



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POST GRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA



TESIS

**“ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE CAMPOS
ELECTROMAGNÉTICOS GENERADOS POR LINEAS ELÉCTRICAS DE
ALTA TENSIÓN”.**

PRESENTADA POR:

JUAN RENZO ILLACUTIPA MAMANI

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAGÍSTER SCIENTIAE EN INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
CON MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL DE LA ENERGÍA.**



PUNO - PERÚ

2014

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ZETIFLANO - PUND	
BIBLIOTECA CENTRAL AREA DE TESIS	
Fecha Ingreso:	07 AGO 2014
Nº	00427

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POST GRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA



CONVENIO MARCO N°004-2010-MEM-CARELEC/UNA
CONVENIO ESPECÍFICO N°001-2012-MEM-CARELEC-UNA/EPG
CONVENIO ESPECÍFICO N°002-2012-MEM-CARELEC-UNA/EPG

TESIS

**“ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE CAMPOS
ELECTROMAGNÉTICOS GENERADOS POR LÍNEAS ELÉCTRICAS DE
ALTA TENSIÓN”.**

**PRESENTADA POR:
JUAN RENZO ILLACUTIPA MAMANI**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAGÍSTER SCIENTIAE EN INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
CON MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL DE LA ENERGÍA.**

PUNO – PERÚ
2014

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POST GRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA

TESIS

**“ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE CAMPOS
ELECTROMAGNÉTICOS GENERADOS POR LÍNEAS ELÉCTRICAS DE
ALTA TENSIÓN”**

PRESENTADA POR:

JUAN RENZO ILLACUTIPA MAMANI

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAGÍSTER SCIENTIAE EN INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
CON MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL DE LA ENERGÍA**

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

:



Mg. Gregorio Meza Marocho

PRIMER MIEMBRO

:



M.Sc. Oscar Raúl Mamani Luque

SEGUNDO MIEMBRO

:



Mg. Julio César Villalta Pacori

ASESOR DE TESIS

:



Mg. Olger Alejandrino Ortega Achata

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso quien me dio la fe, la fortaleza y salud para seguir adelante.

Con gran amor y cariño a todos mis seres queridos, por su apoyo y dedicación que me han permitido alcanzar este deseo compartido para seguir siempre adelante, contribuyendo en mi formación personal y profesional.

Juan Renzo.

AGRADECIMIENTO

A mi Alma Mater la Universidad Nacional del Altiplano, quienes me acogieron en sus aulas durante los años de mi formación profesional.

Con gran aprecio y profundo reconocimiento a los miembros integrantes del Jurado Calificador: Mg. Gregorio Meza Marocho, M.Sc. Oscar Raúl Mamani Luque, Mg. Julio César Villalta Pacori, por su orientación necesaria para el enriquecimiento teórico de la presente investigación.

Al asesor Mg. Olger Alejandrino Ortega Achata, por su respaldo, dirección continua y determinación que han sido esenciales en la culminación de mis aspiraciones profesionales.

A mis amigos y compañeros que supieron brindarme su amistad y me apoyaron cuando más lo necesitaba.

Juan Renzo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	xiii
CAPÍTULO I	
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	1
1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.1.2.1. PROBLEMA GENERAL.....	2
1.1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	2
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS.....	3
1.2.1. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA.....	3
1.2.2. JUSTIFICACIÓN SOCIOECONÓMICA.....	3
1.2.3. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.....	3
1.2.4. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.4. HIPÓTESIS.....	5
1.4.1. HIPÓTESIS GENERAL.....	5
1.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	ANTECEDENTES.....	6
2.1.1.	MITIGACIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LÍNEAS ELÉCTRICAS.....	6
2.1.1.1.	REDUCCIÓN DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO CREADO POR LÍNEAS ELÉCTRICAS.....	7
2.1.1.2.	MODIFICACIÓN DEL DISEÑO DE LA LÍNEA.....	8
2.1.1.3.	EMPLEO DE BUCLES DE COMPENSACIÓN.....	12
2.1.1.4.	COMPENSACIÓN MEDIANTE UN MATERIAL DE ALTA PERMEABILIDAD MAGNÉTICA Y/O CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	14
2.1.1.5.	EMPLEO SIMULTÁNEO DE VARIOS MÉTODOS.....	15
2.1.2.	MITIGACIÓN DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO GENERADO POR OTRAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS.....	15
2.2.	MARCO REFERENCIAL.....	16
2.2.1.	CÁLCULO DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS CREADOS POR LÍNEAS AÉREAS.....	16
2.2.1.1.	CÁLCULO DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO A PARTIR DE LAS ECUACIONES DE MAXWELL.....	17
2.2.1.2.	EFFECTO DE LA TIERRA EN EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO CREADO POR UNA LÍNEA ELÉCTRICA AÉREA.....	21
2.2.1.3.	CÁLCULO DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO A PARTIR DEL MODELO DE LA CATENARIA.....	23

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1.	MÉTODO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	29
3.2.	TIPOLOGÍA Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	29
3.3.	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	30

3.4.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS.....	31
3.5.	COBERTURA A BENEFICIAR.....	33

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1.	MITIGACIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS MEDIANTE LA DIVISIÓN DE FASES.....	34
4.1.1.	CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UN CUADRIPOLO.....	37
4.1.2.	LÍNEA TRIFÁSICA EQUILIBRADA CON UNA FASE DIVIDIDA.....	39
4.1.3.	LÍNEA TRIFÁSICA EQUILIBRADA CON DOS FASES DIVIDIDAS.....	45
4.1.4.	LÍNEA TRIFÁSICA EQUILIBRADA CON TRES FASES DIVIDIDAS.....	51
4.1.5.	DISCUSIÓN.....	55
4.2.	MITIGACIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS MEDIANTE LAZOS.....	58
4.2.1.	MITIGACIÓN CON LAZOS PASIVOS.....	58
4.2.1.1.	LÍNEA CON CONFIGURACIÓN HORIZONTAL DE CONDUCTORES.....	59
4.2.1.2.	LÍNEA CON CONFIGURACIÓN VERTICAL DE CONDUCTORES.....	65
4.2.1.3.	LÍNEA CON CONFIGURACIÓN TRIANGULAR DE CONDUCTORES.....	70
4.2.1.4.	LÍNEAS DE DOBLE CIRCUITO.....	78
4.2.2.	MITIGACIÓN CON LAZOS ACTIVOS.....	82
4.2.2.1.	LÍNEA HORIZONTAL.....	84
4.2.2.2.	LÍNEA VERTICAL.....	88
4.2.2.3.	LÍNEA TRIANGULAR.....	89
4.2.2.4.	LÍNEA CON DISPOSICIÓN DOBLE CIRCUITO VERTICAL.....	92
4.2.3.	DISCUSIÓN.....	94
	CONCLUSIONES.....	98
	RECOMENDACIONES.....	104
	BIBLIOGRAFÍA.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01	CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR LA CORRIENTE.....	19
Figura 02	LÍNEA TRIFÁSICA DE EJEMPLO PARA EL CÁLCULO DEL ERROR DEL CM AL NO CONSIDERAR EL EFECTO DE LA TIERRA.....	23
Figura 03	CURVAS DE ERROR EN EL CÁLCULO DEL CM AL NO CONSIDERAR EL EFECTO DE LA TIERRA.....	23
Figura 04	CAMPO MAGNÉTICO EN (X,Y,Z) DEBIDO A LA INTENSIDAD.....	24
Figura 05	VANO Y DIMENSIONES PRINCIPALES.....	25
Figura 06	CURVAS DE ERROR EN EL CM AL CONSIDERAR MODELO RECTILÍNEO.....	26
Figura 07	CURVAS DE ERROR EN EL CM AL CONSIDERAR MODELO RECTILÍNEO CON ALTURA VARIABLE.....	26
Figura 08	CURVAS DE ERROR EN EL CM AL CONSIDERAR MODELO CON DOS TRAMOS RECTILÍNEOS.....	27
Figura 09	DIPOLO MAGNÉTICO, CUADRIPOLO DE CORRIENTE EQUIVALENTE Y DIAGRAMA DIPOLAR DE AMBOS.....	35
Figura 10	DIPOLO MAGNÉTICO Y CUADRIPOLO DE CORRIENTE EQUIVALENTE FORMADO POR TRES CONDUCTORES.....	36
Figura 11	PARÁMETROS QUE DEFINEN UN CUADRIPOLO DE CORRIENTE.....	37
Figura 12	LÍNEA TRIFÁSICA CON UNA FASE DIVIDIDA Y SU DESCOMPOSICIÓN EN UN CUADRIPOLO Y UN DIPOLO.....	39
Figura 13	LÍNEA CON 1 FASE PARTIDA A1.....	42
Figura 14	LÍNEA CON 1 FASE PARTIDA B1.....	42
Figura 15	LÍNEA CON 1 FASE PARTIDA C1.....	42
Figura 16	CAMPO GENERADO POR LAS CONFIGURACIONES T, A1, B1 y C1.....	44
Figura 17	LÍNEA TRIFÁSICA CON DOS FASES DIVIDIDAS.....	45
Figura 18	EJEMPLOS DE CONFIGURACIÓN CON DOS FASES PARTIDAS.....	46

Figura 19	LÍNEA CON DOS FASES PARTIDAS A2.....	48
Figura 20	LÍNEA CON DOS FASES PARTIDAS B2.....	48
Figura 21	LÍNEA CON DOS FASES PARTIDAS C2.....	48
Figura 22	CAMPO GENERADO POR LAS CONFIGURACIONES T, A2, B2 y C2.....	51
Figura 23	LÍNEA TRIFÁSICA CON TRES FASES DIVIDIDAS.....	51
Figura 24	EJEMPLOS DE CONFIGURACIONES CON TRES FASES PARTIDAS.....	52
Figura 25	LÍNEA CON TRES FASES PARTIDAS B3.....	53
Figura 26	LÍNEA CON TRES FASES PARTIDAS CAMPOS RESULTANTES.....	54
Figura 27	LÍNEA CON TRES FASES PARTIDAS IC MÁXIMO.....	54
Figura 28	DISPOSICIÓN DEL LAZO QUE PERMITE LA MÁXIMA CORRIENTE.....	60
Figura 29	DIMENSIONES CORRESPONDIENTES TORRE ALINEACIÓN.....	61
Figura 30	VARIACIÓN DE I/I_m A IGUAL DISTANCIA ENTRE FASES.....	62
Figura 31	VARIACIÓN DE I/I_m A IGUAL DISTANCIA LAZO FASE.....	62
Figura 32	VARIACIÓN DE I/I_m CON LA DIFERENCIA ALTURA LÍNEA-LAZO.....	63
Figura 33	LÍNEA HORIZONTAL DIVERSAS DISPOSICIONES DE LAZOS.....	64
Figura 34	LÍNEA HORIZONTAL EFICIENCIA PARA DIVERSAS DISPOSICIONES....	65
Figura 35	DISPOSICIÓN DEL LAZO QUE PERMITE LA MÁXIMA CORRIENTE.....	65
Figura 36	DIMENSIONES CORRESPONDIENTES A UNA TORRE DE ALINEACIÓN	66
Figura 37	LÍNEA VERTICAL. EFICIENCIAS LAZO COPLANAR h=10 m.....	67
Figura 38	LÍNEA VERTICAL. EFICIENCIAS LAZO COPLANAR h=14 m.....	67
Figura 39	LÍNEA VERTICAL. DISPOSICIONES CON EL CONDUCTOR A TIERRA...	68
Figura 40	LÍNEA VERTICAL. EFICIENCIAS DIFERENTES DISPOSICIONES.....	69
Figura 41	DISPOSICIONES DE LAZO PASIVO.....	70
Figura 42	CONFIGURACIÓN DELTA. EFICIENCIAS LAZO I.....	72
Figura 43	CONFIGURACIÓN DELTA. EFICIENCIAS LAZO II.....	72
Figura 44	CONFIGURACIÓN DELTA. EFICIENCIAS LAZO III.....	73
Figura 45	DIMENSIONES CORRESPONDIENTE A UNA TORRE DE ALINEACIÓN..	73

Figura 46	EFICIENCIAS OBTENIDAS AL INSERTAR EL LAZO I, $h=10$ m.....	74
Figura 47	EFICIENCIAS OBTENIDAS AL INSERTAR EL LAZO I, $h=14$ m.....	74
Figura 48	DIMENSIONES CORRESPONDIENTES A UNA TORRE DE ALINEACIÓN.....	75
Figura 49	CONFIGURACIÓN TRESBOLILLO. MÁXIMA CORRIENTE.....	76
Figura 50	EFICIENCIAS OBTENIDAS AL INSERTAR EL LAZO I ($h = 10$ m).....	76
Figura 51	EFICIENCIAS OBTENIDAS AL INSERTAR EL LAZO II ($h = 10$ m).....	77
Figura 52	EFICIENCIAS OBTENIDAS AL INSERTAR EL LAZO III ($h = 10$ m).....	77
Figura 53	DIMENSIONES PRINCIPALES DE UN APOYO DE ALINEACIÓN.....	78
Figura 54	DISPOSICIONES DE LAZOS ANALIZADAS.....	79
Figura 55	EFICIENCIA OBTENIDA PARA LAS TRES DISPOSICIONES.....	80
Figura 56	EFICIENCIAS OBTENIDAS CON LA CONFIGURACION II.....	81
Figura 57	EFICIENCIA CON LAZO ACTIVO POSICIÓN COPLANAR $s = 29.4$ m.....	85
Figura 58	EFICIENCIA CON LAZO ACTIVO POSICIÓN COPLANAR $s = 35$ m.....	85
Figura 59	EFICIENCIA PARA EL LAZO I.....	86
Figura 60	EFICIENCIA PARA EL LAZO III.....	87
Figura 61	EFICIENCIAS PARA EL LAZO COPLANAR.....	88
Figura 62	EFICIENCIAS PARA LOS LAZOS I, II y IV.....	89
Figura 63	CONFIGURACIÓN DELTA. PANTALLA MITIGADORA.....	90
Figura 64	EFICIENCIAS PARA $x_a = 0$ m, $y_a = -5$ m.....	91
Figura 65	EFICIENCIAS PARA $x_a = 0$ m, $y_a = -h - 1$ m.....	91
Figura 66	EFICIENCIAS PARA LAS DISPOSICIONES DE LAZO ACTIVO.....	92

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 01	VALORES DE I_C/I_{C_0} PARA LA CONFIGURACIÓN A1.....	42
Cuadro 02	VALORES DE I_C/I_{C_0} PARA LA CONFIGURACIÓN B1.....	43
Cuadro 03	VALORES DE I_C/I_{C_0} PARA LA CONFIGURACIÓN C1.....	43
Cuadro 04	VALORES DE I_C/I_{C_0} PARA LA CONFIGURACIÓN A2.....	49
Cuadro 05	VALORES DE I_C/I_{C_0} PARA LA CONFIGURACIÓN B2.....	49
Cuadro 06	VALORES DE I_C/I_{C_0} PARA LA CONFIGURACIÓN C2.....	49
Cuadro 07	MÁXIMAS REDUCCIONES EN % DE CAMPO CONSEGUIDAS AL DIVIDIR UNA, DOS O TRES FASES, RELATIVAS A LA CONFIGURACIÓN TRESBOLILLO.....	57
Cuadro 08	RELACIÓN I/I_p PARA DIVERSOS CONDUCTORES.....	59

RESUMEN

El estudio se realizó en el Departamento de Puno, Perú; en las instalaciones de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, durante los meses de Octubre del 2013 a Marzo del 2014, con el objetivo de efectuar el analizar de técnicas de mitigación de campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas de alta tensión. Se recurrió a la recolección de datos a través de estudios bibliográficos referente al tema para demostrar la validez de la hipótesis que permita desarrollar técnicas fiables a bajo costo que mitiguen los campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas de alta tensión. Los resultados muestran la posibilidad de mitigar el campo mediante la división de una, dos, o las tres fases. Se concluye del estudio realizado que la configuración más eficiente es la que divide dos de las tres fases. Con ella se puede reducir el campo un 75% a 30 m de la línea, respecto a la configuración tresbolillo. Las configuraciones que permiten una mayor reducción de campo con lazo pasivo y activo son las coplanares (horizontal y vertical), siendo muy sensible dicha reducción a la distancia lazo-fase. Para una distancia fase lazo de 5 m se obtienen reducciones de hasta el 35 %. Por otro lado del análisis realizado con lazos pasivos se obtienen reducciones en la configuración triangular, pero se limita a un 25%. Finalmente del análisis realizado con lazos activos se obtienen que para las configuraciones horizontal y vertical con lazos coplanares se consiguen mayores reducciones conforme aumenta la distancia a la línea, siendo superior al 95% a unos 100 m de la línea.

Palabras claves: campos electromagnéticos, catenaria, cuadripolo, división, fases, mitigación, técnicas.

ABSTRACT

The study was conducted in the Department of Puno, Peru; on the premises of the National University of Altiplano de Puno, during the months of October 2013 to March 2014, in order to effect mitigation techniques to analyze electromagnetic fields generated by electrical power lines. He turned to data collection through literature studies regarding the issue to demonstrate the validity of the hypothesis that allows to develop reliable low-cost techniques that mitigate the electromagnetic fields generated by electrical power lines. The results show the possibility of mitigating the field by dividing one, two, or all three phases. It is concluded from the study that the most efficient configuration is the divided two of the three phases. With it you can reduce 75% to 30 meters from the line, compared to the staggered configuration field. Configurations that allow further reduction of field with passive and active loop is coplanar (horizontal and vertical), such reduction being very sensitive to the distance tie-phase. For a distance of 5 m loop phase reductions of up to 35% are obtained. On the other hand the passive bonds analysis reductions obtained triangular configuration but is limited to 25%. Finally the analysis with active links are obtained for horizontal and vertical coplanar configurations are achieved greater reductions ties with increasing distance to the line, being above 95% within 100 m of the line.

Key words: electromagnetic fields, catenary, quadrupole splitting, phases, mitigation techniques.

INTRODUCCIÓN

Aunque ya en 1966 se advirtió de la existencia de una posible relación entre los campos electromagnéticos de baja frecuencia (CEMBF), en concreto campo eléctrico (analizado primeramente por su mayor facilidad para medirlo y percibirlo fisiológicamente) generado por instalaciones eléctricas, y la salud, las investigaciones efectuadas tuvieron poca repercusión hasta el año 1979. En aquel año Wertheimer y Leeper publicaban un artículo en el que afirmaban que existía una relación entre el cáncer infantil y los CEMBF. Desde entonces no han dejado de aparecer en las últimas dos décadas estudios que pretenden dilucidar si existe una relación causa efecto entre los campos electromagnéticos (CEM) y algunas enfermedades en niños y adultos, así como en animales y plantas.

Paralelamente, se han venido publicando libros y artículos en revistas de divulgación general que, con una orientación pretendidamente alarmista y sin fundamentos científicos rigurosos (como se ha demostrado posteriormente), advierten de los posibles peligros de los CEM sobre la salud, y requieren de las administraciones competentes las medidas necesarias para reducir la exposición a los mismos. Este tratamiento por algunos sectores periodísticos ha creado cierta alarma social, como se demostró en el tendido del cable subterráneo por el Estrecho de Gibraltar, y a diario ante nuevas instalaciones eléctricas.

Sin embargo, los resultados de la mayoría de los estudios realizados hasta la fecha muestran que las evidencias actuales en lo concerniente a que los campos eléctricos y magnéticos provoquen enfermedades son débiles. Esta es la principal conclusión de un informe, que merece destacar por su rigor científico e independencia (realizado sin participación de las empresas eléctricas), elaborado por el Instituto Nacional de Ciencias sobre la Salud Ambiental de EE.UU., y en el que se revisan las principales investigaciones (alrededor de 200) realizadas hasta la fecha de su publicación en relación a los CEMBF, tanto en el laboratorio (personas y animales, in vivo, y con células, in vitro) como epidemiológicos, de poblaciones expuestas en ambiente laboral y doméstico. Las principales conclusiones del informe son las siguientes:

La mayor evidencia de efectos sobre la salud proviene de asociaciones estadísticas observadas en grupos humanos con dos tipos de cáncer: leucemia infantil y leucemia linfocítica en adultos expuestos por motivos de trabajo.

Ninguno de los estudios anteriores, analizados individualmente, prueba una relación convincente entre ambas enfermedades y la exposición a CEMBF. Si se analizan en conjunto, en lo que se denomina un meta análisis, se observa un pequeño incremento del riesgo con la exposición, más débil en la leucemia linfocítica que en la infantil.

Todos los estudios de laboratorio in vivo, y la mayoría de los estudios in vitro fracasan a la hora de demostrar una relación causal entre la exposición a CEMBF a niveles típicos y cambios en parámetros biológicos (fertilidad, reproducción, síntesis de la hormona melatonina).

Debido, por una parte, a las serias limitaciones de los estudios epidemiológicos, relacionadas con la selección de los casos, el número de

casos, y el método para cuantificar el nivel de exposición y por otra a los resultados negativos de los estudios de laboratorio, cuya posibilidad de refutación en caso positivo, sería menor que los estudios epidemiológicos, se debilita la posibilidad de asociar CEMBF con enfermedades.

A pesar de lo anterior, los hallazgos epidemiológicos no pueden descartarse completamente, por lo que no se puede afirmar que la exposición a CEMBF sea completamente segura. Sin embargo, estos hallazgos son insuficientes para aconsejar una agresiva política reguladora, máxime cuando no hay acuerdo en que parámetro del campo es el más significativo (campo resultante, transitorio, valores punta, polarización, orientación respecto al campo natural). Antes bien, se aconseja a la Administración Pública que promueva, por un lado, la búsqueda e implantación de métodos de bajo costo para reducir el CM creado por las líneas de transporte y distribución, y, por otro, campañas de detección de puntos de elevada exposición en el interior de viviendas. Asimismo, se aconseja a los fabricantes de equipos eléctricos que consideren alternativas de bajo costo para reducir los niveles de CM.

Es fundamental, a la hora de realizar un estudio sobre la incidencia de la exposición a CEMBF en la salud, cuantificar los niveles de exposición. Esto no está aún definido, por lo que los diversos estudios epidemiológicos emplean métodos de estimación diferentes: configuración de conductores, tensión, intensidad, distancia, campo magnético medido, campo magnético calculado, media ponderada en el tiempo, etc.

Existen, por otra parte, numerosos estudios que tratan de caracterizar los niveles de CEMBF, sobre todo campo magnético, en diferentes ambientes: residencial, líneas eléctricas aéreas, medio urbano, oficinas, industria ligera, subestación eléctrica, etc. La mayor parte de dichos estudios realizan medidas de campo magnético y los resultados son mostrados como medias ponderadas temporales durante 24 horas (ejemplo de exposición a que un individuo está sometido) o durante un tiempo determinado en un ambiente concreto (en el hogar, el trabajo, etc.). Se han analizado preferentemente dos ambientes, doméstico y laboral. Según Zaffanella, el nivel medio del campo magnético al que un estadounidense está sometido es de $0,09 \mu\text{T}$. En el interior de la vivienda el campo medido medio en varios lugares fue de $0,06 \mu\text{T}$. En Europa, como muestra Swanson, se observan valores ligeramente menores en el interior de la vivienda ($0,05 \mu\text{T}$), debido por un lado a la mayor tensión y por otro a que el sistema de retorno de la corriente es distinto.

En relación a la influencia de líneas aéreas de transmisión y distribución cercana a las viviendas, se observó que ciertos tipos de líneas de transmisión y distribución generaban campos en el interior de las viviendas con un rango de valores medios entre $0,09$ y $0,38 \mu\text{T}$. La mayoría de las viviendas estaban sometidas al campo generado por líneas de distribución enterradas, con una media de $0,03 \mu\text{T}$.

En relación al ambiente laboral, se ha estudiado sobre todo el sector eléctrico, por ser el más expuesto. Theriault ha obtenido unos valores ponderados en el tiempo de hasta $4 \mu\text{T}$.

Debido a las presiones sociales, y a pesar de las débiles evidencias que relacionan los CEMBF con la salud, diversos países y organismos han establecido límites para los niveles de campo eléctrico y magnético en ambiente laboral, para el público en general, y cerca de instalaciones eléctricas (subestaciones y líneas aéreas).

Se observa una gran variabilidad en los límites, dependiendo del organismo.

Mientras que el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) establece unos límites de exposición laboral de 10 kV/m y 1600 μ T diarios, la Organización Mundial de la Salud (OMS), a través de la Comisión Internacional sobre Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP) los fija en 10 kV/m y 500 μ T, y la Unión Europea en 6 kV/m y 200 μ T. En relación a la exposición doméstica se fijan límites en general inferiores. La ICNIRP los establece en 5 kV/m y 100 μ T (igual que la Unión Europea), y la CENELEC en 10 kV/m y 640 μ T.

El criterio empleado por estos organismos está basado en efectos biológicos de corrientes inducidas en el cuerpo por campos externos eléctricos y magnéticos. Sin embargo, otros organismos (en EE.UU. y Suecia) han preferido emplear criterios basados en estudios epidemiológicos, lo que conlleva que los límites de exposición resultantes sean varios órdenes de magnitud menores. Ejemplo de ello son los estados de Florida y Nueva York, que establecen valores máximos de campo eléctrico y magnético en los límites de la servidumbre de paso de líneas eléctricas aéreas. Para el campo eléctrico se establece 1,6 kV/m (Nueva York), 8 kV/m (Florida, líneas de 230 kV) y 10 kV/m (Florida, líneas de 500 kV). En cuanto al campo magnético se fija en 20 μ T (Nueva

York), 15 μ T (Florida, líneas de 230 kV), 20 μ T (Florida, líneas de 500 kV, simple circuito), y 25 μ T (Florida, líneas de 500 kV, doble circuito).

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Descripción de la realidad problemática

Como consecuencia de la creciente sensibilización social, de las recomendaciones emitidas por diferentes organismos, y de la progresiva normalización de los niveles de campos electromagnéticos (CEM) creados por líneas eléctricas, las compañías eléctricas que tienen a su cargo la planificación y explotación de las redes de transporte, reparto y distribución, están empezando a considerar como un factor clave en el diseño de nuevas líneas los niveles de CEM generados.

Por otra parte, es de sumo interés desarrollar técnicas fiables a bajo coste que mitiguen parte del campo generado por líneas ya existentes y por existir, en tramos en los que puede existir una especial incidencia sobre zonas rurales, urbanas, laborales y ganaderas cuya incidencia podría significar contaminación del medio ambiente por ondas electromagnéticas.

En tal sentido, me permití plantear la problemática descrita a través de la formulación del problema mediante las siguientes interrogantes:

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

¿En qué medida el análisis de técnicas de mitigación de campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas de alta tensión, permitirá desarrollar técnicas fiables a bajo coste que mitiguen los campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas de alta tensión, en tramos en los que puede existir una especial incidencia sobre zonas urbanas y rurales?

1.1.2.2. Problemas específicos

¿En qué medida la determinación de la eficacia de las técnicas de mitigación, permitirá seleccionar la más adecuada para alcanzar las metas propuestas?

¿En qué medida la formulación de modelos de cálculo de los campos electromagnéticos, permitirá la comparación entre los diferentes niveles de campo electromagnético creados por las principales configuraciones empleadas en líneas de alta tensión?

1.2.- JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS

1.2.1. Justificación metodológica

Los métodos, procedimientos, técnicas e instrumentos empleados en la investigación, al haberse demostrado su validez y confiabilidad se utilizarán en otros trabajos de investigación.

1.2.2. Justificación socioeconómica

El presente trabajo de investigación cumplirá el importante papel hacia los profesionales entendidos en la materia, brindando información que se convertirá en una guía para la implementación de técnicas fiables a bajo coste que mitiguen parte del campo electromagnético generado por líneas ya existentes y por existir, en tramos en los que puede existir una especial incidencia sobre zonas rurales, urbanas, laborales y ganaderas, lo que contribuirá al mejoramiento social y económico para la población.

1.2.3. Justificación técnica

En virtud a este trabajo de tesis se conoció procedimientos y técnicas de mitigación, que permitieron seleccionar la más adecuada para alcanzar las metas propuestas así mismo se efectuó una comparación entre los niveles de campo electromagnético creados por las principales configuraciones empleadas en líneas de alta tensión.

1.2.4. Justificación Ambiental

Cuando se habla de contaminación, se piensa en contaminación del agua, de la tierra y del aire, pero en los últimos años se ha sumado a este grupo la

contaminación electromagnética; consecuencia al avance tecnológico en el que se encuentra sumergido el planeta. Esto ha ocasionado que la salud de las personas poco a poco, se desmejore y no se tenga un rendimiento adecuado a la hora de realizar una actividad diaria; dolores de cabeza, palpitaciones, dolor de oído, señales generales de cansancio, falta de concentración, jaquecas e insomnio, son algunos de los síntomas que se presentan cuando se está expuesto a largas horas de uso de aparatos electrónicos, vivir cerca de una antena emisora de microondas, torres eléctricas, torres de telefonía celular, transformadores, hornos microondas, etc.

Como resultado de todo lo expuesto anteriormente, para este trabajo, se hizo uso de diferentes fuentes de información que garantizaron el punto de partida de la investigación, que ayudó a la creación de diferentes propuestas que facilitaron la prevención y disminución de los problemas causados por la contaminación electromagnética y de esta manera se logró plantear un conjunto de soluciones que orienten a las diferentes entidades privadas y ambientales para que resuelvan la problemática planteada anteriormente.

1.3.- OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

- Analizar técnicas de mitigación de campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas de alta tensión, para desarrollar técnicas fiables a bajo coste que mitiguen los campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas de alta tensión, en tramos en los que puede existir una especial incidencia sobre zonas urbanas y rurales.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la eficacia de las técnicas de mitigación para seleccionar la más adecuada para alcanzar las metas propuestas.
- Formular modelos de cálculo de los campos electromagnéticos, para efectuar la comparación entre los niveles de campo electromagnético creados por las principales configuraciones empleadas en líneas de alta tensión.

1.4.- HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis General

- El análisis de técnicas de mitigación de campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas de alta tensión, permitirá desarrollar técnicas fiables a bajo coste que mitiguen los campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas de alta tensión, en tramos en los que puede existir una especial incidencia sobre zonas urbanas y rurales.

1.4.2. Hipótesis Específicas

- La determinación de la eficacia de las técnicas de mitigación, permitirá seleccionar la más adecuada para alcanzar las metas propuestas.
- La formulación de modelos de cálculo de los campos electromagnéticos, permitirá la comparación entre los niveles de campo electromagnético creados por las principales configuraciones empleadas en líneas de alta tensión.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES.

2.1.1. Mitigación de Campos Electromagnéticos en Líneas Eléctricas.

DOVAN y OWEN (1998), resumen los principales estudios realizados relacionados con la mitigación del campo creado por instalaciones eléctricas, dentro de las cuales se pueden distinguir dos estrategias de reducción del campo magnético: aquellas que buscan reducir el CEM generado por una fuente concreta (subestación, línea, equipo, etc.), con ello se pretende que una zona amplia alrededor de la fuente se beneficie y aquellas que buscan proteger un espacio concreto, en general pequeño (habitación, sala, equipo), frente a campos externos. En este caso las fuentes de campo externas pueden ser varias.

ADAMS (1996), encontró que para ambas estrategias existen dos técnicas de mitigación: activa y pasiva. La pasiva consiste en modificar algunos de los parámetros de la fuente, o en disponer apropiadamente una pantalla de material con elevada permeabilidad magnética relativa (de modo que se desvíen las líneas de campo) o conductividad eléctrica (se inducen corrientes parásitas cuyo campo

se opone al original), o ambas a la vez. La activa consiste en introducir unas corrientes de amplitud y fase apropiadas, cuyo campo contrarresta el original.

2.1.1.1 Reducción del campo electromagnético creado por líneas eléctricas.

LA TORRE (1993), indica que las principales técnicas que pretenden reducir el campo electromagnético creado por instalaciones eléctricas y, en particular, líneas eléctricas aéreas y subterráneas, son las siguientes: técnicas que buscan la modificación del diseño de la línea, técnicas que introducen una pantalla compuesta por conductores de compensación pasivos o activos, empleo de pantallas realizadas a base de chapa de material con alta permeabilidad magnética y/o conductividad eléctrica y sistemas híbridos a base de planchas y lazos activos.

STEWART y DALE (1993), proponen el empleo de líneas hexafásicas y dodecafásicas para además de mejorar otros aspectos de la transmisión (efecto corona), reducir el campo electromagnético. Sin embargo, la pequeña reducción que se consigue (un 10%) frente a la línea trifásica, y el coste que implica no justifica el empleo de más fases con la finalidad principal de reducir el campo, por lo que hoy día no se apuesta por su aplicación.

ADAMS y TRIVETTE (1996), plantean la posibilidad de incluir en la planificación y gestión de una red de transporte la incidencia en el campo electromagnético generado, en el que se analiza el coste relativo de la variación de los distintos parámetros que definen una línea eléctrica, así como el coste que supone la inserción de conductores de compensación. Se concluye de dicho estudio que la

solución que permite conseguir altos niveles de reducción a un coste moderado es la división de fases.

2.1.1.2 Modificación del diseño de la línea.

CONTI (1997), resume los principales efectos beneficiosos de la división de fases (ligera reducción del campo eléctrico, reducción significativa de la impedancia característica de la línea), así como los negativos (incremento del ruido electromagnético y acústico). Con la introducción de la restricción del campo magnético en el diseño, es necesario revisar las afecciones de los nuevos diseños en las restricciones tradicionales.

En RASHKES (1998), se analizan las limitaciones a la reducción de la distancia entre fases (compactación): existencia de viento, rigidez dieléctrica del aire, ruido audible.

Disposición de los conductores en líneas de simple circuito.

LA TORRE (1993), muestra unos perfiles de campo en los que se observa que las configuraciones horizontal y vertical generan un campo similar, siendo menor el generado por la configuración delta. Sin embargo, no se citan claramente las condiciones de comparación (igual intensidad por fase, igual altura de conductores).

HORTON y GOLDBERG (1994), muestran los perfiles de campo de diversas configuraciones típicas en 115 kV, 230 kV, 345 kV, y 500 kV. Un criterio de comparación entre configuraciones que, a juicio del autor de la presente tesis, es el

más apropiado, consiste en suponer que la altura mínima al terreno es constante. Este criterio es el que se empleará, donde se comparará el campo generado por las diversas disposiciones de simple circuito, tanto bajo la línea como a una distancia representativa (v.g. el límite de la servidumbre de paso).

Disposición de las fases en líneas de doble circuito.

KAUNE y ZAFFANELLA (1982), proponen una formulación bajo la línea, en la cual el nivel de campo es similar, en el primer caso el campo es proporcional a la distancia al cubo, y en el segundo a la distancia al cuadrado. Además de la ventaja anterior, la configuración de baja reactancia presenta otras ventajas, como la menor impedancia de la línea (como indica su nombre), mayor potencia natural, menores niveles de campo eléctrico, menor desequilibrio entre fases y menores corrientes inducidas en el conductor de tierra, lo que implica menores pérdidas resistivas y menor intensidad de retorno por tierra, lo cual reduce la corrosión en tuberías enterradas bajo la línea. Un aspecto negativo de la configuración de baja reactancia es la mayor sensibilidad del campo a desequilibrios de la línea (presencia de componente homopolar).

OLSEN Y WONG (1992), muestran que el campo magnético puede ser más del 100% mayor del esperado cuando existe una fluctuación de corriente por las fases del 2% de la corriente total. Asimismo, muestra que el reparto no equitativo de carga en ambos circuitos causa una degradación en la reducción teórica del campo, aunque no tan seria como el desequilibrio. Este último es más importante en líneas de distribución (el desequilibrio puede alcanzar el 20%) que en transmisión. Otra desventaja de la configuración de baja reactancia

es la mayor importancia del efecto corona.

Reconfiguración de las fases en líneas subterráneas.

KARADY (1998), presenta un método práctico para encontrar la configuración óptima de fases en un sistema de transmisión subterráneo, suponiendo corrientes equilibradas. Aplicándolo se obtienen factores de reducción (relación entre el campo original y el reducido) de 20, a su vez desarrolla un método para optimizar la disposición de las fases cuando existe desequilibrio. Se observa que el desequilibrio incrementa el campo, pero la reducción del campo es aún significativa.

HABIBALLAH (1998), presenta nuevas configuraciones para uno, dos, tres y cuatro cables por fase. Se obtiene con cuatro cables por fase una reducción casi completa del campo. Una técnica sencilla, aunque poco empleada con fines de reducción de campo, es el arrollamiento helicoidal de los cables.

Separación entre fases.

Según KAUNE y NUÑEZ (1998), el campo electromagnético generado por una línea disminuye conforme se reduce la separación entre conductores de distinta fase. Además, conforme crece la distancia a la línea la relación entre el campo magnético y la separación entre fases tiende a ser lineal. Ambos resultados se deducen de la expresión simplificada del campo obtenida. El diseño de líneas compactas ha sido objeto de estudio, no sólo por este efecto beneficioso, sino por otras ventajas, como la reducción de la servidumbre de paso, reducción de la impedancia de la línea, incremento de la potencia natural, reducción de la

compensación serie y paralela, etc. Sin embargo, el incremento del efecto corona ha dificultado la compactación en líneas con tensiones superiores a 138 kV.

Altura de conductores.

Según LA TORRE (1993), de la expresión matemática del campo electromagnético creado por líneas se deduce que éste disminuye al incrementarse la altura de los conductores. Además, esta variación no es constante en todos los puntos. Bajo la línea la variación del campo es función de la altura elevada a un exponente cuyo valor oscila entre 1,3 y 1,6. Conforme la distancia a la línea crece la variación con la altura es menor, hasta hacerse despreciable.

En HORTON y GOLBERG (1995), se muestran unas gráficas de las que se puede deducir que en líneas de 500 kV la distancia a partir de la cual el campo electromagnético creado por la línea es independiente de la altura está alrededor de los 50 m. Para líneas de 345 kV se reduce a 35 m. Por último, para líneas de 230 y 138 kV dicha distancia está alrededor de los 20 m. Incluso para una misma línea la disminución del campo electromagnético con la altura puede observarse midiendo el campo bajo la línea longitudinalmente. Debido a la catenaria que describe el conductor, en el centro de un vano el campo será mayor que en los extremos.

División de fases (fase partida).

En KAUNE y ZAFFANELLA (1993), se obtienen expresiones simplificadas del campo electromagnético creado por configuraciones de conductores con división en dos de las fases (dos conductores por fase), donde se observa una

reducción del campo con la distancia al cubo. Si la división es en tres fases se obtiene una reducción con la distancia elevada a la cuarta.

PETTERSSON (1992), provee una expresión similar del campo resultante válido para cualquier número de fases partidas, y cualquier número de conductores en cada fase.

2.1.1.3 Empleo de bucles de compensación.

Según KELHA y PUKKI (1982), el uso de bucles de compensación viene empleándose en aplicaciones biomédicas y físicas, preferentemente para reducir campos electromagnéticos continuos. Sin embargo, no ha sido hasta la última década cuando se ha empezado a considerar la posibilidad de aplicar la misma técnica a fuentes de campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas, en concreto las líneas aéreas. Se resumen a continuación las principales investigaciones.

WALLING y PASERBA (1993), analizan la mitigación que se consigue en una línea trifásica horizontal con la inserción de un bucle horizontal situado bajo la línea. Para aumentar la corriente inducida se inserta un condensador en serie en el bucle. De este modo se consigue una reducción no homogénea del campo, siendo máxima a unos 20 m de la línea. Se analiza también el efecto sobre la impedancia de la línea de la inserción de dicho circuito en la línea, observándose una ligera influencia en la impedancia de secuencia directa y la componente de secuencia negativa, y una influencia despreciable en la homopolar.

JONSSON y LARSSON (1994), analizan un esquema de compensación pasivo y activo aplicado a una configuración triangular o delta. El circuito de compensación consiste en tres conductores formando una configuración delta invertida. En este caso la corriente que circula por los conductores se genera por una fuente de alimentación independiente trifásica (compensación activa). Se observa una reducción a 100 m de la línea del 45% con la compensación pasiva con condensador, del 60% con la compensación activa suponiendo alimentación equilibrada, y una compensación total suponiendo alimentación independiente a cada fase. El valor de la intensidad por el circuito de compensación activo se obtiene mediante un cálculo iterativo.

MEMARI y JANISCHEWSKYI (1996), muestran los cálculos necesarios para obtener la intensidad inducida en el lazo de mitigación pasivo. Para ello calculan el flujo que atraviesa el lazo, y aplican la Ley de Inducción de Faraday para obtener la fuerza electromotriz inducida. Dividiendo por la impedancia del lazo se obtiene la intensidad. Demuestran también que con un lazo se puede reducir el campo electromagnético, no sólo sobre el suelo, sino en posiciones más elevadas.

OLSEN y WONG (1992), obtienen la intensidad inducida a partir de la expresión de la fuerza electromotriz inducida en los conductores del lazo, teniendo además en cuenta el efecto de la tierra.

RETA Y KARADY (1998), analizan teóricamente un diseño de pantalla activa con el

objeto de proteger un espacio reducido (unos 50 m²) frente al campo generado por una línea horizontal situada encima. Para ello se dispone una serie de lazos (entre 5 y 10) rodeando, a modo de jaula, el espacio a proteger. Se han obtenido atenuaciones de hasta el 95% en algunos puntos del interior. Una objeción importante a este esquema es la dificultad y coste implícito para alimentar de forma independiente un número tan elevado de lazos (en total entre 15 y 30).

2.1.1.4 Compensación mediante un material de alta permeabilidad magnética y/o conductividad eléctrica.

En HORTON y GOLBERG (1994), se obtiene un factor de reducción de 11 para un apantallamiento ferromagnético de 5 mm de espesor con una permeabilidad relativa de 10000, siendo la fuente un conductor aéreo. Se puede conseguir la misma eficacia con una pantalla conductora de cobre de 1,7 cm, o de aluminio de 2,9 cm.

WASSEF (1998), aplica el método de elementos finitos para analizar la atenuación conseguida por una pantalla cilíndrica concéntrica con el conductor. Si el cilindro es cerrado se obtiene poca atenuación. Si se abre por encima del cable un ángulo de unos 5° se obtienen reducciones bajo la línea del 50%. El estudio no indica qué reducción se consigue en puntos alejados de la línea.

En RIKITAKE (1987), se obtiene una solución analítica para pantallas cilíndricas de material ferromagnético, donde se observa que la reducción crece con el espesor del cilindro.

DURKIN y FOGARTY (1995), recogen experiencias de empleo de planchas de acero, colocadas encima de los cables, lo cual permite una reducción de dos a cuatro veces. En FARAG y DAWOUD (1999), se emplea una pantalla compuesta por dos planchas de materiales de alta y media permeabilidad, obteniéndose reducciones de hasta el 98%.

2.1.1.5 Empleo simultáneo de varios métodos.

HILES y OLSEN (1998), proponen una solución basada en el empleo simultáneo de chapas de material de alta permeabilidad y/o conductividad, junto con un lazo de mitigación activo. Esta solución puede aplicarse a todo tipo de fuentes de campos electromagnéticos. En particular, la aplican a la mitigación del campo electromagnético en el interior de una oficina contigua a un cuadro de protecciones por el que circula una intensidad de 1000 A. Se ensayaron diversas soluciones, obteniéndose un factor de reducción máximo de 6, con el empleo de chapa de aluminio o de acero. Empleando simultáneamente ambos materiales se obtuvo un factor de reducción de 9. Por último se añadió un lazo activo, con lo que se consiguió una reducción casi completa en algunos puntos de medida.

2.1.2. Mitigación del Campo Electromagnético Generado por otras Instalaciones Eléctricas.

En DURKIN y FOGARTY (1995), se recoge una experiencia relacionada con el empleo de pantallas de μ metal para reducir el campo electromagnético creado por celdas de protección de centros de transformación de baja tensión. Se consigue un campo 25 veces menor que el original con una pantalla de 1,59 mm de

espesor. Con la misma pantalla se consiguió igual atenuación cuando la fuente era una batería de condensadores de 200 kVAR.

HASSELGREN y HAMNERIUS (1994), presentan un ejemplo de apantallamiento de un centro de transformación de baja tensión. Para ello se emplean planchas de aluminio de 5mm de espesor, colocadas en el techo y paredes. Se consigue un campo 30 veces menor que el original.

2.2. MARCO REFERENCIAL.

2.2.1. Cálculo de Campos Electromagnéticos Creados por Líneas Aéreas.

Según PAPPA y BEN (1992), menciona que el cálculo exacto del campo electromagnético generado por líneas de transmisión requiere el empleo de las ecuaciones de Maxwell. En líneas de transmisión de potencia, debido a la baja frecuencia de la corriente, las ecuaciones de Maxwell se simplifican de manera que puede aplicarse la ley de Biot Savart a la curva catenaria que compone el conductor de un vano, o a modelos del conductor más simples. Uno de ellos es la división de la curva en elementos lineales a trozos. Otro considera los conductores rectilíneos e indefinidos (RI).

LA TORRE (1993), argumenta que la ley de Biot Savart considera los conductores reducidos a hilos de sección nula, hipótesis válida para distancias alejadas de los mismos, incluso cuando existe más de un conductor por fase. Es el caso habitual, ya que el interés se centra en determinar el campo cercano al suelo, donde existe una mayor exposición. Si se desea calcular el campo cerca de los conductores es más exacto aplicar el método de los elementos

finitos. HAMERER (1996), prueban que su aplicación en puntos alejados de la superficie de los conductores reduce el error de cálculo frente a la ley de Biot Savart. Un método alternativo para el cálculo del CM cerca de los conductores es el propuesto por ABDALLAH (1999), consiste en dividir cada sub conductor de cada fase en hilos cuyas intensidades se calculan de manera que satisfagan unas ecuaciones de contorno conocidas.

Se han propuesto diversas simplificaciones al modelo rectilíneo indefinido, como la expansión en series (KAUNE, 1998) o la descomposición en dipolos propuesta por PETTERSSON (1992), que presentan algunas ventajas: Permiten conocer los principales parámetros que influyen en el campo electromagnético generado por líneas aéreas, permiten conocer cómo varía el campo magnético con la distancia transversal a la línea, permiten analizar de una manera sencilla nuevos diseños de configuraciones que reducen el campo electromagnético generado, facilitan el análisis de técnicas de mitigación: división de fase, lazo pasivo y activo.

2.2.1.1 Cálculo del campo electromagnético a partir de las Ecuaciones de Maxwell.

OLSEN (1992), argumenta que del análisis de las ecuaciones de Maxwell se observa que la presencia de cargas en movimiento genera simultáneamente campos eléctricos y magnéticos acoplados, con lo cual el problema del cálculo de los campos eléctrico y magnético requiere la resolución de ecuaciones diferenciales lineales en derivadas parciales de segundo orden en las coordenadas espaciales y en el tiempo (ecuación de ondas electromagnéticas).

Una formulación más sencilla se obtiene teniendo en cuenta que la frecuencia de la corriente es pequeña en líneas de transmisión de potencia. Es posible entonces desacoplar los cálculos del campo eléctrico y magnético creados por la línea (campos cuasi estacionarios), siendo el primero función exclusiva del potencial del conductor, y el segundo de la corriente que circula por el mismo. Matemáticamente, esto significa despreciar, en la tercera ecuación de Maxwell el término correspondiente a la corriente de desplazamiento D .

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

\vec{H} representa la intensidad de campo magnético, \vec{J} la densidad de corriente eléctrica y t el tiempo.

WONG (1998), muestra a continuación con un ejemplo el error cometido con esta aproximación. Considérese una corriente uniforme $i(t)$ que circula por un hilo rectilíneo de longitud infinita en el vacío (figura 1). Supóngase además que el hilo está fijo en el espacio, pero la corriente varía senoidalmente con pulsación $\omega = 2\pi f$, siendo f la frecuencia. La tercera ecuación de Maxwell en forma integral y fasorial viene dada por:

$$\int_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \left(\vec{J} + j\omega \epsilon_0 \vec{E} \right) \cdot d\vec{s} \quad (2.2)$$

Siendo

S : Superficie de control.

C : Contorno de la superficie de control.

\vec{B} : Vector densidad de campo magnético.

\vec{E} : Vector campo eléctrico.

ϵ_0 : Permeabilidad dieléctrica del vacío (8.854×10^{-12} F/m)

μ_0 : Permeabilidad magnética del vacío ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

Teniendo en cuenta la simetría axial y radial, el primer miembro de (2.2) puede ponerse como:

$$\int_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = 2\pi r B_\phi \quad (2.3)$$

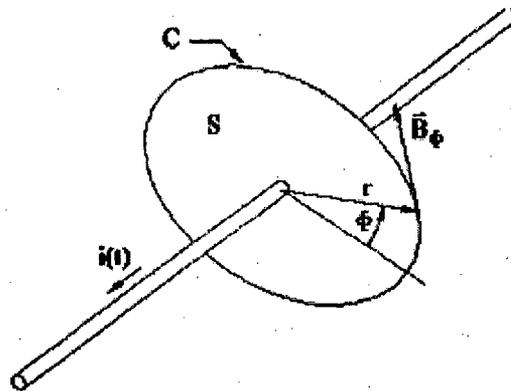


Figura 1: Campo magnético creado por la corriente $i(t)$

La solución exacta de (2.2) viene dada por:

$$B_\phi = \frac{\mu_0 I k}{4} (J_1(kr) \text{sen } wt - Y_1(kr) \text{cos } wt) \quad (2.4)$$

siendo $k = \omega/c$, c la velocidad de la luz en el vacío, e I la amplitud de la corriente.

Por otra parte $J_1(x)$ e $Y_1(x)$ son respectivamente las funciones de Bessel de orden 1, primera y segunda clase respectivamente.

$$J_p(x) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{i! \Gamma(p+1+i)} \left(\frac{x}{2}\right)^{1+2i} \quad (2.5)$$

$$Y_1(x) = \lim_{p \rightarrow 1} \frac{J_p(x) \cos px - J_{-p}(x)}{\sin px} \quad (2.6)$$

$$\Gamma(x+1) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^x dt \quad (2.7)$$

Para $kr \ll 1$ (2.5) y (2.6) se simplifican:

$$J_1(x) = \frac{x}{2} \quad (2.8)$$

$$Y_1(x) = \frac{-2}{\pi x} + \frac{1}{\pi} x \ln \frac{x}{2} \quad (2.9)$$

Sustituyendo en (2.4) se obtiene:

$$B_\phi = \frac{\mu_0 I \cos(\omega t)}{2\pi r} \quad (2.10)$$

Que coincide con la expresión del campo creado por una corriente rectilínea indefinida obtenida en (2.1) cuando se anula \vec{D} .

Si $f = 50$ Hz y $r = 1000$ m, se obtiene un error del 0.0004% al emplear (2.10) en lugar de (2.4). A distancias menores el error es aún más pequeño. Se concluye entonces que puede despreciarse la corriente de desplazamiento en (2.1).

2.2.1.2 Efecto de la tierra en el campo electromagnético creado por una línea eléctrica aérea.

CARSON (1926), argumenta que un hilo conductor situado sobre un medio continuo también conductor induce corrientes en el interior del medio. Esto es lo que ocurre al circular una corriente por los conductores de las líneas eléctricas aéreas situadas a cierta altura sobre la tierra. Este problema fue abordado por vez primera por Carson, quien consideró la tierra de resistividad uniforme e infinita en extensión. A partir de las ecuaciones de Maxwell, de la teoría de circuitos, y de resultados experimentales, Carson obtuvo unas expresiones de las impedancias propia y mutua entre dos conductores. Dada la complejidad de las expresiones, posteriormente se han desarrollado formulaciones alternativas más simples y con suficiente exactitud.

WAIT (1969), explica una de ellas, para ello se considera un conductor situado en (x_1, y_1) (figura 2). Wait considera el efecto de la tierra equivalente al de un conductor imagen, de igual radio, por el que circula la misma intensidad que el real, y situado en (x, y, α) , siendo:

$$\alpha = \sqrt{2}\delta e^{-j\frac{\pi}{4}} \quad (2.11)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\mu_0\omega}} \quad (2.12)$$

Donde σ es la conductividad de la tierra en S/m.

KOGLIN (1972), explica en otra formulación que se considera la tierra compuesta por un conjunto de capas conductoras con distribución uniforme de corriente en cada una. Una última considera sólo el primer término de la serie de Carson, ésta aproximación es válida para distancias a la línea menores de 150 m, y resistividad del terreno superior a $3 \Omega\text{m}$. Debido a que a la frecuencia de 60 Hz la profundidad del conductor imagen es mucho mayor que la altura del conductor real, el efecto del conductor imagen puede despreciarse cuando se mide el campo magnético a distancias inferiores a un cierto valor.

Se determina a continuación, para el caso concreto de la línea de la figura 2 el error cometido a diferentes distancias de la línea, cuando no se consideran los conductores imágenes. Suponiendo conductores de longitud infinita el campo debido a cada conductor viene dado por (2.10).

El campo total se obtendrá sumando vectorialmente el debido a cada conductor. La figura 3 muestra las curvas de error, para dos valores distintos de σ en función de la distancia a la línea. La altura de la línea es 10 m y la distancia entre fases 8 m, valores típicos de líneas de transporte. Los valores de $|\alpha|$ son 318 m ($\sigma = 0, 1 \text{ S/m}$) y 1007 m ($\sigma = 0, 01 \text{ S/m}$), muy superiores a la altura de la línea.

De la figura 3 se puede observar que el error cometido depende sensiblemente de la resistividad del terreno. Para una resistividad típica de $100 \Omega\text{m}$ se observa un error pequeño (menor del 3%) cuando se calcula el campo para distancias inferiores a unos 400 m. Para una resistividad elevada del terreno ($10 \Omega\text{m}$) la distancia para la cual el error es menor del 3% se reduce a 150 m.

A esta distancia el campo electromagnético creado por líneas aéreas de AT presenta unos valores mucho menores que a distancias más cercanas, por lo que el cálculo exacto del campo presenta un interés secundario. En la presente tesis se calculará el campo a distancias inferiores a 100 m, por lo que no se considerará la presencia de los conductores imagen.

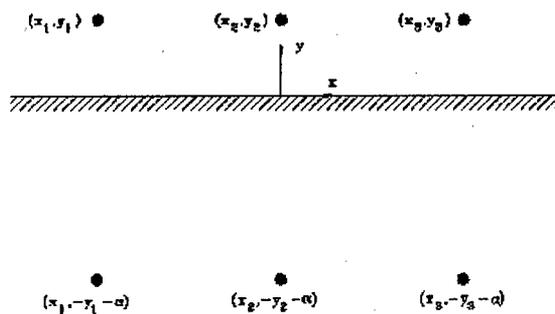


Figura 2: Línea trifásica de ejemplo para el cálculo del error del CM al no considerar el efecto de la tierra.

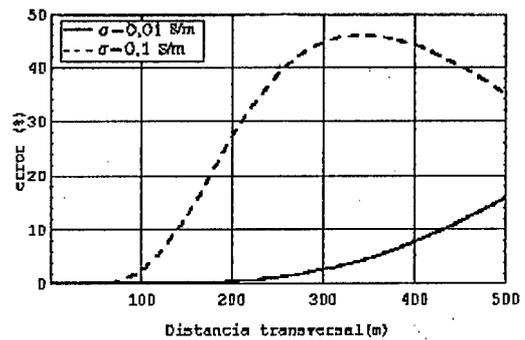


Figura 3: Curvas de error en el cálculo del CM al no considerar el efecto de la tierra.

2.2.1.3 Cálculo del campo electromagnético a partir del modelo de la catenaria.

PLONUS (1878), menciona que hasta ahora se ha considerado que los conductores son rectilíneos. Sin embargo, los conductores describen una catenaria entre dos puntos de suspensión. La línea se compondrá por tanto de sucesivas catenarias. Se analiza a continuación el error cometido al sustituir la catenaria por una recta.

Para obtener el campo creado por un vano finito en el que los conductores describen una catenaria, es necesario integrar el campo creado por un diferencial de longitud a lo largo de todo el vano. Para ello se empleará la ley de Biot Savart. El campo magnético en (x,y,z) creado por la intensidad $i_i(t)$ en el conductor i , viene dado por (figura 4):

$$\vec{B}_i(x, y, z, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\vec{r}_{ia}}^{\vec{r}_{ib}} \frac{i_i(t) d\vec{r}_i \wedge (\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} \quad (2.13)$$

Siendo $\vec{r} = (x, y, z)$ el vector posición del punto donde se calcula el campo, y $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ el vector posición de cada punto del conductor.

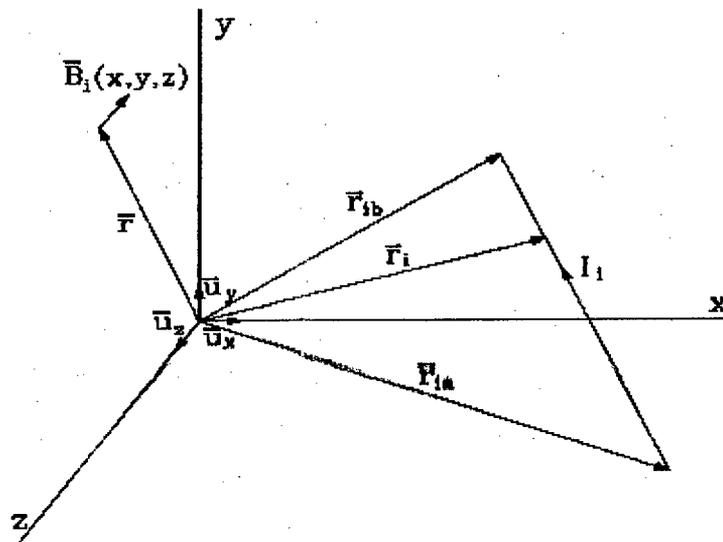


Figura 4: Campo magnético en (x, y, z) debido a la intensidad $i_i(t)$

Si se considera la catenaria contenida en el plano $x=0$ (figura 5) la ecuación de la curva será:

$$y_i(z) = L \cosh \frac{z}{L} \quad (2.14)$$

donde L es la constante de la catenaria. Integrando (2.13) entre $\vec{r}_{ia} = (0, y_i, (-0.5v), 0.5v)$ y $\vec{r}_{ib} = (0, y_i, (0.5v), 0.5v)$ se obtiene el campo \vec{B}_i creado por el conductor i .

PLONUS (1878), sostiene que sumando el campo creado por cada uno de los conductores de la línea se obtiene el campo total. Considérese para la configuración de la figura 2, una línea compuesta por vanos de distancia $v = 400$ m y flechas $f = 12$ m. La distancia entre fases es 8 m y la altura mínima al suelo 10 m. Los valores anteriores son típicos en líneas de transporte a 500 kV. De (2.14) se obtiene $L = 1669$ m.

La figura 6 muestra las curvas de error en el campo obtenidas al sustituir la catenaria por una recta cuya altura es 10 m. Las curvas se han obtenido a lo largo de una trayectoria transversal (eje x), en medio ($z = 0$) y en un extremo ($z = -0.5v$) del vano central, teniendo 2 vanos a cada lado.

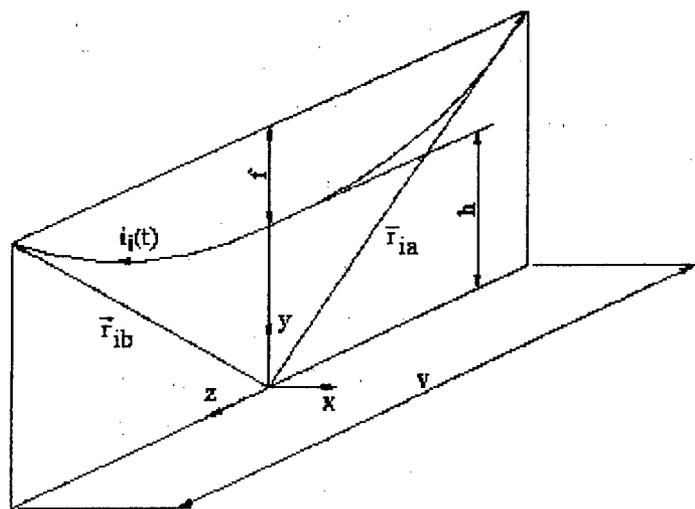


Figura 5: Vano y dimensiones principales

Este número de vanos adyacentes es suficiente para obtener un campo con un error menor del 0.5% respecto a la línea con un número mucho mayor de vanos (caso más realista), cuando se calcula el campo a menos de 100 m de la línea. Se observa de la figura que el error cometido al considerar la línea formada por conductores rectilíneos de altura 10 m es menor del 10% a distancias inferiores a 100 m, a lo largo de la trayectoria transversal $z = 0$ a 1 m sobre el suelo. Sin embargo, para la trayectoria $z = -0.5v$ (extremo del vano) el error es mayor bajo la línea (hasta un 250%), siendo menor a mayores distancias.

MAMISHEY (1996), propone una manera de reducir el error en $z \neq 0$. Para ello se emplea el modelo de conductor rectilíneo de longitud infinita, pero cuya altura coincide con la de la catenaria en la coordenada z donde se desea calcular el campo. Por ejemplo, para el caso anterior ($z = -0.5v$), la altura de cálculo será $h + f = 22$ m. Con dicho valor resulta el error (figura 7). Se muestra también el error para la distancia intermedia $z = -v/4$. El máximo de error se obtiene para $z = -v/2$ bajo la línea, siendo inferior al 12%. Este error varía para otras longitudes de vano, configuraciones de conductores o dimensiones geométricas de la línea, aunque se obtienen resultados similares.

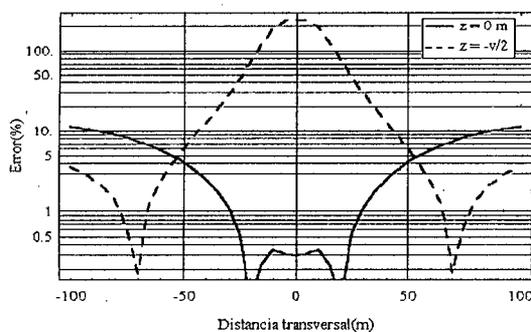


Figura 6: Curvas de error en el CM al considerar modelo rectilíneo.

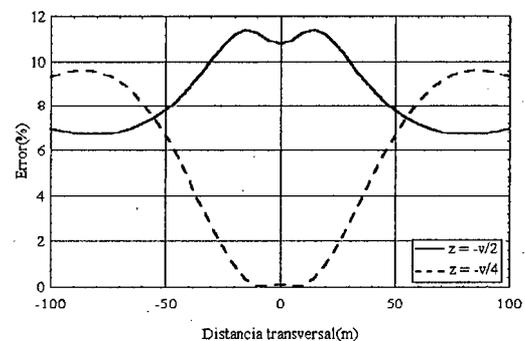


Figura 7: Curvas de error en el CM al considerar modelo rectilíneo con altura variable.

NEVEL (1996), argumenta una última alternativa que se ha probado, es la sustitución de la catenaria por dos tramos rectilíneos cuyos extremos son los puntos de suspensión y el centro del conductor en el vano. Se puede obtener una expresión explícita del campo creado por un vano, con lo que el cálculo se simplifica notablemente respecto a la catenaria.

La figura 8 muestra las curvas de error cuando se aplica este procedimiento de cálculo. Se observa que el error ha aumentado para $z = 0$, pero ha disminuido en $z = -v/2$. Puede ser una opción válida si se desea reducir el error máximo.

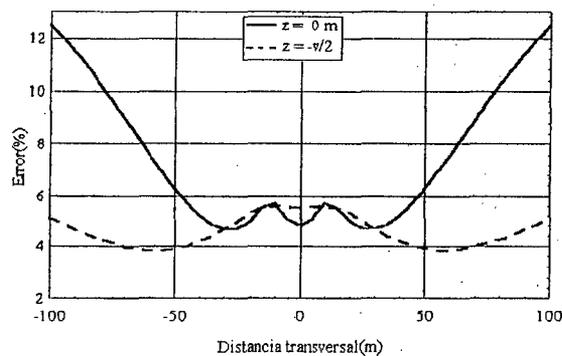


Figura 8: Curvas de error en el CM al considerar modelo con dos tramos rectilíneos.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Durante el recorrido de esta investigación la metodología se trabajó enfocada al cumplimiento de los objetivos como parte fundamental en el proceso de investigación científica, con la finalidad de que nos permita predecir, explicar y describir los fenómenos y adquirir conocimientos de esos fenómenos estudiados, en tal sentido la metodología se orientó para el cumplimiento de los siguientes objetivos:

- 1) Analizar técnicas de mitigación de campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas de alta tensión, para desarrollar técnicas fiables a bajo coste que mitiguen los campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas de alta tensión, en tramos en los que puede existir una especial incidencia sobre zonas urbanas y rurales.
- 2) Determinar la eficacia de las técnicas de mitigación para seleccionar la más adecuada para alcanzar las metas propuestas.
- 3) Formular modelos de cálculo de los campos electromagnéticos, para efectuar la comparación entre los niveles de campo electromagnético

creados por las principales configuraciones empleadas en líneas de alta tensión.

3.1. MÉTODO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

Método explicativo.- Por otro lado el método va más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o el establecimiento entre conceptos, están dirigidos a responder las causas de los eventos físicos o sociales, que para este trabajo, se hizo uso de diferentes fuentes de información que garantizaron el punto de partida de la investigación, que ayudó a la creación de diferentes propuestas que facilitaron la prevención y disminución de los problemas causados por la contaminación electromagnética y de esta manera se logró plantear un conjunto de soluciones que orienten a las diferentes entidades privadas y ambientales para que resuelvan la problemática ambiental planteada anteriormente.

Diseño.- Es el plan o estrategia que se desarrollará para obtener la información que requiere la investigación. Se aplicará el método no experimental transeccional o transversal descriptivo, ya que se recolectaron datos en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito es describir variables, y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. Es como tomar una fotografía de algo que sucede.

3.2. TIPOLOGÍA Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN.

Tipo.- Esta es una investigación analítica, consiste fundamentalmente en establecer la comparación de variables entre grupos de estudio y de control.

Además, se refiere a la proposición de hipótesis que el investigador trata de probar o invalidar.

Por otro lado en cuanto a los procedimientos y técnicas de mitigación desarrollados, se efectuaron considerando los impactos ambientales respecto de un transporte de energía limpia y sostenible, la cual podrá ser utilizada como nuevo conocimiento por empresas dedicadas al transporte de energía eléctrica y entidades fiscalizadoras, como gestión ambiental en el transporte de energía.

Nivel.- Tomando como referencia la naturaleza de las variables, esta es una investigación del tipo descriptivo, debido a que la investigación descriptiva ofrece la posibilidad de predicción y requiere considerable conocimiento del área que se investiga para formular las preguntas específicas que se busca responder.

3.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

La recolección de los datos fue dada a partir de un estudio bibliográfico detenido en documentación teórica y conceptual referente al tema del análisis de técnicas de mitigación de campos electromagnéticos generados por líneas eléctricas de alta tensión, además de las teorías de localización y contextualización de las políticas de transmisión de energía eléctrica.

Recolección de datos del primer y segundo objetivo:

Se efectuó una recopilación de los principales estudios realizados relacionados con la mitigación del campo creado por instalaciones eléctricas, dentro de las

cuales se pudieron distinguir dos estrategias de reducción del campo electromagnético.

Por otro lado se encontró que para ambas estrategias existen dos técnicas de mitigación: activa y pasiva.

Recolección de datos del tercer objetivo:

De igual manera se efectuó una recopilación de estudios sobre formulaciones para el cálculo de campos electromagnéticos, a partir de la descomposición en dipolos magnéticos, con la que se han obtenido algunas propiedades del campo creado por líneas trifásicas.

3.4. TÉCNICAS DE ANÁLISIS.

Una vez recolectada la información a partir del estudio bibliográfico, se crea un texto de transcripción y se procede al análisis de los datos mediante el análisis de contenido.

Análisis del primer y segundo objetivo:

Se ha analizado la posibilidad de mitigar el campo mediante la división de una, dos, o las tres fases.

Se ha analizado y contrastado experimentalmente el empleo de lazos pasivos y activos de mitigación.

Análisis del tercer objetivo:

Se ha analizado y desarrollado una formulación alternativa al modelo RI, a partir de la descomposición en dipolos magnéticos, con la que se han obtenido

algunas propiedades del campo creado por líneas trifásicas.

Una vez desarrollados los modelos de cálculo, se han aplicado al diseño de líneas aéreas de simple circuito.

Este análisis se basa en las características que Pérez (2002), indica que se repiten con mayor frecuencia en su definición del análisis de contenido:

Objetividad.- Supone el empleo de procedimientos de análisis que puedan ser reproducidos por otros investigadores, de modo que los resultados obtenidos sean susceptibles de verificación. Por lo tanto, las unidades de mensaje que han sido fragmentadas, las categorías que sirven para clasificar las escalas, etc, deben definirse con claridad y precisión para que a partir de los criterios indicados, los investigadores puedan realizar la misma investigación.

Sistematicidad.- Es una cualidad del análisis de contenido por la que la inclusión o exclusión de determinadas categorías se hace de acuerdo con unas reglas y criterios previamente establecidos. Su finalidad es la de impedir cualquier selección arbitraria que pudiera retener solamente aquellos elementos que estuvieran de acuerdo con la tesis del investigador. La fidelidad a esta regla especialmente importante cuando el análisis de contenido se utiliza para verificar hipótesis.

Contenido manifiesto.- Implica que se puedan cifrar numéricamente los resultados del análisis. Todo mensaje está considerado como una secuencia

de datos aislables, susceptibles de ser ordenados por categorías y tratados de manera estadística.

Capacidad de generalización.- El análisis de contenido no se limita al recuento de frecuencias y tabulación de datos cualitativos, sino que lleva a cabo estos procesos en vista a la prueba de hipótesis, para extraer conclusiones de cara a una investigación. De ahí la importancia de llevar a cabo un proceso inferencial que culmine con una generalización.

3.5. COBERTURA A BENEFICIAR

Como resultado de todo lo expuesto anteriormente, el presente trabajo de investigación, garantizará el punto de partida de nuevas investigaciones, que ayudarán a la creación de diferentes propuestas que facilitaran la prevención y disminución de los problemas causados por la contaminación electromagnética y de esta manera se logrará plantear un conjunto de soluciones que orienten a las diferentes entidades públicas y privadas relacionadas a aspectos ambientales para que resuelvan la problemática planteada anteriormente de manera eficiente.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados y discusión respecto al primer y segundo objetivo.

4.1. Mitigación de Campos Electromagnéticos mediante la División de Fases.

Como se indicó en el capítulo 2, se consigue una configuración de baja emisión magnética cuando se divide una o varias fases en dos o más conductores distintos.

En KAUNE Y NUÑEZ (1993), se obtienen expresiones a partir de la aproximación en serie de potencias. Por otro lado PETERSSON (1996), obtiene la misma formulación, a partir de la descomposición en dipolos.

Ambas son válidas únicamente para puntos alejados de la línea. En este epígrafe se analiza el campo creado por dicha configuración, justificando su comportamiento magnético desde el punto de vista de la descomposición en dipolos, se estudia su efectividad, y se introducen expresiones de cálculo aproximadas, válidas para cualquier punto, cercano o lejano a la línea.

Tal como se procedió en el análisis del dipolo, conviene estudiar primeramente el campo creado por dos dipolos con igual intensidad, y que se conoce como cuadripolo de corriente.

La figura 9 muestra un dipolo y un cuadripolo por el que circula la misma intensidad, la altura mínima al suelo es la misma, y la distancia mínima entre fases también (cuadripolo equivalente). Del diagrama dipolar se observa que el campo creado por el dipolo 2 se opone en gran medida al campo creado por el dipolo 1, obteniéndose un campo resultante menor.

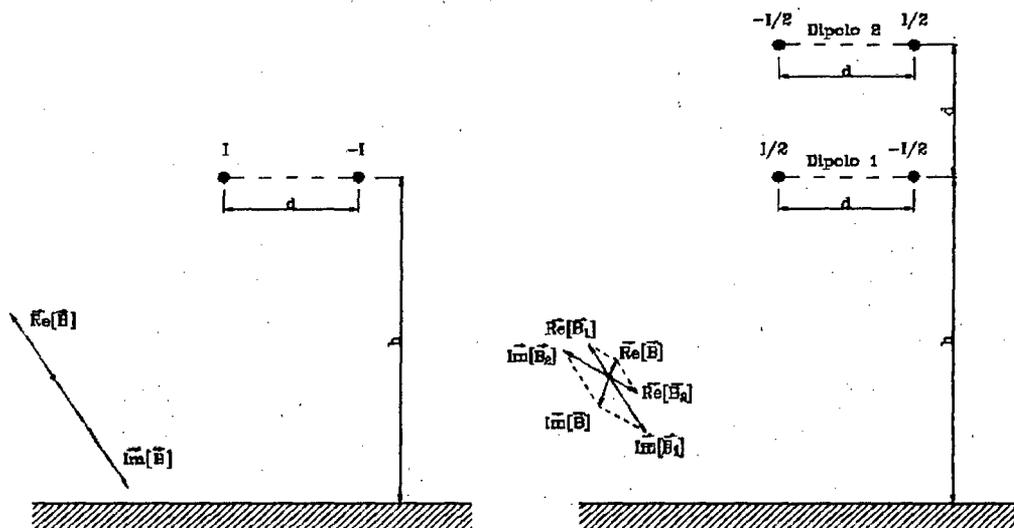


Figura 9: Dipolo magnético (izquierda), cuadripolo de corriente equivalente, y diagrama dipolar de ambos (derecha).

Este resultado se obtiene también con el cuadripolo de tres conductores mostrado en la figura 10, donde dos de las corrientes de igual polaridad circulan por el mismo conductor.

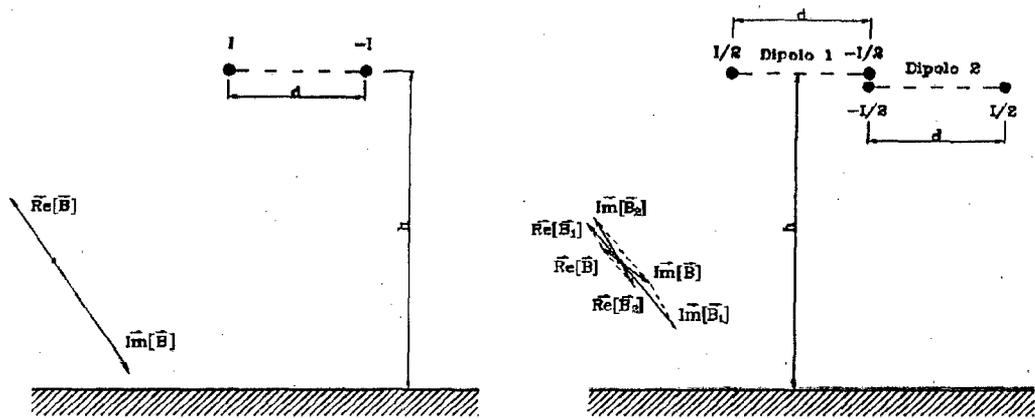


Figura 10: Dipolo magnético (izquierda) y cuadrípulo de corriente equivalente (derecha) formado por tres conductores (el conductor central se ha desdoblado en dos para distinguir ambos dipolos).

Para $h = 10$ m y $d = 8,5$ m la eficiencia del cuadrípulo rectangular en x_t es de 0.2 (se reduce el campo a $1/5$ de su valor), mientras que la correspondiente al cuadrípulo plano es 0.25 (se reduce el campo a $1/4$ de su valor). Obsérvese también de las figuras 9 y 10 que con el cuadrípulo plano se consigue un ángulo de $\vec{R}_e \left[\vec{B}_2 \right]$ más en oposición que con el cuadrípulo rectangular.

Sin embargo la reducción del campo es menor, debido a que el módulo de \vec{B}_1 es un 30% superior en el caso plano, mientras que el módulo de \vec{B}_2 es prácticamente el mismo.

Se obtienen a continuación las ecuaciones del campo magnético creado por un cuadrípulo de corriente, a partir de la descomposición en dipolos.

4.1.1. Campo magnético creado por un cuádrupolo.

Considérense dos dipolos formando un cuádrupolo (figura 11).

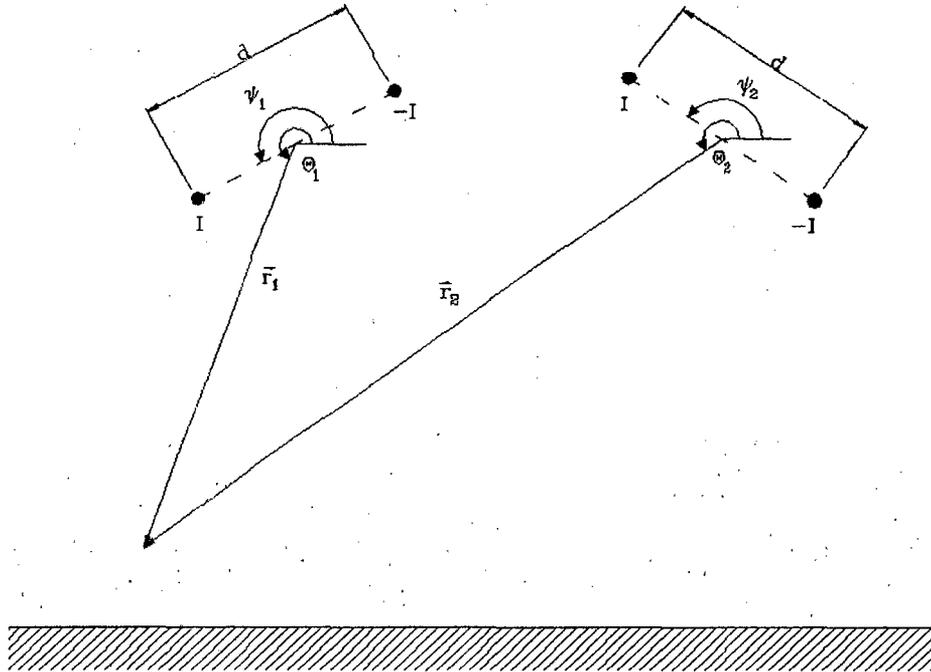


Figura 11: Parámetros que definen un cuádrupolo de corriente

El campo creado por cada dipolo, viene dado por:

$$\vec{B}_{1a} = \frac{\mu_0 M}{2\pi r_1^2} (\cos \varphi_{1a} \vec{u}_r + \sin \varphi_{1a} \vec{u}_y) \quad (4.1)$$

$$\vec{B}_{2a} = \frac{\mu_0 M}{2\pi r_2^2} (\cos \varphi_{2a} \vec{u}_r + \sin \varphi_{2a} \vec{u}_y) \quad (4.2)$$

Siendo:

$$\varphi_{1a} = 2\theta_1 - \psi_1 + \frac{\pi}{2} \quad (4.3)$$

$$\varphi_{2a} = 2\theta_2 - \psi_2 + \frac{\pi}{2} \quad (4.4)$$

El campo resultante se calcula aplicando el teorema del coseno:

$$|\vec{\text{Re}}[\vec{B}_a]|^2 = \left(\frac{\mu_0 \text{Re}[I]d}{2\pi} \right)^2 \left(\frac{1}{r_1^4} + \frac{1}{r_2^4} + \frac{2}{r_1^2 r_2^2} \cos(\varphi_{1a} - \varphi_{2a}) \right) \quad (4.5)$$

$$|\vec{\text{Im}}[\vec{B}_a]|^2 = \left(\frac{\mu_0 \text{Im}[I]d}{2\pi} \right)^2 \left(\frac{1}{r_1^4} + \frac{1}{r_2^4} + \frac{2}{r_1^2 r_2^2} \cos(\varphi_{1a} - \varphi_{2a}) \right) \quad (4.6)$$

$$B_{ar}^2 = \left(\frac{\mu_0 I d}{2\pi} \right)^2 \left(\frac{1}{r_1^4} + \frac{1}{r_2^4} + \frac{2}{r_1^2 r_2^2} \cos(\varphi_{1a} - \varphi_{2a}) \right) \quad (4.7)$$

Es interesante analizar el campo creado por un tipo de cuadrípolos, en los que se cumple que $(\psi_1 = \pi + \psi_2)$. Para puntos alejados de la línea $\theta_1 \approx \theta_2$, con lo que $\varphi_1 - \varphi_2 = -\pi$. Por otro lado $r_1 \approx r_2$, con lo que (4.7) tiende a anularse más rápidamente que en el caso del dipolo. En el siguiente apartado se analizará esto con más detalle.

En los siguientes apartados se obtienen las configuraciones óptimas para las líneas trifásicas equilibradas con 1, 2 o 3 fases divididas. Conviene indicar que las soluciones se han obtenido para una altura mínima al suelo de 10 m, y una distancia mínima entre fases de 8,5 m.

Se ha observado que para otros valores varía ligeramente la solución. Sin embargo, de la simulación se ha deducido que el campo creado por la solución presentada, a otra altura y distancia entre fases (siempre dentro del rango empleado en líneas de transporte), es muy similar al que generan las configuraciones óptimas a dicha altura o distancia entre fases.

4.1.2. Línea trifásica equilibrada con una fase dividida.

Una línea trifásica equilibrada con una fase dividida puede descomponerse en un cuadripolo de tres conductores (dipolos 1 y 2) y un dipolo (dipolo 3) (figura 12). Se supondrá en lo que sigue que la intensidad por el cuadripolo I_q viene dada por:

$$I_q = \frac{1}{2}I_a = \frac{1}{2}I e^{j0} \quad (4.5)$$

Mientras que la intensidad por el dipolo podrá tomar dos valores distintos:

$$I_3 = I_c = I e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (4.6)$$

$$I_3 = I_b = I e^{j\frac{-2\pi}{3}} \quad (4.7)$$

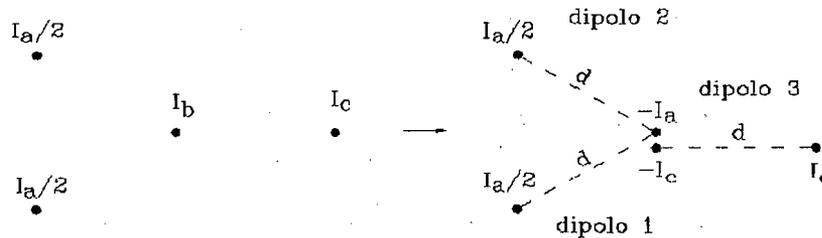


Figura 12 : Línea trifásica con una fase dividida y su descomposición en un cuadripolo y un dipolo.

El campo resultante es la suma del generado por el cuadripolo y por el dipolo.

El debido al cuadripolo no tiene parte imaginaria. El debido al dipolo tiene parte

real (la misma si I_3 viene dado por (4.6) o (4.7)) e imaginaria, cuyo vector $\vec{I}_m \left[\vec{B}_3 \right]$

tendrá un sentido o el opuesto dependiendo del valor de I_3 . Esto, sin embargo, no

afectará al campo resultante generado por el cuadrupolo y el dipolo, ya que

$\vec{I}_m \left[\vec{B}_q \right] = 0$, por lo que se puede escoger cualquiera de los dos valores.

Se analiza en primer lugar la posibilidad de obtener una configuración para la cual el CM varíe con $(1/r^3)$. Dado que la línea puede dividirse en dos conjuntos de conductores con corriente neta nula en cada uno, el momento de segundo orden del desarrollo en serie de potencias del campo debido a la línea puede ponerse como suma de dos momentos de segundo orden calculados de forma independiente: el debido al cuadrupolo y al dipolo.

$$\vec{M}_2 = \vec{M}_{d2} + \vec{M}_{q2} \quad (4.8)$$

Se vio en el apartado 4.1.1 que es posible obtener cuadrupolos en los que se cumple $M_{q2} = 0$.

Sin embargo \vec{M}_{d2} no es nunca nulo, con lo que el campo debido a la línea no puede variar con $(1/r^3)$.

Se determina a continuación la configuración que minimiza el campo. Para ello se supondrá que, al igual que en el caso anterior, la distancia d entre los conductores de los dos dipolos que componen el cuadrupolo es la misma, e igual a la distancia entre los conductores del dipolo (figura 12).

De la resolución se determinan los valores de α, β, γ que minimizan IC , el campo en x_m y el campo en x_l :

- Configuración que maximiza el índice de compacidad (A1)

$$\alpha = 0^\circ$$

$$\beta = 60^\circ$$

$$\gamma = 0^\circ \quad (\text{Figura 13})$$

- Configuración que minimiza el campo en x_m (B1)

$$\alpha = 69^\circ$$

$$\beta = 36^\circ$$

$$\gamma = 96^\circ \quad (\text{Figura 14})$$

- Configuración que minimiza el campo en x_t (C1)

$$\alpha = 40^\circ$$

$$\beta = 82^\circ$$

$$\gamma = 142^\circ \quad (\text{Figura 15})$$

Los cuadros 1, 2 y 3 muestra los valores de IC/IC_0 , $F A(x_m)$ y $F A(x_t)$ para las configuraciones indicadas y distintas alturas. Se han obtenido suponiendo conductores rectilíneos e indefinidos (RI) y con la aproximación DA. IC_0 es el índice de compacidad de una línea trifásica simple configuración tresbolillo, de altura 10 m y distancia entre conductores 8,5 m. Para el cálculo de $F A$ se ha tomado como campo de referencia el generado también por dicha línea. Se ha tomado como referencia la configuración tresbolillo por ser la que genera un campo reducido.

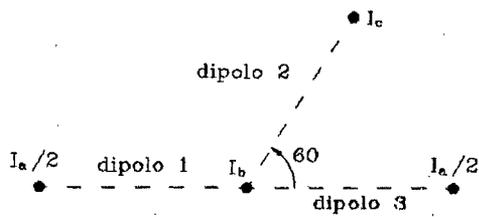


Figura 13: Línea con 1 fase partida. Configuración que maximiza el índice de compatibilidad (A1).

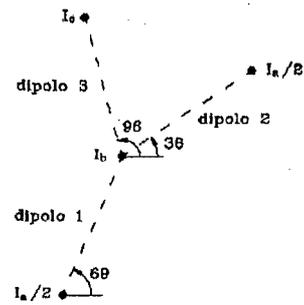


Figura 14: Línea con 1 fase partida. Configuración que minimiza el campo en x_m (B1).

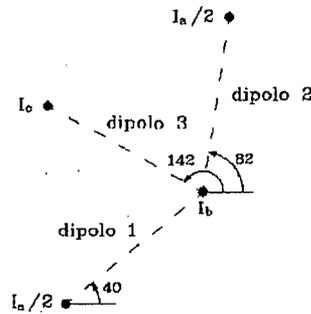


Figura 15: Línea con 1 fase partida. Configuración que minimiza el campo en x_t (C1)

Cuadro 1 : Valores de IC/IC_0 , $FA(x_m)$ y $FA(x_t)$ para la configuración A1

h (m)	IC/IC_0		$FA(x_m)$		$FA(x_t)$	
	RI	DA	RI	DA	RI	DA
10	1,19	1,28	1,41	1,53	1,18	1,20
14	0,75	0,74	0,80	0,80	1,06	1,09
18	0,54	0,51	0,51	0,49	0,94	0,96

Cuadro 2 : Valores de IC/IC_0 , $FA(x_m)$ y $FA(x_t)$ para la configuración B1

h (m)	IC/IC_0		$FA(x_m)$		$FA(x_t)$	
	RI	DA	RI	DA	RI	DA
10	0,72	0,58	0,49	0,42	0,69	0,72
14	0,50	0,42	0,30	0,26	0,61	0,63
18	0,39	0,33	0,21	0,19	0,53	0,56

Cuadro 3 : Valores de IC/IC_0 , $FA(x_m)$ y $FA(x_t)$ para la configuración C1 (figura 5.13).

h (m)	IC/IC_0		$FA(x_m)$		$FA(x_t)$	
	RI	DA	RI	DA	RI	DA
10	0,81	0,75	0,52	0,50	0,64	0,67
14	0,55	0,50	0,31	0,29	0,56	0,59
18	0,42	0,38	0,21	0,19	0,49	0,52

De los cuadros puede observarse lo siguiente:

- El índice de compacidad es superior al del dipolo para la configuración A1, siendo inferior en las otras dos.
- En las configuraciones B1 y C1 el campo bajo la línea para $h = 10$ m es aproximadamente 2 veces menor que en el caso de la configuración T. Aunque no aparece indicado en las tablas, se ha comprobado que la eficiencia respecto a la configuración T de igual altura se mantiene sensiblemente constante con la altura.

- Igualmente, en ambas configuraciones el campo en x_t para $h = 10$ m se reduce aproximadamente 35% respecto al campo creado por T. Aunque no se refleja en las tablas, se ha comprobado que la eficiencia respecto a la configuración T de igual altura se mantiene sensiblemente constante al variar la altura.
- El campo se reduce bajo la línea aproximadamente un 9% por cada metro de incremento de altura de los conductores. En x_t dicho incremento se reduce al 3%.
- En el cálculo de F A se cometen errores menores del 10% al emplear la aproximación DA.

La figura 16 muestra los perfiles transversales de campo de la configuración T y las configuraciones A1, B1 y C1 para una corriente por fase de 500 A, $h = 10$ m y $d = 8.5$ m.

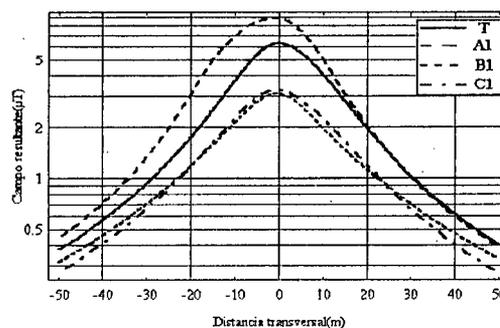


Figura 16: Campo generado por las configuraciones T, A1, B1, y C1, para $h = 10$ m, $d = 8,5$ m y 500 A de intensidad por fase.

4.1.3. Línea trifásica equilibrada con dos fases divididas.

Una línea trifásica equilibrada con dos fases divididas puede descomponerse en dos cuadripolos de tres conductores (figura 17).

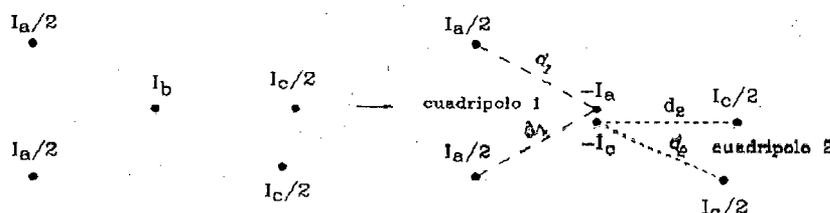


Figura 17: Línea trifásica con dos fases divididas y su descomposición en dos cuadripolos de tres conductores.

Las intensidades de ambos cuadripolos serán:

$$I_1 = \frac{I_a}{2} e^{j0} \quad (4.9)$$

$$I_2 = \frac{I_a}{2} e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (4.10)$$

El campo generado por el cuadripolo 1 no tiene parte imaginaria. El generado por el cuadripolo 2 tendrá parte imaginaria, y su desfase respecto a la real será de π , como se vio en el apartado 4.1.1.

Dado que la línea puede descomponerse en dos cuadripolos, el momento de segundo orden del desarrollo en serie del campo creado por la línea será nulo cuando lo sean los correspondientes a ambos cuadripolos. Se vio que para que el momento de segundo orden de un cuadripolo sea nulo se ha de verificar que la suma vectorial de los momentos magnéticos de los dipolos que lo integran

ha de ser nula. En cuadripolos formados por tres conductores esto se cumple cuando los conductores están alineados. La figura 18 muestra dos ejemplos.

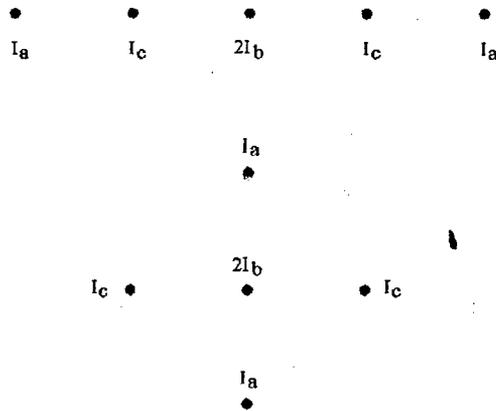


Figura 18: Ejemplos de configuraciones con dos fases partidas cuyo CM varía con $1/r^3$

Se determinan a continuación las configuraciones que minimizan el índice de compacidad y el campo bajo la línea y en el límite de la servidumbre de paso. Para ello se supondrá que, al igual que en los casos anteriores, la distancia d_1 entre los conductores de los dipolos que pertenecen al cuadripolo 1 es la misma. Análogamente sucede con la distancia d_2 y los dipolos del cuadripolo 2.

De la resolución se determinan los valores de $\psi_{11}, \psi_{12}, \psi_{21}, \psi_{22}$ que minimizan IC , el campo en x_m y el campo en x_l :

- Configuración que maximiza el índice de compacidad (A2)

$$\psi_{11} = 30^\circ$$

$$\psi_{12} = 210^\circ$$

$$\psi_{21} = 150^\circ$$

$$\psi_{22} = 330^\circ$$

$$d_2 = d_1 \quad (\text{Figura 19})$$

- Configuración que minimiza el campo en x_m (B2)

$$\psi_{11} = 24^\circ$$

$$\psi_{12} = 250^\circ$$

$$\psi_{21} = 310^\circ$$

$$\psi_{22} = 190^\circ$$

$$d_2 = d_1 \quad (\text{Figura 20})$$

- Configuración que minimiza el campo en x_l (C2)

$$\psi_{11} = 18^\circ$$

$$\psi_{12} = 210^\circ$$

$$\psi_{21} = 90^\circ$$

$$\psi_{22} = 270^\circ$$

$$d_2 = d_1 \quad (\text{Figura 21})$$

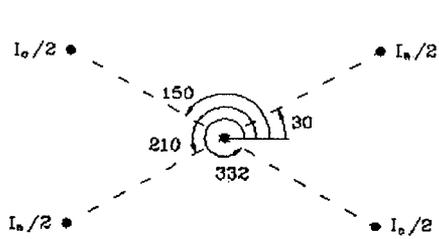


Figura 19: Línea con 2 fases partidas. Configuración que maximiza el índice de compacidad (A2).

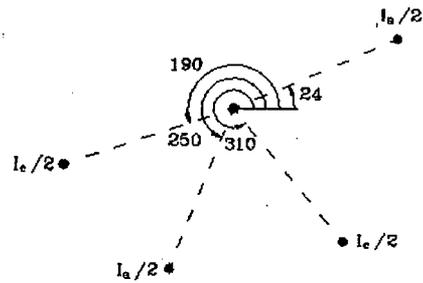


Figura 20: Línea con 2 fases partidas. Configuración que minimiza el campo en x_m (B2).

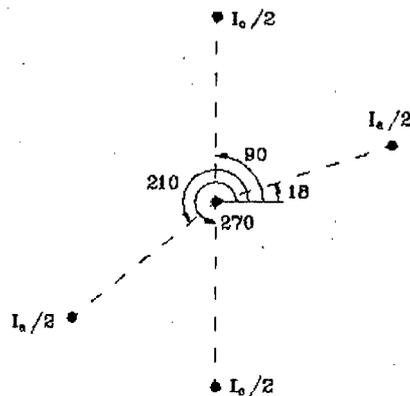


Figura 21: Línea con 2 fases partidas. Configuración que minimiza el campo en x_t (C2)

Los cuadros 4, 5 y 6 muestran los valores de IC/IC_0 , $F A(x_m)$ y $F A(x_t)$ para las configuraciones indicadas y distintas alturas. Se han obtenido considerando conductores rectilíneos e indefinidos (RI) y con la aproximación DA. IC_0 es el índice de compacidad de una línea trifásica cuya configuración es al tresbolillo, de altura 10 m y distancia entre conductores 8,5 m. Para el cálculo de $F A$ se ha tomado también como campo de referencia el generado por dicha línea.

Cuadro 4 : Valores de IC/IC_0 , $FA(x_m)$ y $FA(x_t)$ para la configuración A2

h (m)	IC/IC_0		$FA(x_m)$		$FA(x_t)$	
	RI	DA	RI	DA	RI	DA
10	1,68	1,80	0,55	0,60	0,33	0,33
14	1,05	1,04	0,29	0,29	0,27	0,28
18	0,73	0,69	0,17	0,16	0,23	0,23

Cuadro 5 : Valores de IC/IC_0 , $FA(x_m)$ y $FA(x_t)$ para la configuración B2

h (m)	IC/IC_0		$FA(x_m)$		$FA(x_t)$	
	RI	DA	RI	DA	RI	DA
10	0,61	0,46	0,28	0,21	0,46	0,46
14	0,35	0,28	0,13	0,10	0,37	0,37
18	0,25	0,22	0,08	0,07	0,30	0,31

Cuadro 6 : Valores de IC/IC_0 , $FA(x_m)$ y $FA(x_t)$ para la configuración C2

h (m)	IC/IC_0		$FA(x_m)$		$FA(x_t)$	
	RI	DA	RI	DA	RI	DA
10	1,44	1,14	0,37	0,31	0,26	0,27
14	0,89	0,72	0,18	0,16	0,21	0,22
18	0,63	0,52	0,10	0,09	0,17	0,17

De los cuadros puede observarse lo siguiente:

- El índice de compacidad de A2 es el mayor de las configuraciones analizadas previamente.
- El índice de compacidad es muy superior en la configuración C2 que en la B2, por lo que, aunque $F A(x_m)$ es menor en B2, el campo debido a C2 se hace menor en $F A(x_t)$.
- En la configuración B2 el campo bajo la línea para $h = 10$ m es aproximadamente 3, 5 veces menor que en el caso de la configuración T, mientras que en la C2 es aproximadamente 3 veces menor. Aunque no aparece indicado en las tablas, se ha comprobado que la eficiencia respecto a la configuración T de igual altura se mantiene sensiblemente constante con la altura.
- En la configuración B2 el campo en x_t para $h = 10$ m es aproximadamente 2 veces menor que el creado por T. Con la configuración C2 el campo en x_t se reduce aproximadamente 4 veces. Aunque no se refleja en las tablas, se ha comprobado que la eficiencia respecto a la configuración T de igual altura se mantiene sensiblemente constante al variar la altura.
- El campo se reduce bajo la línea aproximadamente un 9% por cada metro de incremento de altura de los conductores. En x_t dicho incremento se reduce al 5%.

La figura 22 muestra los perfiles transversales de campo de la configuración T y las configuraciones A2, B2 y C2 para una corriente por fase de 500 A, $h = 10$ m y $d = 8.5$ m.

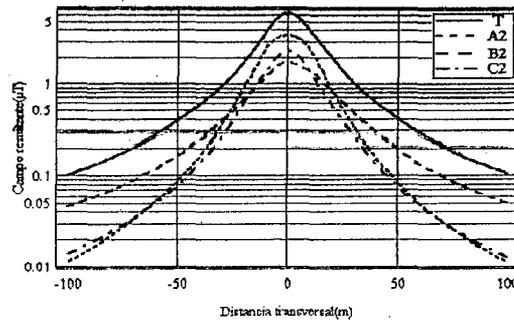


Figura 22: Campo generado por las configuraciones T, A2 B2, y C2, para $h = 10$ m, $d = 8,5$ m y 500 A de intensidad por fase.

4.1.4. Línea trifásica equilibrada con tres fases divididas.

Se analiza por último la configuración en la que las tres fases están divididas. Dicha configuración se puede descomponer en dos cuadripolos de cuatro conductores: cuadripolo 1, cuya intensidad viene dada en (4.9), y cuadripolo 2, con la intensidad dada en (4.10) (figura 23). Las intensidades por cada cuadripolo vendrán dadas por (4.9) y (4.10).

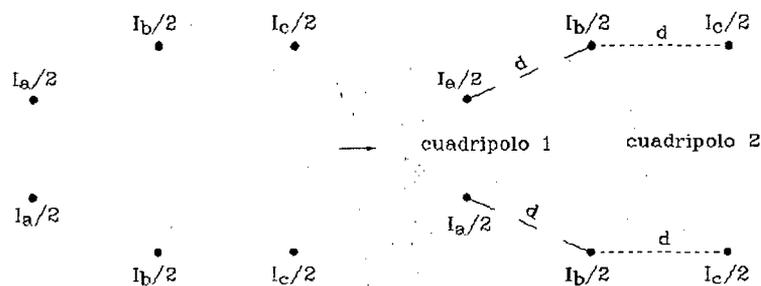


Figura 23: Línea trifásica con tres fases divididas (izquierda) y su descomposición en dos cuadripolos de cuatro conductores (derecha).

Al igual que en el caso de la línea con dos fases divididas, es posible dividir la línea en dos cuadripolos tales que el CM generado por cada uno de ellos varíe con $(1/r^3)$. Para ello cada cuadripolo ha de cumplir que los vectores momento magnético de sus dipolos sean iguales y de sentido contrario. La figura 24 muestra algunos ejemplos.

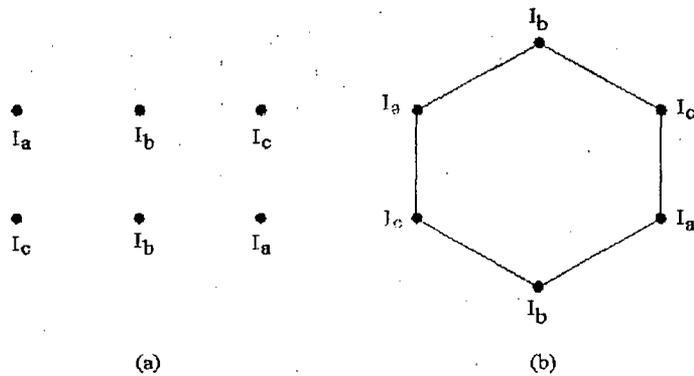


Figura 24: Ejemplos de configuraciones con tres fases partidas cuyo CM varía con $1/r^3$

El ejemplo (a) de la figura 24 coincide con la configuración de baja reactancia en las líneas de doble circuito cuando circula la misma carga por ambas. El ejemplo (b) muestra los conductores dispuestos en los vértices de un hexágono.

Suponiendo que los dipolos de un mismo cuadripolo tienen igual distancia (d_1 , cuadripolo 1; d_2 , cuadripolo 2), y que la distancia mínima al suelo h es también constante. La distancia d_3 puede tomar cualquier valor, ya que separa los conductores de una misma fase. De la resolución se determinan los valores de $\alpha, \psi_{11}, \psi_{12}, \psi_{21}, \psi_{22}, d_2, d_3$ que minimizan IC, el campo en x_m y el campo en x_l .

Siendo estos los siguientes:

- Configuración que maximiza el índice de compacidad (A3)

Coincide con la A2.

- Configuración que minimiza el campo en x_m (B3)

$$\psi_{11} = 193^\circ$$

$$\psi_{12} = 298^\circ$$

$$\psi_{21} = 253^\circ$$

$$\psi_{22} = 20^\circ$$

$$\alpha = 7^\circ$$

$$d_2 = d_1$$

$$d_3 = 0.25d_1 \quad (\text{Figura 25})$$

- Configuración que minimiza el campo en x_l (C3)

Coincide con la C2.

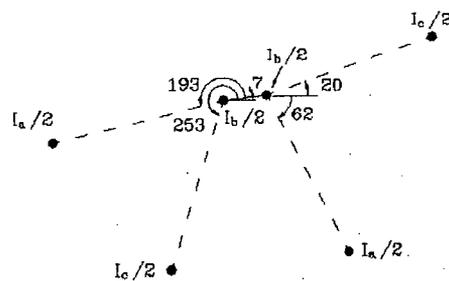


Figura 25: Línea con 3 fases partidas. Configuración que minimiza el campo en x_m (B3)

Si se fija d_3 a un valor constante distinto de cero, se tienen unos resultados similares al óptimo. La figura 26 muestra los campos resultantes en x_m y x_t en las configuraciones óptimas para distintos valores de d_3 , siendo $h = 10$ m, $d_1 = 8.5$ m y 500 A de intensidad por fase. La figura 27 muestra el IC para las configuraciones que lo maximizan. Obsérvese que el campo es menos compacto conforme crece d_3 , hasta un mínimo, a partir del cual crece ligeramente.

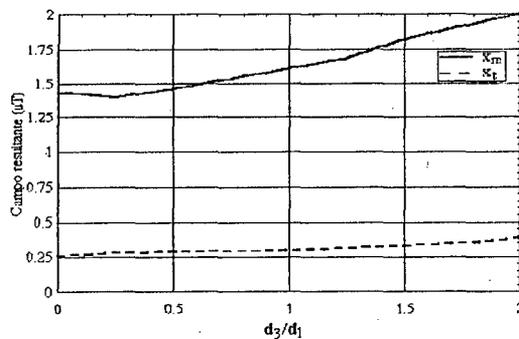


Figura 26: Línea con 3 fases partidas. Campos resultantes mínimos en x_m y x_t en función de d_3 .

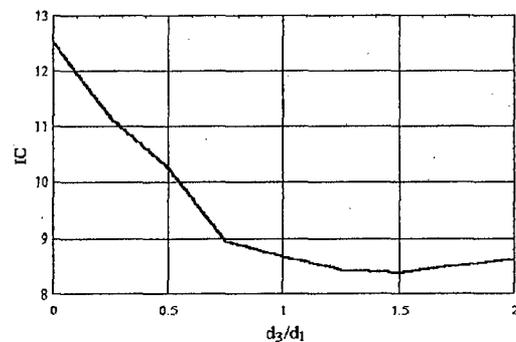


Figura 27: Línea con 3 fases partidas. IC máximo en función de d_3 .

De lo anterior se deduce que no se consigue atenuar más el campo con la división de las tres fases.

4.1.5. Discusión.

Según LA TORRE y SANCHA (1993), las principales técnicas que pretenden reducir el campo electromagnético creado por instalaciones eléctricas y, en particular, líneas eléctricas aéreas y subterráneas, son las siguientes:

Técnicas que buscan la modificación del diseño de la línea (Configuración de conductores, distancia entre fases, altura de conductores, división de fases).

Técnicas que introducen una pantalla compuesta por conductores de compensación, pasivos o activos. Empleo de pantallas realizadas a base de chapa de material con alta permeabilidad magnética y/o conductividad eléctrica.

STEWART y DALE (1993), proponen el empleo de líneas hexafásicas y dodecafásicas para, además de mejorar otros aspectos de la transmisión, reducir el campo electromagnético. Sin embargo, la pequeña reducción que se consigue (un 10%) frente a la línea trifásica, y el coste que implica no justifica el empleo de más fases con la finalidad principal de reducir el campo, por lo que hoy día no se apuesta por su aplicación.

Por otra parte, ADAMS y TRIVETTE (1996), plantean la posibilidad de incluir en la planificación y gestión de una red de transporte la incidencia en el campo electromagnético generado.

Siguiendo la recomendación de los principales organismos, mitigar a bajo coste, la evaluación económica de las soluciones propuestas es un análisis previo a cualquier decisión.

Cabe destacar el desarrollo simplificado que proponen RASHKES y LORDAN (1998), en el que se analiza el coste relativo de la variación de los distintos parámetros que definen una línea eléctrica, así como el costo que supone la inserción de conductores de compensación. Se concluye de dicho estudio que la solución que permite conseguir altos niveles de reducción a un coste moderado es la división de fases.

En lo referente al trabajo de investigación se ha analizado la reducción de campo que se puede conseguir en líneas de transporte cuando se divide una, dos o tres fases.

Para ello se ha determinado la ecuación del campo debida a un cuadripolo, basada en la aproximación DA (apartado 4.1.1), observándose que para determinadas configuraciones el campo se reduce con la distancia al cubo. A partir de dicha ecuación se ha determinado el cuadripolo que minimiza el campo, obteniéndose una reducción del 67% bajo la línea y del 80% en el límite de la servidumbre de paso. Seguidamente se han determinado las configuraciones que minimizan el campo cuando se divide una fase (apartado 4.1.2), dos fases (apartado 4.1.3) y tres fases (apartado 4.1.4). Por último se ha analizado la configuración doble circuito, obteniéndose las disposiciones, para una determinada distancia entre circuitos, que minimizan el campo bajo la línea y lejos de la línea. La configuración de baja reactancia es la que presenta el mínimo campo lejos de la línea cuando la distancia entre circuitos coincide con la distancia entre fases.

En el cuadro 7 se muestran las reducciones conseguidas respecto a la configuración tresbolillo, suponiendo que la corriente por fase, distancia entre fases y altura mínima al suelo es la misma para todas las configuraciones. La configuración de tres fases corresponde a una distancia $d_3 = 2d_1$. Para valores menores de d_3 se obtienen reducciones ligeramente mayores.

Cuadro 7 : Máximas reducciones en % de campo conseguidas al dividir una, dos, o tres fases, relativas a la configuración tresbolillo.

Disposición	Bajo la línea	Límite servidumbre paso	$x = 500$ m
1 fase partida (C1)	50	35	30
2 fases partidas (C2)	62	75	92
3 fases partidas (A4)	60	25	97

Se puede observar del cuadro que la división de una fase reduce significativamente el campo cerca de la línea, pero dicha reducción va siendo menor a distancias mayores. Lo contrario ocurre con la división de dos fases. La división de tres fases no mejora la reducción conseguida con dos fases.

Resultados y discusión respecto al tercer objetivo.

4.2. Mitigación de Campos Electromagnéticos mediante Lazos.

En este capítulo se analiza la técnica de reducción de campo basada en la inserción de uno o varios lazos pasivos, en los que la corriente que circula es puramente inducida, o activos, en los que la corriente que circula es controlada por un circuito externo. Los lazos se componen de dos conductores paralelos a la línea, y dos tramos que cierran el circuito. De este modo se intenta crear un campo electromagnético que contrarreste el original.

Tal como se vio en el capítulo 2 esta técnica se ha analizado aplicándose a determinadas configuraciones de líneas (horizontal, delta invertida) (Walling y Paserba,1993), sin realizar un análisis comparativo entre diversas soluciones posibles. Se pretende en este capítulo establecer un método semiheurístico que permita, para cualquier configuración de conductores y número de circuitos, determinar de un modo aproximado la posición más adecuada de los lazos de mitigación pasivos, así como las características del conductor del lazo. Los resultados del método pasivo se compararán con el activo, basado en la inyección de unas corrientes por los bucles, de magnitud y fase tales que se reduzca el CM en el punto o zona determinados. Se desarrollará también un método para determinar dichos parámetros de la corriente en los lazos.

4.2.1. Mitigación con lazos pasivos.

Se evalúan en este apartado las posibilidades de mitigación del CM creado por líneas de transporte, con la inserción de lazos pasivos. Para ello se abordará el problema en dos fases:

1. Análisis del campo magnético que se desea reducir.
2. Diseño del conjunto de lazos para conseguir una mitigación óptima del campo.

En el cuadro 8 se muestran la relación existente entre las intensidades de corriente que circulan en los lazos y las intensidades de corriente senoidales en régimen permanente para diferentes tipos de conductores.

Cuadro 8: Relación I/I_p para diversos conductores

Conductor	$R'(\Omega/\text{km})$	Diámetro (mm)	rgm/a	I/I_p
LA-110	0,6132	14,00	0,8260	0,105
LA-145	0,4844	15,75	0,8260	0,112
LA-180	0,3924	17,50	0,8260	0,118
LA-280	0,2388	21,80	0,8116	0,126
LA-380	0,1714	26,38	0,8085	0,131
LA-455	0,1436	27,72	0,8085	0,132
LA-545	0,1192	30,42	0,8085	0,135
LA-635	0,1022	32,85	0,8085	0,136

A continuación se analizan cada una de estas etapas para distintas configuraciones de conductores.

4.2.1.1. Línea con configuración horizontal de conductores.

Usando las variables definidas se tiene, para la línea con disposición horizontal de conductores, $\alpha = \beta = 0$. Si se considera un sólo lazo y una distancia mínima fase-lazo d_{lm} , la posición del lazo que maximiza el módulo de la intensidad

$I = |I|$ viene definida por $s = 2d + 2d_{lm}$, $\gamma = \pi, \xi = 0$ (figura 28).

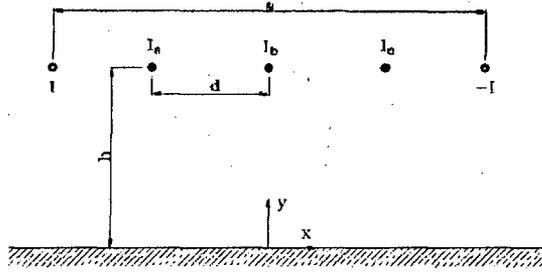


Figura 28: Disposición del lazo que permite la máxima corriente inducida en una línea con disposición horizontal de conductores.

Para obtener la configuración óptima se ha resuelto el problema de optimización siguiente:

Maximizar:

$$f(\gamma, \xi, d_l, s) = \left| \frac{V'}{R' + jX'} \right| \quad (4.11)$$

Sujeto a las restricciones:

$$dp(ij, a) \geq d_{lm} \quad i, j = 1, 2 \quad (4.12)$$

$$dp(ij, b) \geq d_{lm} \quad i, j = 1, 2 \quad (4.13)$$

$$dp(ij, c) \geq d_{lm} \quad i, j = 1, 2 \quad (4.14)$$

La configuración óptima obtenida presenta una disposición similar a la de un dipolo coplanar con los conductores de fase. Para dicha configuración, la intensidad inducida queda:

$$I = \frac{-\frac{\sqrt{3}\omega\mu_0}{4\pi} \ln\left(\frac{s+2d}{s-2d}\right) (1 + j\sqrt{3})}{R' + j\frac{\omega\mu_0}{\pi} \ln\frac{s}{rgm}} I_a \quad (4.15)$$

En lo que sigue se verán los resultados de mitigación para unas dimensiones de apoyo típicas de líneas de 500 kV. Se tomarán en concreto dichos valores de una torre de alineación (figura 29). Si $d_{im} = 5m$ y el conductor es el LA-545 (Tabla 8) la corriente inducida en el lazo óptimo viene dada por $I_m = 0.175I_a$.

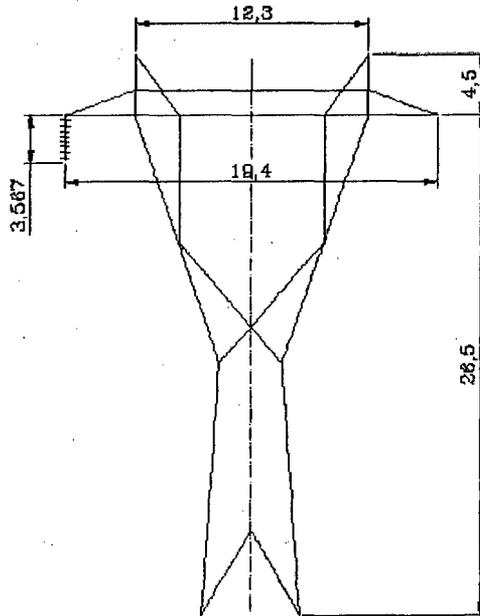


Figura 29: Dimensiones correspondientes a una torre de alineación (en metros).

Las figuras 30 y 31 muestran la variación de I/I_m con el ancho del lazo s ($d = 9.7 m$) y la distancia entre fases d ($s = 29.4 m$). El conductor es el LA-545, dato poco relevante, ya que el tipo de conductor influye muy levemente en la corriente inducida. Obsérvese de la figura 30 que cuanto más corta sea la distancia fase-lazo mayor será la corriente inducida. Existe sin embargo una distancia mínima que hay que mantener, para evitar el contacto entre ambos conductores. Dado que dicha distancia depende de la longitud de vano, tipo de apoyo, flecha, tipo de conductor, condiciones ambientales, etc., no es posible

conocerlo con exactitud. Se considerará aquí un valor orientativo de 5 m. De la figura 31 se observa que la corriente aumenta con d , con lo que la mitigación con lazo es menos efectiva en líneas más compactas.

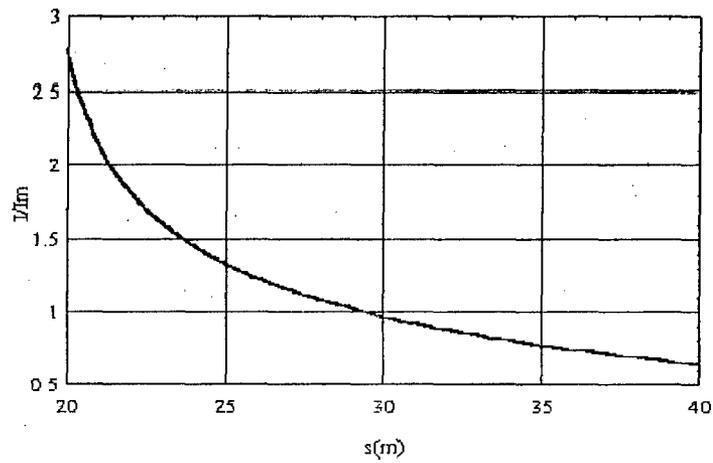


Figura 30: Variación de I/I_m con s (a igual distancia entre fases).

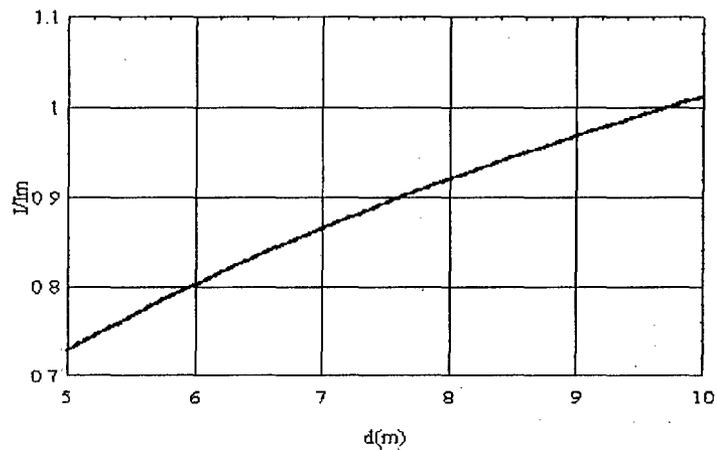


Figura 31: Variación de I/I_m con la distancia entre fases (a igual distancia lazo-fase).

La figura 32 muestra la variación de I/I_m con la diferencia altura línea-altura lazo, para $s = 29.4$ m. Es evidente que el parámetro que más afecta a la intensidad inducida es la anchura del lazo.

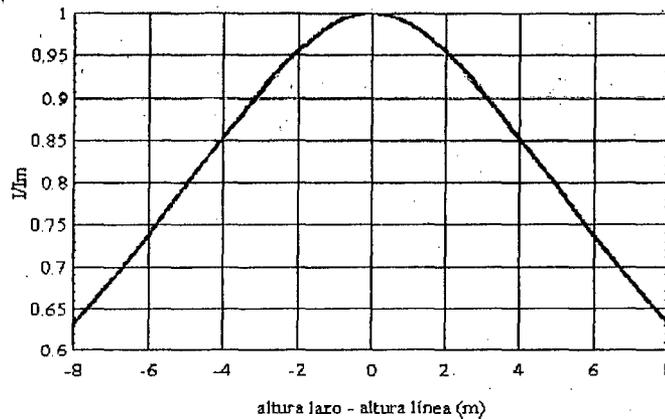


Figura 32: Variación de I/I_m con la diferencia altura línea-altura lazo

Es interesante analizar la eficiencia en otras disposiciones del lazo, distintas a la coplanar. Puede ocurrir que, en el caso de líneas con dos cables de tierra, se deseen aprovechar los propios cables como elementos del lazo pasivo, o se podría pensar en situar el lazo ligeramente enterrado, evitando el empleo de apoyos. La figura 33 muestra estas tres posibles localizaciones del lazo, alternativas a la óptima. Teniendo en cuenta las dimensiones del apoyo de la figura 29, se tiene que $s_l = 12.3m$, $h_l = 4.5m$. Para dicha posición del lazo se obtiene $FA_{l2} = 0.90$, una pequeña reducción del campo del 10%.

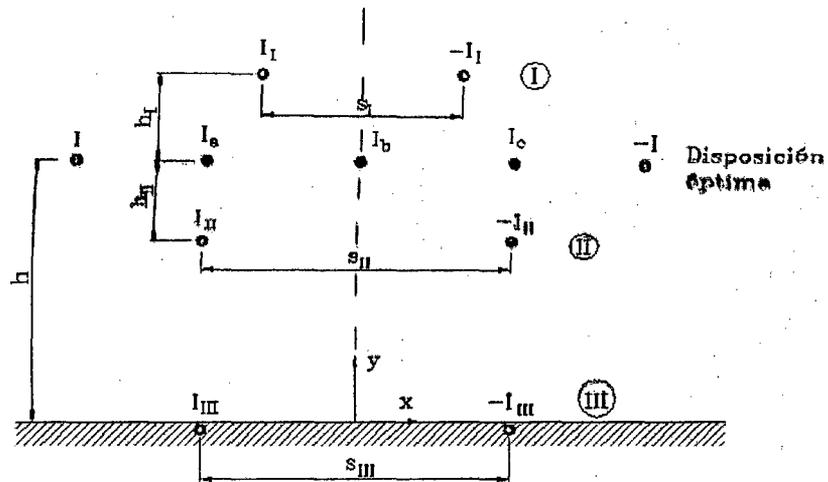


Figura 33: Línea horizontal. Diversas disposiciones de lazos

En la disposición II la altura del lazo es menor que la de la línea. Para $h_{II} = 5m$ y $s_{II} = 30m$ se obtiene $FA_{II2} = 0.76$.

Por último en la posición III, con $s_{III} = 40m$, y una profundidad de 1 m, se obtiene $FA_{III2} = 0.82$.

La figura 34 muestra las curvas de eficiencia, obtenidas con el modelo RI, para las tres posiciones, junto con la coplanar. La disposición coplanar es la óptima a distancias superiores a aproximadamente 25 m. Sin embargo, la configuración II presenta una mayor eficiencia a distancias menores, llegando a tener una reducción de casi el 55% en $x = -17 m$. Obsérvese también que con el lazo enterrado se obtiene reducción de campo a partir de aproximadamente 25 m, pero para distancias menores el campo es mayor que el debido a la línea.

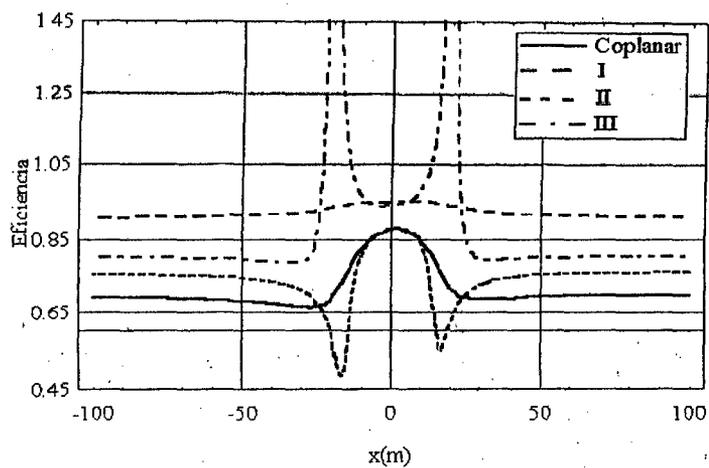


Figura 34: Línea horizontal. Eficiencia para diversas disposiciones de lazos

4.2.1.2. Línea con configuración vertical de conductores.

Dada la similitud entre las disposiciones horizontal y vertical, es inmediato deducir que, para la configuración vertical, la disposición del lazo que permite una máxima corriente inducida I es la coplanar con la línea (figura 35).

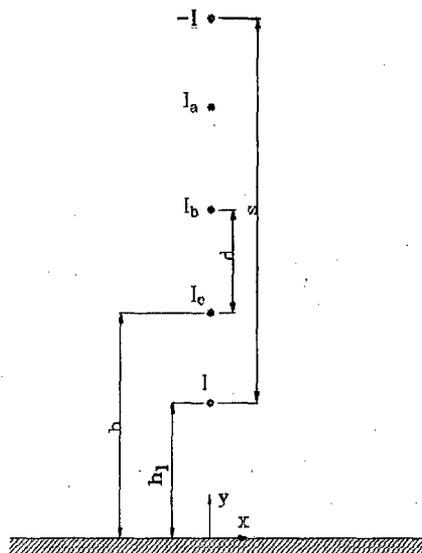


Figura 35: Disposición del lazo que permite la máxima corriente inducida en una línea con disposición vertical de conductores.

La intensidad inducida viene dada por (4.15), y la variación de I/I_a con s es la misma que la de la figura 30. La variación de I/I_a con la coordenada del lazo x_l (suponiendo $x = 0$ de la línea) es la misma que en la línea horizontal (figura 32), donde ahora x_l juega el mismo papel que la diferencia de alturas lazo-línea.

Se analiza a continuación la eficiencia cerca de la línea. Para ello se tomará como ejemplo un apoyo de alineación de una línea de doble circuito, suponiendo que existe un solo circuito energizado (figura 36).

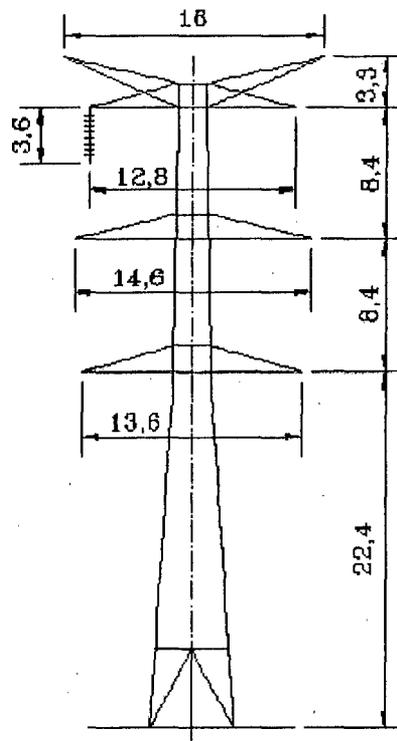


Figura 36: Dimensiones correspondientes a una torre de alineación (en metros)

Para simplificar se supondrá que los tres conductores de una misma fase están alineados verticalmente. Las figuras 37 y 38 muestran, para $d = 8.4$ m, $s = 26.8$ m, $h = 10$ m ($h_i = 5$ m) y $h = 14$ m ($h_i = 9$ m), la eficiencia obtenida con los métodos RI, DA y DS. Obsérvese que las curvas de FA_a y FA son indistinguibles.

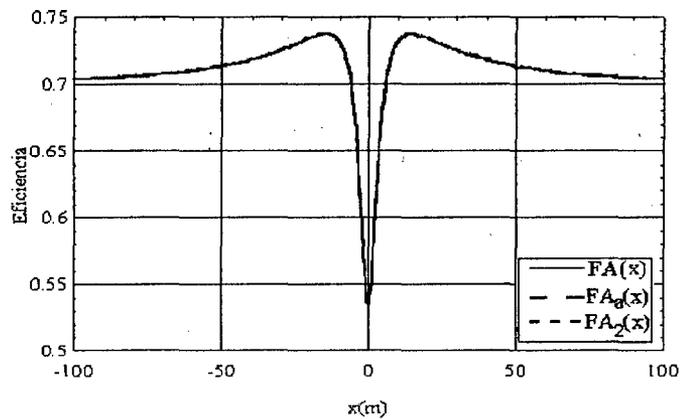


Figura 37: Línea vertical. Eficiencias obtenidas al insertar un lazo coplanar, con distintas formulaciones ($h = 10$ m).

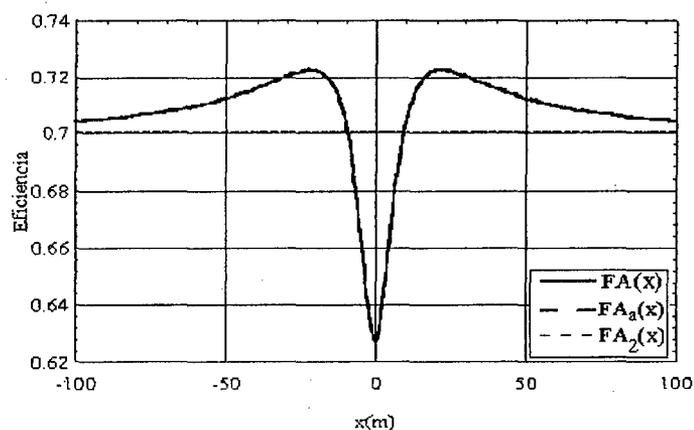


Figura 38: Línea vertical. Eficiencias obtenidas al insertar un lazo coplanar, con distintas formulaciones ($h = 14$ m).

En la configuración *II* se entierra el conductor de retorno a 1 m de profundidad. Suponiendo una altura mínima al suelo $h = 10$ m, de la figura 36 se obtiene $d_I = 1.6$ m, $h_I = 7.0$ m, $s_I = 2h_I + 2d = 30.8$ m, y $s_{II} = h_I + 2d + h + 1 = 34.8$ m.

La figura 40 muestra la eficiencia para ambas disposiciones, junto con la coplanar.

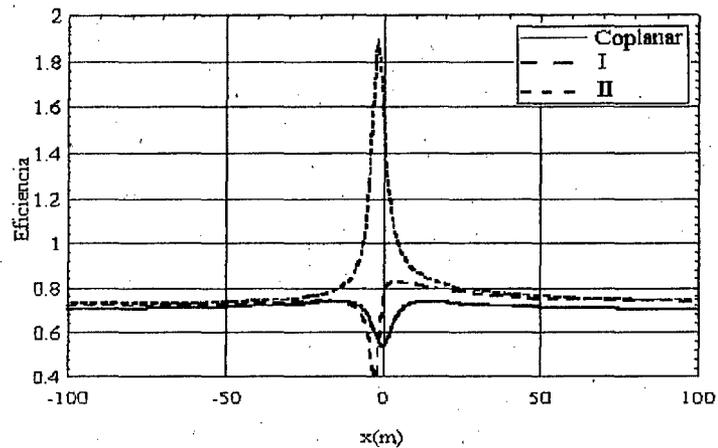


Figura 40 : Línea vertical. Eficiencia para las disposiciones

Obsérvese que para distancias superiores a 30 m la eficiencia de las tres disposiciones es muy similar. Para distancias menores la disposición *I* mantiene la eficiencia por debajo de 0.8, y con la disposición *II* se amplifica el campo hasta el 190% bajo la línea. A pesar de ello, esta configuración puede ser interesante por ser la zona de amplificación muy reducida y por no emplear ningún conductor adicional soportado por el apoyo. Cabe incluso la posibilidad de emplear los apoyos extremos de un vano como los tramos cortos del lazo.

4.2.1.3. Línea con configuración triangular (delta) de conductores.

Se analizan a continuación las posibilidades de mitigación con lazo pasivo en el caso de la configuración delta. Se supondrá en primer lugar que las tres fases están situadas en los vértices de un triángulo equilátero. Resolviendo el problema de maximización, la disposición de lazo que maximiza la corriente inducida viene dada por $\gamma = \pi$, $\xi = 0$, $d_l = d_{lm}$, y $s = d + 2d_{lm}$. Debido a la simetría geométrica existen 3 disposiciones óptimas, con intensidades inducidas de igual módulo y diferente desfase (figura 41).

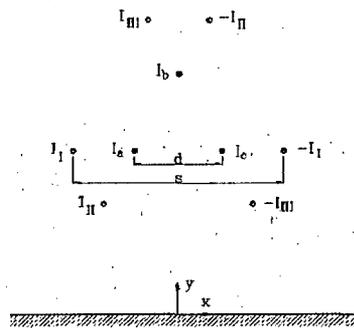


Figura 41: Disposiciones de lazo pasivo que permiten la máxima corriente inducida en una línea con disposición triangular de conductores.

Se vio en la figura 31 que la corriente inducida se reducía con distancias entre fases menores. Dado que la línea triangular es equivalente, en términos de corriente inducida, a una horizontal cuya distancia entre fases es la mitad, la corriente inducida debida a una línea triangular es menor que la de una línea horizontal con igual distancia entre fases d . Para líneas de transporte la reducción es del orden del 30%.

La variación de I/I_a con s y la diferencia de altura lazo-fase es similar a la vista en el caso horizontal (figuras 30 y 32).

Se obtiene a continuación la expresión de la eficiencia para los lazos de la figura 41. Una gran diferencia entre el campo debido a una línea de configuración triangular y el debido a una línea con los conductores alineados (horizontal, vertical) es que, conforme la distancia a la línea crece, las componentes real e imaginaria del campo debido a la configuración coplanar tienden a alinearse, como se vio en el estudio de la configuración horizontal. Sin embargo, en la configuración triangular ambos vectores tienden a un desfase distinto de π . Esto hace que la polarización del campo debido a la línea (elíptica) no coincida con la debida al lazo (lineal), y el lazo pasivo no sea tan efectivo en el caso triangular, por cuanto las componentes debidas al lazo no están en oposición con las correspondientes a la línea.

Las figuras 42, 43 y 44 muestran las curvas de eficiencia obtenidas con los modelos RI, DA y DS, para las mismas longitudes. Se observa que con el lazo *I* se consigue mayor eficiencia que con él *II* y *III*, aunque, como se ha indicado previamente, la eficiencia de los tres tiende al mismo valor conforme la distancia a la línea es mayor.

El análisis previo ha supuesto que la disposición triangular es equilátera. Se analiza a continuación el caso más real de una disposición no equilátera, estudiando sólo el lazo *I*, por ser el de mayor interés. Para evaluar la eficiencia se van a emplear las dimensiones de un apoyo de alineación correspondiente a la línea (figura 45).

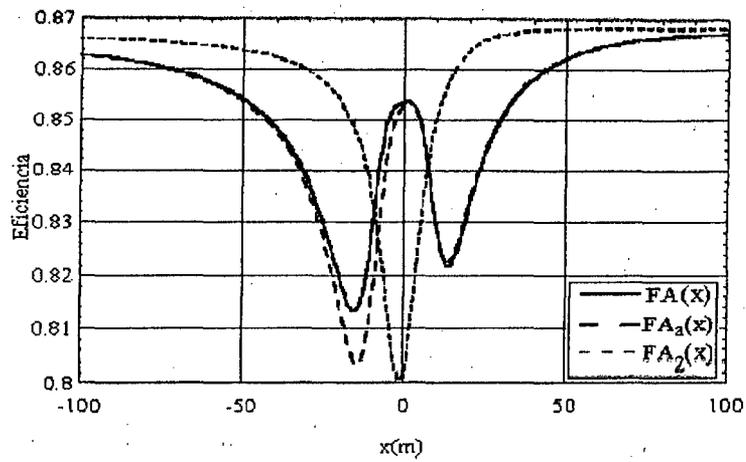


Figura 42: Configuración delta. Eficiencias obtenidas con el lazo I, para distintas formulaciones.

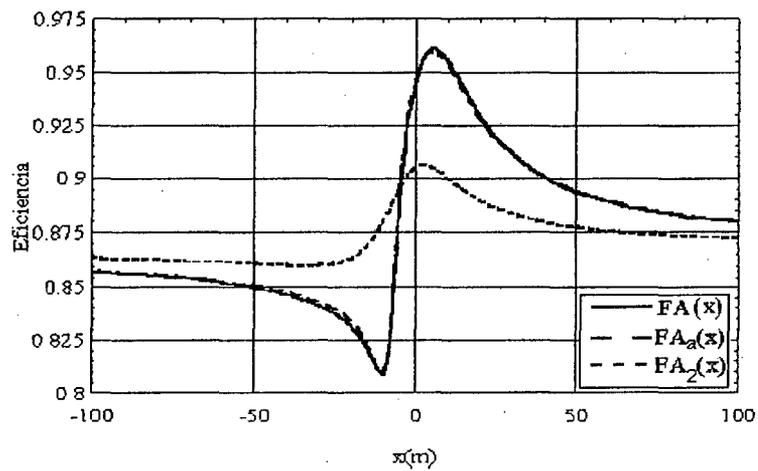


Figura 43: Configuración delta. Eficiencias obtenidas con el lazo II, para distintas formulaciones.

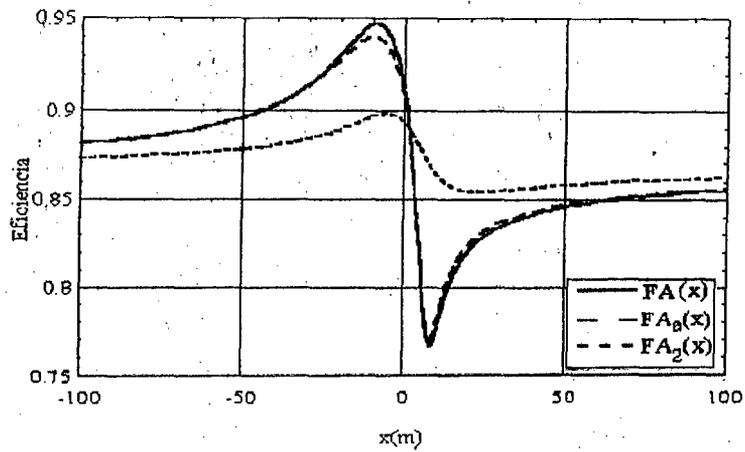


Figura 44: Configuración delta. Eficiencias obtenidas con el lazo III, para distintas formulaciones.

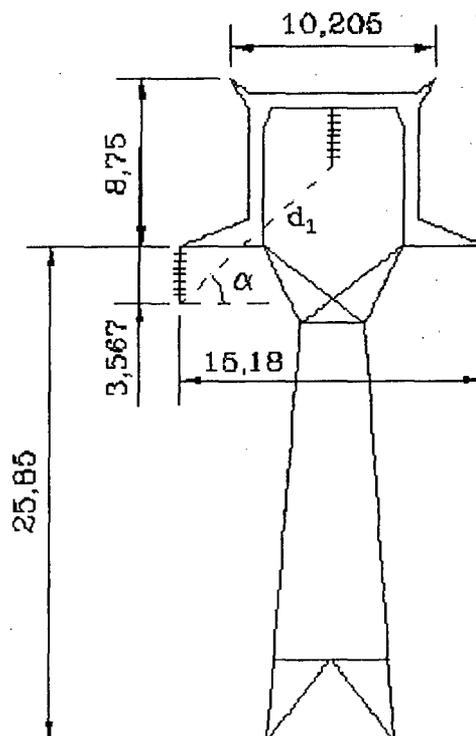


Figura 45: Dimensiones correspondientes a una torre de alineación (en metros).

Las figuras 46 y 47 muestran la eficiencia para la configuración (figura 45) con alturas $h = 10$ m, y $h = 14$ m, obtenida por los tres métodos.

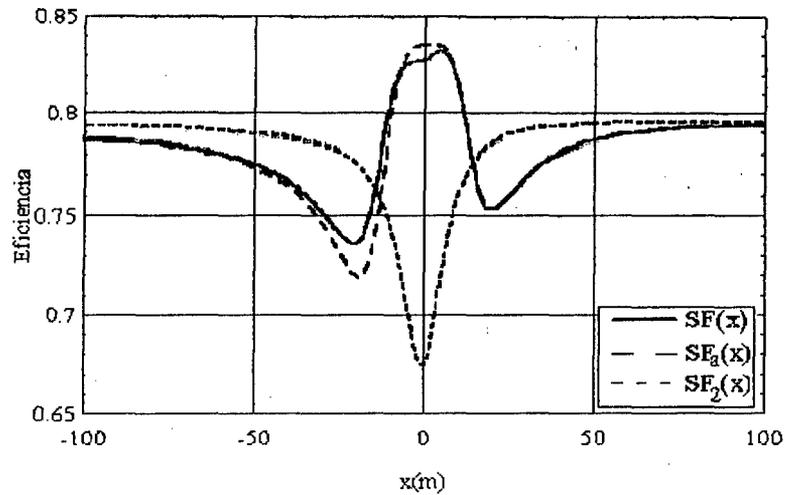


Figura 46: Eficiencias obtenidas al insertar el lazo I ($h = 10$ m).

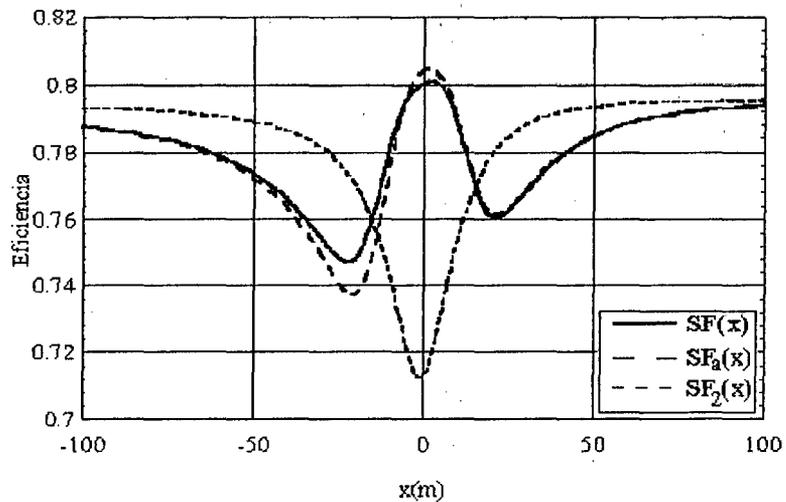


Figura 47: Eficiencias obtenidas al insertar el lazo I ($h = 14$ m).

Tal como se viera en las configuraciones horizontal y vertical, se podrán aprovechar los dos cables de tierra (figura 45) para formar un lazo pasivo. Sin embargo, la mitigación que se consigue es despreciable.

Una configuración triangular, empleada también en las redes de transporte es la tresbolillo. Un apoyo de alineación se muestra en la figura 48.

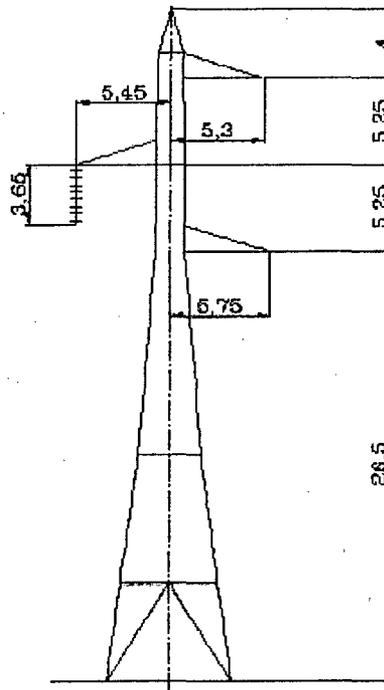


Figura 48:
Dimensiones correspondientes a una torre de
alineación (en metros).

Se analizan brevemente algunas disposiciones de lazos para esta configuración. Dado que es una configuración similar a la delta, las disposiciones óptimas de lazo también lo serán. La figura 49 muestra tres

posibles disposiciones. Las eficiencias correspondientes se muestran en las figuras 50,51 y 52.

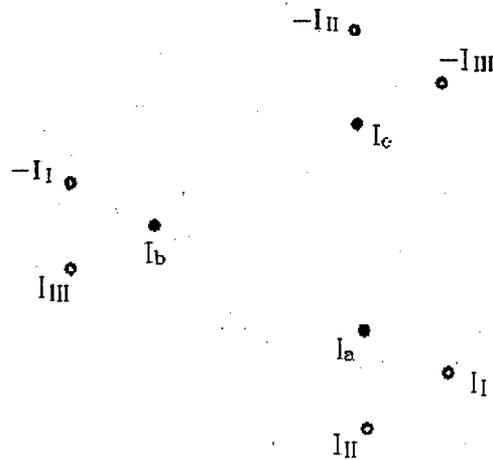


Figura 49: Configuración tresbolillo. Disposiciones que permiten la máxima corriente inducida.

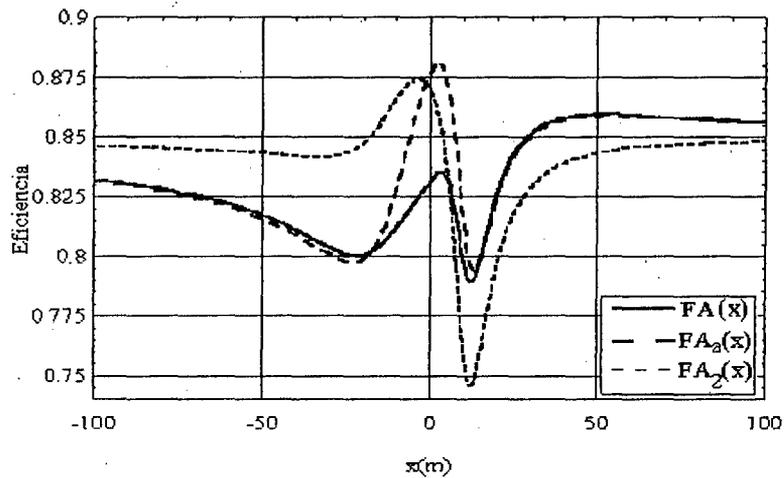


Figura 50: Eficiencias obtenidas al insertar el lazo I ($h = 10$ m).

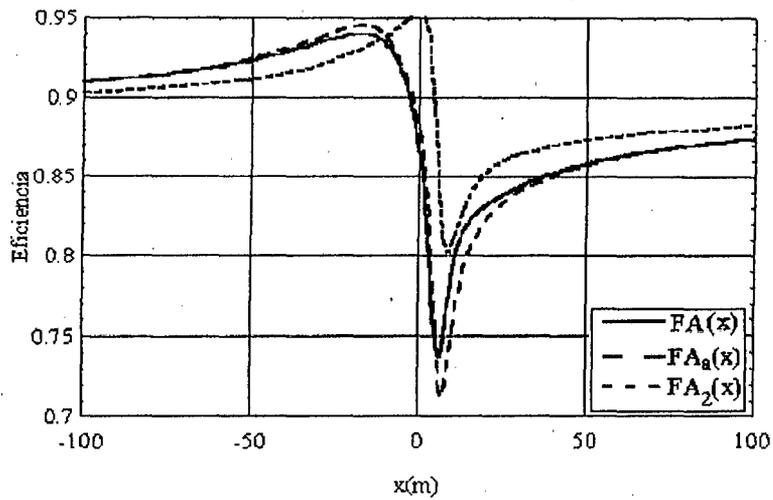


Figura 51:
Eficiencias obtenidas al insertar el lazo II
($h = 10$ m).

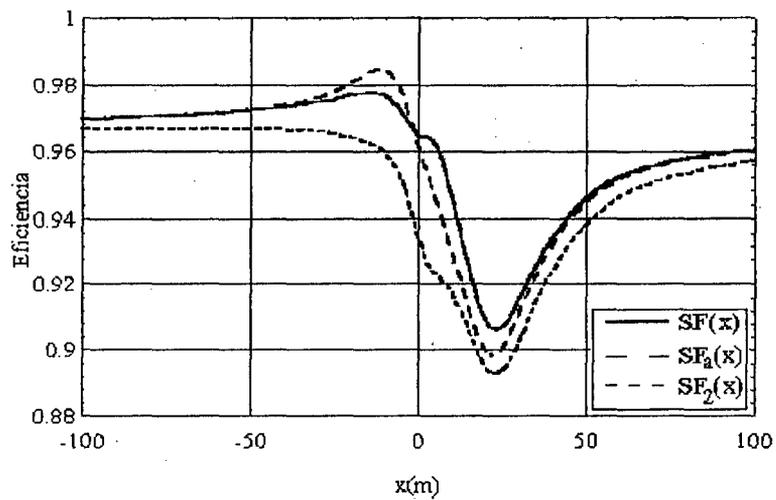


Figura 52:
Eficiencias obtenidas al insertar el lazo III
($h = 10$ m).

4.2.1.4. Líneas de doble circuito.

Se analiza por último la posibilidad de empleo de lazos pasivos en líneas de doble circuito, en concreto dos tipos empleados en las redes de transporte, doble bandera y doble delta. Se supondrá que por ambos circuitos circula la misma intensidad. Las figuras 36 y 53 muestran dos apoyos con sus dimensiones más importantes.

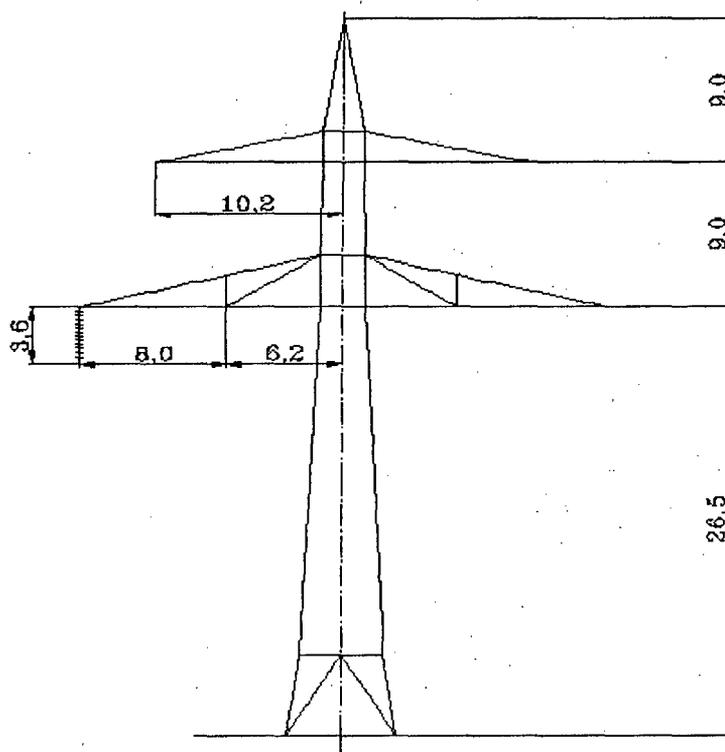


Figura 53: Dimensiones principales de un apoyo de alineación (en metros).

Se analiza en primer lugar la línea doble circuito bandera, disposición de fases superhaz (abc-abc), por ser la que más campo genera. Para simplificar se supondrá que los conductores están alineados verticalmente y que la distancia

entre circuitos es la media de las distancias entre las mismas fases de ambos circuitos (13,5 m). Si se dispone de un sólo lazo, la corriente inducida puede obtenerse por superposición de los dos circuitos.

Igualmente, el campo debido a la línea será la superposición del campo debido a cada circuito. Obsérvese que, en la disposición superhaz, el campo generado por la línea, a suficiente distancia transversal, se asemeja al generado por sólo un circuito de configuración vertical cuya intensidad fuese la misma que la suma de las intensidades por ambos circuitos. Por ello es de prever que el lazo ha de ser vertical.

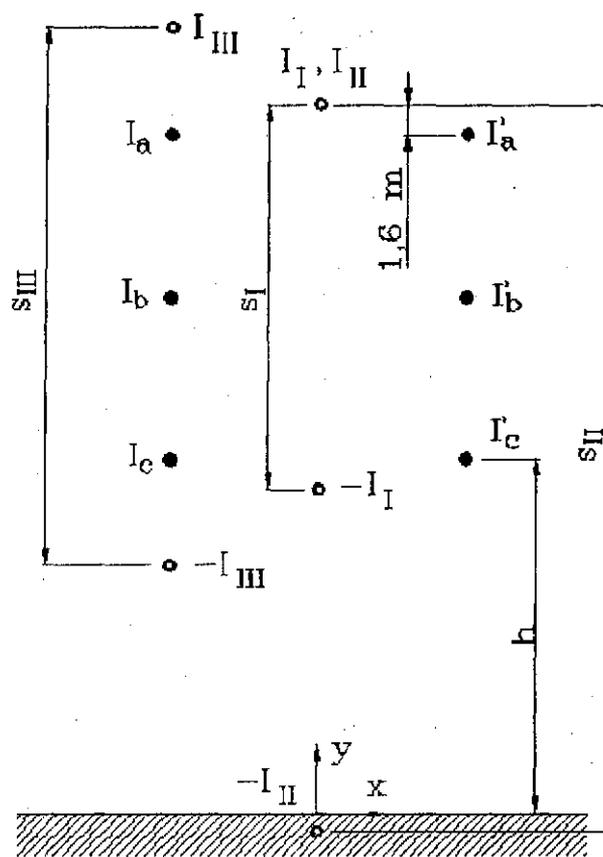


Figura 54: Disposiciones de lazos analizadas.

Si se resuelve el problema de maximización para un sólo lazo resulta que, para las dimensiones de la figura 36, el lazo con máxima corriente inducida es el I de la figura 54, siendo $s = 20$ m. Lejos de la línea la eficiencia tiende a $FA = 0.87$. Sin embargo, dado que el campo debido al lazo es proporcional al momento dipolar, producto de la intensidad inducida I por la anchura del lazo s (como se ha visto en los casos anteriores), y dado que en la posición del lazo I la corriente inducida disminuye lentamente con s el momento dipolar crece con s , se consiguen mayores atenuaciones aumentando la anchura del lazo. Así por ejemplo, con un tramo subterráneo (1 m de profundidad) y $s = 29; 4$ m, la eficiencia tiende a 0,79 con la distancia (lazo II, figura 54).

En la figura 55 se muestran las curvas de eficiencia de los tres lazos.

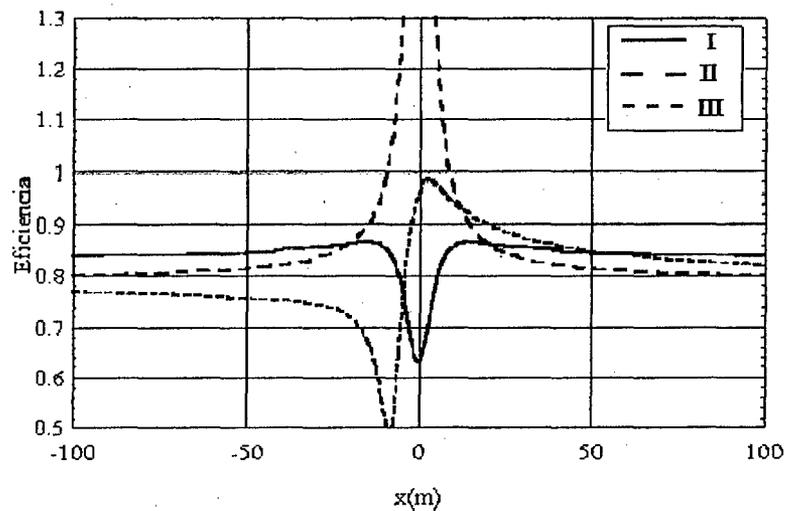


Figura 55: Eficiencia obtenida para la tres disposiciones.

Se analiza por último la línea doble bandera delta. Se vio en el análisis de la configuración simple circuito que la disposición de los dipolos en distinta orientación no permitía obtener la mitigación conseguida con las configuraciones planas. En el caso de doble circuito ocurre lo mismo. No se han observado reducciones significativas de campo empleando un sólo lazo. Con dos lazos se obtiene una mayor reducción, aunque siempre inferior a la obtenida con las configuraciones horizontal y vertical. Como ejemplo se muestra en la figura 56 la curva de eficiencia, obtenida a partir de las dimensiones de la figura 53, cuando se insertan dos lazos en la disposición II (figura 41) en ambos circuitos.

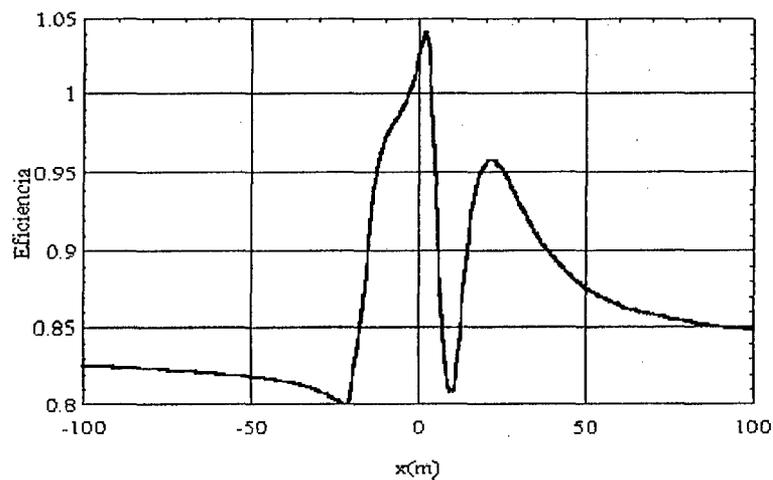


Figura 56: Eficiencias obtenidas con la configuración II para ambos circuitos.

4.2.2. Mitigación con lazos activos.

En un lazo activo la intensidad es inyectada desde una fuente externa, de tal modo que puede conseguirse el módulo y desfase deseado. Se supondrá en el análisis que sigue que, al igual que en el caso pasivo, la fuerza electromotriz inducida en las fases, debida al lazo, es despreciable.

Este método presenta algunas ventajas e inconvenientes respecto al lazo pasivo. Entre las primeras cabe destacar la mayor atenuación conseguida, y la mayor flexibilidad en la disposición del lazo. Entre las segundas, el incremento significativo del costo de instalación y mantenimiento, y la necesidad de disponer de un sistema de control para adecuar en cada instante la intensidad inyectada con el campo que se pretende atenuar.

Merece la pena puntualizar algunos aspectos relativos a la posición del lazo. En el lazo pasivo, éste ha de estar situado en una posición que permita concatenar el máximo flujo creado por la línea. Con el lazo activo se permite una mayor flexibilidad en la colocación del lazo, aunque hay que seguir teniendo en cuenta la orientación vectorial de ambos campos. Por ejemplo, un lazo situado en un plano con un cierto ángulo respecto a una línea horizontal será mucho menos efectivo que uno situado coplanar con la línea. Se necesitará una inyección de más corriente (más potencia en la fuente de alimentación del lazo) y además la eficiencia dependerá más fuertemente de la zona de interés (cerca o lejos de la línea). Existe por tanto una posición óptima del lazo con la que se permite reducir el máximo de campo, en la zona más amplia, y con el mínimo de potencia a inyectar al lazo. Cuanto más distinta de

la óptima sea la posición del lazo menos efectiva será la mitigación, reduciéndose a una franja limitada, y con probabilidad alta de existencia de amplificación del campo en otros puntos (como se ha visto en el caso pasivo). Es por ello que el empleo de lazos externos activos crea zonas de atenuación, pero también de amplificación, siendo la transición entre una y otra más bien abrupta, tanto mayor cuanto más atenuación se consiga.

El problema que se plantea es entonces, dada una línea, determinar la posición del lazo, módulo y desfase de la intensidad, de modo que se reduzca al máximo el campo en una zona de interés (ZI). Dadas las múltiples soluciones que pueden considerarse válidas, se supuso que la posición y dimensiones del lazo son conocidas. Además, las características del lazo pueden estar supeditadas a otros requerimientos, como por ejemplo la colocación fuera de la línea para evitar reforzar los apoyos.

El análisis se aborda para dos supuestos distintos. Si el lazo está incorporado a la línea, y se desea reducir el campo en puntos alejados, el problema puede analizarse con el modelo DS. Si, por el contrario, el lazo es externo, o se desea reducir el campo en puntos cercanos, el problema deberá analizarse con los modelos DA o RI.

Se aplicará a continuación la mitigación con lazo activo a las distintas configuraciones y ejemplos ya vistos, considerando que sólo existe componente de secuencia directa en la intensidad.

4.2.2.1. Línea horizontal.

Considérese la configuración horizontal cuyas dimensiones se muestran en la figura 29.

Supóngase inicialmente que se desea reducir el campo lejos de la línea (unos 100 m). En ese caso se puede emplear la formulación DS. Entonces, el campo generado por la línea viene dado por la siguiente ecuación:

$$\vec{B}_{p2} = \frac{\mu_0 I_a d}{4\pi r^2} (3 - j\sqrt{3})(\sin 2\theta \vec{u}_x - \cos 2\theta \vec{u}_y) \quad (4.16)$$

Para un lazo situado en la posición coplanar (figura 28) el campo viene dado por la siguiente ecuación:

$$\vec{B}_{la} = \frac{\mu_0}{2\pi r^2} M (\sin 2\theta \vec{u}_x - \cos 2\theta \vec{u}_y) \quad (4.17)$$

La figura 57 muestra la eficiencia FA obtenida con el modelo RI, para $s = 29.4$ m. La intensidad requerida por el lazo resulta ser $I = 0.57I_a$. Obsérvese que el campo tiende a cero con la distancia a la línea. Para lazos con anchura mayor la intensidad será menor. Sin embargo la eficiencia empeora cerca de la línea. Esto se muestra en la figura 58, donde $s = 35$ m. La intensidad es ahora $I = 0.48I_a$, tomando como origen de fases I_a .

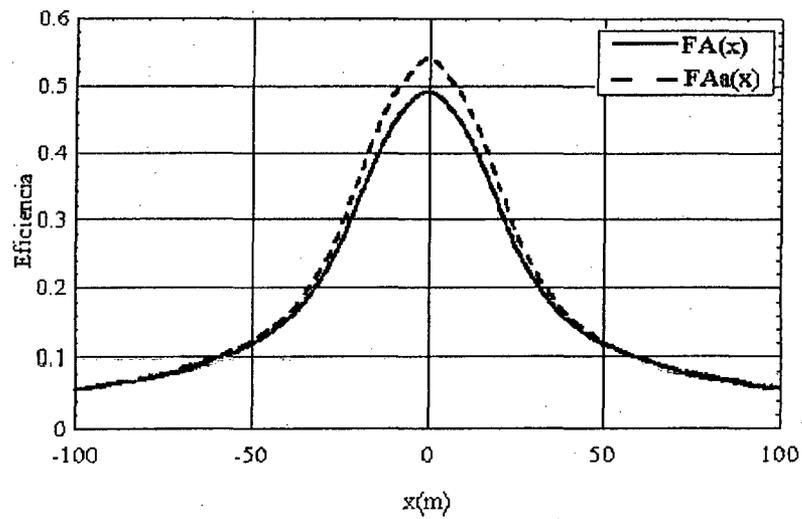


Figura 57:
Eficiencia con lazo activo en la posición co-
planar (figura 6.10), y $s = 29,4$ m.

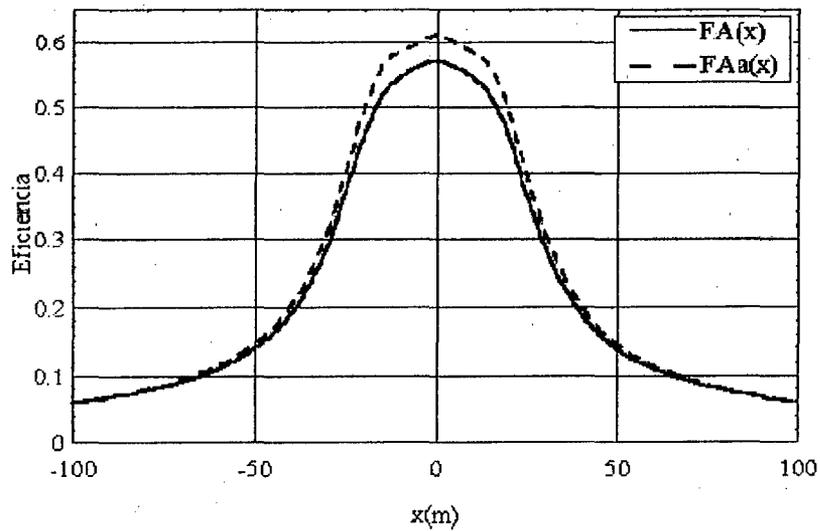


Figura 58:
Eficiencia con $s = 35$ m (lazo activo en la
posición coplanar).

La configuración coplanar, con la que se conseguía la máxima corriente inducida en el lazo pasivo, es también la óptima para el lazo activo cuando se desea reducir el campo en una amplia franja, ya que, como se acaba de ver, es la que genera un campo próximo a la oposición en puntos no muy alejados de la línea. Sin embargo, tal como se vio con el lazo pasivo, es interesante analizar otras localizaciones del lazo, como las posiciones *I* y *III* de la figura 33. Para dichas posiciones han de emplearse, para el cálculo de la intensidad por el lazo, los modelos DA o RI para la línea.

La figura 59 muestra la eficiencia conseguida para la posición *I*, cuando se minimiza el campo a 100 m y 30 m de la línea. Las intensidades resultan ser $I = 1.39I_a$ (100m) e $I = 1.60I_a$ (30 m).

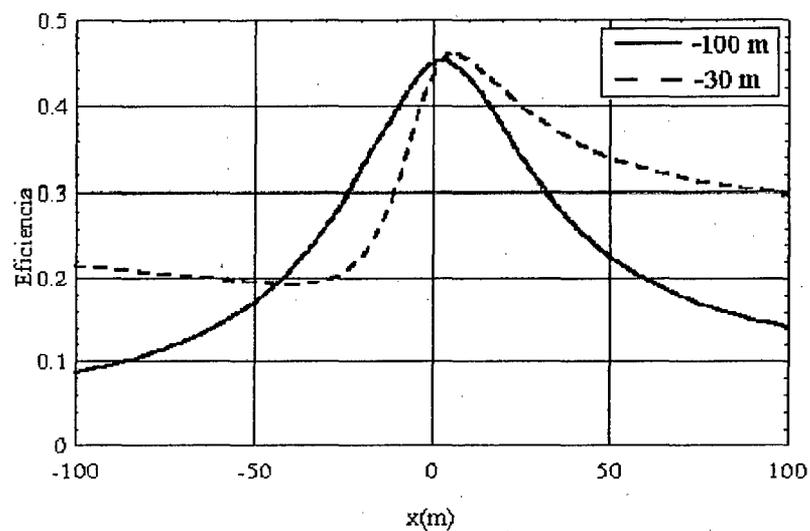


Figura 59:
Eficiencia para el lazo I con $x_o = -100$ m
y $x_o = -30$ m.

La figura 60 muestra lo mismo para un lazo situado en la posición *III* (lazo enterrado a 1 m de profundidad, $s = 30$ m). Las intensidades en este caso son $I = 0.53I_a$ (100 m) e $I = 0.29I_a$ (30 m). Obsérvese que en ambos casos existen puntos donde se atenúa el campo, junto con puntos, cerca de la línea, donde se amplifica. Para el lazo situado en la posición *III* se consigue una discreta atenuación, aunque con una intensidad inyectada pequeña.

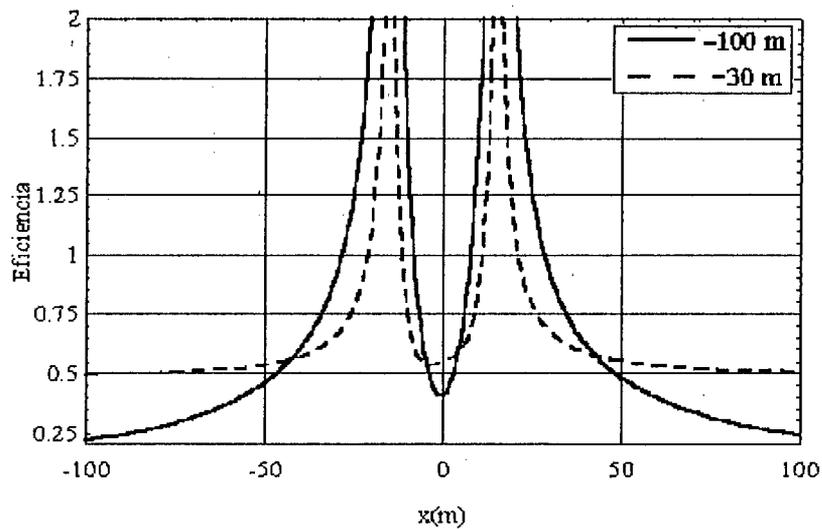


Figura 60:
Eficiencia para el lazo III con $x_0 = -100$ m
y $x_0 = -30$ m.

4.2.2.2. Línea vertical.

Dada la similitud geométrica, se obtienen eficiencias similares a la configuración horizontal.

Para el ejemplo de la figura 36, con $s = 26.8$ m, la figura 61 muestra la eficiencia cuando la intensidad por el lazo se ha obtenido con la misma expresión que en el caso horizontal ($I = 0.54I_a$). Se muestra también la curva de eficiencia cuando se minimiza el campo en $x_0 = -30$ m ($I = 0.57I_a$).

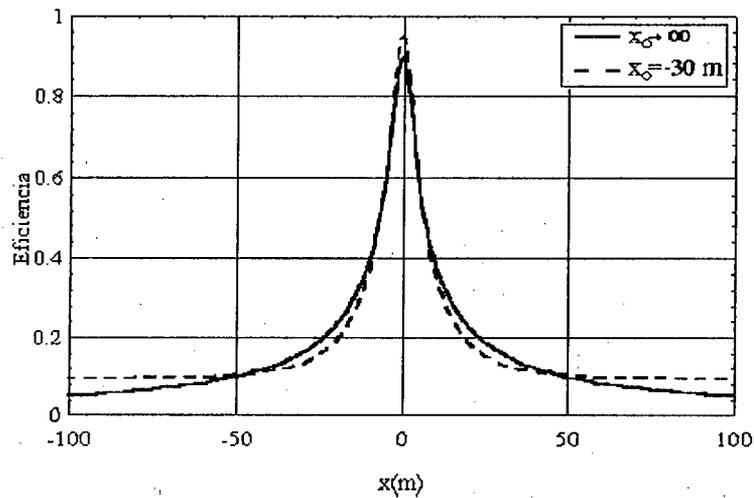


Figura 61: Eficiencias para el lazo coplanar.

Para las posiciones I y II del lazo (figura 39), la figura 62 muestra las eficiencias cuando se minimiza el campo en $x_0 = -30$ m. Las intensidades respectivas son $I = 0.47I_a$, $I = 0.41I_a$, e $I = 1.52I_a$.

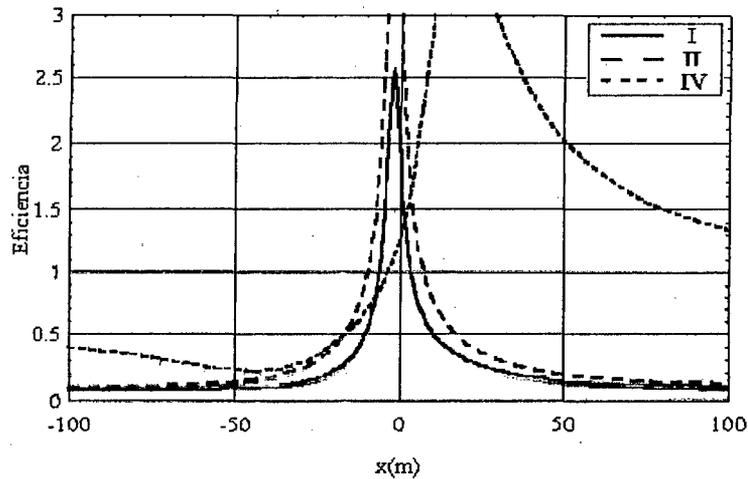


Figura 62: Eficiencias para los lazos I, II y IV ($x_o = -30$ m).

4.2.2.3. Línea triangular.

Se vio anteriormente que la configuración delta, debido a la distinta orientación de ambos dipolos, no es tan favorable para la mitigación con lazo pasivo. Con lazo activo ocurre lo mismo. El campo creado por el lazo presenta una polarización lineal, mientras que el debido a la línea es claramente elíptica, incluso en puntos alejados de la línea, con lo que no se puede anular el campo en ningún punto. Si se supone que el triángulo formado por las fases es equilátero, y se desea reducir el campo en un punto muy alejado de la línea, se puede emplear la formulación DS para lazo y línea. Si el lazo está situado en la disposición I de la figura 41, a partir de lo cual, se obtiene la intensidad que ha de circular por el lazo.

Una alternativa que permite mejorar la eficiencia en líneas triangulares, es el empleo de dos lazos con un conductor común, alimentado por un sistema

trifásico de tensiones (figura 63). Las intensidades por los conductores del lazo formarán un sistema trifásico equilibrado, siendo la incógnita I_{la} .

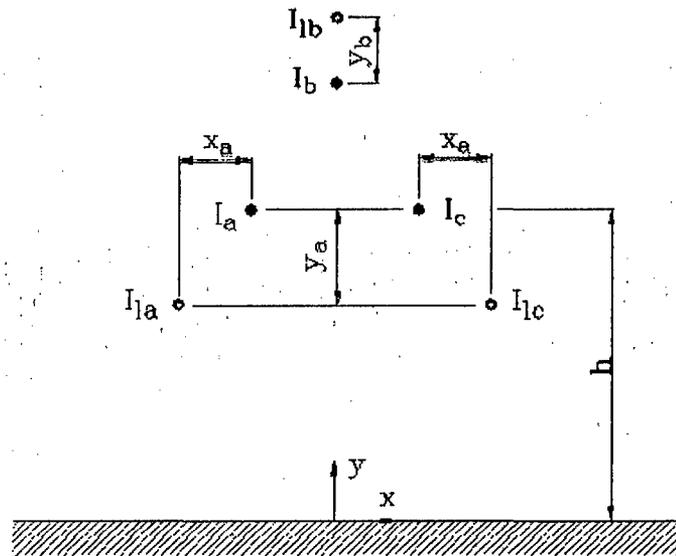


Figura 63: Configuración delta. Pantalla mitigadora compuesta por tres conductores.

La figura 64 muestra las curvas de eficiencia para $x_a = 0$ m, $y_a = -5$ m, e $y_b = 5$ m, cuando se minimiza el campo en el infinito y en $x_0 = -30$ m. El valor de la intensidad por la pantalla resulta ser $I_{la} = 0.59I_a$ ($x_0 \rightarrow \infty$) e $I_{la} = 0.6I_a$ ($x_0 = -30m$).

Por otro lado la figura 65 muestra lo mismo para $x_a = 0$ m, $y_a = -h - 1$ m (fases a y c enterradas a 1 m de profundidad), e $y_b = 5$ m. Las intensidades son $I_{la} = 0.45I_a$ ($x_0 \rightarrow \infty$) e $I_{la} = 0.43I_a$ ($x_0 = -30m$).

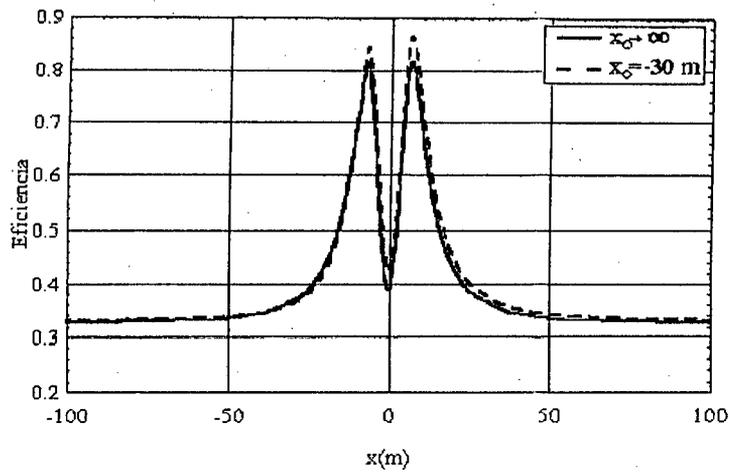


Figura 64: Eficiencias para $x_a = 0$ m
 $y_a = -5$ m, e $y_b = 5$ m.

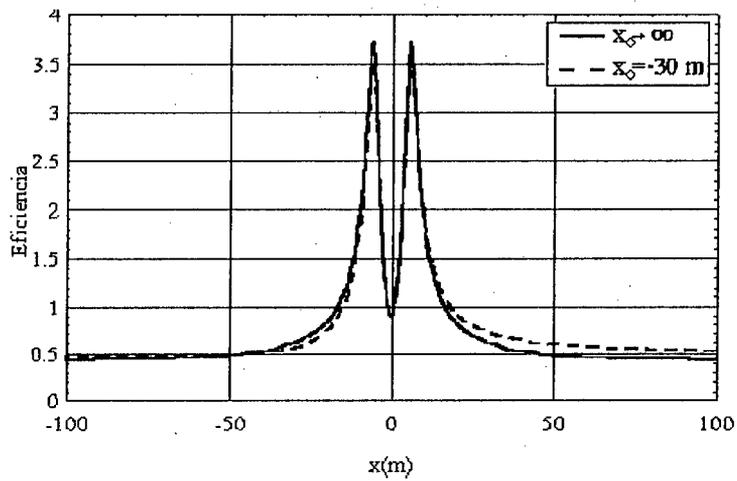


Figura 65: Eficiencias para $x_a = 0$ m , -
 $y_a = -h - 1$ m, e $y_b = 5$ m.

4.2.2.4. Línea con disposición doble circuito vertical.

Se analiza a continuación la mitigación activa de la línea doble circuito vertical, configuración abc-abc. En todos los ejemplos se supuso que la intensidad es la misma en ambos circuitos, aunque los métodos expuestos pueden aplicarse a circuitos con diferente carga.

La figura 66 muestra las eficiencias obtenidas con los lazos *I*, *II*, y *III* de la figura 54, cuando se minimiza el campo en $x_0 = -30$ m. Las intensidades a inyectar son $I = 1.56I_a$ (lazo *I*), $I = 0.96I_a$ (lazo *II*), e $I = 0.85I_a$ (lazo *III*).

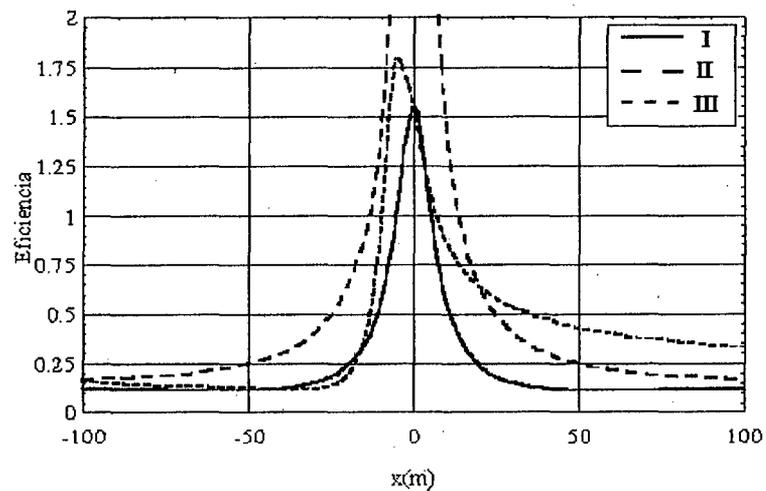


Figura 66: Eficiencias para las disposiciones de lazo activo

El lazo *I*, debido a su situación centrada respecto a la línea, es el que permite una mayor atenuación en toda la trayectoria transversal. El lazo *II*, situado también en el centro de la línea, requiere una intensidad menor, debido a la mayor anchura, pero la mitigación conseguida es más reducida. El lazo *III*,

coplanar con uno de los circuitos, es el que requiere menos intensidad, pero debido a su posición asimétrica, no mitiga lo mismo en un semieje x que en el otro.

Obsérvese también de la figura 66 que en los tres casos se produce una amplificación del campo cerca de la línea, llegando a ser el campo en $x = 0$, para el lazo II , 9,5 veces mayor que sin lazo. Además, cuando la carga en cada circuito no es sensiblemente la misma, se reduce la mitigación. Una solución a ambos inconvenientes consiste en disponer dos lazos coplanares con ambos circuitos, tal como se vio en el caso pasivo. La intensidad en cada lazo puede calcularse según tres procedimientos alternativos:

1. Aislando un circuito del otro. La intensidad en cada lazo se calcula de modo que compense al máximo el campo creado exclusivamente por el circuito coplanar con dicho lazo. El proceso de cálculo es idéntico al de una línea de simple circuito.
2. Fijando la intensidad en ambos lazos al mismo valor. Una alternativa interesante por permitir una regulación más sencilla de la intensidad por los lazos.
3. La intensidad en cada lazo se calcula de modo que se minimiza el campo resultante debido a ambos circuitos y lazos.

4.2.3. Discusión.

ADAMS (1996), encontró que para ambas estrategias existen dos técnicas de mitigación: activa y pasiva. La pasiva consiste en modificar algunos de los parámetros de la fuente, o en disponer apropiadamente una pantalla de material con elevada permeabilidad magnética relativa (de modo que se desvían las líneas de campo) o conductividad eléctrica (se inducen corrientes parásitas cuyo campo se opone al original), o ambas a la vez. La activa consiste en introducir unas corrientes de amplitud y fase apropiadas, cuyo campo contrarresta el original.

Según KELHA y PUKKI (1982), el uso de bucles de compensación viene empleándose en aplicaciones biomédicas y físicas, preferentemente para reducir campos electromagnéticos continuos. Sin embargo, no ha sido hasta la última década cuando se ha empezado a considerar la posibilidad de aplicar la misma técnica a fuentes de campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas, en concreto las líneas aéreas. Se resumen a continuación las principales investigaciones.

WALLING y PASERBA (1993), analizan la mitigación que se consigue en una línea trifásica horizontal con la inserción de un bucle horizontal situado bajo la línea. Para aumentar la corriente inducida se inserta un condensador en serie en el bucle. De este modo se consigue una reducción no homogénea del campo, siendo máxima a unos 20 m de la línea. Se analiza también el efecto sobre la impedancia de la línea de la inserción de dicho circuito en la línea, observándose una ligera influencia en la impedancia de secuencia directa y la componente de secuencia negativa, y una influencia despreciable en la

homopolar.

JONSSON y LARSSON (1994), analizan un esquema de compensación pasivo y activo aplicado a una configuración triangular o delta. El circuito de compensación consiste en tres conductores formando una configuración delta invertida. En este caso la corriente que circula por los conductores se genera por una fuente de alimentación independiente trifásica (compensación activa). Se observa una reducción a 100 m de la línea del 45% con la compensación pasiva con condensador, del 60% con la compensación activa suponiendo alimentación equilibrada, y una compensación total suponiendo alimentación independiente a cada fase. El valor de la intensidad por el circuito de compensación activo se obtiene mediante un cálculo iterativo.

MEMARI y JANISCHEWSKYI (1996), muestran los cálculos necesarios para obtener la intensidad inducida en el lazo de mitigación pasivo. Para ello calculan el flujo que atraviesa el lazo, y aplican la Ley de Inducción de Faraday para obtener la fuerza electromotriz inducida. Dividiendo por la impedancia del lazo se obtiene la intensidad. Demuestran también que con un lazo se puede reducir el campo electromagnético, no sólo sobre el suelo, sino en posiciones más elevadas.

RETA Y KARADY (1998), analizan teóricamente un diseño de pantalla activa con el objeto de proteger un espacio reducido (unos 50 m²) frente al campo generado por una línea horizontal situada encima. Para ello se dispone una serie de lazos (entre 5 y 10) rodeando, a modo de jaula, el espacio a proteger. Se han obtenido

atenuaciones de hasta el 95% en algunos puntos del interior. Una objeción importante a este esquema es la dificultad y coste implícito para alimentar de forma independiente un número tan elevado de lazos (en total entre 15 y 30).

En lo referente al tercer objetivo, se ha analizado la posibilidad de emplear, como pantallas mitigadoras, lazos pasivos y lazos activos. Para ello se ha desarrollado la formulación necesaria, en la que se obtienen las inductancias propias y mutuas entre lazos y fases. Se pueden deducir lo siguiente:

- La resistencia del conductor es un factor de importancia secundaria cuando el lazo es pasivo sin compensar, o activo.
- Las configuraciones que permiten una mayor reducción de campo con lazo pasivo y activo son las coplanares (horizontal y vertical), siendo muy sensible dicha reducción a la distancia lazo-fase. Para una distancia fase-lazo de 5 m se obtienen reducciones de hasta el 35 %.
- Con un lazo pasivo se obtienen también reducciones en la configuración triangular, pero se limita a un 25%. Si en lugar de un lazo se colocan dos la reducción aumenta, acercándose a los niveles conseguidos por la configuración coplanar.
- Para la configuración doble circuito vertical, disposición superhaz de fases, se obtienen reducciones de casi el 40% con la inserción de dos lazos pasivos coplanares. Para la configuración de baja reactancia la reducción conseguida es menor.

- La inserción de un condensador permite reducir el campo, en el caso coplanar, más de un 50% respecto al lazo sin condensador, siendo de un 30% para la configuración triangular.
- El lazo activo permite obtener rendimientos del apantallado de casi el 100% para configuraciones coplanares, en puntos alejados de la línea (100 m). Para puntos cercanos a la línea la eficiencia está en torno a 0.2. Con la disposición triangular se consiguen peores resultados ($FA \approx 0.45$). Una manera de mejorar el apantallado en dicha configuración es insertar un conductor más en la pantalla, formando un sistema trifásico equilibrado. Se han obtenido valores de $FA \approx 0.3$.
- Para la configuración doble circuito vertical, con dos lazos activos coplanares, se han analizado tres procedimientos para determinar las intensidades por los lazos. Se consiguen reducciones del 100% con el procedimiento 3 (regulación independiente de la intensidad en cada lazo). Aunque en la configuración baja reactancia se pueden obtener también reducciones significativas, sólo se consiguen en zonas reducidas de la trayectoria transversal, excepto cuando se alimenta cada lazo con la misma intensidad en módulo y desfase π .
- La presencia de componente homopolar reduce la eficacia de los lazos pasivos y activos. Los lazos pasivos dispuestos simétricamente respecto a la línea no inducen una intensidad como respuesta al campo creado por la componente homopolar. Con lazos activos sí puede eliminarse el campo creado por la componente homopolar, pero a costa de incrementar el campo rápidamente para otros puntos de la trayectoria transversal.

CONCLUSIONES

En la presente tesis se ha abordado la problemática de la reducción del campo electromagnético creado por líneas aéreas, en particular, las que constituyen la red de transporte. Para ello se han empleado diversos modelos que permiten obtener el campo electromagnético creado por las mismas. Estos modelos se han aplicado al análisis de diversas configuraciones de conductores, así como al de tres métodos de mitigación: división de fases e inserción de lazo pasivo y activo.

Las conclusiones se han organizado considerando los tres objetivos. Se ha procurado reflejar además la relación entre las principales técnicas de reducción de Campos Electromagnéticos creado por líneas eléctricas de alta tensión.

Estas conclusiones se ponen a consideración de quienes tienen a cargo la gestión ambiental y también de las personas ligadas al sector científico tecnológico, ya que se considera que la suma de estudios puede aportar los conocimientos necesarios para el tratamiento de un problema de gran

importancia ambiental. Si bien este trabajo está relacionado a un caso de la región, sus conclusiones pueden ser tenidas en cuenta, con la debida prudencia, para el estudio de problemáticas similares en otras zonas.

Relacionadas al primer y segundo objetivo:

Mitigación mediante la división de fases.- Se ha analizado la posibilidad de mitigar el campo mediante la división de una, dos, o las tres fases. Se concluye del estudio realizado que la configuración más eficiente es la que divide dos de las tres fases. Con ella se puede reducir el campo un 75% a 30 m de la línea, respecto a la configuración tresbolillo.

Mitigación mediante la inserción de lazos pasivos.- Se ha analizado y contrastado experimentalmente el empleo de lazos pasivos y activos de mitigación. Del análisis efectuado con lazos pasivos se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Las configuraciones que permiten una mayor reducción de campo son aquellas cuyos conductores están contenidos en un plano, y el lazo pasivo está contenido en el mismo plano (horizontal y vertical).
- Para las configuraciones no coplanares se obtienen reducciones de campo menores. Se consiguen valores de eficiencia similares al caso coplanar, cuando se emplean dos lazos y tres conductores.
- Con la configuración doble circuito vertical, superhaz, se consigue una reducción ligeramente mayor que con la configuración simple circuito, disponiendo dos lazos coplanares con los circuitos. Para la configuración de baja reactancia la reducción es menor.

- Se han analizado otras disposiciones del lazo que tienen su interés por la mayor facilidad en adaptarse a la línea ya existente. La reducción conseguida es menor, y en algunas de ellas se observan amplificaciones del campo, generalmente cerca de la línea. Merece la pena destacar, en las líneas verticales con conductor de tierra, una disposición de lazo vertical compuesta por el propio conductor de tierra y el otro tramo enterrado, con la que se consiguen reducciones de campo similares a los lazos coplanares, a distancias superiores a unos 30 m de la línea, tanto en la configuración simple como doble circuito. Como contrapartida, se obtienen amplificaciones del campo bajo la línea.
- Como ejemplo, para distancias típicas entre fases de la red de 500 kV, y distancia lazo-fase 5 m, se obtiene reducciones de hasta el 35% con lazos coplanares en configuraciones horizontal y vertical. Para la configuración delta la reducción máxima es del 25% cerca de la línea. A distancias mayores la reducción disminuye (20% a unos 100 m). Para la configuración doble circuito vertical la reducción llega casi al 40% con dos lazos pasivos coplanares.

Mitigación mediante la inserción de lazos activos.- Del análisis realizado con lazos activos se obtienen las siguientes conclusiones:

- Para las configuraciones horizontal y vertical con lazos coplanares se consiguen mayores reducciones conforme aumenta la distancia a la línea, siendo superior al 95% a unos 100 m de la línea.
- Para la configuración triangular, la reducción que se consigue con un lazo activo es del 55%. Se ha simulado también el empleo de una

pantalla mitigadora compuesta por tres conductores. Si se alimenta dicha pantalla con un sistema trifásico equilibrado de intensidades se obtienen reducciones de hasta el 70%, alcanzándose casi el 100% en caso de regulación independiente de cada fase.

- Para la configuración doble circuito vertical se han conseguido reducciones del 100% mediante el empleo de dos lazos con regulaciones independientes. Como contrapartida, el campo crece bajo la línea. Al igual que en el caso pasivo, la configuración baja reactancia presenta un peor comportamiento que la superhaz.
- La presencia de componente homopolar de intensidad resta capacidad mitigante del lazo activo. Se puede conseguir reducir el campo debido a la componente homopolar de intensidad, pero sólo a un lado de la línea. En el otro lado el campo crece rápidamente. Por ello, si la componente homopolar no es excesiva, es preferible no considerarla en el cálculo de la intensidad a inyectar en el lazo.

Relacionadas al tercer objetivo:

Modelos de Cálculo.- Las principales conclusiones relativas a los modelos de cálculo empleados son las siguientes:

- El efecto de la tierra hay que considerarlo para distancias a la línea superiores a 500 m.
- Un modelo exacto de la línea ha de tener en cuenta la curva de la catenaria. Sin embargo, dicha curva se puede sustituir por una recta infinita (modelo RI), cuya altura coincida con el punto de la catenaria más cercano al punto de medida, con un error menor del 10% para distancias a

la línea inferiores a unos 100 m.

- Se ha desarrollado una formulación alternativa al modelo RI, a partir de la descomposición en dipolos magnéticos, con la que se han obtenido algunas propiedades del campo creado por líneas trifásicas.
- Se ha desarrollado un modelo simplificado del RI, basado en la descomposición en dipolos magnéticos (DA). Este modelo presenta como principal ventaja frente al RI la posibilidad de obtener una expresión explícita del campo resultante y sus componentes vectoriales, en función de los parámetros de la línea. Esto facilita el análisis de configuraciones de baja emisión magnética. Se ha comprobado con las principales configuraciones de la red de transporte que se puede emplear el modelo DA a distancias superiores a 15 m con un error menor del 5% tanto en el campo resultante como en el módulo de las componentes vectoriales.
- Una formulación aún más compacta (DS) se puede obtener a partir de la DA, o también a partir de la descomposición en serie del campo resultante. Se obtienen errores menores del 5% a distancias superiores a 40 m.

Diseño de líneas aéreas de simple circuito.- Una vez desarrollados los modelos de cálculo, se han aplicado al diseño de líneas aéreas de simple circuito. Las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

- A igual distancia entre conductores, la configuración que genera menos campo es la delta invertida, y la que genera más campo la horizontal.

- Variando la configuración de los conductores se puede reducir el campo bajo la línea hasta un 55%, siendo menor la reducción a mayores distancias.
- Se puede reducir más moderadamente el campo decrementando la distancia entre fases (5 + 10% por metro) y la altura de los conductores (2.5% por metro a 30 m de la línea).

RECOMENDACIONES

Como consecuencia del trabajo desarrollado en esta tesis, se ha visto la posibilidad de seguir investigando alrededor de la problemática de la reducción del campo generado por las líneas eléctricas. En este sentido, algunas propuestas sobre futuras líneas de investigación se presentan a continuación:

Relacionadas al primer y segundo objetivo:

- La implantación práctica de los métodos de reducción de campo abordados en la presente tesis (división de fases e inserción de lazos) requiere, no sólo exclusivamente un análisis de la eficiencia conseguida con cada método, sino una visión global de las implicaciones tanto económicas como en la seguridad de la explotación del servicio. Así, habría que estudiar los nuevos requerimientos estructurales de los apoyos que han de soportar los conductores adicionales, cómo se ve modificado el campo eléctrico y las pérdidas por efecto corona, el desequilibrio eléctrico que introducen, etc.
- Se ha visto que la mitigación con lazo activo es muy eficiente en prácticamente todas las configuraciones. Sin embargo, su implantación se

ve frenada por la necesidad de disponer de equipos que inyecten una intensidad cuyo valor ha de variar con la carga de la línea. El desarrollo de equipos fiables con mantenimiento nulo y alimentación autónoma (v.g. energía solar) es condición indispensable para pensar en la posibilidad de la explotación práctica del lazo activo.

Relacionadas al tercer objetivo:

- Se presentó un método de mitigación de campos magnéticos basado en la inserción de planchas de material ferromagnético y/o conductor. En ocasiones, si el espacio a reducir no es muy amplio, podría ser más interesante el empleo de pantallas de estas características, por cuanto no afectarían a la línea. Una comparación técnico-económica con los métodos estudiados en la presente tesis podría servir en la toma de decisiones a la hora de abordar problemas de mitigación concretos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdallah H.**, (1999). Calculation of Magnetic Fields from Electric Power Transmission Lines. *Electric Power System Research*. N°. 49, pp. 99-105.
- Adair E.R.**, (1991). *Currents of Death Rectified*. Proceedings of the Industry Applications Society, Electromagnetics Field Seminar, Nueva York.
- Adams H.W., Trivette J.D.**, (1996). Evaluation of Magnetic Field and System Loss Considerations for Changes in Transmission Network Configuration. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 11, N°. 4, pp. 2036-2041.
- Adler R.B., Chu L.J., Fano R.M.**, (1960). *Electromagnetic Energy, Transmission and Radiation*. John Wiley, Nueva York.
- Asanova T.P., Rakov A.N.**, (1960). The Health Status of People Working in the Electric Field of Open 400-500 kV switching structures. *Gigiena Truda Professionalnye Zabolevaniia*, N°. 10, pp. 50-52.
- Belmans R., Van Dessel M., Koopmans W., Geysen W.**, (1993). CAD-Finite Element Calculation Modelling of the Field Under a High Voltage Line., paper 200-06.
- Brodeur P.**, (1989). *Currents of Death: Power Lines, Computer Terminals, and the Attempt to Cover Up Their Thread*. Simon and Schuster, Nueva York.

- ANSI/IEEE., (1987).** IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York.
- Carson J., (1926).** Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. Bell System Tech., N° 5, pp. 539-554.
- Conti R., Deponti F., Visintainer I., (1997).** Analisi dei Possibili Metodi di Riduzione del Campo Magnetico a Frequenza Industriale. Documento interno ENEL, Milán.
- Cotten W.L., Ramsing K.C.K., Cai C., (1994).** Design Guidelines for Reducing Electromagnetic Field Effects from 60-Hz Electrical Power Systems. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 30, N° 6, pp. 1462-1471.
- Dommel, H.W., (1986).** Electromagnetic Transients Program (EMTP). Reference Manual. 4427 West 6th Avenue, Vancouver, Canada.
- Dovan T., Owen R., Nuttall K., Howard B., (1998).** VDU Interference and Power Frequency Magnetic Field Design Considerations for Private Electrical Facilities. Electra. N° 181, pp. 113-137.
- Du Y., Cheng T.C., Farag A.S., (1996).** Principles of Power Frequency Magnetic Field Shielding with Flat Sheets in a Source of Long Conductors. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 38, N° 3, pp. 450-459.
- Durkin C.J., Fogarty R.P., (1995).** Five Years of Magnetic Field Management. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 10, N° 1, pp. 219-228.
- Farag A.S., Dawoud M.M., Habiballah I.O., (1999).** Implementation of Shielding Principles for Magnetic Field Management of Power Cables, Electric Power System Research. N° 48, pp. 193-209.

- Feychting M., Ahlbom A., (1993).** Magnetic Fields and Cancer in Children Residing near Swedish High-Voltage Power Lines. *American Journal of Epidemiology*, N°. 138, pp. 407-401.
- Feychting M., Forssen U., Floderus B., (1997).** Occupational and Residential Magnetic Field Exposure and Leukemia and Central Nervous System Tumors. *Epidemiology*, N°. 8, pp. 384-389.
- Fink D., Wayne H., (1996).** Manual de Ingeniería Eléctrica, decimotercera edición. McGraw-Hill, México.
- Floderus B., Persson T., Stenlund C., Wennberg A., Ost A., Knave B., (1993).** Occupational Exposure to Magnetic Fields in Relation to Leukemia and Brain Tumors: A Casecontrol Study in Sweden, *Cancer Causes and Control*, No. 4, pp. 465-476.
- González F.J., (1998).** Líneas Eléctricas. Apuntes del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla.
- Grupo de Trabajo de Campos Electromagnéticos de Unesa, (1998).** Campos Eléctricos y Magnéticos de 50 Hz. Grupo Pandora.
- Habiballah I.O., Farag A.S., Dawoud M.M., Firoz A., (1998).** Underground Cable Magnetic Field Simulation and Management Using New Design Configurations. *Electric Power System Research*, N°. 45, pp. 141-148.
- H. Koglin., Rees V., (1972).** Equivalent Circuit of HVDC Lines for Symmetric and Unsymmetric Operation in a Frequency Region 0 to 100 kHz. *ETZ-A*, Vol. 93, pp. 148-152.
- Hasselgren L., Nöller E., Hamnerius Y., (1994).** Calculation of Magnetic Shielding of a Substation at Power Frequency using FEM. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, N°. 3, pp. 1398-1405.

- Hiles M., Olsen R., Holte K., Jensen D., Griffing K.,** (1998). Power Frequency Magnetic Field Management Using a Combination of Active and Passive Shielding Technology. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 13, N° 1, pp. 171-179.
- Horton W.F., Goldberg S.,** (1994). Shielding the Power Frequency Magnetic Fields produced by Underground Distribution Cables. Proceedings of the North American Power Symposium, Kansas State University.
- Horton W.F., Goldberg S.,** (1995). Power Frequency Magnetic Fields and Public Health. Boca Raton. CRC.
- Hameyer K, Mertens R, Belmans R.,** (1996). Computation and Measurement of Electromagnetic Fields of AC High Voltage Transmission Lines. AC and DC Power Transmission Conference, Conference Publication No. 423, pp. 52-57.
- IEEE Magnetic Fields Task Force.,** (1988). Magnetic Fields from Electric Power Lines. Theory and comparison to measurements. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 3, N°. 4, pp. 2127-2136.
- IEEE Magnetic Fields Task Force.,** (1991). An Evaluation of Instrumentation used to Measure AC Power System Magnetic Fields. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 6, N°. 1, pp. 373-383.
- Ivanyi A.,** (1995). Shielding of Phase Conductors. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 32, N°. 3, pp. 1481-1484.
- Jonsson U., Larsson A., Sjödin J.O.,** (1994). Optimized Reduction of the Magnetic Field near Swedish 400 kV Lines by Advanced Control of Shield Wire Currents. Test results and economic evaluation. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 9, N°. 2, pp. 961-969.

- Jay F.**, (1984). IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, Nueva York.
- Karady G.**, (1994). A Novel Magnetic Field Management Method for Underground Power Cables. Electric Power System Research. Vol. 31, N°. 2, pp. 103-110.
- Karady G., Núñez C., Raghavan R.**, (1998). The Feasibility of Magnetic Field Reduction by Phase Relationship Optimization in Cable Systems. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 13, N°. 2, pp. 647-654.
- Kaune W.T., Zaffanella L.E.**, (1993). Analysis of Magnetic Fields Produced Far from Electric Power Lines. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 7, N°. 4, pp. 2082-2091.
- Kelhä V.O., Pukki J.M., Peltonen R.S., Penttinen A.J., Imoniemi R.J., Heino J.J.**, (1982). Design, Construction and Performance of a Large-volume Magnetic Shield. IEEE Trans. Magn. N°. 18, pp. 260-270.
- Latorre J., Soto F., Sancha J.L.**, (1993). Diseño de Líneas Aéreas Eléctricas en Alta Tensión en Relación con los Campos Eléctricos y Magnéticos. 3as Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, Barcelona.
- La Torre J., Soto F., Sancha J.L., Martín L., Sánchez S., Bernar J.**, (1994). Electric and Magnetic Fields at Low Frequency Produced by Spanish High Voltage Overhead Transmission Lines. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Roma.
- Lindberg L.**, (1998). Reduction of Magnetic Fields from Electric Power and Installation Lines. IEE Proc.-Sci. Meas. Technology. Vol. 145, N°. 5, pp. 215-221.

- London S.J., Thomas D.C., Bowman J.D., Sobel E., Cheng T.C., Peters J.M.,** (1991). Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields and Risk of Childhood Leukemia. *American Journal of Epidemiology*. N°. 134, pp. 923-937.
- Maddock B.J.,** (2008). A Summary of Standards for Human Exposure to Electric and Magnetic Fields at Power Frequencies. *Electra*. N°. 179, pp. 51-63.
- Mamishv A.V., Nevels R.D., Russell B.D.,** (1996). Effects of Conductor Sag on Spatial Distribution of Power Line Magnetic Field. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 11, N°. 3, pp. 1571-1576.
- Memari A.R., Janischewskyj W.,** (1996). Mitigation of Magnetic Field near Power Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 11, N°. 3, pp. 1577-1586.
- Nadie J.,** (2000). ¿Qué Está Pasando con los Campos Electromagnéticos?. *Andalucía Ecológica*, pp. 4-6.
- Niehs Program Staff.,** (1999). NIEHS Report on Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields. NIH Publication N°. 99-4493, National Institute of Environmental Health Sciences, P.O. Box 12233, Research Triangle Park, NC 27709.
- Nourai A., Keri J. F., Shih C. H.,** (2008). Shield Wire Loss Reduction for Double Circuit Transmission Lines. *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 3, N°. 4, pp. 1854-1864.
- Olsen R.G., Wong P.S.,** (1992). Characteristics of Low Frequency Electric and Magnetic Fields in the Vicinity of Electric Power Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 7, N°. 4, pp. 2046-2053.

- Olsen R.G., James D.C., Chartier V.L.,** (1993). The Performance of Reduced Magnetic Field Power Lines: Theory and Measurements on an Operating Line. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 8, N°. 3, pp. 1430-1442.
- Olsen R.G., Backus S.L., Stearns R.D.,** (2005). Development and Validation of Software for Predicting Elf Magnetic Fields near Power Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, N°. 3, pp. 1525-1534.
- Panofsky W., Phillips M.,** (1962). Classical Electricity and Magnetism, Segunda edición. Addison-Wesley.
- Pappa J., Ben-Yaacov G.,** (1992). Windowed Access to Electric and Magnetic Fields Software. Computer Applications in Power, pp. 24-28.
- Pettersson P.,** (1992). Simple Method for Characterization of Magnetic Fields from Balanced Three-phase Systems. Proceedings Cigré Session, Paper 36-103.
- Pettersson P.,** (1996). Principles in Transmission Line Magnetic Field Reduction. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 11, N°. 3, pp. 1587-1592.
- Pettersson P.,** (1996). Reduction of Power System Magnetic Field by Configuration Twist.
- Plonus M.A.,** (1978). Applied Electromagnetics. International Student Edition. McGraw-Hill Kogakusha, Tokio.
- Rade L., Westergren B.,** (2010). Mathematics Handbook for Science and Engineering, 4ª edición. Springer-Verlag, Berlín.
- Rashkes V.S., Lordan R.,** (1998). Magnetic Field Reduction Methods: Efficiency and Cost. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 13, N°. 2, pp. 552-559.

- Reta-Hernández M., Karady G.G., (1998).** Attenuation of Low Frequency Magnetic Fields Using Active Shielding. *Electric Power System Research*. N°. 45, pp. 57-63.
- Rikitake T., (1987).** *Magnetic and Electromagnetic Shielding*. D. Reidel Publishing Company, Boston.
- Rios S., Martín J., (1997).** *Simulación. Métodos y Aplicaciones*, primera edición. Editorial, Madrid.
- De la Rosa R., (1996).** *Contaminación Electromagnética. Las Radiaciones y sus Efectos sobre la Salud*, segunda edición. Terapion, Valencia.
- Sarma P., (1993).** Characterization of Power Frequency Magnetic Fields in Different Environments. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 8, N°. 2, pp. 598-606.
- Savitz D.A., Barnes F.A., John E.M., Tvrdik J.G., (1988).** Case Control Study of Childhood Cancer and Exposure to 60-Hz Magnetic Fields. *American Journal of Epidemiology*. N°. 128, pp. 21-38.
- Sicree R.M., Rauch G.B., Dietrich F.M., (1993).** Comparison of Magnetic Flux Density Meter Responses over a Database of Residential Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 8, N°. 2, pp. 607-619.
- Stevenson W.D., (1992).** *Elements of Power System Analysis*, segunda edición. McGraw-Hill, Nueva York..
- Stewart J.R., Dale S.J., Klein K.W., (1993).** Magnetic Field Reduction Using High Phase Order Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 8, N°. 2, pp. 628-636.

- Swanson J.**, (2006). Long Term Variations in the Exposure of the Population of England and Wales to Power Frequency Magnetic Fields. *J. Radio. Protection.* N°. 16, pp. 287-301.
- Taflove A., Genge M., Dabkowski J.**, (1979). Mitigation of Buried Pipeline Voltages due to 60 Hz AC Inductive Coupling. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.* Vol. PAS-98, N°. 5, pp. 1806-1823.
- Torá J.L.**, (1997). Transporte de la Energía Eléctrica. UPCO, Madrid.
- Tsanakas D., Tsalemis D., Agoris D., Vojazakis J.**, (1994). Optimum Arrangements of the Phase Conductors of Overhead Transmission Lines for the Magnetic Field Minimization. Cigré Session, paper 36-101.
- UNE 21018.**, (1980). Normalización de Conductores Desnudos a Base de Aluminio, para Líneas Eléctricas Aéreas. AENOR, Fernández de la Hoz, 52, Madrid.
- Wait J.R., Spies K.P.**, (1969). On the Image Representation of the Quasi-Static Fields of a Line Current Source Above the Ground. *Canadian Journal of Physics*, Vol. 47, pp. 2731-2733.
- Walling R.A., Paserba J.J., Burns C.W.**, (1993). Series-capacitor Compensated Shield Scheme for Enhanced Mitigation of Transmission Line Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Power Delivery.* Vol. 8, N°. 1, pp. 461-469.
- Wassef K., Varadan V.V.**, (1998). Magnetic Field Shielding Concepts for Power Transmission Lines. *IEEE Transactions on Magnetics.* Vol. 34, N°. 3, pp. 649-654.
- Wertheimer N., Leeper E.**, (1979). Electrical Wiring Configuration and Childhood Cancer. *American Journal of Epidemiology.* N°. 109, pp. 273-284.

Working Group on Electrostatic and Electromagnetic Effects of Transmission

Lines., (1978). Measurement of Electric and Magnetic Fields from Alternating Current Power Lines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-97, N°. 4, pp. 1104-1114.

Zaffanella L., (1993). Survey of Residential Magnetic Field Sources. Informe para el Electrical Power Research Institute (EPRI).