \frac{2h}{a}} \frac{h}{r^2} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (\text{Ecuación 7})$$

donde V es el voltaje de la línea, a es el radio del conductor e I la intensidad que circula por la misma.

4.1.2. Método de simulación de cargas

Un método útil y muy utilizado en la ingeniería de la alta tensión es el método de simulación de carga, también conocido como método de cargas equivalentes. Este método consiste en emplear elementos de carga simples, ficticios, que concentren la carga del conductor, pero colocados convenientemente en su interior para modelar la equipotencial real del conductor. Este es un método que tiene la ventaja de que la intensidad de los campos y el potencial resultan en funciones analíticas. En la práctica para el cálculo del campo eléctrico bajo una línea de transmisión usando este método, los conductores se suponen de longitud infinita (problema bidimensional), paralelos a la superficie del terreno, que se supone también plano y buen conductor (permite usar el método de las imágenes), y paralelos entre sí. El campo eléctrico se calcula generalmente hallando la densidad de

carga lineal (carga eléctrica por unidad de longitud) en los conductores, mientras que el campo magnético suele calcularse aplicando la ley de Biot-Savart [32][33]. Según este método el campo eléctrico en las proximidades de un conductor de línea eléctrica situado a (y_i, z_i) por encima del suelo y que tiene una densidad de carga lineal q_i y por el que circula una intensidad de corriente I_i , puede obtenerse utilizando el método de las imágenes (Fig. 16) [33].

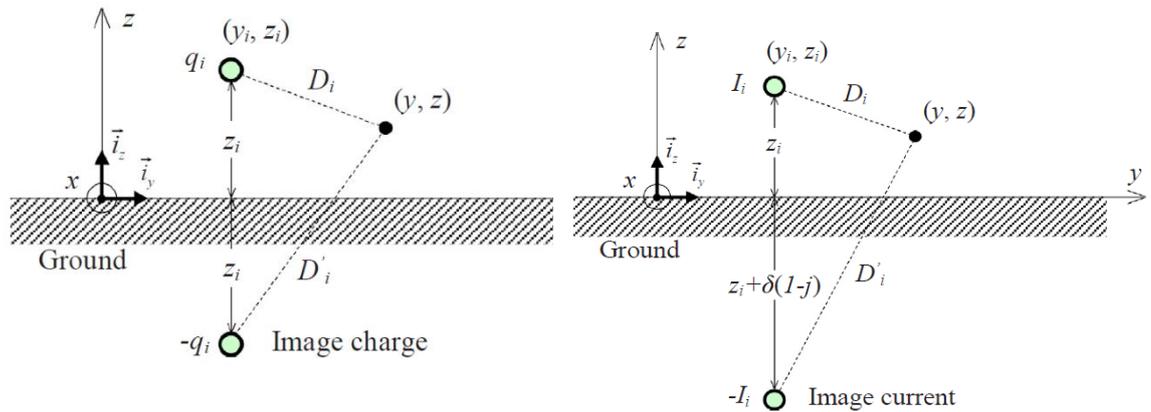


Figura 16. a) Modelo de conductor simple para calcular la intensidad de campo eléctrico en el plano yz [33]. b) Modelo de conductor simple para calcular la densidad de flujo magnético en el plano yz [33].

donde $D_i = \sqrt{(y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}$ es la distancia entre el conductor y el punto de observación (y, z) y $D'_i = \sqrt{(y - y_i)^2 + (z + z_i)^2}$ es la distancia entre el conductor de la imagen y el punto de observación (y, z) . La influencia de varios conductores se tendrá en cuenta aplicando el principio de superposición. Así, el campo eléctrico debido a múltiples conductores vendrá dado por:

$$\vec{E}(y, z) = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{y - y_i}{D_i^2} - \frac{y - y_i}{D_i'^2} \right) \cdot \vec{i}_y + \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{z - z_i}{D_i^2} - \frac{z - z_i}{D_i'^2} \right) \cdot \vec{i}_z \quad (\text{Ecuación 8})$$

donde ϵ_0 representa la permitividad eléctrica del vacío, n el número de conductores y q_i la carga de los conductores.

De forma similar se puede obtener para el campo magnético como:

$$\vec{B}(y, z) = - \sum_{i=1}^n \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \left(\frac{z - z_i}{D_i^2} - \frac{z + z_i + \delta(1 - j)}{D_i'^2} \right) \cdot \vec{l}_y + \sum_{i=1}^n \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \left(\frac{y - y_i}{D_i^2} - \frac{y - y_i}{D_i'^2} \right) \cdot \vec{l}_z \quad (\text{Ecuación 9})$$

donde I_i representa la corriente que circula por el conductor i localizado en (y_i, z_i) , μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío y $\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho_g}{f}}$ en donde ρ_g es la resistividad del suelo y f la frecuencia.

4.1.3. Método de elementos finitos

Conocido también como el método variacional, es utilizado en el mundo de la ingeniería para determinar entre otras cosas la distribución del campo magnético en una región de interés. Esto se consigue al dividir el dominio en elementos finitos y asignar nodos a cada elemento, para posteriormente subdividir la región de estudio en un cierto número de subregiones en formas de triángulos, donde las aristas de los elementos definan una malla y sus vértices sean los nudos [34]. En el estudio hemos utilizado el software FEMM (Finite Element Method Magnetics) que hace uso de este método. En la figura 17 se puede ver un ejemplo del mallado que realiza este programa antes de simular.

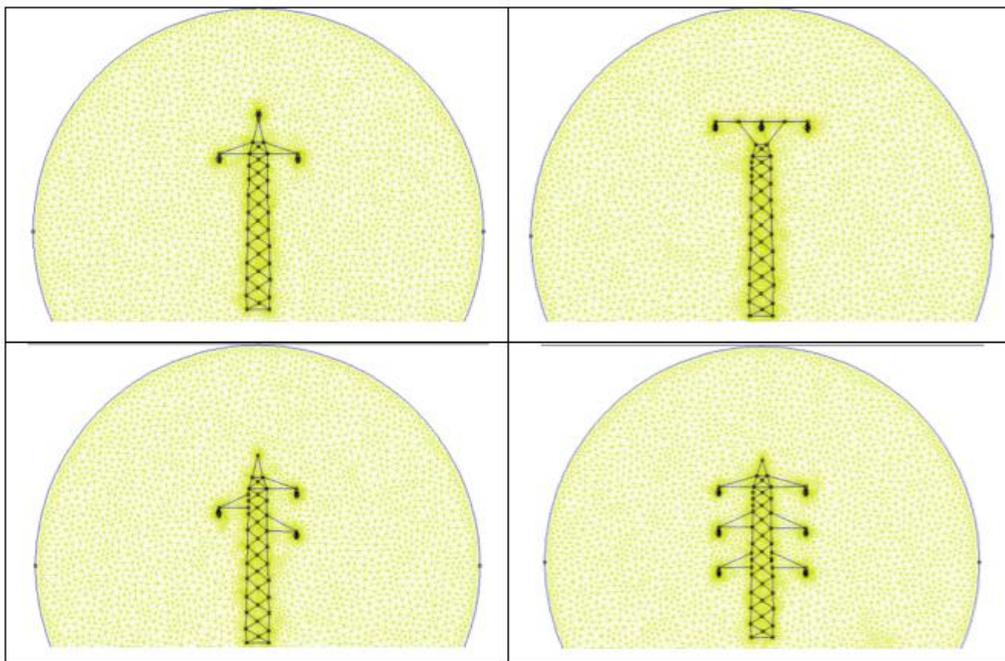


Figura 17. Ejemplo del mallado que realiza el programa FEMM antes de simular para cada una de las configuraciones creando pequeños triángulos.

Con el mallado y haciendo uso de este método lo que se consigue es aproximar la solución del potencial y el campo magnético para cada uno de los elementos finitos, en vez de resolver la ecuación diferencial. El tipo de expresión que se obtiene se muestra en la ecuación 10 [34].

$$V_1 = \frac{-\sum [C_{2K}V_{2K} + C_{3K}V_{3K}]}{\sum C_{1K}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

donde para cada vértice “i” los V_K representan los potenciales, C_K son coeficientes conocidos que dependen de las coordenadas de los vértices y de propiedades físicas de los materiales.

Con el programa FEMM una vez creado el modelo y realizado el mallado, se simula y el software nos muestra el flujo magnético en una ventana. En la figura 18 a modo de ejemplo se muestra el flujo del campo magnético en cada una de las configuraciones estudiadas y la escala de colores que utiliza (la unidad se expresa en teslas).

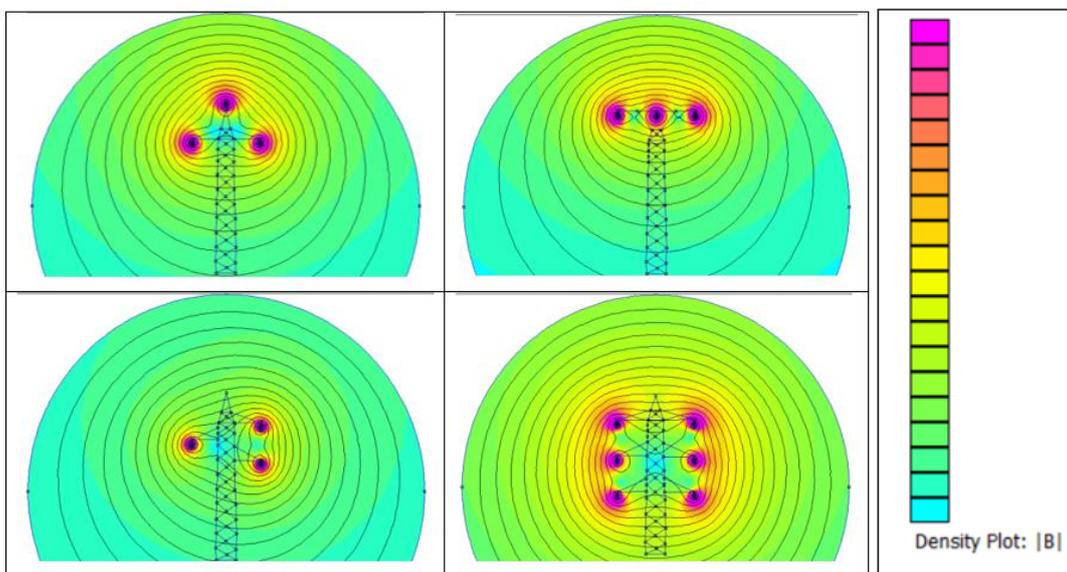


Figura 18. Flujo del campo magnético B para las distintas configuraciones.

Además, hay que destacar que el software FEMM está pensado para estudiar pequeños equipos electrónicos y que presenta algunas limitaciones como no diferenciar entre fases

y no contar con una librería de conductores de LAT. Por ello el modelo creado es bastante simple y solo ha sido utilizado para las configuraciones de circuito simple como apoyo a las ecuaciones aproximadas que veremos en el apartado 4.1.5.

4.1.4. Método de la Ley de Biot-Savart en conductores trifásicos (CRMAG+)

La ley de Biot-Savart determina la intensidad diferencial del campo magnético que se produce en un punto específico P debido a un conductor por el que circula cierta intensidad. En el caso de las LAT trifásicas el problema se complica al contar con más de un conductor y no poder hacer las simplificaciones vistas en la ecuación 6 del apartado 4.1.1. En este caso, al tener presente corrientes eléctricas sinusoidales, el flujo magnético también lo será, teniendo que calcular las componentes del campo magnético en cada eje (B_x , B_y y B_z) y posteriormente el valor eficaz del flujo magnético en el punto P [35]. Por ello, cuando se hace uso de este método es necesario conocer la geometría de los conductores para poder realizar la integración numérica (Ec. 11) utilizando el método del rectángulo para cada conductor de fase [35].

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \oint \frac{d\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^3} \quad (\text{Ecuación 11})$$

donde I es la corriente del circuito, \mathbf{r} es el vector desde la carga hasta el punto P y $d\mathbf{l}$ es el vector de longitud infinitesimal.

Este método es el utilizado por el software CRMAG+ que se ha empleado en este trabajo para la simulación de los campos magnéticos producidos en líneas de alta tensión [36]. Este programa nos permite cuantificar el campo magnético en instalaciones, transformadores y líneas aéreas de alta tensión haciendo uso de este método y de aproximaciones derivadas del análisis de medidas experimentales [35]. Fue creado por el Dr. Carlos Roldán Blay y el Dr. Carlos Roldán Porta como parte del proyecto CREMIE [37]. Los resultados haciendo uso de este software de simulación para una LAT se muestran en el apartado 5.2.

4.1.5. Ecuaciones aproximadas

En el contexto de las líneas de alta tensión, los estudios para llevar a cabo un cálculo preciso del campo electromagnético pueden ser muy complejos o requerir un alto nivel de conocimiento. Por ello, con el paso de los años se han propuesto distintas ecuaciones

aproximadas para obtener los valores de los campos eléctricos y magnéticos en las cercanías de las LAT. Veamos algunos de los estudios más conocidos que proponen estas ecuaciones aproximadas.

Ecuaciones de Federico Moro y Roberto Turri [38].- Ambos del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Padua (UNIPD) en Italia, publicaron en el 2012 su investigación sobre la evaluación del campo magnético en líneas eléctricas. En su investigación observaron que el método de vector complejo (CVM) utilizado para analizar OEM planas es una buena herramienta para representar campos magnéticos armónicos, obteniendo una expresión en función de la distancia de fase a fase (d_{ff}). Para ello Moro y Turri utilizando algebra vectorial compleja y, asumiendo una geometría en el plano (2D), obtuvieron la ecuación 12 de densidad de flujo magnético para cualquier tipo de arreglo de conductores, cualquier número de fases y cagas. Además, esta expresión proporciona valores exactos

$$B = \frac{\mu}{2\pi} \sqrt{\sum_{p=1}^n \left[\sum_{q=1}^n \frac{I_p I_q \cos(\theta_{pq})}{r_p^2} - \sum_{q=p+1}^n \frac{I_p I_q \cos(\theta_{pq}) d_{pq}^2}{r_p^2 r_q^2} \right]} \quad (\text{Ecuación 12})$$

donde μ es la permeabilidad magnética del aire, n es el número de fases, p y q indican conductores de fase, d_{pq} es la distancia entre fases y θ_{pq} es el cambio de fase.

A partir de esta expresión general y realizando distintas aproximaciones obtuvieron las ecuaciones que se muestran en la Tabla XI para cada una de las configuraciones estudiadas.

Ecuaciones del Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRÉ).- El CIGRE es una organización mundial con más de 3500 empresas de 90 países diferentes que se dedica a la promoción y el intercambio de conocimientos técnicos sobre la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. En 2009 publicaron un informe con técnicas de mitigación de los campos magnéticos originados por el sistema eléctrico [39]. En este informe se recogen algunas ecuaciones aproximadas para el estudio de los campos magnéticos. Estas ecuaciones se pueden utilizar para calcular el campo en puntos lejos de

los conductores y se deducen mediante la expansión en serie de la Ley de Biot-Savart (Ec. 13 y 14).

$$B(x, y, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (ye_x - xe_y) f(x, y, z) \quad (\text{Ecuación 13})$$

donde f:

$$f(x, y, z) = \frac{1}{(x^2 + y^2)} \left(\frac{\frac{L}{2} + z}{\sqrt{x^2 + y^2 + \left(\frac{L}{2} + z\right)^2}} + \frac{\frac{L}{2} - z}{\sqrt{x^2 + y^2 + \left(\frac{L}{2} - z\right)^2}} \right) \quad (\text{Ecuación 14})$$

De la expresión anterior dedujeron que en el caso de un sistema trifásico con cargas equilibradas el campo a una distancia r de los conductores es la ecuación 15 y para cada una de las configuraciones las expresiones deducidas se muestran en la Tabla XI [39].

$$B(r) = \frac{d_{ff} I}{5\sqrt{2}r^2} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Tabla XI. Ecuaciones aproximadas para el campo magnético que se utilizaran.

Ecuación	Horizontal	Delta
Moro y Turri	$B(r, I) = \frac{3\mu I}{2\pi} \frac{\sqrt{3}d_{ff}}{r^2 - d_{ff}^2}$	$B(r, I) = \frac{3\mu I}{2\sqrt{2}\pi} \frac{\sqrt{3}d_{ff}}{r^2}$
CIGRE	$B(r) = \frac{\sqrt{3}d_{ff}I}{5r^2}$	$B(r) = \frac{\sqrt{6}d_{ff}I}{10r^2}$
Ecuación	SuperBundle	Baja Reactancia
Moro y Turri	$B(r, I) = \frac{\mu a \sqrt{3}}{\pi} \frac{I}{r^2 - a^2}$	$B(r, I) = \frac{\mu a I \sqrt{a^2 + 12w^2}}{\pi r^3}$
CIGRE	$B(r) = \frac{2\sqrt{3}d_{ff}I}{5r^2}$	$B(r) = \frac{2d_{ff}I}{5r^3} \sqrt{d^2 + 3s^2}$

En donde μ es la permeabilidad magnética en el vacío, I la intensidad que recorre, r la distancia desde el centro geométrico de los conductores al punto de medida, d_{ff} es la distancia entre fases, a es la distancia entre dos conductores de un mismo circuito, w es la distancia desde el conductor al eje de simetría y s es la distancia entre dos conductores de distintos circuitos.

4.2. Introducción a las técnicas de mitigación

A pesar de que no se ha demostrado fehacientemente que los CEM generados por las líneas de alta tensión tengan efectos nocivos para la salud humana, existe incertidumbre por los posibles riesgos que puedan presentar. Por esta razón, se han desarrollado varias técnicas de mitigación para reducir los niveles de CEM de las fuentes generadoras. Estas técnicas se pueden clasificar en dos:

- *Técnicas Pasivas*: se basan en la utilización de materiales y diseños de estructuras para reducir los campos electromagnéticos en el entorno de las líneas de alta tensión.
- *Técnicas Activas*: se basan en la generación de campos electromagnéticos opuestos para reducir o anular el campo electromagnético generado por las líneas de alta tensión.

A continuación, se nombran algunas técnicas que mitigan los campos electromagnéticos generados por las LAT:

Configuración de los conductores

Para las líneas de transporte de doble circuito existe una técnica de mitigación que reduce el campo magnético. Esta técnica consiste en cambiar la disposición de las mismas fases para cada uno de los circuitos (Fig. 19). Esto se conoce como configuración de baja reactancia y su principal ventaja es que reduce el campo electromagnético y la impedancia de la línea.

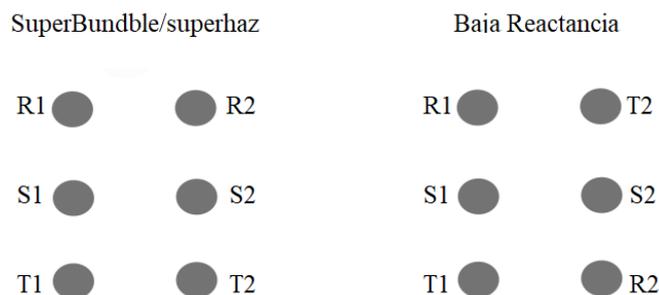


Figura 19. Diferencias en la disposición de las fases para cada configuración de doble circuito.

En el caso de las líneas de un único circuito, existen evidencias de que la intensidad de campo magnético en líneas con configuración en delta presenta valores menores que en la configuración horizontal o vertical [40]. También se pueden reducir los campos magnéticos disminuyendo la separación entre los conductores (Fig. 20), aumentando la altura de los conductores respecto al suelo (Fig. 21) o haciendo una división de fase utilizando dos conductores para cada una.

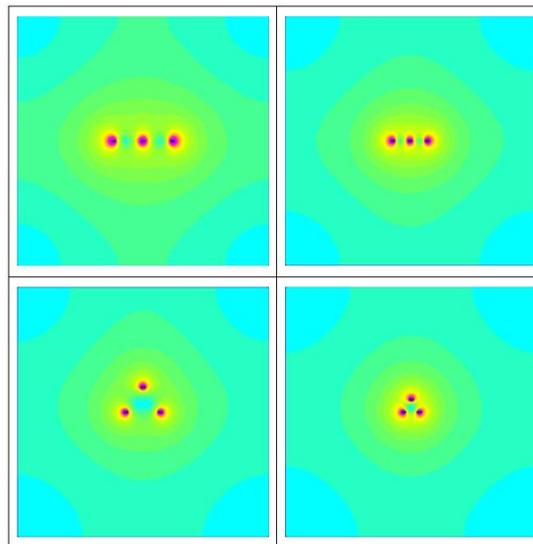


Figura 20. Flujo del campo magnético con distinta separación entre conductores utilizando el software FEMM.

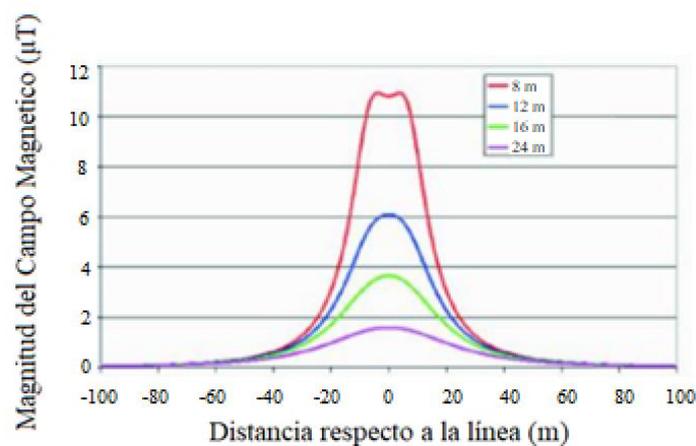


Figura 21. Variación del campo magnético con la altura respecto al suelo y al conductor, modificado de EMFs.info [41].

Existen otras técnicas de mitigación cómo lo son los lazos pasivos y o el apantallamiento electromagnético, pero no se han considerado en el estudio.

5. Resultados y discusión

5.1. Resultados con ecuaciones aproximadas.

Los cálculos fueron realizados para líneas con conductores 147-AL1/34-ST1A (45 kV), 337-AL1/44-ST1A (66 kV), 402-AL1/52-ST1A (132 kV) y 806-AL1/56-ST1A (220 kV). Se han utilizado estos conductores porque son los conductores normalizados que se utilizan en Canarias y sus propiedades han sido obtenida de las “Especificaciones Técnicas Particulares de LAT Mayores a 36 kV” de la empresa distribuidora ENDESA [42]. Las tablas con las propiedades se encuentran en el Anexo I. Para cada una de las configuraciones se han supuesto distintos casos para poder estudiar los efectos de los parámetros que definen la línea, siendo los siguientes:

- Variación de la altura de la línea respecto al suelo (15 m, 10 m y 8 m), donde la altura se mide desde el suelo al centro geométrico de la configuración
- Variación de la distancia entre conductores (1,5 m, 2 m y 3 m).

Además, hay que destacar que la medida se realizará a un metro de altura, que suele ser la altura estándar al medir los CEM ya que nos interesa estudiar estos cerca de los órganos sensibles. Las tablas con todos los resultados se pueden ver en el Anexo II.

5.1.1. Configuración en delta

La geometría de la configuración delta se muestra en la figura 22, en donde se han representado con los parámetros ya definidos en el apartado 4.1.5.

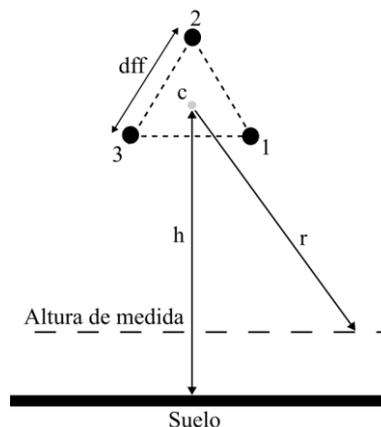


Figura 22. Representación geométrica de la configuración delta.

En primer lugar, veremos cómo varía el campo magnético para una situación en la que la línea se encuentra en su punto más bajo a 8 metros respecto al suelo y la distancia entre fases es de 1,5 metros (Fig. 23).

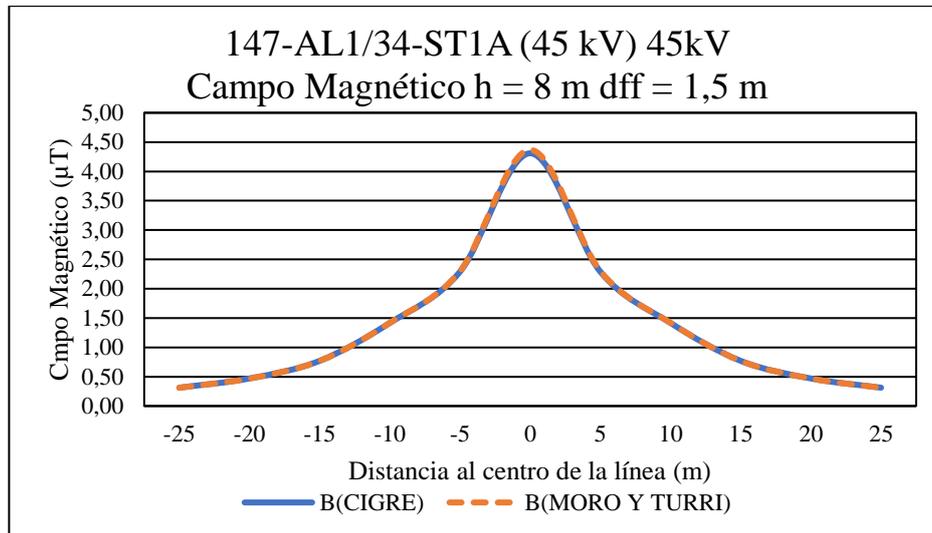


Figura 23. Campo magnético con las dos ecuaciones aproximadas en el conductor 147-AL1/34-ST1A (45 kV) para la configuración delta.

En la figura 23 podemos observar cómo las dos aproximaciones presentadas para el CM dan valores idénticos. Comparamos estos resultados con los obtenidos por el programa FEMM (Fig. 24).

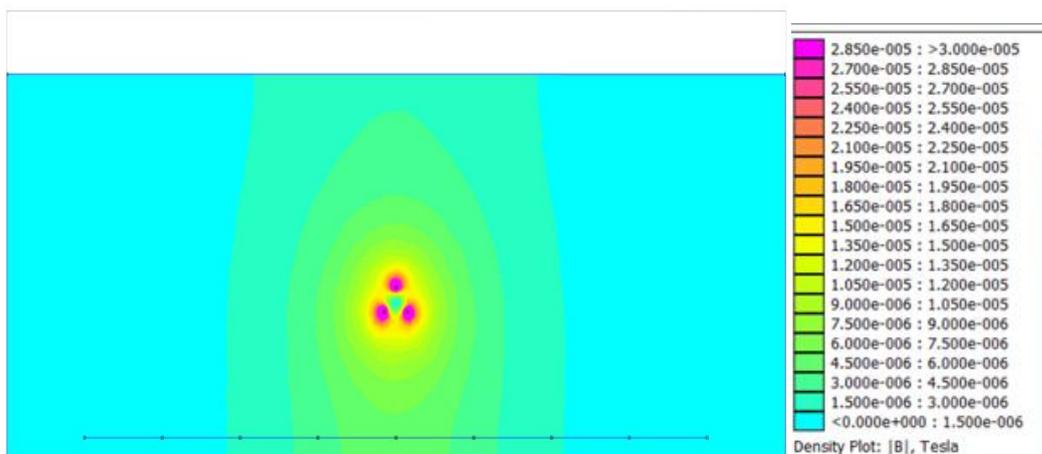


Figura 24. Flujo del campo magnético para la configuración delta elaborado con FEMM en el conductor 147-AL1/34-ST1A a una altura de 8 metros y con distancia entre fases de 1,5 metros.

En la figura 24 vemos cómo el CM toma valores mayores a $30 \mu\text{T}$ cerca de los conductores mientras que el valor del campo disminuye cuando nos alejamos. Hay que destacar que en la figura 24 se ha trazado una línea a 1 metro simulando la altura de medida y además se han marcado con cuadrados distintos puntos con una separación de 5 metros entre cada uno. Con todo esto vemos que el campo magnético debajo de los conductores es aproximadamente $5 \mu\text{T}$.

Una vez introducido un primer cálculo teórico y apoyado con FEMM, lo que nos interesa ahora es ver cómo afecta la variación de los parámetros al campo magnético. En la figura 25 vemos cómo el campo magnético disminuye cuando la altura es mayor y cuanto más pequeña es la distancia entre los conductores. En la figura 26 podemos ver más en concreto como se reduce el campo magnético con la altura a una distancia de por ejemplo 10 metros respecto a la línea, esto lo conseguimos representado en la gráfica la diferencia entre el CM justo debajo de la línea ($x=0 \text{ m}$) y el CM a la distancia que nos interesa (en este caso $x=10 \text{ m}$). Podemos observar cómo el ΔB es mayor (el CM disminuye más) cuando la altura es más baja.

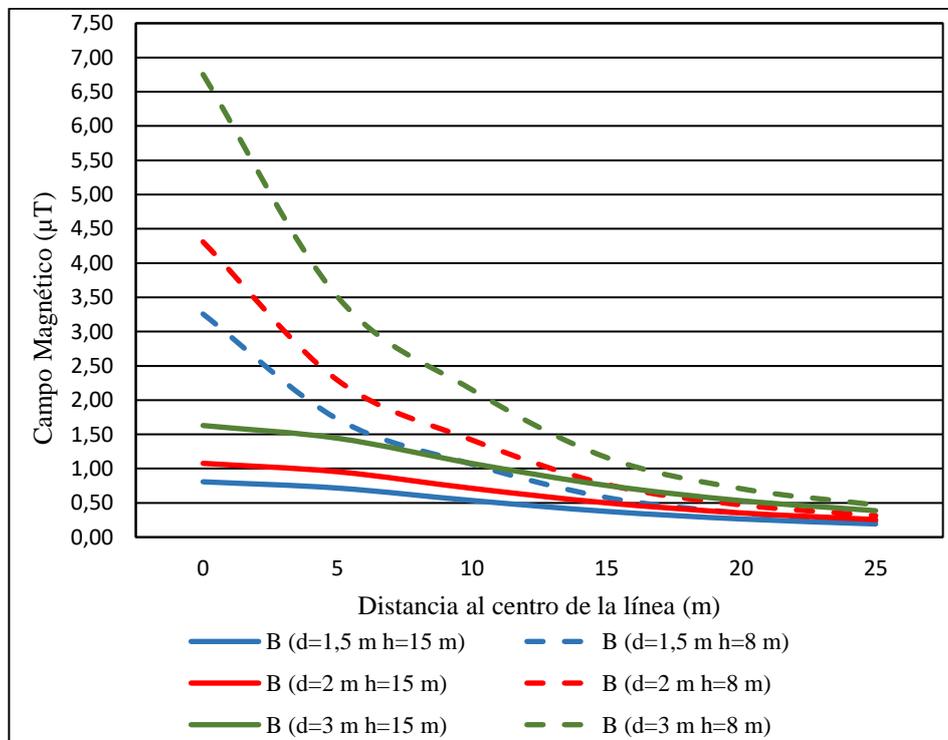


Figura 25. Valores del campo magnético para la configuración delta con distintas alturas y distancias entre fases en el conductor 147-AL1/34-ST1A (45 kV).

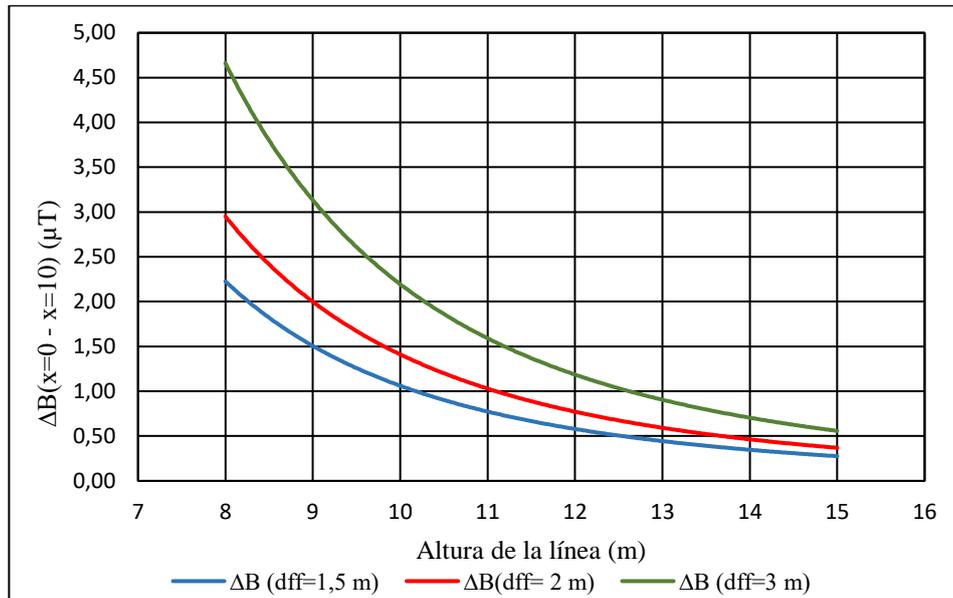


Figura 26. Valores de la diferencia del campo magnético en $x=0$ m y $x=10$ m respecto a la altura de la línea y para la configuración delta con el conductor 147-AL1/34-ST1A (45 kV).

5.1.2. Configuración horizontal

En la figura 27 se muestra el esquema geométrico de la configuración en horizontal.

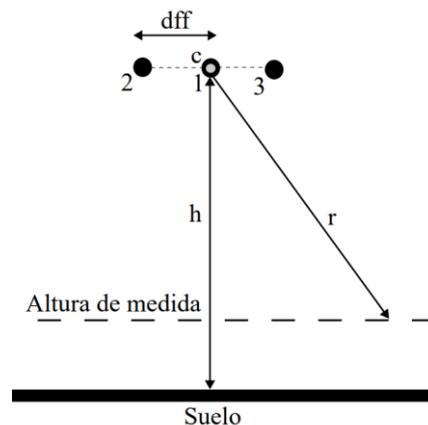


Figura 27. Representación geométrica de la configuración horizontal.

Al igual que con la configuración delta, representamos en la figura 28 el campo magnético con las ecuaciones aproximadas y en la figura 29 la comparación del flujo magnético del programa FEMM. En ellas vemos nuevamente que las ecuaciones aproximadas dan resultados casi idénticos y que los resultados obtenidos son mayores que la configuración delta.

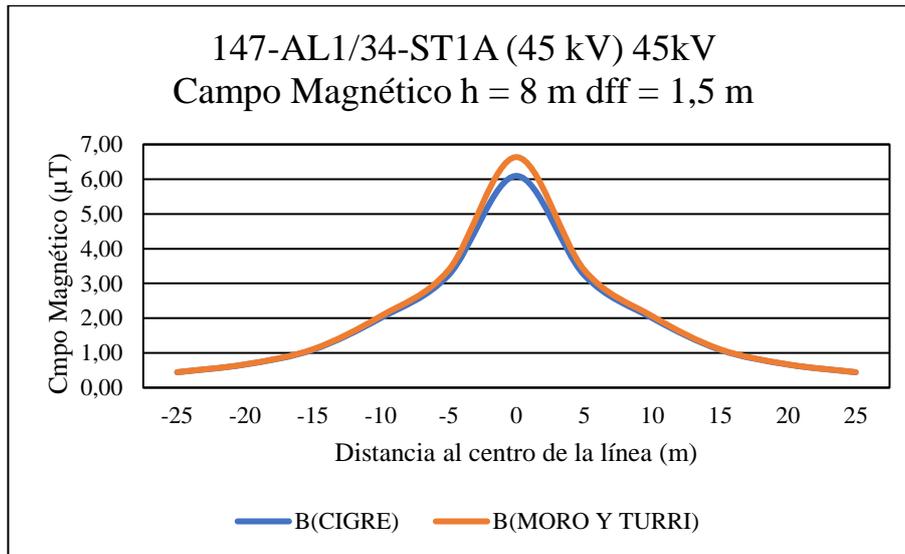


Figura 28. Campo magnético con las dos ecuaciones aproximadas en el conductor 147-AL1/34-ST1A para la configuración horizontal.

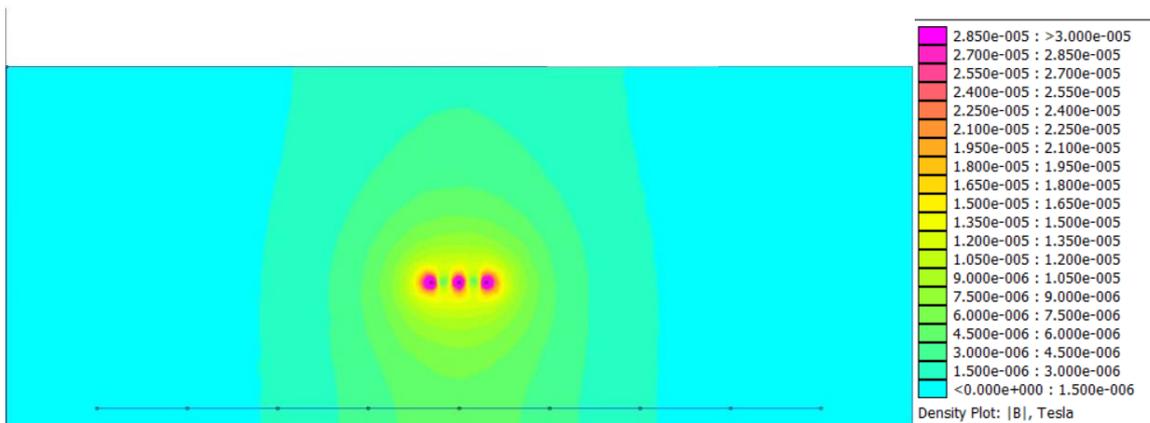


Figura 29. Flujo del campo magnético para la configuración horizontal elaborado con FEMM, en el conductor 147-AL1/34-ST1A a una altura de 8 metros y con distancia entre fases de 1,5 metros.

Ahora al igual que hicimos en la configuración delta comprobamos cómo se comporta el CM cuando se cambian los parámetros (Fig. 30). También podemos representar cuánto disminuye el CM en $x=10$ m cuando la distancia entre fases cambia para distintas alturas (Fig.31). Como podemos observar, un incremento de la distancia entre fases supone mayores tasas de cambio en el campo B (ΔB) cuando la altura es menor.

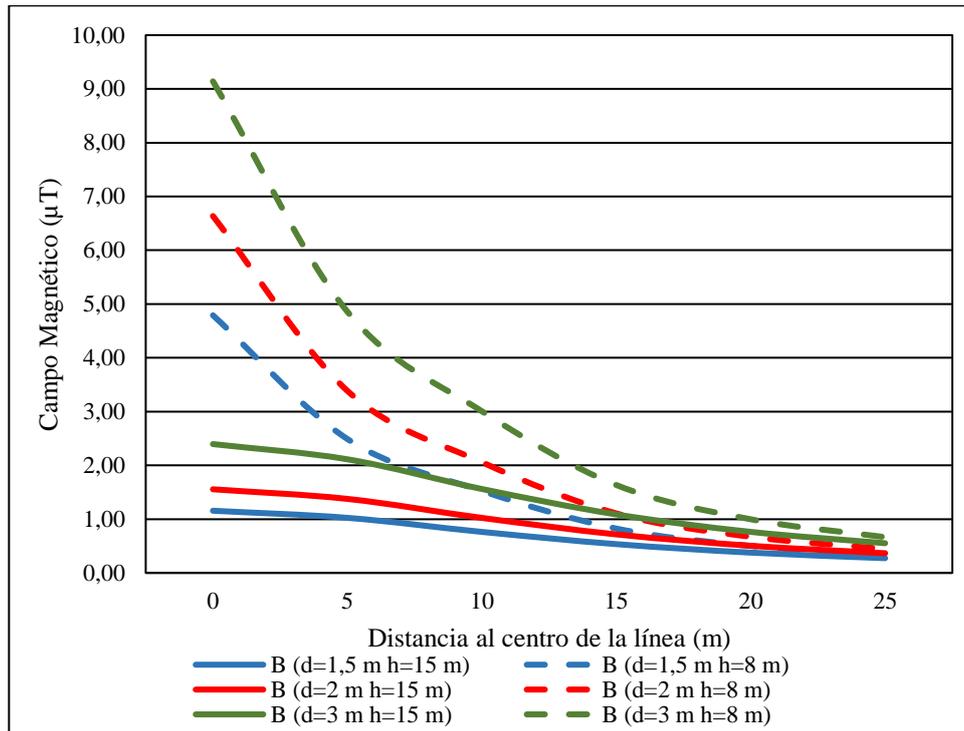


Figura 30. Valores del campo magnético para la configuración horizontal con distintas alturas y distancias entre fases en el conductor 147-AL1/34-ST1A (45 kV).

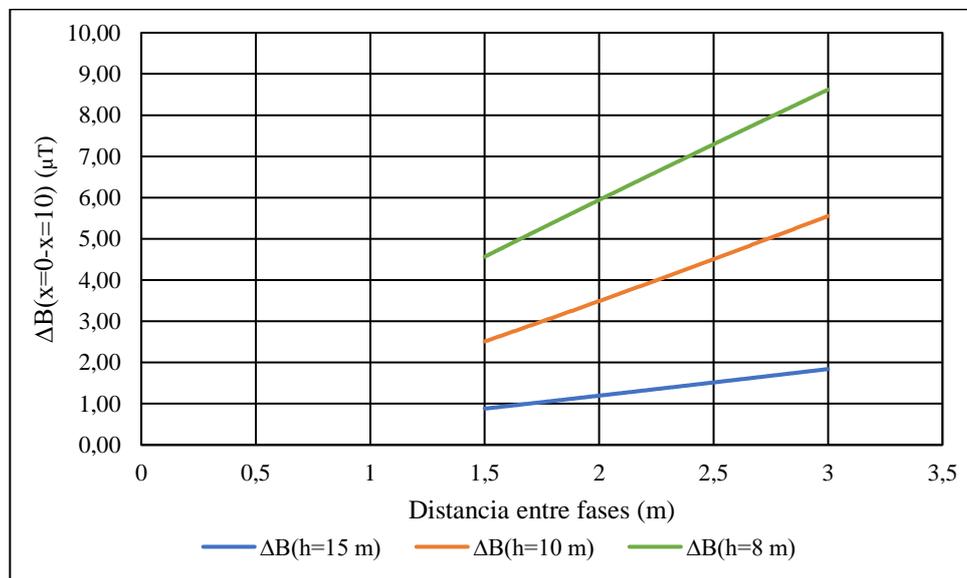


Figura 31. Valores de la diferencia del campo magnético en $x=0$ m y $x=10$ m respecto a la distancia entre fases y para la configuración horizontal con el conductor 147-AL1/34-ST1A (45 kV).

5.1.3. Configuraciones de doble circuito (Baja Reactancia y Super Bundle)

En esta ocasión al estudiar las configuraciones de doble circuito se ha realizado para tensiones de 132 kV y 220 kV. En la figura 32 se muestra el esquema para estas dos configuraciones.

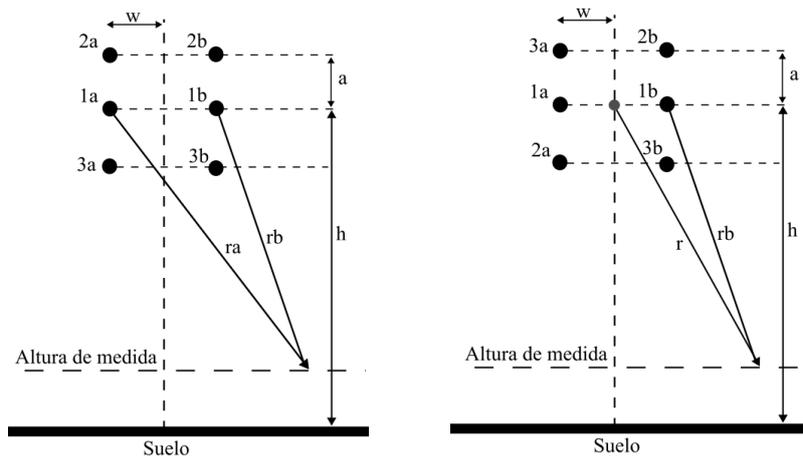


Figura 32. Representación geométrica de la configuración de doble circuito Super-Bundle (izquierda) y de baja reactancia (derecha).

Al igual que en las demás configuraciones, las ecuaciones aproximadas presentadas son prácticamente la misma expresión dando resultados idénticos en la configuración de baja reactancia. Esto lo vemos en la figura 33, donde se representa en azul los valores del CM en la configuración Super-Bundle y en verde los de baja reactancia.

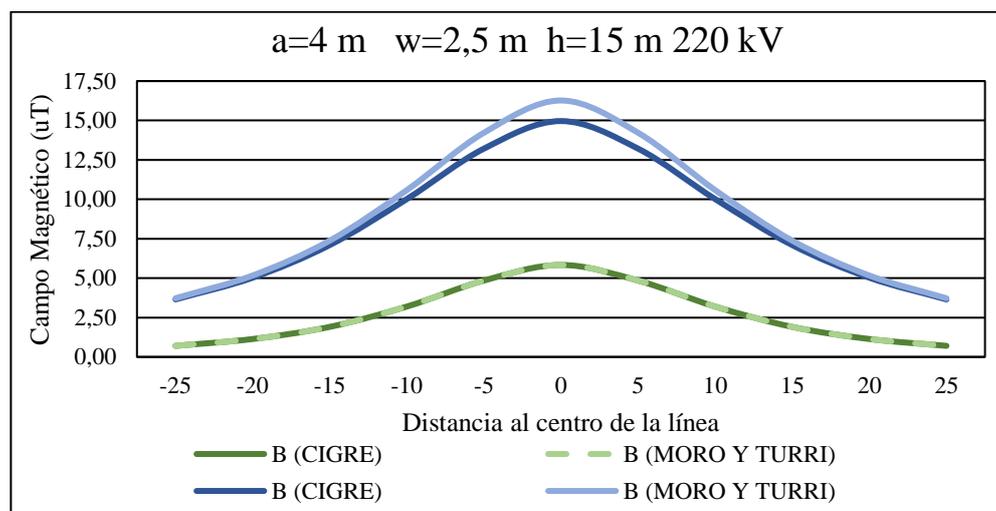


Figura 33. Campo magnético con las dos ecuaciones aproximadas en el conductor 806-AL1/56-ST1A para la configuración Super-Bundle y baja reactancia.

Además, en la figura 33 se ve que la configuración de baja reactancia reduce considerablemente el campo magnético frente a la configuración Super-Bundle. Por último, en la figura 34 se muestran la relación de los parámetros con el campo magnético. En este caso se ha optado por representarlas en la misma gráfica para comparar las dos configuraciones.

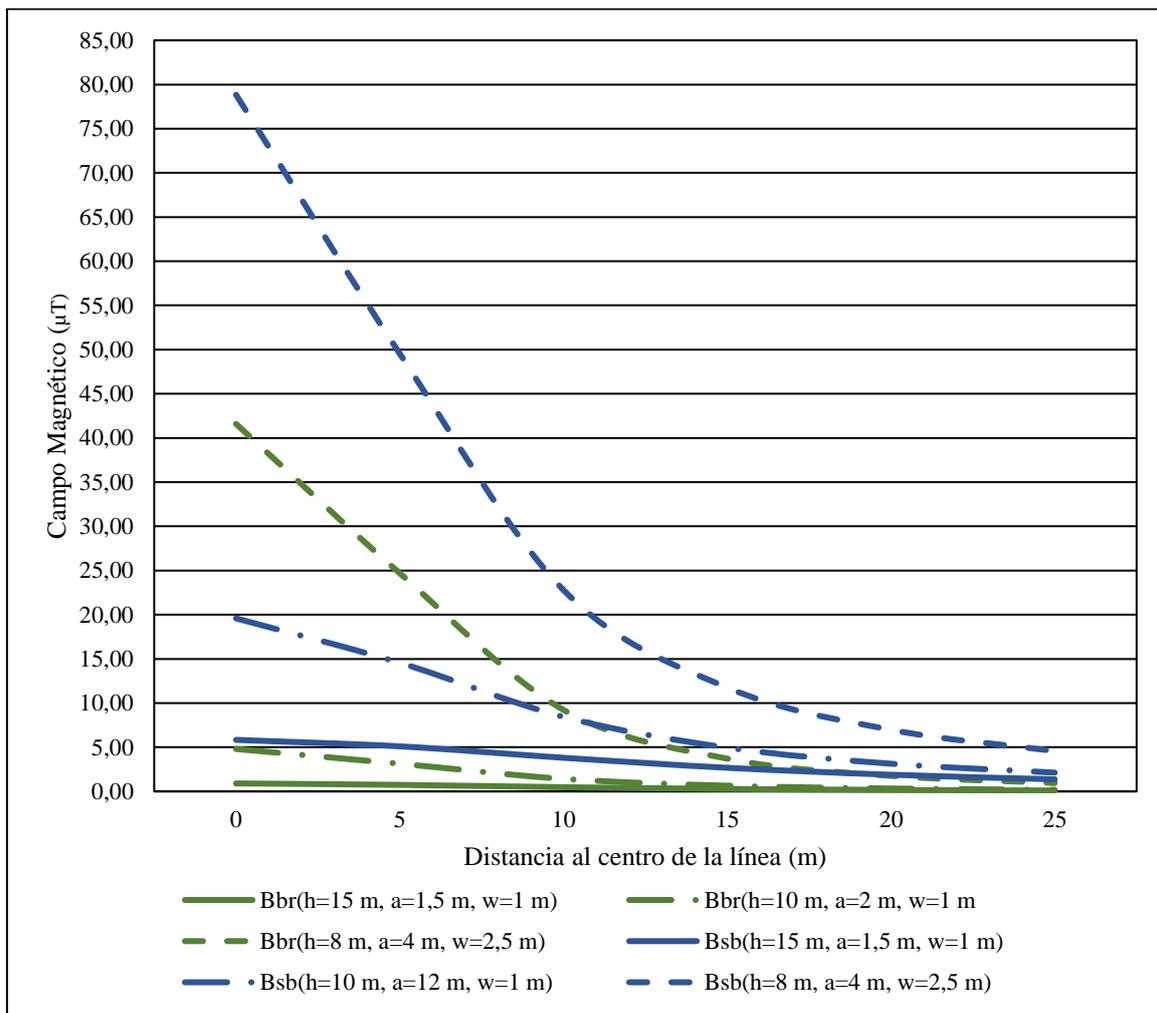


Figura 34. Campo magnético de las configuraciones en Super-Bundle (representados en colores azules) y baja reactancia (representado en colores verdes) para distintos armados y alturas, con un conductor 806-AL1/56-ST1A (LA 860) 220 kV.

Se puede apreciar cómo era de esperar que el campo magnético aumenta cuando los conductores se encuentran más cerca del suelo y cuando la distancia entre conductores aumenta. Además, se observa que la configuración de baja reactancia disminuye los campos magnéticos siendo la mejor configuración que mitiga el campo magnético.

5.2. Simulación con CRMag+

Con el objeto de analizar los campos magnéticos generados en un trazado real, se utilizaron las capacidades de cálculo que ofrece el programa CRMag+. Para ello se eligió la línea de 220 kV que une la subestación de las Caletillas con la subestación del Rosario (isla de Tenerife), la cual presenta una configuración de doble circuito (Super-Bundle). En la figura 35 se muestra el trazado que sigue la línea en su tramo aéreo.

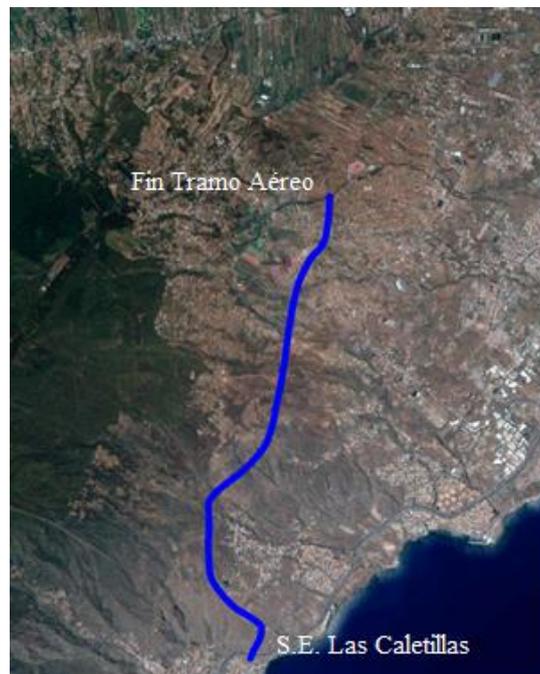


Figura 35. Recorrido de la línea aérea que une la subestación de las Caletillas con la subestación del Rosario

Los datos de partida para la línea a estudiar se pueden observar en la Tabla I. Algunos de estos datos han sido obtenidos del estudio de impacto ambiental que elaboró la empresa Biosfera XXI en el año 2010 [43]. En el Anexo III se encuentra explicado todo el procedimiento seguido para obtener los resultados, por lo que aquí se muestran los resultados en la Tabla XII. En dicha tabla, L es la longitud del vano, la cota inicial, media y final del terreno se identifica con la letra Z (Z_i , Z_m y Z_f) y $B_{\text{máx}}$ es el campo máximo que se obtiene en el vano. De la Tabla XII podemos ver que el campo magnético es máximo para el vano 10, por lo que analizaremos este caso con un poco más de profundidad. Para ello primero representamos en la figura 36 el render 3D del vano y el terreno.

Tabla XII. Resultados de la simulación en cada uno de los vanos con CRMag+.

Vano	L (m)	Z _i (m)	Z _m (m)	Z _f (m)	B _{max} (μT)
1	282.3	46.7	108.58	208.0	20.99
2	93.0	208.0	218.12	228.49	11.86
3	180.0	228.49	244.23	270.0	11.15
4	240.0	270.0	288.55	316.18	17.27
5	217.0	316.18	333.0	367.21	23.04
6	317.0	367.21	381.28	421.18	12.88
7	262.6	421.18	434.13	458.77	11.90
8	324.1	458.77	492.82	550.95	18.12
9	384.8	550.95	563.09	608.62	23.66
10	341.0	608.62	544.26	544.16	24.02
11	456.0	544.16	521.0	544.44	20.43
12	295.1	544.44	572.6	605.63	14.66
13	433.4	605.63	597.0	605.57	11.56
14	263.7	605.57	642.07	679.47	12.97
15	450.0	679.47	690.0	743.97	16.99
16	189.5	743.97	750.0	765.76	11.93
17	418.3	765.76	719.68	742.66	18.54
18	293.9	742.66	704.28	700.92	20.73
19	294.0	700.92	697.0	728.36	18.90
20	222.1	728.36	719.29	736.11	19.14
21	303.6	736.11	717.0	744.75	19.97
22	294.6	744.75	723.0	751.06	13.94
23	257.2	751.06	714.02	700.54	19.35
24	239.9	700.54	692.0	712.0	11.52
25	234.8	712.0	713.0	744.15	16.73
26	249.5	744.15	719.07	746.07	11.43

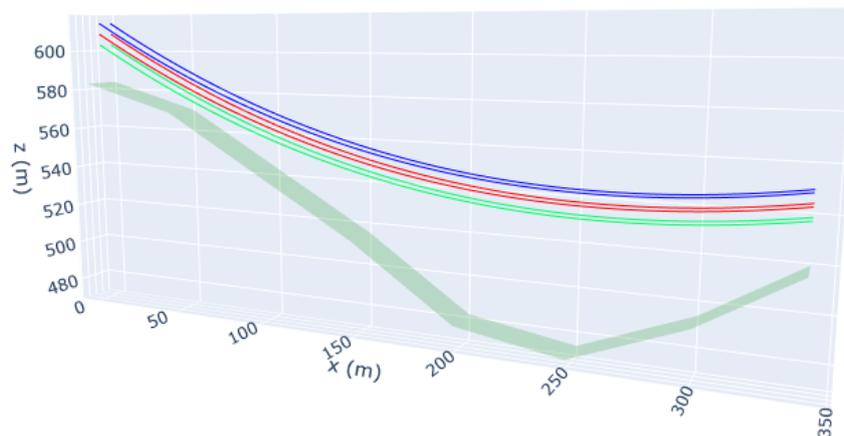


Figura 36. Representación 3D del vano y el terreno del tramo 10.

La figura 36 permite hacernos una idea de dónde encontrar los valores más altos del campo por los desniveles del terreno. Este pensamiento lo podemos confirmar representando la superficie del campo magnético (Fig. 37,a) y posteriormente con la gráfica de corte en el eje X en el punto donde el campo es máximo (Fig. 37,b)

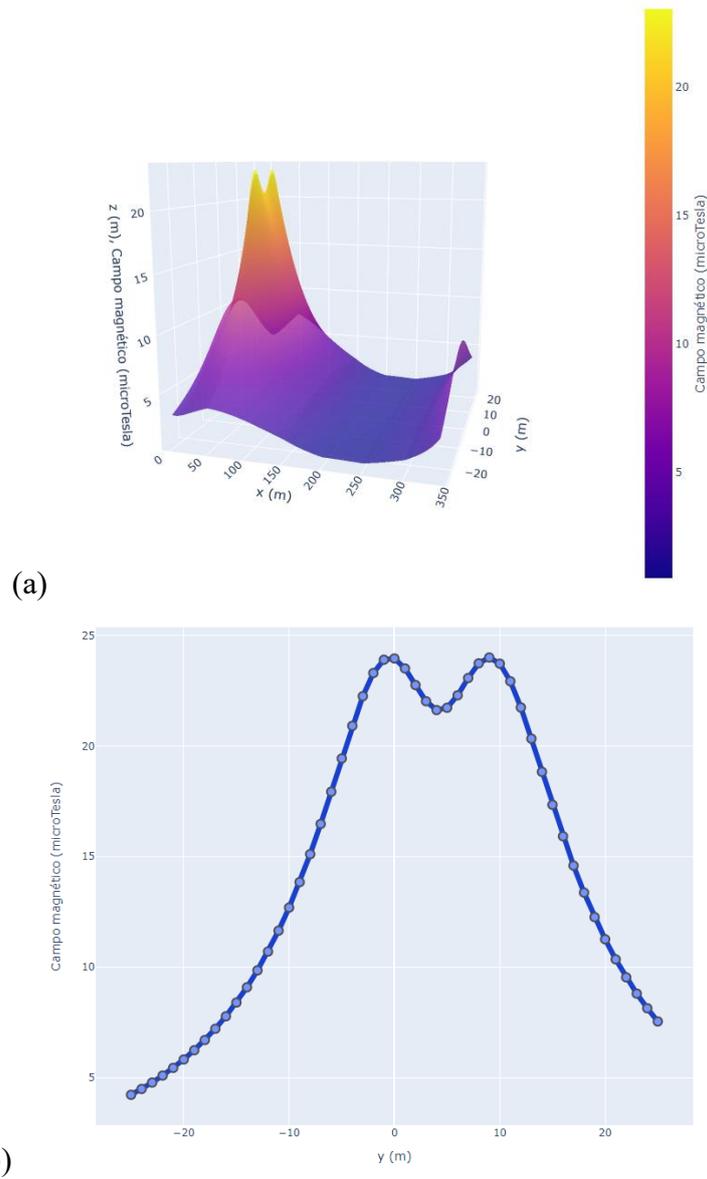


Figura 37. a) Campo magnético en el vano 10. b) Corte en el eje X en el punto donde el campo magnético es máximo para el vano 10.

Como se puede observar en la figura 37,a, el campo magnético aumenta cuando la LAT está más cerca del suelo, siendo máximo cuando los conductores inferiores de la LAT se encuentran a una altura de 10 metros respecto al suelo (diferencia en el eje Z entre la cota del conductor y el terreno) (Fig. 36) y a 50 metros respecto al primer apoyo (en el eje X). Además, destacar que en la figura 37,b el eje Y es la distancia bajo la línea y que para el software $y=0$ no es justo debajo del centro de la LAT sino justo debajo del conductor A1

(conductor central izquierdo) por lo que la gráfica está desplazada, esto se explica mejor en el Anexo III.

Si bien los resultados obtenidos están muy por debajo de los $100 \mu\text{T}$ que establece la normativa en cuanto al valor máximo del campo magnético para frecuencias industriales, no superaría los requerimientos de algunas recomendaciones más restrictivas que proponen algunos organismos internacionales. En este sentido y si en un futuro estos valores máximos de la normativa se modificaran a la baja, podríamos obtener valores de campo aún más pequeños intercambiando dos fases en un circuito, es decir, utilizar la configuración de baja reactancia. Con este objetivo, hemos simulado también la superficie del campo magnético para este vano con la configuración de baja reactancia. Los resultados se pueden ver en la figura 38, en donde vemos cómo se ha reducido el campo magnético a valores inferiores a $3 \mu\text{T}$ y el valor máximo se ha reducido $4,2 \mu\text{T}$ siendo este de $19,78 \mu\text{T}$.

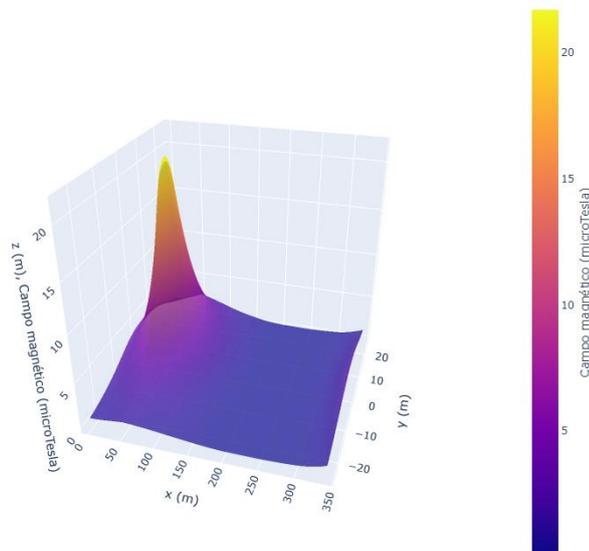


Figura 38. Superficie del campo magnético para el vano 10 con la configuración de baja reactancia.

6. Conclusiones / Conclusions

6.1. Conclusiones

Las LAT que forman parte de los sistemas de transporte de energía eléctrica, generan campos electromagnéticos muy intensos en sus proximidades, por lo que hoy en día existe un gran debate y preocupación por los posibles efectos que pueden tener estos campos en la salud. Aunque existen normativas para limitar los valores de estos campos en las proximidades de las LAT, el incremento de la demanda de energía eléctrica, así como un mejor conocimiento científico sobre los efectos de los CEM sobre la salud, hacen previsible que en un futuro estos valores límite se vean reducidos. Ante esta situación es necesario conocer de qué forma se pueden disminuir estos valores sin renunciar al suministro eléctrico que tantos beneficios ha tenido para la humanidad.

En este trabajo de fin de grado se han analizado, mediante la utilización de diferentes métodos de cálculo de los campos generados por las líneas de alta tensión, algunos de los mecanismos que se proponen para disminuir el valor de estos en las proximidades de las LAT. Concretamente se ha analizado la dependencia de los campos con respecto a la configuración de la línea en circuitos sencillos y dobles, así como las variaciones en función de los cambios en algunos parámetros que la definen (distancia entre fases, altura, etc.).

En los resultados con las ecuaciones aproximadas se ha comprobado que la configuración delta presenta los valores más bajo de campo magnético para los circuitos sencillos. Por otro lado, para los de doble circuito la configuración que mejor mitiga los valores del campo es la de baja reactancia. No obstante, en las distintas LAT estudiadas observamos que el campo magnético a partir de cierta distancia (entre 20 y 25 metros de la línea) se reduce considerable y para los circuitos sencillos se obtienen valores muy similares (inferiores a $2 \mu\text{T}$) independientemente de la configuración y tensión. Esto también se refleja en los circuitos dobles, siendo el campo magnético inferior a $7 \mu\text{T}$ para la configuración Super-Bundle e inferior a $2 \mu\text{T}$ en la de baja reactancia, obteniendo en esta última configuración resultado muy similares a las de circuito sencillo.

También, y mediante la utilización de métodos de cálculo computacionales como el programa CRMag+, se ha estudiado un caso real en la isla de Tenerife, analizando los valores máximos del campo que genera la LAT en su cercanía bajo la perspectiva de la normativa actual. Se ha comprobado que todos los valores están por debajo de los valores límite permitidos, aunque se proponen otras configuraciones posibles que reducirían aún más los valores de campo generados por este trazado, si en un futuro tuvieran que reducirse.

6.2. Conclusions

The overhead power lines (LAT) that are part of the electric power transportation systems generate highly intense electromagnetic fields in their proximity. Therefore, there is currently a significant debate and concern regarding the potential effects these fields may have on health. Although there are regulations in place to limit the values of these fields near LAT, the increasing demand for electric power, along with a better scientific understanding of the effects of electromagnetic fields on health, make it likely that these limit values will be reduced in the future. In this context, it is necessary to explore ways to decrease these values without compromising the electrical supply, which has provided numerous benefits to humanity.

In this final degree project, different calculation methods have been used to analyse the fields generated by high-voltage lines and examine some of the proposed mechanisms for reducing their values near LAT. Specifically, the dependence of the fields on the line configuration in single and double circuits has been analysed, as well as the variations resulting from changes in certain defining parameters (phase distance, height, etc.).

The results obtained using approximate equations have shown that the delta configuration yields the lowest magnetic field values for single-circuit systems. On the other hand, for double-circuit systems, the low-reactance configuration proves to be the most effective in mitigating the field values. However, in the various studied LAT, it was observed that the magnetic field reduces significantly at a certain distance (between 20 and 25 meters from the line). For single-circuit systems, very similar values (below $2 \mu\text{T}$) are obtained regardless of the configuration and voltage. This trend also applies to double-circuit systems, where the magnetic field is below $7 \mu\text{T}$ for the Super-Bundle configuration and below $2 \mu\text{T}$ for the low-reactance configuration, yielding results very similar to those of single-circuit systems.

Furthermore, using computational calculation methods, such as the CRMag+ program, a real case study was conducted on the island of Tenerife, analyzing the maximum values of the field generated by the LAT in its vicinity according to current regulations. It was

found that all values are below the allowed limit values, although alternative configurations are proposed that would further reduce the field values generated by this layout if they were to be lowered in the future.

7. Bibliografía

- [1] P. Bandara y D. O. Carpenter, “Planetary electromagnetic pollution: it is time to assess its impact,” *The Lancet Planetary Health*, vol. 2, n° 12, pp. e512-e514, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30221-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30221-3) [Último acceso: 7 Febrero 2023].
- [2] R. López Valverde, “Historia del electromagnetismo,” IES Pablo Picasso, 2001. [En línea]. Disponible en: https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7053/7053326/historia_del_electromagnetismo.pdf
- [3] A. Beléndez, “La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la" síntesis electromagnética" de Maxwell,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 30, pp. 2601.1-2601.20, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172008000200012>
- [4] EPEC, “Guericke y el generador electrostático,” *La historia de la electricidad*, vol. 4, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://web.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/fichaguericke.pdf>
- [5] M. Alcaraz González, “Maxwell,” Mayo 2005. [En línea]. Available: https://webs.um.es/jmz/IntroFisiCompu/Alumnos/05_Alcaraz_Marta/Maxwell.html[Último acceso: 7 Febrero 2023].
- [6] D. Anaya, “Thomas Alva Edison y la empresa de la electricidad parte II,” Expo Energía, 11 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.exposolucionesenenergia.com/blog/thomas-alva-edison-2.php?m=> [Último acceso: 7 Febrero 2023].
- [7] J. M. Sadurní, “Nikola tesla, el genio de la electricidad,” *Historia National Geographic*. 15 Diciembre 2022. [En línea]. Available: https://historia.nationalgeographic.com.es/a/nikola-tesla-genio-electricidad_14494 [Último acceso: 7 Febrero 2023].
- [8] Biografías.es, “George Westinghouse,” [En línea]. Available: <https://www.biografias.es/famosos/george-westinghouse.html> [Último acceso: 7 Febrero 2023].
- [9] J. C. Guerra, Contaminación electromagnética, apuntes Ingeniería del Medio Ambiente. Universidad de La Laguna.
- [10] S. J. Ling, J. Sanny y W. Moebs, “Chapter 16 Electromagnetic Waves,” de *University Physics volume 2*, Texas, OpenStax, 2016, pp. 679-710. [En línea]. Disponible en: <https://openstax.org/details/books/university-physics-volume-2>
- [11] CEMEDAL, “Los límites entre el campo cercano y el campo lejano,” 4 Septiembre 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.cemdal.com/2016/09/04/los-l%C3%ADmites-entre-el-campo-cercano-y-el-campo-lejano/> [Último acceso: 17 Abril 2023].
- [12] entso-e, “Grid Map,” 1 Enero 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.entsoe.eu/data/map/#5.73/41.88/2.457> [Último acceso: 14 Marzo 2023].
- [13] C. Gonzalez Gisbert, “Gestión y operación de la red eléctrica. Esquema de la red eléctrica de España. Asimetría peninsular: generación y consumo. Conexiones internacionales,” 15 Noviembre 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.eoi.es/blogs/merme/gestion-y-operacion-de-la-red-electrica-esquema-de-la-red-electrica-de-espana-asimetria-peninsular-generacion-y-consumo-conexiones-internacionales-3/> [Último acceso: 14 Marzo 2023].

- [14] ENDESA, “Historia de la electricidad,” [En línea]. Disponible: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/historia-de-la-electricidad> [Último acceso: 31 Marzo 2023].
- [15] Aucatel, “Inspección de Instalaciones de Alta Tensión,” [En línea]. Disponible en: <https://www.aucatel.com/alta-tension/#:~:text=Primera%20categor%C3%ADa%20tensi%C3%B3n%20nominal%20inferior,superior%20a%20un%201%20KV> [Último acceso: 31 Marzo 2023].
- [16] REE, “Sistema eléctrico canario,” [En línea]. Disponible en: <https://www.ree.es/es/actividades/sistema-electrico-canario> [Último acceso: 31 Marzo 2023].
- [17] “Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09.”
- [18] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, “Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz),” *Health physics*, vol. 118, n° 5, pp. 483-524, 2020.
- [19] J. L. Pérez Alejo y . R. Miranda Leyva, “Radiaciones electromagnéticas y salud en la investigación médica,” *Revista Cubana de Medicina Militar*, vol. 39, n° 1, 2010.
- [20] “Efectos sobre la salud de los CEM,” Universidad Zaragoza, [En línea]. Disponible en: <https://uprl.unizar.es/higiene-industrial/efectos-sobre-la-salud-de-los-cem> [Último acceso: 10 Marzo 2023].
- [21] World Health Organization, “Non-ionizing Radiation: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields,” de *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans*, vol. 80, Lyon, France, 2002.
- [22] IARC, WHO, “Classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans,” Press Release, n° 208, 2011.
- [23] Parliamentary Assembly, “The potential dangers of electromagnetic fields and their effect on the environment,” Resolution 1815, Estrasburgo, 2011.
- [24] SCENIHR, “Opinion on Potential health effects of exposure to electromagnetic fields,” 2016. Disponible en <https://data.europa.eu/doi/10.2772/75635>.
- [25] NIH, “National Library of Medicine,” [En línea]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17543004/> [Último acceso: 8 Marzo 2023].
- [26] Sanidad, “Sanidad participa en el proyecto europeo NextGEM para monitorizar los campos electromagnéticos,” La Moncloa, 20 Febrero 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/sanidad14/Paginas/2023/200223-proyecto-europeo-nextgem-electromagneticos.aspx> [Último acceso: 10 Marzo 2023].
- [27] “1999/519/CE: Recomendación del Consejo, de 12 de julio de 1999, relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)”.

- [28] “Directiva 2004/40/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004 sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos”.
- [29] “REAL DECRETO 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones”.
- [30] “Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITCRAT 01 a 23”.
- [31] “Real Decreto 299/2016, de 22 de julio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos”.
- [32] H. Salkić, A. Softić, I. Turkovic, A. Muharemovic y M. Klaric, “Calculation and Measurement of Electromagnetic Fields,” *Electromagnetic Radiation*, 2012.
- [33] E. Lunca, S. Ursache y A. Salceanu, “Computation and analysis of the extremely low frequency electric and magnetic fields generated by two designs of 400 kV overhead transmission lines” *Measurement*, vol. 124, pp. 197-204, 2018.
- [34] N. Morales Osorio, “Software para cálculo de campos eléctricos y magnéticos en baja frecuencia”
- [35] C. Roldán Blay y Roldán Porta, “Quick Calculation of Magnetic Flux Density in Electrical Facilities,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 3, p. 891, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/app10030891>
- [36] Inielectric, “CRMAG,” [En línea]. Disponible en: <http://www.inielectric.com/resultados/CRMAG>. [Último acceso: 8 Junio 2023].
- [37] Inielectric, “PROYECTO CREMIE,” [En línea]. Disponible en: <http://www.inielectric.com/ingenieriaelectrica/investigacion/cremie>. [Último acceso: 8 Junio 2023].
- [38] F. Moro y R. Turri, “Accurate calculation of the right-of-way width for power line magnetic field impact assessment,” *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 37, pp. 343-364, 2012.
- [39] CIGRE, Work Group on Electric Power Systems, WG C4.204, “Mitigation techniques of power-frequency magnetic fields”, *Electra*, vol.242, pp. 75–83, Feb.2009.
- [40] P. L. Cruz Romero, “Análisis, cálculo y técnicas de mitigación de campos magnéticos creados por líneas eléctricas de alta tensión,” Sevilla, 2000.
- [41] EMFs.info, “Summaries of fields from all power lines,” [En línea]. Disponible en: <https://www.emfs.info/sources/overhead/summaries/> [Último acceso: 1 Abril 2023].
- [42] Endesa Distribución Eléctrica S.L.U., “Especificaciones Técnicas Particulares de Líneas Aéreas de Alta Tensión mayores a 36 kV,” Julio 2017. [En línea]. Disponible en: https://industria.gob.es/es-ES/participacion_publica/Documents/especificaciones-tecnicas-Endesa/LRZ001_EP-Lineas-Aereas-Alta-Tension-accesible.pdf. [Último acceso: 20 Junio 2023].

[43] BIOSFERA XXI, “Estudio de Impacto Ambiental de las Subestaciones El Rosario 220/66kV y Caletillas 220kV, y de las líneas Caletillas-El Rosario a 220kV, El Rosario-Geneto a 66kV y Caletillas–Candelaria a 220kV,” 2010. [En línea]. Disponible en:
[https://www.ree.es/sites/default/files/04_SOSTENIBILIDAD/Documentos/tramitacion_ambiental/DIA/Documento%20Síntesis%20Subestaci%C3%B3n%20Caletillas%20\(Nueva%20Candelaria\)%20220%20kV.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/04_SOSTENIBILIDAD/Documentos/tramitacion_ambiental/DIA/Documento%20Síntesis%20Subestaci%C3%B3n%20Caletillas%20(Nueva%20Candelaria)%20220%20kV.pdf) [Último acceso: 8 Junio 2023].

ANEXOS

ANEXO I: TABLAS DE PROPIEDADES DE CONDUCTORES DE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN.....	66
ANEXO II: TABLAS DE RESULTADOS	71
ANEXO III: SIMULACIÓN CON CRMAG+	90
ANEXO IV: SIMULACIÓN CON FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS	100

ANEXO I: TABLAS DE PROPIEDADES DE CONDUCTORES DE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	68
2. TABLAS DE PROPIEDADES	68
3. REFERENCIAS.....	70

1. Introducción

En este documento se muestran las tablas de propiedades de los conductores utilizados en el estudio de las LAT (Tablas I.I y I.II). Estas tablas corresponden a las tablas 1 y 3 de las Especificaciones Técnicas Particulares de Líneas Aéreas de Alta Tensión mayores a 36 kV de la empresa distribuidora ENDESA [1]. Estas tablas han sido utilizadas para el cálculo del campo magnético con el método de las ecuaciones aproximadas y en los distintos softwares de simulación. Los conductores utilizados han sido los siguientes:

- 147-AL1/34-ST1A (45 kV)
- 337-AL1/44-ST1A (66 kV)
- 402-AL1/52-ST1A (132 kV)
- 806-AL1/56-ST1A (220 kV)

2. Tablas de propiedades

Tabla I.I Conductores normalizados para cada tensión con su intensidad y potencia máxima admisible.

TENSIÓN	CONDUCTOR		INTENSIDAD (A)	POTENCIA (MVA)
45 KV	147-AL1/34-ST1A (LA 180)	147-AL1/ 34-A20SA (LARL 180)	431	33,6
	242-AL1/39-ST1A (LA 280)	242-AL1/ 39-A20SA (LARL 280)	581	45,3
	337-AL1/44-ST1A (LA 380)	337-AL1/ 44-A20SA (LARL 380)	720	56,1
66 KV	147-AL1/34-ST1A (LA 180)	147-AL1/ 34-A20SA (LARL 180)	431	49,3
	242-AL1/39-ST1A (LA 280)	242-AL1/ 39-A20SA (LARL 280)	581	66,4
	337-AL1/44-ST1A (LA 380)	337-AL1/ 44-A20SA (LARL 380)	720	82,3
110 KV	147-AL1/34-ST1A (LA-180)	147-AL1/ 34-A20SA (LARL 180)	431	82,1
	242-AL1/39-ST1A (LA 280)	242-AL1/ 39-A20SA (LARL 280)	581	110,7
	337-AL1/44-ST1A (LA 380)	337-AL1/ 44-A20SA (LARL 380)	720	137,2
	402-AL1/52-ST1A (LA 455)	402-AL1/52-A20SA (LARL 455)	806,7	153,7
132 KV	147-AL1/34-ST1A (LA-180)	147-AL1/ 34-A20SA (LARL 180)	431	98,6
	242-AL1/39-ST1A (LA 280)	242-AL1/ 39-A20SA (LARL 280)	581	132,9
	337-AL1/44-ST1A (LA 380)	337-AL1/ 44-A20SA (LARL 380)	720	164,6
	402-AL1/52-ST1A (LA 455)	402-AL1/52-A20SA (LARL 455)	806,7	184,4

Tabla I.II. Parámetros de conductores normalizados en LAT

Designación Código / Código antiguo	Sección mm ²		Equiv en Cobre (mm ²)	Diámetro mm		Composición				Carga de Rotura (daN)	Resist. eléctrica c.c. a 20°C (Ω/km)	Masa Kg /km	Módulo elasticidad daN/m ²	Coef. de dilatación lineal (°C ⁻¹ ·10 ⁻⁶)
	Aluminio	Total		Acero	Total	Alambres de aluminio		Alambres de acero						
						Nº	Diámetro (mm)	Nº	Diámetro (mm)					
147-AL1 / 34-ST1A LA 180	147,3	181,6	93	7,50	17,50	30	2,50	7	2,50	6390	0,1962	676	8000	17,8
242-AL1 / 39-ST1A LA 280 (Hawk)	241,7	281,1	152	8,04	21,80	26	3,44	7	2,68	8450	0,1194	977	7500	18,9
337-AL1 / 44-ST1A LA 380 (Gull)	337,3	381,0	212	8,46	25,38	54	2,82	7	2,82	10650	0,0857	1275	6900	19,3
402-AL1 / 52-ST1A LA 455 (Cóndor)	402,3	454,5	253	9,24	27,72	54	3,08	7	3,08	12400	0,0718	1521	6900	19,3

Para las LAT de 220 kV se utilizó el conductor 806-AL1/56-ST1A LA 860 (LAPWING) con las siguientes características:

- Intensidad: 1077 A
- Sección Al: 805,7 mm²
- Sección Total: 861,3 mm²
- Diámetro Acero: 9,54 mm²
- Diámetro Total: 38,16 mm
- Composición alambres de aluminio: 45 alambres y diámetro de 4,77 mm
- Composición alambres de acero: 7 alambres y diámetro de 3,18 mm
- Carga de rotura: 18700 daN
- Resistencia eléctrica en c.c. (20°C): 0,0359 Ω/km
- Masa: 2666 kg
- Módulo de elasticidad: 6600 daN/mm²
- Coeficiente de dilatación: 20,9 °C · 10⁻⁶

3. Referencias

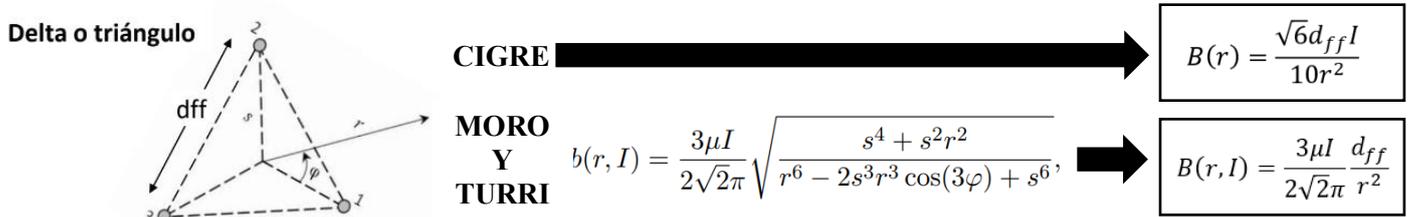
- [1] Endesa Distribución Eléctrica S.L.U., “Especificaciones Técnicas Particulares de Líneas Aéreas de Alta Tensión mayores a 36 kV,” Julio 2017. [En línea]. Disponible en: https://industria.gob.es/es-ES/participacion_publica/Documents/especificaciones-tecnicas-Endesa/LRZ001_EP-Lineas-Aereas-Alta-Tension-accesible.pdf. [Último acceso: 20 Junio 2023].

ANEXO II: TABLAS DE RESULTADOS

ÍNDICE

1. CONFIGURACIÓN DELTA.....	73
2. CONFIGURACIÓN HORIZONTAL.....	77
3. CONFIGURACIÓN DE BAJA REACTANCIA.....	81
4. CONFIGURACIÓN EN SUPER BUNDLE	85

1. Configuración Delta



Donde r es la distancia al punto de medida, s la distancia desde el conductor al centro geométrico, dff es la distancia entre fases, I la intensidad de corriente y μ es la permeabilidad magnética del vacío.

147-AL1/34-ST1A (LA 180) 45 kV

Tabla II.I. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración delta 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65	
CIGRE	B (μ T)	0,19	0,27	0,38	0,53	0,72	0,81	0,72	0,53	0,38	0,27	0,19
MORO TURRI	B (μ T)	0,19	0,27	0,38	0,53	0,72	0,81	0,72	0,53	0,38	0,27	0,19

Tabla II.II. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración delta 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65	
CIGRE	B (μ T)	0,26	0,35	0,50	0,71	0,96	1,08	0,96	0,71	0,50	0,35	0,26
MORO TURRI	B (μ T)	0,26	0,35	0,50	0,71	0,95	1,08	0,95	0,71	0,50	0,35	0,26

Tabla II.III. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración delta 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65	
CIGRE	B (μ T)	0,39	0,53	0,75	1,07	1,43	1,62	1,43	1,07	0,75	0,53	0,39
MORO TURRI	B (μ T)	0,39	0,53	0,75	1,08	1,44	1,63	1,44	1,08	0,75	0,53	0,39

Tabla II.IV. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración delta 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57	
CIGRE	B (μ T)	0,22	0,33	0,52	0,87	1,49	1,96	1,49	0,87	0,52	0,33	0,22
MORO TURRI	B (μ T)	0,22	0,33	0,52	0,88	1,50	1,96	1,50	0,88	0,52	0,33	0,22

Tabla II.V. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración delta 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57	
CIGRE	B (μ T)	0,30	0,44	0,69	1,17	1,99	2,61	1,99	1,17	0,69	0,44	0,30
MORO TURRI	B (μ T)	0,30	0,44	0,69	1,17	2,00	2,62	2,00	1,17	0,69	0,44	0,30

Tabla II.VI. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración delta 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57	
CIGRE	B (μ T)	0,45	0,66	1,04	1,75	2,99	3,91	2,99	1,75	1,04	0,66	0,45
MORO TURRI	B (μ T)	0,45	0,66	1,04	1,77	3,04	4,01	3,04	1,77	1,04	0,66	0,45

Tabla II.VII. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración delta 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96	
CIGRE	B (μ T)	0,23	0,35	0,58	1,06	1,72	3,23	1,72	1,06	0,58	0,35	0,23
MORO TURRI	B (μ T)	0,23	0,35	0,58	1,06	1,72	3,26	1,72	1,06	0,58	0,35	0,23

Tabla II.VIII. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración delta 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96	
CIGRE	B (μ T)	0,31	0,47	0,77	1,42	2,29	4,31	2,29	1,42	0,77	0,47	0,31
MORO TURRI	B (μ T)	0,31	0,47	0,77	1,42	2,30	4,37	2,30	1,42	0,77	0,47	0,31

Tabla II.IX. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración delta 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96	
CIGRE	B (μ T)	0,47	0,71	1,16	2,13	3,43	6,46	3,43	2,13	1,16	0,71	0,47
MORO TURRI	B (μ T)	0,47	0,71	1,16	2,15	3,51	6,75	3,51	2,15	1,16	0,71	0,47

337-AL1/44-ST1A (LA 380) 66kV

Tabla II.X. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración delta 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	
dff (m)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65	
CIGRE	B (μ T)	0,32	0,44	0,63	0,89	1,20	1,35	1,20	0,89	0,63	0,44	0,32
MORO TURRI	B (μ T)	0,32	0,44	0,63	0,89	1,20	1,35	1,20	0,89	0,63	0,44	0,32

Tabla II.XI. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración delta 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65	
CIGRE	B (μ T)	0,43	0,59	0,84	1,19	1,60	1,80	1,60	1,19	0,84	0,59	0,43
MORO TURRI	B (μ T)	0,43	0,59	0,84	1,19	1,60	1,80	1,60	1,19	0,84	0,59	0,43

Tabla II.XII. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración delta 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65	
CIGRE	B (μ T)	0,64	0,89	1,26	1,79	2,39	2,70	2,39	1,79	1,26	0,89	0,64
MORO TURRI	B (μ T)	0,64	0,89	1,26	1,80	2,41	2,72	2,41	1,80	1,26	0,89	0,64

Tabla II.XIII. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración delta 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57		
CIGRE	B (μ T)		0,37	0,55	0,86	1,46	2,50	3,27	2,50	1,46	0,86	0,55	0,37
MORO TURRI	B (μ T)		0,65	0,55	0,86	1,46	2,50	3,28	2,50	1,46	0,86	0,55	0,37

Tabla II.XIV. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración delta 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57		
CIGRE	B (μ T)		0,50	0,73	1,15	1,95	3,33	4,35	3,33	1,95	1,15	0,73	0,50
MORO TURRI	B (μ T)		0,50	0,73	1,15	1,95	3,34	4,38	3,34	1,95	1,15	0,73	0,50

Tabla II.XV. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración delta 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57		
CIGRE	B (μ T)		0,75	1,10	1,73	2,92	4,99	6,53	4,99	2,92	1,73	1,10	0,75
MORO TURRI	B (μ T)		0,75	1,10	1,74	2,95	5,08	6,69	5,08	2,95	1,74	1,10	0,75

Tabla II.XVI. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración delta 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96		
CIGRE	B (μ T)		0,39	0,59	0,97	1,78	2,87	5,40	2,87	1,78	0,97	0,59	0,39
MORO TURRI	B (μ T)		0,39	0,59	0,97	1,78	2,88	5,44	2,88	1,78	0,97	0,59	0,39

Tabla II.XVII. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración delta 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96		
CIGRE	B (μ T)		0,52	0,79	1,29	2,37	3,83	7,20	3,83	2,37	1,29	0,79	0,52
MORO TURRI	B (μ T)		0,52	0,78	1,29	2,37	3,84	7,30	3,84	2,37	1,29	0,78	0,52

Tabla II.XVIII. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración delta 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96		
CIGRE	B (μ T)		0,78	1,18	1,93	3,55	5,74	10,80	5,74	3,55	1,93	1,18	0,78
MORO TURRI	B (μ T)		0,79	1,18	1,94	3,59	5,86	11,28	5,86	3,59	1,94	1,18	0,79

402-AL1/52-ST1A (LA 455) 132 kV

Tabla II.XIX. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración delta 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7		
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	28,653	24,413	20,518	17,205	14,866	14	14,866	17,205	20,518	24,413	28,653		
CIGRE	B (μ T)		0,36	0,50	0,70	1,00	1,34	1,51	1,34	1,00	0,70	0,50	0,36
MORO TURRI	B (μ T)		0,36	0,50	0,70	1,00	1,34	1,51	1,34	1,00	0,70	0,50	0,36

Tabla II.XX. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración delta 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65	
CIGRE	B (μ T)	0,48	0,66	0,94	1,34	1,79	2,02	1,79	1,34	0,94	0,66	0,48
MORO TURRI	B (μ T)	0,48	0,66	0,94	1,33	1,79	2,02	1,79	1,33	0,94	0,66	0,48

Tabla II.XXI. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración delta 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65	
CIGRE	B (μ T)	0,72	0,99	1,41	2,00	2,68	3,02	2,68	2,00	1,41	0,99	0,72
MORO TURRI	B (μ T)	0,72	1,00	1,41	2,01	2,70	3,05	2,70	2,01	1,41	1,00	0,72

Tabla II.XXII. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración delta 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57	
CIGRE	B (μ T)	0,42	0,62	0,97	1,64	2,80	3,66	2,80	1,64	0,97	0,62	0,42
MORO TURRI	B (μ T)	0,42	0,62	0,97	1,64	2,80	3,67	2,80	1,64	0,97	0,62	0,42

Tabla II.XXIII. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración delta 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57	
CIGRE	B (μ T)	0,56	0,82	1,29	2,18	3,73	4,88	3,73	2,18	1,29	0,82	0,56
MORO TURRI	B (μ T)	0,56	0,82	1,29	2,18	3,74	4,91	3,74	2,18	1,29	0,82	0,56

Tabla II.XXIV. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración delta 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57	
CIGRE	B (μ T)	0,84	1,23	1,94	3,28	5,59	7,32	5,59	3,28	1,94	1,23	0,84
MORO TURRI	B (μ T)	0,84	1,24	1,95	3,31	5,69	7,50	5,69	3,31	1,95	1,24	0,84

Tabla II.XXV. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración delta 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	720	
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96	
CIGRE	B (μ T)	0,44	0,66	1,08	1,99	3,21	6,05	3,21	1,99	1,08	0,66	0,39
MORO TURRI	B (μ T)	0,44	0,66	1,08	1,99	3,22	6,10	3,22	1,99	1,08	0,66	0,39

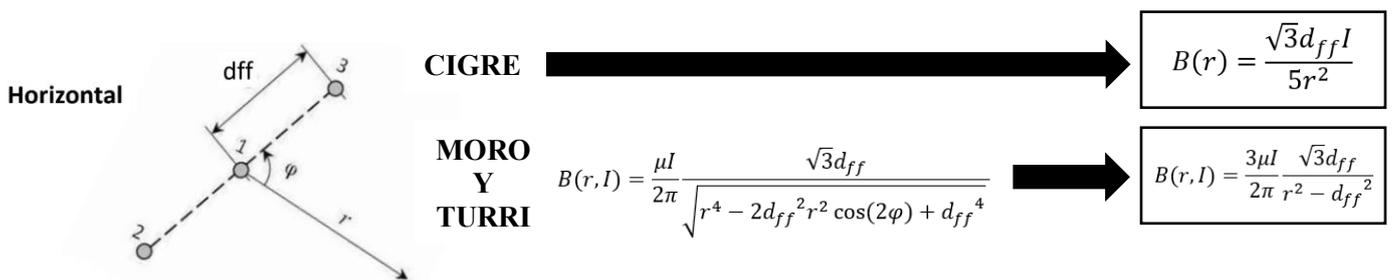
Tabla II.XXVI. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración delta 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	720	
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96	
CIGRE	B (μ T)	0,59	0,88	1,44	2,65	4,29	8,07	4,29	2,65	1,44	0,88	0,52
MORO TURRI	B (μ T)	0,58	0,88	1,44	2,66	4,31	8,18	4,31	2,66	1,44	0,88	0,52

Tabla II.XXVII. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración delta 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	720	
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96	
CIGRE	B (μ T)	0,88	1,32	2,16	3,98	6,43	12,10	6,43	3,98	2,16	1,32	0,78
MORO TURRI	B (μ T)	0,88	1,32	2,18	4,02	6,56	12,64	6,56	4,02	2,18	1,32	0,79

2. Configuración Horizontal



Donde r es la distancia al punto de medida, dff es la distancia entre fases, I la intensidad de corriente y μ es la permeabilidad magnética del vacío.

147-AL1/34-ST1A (LA 180) 45 kV

Tabla II.XXVIII. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración horizontal a 45 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65	
CIGRE	B (μ T)	0,27	0,38	0,53	0,76	1,01	1,14	1,01	0,76	0,53	0,38	0,27
MORO TURRI	B (μ T)	0,27	0,38	0,53	0,76	1,02	1,16	1,02	0,76	0,53	0,38	0,27

Tabla II.XXIX. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración horizontal 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65	
CIGRE	B (μ T)	0,36	0,50	0,71	1,01	1,35	1,52	1,35	1,01	0,71	0,50	0,36
MORO TURRI	B (μ T)	0,37	0,50	0,72	1,02	1,38	1,56	1,38	1,02	0,72	0,50	0,37

Tabla II.XXX. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración horizontal 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65	
CIGRE	B (μ T)	0,55	0,75	1,06	1,51	2,03	2,29	2,03	1,51	1,06	0,75	0,55
MORO TURRI	B (μ T)	0,55	0,76	1,09	1,56	2,11	2,40	2,11	1,56	1,09	0,76	0,55

Tabla II.XXXI. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración horizontal 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57	
CIGRE	B (μ T)	0,32	0,47	0,73	1,24	2,11	2,76	2,11	1,24	0,73	0,47	0,32
MORO TURRI	B (μ T)	0,32	0,47	0,74	1,25	2,16	2,84	2,16	1,25	0,74	0,47	0,32

Tabla II.XXXII. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración horizontal 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57	
CIGRE	B (μ T)	0,42	0,62	0,98	1,65	2,82	3,69	2,82	1,65	0,98	0,62	0,42
MORO TURRI	B (μ T)	0,43	0,63	0,99	1,69	2,93	3,88	2,93	1,69	0,99	0,63	0,43

Tabla II.XXXIII. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración horizontal 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57	
CIGRE	B (μ T)	0,63	0,93	1,46	2,47	4,23	5,53	4,23	2,47	1,46	0,93	0,63
MORO TURRI	B (μ T)	0,64	0,95	1,51	2,60	4,62	6,22	4,62	2,60	1,51	0,95	0,64

Tabla II.XXXIV. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración horizontal 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96	
CIGRE	B (μ T)	0,33	0,50	0,82	1,50	2,43	4,57	2,43	1,50	0,82	0,50	0,33
MORO TURRI	B (μ T)	0,33	0,50	0,82	1,53	2,49	4,79	2,49	1,53	0,82	0,50	0,33

Tabla II.XXXV. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración horizontal 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96	
CIGRE	B (μ T)	0,44	0,67	1,09	2,00	3,24	6,09	3,24	2,00	1,09	0,67	0,44
MORO TURRI	B (μ T)	0,45	0,67	1,11	2,06	3,39	6,64	3,39	2,06	1,11	0,67	0,45

Tabla II.XXXVI. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración horizontal 45 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96	
CIGRE	B (μ T)	0,66	1,00	1,63	3,01	4,86	9,14	4,86	3,01	1,63	1,00	0,66
MORO TURRI	B (μ T)	0,67	1,02	1,69	3,20	5,38	11,20	5,38	3,20	1,69	1,02	0,67

337-AL1/44-ST1A (LA 380) 66 kV

Tabla II.XXXVII. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración horizontal 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65	
CIGRE	B (μ T)	0,46	0,63	0,89	1,26	1,69	1,91	1,69	1,26	0,89	0,63	0,46
MORO TURRI	B (μ T)	0,46	0,63	0,89	1,27	1,71	1,93	1,71	1,27	0,89	0,63	0,46

Tabla II.XXXVIII. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración horizontal 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65		
CIGRE	B (μ T)		0,61	0,84	1,18	1,69	2,26	2,55	2,26	1,69	1,18	0,84	0,61
MORO TURRI	B (μ T)		0,61	0,84	1,20	1,71	2,30	2,60	2,30	1,71	1,20	0,84	0,61

Tabla II.XXXIX. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración horizontal 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65		
CIGRE	B (μ T)		0,91	1,26	1,78	2,53	3,39	3,82	3,39	2,53	1,78	1,26	0,91
MORO TURRI	B (μ T)		0,92	1,27	1,82	2,61	3,53	4,00	3,53	2,61	1,82	1,27	0,92

Tabla II.XL. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración horizontal 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57		
CIGRE	B (μ T)		0,53	0,78	1,22	2,07	3,53	4,62	3,53	2,07	1,22	0,78	0,53
MORO TURRI	B (μ T)		0,53	0,78	1,23	2,09	3,61	4,75	3,61	2,09	1,23	0,78	0,53

Tabla II.XLI. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración horizontal 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57		
CIGRE	B (μ T)		0,71	1,04	1,63	2,76	4,71	6,16	4,71	2,76	1,63	1,04	0,71
MORO TURRI	B (μ T)		0,71	1,05	1,65	2,82	4,89	6,48	4,89	2,82	1,65	1,05	0,71

Tabla II.XLII. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración horizontal 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57		
CIGRE	B (μ T)		1,06	1,56	2,45	4,13	7,06	9,24	7,06	4,13	2,45	1,56	1,06
MORO TURRI	B (μ T)		1,07	1,59	2,52	4,35	7,71	10,39	7,71	4,35	2,52	1,59	1,07

Tabla II.XLIII. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración horizontal 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96		
CIGRE	B (μ T)		0,56	0,83	1,37	2,51	4,06	7,64	4,06	2,51	1,37	0,83	0,56
MORO TURRI	B (μ T)		0,56	0,84	1,38	2,55	4,16	8,00	4,16	2,55	1,38	0,84	0,56

Tabla II.XLIV. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración horizontal 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96		
CIGRE	B (μ T)		0,74	1,11	1,82	3,35	5,41	10,18	5,41	3,35	1,82	1,11	0,74
MORO TURRI	B (μ T)		0,74	1,12	1,85	3,44	5,66	11,09	5,66	3,44	1,85	1,12	0,74

Tabla II.XLV. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración horizontal 66 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720		
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96		
CIGRE	B (μ T)		1,11	1,67	2,73	5,02	8,12	15,27	8,12	5,02	2,73	1,67	1,11
MORO TURRI	B (μ T)		1,13	1,70	2,82	5,34	8,99	18,71	8,99	5,34	2,82	1,70	1,13

402-AL1/52-ST1A (LA 455) 132 kV

Tabla II.XLVI. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración horizontal 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7		
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65		
CIGRE	B (μ T)		0,51	0,70	1,00	1,42	1,90	2,14	1,90	1,42	1,00	0,70	0,51
MORO TURRI	B (μ T)		0,51	0,71	1,00	1,43	1,92	2,16	1,92	1,43	1,00	0,71	0,51

Tabla II.XLVII. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración horizontal 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7		
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65		
CIGRE	B (μ T)		0,68	0,94	1,33	1,89	2,53	2,85	2,53	1,89	1,33	0,94	0,68
MORO TURRI	B (μ T)		0,68	0,94	1,34	1,91	2,58	2,91	2,58	1,91	1,34	0,94	0,68

Tabla II.XLVIII. Resultados a una altura de 15 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración horizontal 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7		
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	28,65	24,41	20,52	17,20	14,87	14,00	14,87	17,20	20,52	24,41	28,65		
CIGRE	B (μ T)		1,02	1,41	1,99	2,83	3,79	4,28	3,79	2,83	1,99	1,41	1,02
MORO TURRI	B (μ T)		1,03	1,43	2,03	2,92	3,95	4,48	3,95	2,92	2,03	1,43	1,03

Tabla II.XLIX. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración horizontal 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7		
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57		
CIGRE	B (μ T)		0,59	0,87	1,37	2,32	3,95	5,17	3,95	2,32	1,37	0,87	0,59
MORO TURRI	B (μ T)		0,60	0,88	1,38	2,35	4,04	5,32	4,04	2,35	1,38	0,88	0,60

Tabla II.L. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración horizontal 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25		
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7		
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26		
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57		
CIGRE	B (μ T)		0,79	1,16	1,83	3,09	5,27	6,90	5,27	3,09	1,83	1,16	0,79
MORO TURRI	B (μ T)		0,80	1,17	1,85	3,16	5,48	7,26	5,48	3,16	1,85	1,17	0,80

Tabla II.LI. Resultados a una altura de 10 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración horizontal 132 a kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)	26,57	21,93	17,49	13,45	10,30	9,00	10,30	13,45	17,49	21,93	26,57
CIGRE	B (μ T)	1,19	1,74	2,74	4,63	7,91	10,35	7,91	4,63	2,74	1,19
MORO TURRI	B (μ T)	1,20	1,78	2,82	4,87	8,64	11,64	8,64	4,87	2,82	1,20

Tabla II.LII. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 1,5 m para la configuración horizontal 132 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	720
dff (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)	25,962	21,190	16,553	12,207	9,602	7	9,602	12,207	16,553	21,190	25,962
CIGRE	B (μ T)	0,62	0,93	1,53	2,81	4,55	8,55	4,55	2,81	1,53	0,93
MORO TURRI	B (μ T)	0,62	0,94	1,54	2,86	4,66	8,97	4,66	2,86	1,54	0,94

Tabla II.LIII. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 2 m para la configuración horizontal a 132 kV

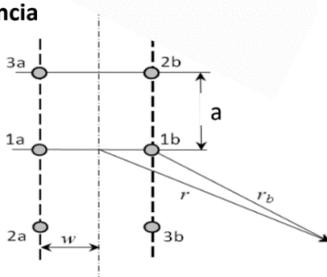
Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	720
dff (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)	25,96	21,19	16,55	12,21	9,60	7,00	9,60	12,21	16,55	21,19	25,96
CIGRE	B (μ T)	0,83	1,24	2,04	3,75	6,06	11,41	6,06	3,75	2,04	0,74
MORO TURRI	B (μ T)	0,83	1,26	2,07	3,85	6,34	12,42	6,34	3,85	2,07	0,74

Tabla II.LIV. Resultados a una altura de 8 m y distancia entre fases de 3 m para la configuración horizontal a 132 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	720
dff (m)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)	25,962	21,190	16,553	12,207	9,602	7	9,602	12,207	16,553	21,190	25,962
CIGRE	B (μ T)	1,24	1,87	3,06	5,63	9,09	17,11	9,09	5,63	3,06	1,11
MORO TURRI	B (μ T)	1,26	1,91	3,16	5,99	10,08	20,96	10,08	5,99	3,16	1,13

3. Configuración de Baja Reactancia

Baja Reactancia



CIGRE

MORO
Y
TURRI

$$B(r, I) = \frac{\mu I a \sqrt{a^2 + 12w^2}}{\pi r^3} + \frac{\mu \Delta I \sqrt{3}a}{\pi r_b^2 - a^2}$$

$$B(r, I) = \frac{2d_{ff}I}{5r^3} \sqrt{d_{ff}^2 + 3s^2}$$

$$B_{br}(r, I) = \frac{\mu a I \sqrt{a^2 + 12w^2}}{\pi r^3}$$

Donde r es la distancia al punto de medida desde el centro geométrico, I la intensidad de corriente, μ es la permeabilidad magnética del vacío, a es la distancia entre dos conductores de un mismo circuito (equivalente a d_{ff}), w es la distancia desde el conductor al eje de simetría y s es la distancia entre ambos circuitos ($s=2w$).

402-AL1/52-ST1A (LA 455) 132 kV

Tabla II.LV. Resultados a una altura de 15 m, distancia entre conductores del mismo circuito 1,5 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración de baja reactancia a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		28,64	24,41	20,52	17,21	14,89	13,94	14,89	17,21	20,52	24,41	28,64
CIGRE	B (μ T)	0,08	0,13	0,21	0,36	0,55	0,68	0,55	0,36	0,21	0,13	0,08
MORO TURRI	B (μ T)	0,08	0,13	0,21	0,36	0,55	0,68	0,55	0,36	0,21	0,13	0,08

Tabla II.LVI. Resultados a una altura de 15 m, distancia entre conductores del mismo circuito 2 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración de baja reactancia a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		28,64	24,41	20,52	17,21	14,89	13,94	14,89	17,21	20,52	24,41	28,64
CIGRE	B (μ T)	0,11	0,18	0,30	0,51	0,78	0,95	0,78	0,51	0,30	0,18	0,11
MORO TURRI	B (μ T)	0,11	0,18	0,30	0,51	0,78	0,95	0,78	0,51	0,30	0,18	0,11

Tabla II.LVII. Resultados a una altura de 15 m, distancia entre conductores del mismo circuito 4 m y distancia al eje de simetría de 2,5 m para la configuración de baja reactancia a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
w (m)		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		28,60	24,37	20,51	17,27	15,03	14,12	15,03	17,27	20,51	24,37	28,60
CIGRE	B (μ T)	0,53	0,85	1,43	2,39	3,63	4,37	3,63	2,39	1,43	0,85	0,53
MORO TURRI	B (μ T)	0,53	0,85	1,43	2,39	3,63	4,37	3,63	2,39	1,43	0,85	0,53

Tabla II.LVIII. Resultados a una altura de 10 m, distancia entre conductores del mismo circuito 1,5 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración de baja reactancia a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		26,56	21,92	17,48	13,45	10,32	8,96	10,32	13,45	17,48	21,92	26,56
CIGRE	B (μ T)	0,10	0,17	0,34	0,75	1,66	2,54	1,66	0,75	0,34	0,17	0,10
MORO TURRI	B (μ T)	0,10	0,17	0,34	0,75	1,66	2,54	1,66	0,75	0,34	0,17	0,10

Tabla II.LIX. Resultados a una altura de 10 m, distancia entre conductores del mismo circuito 2 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración de baja reactancia a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		26,56	21,92	17,48	13,45	10,32	8,96	10,32	13,45	17,48	21,92	26,56
CIGRE	B (μ T)	0,14	0,25	0,48	1,06	2,35	3,59	2,35	1,06	0,48	0,25	0,14
MORO TURRI	B (μ T)	0,14	0,25	0,48	1,06	2,35	3,59	2,35	1,06	0,48	0,25	0,14

Tabla II.LX. Resultados a una altura de 10 m, distancia entre conductores del mismo circuito 4 m y distancia al eje de simetría de 2,5 m para la configuración de baja reactancia a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
w (m)		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		26,48	21,84	17,41	13,43	10,46	9,24	10,46	13,43	17,41	21,84	26,48
CIGRE	B (μ T)	0,66	1,18	2,33	5,08	10,76	15,58	10,76	5,08	2,33	1,18	0,66
MORO TURRI	B (μ T)	0,66	1,18	2,33	5,08	10,76	15,58	10,76	5,08	2,33	1,18	0,66

Tabla II.LXI. Resultados a una altura de 8 m, distancia entre conductores del mismo circuito 1,5 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración de baja reactancia a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		25,95	21,17	16,53	12,19	8,62	6,97	8,62	12,19	16,53	21,17	25,95
CIGRE	B (μ T)	0,10	0,19	0,40	1,01	2,85	5,39	2,85	1,01	0,40	0,19	0,10
MORO TURRI	B (μ T)	0,10	0,19	0,40	1,01	2,85	5,39	2,85	1,01	0,40	0,19	0,10

Tabla II.LXII. Resultados a una altura de 8 m, distancia entre conductores del mismo circuito 2 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración de baja reactancia a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		25,95	21,17	16,53	12,19	8,62	6,97	8,62	12,19	16,53	21,17	25,95
CIGRE	B (μ T)	0,15	0,27	0,57	1,42	4,03	7,62	4,03	1,42	0,57	0,27	0,15
MORO TURRI	B (μ T)	0,15	0,27	0,57	1,42	4,03	7,62	4,03	1,42	0,57	0,27	0,15

Tabla II.LXIII. Resultados a una altura de 8 m, distancia entre conductores del mismo circuito 4 m y distancia al eje de simetría de 2,5 m para la configuración de baja reactancia a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
w (m)		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		25,86	21,07	16,43	12,12	8,73	7,34	8,73	12,12	16,43	21,07	25,86
CIGRE	B (μ T)	0,71	1,32	2,77	6,91	18,49	31,15	18,49	6,91	2,77	1,32	0,71
MORO TURRI	B (μ T)	0,71	1,32	2,77	6,91	18,49	31,15	18,49	6,91	2,77	1,32	0,71

806-AL1/56-ST1A (LA 860) 220 kV

Tabla II.LXIV. Resultados a una altura de 15 m, distancia entre conductores del mismo circuito 1,5 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración de baja reactancia a 220 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		28,64	24,41	20,52	17,21	14,89	13,94	14,89	17,21	20,52	24,41	28,64
CIGRE	B (μ T)	0,10	0,17	0,28	0,48	0,74	0,90	0,74	0,48	0,28	0,17	0,10
MORO TURRI	B (μ T)	0,10	0,17	0,28	0,48	0,74	0,90	0,74	0,48	0,28	0,17	0,10

Tabla II.LXV. Resultados a una altura de 15 m, distancia entre conductores del mismo circuito 2 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración de baja reactancia a 220 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		28,64	24,41	20,52	17,21	14,89	13,94	14,89	17,21	20,52	24,41	28,64
CIGRE	B (μ T)	0,15	0,24	0,40	0,68	1,04	1,27	1,04	0,68	0,40	0,24	0,15
MORO TURRI	B (μ T)	0,15	0,24	0,40	0,68	1,04	1,27	1,04	0,68	0,40	0,24	0,15

Tabla II.LXVI. Resultados a una altura de 15 m, distancia entre conductores del mismo circuito 4 m y distancia al eje de simetría de 2,5 m para la configuración de baja reactancia a 220 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
w (m)		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		28,60	24,37	20,51	17,27	15,03	14,12	15,03	17,27	20,51	24,37	28,60
CIGRE	B (μ T)	0,70	1,14	1,91	3,19	4,84	5,84	4,84	3,19	1,91	1,14	0,70
MORO TURRI	B (μ T)	0,70	1,14	1,91	3,19	4,84	5,84	4,84	3,19	1,91	1,14	0,70

Tabla II.LXVII. Resultados a una altura de 10 m, distancia entre conductores del mismo circuito 1,5 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración de baja reactancia a 220 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		26,56	21,92	17,48	13,45	10,32	8,96	10,32	13,45	17,48	21,92	26,56
CIGRE	B (μ T)	0,13	0,23	0,46	1,00	2,22	3,40	2,22	1,00	0,46	0,23	0,13
MORO TURRI	B (μ T)	0,13	0,23	0,46	1,00	2,22	3,40	2,22	1,00	0,46	0,23	0,13

Tabla II.LXVIII. Resultados a una altura de 10 m, distancia entre conductores del mismo circuito 2 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración de baja reactancia a 220 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		26,56	21,92	17,48	13,45	10,32	8,96	10,32	13,45	17,48	21,92	26,56
CIGRE	B (μ T)	0,18	0,33	0,65	1,42	3,13	4,80	3,13	1,42	0,65	0,33	0,18
MORO TURRI	B (μ T)	0,18	0,33	0,65	1,42	3,13	4,80	3,13	1,42	0,65	0,33	0,18

Tabla II.LXIX. Resultados a una altura de 10 m, distancia entre conductores del mismo circuito 4 m y distancia al eje de simetría de 2,5 m para la configuración de baja reactancia a 220 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
w (m)		2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		26,48	21,84	17,41	13,43	10,46	9,24	10,46	13,43	17,41	21,84	26,48
CIGRE	B (μ T)	0,89	1,58	3,11	6,78	14,36	20,81	14,36	6,78	3,11	1,58	0,89
MORO TURRI	B (μ T)	0,89	1,58	3,11	6,78	14,36	20,81	14,36	6,78	3,11	1,58	0,89

Tabla II.LXX. Resultados a una altura de 8 m, distancia entre conductores del mismo circuito 1,5 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración de baja reactancia a 220 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		25,95	21,17	16,53	12,19	8,62	6,97	8,62	12,19	16,53	21,17	25,95
CIGRE	B (μ T)	0,14	0,26	0,54	1,35	3,81	7,20	3,81	1,35	0,54	0,26	0,14
MORO TURRI	B (μ T)	0,14	0,26	0,54	1,35	3,81	7,20	3,81	1,35	0,54	0,26	0,14

Tabla II.LXXI. Resultados a una altura de 8 m, distancia entre conductores del mismo circuito 2 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración de baja reactancia a 220 kV

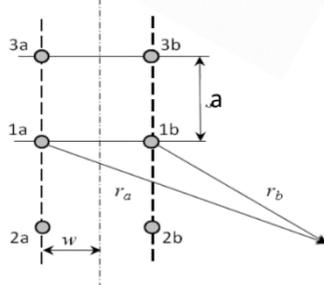
Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		25,95	21,17	16,53	12,19	8,62	6,97	8,62	12,19	16,53	21,17	25,95
CIGRE	B (μ T)	0,20	0,36	0,76	1,90	5,38	10,17	5,38	1,90	0,76	0,36	0,20
MORO TURRI	B (μ T)	0,20	0,36	0,76	1,90	5,38	10,17	5,38	1,90	0,76	0,36	0,20

Tabla II.LXXII. Resultados a una altura de 8 m, distancia entre conductores del mismo circuito 4 m y distancia al eje de simetría de 2,5 m para la configuración de baja reactancia a 220 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
w (m)		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		25,86	21,07	16,43	12,12	8,73	7,34	8,73	12,12	16,43	21,07	25,86
CIGRE	B (μ T)	0,95	1,76	3,70	9,23	24,69	41,59	24,69	9,23	3,70	1,76	0,95
MORO TURRI	B (μ T)	0,95	1,76	3,70	9,23	24,69	41,59	24,69	9,23	3,70	1,76	0,95

4. Configuración en Super-Bundle

SuperBundle



CIGRE

MORO
Y
TURRI



$$B(r) = \frac{2\sqrt{3}d_{ff}I}{5r^2}$$

$$b(I_a, I_b, r_a, r_b) = \frac{\sqrt{3}a\mu}{2\pi} \left(\frac{I_a}{r_a^2 - a^2} + \frac{I_b}{r_b^2 - a^2} \right)$$

$$B_{spb}(r, I) = \frac{\mu a \sqrt{3}}{\pi} \frac{I}{r^2 - a^2}$$

Donde r es la distancia al punto de medida desde el centro geométrico ($r = \sqrt{r_a r_b}$), I la intensidad de corriente, μ es la permeabilidad magnética del vacío y a es la distancia entre dos conductores de un mismo circuito (equivalente a d_{ff}).

402-AL1/52-ST1A (LA 455) 132 kV

Tabla II.LXXIII. Resultados a una altura de 15 m, distancia entre conductores del mismo circuito 1,5 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración super-bundle a 132 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	
a (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
w (m)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,64	24,41	20,52	17,21	14,89	13,94	14,89	17,21	20,52	24,41	28,64	
CIGRE	B (μ T)	1,02	1,41	1,99	2,83	3,78	4,32	3,78	2,83	1,99	1,41	1,02
MORO TURRI	B (μ T)	1,02	1,41	2,00	2,85	3,82	4,37	3,82	2,85	2,00	1,41	1,02

Tabla II.LXXIV. Resultados a una altura de 15 m, distancia entre conductores del mismo circuito 2 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración super-bundle a 132 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	
a (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
w (m)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,64	24,41	20,52	17,21	14,89	13,94	14,89	17,21	20,52	24,41	28,64	
CIGRE	B (μ T)	1,36	1,88	2,66	3,77	5,04	5,76	5,04	3,77	2,66	1,88	1,36
MORO TURRI	B (μ T)	1,37	1,89	2,68	3,82	5,13	5,88	5,13	3,82	2,68	1,89	1,37

Tabla II.LXXV. Resultados a una altura de 15 m, distancia entre conductores del mismo circuito 4 m y distancia al eje de simetría de 2,5 m para la configuración super-bundle a 132 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	
a (m)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
w (m)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,60	24,37	20,51	17,27	15,03	14,12	15,03	17,27	20,51	24,37	28,60	
CIGRE	B (μ T)	2,73	3,76	5,32	7,50	9,90	11,21	9,90	7,50	5,32	3,76	2,73
MORO TURRI	B (μ T)	2,79	3,87	5,53	7,93	10,65	12,19	10,65	7,93	5,53	3,87	2,79

Tabla II.LXXVI. Resultados a una altura de 10 m, distancia entre conductores del mismo circuito 1,5 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración super-bundle a 132 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	
a (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
w (m)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,56	21,92	17,48	13,45	10,32	8,96	10,32	13,45	17,48	21,92	26,56	
CIGRE	B (μ T)	1,19	1,75	2,74	4,63	7,87	10,45	7,87	4,63	2,74	1,75	1,19
MORO TURRI	B (μ T)	1,19	1,75	2,76	4,69	8,04	10,75	8,04	4,69	2,76	1,75	1,19

Tabla II.LXXVII. Resultados a una altura de 10 m, distancia entre conductores del mismo circuito 2 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración super-bundle a 132 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	
a (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
w (m)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,56	21,92	17,48	13,45	10,32	8,96	10,32	13,45	17,48	21,92	26,56	
CIGRE	B (μ T)	1,59	2,33	3,66	6,18	10,49	13,94	10,49	6,18	3,66	2,33	1,59
MORO TURRI	B (μ T)	1,59	2,35	3,71	6,32	10,90	14,67	10,90	6,32	3,71	2,35	1,59

Tabla II.LXXVIII. Resultados a una altura de 10 m, distancia entre conductores del mismo circuito 4 m y distancia al eje de simetría de 2,5 m para la configuración super-bundle a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
w (m)		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		26,48	21,84	17,41	13,43	10,46	9,24	10,46	13,43	17,41	21,84	26,48
CIGRE	B (μ T)	3,19	4,69	7,38	12,39	20,43	26,16	20,43	12,39	7,38	4,69	3,19
MORO TURRI	B (μ T)	3,26	4,85	7,79	13,59	23,93	32,18	23,93	13,59	7,79	4,85	3,26

Tabla II.LXXIX. Resultados a una altura de 8 m, distancia entre conductores del mismo circuito 1,5 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración super-bundle a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		25,95	21,17	16,53	12,19	8,62	6,97	8,62	12,19	16,53	21,17	25,95
CIGRE	B (μ T)	1,25	1,87	3,07	5,64	11,28	17,25	11,28	5,64	3,07	1,87	1,25
MORO TURRI	B (μ T)	1,25	1,88	3,09	5,73	11,63	18,08	11,63	5,73	3,09	1,88	1,25

Tabla II.LXXX. Resultados a una altura de 8 m, distancia entre conductores del mismo circuito 2 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración super-bundle a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		25,95	21,17	16,53	12,19	8,62	6,97	8,62	12,19	16,53	21,17	25,95
CIGRE	B (μ T)	1,66	2,49	4,09	7,52	15,04	23,00	15,04	7,52	4,09	2,49	1,66
MORO TURRI	B (μ T)	1,67	2,52	4,15	7,73	15,89	25,06	15,89	7,73	4,15	2,52	1,67

Tabla II.LXXXI. Resultados a una altura de 8 m, distancia entre conductores del mismo circuito 4 m y distancia al eje de simetría de 2,5 m para la configuración super-bundle a 132 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7	806,7
a (m)		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
w (m)		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		25,86	21,07	16,43	12,12	8,73	7,34	8,73	12,12	16,43	21,07	25,86
CIGRE	B (μ T)	3,34	5,03	8,28	15,21	29,32	41,51	29,32	15,21	8,28	5,03	3,34
MORO TURRI	B (μ T)	3,43	5,22	8,80	17,07	37,10	59,05	37,10	17,07	8,80	5,22	3,43

806-AL1/56-ST1A (LA 860) 220 kV

Tabla II.LXXXII. Resultados a una altura de 15 m, distancia entre conductores del mismo circuito 1,5 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración super-bundle a 220 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		28,64	24,41	20,52	17,21	14,89	13,94	14,89	17,21	20,52	24,41	28,64
CIGRE	B (μ T)	1,36	1,88	2,66	3,78	5,05	5,76	5,05	3,78	2,66	1,88	1,36
MORO TURRI	B (μ T)	1,37	1,89	2,67	3,81	5,10	5,83	5,10	3,81	2,67	1,89	1,37

Tabla II.LXXXIII. Resultados a una altura de 15 m, distancia entre conductores del mismo circuito 2 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración super-bundle a 220 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	
a (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
w (m)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,64	24,41	20,52	17,21	14,89	13,94	14,89	17,21	20,52	24,41	28,64	
CIGRE	B (μ T)	1,82	2,51	3,55	5,04	6,73	7,68	6,73	5,04	3,55	2,51	1,82
MORO TURRI	B (μ T)	1,83	2,52	3,58	5,11	6,85	7,85	6,85	5,11	3,58	2,52	1,83

Tabla II.LXXXIV. Resultados a una altura de 15 m, distancia entre conductores del mismo circuito 4 m y distancia al eje de simetría de 2,5 m para la configuración super-bundle a 220 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	
a (m)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
w (m)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	28,60	24,37	20,51	17,27	15,03	14,12	15,03	17,27	20,51	24,37	28,60	
CIGRE	B (μ T)	3,65	5,03	7,10	10,01	13,21	14,96	13,21	10,01	7,10	5,03	3,65
MORO TURRI	B (μ T)	3,72	5,16	7,38	10,58	14,22	16,27	14,22	10,58	7,38	5,16	3,72

Tabla II.LXXXV. Resultados a una altura de 10 m, distancia entre conductores del mismo circuito 1,5 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración super-bundle a 220 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	
a (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
w (m)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,56	21,92	17,48	13,45	10,32	8,96	10,32	13,45	17,48	21,92	26,56	
CIGRE	B (μ T)	1,59	2,33	3,66	6,19	10,51	13,95	10,51	6,19	3,66	2,33	1,59
MORO TURRI	B (μ T)	1,59	2,34	3,69	6,27	10,73	14,36	10,73	6,27	3,69	2,34	1,59

Tabla II.LXXXVI. Resultados a una altura de 10 m, distancia entre conductores del mismo circuito 2 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración super-bundle a 220 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	
a (m)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
w (m)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,56	21,92	17,48	13,45	10,32	8,96	10,32	13,45	17,48	21,92	26,56	
CIGRE	B (μ T)	2,12	3,11	4,88	8,25	14,01	18,61	14,01	8,25	4,88	3,11	2,12
MORO TURRI	B (μ T)	2,13	3,13	4,95	8,44	14,55	19,58	14,55	8,44	4,95	3,13	2,13

Tabla II.LXXXVII. Resultados a una altura de 10 m, distancia entre conductores del mismo circuito 4 m y distancia al eje de simetría de 2,5 m para la configuración super-bundle a 220 kV

Distancia a la línea (m)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Intensidad (A)	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	
a (m)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
w (m)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
μ (μ T)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	
r (m)	26,48	21,84	17,41	13,43	10,46	9,24	10,46	13,43	17,41	21,84	26,48	
CIGRE	B (μ T)	4,26	6,26	9,85	16,54	27,27	34,92	27,27	16,54	9,85	6,26	4,26
MORO TURRI	B (μ T)	4,36	6,48	10,40	18,15	31,95	42,97	31,95	18,15	10,40	6,48	4,36

Tabla II.LXXXVIII. Resultados a una altura de 8 m, distancia entre conductores del mismo circuito 1,5 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración super-bundle a 220 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		25,95	21,17	16,53	12,19	8,62	6,97	8,62	12,19	16,53	21,17	25,95
CIGRE	B (μ T)	1,66	2,50	4,09	7,53	15,06	23,03	15,06	7,53	4,09	2,50	1,66
MORO TURRI	B (μ T)	1,67	2,51	4,13	7,64	15,53	24,14	15,53	7,64	4,13	2,51	1,67

Tabla II.LXXXIX. Resultados a una altura de 8 m, distancia entre conductores del mismo circuito 2 m y distancia al eje de simetría de 1 m para la configuración super-bundle a 220 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
w (m)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		25,95	21,17	16,53	12,19	8,62	6,97	8,62	12,19	16,53	21,17	25,95
CIGRE	B (μ T)	2,22	3,33	5,46	10,04	20,08	30,70	20,08	10,04	5,46	3,33	2,22
MORO TURRI	B (μ T)	2,23	3,36	5,54	10,32	21,22	33,45	21,22	10,32	5,54	3,36	2,23

Tabla II.XC. Resultados a una altura de 8 m, distancia entre conductores del mismo circuito 4 m y distancia al eje de simetría de 2,5 m para la configuración super-bundle a 220 kV

Distancia a la línea (m)		-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
Intensidad (A)		1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077	1077
a (m)		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
w (m)		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
μ (μ T)		1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
r (m)		25,86	21,07	16,43	12,12	8,73	7,34	8,73	12,12	16,43	21,07	25,86
CIGRE	B (μ T)	4,46	6,72	11,05	20,31	39,14	55,42	39,14	20,31	11,05	6,72	4,46
MORO TURRI	B (μ T)	4,57	6,97	11,75	22,79	49,53	78,84	49,53	22,79	11,75	6,97	4,57

ANEXO III: SIMULACIÓN CON CRMAG+

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN AL CRMAG+	92
2. PASOS SEGUIDOS EN EL ANÁLISIS CON CRMAG+.....	93
3. REFERENCIAS.....	99

1. Introducción al CRMag+

El software empleado para la simulación de los campos magnéticos producidos en líneas de alta tensión es CRMag+ [1], este programa nos permite cuantificar el campo magnético en instalaciones, transformadores y líneas aéreas de alta tensión. Fue creado por el Dr. Carlos Roldán Blay y el Dr. Carlos Roldán Porta como parte del proyecto CREMIE [2]. En 2017, ambos autores comenzaron a desarrollar los modelos numéricos y la primera versión del software CRMag. Más tarde, en 2020, con la necesidad de adecuar CRMag a las ingenierías y al mundo empresarial, publicaron un trabajo de investigación sobre el software [3]. Finalmente, en 2021 desarrollaron el software completo, CRMag+ con la colaboración de la Universidad Jaume I y de la empresa Ingenix Automation S.L.

El software en modo líneas aéreas presenta una interfaz sencilla, intuitiva y con bastantes herramientas que son de utilidad para complementar informes sobre el impacto de los campos magnéticos (Fig. 3.1). Además, cuenta con un manual de usuario muy útil para familiarizarse con el software [4].

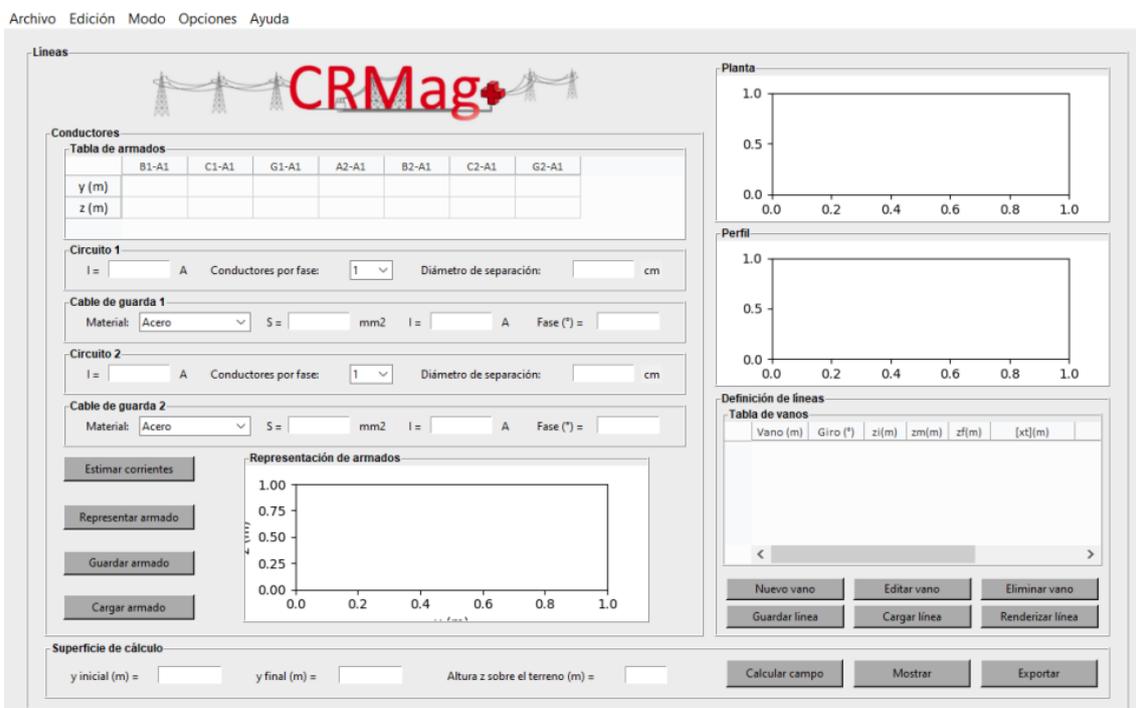


Figura 3.1. Interfaz de CRMag+ en modo línea.

Algunas de las herramientas que introduce el software nos permiten, entre otras cosas, mostrar la configuración del armado de los conductores (Fig. 3.2,a), visualizar el perfil de los vanos (Fig. 3.2,b) y ver las gráficas del campo magnético respecto al eje transversal y longitudinal (Fig. 3.2,c). También el software nos permite representar mediante renders 3D el vano y la superficie del campo magnético (Fig. 3.2,d).

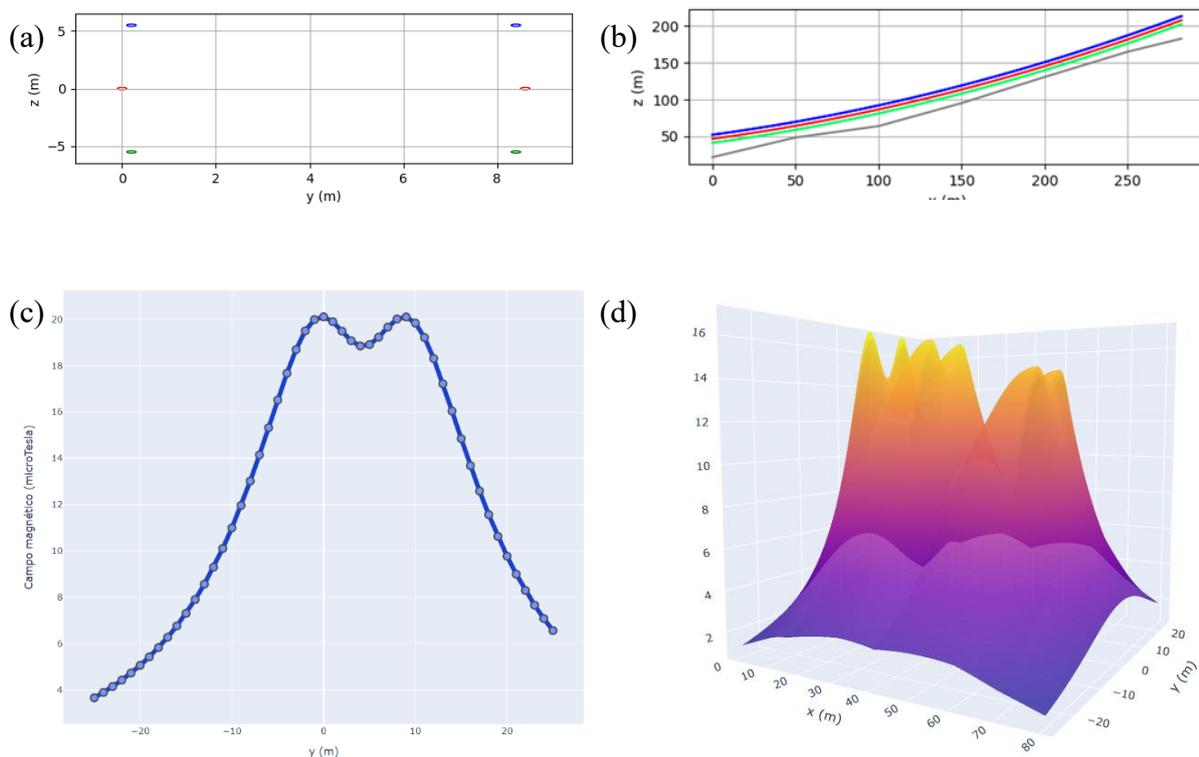


Figura 3.2. a) Representación de la configuración del armado de los conductores b) Representación del vano y del terreno para el primer tramo de línea estudiada c) Gráfica del campo magnético con corte en el eje X d) Superficie del campo magnético en un tramo de línea

2. Pasos seguidos en el análisis con CRMag+

En primer lugar, se analizaron las LAT presentes en Tenerife para, a continuación, elegir una para su estudio. Dadas las características de la red eléctrica canaria son pocas las LAT de 220 kV que encontramos en el archipiélago. La LAT elegida es la línea que une la subestación de Las Caletillas con la subestación de El Rosario, en la figura 3.3 se muestra la ubicación de la LAT con una longitud aproximada de 7,6 km.



Figura 3.3. Ubicación geográfica de la LAT analizada desde la subestación de las Caletillas hasta el final del tramo aéreo.

Se ha elegido esta LAT con configuración de doble circuito por ser la más reciente en entrar en funcionamiento y por contar con un estudio de impacto ambiental que elaboró la empresa Biosfera XXI en el año 2010 [5]. Este estudio nos puede servir para obtener los datos de partida y realizar una simulación más realista. Los datos de partida se pueden observar en la Tabla III.I.

Tabla III.I. Datos generales del tramo aéreo de la línea Caletillas-El Rosario

Intensidad.	1120 A
Sección	454,5 mm ²
Capacidad térmica de transporte.	447 MVA
Nº de circuitos.	2
Nº de conductores por fases.	1
Conductor.	Condor AW
Altura de montaje.	20 m
Nº de apoyos	27
Tipo de Armado	Drago H51

Además, se ha supuesto que se utiliza una configuración de doble circuito super-bundle. Los parámetros del armado tipo Drago H51 se pueden ver en la figura 3.4.

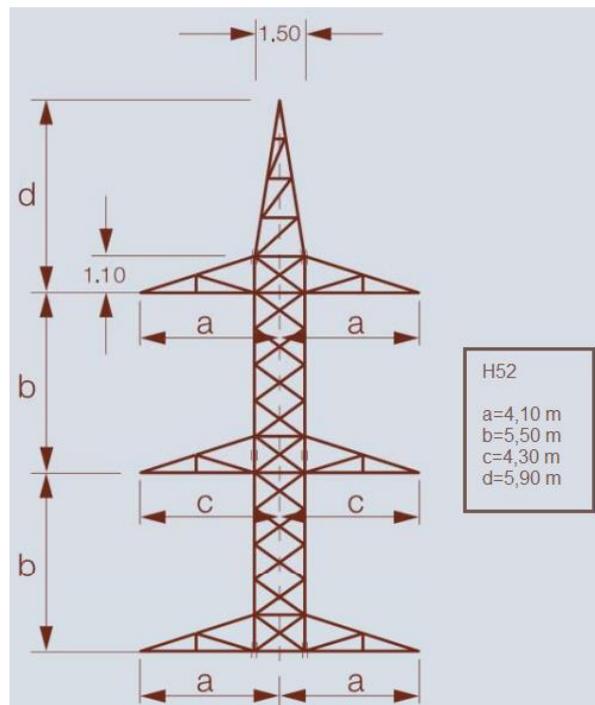


Figura 3.4. Dimensiones del armado de conductores utilizados, editado del manual DRAGO

Con todos estos datos, lo primero que hacemos con el programa es crear el armado con las distintas dimensiones indicadas en la figura 3.4. Además, hay que destacar que el software considera que el conductor A1 se encuentra en el origen de coordenadas. Al introducir los datos del armado, el software nos lo representa como se muestra en la figura 3.2,a. En la

Tabla III.II podemos ver la ventana en la que se introducen los datos del armado en CRMag+.

Tabla III.II. Ventana del programa para introducir las coordenadas de los conductores para el armado.

	B1-A1	C1-A1	G1-A1	A2-A1	B2-A1	C2-A1	G2-A1
y (m)							
z (m)							

Una vez se tiene el armado, pasamos a definir los vanos de cada uno de los tramos. Para ello, primero hay que definir el terreno y posteriormente indicar las cotas de cada uno de los apoyos que componen el tramo. El programa, a la hora de definir el terreno, nos deja introducir los datos de forma manual desde un fichero DXF (AutoCAD y similares) o con un fichero CSV (bases de datos cartográficas). Para la línea a simular, introducimos de forma manual los datos con la ayuda del visor de GRAFCAN, ya que cuenta con información de LIDAR que permite obtener los perfiles de pendiente del terreno seleccionado. En la figura 3.5 podemos ver un ejemplo utilizando estos datos para obtener las cotas de los apoyos en los dos primeros tramos de la línea.

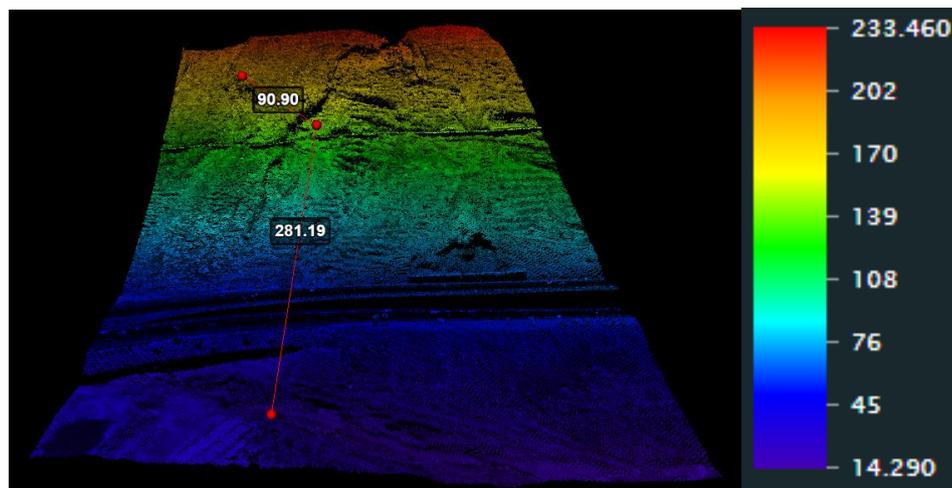
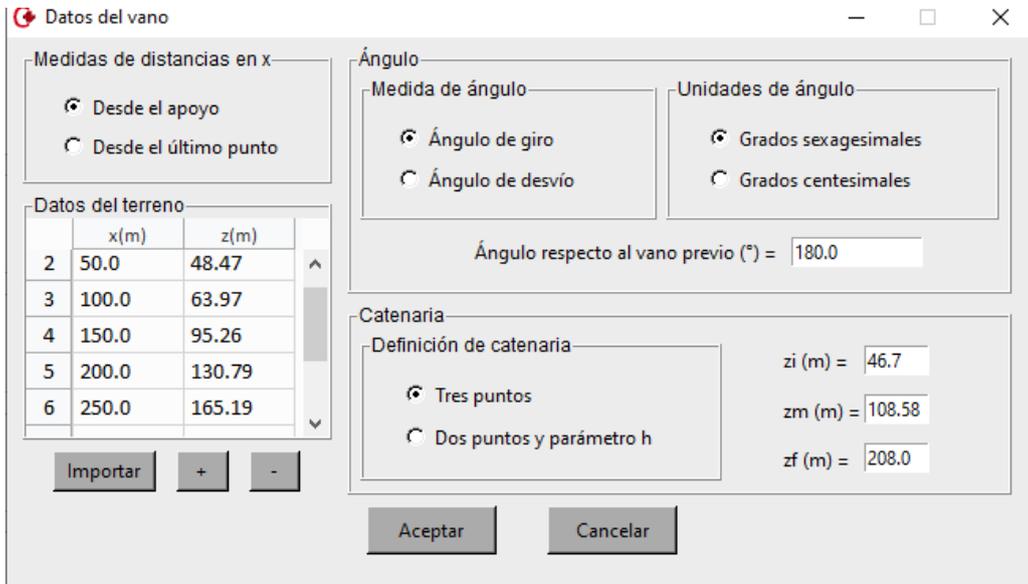


Figura 3.5. Desnivel del terreno donde se ubican los dos primeros tramos con LIDAR

En la figura 3.5, cuando ponemos el cursor del ratón sobre uno de los puntos, nos aparece en pantalla la cota y la longitud entre cada punto.

Este proceso se repite con los 26 vanos (27 apoyos) donde, aparte de obtener las cotas de los apoyos, se han apuntado las del terreno cada 50 metros, todo esto justo debajo de la línea. En la figura 3.6 podemos ver un ejemplo de los datos que definen el primer vano.



Datos del vano

Medidas de distancias en x

Desde el apoyo
 Desde el último punto

Datos del terreno

	x(m)	z(m)
2	50.0	48.47
3	100.0	63.97
4	150.0	95.26
5	200.0	130.79
6	250.0	165.19

Ángulo

Medida de ángulo

Ángulo de giro
 Ángulo de desvío

Unidades de ángulo

Grados sexagesimales
 Grados centesimales

Ángulo respecto al vano previo (°) = 180.0

Catenaria

Definición de catenaria

Tres puntos
 Dos puntos y parámetro h

zi (m) = 46.7
 zm (m) = 108.58
 zf (m) = 208.0

Figura 3.6. Datos con los que se describen los vano con CRMAG+

Una vez introducidos todos los datos para cada uno de los tramos, podemos pasar a simular los campos magnéticos y obtener los resultados que se muestran y discuten en el apartado 5.2 de la memoria (Tabla III.III).

Tabla III.III. Resultados obtenidos en la simulación en cada uno de los vanos

Vano	L (m)	Z _i (m)	Z _m (m)	Z _f (m)	B _{max} (μT)
1	282.3	46.7	108.58	208.0	20.99
2	93.0	208.0	218.12	228.49	11.86
3	180.0	228.49	244.23	270.0	11.15
4	240.0	270.0	288.55	316.18	17.27
5	217.0	316.18	333.0	367.21	23.04
6	317.0	367.21	381.28	421.18	12.88
7	262.6	421.18	434.13	458.77	11.90
8	324.1	458.77	492.82	550.95	18.12
9	384.8	550.95	563.09	608.62	23.66
10	341.0	608.62	544.26	544.16	24.02
11	456.0	544.16	521.0	544.44	20.43
12	295.1	544.44	572.6	605.63	14.66
13	433.4	605.63	597.0	605.57	11.56
14	263.7	605.57	642.07	679.47	12.97
15	450.0	679.47	690.0	743.97	16.99
16	189.5	743.97	750.0	765.76	11.93
17	418.3	765.76	719.68	742.66	18.54
18	293.9	742.66	704.28	700.92	20.73
19	294.0	700.92	697.0	728.36	18.90
20	222.1	728.36	719.29	736.11	19.14
21	303.6	736.11	717.0	744.75	19.97
22	294.6	744.75	723.0	751.06	13.94
23	257.2	751.06	714.02	700.54	19.35
24	239.9	700.54	692.0	712.0	11.52
25	234.8	712.0	713.0	744.15	16.73
26	249.5	744.15	719.07	746.07	11.43

Además, en la memoria se ha analizado el vano 10 con detalle.

3. Referencias

- [1] Inielectric, “CRMAG,” [En línea]. Disponible en: <http://www.inielectric.com/resultados/CRMAG>. [Último acceso: 8 Junio 2023].
- [2] Inielectric, “PROYECTO CREMIE,” [En línea]. Disponible en: <http://www.inielectric.com/ingenieriaelectrica/investigacion/cremie>. [Último acceso: 8 Junio 2023].
- [3] C. Roldán Blay y Roldán Porta, “Quick Calculation of Magnetic Flux Density in Electrical Facilities,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 3, p. 891, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app10030891> [Último acceso: 8 Junio 2023].
- [4] Grupo Inielectric, “Manual de usuario del software CRMAG PLUS,” p. 193-263, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.inielectric.com/images/CRMAG/ManualCRMAGPLUS.pdf> [Último acceso: 8 Junio 2023].
- [5] BIOSFERA XXI, “Estudio de Impacto Ambiental de las Subestaciones El Rosario 220/66kV y Caletillas 220kV, y de las líneas Caletillas-El Rosario a 220kV, El Rosario-Geneto a 66kV y Caletillas–Candelaria a 220kV,” 2010. [En línea]. Disponible en: [https://www.ree.es/sites/default/files/04_SOSTENIBILIDAD/Documentos/tramitacion_ambiental/DIA/Documento%20Sintesis%20Subestaci%C3%B3n%20Caletillas%20\(Nueva%20Candelaria\)%20220%20kV.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/04_SOSTENIBILIDAD/Documentos/tramitacion_ambiental/DIA/Documento%20Sintesis%20Subestaci%C3%B3n%20Caletillas%20(Nueva%20Candelaria)%20220%20kV.pdf) . [Último acceso: 8 Junio 2023].

ANEXO IV: SIMULACIÓN CON FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN A FEMM	102
2. PASOS SEGUIDOS EN EL ANÁLISIS CON FEMM.....	103
3. REFERENCIAS.....	106

1. Introducción a FEMM

El software FEMM (Finite Element Method Magnetics) fue creado por el Dr. David Meeker y, cómo su propio nombre indica, hace uso del método de los elementos finitos para el campo magnético. Este método ha sido introducido en la memoria de este TFG, pero en este documento se explicará un poco mejor los pasos seguidos en el estudio con el software.

El software, en su última versión (FEMM 4.2), nos permite resolver problemas de magnetismo y electrostática de baja frecuencia [1] y presenta una interfaz bastante simple al ser un programa de libre distribución (Fig. 4.1).

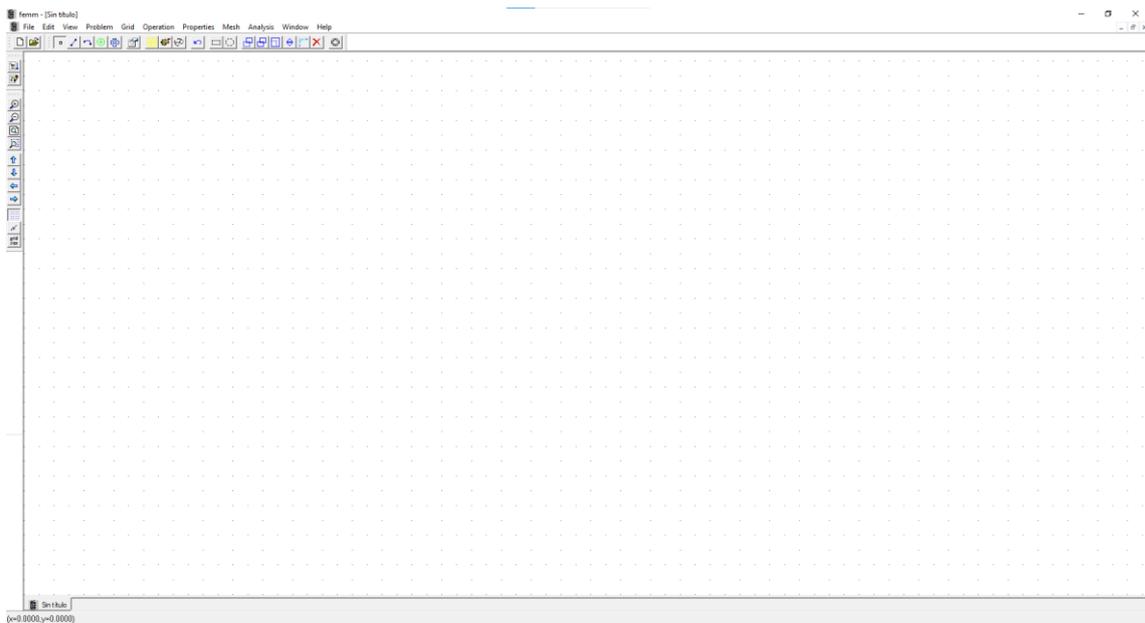


Figura 4.1. Interfaz del software FEMM 4.2

Sin embargo, es una herramienta muy utilizada para analizar campos magnéticos en pequeños equipos electrónicos, en imanes y motores. El programa nos permite obtener como resultados distintas gráficas como el flujo del campo magnético, las líneas y superficie de campo, entre otras.

Para este estudio, el software FEMM solamente ha sido utilizado como complemento teórico y como apoyo a los resultados mostrados por el método de las ecuaciones aproximadas del campo magnético (Fig. 4.2).

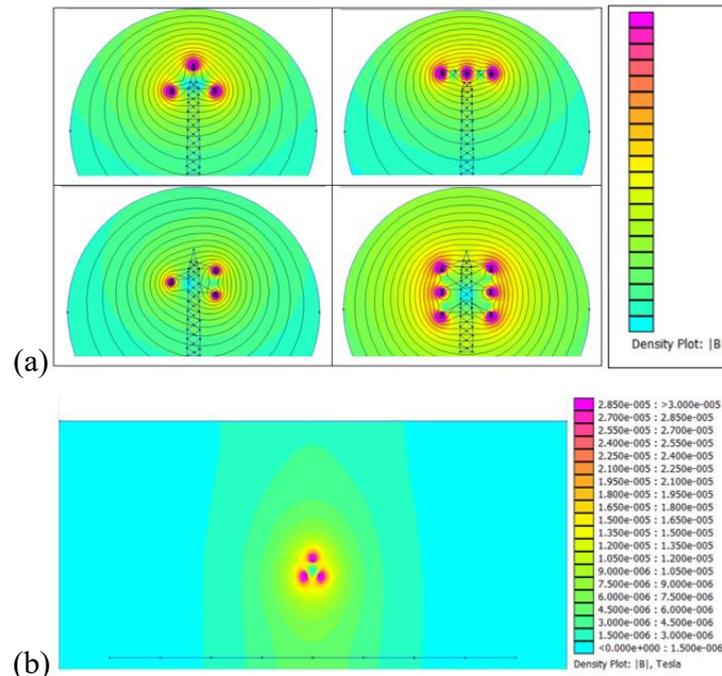


Figura 4.2. a) Modelo creado con FEMM para mostrar el flujo del campo magnético en las configuraciones utilizadas. b) Resultados del campo magnético para la configuración delta con un modelo más simple.

Se ha implementado como apoyo al método de las ecuaciones aproximadas vistas en el apartado 5.1 de la memoria, porque el software FEMM presenta algunas limitaciones como no diferenciar entre fases o no contar con una librería de conductores de LAT. Por ello, el modelo creado para obtener los resultados es bastante simple, limitándolo solamente a los conductores sin considerar las torres o apoyos.

2. Pasos seguidos en el análisis con FEMM

Lo primero que hacemos es definir el modelo del problema a analizar. Para ello, el software nos permite dos opciones: En primer lugar, el programa nos da la opción de importar un fichero DXF (AutoCAD y similares) que facilita bastante la creación del modelo. La segunda opción es trabajar directamente con la interfaz de FEMM y definir la geometría del problema definiendo los nodos o puntos de la estructura. Para el modelo de la figura 4.2,a se optó por la primera opción, mientras que el modelo más simple utilizado en los cálculos se hizo directamente en FEMM (Fig. 4.2,b). Hay que destacar que, cuanto más número de nodos se tenga, el modelo será más realista, ya que la simulación del programa

discretiza la región en un gran número de triángulos de tamaños variables, en donde los vértices corresponden en gran medida a los nodos definidos.

Una vez se han creado los modelos, lo siguiente que se tiene que definir son las propiedades de los distintos materiales del problema. Para ello, el programa cuenta con una librería con algunos materiales ya definidos y con opción de crear otros nuevos (Fig. 4.3)

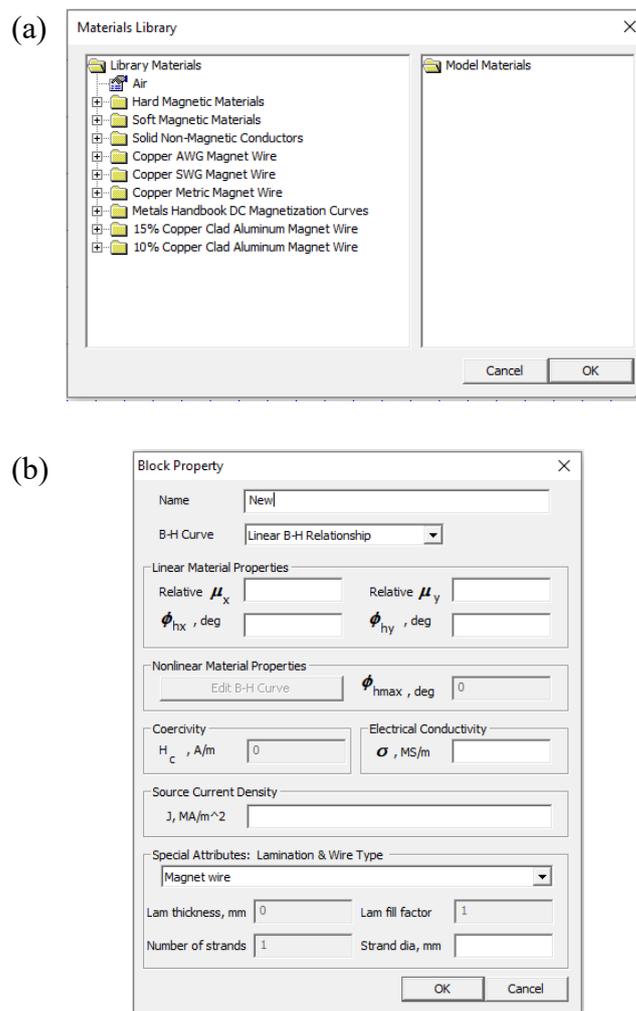


Figura 4.3. a) Librería de materiales que incluye FEMM b) Ventana para crear nuevas propiedades de materiales

Para los conductores a estudiar, al ser cables de aluminio con alma de acero (Fig. 4.4) se aprovecharon los materiales que ya vienen definidos por el programa (Aluminio y Acero) cambiando los parámetros necesarios para cada conductor con sus propiedades vistas en las tablas del Anexo I.

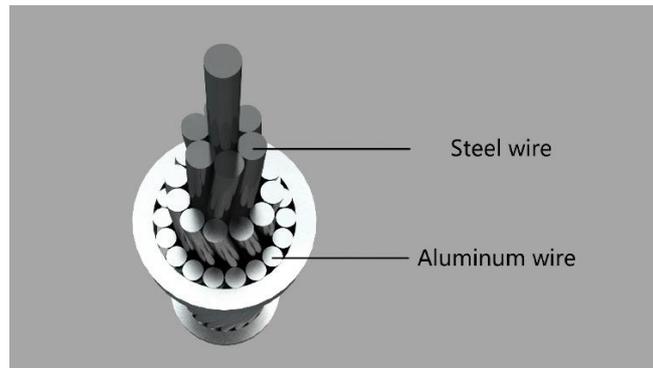


Figura 4.4. Estructura de un conductor de aluminio con alma de acero [2].

Posteriormente, y antes de la simulación, se lleva a cabo un preprocesado en el que el software realiza el mallado (mesh) creando los triángulos cómo se ve en la Figura 4.5.

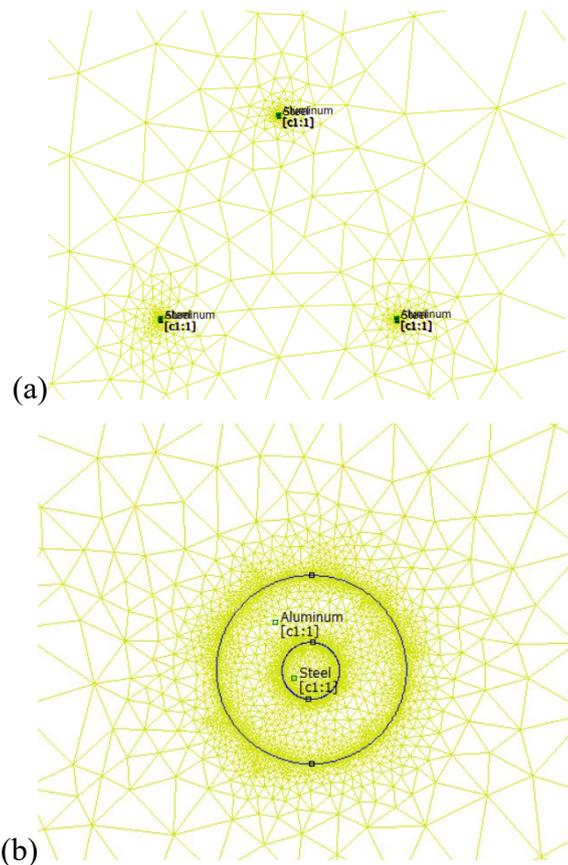


Figura 4.5. a) Mallado que realiza FEMM antes de la simulación en la configuración delta b) Mallado visto desde más cerca en uno de los conductores.

Finalmente, se simula y se obtienen los resultados del flujo magnético para las configuraciones de circuito simple vistas en la memoria.

3. Referencias

[1] D. Meeker “FEMM 4.2 Magnetostatic Tutorial,” [En línea]. Disponible en: <https://www.femm.info/wiki/MagneticsTutorial> [Último acceso: 24 Junio 2023].

[2] NG Energy Group “Conductor ACSR (Conductor de aluminio reforzado con acero),” [En línea]. Disponible en: <https://ngenergygroup.com/producto/conductor-acsr-conductor-de-aluminio-reforzado-con-acero/> [Último acceso: 24 Junio 2023].