

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Diseño de apoyo para línea eléctrica aérea compacta
con doble tensión 800 kV/400 kV

Autor: Rafael José Pichardo Lama

Tutor: Pedro Luis Cruz Romero

Dep. Ingeniería eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Diseño de apoyo para línea eléctrica aérea compacta con doble tensión 800 kV/400 kV

Autor:

Rafael José Pichardo Lama

Tutor:

Pedro Luis Cruz Romero

Dep. de Ingeniería eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Diseño de apoyo para línea eléctrica aérea compacta con doble tensión 800 kV/400 kV

Autor: Rafael José Pichardo Lama

Tutor: Pedro Luis Cruz Romero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia y a mi novia por apoyarme en todo momento y alentarme en esta dura batalla.

A todas las personas que me llevo de esta bonita etapa, que serán sin duda grandes amigos para siempre.

Agradecimientos

A José Manuel Prieto Montilla, Javier Prada Delgado, Cristian Montané Palomo, José Andrés Millán Romera, Fernando Pérez Ramírez, Manuel Pavón Contreras, Alejandro Muñoz Cueva, Manuel Rodríguez Caballero, Alberto Perula Jiménez, Cristóbal Millán Herrador, Antonio Doña Jiménez, Manuel Caro Parrado, José Lucena Concha, Ezequiel Martín Sosa, Angel González Castro, Pepe Pozo Rodríguez y a todas las personas que hicieron que el día a día en la ETSI no fuera simplemente ir a clase.

A Pedro Cruz por ayudarme en todo lo necesario para poder realizar este proyecto.

En este trabajo se presenta una alternativa a la construcción de nuevas líneas de transmisión utilizando líneas ya existentes en España, en concreto estudiamos la adaptación de un apoyo actual de una línea de 400 kV de Red Eléctrica Española (REE), para que pueda albergar una nueva línea de 800 kV.

Este nivel de extraalta tensión, inexistente todavía en nuestro país, se justifica debido a la necesidad de construir una nueva superred que una el norte de África con Europa y, además, mejore la integración de los centros de generación de energía renovable europeos los cuales se encuentran en áreas remotas lejos de las zonas de consumo como por ejemplo los campos de fotovoltaicas en el sur de Europa (España) o el potencial de energía eólica que se encuentra en el mar fuera de la costa (offshore), en el océano Atlántico y el Mar del Norte, los cuales se encuentran alejados de Europa central (Alemania) que es el principal centro de consumo. (Ver figura 0-1)

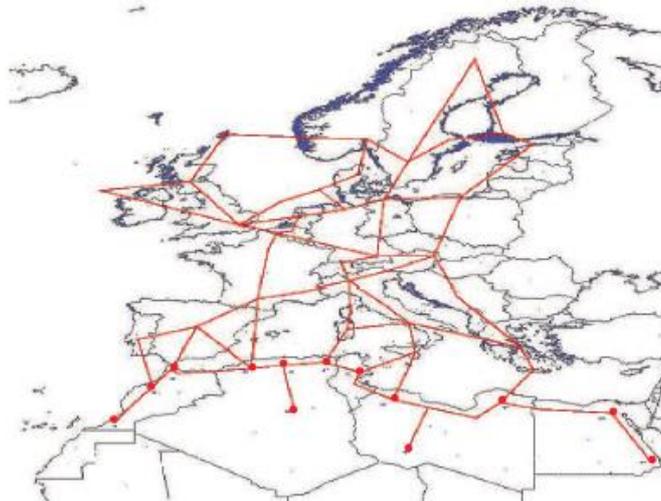


Figura 0-1. Futura superred Euro-Norafricana

Esta necesidad también es debida al aumento de fuentes de energía renovable en África, que los llevará a tener una capacidad de exportación de 347 Twh en 2050, siendo las actuales infraestructuras inservibles e insuficientes para distribuir tal cantidad de energía. Además, en Europa las energías renovables cada vez suponen un mayor porcentaje de la generación de energía debido al constante empeño en reducir los niveles de CO₂ en la atmósfera y de reducir el consumo de combustible fósil para dar paso a una forma de generación más cuidadosa con el medio ambiente

Ésto, unido a que cada vez más los clientes exigen a las distribuidoras que la fiabilidad del suministro sea alta y a que los colectivos a favor del medio ambiente exigen un menor impacto medioambiental en cualquier construcción que se lleve a cabo, nos ha llevado a la elección de líneas compactas para el nuevo nivel de tensión de 800 kV, así como la compactación de la línea de 400 kV ya existente.

El apoyo elegido para la línea de 800 kV es un apoyo tipo BOLD para línea compacta de la compañía AEP el cual estudiaremos a continuación.

Abstract

This project presents an alternative to the construction of new transmission lines using lines already existing in Spain, we are specifically studying the adaptation of a current support of a 400 kV line of REE, so that it can accommodate a new 800 kV line.

This level of extra-tension, nonexistent in our country, is justified due to the need to build a new super network linking North Africa with Europe and improve the integration of renewable energies of European generation centers which are located in remote areas far away of the consumption areas such as, for example, the photovoltaic fields in southern Europe (Spain) or the wind energy potential that is found in the offshore sea, in the Atlantic Ocean and the North Sea, which They are far from central Europe (Germany) which is the main center of consumption.

This need is also due to the increase of renewable energy sources in Africa, which will lead them to have an export capacity of 347 Twh in 2050, the current infrastructures being unsuitable and insufficient to distribute this amount of energy. In addition, in Europe, renewable energies increasingly account for a greater percentage of energy generation. This is due to the constant effort to reduce the levels of CO₂ in the atmosphere and reduce the consumption of fossil fuel to make way for a more careful generation with the environment.

This, together with the fact that more and more customers demand from distributors that the reliability of the supply is high since the groups in favor of the environment demand a lower environmental impact in any construction that takes place, has led us to the choice of compact lines for the new voltage level of 800 Kv, as well as the compaction of the existing 400 Kv line.

The support chosen for the 800 kV line is a BOLD type support for the compact line of the AEP company, which we will study next.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	14
Índice de Figuras	17
1 Introducción	1
1.1 <i>Justificación del proyecto</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	2
2 Líneas compactas	3
2.1 <i>Definición</i>	3
2.2 <i>Ventajas sobre las líneas no compactas</i>	4
2.2.1 Reducción de gastos de mantenimiento y pérdidas técnicas	4
2.2.2 Reconversión	4
2.2.3 Posibilidad de instalación de ternas múltiples en la misma estructura	4
2.2.4 Menor impacto ambiental	5
2.2.5 Tareas de tendido rápidas y económicas	5
2.3 <i>Líneas compactas en la actualidad para líneas de extra alta tensión</i>	5
2.3.1 Algunos ejemplos en el mundo	5
3 Características del apoyo actual para una línea doble circuito de 400 kV	7
3.1 <i>Configuración de conductores</i>	7
3.1.1 Configuración de fases	8
3.1.2 Configuración de conductores por fase	8
3.2 <i>Efecto corona</i>	9
3.2.1 Definición	9
3.2.2 Cálculo	10
3.3 <i>Ruido audible</i>	12
3.3.1 Definición	12

3.3.2	Cálculo del ruido audible	12
3.3.3	Ejemplo de cálculo	13
3.4.	<i>Ruido electromagnético</i>	14
3.4.1	Cálculo del TVI	14
3.4.2	Ejemplo de cálculo	15
3.5.	<i>Campo magnético</i>	16
3.5.1	Ejemplo de cálculo	17
3.6.	<i>Reactancia de la línea</i>	18
4	Propuesta de diseño del nuevo apoyo para dos líneas de 400 kV y 800 kV	20
4.1.	<i>Características técnicas del apoyo BOLD y diseño del nuevo apoyo</i>	20
4.1.1	Apoyo tipo BOLD para 345 kV	20
4.1.2	Propuesta de diseño de apoyo BOLD para línea de 800 kV	22
4.1.3	Configuración y número de conductores	22
4.1.4	Adaptación del apoyo actual de 400 kV	23
4.2.	<i>Efecto corona</i>	26
4.2.1	Cálculo de la tensión crítica disruptiva	27
4.2.2	Cálculo de las pérdidas por el efecto corona	29
4.3.	<i>Ruido audible</i>	30
4.3.1.	Ejemplo de cálculo	30
4.4.	<i>Ruido electromagnético</i>	33
4.4.1	Cálculo del TVI	33
4.4.2	Ejemplo de cálculo	33
4.5.	<i>Campo magnético</i>	35
4.5.1	Ejemplo de cálculo	36
4.6.	<i>Reactancia de la línea</i>	37
4.7.	<i>Tensiones inducidas entre líneas</i>	39
4.7.1	Cálculo de las tensiones inducidas por la línea de 400 kV en el circuito de 800 kV	40
4.7.2	Cálculo de tensiones inducidas por la línea de 400 kV en la línea de 800 kV	42
5	Estudio mecánico del nuevo apoyo	44
5.1	<i>Vano máximo en terreno llano</i>	44
5.2	<i>Árbol de cargas</i>	46
5.2.1	Cargas mecánicas en la estructura	46
5.2.2	Representación de la distribución de fuerzas en el apoyo	48
6	Estudio económico y medioambiental	49
6.1	<i>Peso de la estructura soporte</i>	49
6.1.1	Peso del apoyo BOLD 800 kV	49
6.1.2	Peso del acero necesario para el refuerzo del apoyo de REE 400 kV	50
6.2	<i>Cálculo de la cimentación</i>	50
6.2.1	Modificación de la cimentación de la línea de 400 kV	51

6.3	<i>Coste de la modificación de la línea de 400 kV</i>	52
6.4	<i>Deforestación</i>	53
7	Conclusiones y trabajo futuro	54
7.1	<i>Conclusiones</i>	54
7.2	<i>Trabajo futuro</i>	54
	REFERENCIAS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Línea compacta doble circuito (EEUU)	3
Figura 2-2. Circuito no compacto junto a circuito compacto en el mismo apoyo	4
Figura 2-3. Línea compacta extra alta tensión con apoyos BOLD (138 kV y 345 kV)	6
Figura 2-4. Base de los apoyos BOLD 345 kV (Tubos huecos)	6
Figura 2-5. Sustitución línea 345 kV en Indiana por una compacta con apoyos BOLD	6
Figura 3-1. Apoyo para línea de 400 kV doble circuito de REE	7
Figura 3-2. Configuración de fases en el apoyo de 400 kV	8
Figura 3-3. Configuración de una fase	8
Figura 3-4. Distancias entre fases	11
Figura 3-5. Ejemplo de punto de medida del nivel de ruido audible	13
Figura 3-6. Ejemplo de punto de medida del nivel de ruido electromagnético	15
Figura 3-7. Referencia y punto de medida del campo magnético	16
Figura 4-1. Comparación campos magnéticos apoyo BOLD- apoyo NORMAL	20
Figura 4-2. Apoyo BOLD 345 kV	21
Figura 4-3. Propuesta de apoyo BOLD 800 kV	22
Figura 4-4. Configuración de conductores de la línea de 800 kV	23
Figura 4-5. Compactación de la línea de 400 kV	24
Figura 4-6. Propuesta de conector para unir el apoyo de 400 kV con el de 800 kV	24
Figura 4-7. Diseño final del apoyo para ambas líneas (400 y 800 kV)	25
Figura 4-8. Distancia entre conductores de una fase	27
Figura 4-9. Distancia entre fases línea de 400 kV compactada	28
Figura 4-10. Punto de medida para el cálculo del ruido audible	31
Figura 4-11. Límites de ruido audible OMS (dB)	33
Figura 4-12. Configuración de fases en el nuevo apoyo	35
Figura 4-13. Distancia entre fases de ambas líneas	40
Figura 4-14. Cuadro resumen valores obtenidos	43
Figura 5-1. Diagrama de fuerzas en el apoyo para hipótesis de HIELO	48
Figura 6-1. Precios mano de obra	52
Figura 6-2. Precios ingeniería	53

1 INTRODUCCIÓN

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: La voluntad.

- Albert Einstein -

El diseño de las líneas eléctricas ha sido desde siempre un quebradero de cabeza para los profesionales del sector.

El diseño y la construcción de una línea eléctrica conllevan, a parte del cumplimiento de la norma establecida en el país de construcción, un compromiso tanto medioambiental como social.

Cada vez más, la sociedad pone mayores impedimentos a la hora de construir líneas eléctricas cerca de las poblaciones, ya sea por miedo a algo nuevo o simplemente desconocen la importancia que hoy y siempre han tenido las líneas de transmisión en nuestra vida cotidiana.

Esto, unido a que los clientes de las distribuidoras exigen que la fiabilidad del suministro sea cada vez mayor, hace que las líneas compactas sean una buena alternativa para las futuras construcciones de líneas de transmisión.

1.1 Justificación del proyecto.

Este proyecto, como ya vimos en el resumen, se justifica ya que existe la necesidad de construir una nueva super red que una el norte de África con Europa y, además, de la necesidad de mejorar la integración de los centros de generación europeos los cuales se encuentran en áreas remotas lejos de las zonas de consumo, además, en un futuro el consumo de energía eléctrica se verá incrementado debido al aumento de población y a la aparición de nuevas tecnologías que requerirán un aumento de la capacidad de carga de las líneas por lo que la infraestructura estudiada en este proyecto será necesaria para soportar dicho aumento.

Para alcanzar una mayor calidad de servicio, las transportistas y distribuidoras de energía eléctrica deben analizar alternativas para aumentar la fiabilidad en el suministro a sus clientes.

La respuesta a estas exigencias está dada por las instalaciones de REDES COMPACTAS las cuales se encuentran ampliamente difundidas en varios países no siendo así en España.

Descartando la opción de construir nuevas líneas eléctricas por los inconvenientes que ello conlleva, estudiaremos la adaptación de los apoyos actuales de líneas aéreas de 400 kV.

Esta adaptación consistirá en superponer una nueva línea de 800 kV a la ya existente, aumentando así la capacidad de carga y evitando la construcción de nuevas líneas. Para ello rediseñaremos el apoyo actual y estudiaremos los efectos eléctricos del nuevo diseño.

1.2 Objetivos.

En primer lugar, como introducción veremos la definición de línea compacta señalando las ventajas que tienen respecto a las líneas normales ya que este tipo de líneas no son muy comunes en nuestro país y tendremos una mejor visión de nuestro proyecto.

Posteriormente estudiaremos el diseño del actual apoyo para una línea de doble circuito de 400 kV de REE y los distintos efectos eléctricos que se producen en ella, los cuales son: el efecto corona, ruido audible, ruido electromagnético, campo magnético, reactancia de las líneas y para el nuevo apoyo estudiaremos las tensiones inducidas entre líneas.

Una vez estudiado el apoyo actual propondremos el nuevo diseño del apoyo que albergará la actual línea de 400 kV, la cual veremos la posibilidad de convertirla en una línea compacta para que los efectos eléctricos resultantes sean aceptables, y la nueva línea de 800 kV estudiando los efectos anteriormente mencionados para finalmente estudiar las restricciones técnicas que se pueden dar al llevar a cabo dicha adaptación y hacer una comparación entre ambas configuraciones con el fin de ver la viabilidad de la nueva configuración.

Una vez diseñado el nuevo apoyo realizaremos un estudio mecánico de éste con el fin de ver las fuerzas que actúan sobre él y determinar si la nueva configuración será mecánicamente aceptable, para luego realizar un estudio económico y evaluar la rentabilidad de la inversión.

Para terminar, se expondrá una serie de conclusiones obtenidas de este estudio.

2 LÍNEAS COMPACTAS

*Nuestras virtudes y nuestros defectos son inseparables,
como la materia y la fuerza. Cuando se separan, el
hombre no existe.*

-Nikola Tesla-

2.1. Definición

El término de línea compacta fue introducido en Estados Unidos para denotar a las líneas aéreas que se caracterizan por la reducción de la distancia entre fases en comparación con las líneas aéreas tradicionales. Teóricamente pueden emplearse en cualquier nivel de tensión, usando para ello conductores de acero altamente resistentes que pueden estar aislados o sin cubierta de aislamiento cuya separación se mantiene con espaciadores aislantes distanciados entre ellos, además, son líneas altamente fiables para la distribución de energía eléctrica. [18] ,[22].

La combinación de la alta resistencia mecánica del conductor portante, el diseño coordinado del aislamiento de la cubierta de los conductores de fase, en el caso de los conductores aislados, y los aisladores soporte y espaciadores, permiten una proximidad de los conductores energizados, al mismo tiempo que se mantiene un alto nivel de fiabilidad.

La resistencia y la durabilidad del sistema permiten mantener el servicio eléctrico durante condiciones adversas tales como caída de árboles o ramas, vientos fuertes y postes rotos.

La compacticidad también reduce significativamente la necesidad de podas, tanto inicialmente, durante la construcción de la línea, como más tarde, para mantener la fiabilidad del sistema.

En la figura 2-1 se puede observar una línea compacta con tres circuitos de 115 kV, 13.8 kV y 13.8 kV en la que podemos apreciar que el ancho de la línea compacta de 3 circuitos es menor que el de una línea normal de 3 circuitos.



Figura 2-1. Línea compacta doble circuito (EEUU)

2.2 Ventajas sobre las líneas no compactas

Tanto en el aspecto técnico, como en el económico y el ecológico las líneas compactas presentan muchas ventajas frente a las no compactas. [18]

Las principales ventajas son:

- Reducción de gastos de mantenimiento y pérdidas técnicas.
- Reconversión.
- Posibilidad de instalación de ternas múltiples en la misma estructura y aumento de la capacidad de carga.
- Conservación de la arborización disminuyendo la frecuencia y el volumen de poda. (Menor impacto ambiental)
- Tareas de tendido rápidas y económicas.
- Retorno de la inversión a corto plazo.

2.2.1 Reducción de gastos de mantenimiento y pérdidas técnicas

La reducción de los gastos de mantenimiento se debe a que se interviene menos en la red gracias a su alta fiabilidad por lo que se reduce la duración media de interrupciones por corte de servicio (TIEPI) y el número de interrupciones equivalente de la potencia instalada (NIEPI) mejorando la calidad del servicio técnico debido a la drástica reducción de las interrupciones accidentales y cortes programados.

2.2.2 Reconversión

Este sistema permite aprovechar las estructuras existentes pudiendo solucionar los problemas de las instalaciones peligrosas y repotenciar los alimentadores.

2.2.3 Posibilidad de instalación de ternas múltiples en la misma estructura

Este tipo de instalación permite el montaje de ternas múltiples manteniendo las alturas de los soportes convencionales disminuyendo la inversión inicial y posibilitando una mayor capacidad de carga.



Figura 2-2. Circuito no compacto junto a circuito compacto en el mismo apoyo

2.2.4 Menor impacto ambiental

Podemos aumentar la capacidad de transporte de nuestro sistema sin necesidad de construir nuevas líneas evitando una gran inversión y reduciendo en gran parte el impacto ambiental que conlleva la construcción de una nueva línea eléctrica.

Las líneas compactas reducen considerablemente los espacios de montajes y franjas de seguridad. También se reducen las podas de árboles tanto en frecuencia como en volumen permitiendo la conservación de las aves.

Estas líneas respecto a las normales son de mayor estética y armonizan con el medio ambiente. En algunos países, según la zona, es obligatorio mimetizar los apoyos con el paisaje.

2.2.5 Tareas de tendido rápidas y económicas

Es consecuencia de la reutilización de los antiguos apoyos.

Todo el ahorro en costes de mantenimiento, costes de tendido, en general costes de inversión se ven traducido en un rápido retorno de la inversión que hace que la instalación de líneas compactas sea una opción muy interesante y ventajosa que hay que tener en cuenta a la hora de construir nuevas líneas.

2.3 Líneas compactas en la actualidad para líneas de extra alta tensión

Dejando atrás los apartados anteriores en los que describíamos las líneas compactas en general vamos a centrarnos en las líneas compactas para niveles de tensión muy grandes (extra alta tensión) ya que la línea que estudiaremos es de 400 kV y la que superpondremos a ésta es de 800 kV.

2.3.1 Algunos ejemplos en el mundo

- FORT WAYNE, INDIANA:

Doble circuito de 138 kV sustituido por un circuito de 138 kV y otro de 345 kV utilizando apoyos BOLD que será el tipo de apoyo utilizado para la modificación de nuestros apoyos actuales de 400 kV. [1]

Este es un ejemplo de como las líneas compactas pueden entregar más energía en un espacio más pequeño.

(Ver figura 2-3)

- RAIMONDVILLE, TEXAS:

Esta línea de 18 millas es el primer proyecto audaz propuesto en Texas. La línea se construirá con apoyos BOLD de doble circuito de 345 kV. [1]

El proyecto apoyará el continuo desarrollo de la energía eólica en el Valle Bajo del Río Grande.

(Ver figura 2-4)

- LAFAYETTE, INDIANA:

Estas 20 millas a reconstruir en el oeste de Indiana sustituyen a la línea de doble circuito de 345 kV con una mayor capacidad y mayor eficiencia. [1]

La reconstrucción de esta línea mitiga las condiciones de sobrecarga y apoya el continuo desarrollo de energía eólica en el oeste de Indiana.

Se puede observar a la derecha la antigua línea con apoyos normales y a la izquierda la nueva línea con apoyos compactos BOLD apreciándose el menor tamaño de éstos y la menor distancia entre circuitos y fases.

(Ver figura 2-5)



Figura 2-3. Línea compacta extra alta tensión con apoyos BOLD (138 kV y 345 kV)



Figura 2-4. Base de los apoyos BOLD 345 kV (Tubos huecos)



Figura 2-5. Sustitución línea 345 kV en Indiana por una compacta con apoyos BOLD

3 CARACTERÍSTICAS DEL APOYO ACTUAL PARA UNA LÍNEA DOBLE CIRCUITO DE 400 kV

La electricidad es el alma del universo.

- Jhon Wesley -

En este apartado estudiaremos las características del apoyo de REE para una línea de 400 kV doble circuito. Para ello profundizaremos en la configuración de los conductores en el apoyo, indicando la distribución de fases y las distancias entre ellas para luego dar paso al estudio eléctrico en el que se calcularán el efecto corona, el ruido audible, el ruido electromagnético, el campo magnético y la reactancia de la línea.

Es importante conocer el valor de estos efectos producidos por la configuración actual ya que posteriormente los compararemos con los valores de la nueva configuración para tener una percepción de cómo influye la superposición de la nueva línea en dichos efectos eléctricos y veremos, por un lado, si los valores de la nueva configuración son aceptables para llevar a cabo el proyecto de adaptación de los apoyos actuales y por otro, los compararemos con los límites recomendados para la exposición de las personas.

3.1 Configuración de conductores

Este tipo de línea es típica de la compañía REE para un nivel de tensión de 400 kV por lo que podemos encontrar esta configuración en cualquier punto de nuestro país en el que se encuentre una línea de estas características.

La línea se compone de dos circuitos de tensión 400 kV, por los que circulan corrientes próximas a 1000 A, y dos hilos de guarda tal como podemos observar en la figura 3-1 que, además, nos muestra las dimensiones del apoyo que vamos a estudiar y cuyas medidas se encuentran en metros.

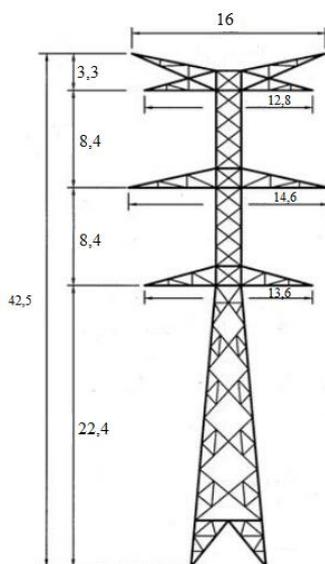


Figura 3-1. Apoyo para línea de 400 kV doble circuito de REE

3.1.1 Configuración de fases

Respecto a la configuración de las fases, en este apoyo podemos encontrar diferentes disposiciones de las mismas como podemos ver en la figura 3-2, aunque en nuestro caso para realizar este estudio, vamos a elegir la configuración de la segunda torre ya que es la que genera el mínimo campo magnético posible.

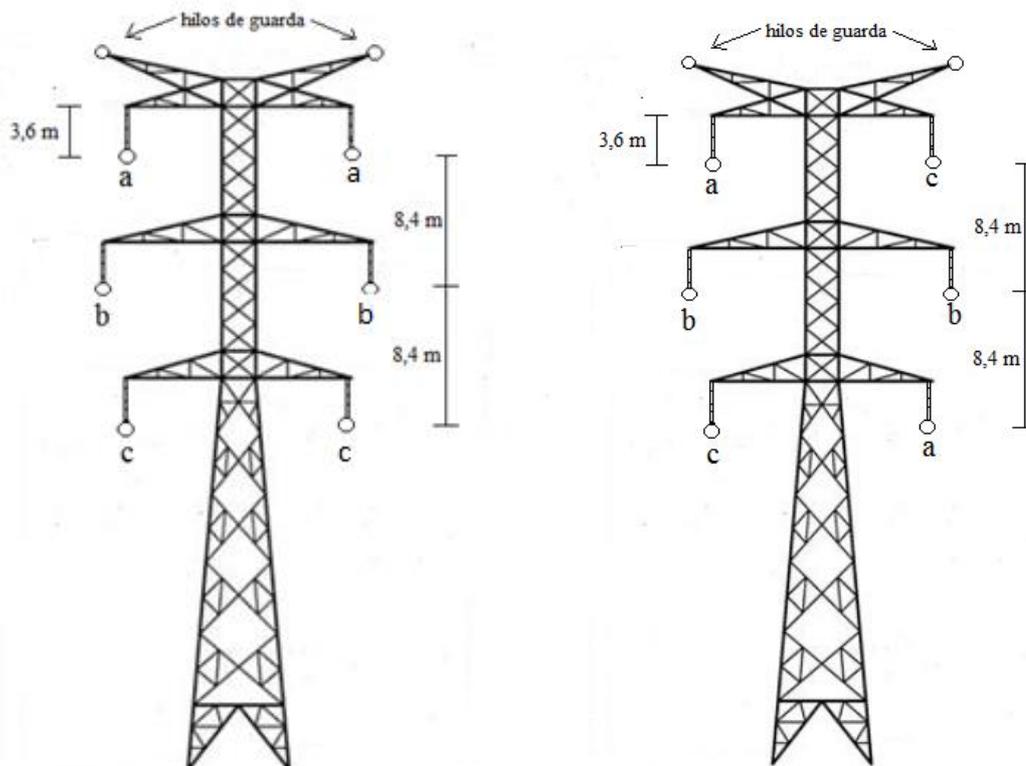


Figura 3-2. Configuraciones de fases en el apoyo de 400 kV

3.1.2 Configuración de conductores por fase

Dejando a un lado la disposición geométrica de todas las fases, nos adentramos en la configuración individual de cada una de ellas.

Cada una de las seis fases de ambos circuitos están constituidas por dos conductores tipo 485-AL1/63-ST1A (**Cardinal**) (Dúplex) separados entre sí 40 cm y están posicionados horizontalmente tal como podemos ver en la siguiente figura.

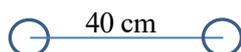


Figura 3-3. Configuración de una fase

Este tipo de conductor es muy común en las diferentes líneas de REE por lo que podemos encontrar fácilmente sus características físicas en su página web:

Sección de 547,3 mm².

Diámetro de 30,42 mm.

Fabricado en Al-Ac.

Con los datos anteriores y algunas hipótesis de los valores de los diferentes parámetros de la línea podemos comenzar a realizar el estudio eléctrico el apoyo actual.

Los valores propuestos son los típicos en las líneas de REE 400 kV doble circuito con este tipo de apoyo.

*Tensión de línea:400 kV.

*Capacidad de transporte o carga:700 MW.

*Frecuencia:50 Hz.

*Intensidad:1000 A.

3.2 Efecto corona

3.2.1 Definición

El efecto corona consiste en la ionización del aire que rodea a los conductores de alta Tensión. Este fenómeno tiene lugar cuando el gradiente eléctrico supera la rigidez dieléctrica del aire y se manifiesta por luminiscencias o penachos azulados que aparecen alrededor del conductor, más o menos concentrados en las irregularidades de su superficie. [19]

Las líneas eléctricas se diseñan para que el efecto corona sea mínimo, puesto que también suponen una pérdida en su capacidad de transporte de energía.

En su aparición e intensidad influyen los siguientes condicionantes:

*Tensión de la línea:

Cuanto mayor sea la tensión de funcionamiento de la línea, mayor será el gradiente eléctrico en la superficie de los cables y, por tanto, mayor el efecto corona. En realidad, sólo se produce en líneas de tensión superior a 80 kV.

*La humedad relativa del aire:

Una mayor humedad, especialmente en caso de lluvia o niebla, incrementa de forma importante el efecto corona.

*El estado de la superficie del conductor:

Las rugosidades, irregularidades, defectos, impurezas adheridas, etc. incrementan el efecto corona.

*Número de subconductores:

El efecto corona será menor cuanto más subconductores tenga cada fase de la línea. En nuestro caso el efecto corona será menor que en las líneas de 400 kV cuyas fases están compuestas de un solo conductor.

3.2.2 Cálculo

El efecto corona se producirá cuando la tensión de la línea supere la tensión crítica disruptiva del aire, es decir, aquel nivel de tensión por encima del cual el aire se ioniza. [17]

La fórmula más utilizada para la determinación de la tensión crítica es la fórmula de Peek:

$$V_c = 21,2 \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{DMG}{RMG} \cdot n \cdot K_r \cdot K_m \quad (3-1)$$

Donde:

- V_c es el valor de tensión crítica disruptiva en kV.
- δ es el factor de densidad del aire.
- r es el radio del conductor en centímetros.
- DMG es la distancia media geométrica entre fases.
- RMG es el radio medio geométrico.
- n es el número de conductores por fase.
- k_r es el coeficiente de rugosidad del conductor empleado, cuyo valor suele ser:
 - 1 para conductores nuevos.
 - 0,98 - 0,93 para conductores viejos (con protuberancias).
 - 0,87 - 0,83 para cables formados por hilos.
- k_m es el coeficiente medioambiental, cuyo valor suele ser:
 - 1 cuando el aire es seco.
 - 0,8 para aire húmedo o contaminado.

Para aquellos casos en los que se produce el efecto corona, la pérdida de potencia se calcula según la fórmula:

$$P_c = \frac{244}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{RMG}{DMG}} \cdot (V_s - V_c)^2 \cdot 10^{-5} \quad (3-2)$$

Donde:

- P_c es la pérdida de potencia en kW/km.
- δ es el factor de densidad del aire.
- f es la frecuencia de la línea en Hz
- DMG es la distancia media geométrica entre fases.
- RMG es el radio medio geométrico.
- V_s es el valor de la tensión fase-neutro (o tensión simple) en kV.
- V_c es el valor de tensión crítica disruptiva en kV.

El factor de densidad del aire depende de la presión del aire alrededor de nuestra línea y por consiguiente de la altura a la que se encuentre. En este caso suponemos que la línea se encuentra a una cota de 400 m sobre el nivel

del mar y podemos calcular el factor de densidad del aire de la siguiente manera, donde $P=725$ mmHg.

$$\delta = \frac{273+20}{273+T} \cdot \frac{P}{760} \quad (3-3)$$

- T es la temperatura del aire en grados Celsius.
- P es la presión del aire en milímetros de mercurio.

3.2.2.1 Cálculo de la tensión crítica disruptiva

Como hemos dicho anteriormente, supondremos una cota de terreno de 400 m sobre el nivel del mar donde $P=725$ mmHg y $T=21^\circ$ C, por lo tanto, el factor de densidad del aire es el siguiente:

$$\delta = \frac{273+20}{273+21} \cdot \frac{725}{760} = 0.9507.$$

El radio del conductor es la mitad del diámetro, cuyo valor lo conocemos del apartado anterior.

$$r = \frac{3,042}{2} = 1,521 \text{ cm.}$$

Una vez conocidos r y δ procedemos a calcular la distancia media geométrica, dada por la ecuación 3-4. [17]

$$DGM = \sqrt[3]{Da \cdot Db \cdot Dc} \quad (3-4)$$

Para el cálculo de DGM utilizamos la siguiente figura en la que aparecen las diferentes distancias entre fases calculadas a partir de la figura 3-1.

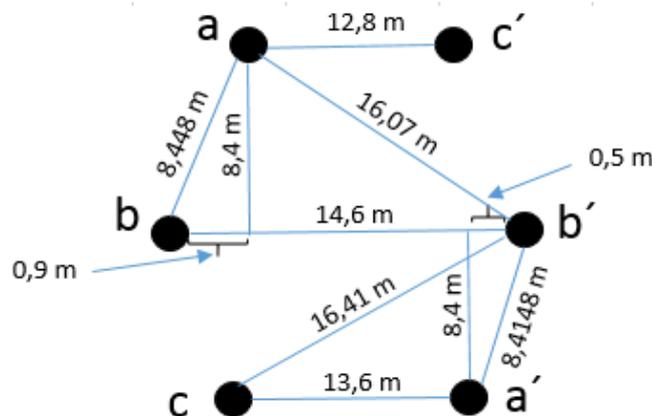


Figura 3-4. Distancias entre fases

Consideramos: $Dac \approx 8,4+8,4 = 16,8$ m y $Daa' \approx Dcc' = 21,615$ m.

Con las distancias entre fases ya calculadas se procede al cálculo de la distancia geométrica media y el radio geométrico medio, necesarios para el cálculo de la tensión crítica disruptiva:

$$Da = \frac{\sqrt{Dab \cdot Dac \cdot Dac' \cdot Dab'}}{Daa'} = \frac{\sqrt{8,448 \cdot 16,8 \cdot 12,8 \cdot 16,07}}{21,615} = 7,905 \text{ m.}$$

$$Db = \frac{\sqrt{Dba \cdot Dbc \cdot Dba' \cdot Dbc'}}{Dbb'} = \frac{\sqrt{8,448 \cdot 8,4148 \cdot 16,07 \cdot 16,41}}{14,6} = 9,3779 \text{ m.}$$

$$Dc = \frac{\sqrt{Dcb \cdot Dca \cdot Dcb' \cdot Dca'}}{Dcc'} = \frac{\sqrt{8,4148 \cdot 16,8 \cdot 16,41 \cdot 13,6}}{21,615} = 8,2176 \text{ m.}$$

$$DGM = \sqrt[3]{7,905 \cdot 9,3779 \cdot 8,2176} = 8,477 \text{ m.}$$

$$RGM = \sqrt{r \cdot d} = \sqrt{0,01521 \cdot 0,4} = 0,078 \text{ m (Línea dúplex).}$$

$$n = 2 \text{ (Línea dúplex).}$$

Kr = 0,98. Suponemos que los cables llevan ya un tiempo instalados.

$$Km = 1.$$

Con todo lo anterior calculamos la tensión crítica disruptiva:

$$Vc = 21,2 \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{DMG}{RGM} \cdot n \cdot Kr \cdot Km$$

$$Vc = 21,2 \cdot 0,9507 \cdot 1,521 \cdot \ln \frac{8,477}{0,078} \cdot 2 \cdot 0,98 \cdot 1 = \boxed{281,702 \text{ kV.}}$$

281,702 kV es el límite a partir del cual aparecerá el efecto corona en nuestra línea, por lo tanto, como la tensión de la línea es de 400kV > 281,702kV se producirán pérdidas por efecto corona y las calculamos a continuación.

3.2.2.2 Cálculo de las pérdidas por el efecto corona

Las pérdidas producidas por el efecto corona vienen dadas por la ecuación 3-2 vista anteriormente donde $f = 50 \text{ Hz}$, $RGM = 0,078$, $\delta = 0,9507$, $DGM = 8,477$, $V_s = \frac{400}{\sqrt{3}}$, y $V_c = \frac{281,702}{\sqrt{3}}$.

$$P_c = \frac{244}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{RGM}{DMG}} \cdot (V_s - V_c)^2 \cdot 10^{-5};$$

$$P_c = \frac{244}{0,9507} \cdot (50 + 25) \cdot \sqrt{\frac{0,078}{8,477}} \cdot \left(\frac{400}{\sqrt{3}} - \frac{281,702}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 10^{-5} = \boxed{86,1325 \frac{\text{kW}}{\text{Km fase}}}$$

Por cada kilómetro de línea, cada fase tiene unas pérdidas de 86,1325 kW que es un valor normal para este nivel de tensión.

Una vez calculadas las pérdidas por el efecto corona vamos a calcular el nivel de ruido audible que se produce debido a este efecto.

3.3 Ruido audible

3.3.1 Definición

El ruido provocado por el efecto corona consiste en un zumbido a baja frecuencia provocado, a su vez, por el movimiento de los iones y un chisporroteo producido por las descargas eléctricas.

Son ruidos de baja intensidad que en algunos casos apenas son perceptibles y, únicamente cuando el efecto corona es muy grande el ruido se percibirá en las proximidades inmediatas de líneas de muy alta tensión, reduciéndose rápidamente al aumentar la distancia con la línea. [7]

3.3.2 Cálculo del ruido audible

Para obtener el nivel total de ruido de una línea de transmisión primero se debe de calcular el potencial de ruido

de cada una de las fases, es decir, el máximo ruido audible que puede generar cada fase a una E_i (intensidad de campo eléctrico máxima) en la superficie de los conductores.

El potencial de ruido audible para cada fase viene dado por la siguiente ecuación:

$$NP_{ai} = -164,6 + 120 \text{ Log } E_i + 55 \text{ Log } Re_i \quad (\text{dB}) \quad (3-5)$$

Donde:

E_i es la intensidad de campo eléctrico máxima en Kv/cm;

Re_i es el radio equivalente de acuerdo con: $Re_i = r$ si $n \leq 2$

$$Re_i = 0,58 n^{0,48} r \quad \text{si } n > 2$$

siendo n es el número de subconductores y r es el radio del subconductor en mm.

Una vez calculado el potencial de ruido de cada fase podemos calcular el nivel de ruido total en cualquier punto cercano a la línea mediante la siguiente fórmula:

$$NP = 10 \text{ Log} \left\{ \sum_{i=1}^n \exp[0,23(NP_{ai} - 11,4 \text{ Log } D_{li} - 5,8)] \right\} \quad (3-6)$$

Donde D_{li} es la distancia en metros entre el conductor i y el punto de medida.

3.3.3 Ejemplo de cálculo

Vamos a calcular el nivel total de ruido audible en un punto cercano a la línea representado en la figura 3-5.

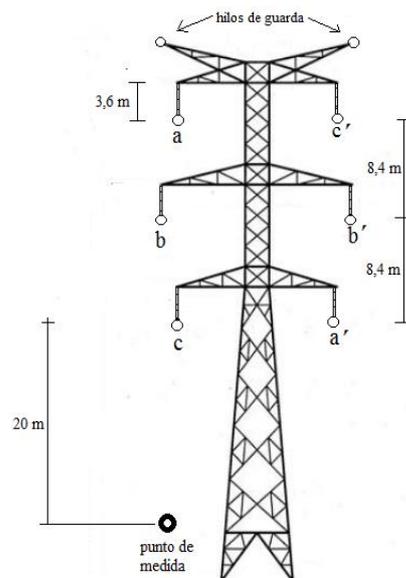


Figura 3-5. Ejemplo de punto de medida del nivel de ruido audible

Las distancias desde el punto de medida a las diferentes fases son las siguientes:

$$D_{lc} = 20 \text{ m};$$

$$D_{lb} \approx 28,4 \text{ m};$$

$$D_{la} \approx 36,8 \text{ m};$$

Utilizando Pitágoras y las dimensiones del apoyo:

$$D_{la'} = 24,186 \text{ m};$$

$$D_{lb'} \approx 31,933 \text{ m};$$

$$D_{lc'} \approx 38,962 \text{ m};$$

Con estas medidas, tomando $R_{ei} = r = 15,21$ mm y sabiendo que la intensidad de campo eléctrico superficial máxima de un conductor dúplex a 400 kV se da en su superficie es aproximadamente 14 kV/cm podemos calcular el potencial de ruido de cada fase y posteriormente el nivel de ruido audible en el punto de medida:

$$NP_{ai} = -164,6 + 120 \text{ Log } E_i + 55 \text{ Log } R_{ei}$$

$$NP_{ai} = -164,6 + 120 \text{ Log } 14 + 55 \text{ Log } 15,21 = 37,95 \text{ dB};$$

Como hemos visto en la definición del potencial de ruido audible, cada fase produce en su superficie 37,95 dB para una E_i máxima = 14kV/cm.

El nivel total de ruido audible en el punto de medida se consigue con la superposición del ruido de cada fase en dicho punto:

$$NP = 10 \text{ Log } \left\{ \sum_{i=1}^n \exp[0,23(NP_{ai} - 11,4 \text{ Log } D_{li} - 5,8)] \right\}$$

$$NP = 10 \text{ Log } \left\{ \begin{array}{l} \exp[0,23(37,95 - 11,4 \text{ Log } 20 - 5,8)] + \\ \exp[0,23(37,95 - 11,4 \text{ Log } 28,4 - 5,8)] + \\ \exp[0,23(37,95 - 11,4 \text{ Log } 36,8 - 5,8)] + \\ \exp[0,23(37,95 - 11,4 \text{ Log } 24,186 - 5,8)] + \\ \exp[0,23(37,95 - 11,4 \text{ Log } 31,933 - 5,8)] + \\ \exp[0,23(37,95 - 11,4 \text{ Log } 38,962 - 5,8)] \end{array} \right\} = 23,352 \text{ dB};$$

Este nivel de ruido no es muy alto comparándolo con el nivel de ruido en un área rural, el cual puede variar desde 20 dB a 30 dB por lo que el ruido audible producido por el efecto corona pasará, en ocasiones, inadvertido.

3.4 Ruido electromagnético:

Una vez calculado el ruido audible producido por el efecto corona, vamos a calcular el nivel de ruido electromagnético de la línea de doble circuito de 400 kV. [16]

Consideramos como ruido electromagnético la interferencia producida por el efecto corona en un rango de frecuencias altas, por encima de los 30 MHz.

A partir de ahora llamaremos al ruido electromagnético **TVI** (television interference) ya que este rango de frecuencias es el utilizado para la transmisión de tv.

3.4.1 Cálculo del TVI

Para calcular el nivel de TVI de nuestra línea de transmisión utilizaremos la siguiente fórmula del método del **EPRI** (Electric Power Research Institute, EE. UU.) obtenida experimentalmente:

$$TVI = R_{Io} - 20 \log(f) - 20 \log\left(\frac{X}{X_o}\right) + C \quad \text{dB /fase} \quad (3-7)$$

Donde:

R_{Io} es el radio de interferencia de referencia a la distancia X_o .

f es la frecuencia de medida en MHz.

X es la distancia lateral desde el punto de medida al conductor.

X_o es la distancia de referencia de medida del R_{Io} .

C es un factor de corrección dependiente del sistema de medida del TVI.

3.4.2 Ejemplo de cálculo

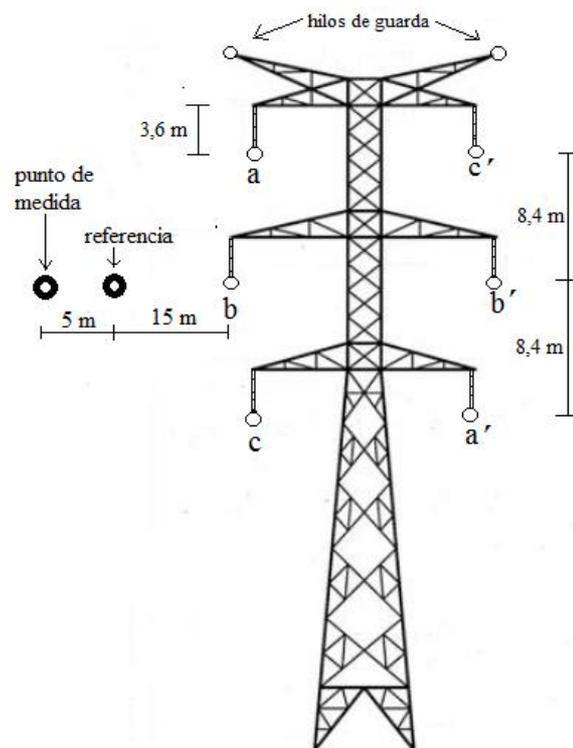


Figura 3-6. Ejemplo de punto de medida del nivel de ruido electromagnético

El método EPRI nos da como referencia una distancia lateral al conductor de $X_0=15$ m en la cual, para $n < 3$ y $g < 17$ kV/cm, el radio de interferencia es $RI_0 \approx 65$ dB.

En este ejemplo de cálculo nuestro punto de medida estará a una distancia lateral de 20 m aprox. de los conductores del primer circuito y a unos 33 m del segundo circuito, la frecuencia de medición dada por el método EPRI es de 75 MHz y el factor $C=3,2$ dB.

Con todos estos datos pasamos a calcular el TVI de ambos circuitos en el punto de medida:

Para el primer circuito:

$$TVI = RI_0 - 20 \log(f) - 20 \log\left(\frac{X}{X_0}\right) + C;$$

$$TVI = 65 - 20 \log(75) - 20 \log\left(\frac{20}{15}\right) + 3,2 = 28,201 \text{ dB/fase}$$

Para el segundo circuito la distancia lateral al punto de medida es $X \approx 24$ m.

$$TVI = RI_0 - 20 \log(f) - 20 \log\left(\frac{X}{X_0}\right) + C =$$

$$TVI = 65 - 20 \log(75) - 20 \log\left(\frac{33}{15}\right) + 3,2 = 23,85 \text{ dB/fase}$$

Se observa, como es lógico, que a medida que la distancia lateral de medida aumenta, el valor de la interferencia disminuye.

El valor total del ruido electromagnético en el punto de medida será la suma de las contribuciones de cada fase, por lo tanto:

$$TVI_{tot} = 3 \cdot 28,201 + 3 \cdot 23,85 = 156,153 \text{ dB}$$

3.5 Campo magnético

En este apartado calcularemos el campo magnético producido por la corriente pasante por los conductores. [15]

Para el cálculo de campo magnético bajo los alimentadores de distribución y barras en sistemas de transmisión, se plantea un método de simulación de corrientes en analogía con el método de simulación de cargas para el campo eléctrico. En el mismo, la

fuente del campo es directamente la corriente del conductor, las líneas de campo

atraviesan la superficie del suelo y el plano de referencia se encuentra bastante profundidad.

Las componentes de campo magnético para cada conductor "i" están representadas por las siguientes expresiones:

$$B_{xi} = \frac{\mu \cdot I_i}{2\pi} \cdot \frac{-(y-y_i)}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (T) \quad (3-8)$$

$$B_{yi} = \frac{\mu \cdot I_i}{2\pi} \cdot \frac{(x-x_i)}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (T)$$

Donde:

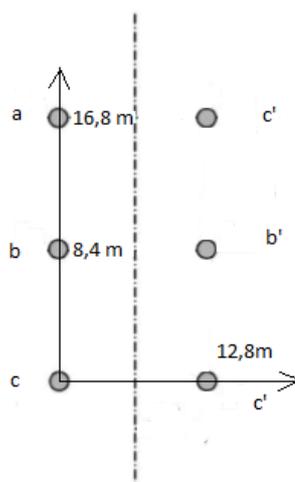
El conductor "i", está ubicado en la posición (xi, yi) respecto de la referencia, la cual tomaremos en el conductor C.

(x, y) es la posición del punto en el que realizaremos la medida respecto a la referencia.

μ es la permeabilidad del medio (Aire).

I_i es la corriente que pasa por el conductor i.

En la siguiente figura podemos observar las posiciones de cada fase y la posición de la referencia, la cual representa el área justo debajo de la línea cercana al suelo para así poder comparar con el límite de exposición a campos magnéticos sobre las personas establecido por el ICNIRP, una de las principales agencias internacionales vinculadas a la Organización Mundial de la Salud (OMS).



● Punto de medida = (0, -20)

Figura 3-7. Referencia y punto de medida del campo magnético.

3.6.1 Ejemplo de cálculo

Para ilustrar el concepto de campo magnético vamos a realizar un pequeño ejemplo tomando como punto de medida el de la figura 3-7.

En este caso los valores para realizar el cálculo son los siguientes:

$$\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2;$$

$$I = 1000 \text{ A};$$

$$(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (0, -20);$$

$(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$ de cada fase (Ver figura 3-7)

Sustituyendo estos valores en las fórmulas anteriores obtenemos los siguientes valores de las componentes del campo magnético producido por cada fase en el punto de medida:

Fase a:

$$B_{xa} = 5,43 \mu\text{T};$$

$$B_{ya} = 0;$$

Fase b:

$$B_{xb} = 7,04 \mu\text{T};$$

$$B_{yb} = 0;$$

Fase c:

$$B_{xc} = 10 \mu\text{T};$$

$$B_{yc} = 0;$$

Fase a':

$$B_{xa'} = 7,69 \mu\text{T};$$

$$B_{ya'} = -4,54 \mu\text{T};$$

Fase b':

$$B_{xb'} = 5,85 \mu\text{T};$$

$$B_{yb'} = -2,63 \mu\text{T};$$

Fase c':

$$B_{xc'} = 4,85 \mu\text{T};$$

$$B_{yc'} = -1,68 \mu\text{T};$$

Para calcular el valor total del campo magnético en el punto de medida sumamos las componentes producidas por cada fase y posteriormente calculamos su módulo:

$$B_{xtotal} = 40,26 \mu\text{T};$$

$$B_{ytotal} = -8,85 \mu\text{T};$$

Siendo el módulo del campo magnético en el punto de medida:

$$B_{total} = \sqrt{B_{xtotal}^2 + B_{ytotal}^2} = \boxed{41,22 \mu\text{T}}$$

Como era de esperar, este valor no supera el límite establecido por el ICNIRP para público en general el cual tiene un máximo permitido de 83 μT .

3.6 Reactancia de la línea

Para finalizar con la obtención de los parámetros típicos de la línea de 400 kV vamos a calcular la reactancia, la cual se define como la oposición al paso de corriente que ofrece una inductancia (reactancia inductiva) o una capacitancia (reactancia capacitiva), con el fin de saber los valores normales de ésta en el caso de 400 kV y poder compararla con la reactancia del apoyo modificado. [9], [10]

Empezamos por el cálculo de la reactancia inductiva la cual se define por la siguiente ecuación:

$$Xl = w \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (3-9)$$

Donde:

f es la frecuencia de la red.

L es la inductancia de la línea.

La inductancia para una línea de doble circuito como la nuestra se define como

$$L = \left(\frac{1}{2 \cdot n} + 4,6 \log \frac{DMG}{RMG} \right) \cdot 10^{-4} \frac{H}{\text{Km fase}} \quad (3-10)$$

Donde:

n es el número de conductores por fase;

DMG es la distancia media geométrica entre conductores;

RMG es el radio medio geométrico;

En nuestro caso $n=2$ porque tenemos dos conductores por fase, $DMG=8,477$ m y $RMG=0,078$ m como hemos visto en apartados anteriores, por lo que la inductancia es

$$L = \left(\frac{1}{4} + 4,6 \log \frac{8,477}{0,078} \right) \cdot 10^{-4} = 9,62 \cdot 10^{-4} \frac{H}{\text{Km fase}}$$

Y la reactancia inductiva es

$$Xl = w \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 9,62 \cdot 10^{-4} = \boxed{0,302 \frac{\Omega}{\text{km fase}}}$$

Pasamos ahora al cálculo de la reactancia capacitiva la cual se define como:

$$Xc = \frac{1}{w \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (3-11)$$

Donde:

C es la capacitancia de la línea;

f es la frecuencia de la red;

La capacitancia para una línea de transmisión se define como:

$$C = \frac{0,0243}{\text{Ln} \frac{\text{DMG}}{\text{RMG}}} \cdot 10^{-6} \frac{\text{F}}{\text{Km fase}} \quad (3-12)$$

En nuestro caso:

$$C = \frac{0,0243}{\text{Ln} \frac{8,477}{0,078}} \cdot 10^{-6} = 5,18 \cdot 10^{-9} \frac{\text{F}}{\text{Km fase}}$$

Por lo tanto, la reactancia capacitiva será:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5,18 \cdot 10^{-9}} = \boxed{614,14 \frac{\text{k}\Omega}{\text{km fase}}}$$

Estos son valores normales para el nivel de tensión de 400 kV los cuales compararemos más adelante con los valores de la línea modificada.

4 PROPUESTA DE DISEÑO DEL NUEVO APOYO PARA DOS LÍNEAS DE 400 Y 800 kV

Nuestra mayor debilidad radica en renunciar. La forma más segura de tener éxito es siempre intentarlo una vez más.

- Thomas Edison -

Una vez estudiadas las características del apoyo actual para una línea doble circuito de 400 kV de REE pasamos a estudiar la adaptación de éste.

Veremos los procedimientos que se llevarán a cabo para sobreponer al apoyo actual un apoyo tipo BOLD de la compañía AEP el cual está diseñado para una línea de 345 kV. Por ello veremos las limitaciones y restricciones técnicas que tendría este apoyo para albergar una línea de 800 kV como pueden ser el peso que aguanta dicho apoyo y las distancias de seguridad con la línea de 400 kV, veremos cómo reforzar el apoyo actual para que soporte la nueva línea y llevaremos a cabo la compactación de la línea actual de 400 kV mediante el uso de armados aislantes, lo que nos proporcionará todas las ventajas de las líneas compactas.

4.1 Características técnicas del apoyo bold y diseño del nuevo apoyo

En este apartado veremos las adaptaciones que haremos en el nuevo apoyo tipo BOLD de 345 kV para que pueda pasar de albergar una línea doble circuito a albergar una de 800 kV de un solo circuito y estudiaremos las restricciones técnicas a la hora de construirlo y sobreponerlo en el apoyo actual de 400 kV.

4.1.1 Apoyo tipo BOLD para 345 kV

Este apoyo está formado por una estructura tubular de acero la cual hace que el impacto visual sea menor que un apoyo tipo celosía por lo que su aceptación social es mayor, además, el campo magnético producido por la configuración de los conductores en este apoyo es menor que en los apoyos convencionales no compactos como podemos ver en la figura 4-1.

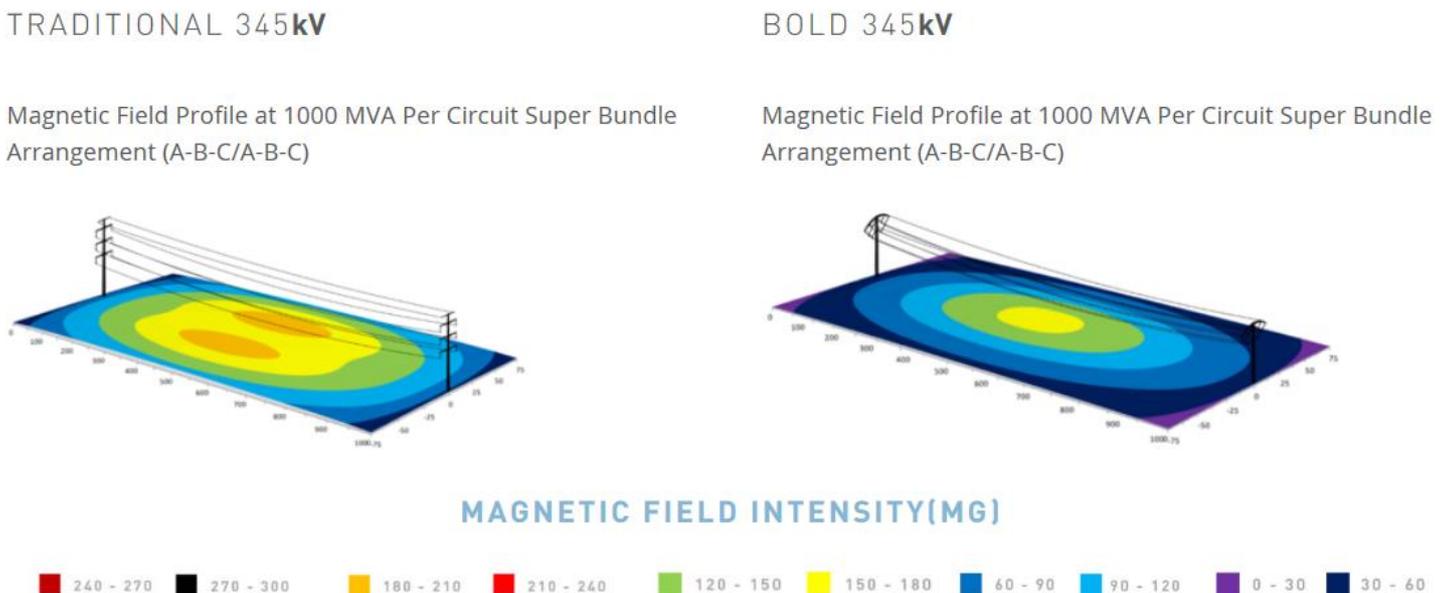


Figura 4-1. Comparación campos magnéticos apoyo BOLD- apoyo NORMAL

El diseño de fábrica del apoyo es el de la figura 4-2, aunque no es definitivo ya que la compañía AEP está continuamente estudiando y diseñando nuevas mejoras según las necesidades de la línea. El apoyo tipo BOLD está preparado para albergar una línea de doble circuito de 345 kV con tres conductores por fase, es por esto por lo que vamos a proponer un diseño para una línea simple de 800 kV ya que habrá que pedir a la compañía AEP un apoyo BOLD adaptado a nuestras necesidades.

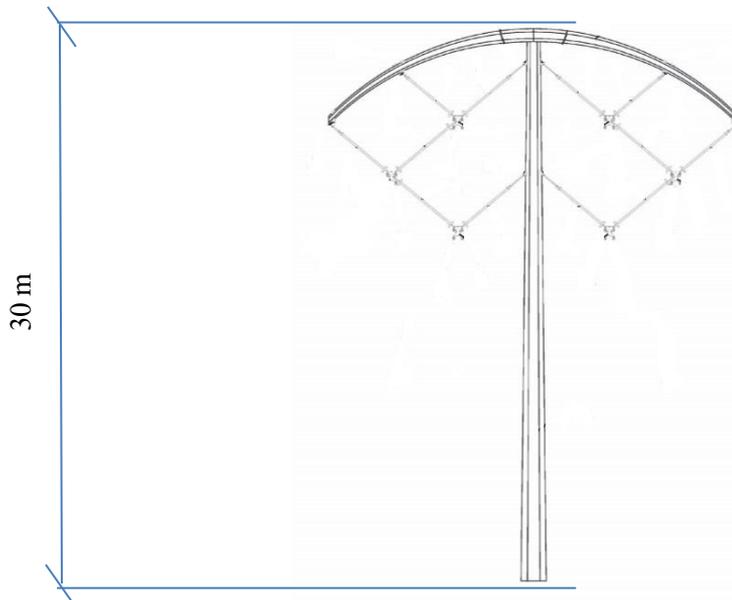


Figura 4-2. Apoyo BOLD 345 kV

Podemos observar que la altura del apoyo tipo BOLD es considerablemente menor que el tradicional de 400 kV, aproximadamente un 30 % más pequeño, por lo que el impacto visual es menor. [20]

Los ángulos entre los aisladores pueden variar desde los 30° a los 120° y la distancia entre fases entre 3 y 10 metros, un 40 % menos que en la línea de 400 kV actual no compacta.

Los aisladores son elementos de importancia en estos tipos de apoyos ya que, al ser rígidos y no permitir el movimiento de los conductores, disminuyen la frecuencia de faltas fase-fase respecto a los apoyos no compactos, aumentando la fiabilidad del sistema, además, los aisladores deben aguantar la tensión de diseño, ser resistentes a los esfuerzos de torsión y compresión a los que se someterán y mantener la distancia para que no salte el arco eléctrico. Para ello se fabrican en cerámica, cristal, o polímero siendo los de polímero los más recomendables debido a que aguantan mejor las altas temperaturas.

Teniendo en cuenta estas recomendaciones respecto a los apoyos BOLD vamos a pasar a diseñar nuestro propio apoyo BOLD, el cual deberá albergar una línea de un circuito de 800 kV.

Al ser una línea de un solo circuito optamos por una configuración coplanar horizontal ya que es típica para grandes niveles de tensión y hace que el esfuerzo en la cimentación del apoyo sea mínimo.

En relación al número de conductores por fase, optamos por una línea quintuplex (5 conductores por fase, 15 conductores en total), lo que proporcionará un menor efecto corona debido al alto número de conductores por fase.

Esto no será un problema para la resistencia del apoyo ya que está diseñado para aguantar como mínimo 18 conductores.

El diseño propuesto consiste en el acortamiento del mástil central para así poder ubicar dos mástiles pequeños formando una V de aproximadamente 60° donde se apoya el arco que sostiene a los aisladores y por lo tanto las fases y los hilos de guarda. Esta modificación es necesaria para poder albergar la fase central de nuestra línea.

Los aisladores de las fases de los extremos forman un ángulo aproximadamente de 80 ° grados, los de la fase central forman un ángulo de aproximadamente 45° y los de los hilos de guarda rondan los 90 °, valores que se encuentran dentro del rango que nos da el fabricante por lo que no habrá ningún problema a la hora de encargarlo.

Al reducirse el número de circuitos respecto al diseño inicial se reduce también el número de aisladores, lo que supondrá un pequeño ahorro a la hora de la construcción del apoyo, sin embargo, la necesidad de tener el final del apoyo en forma de V y la obligación de eliminar los hilos de guarda de la línea de 400 kV para colocarlos sobre la de 800 kV encarecerá un poco la construcción.

Podemos ver la propuesta de diseño en la figura 4-3 en la cual se han añadido los hilos de guarda que hemos tenido que eliminar de la línea de 400 kV estando su nueva ubicación por encima de las fases de la línea de 800 kV.

4.1.2 Propuesta de diseño de apoyo BOLD para línea de 800 kV

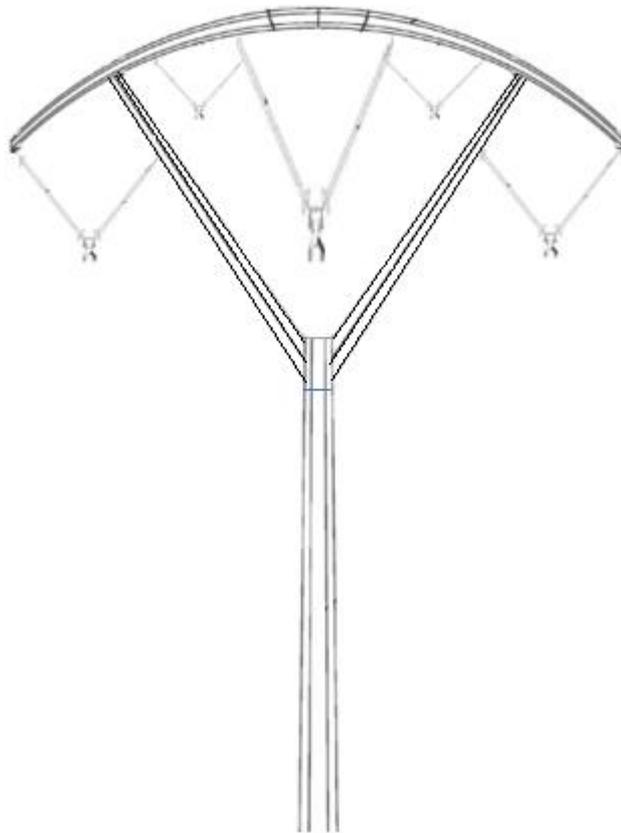


Figura 4-3. Propuesta de apoyo BOLD 800 kV

4.1.3 Configuración y número de conductores

Como anteriormente comentamos, la disposición de las fases será en un mismo plano horizontal, separadas entre sí 10 m, que es un valor típico en este tipo de líneas de alta tensión. Se ha tomado este valor porque está dentro del rango requerido por el fabricante del apoyo, casi en el límite superior, ya que nuestra línea es de 800 kV.

En alta tensión es normal encontrarnos 3 o más conductores por fase, en este caso y basándonos en la experiencia, hemos optado por una línea quintuplex (5 conductores por fase).

Los conductores elegidos son los mismos que para la línea de 400 kV, es decir, conductor tipo Cardinal tiene una **sección de 547,3 mm²**, un **diámetro de 30,42 mm** y está fabricado en Al-Ac.

En la figura 4-4 podemos ver gráficamente la configuración de nuestra línea.

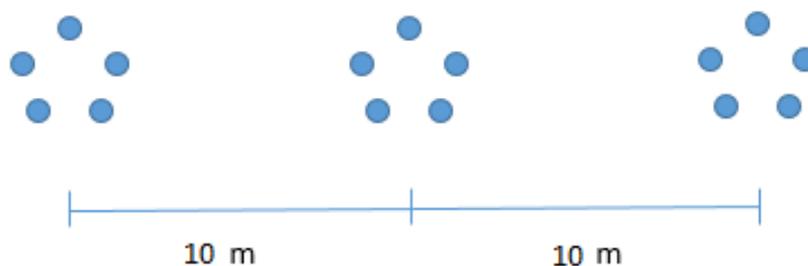


Figura 4-4. Configuración de conductores de la línea de 800 kV

La distancia entre un conductor y conductor es de 40 cm.

Una vez propuesto el diseño para el apoyo de la línea de 800 kV pasamos a estudiar la adaptación de los apoyos actuales de 400 kV.

En esta adaptación, como ya hemos dicho en anteriores ocasiones, sobrepondremos nuestro diseño de apoyo BOLD para 800 kV en el apoyo actual de 400 kV y estudiaremos las restricciones técnicas a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo dicha adaptación.

4.1.4 Adaptación del apoyo actual de 400 kV

Esta adaptación consistirá en llevar a cabo la compactación de la línea actual de 400 kV y la superposición del apoyo de la línea de 800 kV, para ello solo hará falta un conector en forma de tronco piramidal, que sustituye al mástil del apoyo BOLD original de fábrica debido a las grandes dimensiones de éste, cuyo diseño proponemos en este apartado al igual que se explicará los cambios en el apoyo de 400 kV para realizar la compactación y los refuerzos que serán necesarios para que el apoyo aguante el esfuerzo de añadir la nueva línea de 800 kV.

Compactación de la línea actual de 400 kV:

Para llevar a cabo la compactación de la línea de 400 kV se aprovechará la mayoría de la estructura del apoyo actual, eliminando tanto los brazos que sujetan las fases b y b' como los aisladores de las que cuelgan para dar paso a aisladores rígidos como los utilizamos en el apoyo BOLD y dejaremos los brazos de las fases c y a' ya que no suponen ningún impedimento para la compactación de la línea y se podrían utilizar para reforzar la estructura del apoyo.

Utilizando este tipo de aisladores, como hemos visto anteriormente, las distancias de las líneas compactas se pueden llegar a reducir en un 40 % respecto a las líneas no compactas. Podemos ver como queda la configuración de la línea de 400 kV compactada en la figura 4-5 y las distancias resultantes.

Diseño del conector:

Como se vió anteriormente, para unir el nuevo apoyo BOLD al apoyo actual hará falta una pieza que una a ambos apoyos, sustituyendo el mástil del apoyo BOLD diseñado en el apartado anterior ya que el mástil del diseño original es demasiado grande y no se respetaría la distancia entre ambos circuitos la cual sería demasiado grande con el diseño del mástil original. Esta pieza será un tronco de pirámide cuyas bases pueden ser decágonos o dodecágonos para conservar el diseño del mástil original y será realizado en el mismo material del apoyo de 800 kV (acero) dependiendo su longitud de la distancia que deba haber entre las dos líneas.

Podemos ver en la figura 4-6 una aproximación de lo que será el conector.

Refuerzo del apoyo de 400 kV:

Añadir una nueva línea de 800 kV sobre la línea de 400kV supone un aumento de los esfuerzos que debe aguantar el apoyo actual por lo que es necesario añadir refuerzos que permitan que la estructura soporte el peso de el nuevo conjunto de circuitos.

Los esfuerzos a tener en cuenta en este caso son los esfuerzos transversales ya que los esfuerzos longitudinales se anulan, por lo que se tratará de reforzar el apoyo en este sentido. Esto a priori no es fácil de calcular y diseñar manualmente por lo que es necesaria la utilización de un software de cálculo de apoyos o subcontratar una empresa especializada que se encargue de ello, aunque en este proyecto se calculará el peso de acero necesario para reforzar los apoyos, además, veremos más adelante que también habrá que reforzar la cimentación de nuestros apoyos.

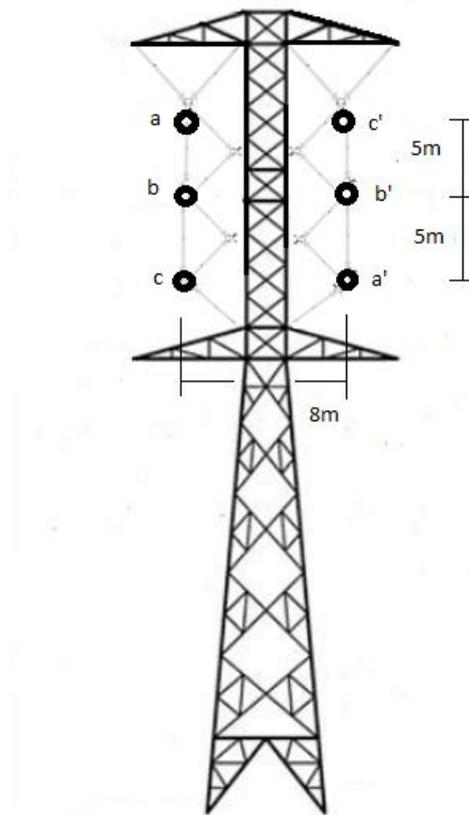


Figura 4-5. Compactación de la línea de 400 kV

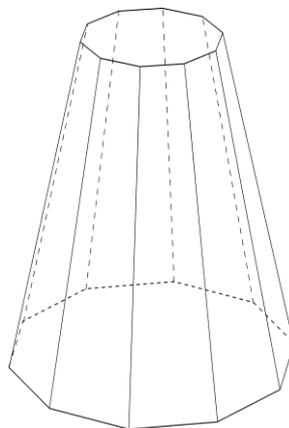


Figura 4-6. Propuesta de conector para unir el apoyo de 400 kV con el de 800 kV.

Una vez compactada la línea y diseñado el conector troncopiramidal se procede al diseño del conjunto de ambos apoyos. Para ello se ha sustituido el mástil del apoyo tipo BOLD por el conector propuesto anteriormente, con el cual quedan unidos ambos apoyos tal y como podemos ver en la siguiente figura.

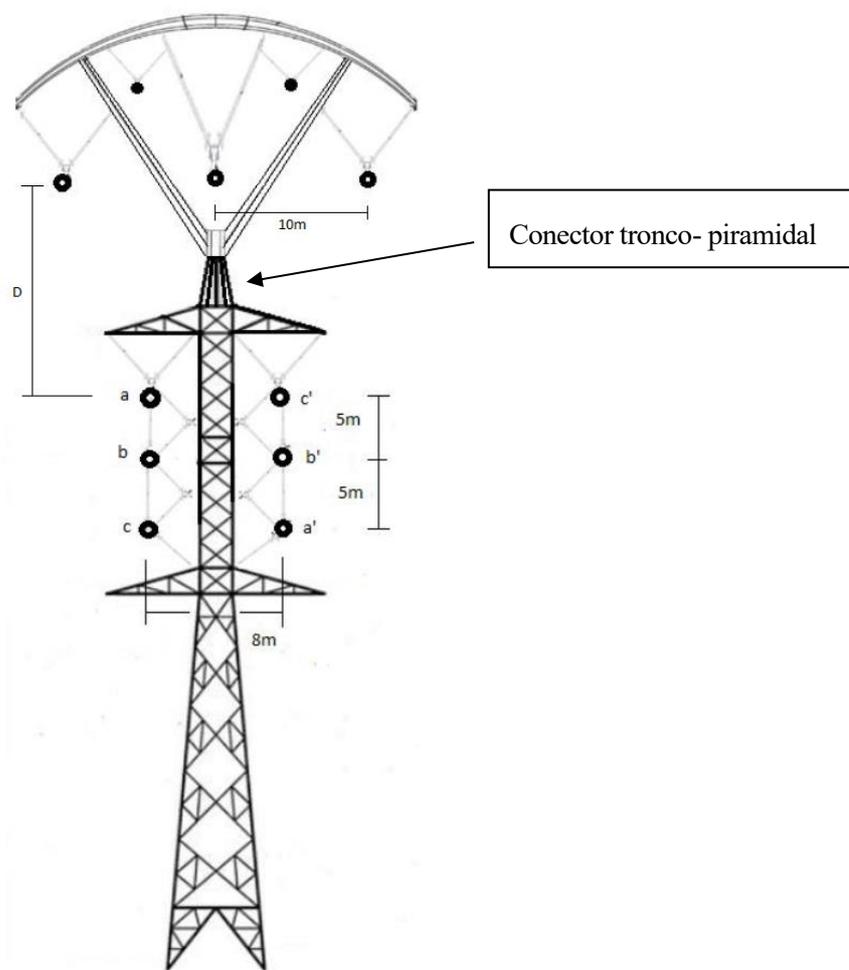


Figura 4-7. Diseño final del apoyo para ambas líneas (400 y 800 kV)

La distancia D se calcula utilizando el Real Decreto 223/2008, del 15 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09, en el cual se establece que la distancia mínima entre líneas, si alguna es de 400 kV o más, es de 7,5 m, por lo que en nuestro caso vamos a suponer $D=10$ m. [23]

El diseño del apoyo que podemos ver en la figura 4-7 cumple con el Real decreto anteriormente mencionado con respecto a distancias de seguridad entre fases, entre líneas y entre conductores de fase.

Una vez propuesto el diseño final pasamos a realizar el estudio eléctrico del mismo, para poder compararlo con el estudio eléctrico realizado con anterioridad del apoyo de 400 kV y ver si los valores calculados son valores coherentes y que cumplen con la normativa y con los límites de exposición de las personas.

4.2 Efecto corona

Una vez propuesto el diseño del nuevo apoyo vamos a calcular el efecto corona para el nuevo diseño compacto de la línea de 400 kV y para la línea de 800 kV. Como ya vimos anteriormente, el efecto corona se producirá cuando la tensión de la línea supere la tensión crítica disruptiva del aire, es decir, aquel nivel de tensión por encima del cual el aire se ioniza. [19]

La fórmula más utilizada para la determinación de la tensión crítica es la fórmula de Peek (3-1).

$$V_c = 21,2 \cdot \delta \cdot r \cdot \text{Ln} \frac{DMG}{RMG} \cdot n \cdot K_r \cdot K_m$$

Donde:

- V_c es el valor de tensión crítica disruptiva en kV.
- δ es el factor de densidad del aire.
- r es el radio del conductor en centímetros.
- DMG es la distancia media geométrica entre fases.
- RMG es el radio medio geométrico.
- n es el número de conductores por fase.
- k_r es el coeficiente de rugosidad del conductor empleado, cuyo valor suele ser:
 - 1 para conductores nuevos.
 - 0,98 - 0,93 para conductores viejos (con protuberancias).
 - 0,87 - 0,83 para cables formados por hilos.
- k_m es el coeficiente medioambiental, cuyo valor suele ser:
 - 1 cuando el aire es seco.
 - 0,8 para aire húmedo o contaminado.

Para aquellos casos en los que se produce el efecto corona, la pérdida de potencia se calcula según la ecuación (3-2):

$$P_c = \frac{244}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{RMG}{DMG}} \cdot (V_s - V_c)^2 \cdot 10^{-5}$$

Donde:

- P_c es la pérdida de potencia en kW/km.
- δ es el factor de densidad del aire.
- f es la frecuencia de la línea en Hz
- DMG es la distancia media geométrica entre fases.
- RMG es el radio medio geométrico.
- V_s es el valor de la tensión fase-neutro (o tensión simple) en kV.
- V_c es el valor de tensión crítica disruptiva en kV.

Factor de densidad del aire:

$$\delta = \frac{273 + 20}{273 + T} \cdot \frac{P}{760}$$

Donde:

- T es la temperatura del aire en grados Celsius.
- P es la presión del aire en milímetros de mercurio.

4.2.1 Cálculo de la tensión crítica disruptiva

Primero se va a calcular la tensión crítica disruptiva para la configuración de la línea de 800 kV y si ésta es menor a 800 kV, se producirá efecto corona en la misma. Para seguir con las mismas hipótesis que en los apartados anteriores supondremos una cota de terreno de 400 m sobre el nivel del mar donde $P=725$ mmHg y $T=21^\circ$ C. [17]

Por lo que sustituyendo estos valores se obtiene un factor de densidad del aire:

$$\delta = \frac{273+20}{273+21} \cdot \frac{725}{760} = 0.9507.$$

El radio del conductor es la mitad del diámetro por lo que para un conductor tipo Cardinal:

$$r = \frac{3,042}{2} = 1,521 \text{ cm. (conductor cardinal)}$$

La distancia geométrica media se obtiene a partir de las distancias entre fases, las cuales son $D_{ab}=10\text{m}$, $D_{bc}=10$, y $D_{ac}=20\text{m}$ respectivamente para la línea de 800 kV:

$$\text{DGM} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ac}}$$

Por lo tanto, la $\text{DGM} = \sqrt[3]{10 \cdot 10 \cdot 20} = 12,59 \text{ m}$.

De forma general se puede determinar el radio medio geométrico de n conductores por fase mediante la siguiente ecuación siempre y cuando los conductores sean de radios iguales y estén dispuestos simétricamente sobre un círculo de radio R' :

$$\text{RGM} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot (R')^{n-1}}$$

En nuestro caso:

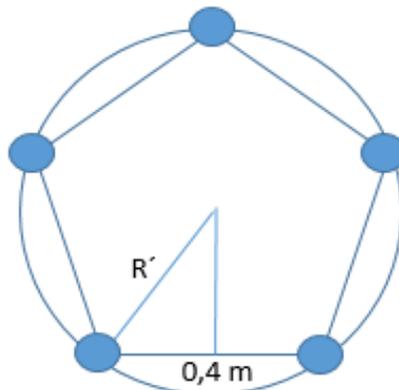


Figura 4-8. Distancia entre conductores de una fase

La relación entre el radio y el lado de un pentágono regular es $1/1,176$ por lo que el radio del pentágono será $R' = 0,4 / 1,176 = 0,34$ m.

Por lo tanto

$$RGM = \sqrt[5]{5 \cdot 0,01521 \cdot (0,34)^4} = 0,252 \text{ m};$$

$Kr = 0,98$. Suponemos que los cables llevan ya un tiempo instalados.

$Km = 1$.

Con todo lo anterior calculamos la tensión crítica disruptiva:

$$V_c = 21,2 \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{DMG}{RGM} \cdot n \cdot Kr \cdot Km$$

$$V_c = 21,2 \cdot 0,9507 \cdot 1,521 \cdot \ln \frac{12,59}{0,252} \cdot 5 \cdot 0,98 \cdot 1 = \boxed{587,5 \text{ kV}}$$

Como nuestra tensión de línea es de $800 \text{ kV} > 587,5 \text{ kV}$ se producirán pérdidas por efecto corona en la línea de 800 kV las cuales veremos en el siguiente apartado junto con las pérdidas por efecto corona de la línea de 400 kV compactada.

Para la línea de 400 kV procedemos de la misma forma que para la línea de 800 kV teniendo en cuenta la nueva configuración en la que las distancias entre fases las podemos ver en la siguiente figura:

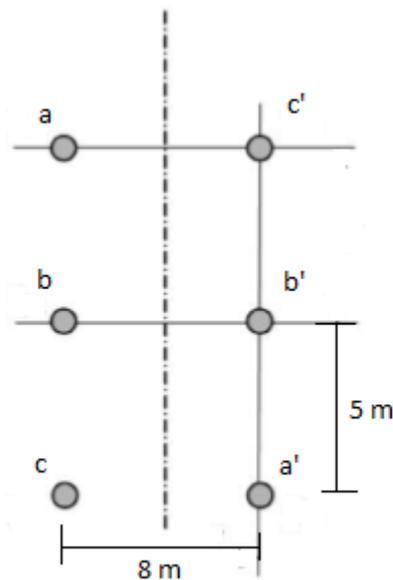


Figura 4-9. Distancias entre fases línea de 400 kV compactada.

Consideramos: $D_{ac} = 5 + 5 = 10$ m, $D_{aa'} = D_{cc'} = \sqrt{8^2 + 10^2} = 12,8$ m y $D_{ab'} = \sqrt{8^2 + 5^2} = 9,43$ m.

Con las distancias entre fases ya calculadas se procede al cálculo de la distancia geométrica media y el radio geométrico medio, necesarios para el cálculo de la tensión crítica disruptiva:

$$D_a = \frac{\sqrt{D_{ab} \cdot D_{ac} \cdot D_{ac'} \cdot D_{ab'}}}{D_{aa'}} = \frac{\sqrt{5 \cdot 10 \cdot 8 \cdot 9,43}}{12,8} = 4,798 \text{ m.}$$

$$D_b = \frac{\sqrt{D_{ba} \cdot D_{bc} \cdot D_{ba'} \cdot D_{bc'}}}{D_{bb'}} = \frac{\sqrt{5 \cdot 5 \cdot 9,43 \cdot 9,43}}{8} = 5,89 \text{ m.}$$

$$D_c = \frac{\sqrt{D_{cb} \cdot D_{ca} \cdot D_{cb'} \cdot D_{ca'}}}{D_{cc'}} = \frac{\sqrt{5 \cdot 10 \cdot 9,43 \cdot 8}}{12,8} = 4,798 \text{ m.}$$

$$DGM = \sqrt[3]{4,798 \cdot 5,89 \cdot 4,798} = 5,137 \text{ m.}$$

$$RGM = \sqrt{r \cdot d} = \sqrt{0,01521 \cdot 0,4} = 0,078 \text{ m (Línea dúplex).}$$

$$n = 2 \text{ (Línea dúplex).}$$

$K_r = 0,98$. Suponemos que los cables llevan ya un tiempo instalados.

$$K_m = 1.$$

Con todo lo anterior calculamos la tensión crítica disruptiva:

$$V_c = 21,2 \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{DMG}{RMG} \cdot n \cdot K_r \cdot K_m$$

$$V_c = 21,2 \cdot 0,9507 \cdot 1,521 \cdot \ln \frac{5,137}{0,078} \cdot 2 \cdot 0,98 \cdot 1 = 251,6 \text{ kV.}$$

281,702 kV es el límite a partir del cual aparecerá el efecto corona en nuestra línea compacta de 400 kV, por lo tanto, como la tensión de la línea es de 400 kV > 251,6 kV se producirán pérdidas por efecto corona, las cuales calculamos a continuación.

4.2.2 Cálculo de las pérdidas por el efecto corona

Para el nuevo apoyo existirán pérdidas de potencia producidas por efecto corona tanto en la línea de 400 kV como en la de 800 kV debido a que la tensión crítica disruptiva en ambas líneas es mayor que las respectivas tensiones nominales por lo que estas pérdidas serán las calculadas a continuación:

$$P_c = \frac{244}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{RMG}{DMG}} \cdot (V_s - V_c)^2 \cdot 10^{-5};$$

Pérdidas en la línea de 800 kV:

$$P_c = \frac{244}{0,9507} \cdot (50 + 25) \cdot \sqrt{\frac{0,252}{12,59}} \cdot \left(\frac{800}{\sqrt{3}} - \frac{587,5}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 10^{-5} = 409,91 \frac{\text{kW}}{\text{Km fase}}$$

Por cada kilómetro de la línea de 800 kV, cada fase tiene unas pérdidas de 409,91 kW, que es un valor aceptable para el nivel de tensión dado.

Pérdidas en la línea de 400 kV:

$$P_c = \frac{244}{0,9507} \cdot (50 + 25) \cdot \sqrt{\frac{0,078}{5,137}} \cdot \left(\frac{400}{\sqrt{3}} - \frac{251,6}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 10^{-5} = 174,11 \frac{\text{kW}}{\text{Km fase}}$$

Por cada kilómetro de la línea de 400 kV compactada, cada fase tiene unas pérdidas de 174,11 kW, que es un valor aceptable para el nivel de tensión dado, aunque en comparación con la línea no compacta, las pérdidas por efecto corona aumentan ligeramente, lo que es normal debido a la reducción de la distancia geométrica media en la línea compacta.

Una vez calculadas las pérdidas por el efecto corona vamos a calcular el nivel de ruido audible que se produce en ambas líneas debido a este efecto.

4.3 Ruido audible

Para evaluar el ruido audible de la línea de 800 kV y de la línea de 400 kV se procederá como en el apartado 3.3, para ello se calcula primero el potencial de ruido en cada línea de la siguiente manera:

$$NP_{ai} = -164,6 + 120 \text{ Log } E_i + 55 \text{ Log } R_{ei} \text{ (dB);}$$

Donde:

E_i es la intensidad de campo eléctrico máxima en Kv/cm;

R_{ei} es el radio equivalente de acuerdo con:

$$R_{ei} = r \quad \text{si } n \leq 2$$

$$R_{ei} = 0,58 n^{0,48} r \quad \text{si } n > 2$$

siendo n es el número de subconductores y r es el radio del subconductor en mm.

Una vez calculado el potencial de ruido de cada conductor podemos calcular el nivel de ruido total en cualquier punto cercano a la línea mediante la siguiente fórmula:

$$NP = 10 \text{ Log} \left\{ \sum_{i=1}^n \exp[0,23(NP_{ai} - 11,4 \text{ Log } D_{li} - 5,8)] \right\} ;$$

Donde D_{li} es la distancia en metros entre el conductor i y el punto de medida en el que se contabiliza el nivel de ruido audible total aportado por ambas líneas.

4.3.1 Ejemplo de cálculo

A continuación, realizaremos un ejemplo de cálculo del nivel de ruido audible en el mismo punto de medida que en el ejemplo del apoyo de 400 kV de REE, para así poder comparar los valores de ruido antes y después de la modificación del apoyo y la inclusión de la línea de 800 kV.

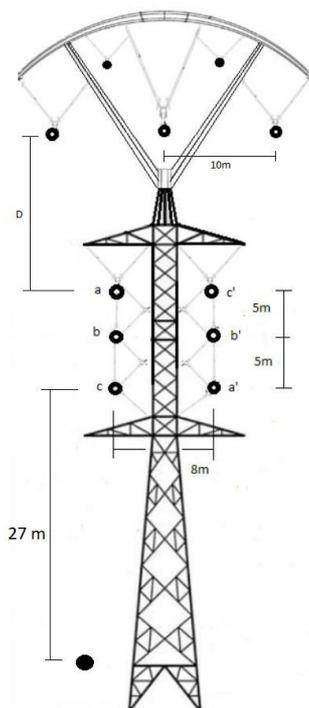


Figura 4-10. Punto de medida para el cálculo del ruido audible

A continuación, procedemos a calcular el ruido audible producido por ambas líneas en el punto de medida que se puede apreciar en la figura 4-9, el cual se encuentra a una distancia del primer conductor de 27 m aprox.

Para calcular la contribución de la nueva línea de 800 kV al nivel total de ruido tenemos que obtener las distancias desde el punto de medida hasta las diferentes fases, por lo que, utilizando el teorema de Pitágoras, las dimensiones del apoyo y la configuración de las fases obtenemos las siguientes medidas (Ver figura 4-9):

Aproximadamente las distancias entre el punto de medida y las fases a, b, c de la línea de 800 kV son:

$$D_a = 47 \text{ m};$$

$$D_b = 48.05 \text{ m};$$

$$D_c = 51.08 \text{ m};$$

Por otro lado, como $n = 5 > 2$, $Re_i = 0,58 \cdot 5^{0,48} \cdot 15,21 = 19,1 \text{ mm}$, además, para una línea de más de 4 conductores por fase y más de 500 kV podemos suponer que la intensidad de campo eléctrico máxima es 30 kV/cm.

Por lo que el potencial de ruido de cada conductor será:

$$NP_{ai} = -164,6 + 120 \text{ Log } 30 + 55 \text{ Log } 19,1 = 83,11 \text{ dB};$$

Cada fase de la línea de 800 kV puede llegar a producir en su superficie un nivel de ruido de 83,11 dB cuando la intensidad de campo eléctrico es máxima e igual a 30 kV/cm.

Considerando todas las fases, el nivel total de ruido audible en el punto de medida producido por la línea de 800 kV es:

$$NP = 10 \text{ Log} \left\{ \sum_{i=1}^n \exp[0,23(NP_{ai} - 11,4 \text{ Log } D_{li} - 5,8)] \right\};$$

$$NP = 10 \text{ Log} \left\{ \exp[0,23(83,11 - 11,4 \text{ Log } 47 - 5,8)] + \right.$$

$$\exp[0,23(83,11 - 11,4\text{Log}48,05 - 5,8)] + \exp[0,23(83,11 - 11,4\text{Log}51,08 - 5,8)] = 62,78 \text{ dB}$$

De la misma forma se procede para calcular la contribución de la línea de 400 kV compacta al nivel total de ruido por lo que de la figura 4-9 y utilizando pitágoras se obtienen las siguientes distancias desde el punto de medida a las diferentes fases de la línea de 400 kV.

Aproximadamente las distancias entre el punto de medida y las fases a, b, c, a', b' y c' de la línea de 800 kV son:

$$D_a = 37 \text{ m};$$

$$D_b = 32 \text{ m};$$

$$D_c = 27 \text{ m};$$

$$D_{a'} = 28,16 \text{ m};$$

$$D_{b'} = 32,98 \text{ m};$$

$$D_{c'} = 37,85 \text{ m};$$

Con estas medidas, tomando $R_{ei} = r = 15,21 \text{ mm}$ y sabiendo que la intensidad de campo eléctrico superficial máxima de un conductor dúplex a 400 kV se da en su superficie es aproximadamente 14 kV/cm podemos calcular el potencial de ruido de cada fase:

$$NP_{ai} = -164,6 + 120 \text{ Log } E_i + 55 \text{ Log } R_{ei}$$

$$NP_{ai} = -164,6 + 120 \text{ Log } 14 + 55 \text{ Log } 15,21 = 37,95 \text{ dB};$$

Como hemos visto en la definición del potencial de ruido audible, cada fase produce en su superficie $37,95 \text{ dB}$ para una E_i máxima $= 14 \text{ kV/cm}$.

El nivel total de ruido audible en el punto de medida producido por la línea de 400 kV se consigue con la superposición del ruido de cada fase en dicho punto:

$$NP = 10 \text{ Log} \left\{ \sum_{i=1}^n \exp[0,23(NP_{ai} - 11,4 \text{ Log } D_{li} - 5,8)] \right\}$$

$$NP = 10 \text{ Log} \left\{ \begin{array}{l} \exp[0,23(37,95 - 11,4 \text{ Log } 37 - 5,8)] + \\ \exp[0,23(37,95 - 11,4 \text{ Log } 32 - 5,8)] + \\ \exp[0,23(37,95 - 11,4 \text{ Log } 27 - 5,8)] + \\ \exp[0,23(37,95 - 11,4 \text{ Log } 28,16 - 5,8)] + \\ \exp[0,23(37,95 - 11,4 \text{ Log } 32,98 - 5,8)] + \\ \exp[0,23(37,95 - 11,4 \text{ Log } 37,85 - 5,8)] \end{array} \right\} = 22,76 \text{ dB};$$

La contribución total de ambas líneas en el punto de medida será la suma de cada una de las contribuciones por separado:

$$NP_{\text{tot}} = 22,76 + 62,78 = 85,54 \text{ dB}$$

Podemos ver que el nivel de ruido audible es mucho mayor que para la línea de 400 kV como era de esperar.

Por debajo de 500 kV el nivel de ruido audible pasa desapercibido, pero para las líneas de muy alta tensión empieza a ser importante y hay que tenerlo en cuenta a la hora de diseñar una línea ya que algunos de los límites de exposición recomendados por la organización mundial de la salud son los siguientes: [24]

Tipos de recintos	Rango de niveles de exposición al ruido que pueden aceptarse
Fábricas para ingeniería pesada	55-75
Fábricas para ingeniería ligera	45-65
Cocinas industriales	40-50
Recintos deportivos y piscinas	35-50
Grandes almacenes y tiendas	35-45
Restaurantes, bares, cafeterías y cafeterías privadas	35-45
Oficinas mecanizadas	40-50
Oficinas generales	35-45
Despachos, bibliotecas, salas de Justicia y aulas	30-35
Viviendas, dormitorios	25-35
Salas de hospitales y quirófanos	25-35
Cines	30-35
Teatros, salas de juntas, iglesias	25-30
Salas de conciertos y teatros de ópera	20-25
Estudios de registro y reproducción sonora	15-20

Figura 4-11. Límites de ruido audible OMS (dB)

Por lo que si nuestra línea pasara cerca de algunos de estos lugares habría que realizar un estudio de cómo reducir el nivel de ruido en dichos entornos.

Pasamos ahora a estudiar el ruido electromagnético de la nueva configuración.

4.4 Ruido electromagnético

Como ya hicimos en el apartado 3.4, vamos a calcular el ruido electromagnético del nuevo apoyo para compararlo con el producido por la línea de 400 kV sin modificar y ver si este valor es admisible atendiendo a los límites correspondientes.

4.4.1 Cálculo del TVI

Como vimos en el apartado 3, para calcular el nivel de TVI de nuestra línea de transmisión utilizaremos la ecuación (3-7) obtenida experimentalmente [16]:

$$TVI = RI_0 - 20 \log(f) - 20 \log\left(\frac{X}{X_0}\right) + C \quad \text{dB /fase} \quad (3-7)$$

Donde:

RI₀ es el radio de interferencia de referencia a la distancia X₀.

f es la frecuencia de medida en MHz.

X es la distancia lateral desde el punto de medida al conductor.

X₀ es la distancia de referencia de medida del RI₀.

C es un factor de corrección dependiente del sistema de medida del TVI.

4.4.2 Ejemplo de cálculo

Primero se calculará la contribución de la línea de 800 kV y para ello se utiliza el mismo método con la misma referencia y el mismo punto de medida que en el apartado 3.4 en el que el método EPRI nos da como referencia

una distancia lateral al conductor de $X_o=15$ m en la cual el radio de interferencia es, para un número de conductores por fase $n > 3$ y una intensidad de campo $g > 17$ kv/cm, $R_{Io} \approx 70$ dB.

Nuestro punto de medida estará a una distancia lateral de 20 m aprox. de la fase a, a 30 m de la fase b y a 40 m de la fase c de la línea de 800 kV, además, la frecuencia de medición del método EPRI es de 75 MHz en la que el factor $C=3,2$ dB.

Con todos estos datos pasamos a calcular el TVI de cada fase de la línea de 800 kV en el punto de medida:

$$TVI_a = 70 - 20 \log(75) - 20 \log\left(\frac{20}{15}\right) + 3,2 = 33,2 \text{ dB}$$

$$TVI_b = 70 - 20 \log(75) - 20 \log\left(\frac{30}{15}\right) + 3,2 = 29,67 \text{ dB}$$

$$TVI_c = 70 - 20 \log(75) - 20 \log\left(\frac{40}{15}\right) + 3,2 = 27,18 \text{ dB}$$

Igualmente, para la nueva configuración compacta de la línea de 400 kV, el método EPRI nos da como referencia una distancia lateral al conductor de $X_o=15$ m en la cual, para $n < 3$ y $g < 17$ kv/cm, el radio de interferencia es $R_{Io} \approx 65$ dB.

En este caso nuestro punto de medida estará a una distancia lateral de 20 m aprox. de los conductores del primer circuito y a unos 28 m del segundo circuito, la frecuencia de medición dada por el método EPRI es de 75 MHz y el factor $C=3,2$ dB.

Con todos estos datos pasamos a calcular el TVI de ambos circuitos en el punto de medida:

Para el primer circuito:

$$TVI = R_{Io} - 20 \log(f) - 20 \log\left(\frac{X}{X_o}\right) + C ;$$

$$TVI = 65 - 20 \log(75) - 20 \log\left(\frac{20}{15}\right) + 3,2 = 28,201 \text{ dB/fase}$$

Para el segundo circuito la distancia lateral al punto de medida es $X \approx 24$ m.

$$TVI = R_{Io} - 20 \log(f) - 20 \log\left(\frac{X}{X_o}\right) + C =$$

$$TVI = 65 - 20 \log(75) - 20 \log\left(\frac{28}{15}\right) + 3,2 = 25,3 \text{ dB/fase}$$

La contribución total en el punto de medida es la suma de las contribuciones de cada fase por lo que el ruido electromagnético total será:

$$TVI = 33,2 + 29,67 + 27,18 + 3 \cdot (28,201 + 25,3) = \boxed{250,55 \text{ dB}}$$

Podemos comprobar que el nivel de ruido electromagnético producido por la nueva configuración del apoyo ha aumentado respecto al ruido producido por la línea de 400 kV del apoyo inicial, aunque éste era de esperar debido a la superposición de la línea de 800 kV.

4.5 Campo magnético

Como ya hicimos con la línea de 400 kV antes de la modificación del apoyo y de la compactación de ésta, se va a calcular el campo magnético producido por la línea de 400 kV una vez compactada y el producido por la nueva línea de 800 kV, para ello usamos las mismas ecuaciones que en el apartado 3.5 dadas por el método de simulación de corrientes en analogía con el método de simulación de cargas para el campo eléctrico. En el mismo, la fuente del campo es directamente la corriente del conductor, las líneas de campo atraviesan la superficie del suelo y el plano de referencia se encuentra bastante profundidad.

Las componentes de campo magnético para cada conductor "i" están representadas por las siguientes expresiones que ya se vieron en el apartado 3.5:

$$B_{xi} = \frac{\mu \cdot I_i}{2\pi} \cdot \frac{-(y-y_i)}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (T) \quad (3-8)$$

$$B_{yi} = \frac{\mu \cdot I_i}{2\pi} \cdot \frac{(x-x_i)}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (T)$$

Donde:

El conductor "i", está ubicado en la posición (x_i, y_i) respecto de la referencia, la cual tomaremos en el conductor C de la línea de 400 kV.

(x, y) es la posición del punto en el que realizaremos la medida respecto a la referencia.

μ es la permeabilidad del medio (Aire).

I_i es la corriente que pasa por el conductor i.

En la siguiente figura podemos observar las posiciones de cada fase en el nuevo apoyo y la posición de la referencia, la cual representa el área justo debajo de la línea cercana al suelo para así poder comparar, como ya se hizo con la línea de 400 kV, con el límite de exposición a campos magnéticos sobre las personas establecido por el ICNIRP, una de las principales agencias internacionales vinculadas a la Organización Mundial de la Salud (OMS).

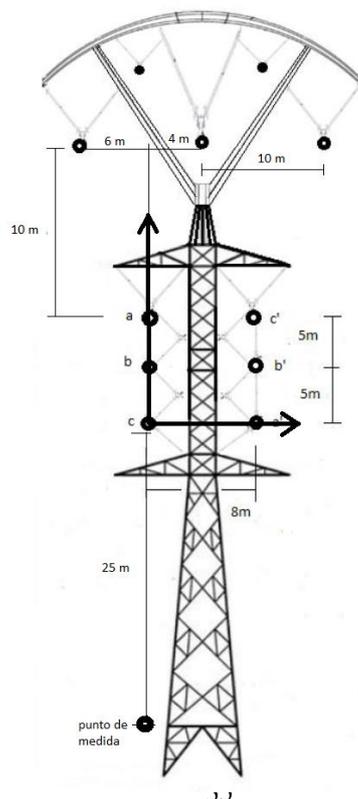


Figura 4-12. Configuración de fases en el nuevo apoyo

4.5.1 Ejemplo de cálculo

Para calcular el campo magnético producido por ambas líneas en el punto de medida se calcularán por separado las componentes de los campos en dicho punto para luego proceder a la suma de dichas componentes y calcular el módulo del campo, el cual se comparará con el estudiado anteriormente para la línea de 400 kV antes de la modificación del apoyo y se verá si cumple con los límites establecidos por el ICNIRP.

En este caso los valores para realizar el cálculo son los siguientes:

$$\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2;$$

$$I = 2000 \text{ A (línea de 800 kV);}$$

$$I = 1000 \text{ A (línea de 400 kV);}$$

$(x, y) = (0, -25)$ ya que la línea de 400 kV está compactada por lo que desde la referencia (fase c) hasta el punto de medida hay 5 metros aprox. más que en la línea no compacta.

(x_i, y_i) de cada fase (Ver figura 4-11)

Sustituyendo estos valores en las fórmulas anteriores obtenemos los siguientes valores de las componentes del campo magnético producido por cada línea en el punto de medida.

Para la línea de 400 kV:

Fase a:

$$B_{xa} = 5,71 \mu\text{T};$$

$$B_{ya} = 0;$$

Fase b:

$$B_{xb} = 6,66 \mu\text{T};$$

$$B_{yb} = 0;$$

Fase c:

$$B_{xc} = 8 \mu\text{T};$$

$$B_{yc} = 0;$$

Fase a':

$$B_{xa'} = 7,25 \mu\text{T};$$

$$B_{ya'} = -2,32 \mu\text{T};$$

Fase b':

$$B_{xb'} = 6,22 \mu\text{T};$$

$$B_{yb'} = -1,66 \mu\text{T};$$

Fase c':

$$B_{xc'} = 5,43 \mu\text{T};$$

$$B_{yc'} = -1,24 \mu\text{T};$$

Una vez calculada las contribuciones de las fases de la línea de 400 kV compactada se procede de la misma forma para la línea de 800 kV.

Para la línea de 800 kV:

Fase a:

$$B_{xa} = 6,01 \mu\text{T};$$

$$B_{ya} = 1,16 \mu\text{T};$$

Fase b:

$$B_{xb} = 8,82 \mu\text{T};$$

$$B_{yb} = -0,78 \mu\text{T};$$

Fase c:

$$B_{xc} = 8 \mu\text{T};$$

$$B_{yc} = -2,52 \mu\text{T};$$

Para calcular el valor total del campo magnético en el punto de medida sumamos las componentes producidas por cada fase y posteriormente calculamos su módulo:

$$B_{x\text{total}} = 62,1 \mu\text{T};$$

$$B_{y\text{total}} = -9,68 \mu\text{T};$$

Siendo el módulo del campo magnético en el punto de medida:

$$B_{\text{total}} = \sqrt{B_{x\text{total}}^2 + B_{y\text{total}}^2} = \boxed{62,85 \mu\text{T}}$$

Con este resultado se puede afirmar, desde el punto de vista del campo magnético, que es viable la modificación del apoyo y la inclusión de la línea de 800 kV ya que el valor del campo magnético total no supera el límite de exposición establecido por el ICNIRP para público en general el cual tiene un máximo permitido de 83 μT .

4.6 Reactancia de la línea

Otros de los parámetros eléctricos importantes que definen a una línea de transmisión son las reactancias inductiva y capacitiva de la línea, por eso se van a calcular para la línea de 400 kV compactada y para la línea de 800 kV, con el fin de comprobar que los valores de éstas se encuentran en un rango normal y por lo tanto que se pueda acometer la modificación del apoyo. [9], [10]

Empezamos por el cálculo de las reactancias inductiva y capacitiva para la línea de 400 kV empleando las ecuaciones que ya se vieron en apartados anteriores.

Reactancias de la línea de 400 kV:

$$X_l = w \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (3-9)$$

Donde:

f es la frecuencia de la red.

L es la inductancia de la línea.

La inductancia para una línea de doble circuito como la nuestra se define como

$$L = \left(\frac{1}{2 \cdot n} + 4,6 \log \frac{DMG}{RMG} \right) \cdot 10^{-4} \frac{H}{\text{Km fase}} \quad (3-10)$$

Donde:

n es el número de conductores por fase;

DMG es la distancia media geométrica entre conductores;

RMG es el radio medio geométrico;

En nuestro caso, $n=2$ porque tenemos dos conductores por fase, $DMG=5,137$ m y $RMG=0,078$ m como hemos visto en apartados anteriores, por lo que la inductancia es

$$L = \left(\frac{1}{4} + 4,6 \log \frac{5,137}{0,078} \right) \cdot 10^{-4} = 8,62 \cdot 10^{-4} \frac{H}{\text{Km fase}}$$

Y la reactancia inductiva es

$$Xl = w \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 8,62 \cdot 10^{-4} = \boxed{0,27 \frac{\Omega}{\text{km fase}}}$$

Por cada kilómetro y fase de la línea de 400 kV encontramos $0,27 \Omega$ de reactancia inductiva.

Pasamos ahora al cálculo de la reactancia capacitiva la cual se define como:

$$Xc = \frac{1}{w \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (3-11)$$

Donde:

C es la capacitancia de la línea;

f es la frecuencia de la red;

La capacitancia para una línea de transmisión se define como:

$$C = \frac{0,0243}{\text{Ln} \frac{DMG}{RMG}} \cdot 10^{-6} \frac{F}{\text{Km fase}} \quad (3-12)$$

En nuestro caso:

$$C = \frac{0,0243}{\text{Ln} \frac{5,137}{0,078}} \cdot 10^{-6} = 5,8 \cdot 10^{-9} \frac{F}{\text{Km fase}}$$

Por lo tanto, la reactancia capacitiva será:

$$Xc = \frac{1}{w \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5,8 \cdot 10^{-9}} = \boxed{548,81 \frac{k\Omega}{\text{km fase}}}$$

Estos valores, al igual que pasaba en la línea de 400 sin modificar, son valores normales para el nivel de tensión de 400 kV, por lo que la compactación de la línea no afecta a grandes rasgos al valor de la reactancia.

Para la línea de 800 kV:

Se procede de la misma manera que anteriormente utilizando las ecuaciones (3-9), (3-10), (3-11) y (3-12) donde en este caso $n = 5$, $DGM = 12,59$ y $RGM = 0,252$ obteniendo los siguientes resultados:

La reactancia inductiva es:

$$Xl = 0,248 \frac{\Omega}{\text{km fase}}$$

Como podemos ver, la reactancia inductiva en la línea de 800 kV es menor que en la de 400 kV debido al mayor número de conductores por fase.

Pasamos ahora al cálculo de la reactancia capacitiva:

$$Xc = 512,3 \frac{\text{k}\Omega}{\text{km fase}}$$

Al igual que la reactancia inductiva, la capacitiva también es menor en la línea de 800 kV que en la de 400 kV por lo tanto tenemos en ambas líneas valores de reactancias dentro del rango normal de valores por lo que no será problema a la hora de llevar a cabo el proyecto.

Para concluir el estudio eléctrico de nuestra nueva línea vamos a calcular las tensiones inducidas entre las líneas de 800 kV y la de 400 kV.

4.7 Tensiones inducidas entre líneas

En este apartado vamos a calcular las tensiones que cada línea induce en la otra debido al campo magnético que la corriente crea al pasar por un conductor. [21]

Como ya sabemos, los conductores de cualquier línea actúan como inductancias, las cuales crean un campo magnético cuando la corriente pasa por ella, por lo tanto, al haber cables cercanos entre sí en cualquier línea de transmisión, el campo magnético producido por un conductor creará una tensión inducida en los conductores cercanos. A este efecto se le llama acoplamiento magnético.

Para calcular el voltaje inducido primero tenemos que calcular las inductancias mutuas que, para conductores paralelos, las obtenemos de la ecuación (4-1):

$$M_{ik} = \frac{\mu_0 \cdot L}{2 \cdot \pi} \cdot \text{Ln} \left(\frac{2 \cdot L}{d_{ik}} - 1 \right) \text{ H} \quad (4-1)$$

Donde d_{ik} es la distancia desde el conductor i al conductor k , L es la longitud de la línea en metros y $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

Una vez obtenidas las inductancias mutuas calculamos los voltajes inducidos en cada fase con la ecuación (4-2):

$$|U_f| = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot [\sum(I_F \cdot M_{Ff})] \quad (4-2)$$

Donde el subíndice F hace referencia a las fases inductoras y el subíndice f a las fases inducidas.

4.7.1 Cálculo de las tensiones inducidas por la línea de 400 kV en el circuito de 800 kV

Primero calculamos las inductancias mutuas, por lo que nos hacen falta saber las distancias d_{ik} .

(Ver figura 4-12).

Para realizar el cálculo tomaremos como longitud de la línea $L=100$ km.

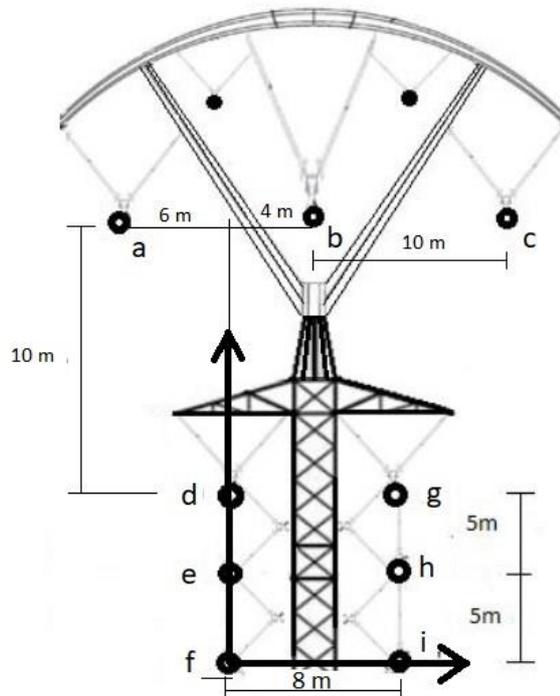


Figura 4-13. Distancias entre fases de ambas líneas

Utilizando el teorema de Pitágoras y las distancias entre fases obtenemos todas las distancias $d_{ik}=d_{ki}$.

$$d_{ad} = d_{cg} = 11,66 \text{ m};$$

$$d_{ae} = d_{ch} = 16,15 \text{ m};$$

$$d_{af} = d_{ci} = 20,88 \text{ m};$$

$$d_{ag} = d_{cd} = 17,2 \text{ m};$$

$$d_{ah} = d_{ce} = 20,51 \text{ m};$$

$$d_{ai} = d_{cf} = 24,41 \text{ m};$$

$$d_{bd} = d_{bg} = 10,77 \text{ m};$$

$$d_{be} = d_{bh} = 15,52 \text{ m ;}$$

$$d_{bf} = d_{bi} = 20,39 \text{ m ;}$$

Una vez obtenidas las distancias entre las distintas fases se procede a calcular las inductancias mutuas para la longitud total de la línea:

$$M_{ad} = M_{cg} = 0,195 \text{ H;}$$

$$M_{ae} = M_{ch} = 0,188 \text{ H;}$$

$$M_{af} = M_{ci} = 0,183 \text{ H;}$$

$$M_{ag} = M_{cd} = 0,187 \text{ H;}$$

$$M_{ah} = M_{ce} = 0,183 \text{ H;}$$

$$M_{ai} = M_{cf} = 0,18 \text{ H;}$$

$$M_{bd} = M_{bg} = 0,197 \text{ H;}$$

$$M_{be} = M_{bh} = 0,189 \text{ H;}$$

$$M_{bf} = M_{bi} = 0,184 \text{ H;}$$

A continuación, calculamos el voltaje inducido en cada una de las fases de la línea de 800 kV por la línea de 400 kV:

$$|U_a| = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot [\sum (I_F \cdot M_{Fa})] =$$

$$|U_a| = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_F \cdot [\sum M_{Fa}] =$$

$$|U_a| = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_F \cdot (M_{da} + M_{ea} + M_{fa} + M_{ga} + M_{ha} + M_{ia}) =$$

$$|U_a| = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1000 \cdot (0,195 + 0,188 + 0,183 + 0,187 + 0,183 + 0,18) =$$

$$|U_a| = \boxed{350,6 \text{ kV}}$$

Por simetría:

$$|U_c| = |U_a| = \boxed{350,6 \text{ kV}}$$

$$U_b = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_F \cdot (M_{db} + M_{eb} + M_{fb} + M_{gb} + M_{hb} + M_{ib}) =$$

$$U_b = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot (0,197 + 0,189 + 0,184) =$$

$$|U_b| = \boxed{358,56 \text{ kV}}$$

Como se puede observar, la línea de 400 kV induce en cada una de las fases de la línea de 800 kV una tensión de aproximadamente 350 kV por cada 100 Km de línea o lo que es lo mismo, 3.5 kV/km

4.7.2 Cálculo de tensiones inducidas por la línea de 800 kV en la línea de 400 kV

Para calcular las tensiones inducidas por la línea de 800 kV en la de 400 kV procedemos de la misma forma que en el apartado anterior teniendo en cuenta que ahora la $I_f = 2000$ A

$$|U_d| = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_f \cdot (M_{ad} + M_{bd} + M_{cd}) =$$

$$|U_d| = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2000 \cdot (0,195 + 0,197 + 0,187) =$$

$$|U_d| = 363,79 \text{ kV} = \boxed{3,6 \text{ kV/km}}$$

$$|U_e| = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_f \cdot (M_{ae} + M_{be} + M_{ce}) =$$

$$|U_e| = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2000 \cdot (0,188 + 0,189 + 0,183) =$$

$$|U_e| = 351,8 \text{ kV} = \boxed{3,5 \text{ kV/km}}$$

$$|U_f| = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_f \cdot (M_{af} + M_{bf} + M_{cf}) =$$

$$|U_f| = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2000 \cdot (0,183 + 0,184 + 0,18) =$$

$$|U_f| = 343,7 \text{ kV} = \boxed{3,4 \text{ kV/km}}$$

Por simetría podemos saber que:

$$|U_g| = |U_d| = 363,79 \text{ kV} = \boxed{3,6 \text{ kV/km}}$$

$$|U_h| = |U_e| = 351,8 \text{ kV} = \boxed{3,5 \text{ kV/km}}$$

$$|U_i| = |U_f| = 343,7 \text{ kV} = \boxed{3,4 \text{ kV/km}}$$

Se puede observar que mientras más distancia hay entre el circuito inductor y la fase inducida, menor es el voltaje inducido, además estos valores de tensión no sobrepasan los valores típicos de tensión inducida para estos niveles de tensión por lo que podemos concluir que la realización de este proyecto desde el punto de vista eléctrico es viable.

A continuación, a modo de resumen, se exponen en el siguiente cuadro los valores de todos los fenómenos calculados anteriormente comparando los de la línea primitiva de 400 kV con los nuevos valores de la línea modificada de 400 kV compacta unida a la de 800 kV.

Con este apartado hemos acabado el estudio eléctrico de nuestro nuevo apoyo por lo que a continuación realizaremos en el siguiente apartado el estudio mecánico de éste.

	Pérdidas Corona	Ruido Audible	Ruido electromagnético	Campo magnético	Reactancia inductiva	Reactancia Capacitiva
Línea 400 kV	$86,13 \frac{kW}{Km \text{ fase}}$	23,35 dB	156,15 dB	41,22 μT	$0,302 \frac{\Omega}{km \text{ fase}}$	$614,14 \frac{k\Omega}{km \text{ fase}}$
Línea 400 kV Compactada	$174,11 \frac{kW}{Km \text{ fase}}$	22,76 dB	160,55 dB	39,92 μT	$0,27 \frac{\Omega}{km \text{ fase}}$	$548,8 \frac{k\Omega}{km \text{ fase}}$
Línea de 800 kV	$409,91 \frac{kW}{Km \text{ fase}}$	62,78 dB	90 dB	22,93 μT	$0,248 \frac{\Omega}{km \text{ fase}}$	$512,3 \frac{k\Omega}{km \text{ fase}}$
400 kV + 800 kV		85,54 dB	250,55 dB	62,85 μT		

Figura 4-14. Cuadro resumen de valores obtenidos.

Como conclusión de este apartado se puede observar que al compactar la línea de 400 kV disminuyen el campo magnético producido por ésta, el ruido audible debido al efecto corona y las reactancias inductiva y capacitiva de la línea, sin embargo, al compactarla, las pérdidas por efecto corona aumentan debido a que la tensión crítica disruptiva disminuye al cambiar la geometría de las fases.

Por otro lado, los niveles de ruido de la nueva línea de 400 kV y 800 kV en conjunto han aumentado como era de esperar, además, superan los límites de ruido establecidos por la OMS que podemos ver en la figura 4-10 por lo que si se llevara a cabo el proyecto habría que estudiar cómo reducir el nivel de ruido en las inmediaciones de los lugares reflejados en dicha figura.

Respecto a los límites de exposición a campos magnéticos propuestos por el ICNIRP para público en general se puede observar que nuestra nueva línea los cumple ya que dicho límite tiene un máximo permitido de

83 μT .

5 ESTUDIO MECÁNICO DEL NUEVO APOYO

*Si hiciéramos todas las cosas de las que somos capaces,
literalmente nos sorprenderíamos a nosotros mismos.*

- Thomas Edison -

Dejando atrás el estudio eléctrico que se ha realizado a nuestro apoyo modificado pasamos a realizar un estudio mecánico del mismo, donde se determinará la flecha máxima para la línea de 800 kV en la situación más desfavorable (con carga de hielo) y se determinará el vano máximo que podría soportar los conductores de la línea de 800 kV para comprobar que el vano impuesto por la línea primitiva de 400 kV es apto.

Por otra parte, veremos el árbol de cargas en el nuevo apoyo para tener una representación de la distribución de fuerzas en los puntos de carga del mismo.

5.1 Vano máximo en terreno llano

Para calcular el vano máximo permisible para la línea de 800 kV utilizaremos la ecuación (5-1), conocida como ecuación de la parábola [6] que es apta para vanos de hasta 1000 m. [23] y [25]

$$f = \frac{a^2 \cdot P}{8 \cdot T_0} \quad (5-1)$$

Donde:

f es la flecha.

P es el peso del cable por unidad de longitud contabilizando la carga de hielo (situación más restrictiva) por lo que:

$$P = P_p \text{ (peso propio del cable)} + P_h \text{ (peso debido al hielo)} \quad (5-2)$$

T₀ es la tensión del cable (se suele suponer constante a lo largo del conductor).

a es el vano, que viene dado por la primitiva línea de 400 kV y es $a = 220\text{m}$ (vano medio para una línea de 400 kV)

Nuestra línea está formada por conductores tipo Cardinal los cuales se definen por las siguientes características físicas: La carga de rotura, que es el valor límite de la carga en kg por la cual el cable se rompe, y el peso propio del conductor (**P_p**), al que añadiremos el peso de la carga de hielo para tener la situación más restrictiva.

La carga de rotura para un conductor Cardinal es $Q=15150\text{ kg}$ y el peso del cable por unidad de longitud es $P_p=1,832\text{ kg/m}$.

La carga de hielo **P_h** viene definida por un factor **K**, que depende del tipo de zona que elijamos para el cálculo, y por el diámetro del conductor **d** y su expresión es:

$$P_h = k \cdot \sqrt{d} \text{ (daN/m)} \quad (5-3)$$

Donde $K = 0,18$ para la zona B y $K = 0,36$ para la zona C del reglamento. En nuestro caso elegimos la zona B del reglamento, que es la comprendida entre 500 y 1000 m sobre el nivel del mar, ya que es la media del terreno español, por lo tanto, con estos datos calculamos primero la tensión máxima de rotura y el peso del conductor.

La tensión del conductor es la relación entre la carga de rotura y un factor n de seguridad que en nuestro caso es n=4, por lo tanto, la tensión del conductor es:

$$T_0 = \frac{Q}{n} = \frac{15150}{4} = 3787,5 \text{ kg}$$

El peso del conductor total que hay que tener en cuenta en los cálculos de la flecha es el propio peso del conductor mas el peso de la carga de hielo, que es la situación más desfavorable y por tanto la más restrictiva.

$$P = P_p \text{ (peso propio del cable)} + P_h \text{ (peso debido al hielo)}$$

$$P = 1,832 + 0,18 \cdot \sqrt{30,42} \cdot \frac{10}{9,8} = 2,844 \text{ kg/m}$$

La flecha que se obtiene para la línea de 800 kV para un vano medio de una línea de 400 kV igual a 220 m es la que sale utilizando la ecuación de la parábola sustituyendo los valores obtenidos.

$$f = \frac{a^2 \cdot P}{8 \cdot T_0}$$

$$f = \frac{220^2 \cdot 2,844}{8 \cdot 3787,5}; \quad f = \boxed{4,54 \text{ m}}$$

Para ver si esta flecha es admisible para la línea de 800 kV vamos a calcular la flecha máxima admisible mediante la fórmula (5-4) que aparece en el reglamento de las líneas.

$$f_{ad} = \left(\frac{D - \frac{U}{150}}{K} \right)^2 - \lambda \quad (5-4)$$

Donde:

D es la distancia entre los conductores de los diferentes circuitos.

U es la tensión de la línea.

K es una constante que depende de la oscilación de los conductores.

λ es la longitud de la cadena de suspensión.

En nuestro caso D = 10 m como vimos en apartados anteriores, U=800 kV, K=0.65 y λ=0 debido a que no tenemos cadena de aisladores en la línea de 800 kV.

Con todo esto se tiene que la flecha máxima admisible para la línea de 800 kV es:

$$f_{ad} = \left(\frac{10 - \frac{800}{150}}{0,65} \right)^2 = 51,54 \text{ m}$$

Que corresponde a un vano máximo admisible en terreno llano:

$$A_{ad} = a \cdot \sqrt{\frac{f_{ad}}{f}} \quad (5-5)$$

$$A_{ad} = 220 \sqrt{\frac{51,54}{4,54}} = \boxed{741,25 \text{ m}}$$

Por lo tanto, la línea de 800 kV soportaría el vano de 220 m impuesto por la primitiva línea de 400 kV.

5.2 Árbol de cargas

En este apartado queremos representar la distribución de fuerzas en los puntos de carga del apoyo y para ello haremos uso de unos diagramas llamados árboles de carga. [12]

Las estructuras de apoyo de una línea de transmisión soportan en términos generales tres tipos de esfuerzos, las cuales se clasifican, de acuerdo con su dirección o sentido de aplicación, en cargas transversales, cargas longitudinales y cargas verticales.

Las cargas transversales comprenden las fuerzas generadas por la acción del viento sobre la estructura, los cables y las cadenas de aisladores y, las generadas por ángulos de deflexión de la línea, las cargas longitudinales comprenden las fuerzas generadas por el tiro de los conductores y las cargas verticales comprenden las fuerzas debidas al peso de los conductores, aisladores y cargas de mantenimiento.

Para el cálculo del árbol de cargas vamos a utilizar la **hipótesis de carga normal** donde todos los conductores y cables de guarda están sanos.

Se considera viento máximo de diseño, elasticidad final, temperatura coincidente y que no hay carga longitudinal por desbalance debidas a vanos adyacentes desiguales, debido a la condición de suspensión.

5.2.1 Cargas mecánicas en la estructura

- Cargas Verticales:

En el cálculo de la carga vertical se considera el peso de los cables de guarda, de los conductores, de los herrajes, de los equipos de soporte y operarios encargados de las labores de mantenimiento y montaje de la línea.

Para calcular la carga vertical que ejercen los conductores sobre las estructuras se usa la ecuación (5-2) que vemos a continuación:

$$C_v = V_{\text{peso}} \cdot W_c + W_{\text{aisladores}} + W_{\text{mant}} \quad (5-2)$$

Dónde

Carga vertical (kg):	C_v
Gravivano de diseño (m):	V_{peso}
Peso del cable y/o conductor (kg/m):	W_c
Peso cadena de aisladores (kg):	$W_{\text{aisladores}}$
Peso operarios mantenimiento (Kg):	W_{mant}

El peso de cable y/o conductor incluye el peso distribuido de los amortiguadores en kg/m.

El peso de las cadenas de aisladores incluye el peso de los herrajes en kg.

Para nuestra estructura, que es una estructura de suspensión, el gravivano de diseño, que es la distancia horizontal entre dos puntos de máxima flecha, es $V_{\text{peso}}=220$ m, el peso del cable Cardinal por metro es $W_c=1,832$ kg/m, el peso de la cadena de aisladores es $W_{\text{aisladores}} = 0$ kg puesto que al compactar la línea los aisladores se sustituyen por armados rígidos.

También hay que tener en cuenta el peso de los trabajadores de mantenimiento que consideraremos $W_{\text{mant}}=400$ kg para los puntos de apoyo de los conductores de fase y $W_{\text{mant}}=200$ kg en los puntos de apoyo de los hilos de guarda.

Con estos datos la carga vertical máxima en cada punto de sujeción de los cables es:

$$FV = (220 \cdot 2 \cdot 1,832 + 0 + 400) = \boxed{1206,1 \text{ kg}}$$
 para las fases de la línea de 400 KV;

$$FV = (220 \cdot 5 \cdot 1,832 + 0 + 400) = \boxed{2415,2 \text{ kg}}$$
 para las fases de la línea de 800 KV;

Como no hemos supuesto nada en este proyecto para el tipo de cable de guarda, vamos a suponer un cable de guarda con la mitad de sección y peso que el conductor Cardinal, por lo que las cargas del cable de guarda serán aproximadamente las producidas solo por el cable, ya que el cable de guarda no cuenta con aisladores.

$$FV = (220 \cdot 1 \cdot \frac{1,832}{2} + 400) = \boxed{601,52 \text{ Kg}}$$
 para cada cable de guarda;

- Cargas longitudinales:

En nuestro caso hemos tomado la hipótesis de carga NORMAL por lo que, por definición, las cargas longitudinales son nulas.

- Cargas transversales:

Este tipo de cargas también se llaman cargas de viento ya que es la carga que ejerce el viento sobre los conductores y las cadenas de aisladores, por lo tanto, estará definida por la velocidad del viento de la zona donde está ubicada la línea.

La carga transversal será entonces:

$$FT = FT (\text{cables}) + FT (\text{aisladores}) \quad (5-3)$$

Donde:

$$FT (\text{cables}) = n \cdot \emptyset_{\text{cond}} \cdot Q_v \cdot V_v \cdot FS \cdot 10^{-3} \quad (\text{Kg}) \quad (5-4)$$

$$FT (\text{aisladores}) = 0 \quad (\text{Kg}) \quad (5-5)$$

Siendo

n: número de conductores por fase.

\emptyset_{cond} : diámetro del conductor en mm.

$Q_v = 40 \text{ Kg/m}^2$ Presión máxima de viento.

$V_v = 220 \text{ m}$ Eolovano de diseño.

FS: factor de seguridad (FS=1,1).

Para las fases de la línea de 400 kV:

$$FT = 2 \cdot 30,42 \cdot 40 \cdot 220 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} = \boxed{588,9 \text{ kg}}$$

Para las fases de la línea de 800 kV

$$FT = 5 \cdot 30,42 \cdot 40 \cdot 220 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} = \boxed{1472,32 \text{ kg}}$$

Para los cables de guarda (no hay cadena de aisladores):

$$FT = 1 \cdot \frac{30,42}{2} \cdot 40 \cdot 220 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} = \boxed{147,23 \text{ kg}}$$

5.2.2 Representación de la distribución de fuerzas en el apoyo

Para terminar este estudio mecánico y para que quede visualmente más clara la distribución de fuerzas en el apoyo, vamos a representarlas en un diagrama (Ver figura 5-1).

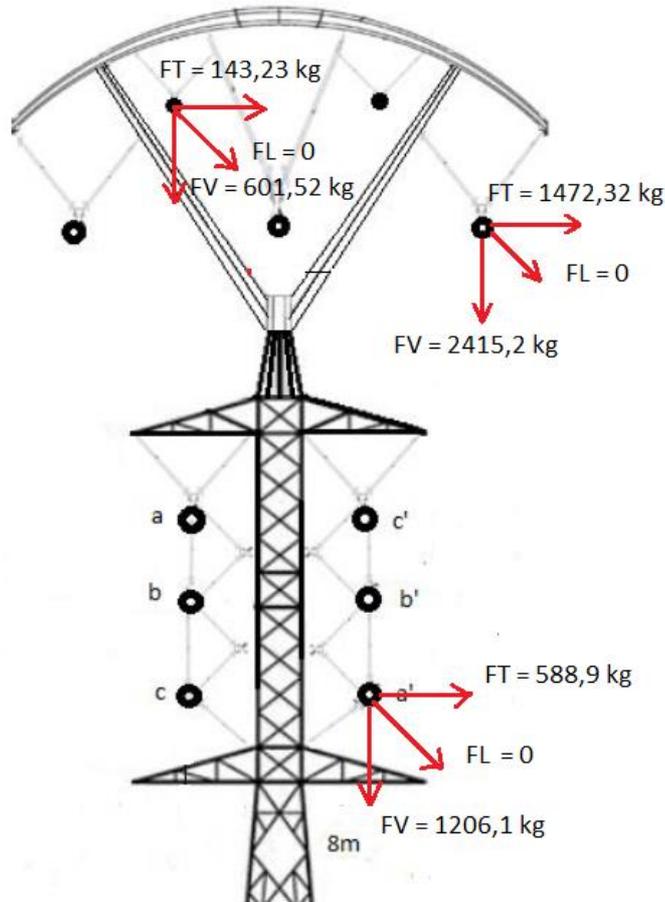


Figura 5-1. Diagrama de fuerzas en el apoyo para hipótesis de HIELO

6 ESTUDIO ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL

La ciencia es el alma de la prosperidad de todas las naciones, y la fuente de vida de todo progreso.

- Louis Pasteur -

En este apartado se va a realizar un estudio económico en el que se incluirán el coste del refuerzo tanto de la cimentación de la línea de 400 kV como de la estructura metálica de los apoyos, el coste de los nuevos apoyos BOLD y el coste de mano de obra e ingeniería.[13] [26]

Posteriormente se realizará un estudio de impacto ambiental en el que se calculará la deforestación que sería necesaria si en vez de modificar la línea de 400 kV primitiva se construyera una línea de 800 kV nueva y demostrar que la adaptación de líneas en uso es más beneficioso para el medio ambiente que construir líneas nuevas.

6.1 Peso de la estructura soporte

Para calcular el coste del apoyo BOLD y del refuerzo del apoyo primitivo de 400 kV es necesario saber el peso de ambas estructuras y para ello existen dos fórmulas empíricas como son la de Ryle y la de Marjerrison.

A continuación, se explica la fórmula de Marjerrison, ecuación (6-1), ya que es la más utilizada [26]

La fórmula de Marjerrison es:

$$W = Ck \cdot He \cdot (FT^{\frac{2}{3}} + FV^{\frac{1}{2}} + FL^{\frac{2}{3}}) \quad (6-1)$$

Donde:

W= Peso de la estructura de suspensión (Kg).

Ck= Constante que varía con la forma de la torre y el voltaje nominal (0,45 valor medio)

He = Altura equivalente, igual a la altura sobre la base del apoyo a la cual la resultante de las cargas máximas produce el momento total.

FT = Suma de las fuerzas transversales de los conductores y cables de guarda.

FV= Suma de las fuerzas verticales de los conductores y cables de guarda.

FL= Suma de las fuerzas longitudinales de los conductores y cables de guarda.

6.1.1 Peso del apoyo BOLD 800 kV

El apoyo BOLD tendrá que soportar el peso del circuito de 800 kV y el peso de los cables de guarda. Para la hipótesis de carga hielo la fuerza transversal total ejercida por las tres fases del circuito de 800 kV es $FT = 3 \cdot 1472,3 = 4416,9$ kg, la fuerza vertical total es $FV = 3 \cdot 2415,2 = 7245,6$ kg y la fuerza longitudinal es $FL = 0$.

Por otro lado, las fuerzas ejercidas por los dos cables de guarda son $FT = 2 \cdot 143,23 = 286,46$ kg, $FV = 2 \cdot 601,52 = 1203$ kg y $FL = 0$.

En total se tiene que las fuerzas transversales en el apoyo BOLD tienen un valor de $FT = 4416,9 + 286,46 = 4703,4$ kg y las fuerzas verticales $FV = 7245,6 + 1203 = 8448,6$ kg.

Tomamos como altura equivalente = 2/3 de la distancia entre fases y base del apoyo, por lo que el peso aproximado de la estructura es:

$$W_{800} = 0,45 \cdot He \cdot \left(FT^{\frac{2}{3}} + FV^{\frac{1}{2}} + FL^{\frac{2}{3}} \right) =$$

$$= 0,45 \cdot 6,66 \cdot \left(4703,4^{\frac{2}{3}} + 8448,6^{\frac{1}{2}} \right) = \boxed{1116,8 \text{ kg}}$$

El peso mínimo aproximado que debe tener el apoyo BOLD de la línea de 800 kV para que aguante las cargas mencionadas en los apartados anteriores es 1116,8 kg.

6.1.2 Peso del acero necesario para el refuerzo del apoyo de REE 400 kV

Para calcular el peso necesario de acero para reforzar el apoyo primero hay que estimar el peso del propio apoyo antes de reforzarlo. Para ello se actúa de igual manera que en el apartado anterior utilizando la fórmula de Marjerrison.

Las fuerzas transversales en el apoyo primitivo de 400 kV las calculamos teniendo en cuenta las cadenas de aisladores con las mismas fórmulas que en el apartado 5.2 y son $FT = 6 \cdot 602,13 = 3612,78 \text{ kg}$, $FV = 6 \cdot 1246,1 = 7476,6 \text{ kg}$ y $FL = 0$, además la distancia de las fases hasta el suelo es 20 m y $He = 2/3 \cdot 20 = 13,3 \text{ m}$ por lo que el peso estimado del apoyo primitivo de 400 kV es:

$$W_{400} = 0,45 \cdot He \cdot \left(FT^{\frac{2}{3}} + FV^{\frac{1}{2}} + FL^{\frac{2}{3}} \right) = 0,45 \cdot 13,3 \cdot \left(3612,78^{\frac{2}{3}} + 7476,6^{\frac{1}{2}} \right) = 1926,66 \text{ kg}$$

Ahora vamos a calcular el peso total de ambos apoyos una vez montado el apoyo de 800 kV sobre el que actúa una fuerza trasversal provocada por los conductores de ambos circuitos y por los cables de guarda que es igual a $FT = 6 \cdot 588,9 + 3 \cdot 1472,32 + 2 \cdot 143,23 = 8236,82 \text{ kg}$, una fuerza vertical que es $FV = 6 \cdot 1206,1 + 3 \cdot 2415,2 + 2 \cdot 601,52 = 15685,24 \text{ kg}$ y $FL = 0$, además tenemos que la distancia entre las fases y el suelo es 30 m aproximadamente por lo que $He = 2/3 \cdot 30 = 20 \text{ m}$ por lo que el peso del apoyo modificado será:

$$W_{tot} = 0,45 \cdot He \cdot \left(FT^{\frac{2}{3}} + FV^{\frac{1}{2}} + FL^{\frac{2}{3}} \right) = 0,45 \cdot 20 \cdot \left(8236,82^{\frac{2}{3}} + 15685,24^{\frac{1}{2}} \right) = 4796,89 \text{ kg}$$

El apoyo modificado debe de tener un peso de 4796,89 kg para que aguante con ambos circuitos.

Para obtener el peso necesario de acero utilizado para los refuerzos del apoyo solo hace falta restarle al peso total el peso del apoyo BOLD y el peso del apoyo primitivo de 400 kV:

$$W_{refuerzos} = W_{tot} - W_{800} - W_{400} = 4796,89 - 1116,8 - 1926,66 = \boxed{1753,4 \text{ kg}}$$

Hacen falta 1753,4 kg de acero para reforzar el apoyo primitivo de 400 kV.

6.2 Cálculo de la cimentación

Según la normalización de cimentaciones de la Electricité de France aparecen series de cimentaciones para dos tipos de terreno, de las cuales hemos elegido un terreno normal firme. [13]

De ellas se ha obtenido el volumen de hormigón y de excavación en función del esfuerzo de arrancamiento en toneladas. Este esfuerzo se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación 6-2.

$$Ar = 2,5 \cdot P \quad (6-2)$$

Donde:

P=Resultante simple de las cargas transversales y longitudinales combinadas, en las condiciones de máximas cargas de viento y la calculamos con la ecuación 6-3:

$$P = \sqrt{(FT_{cond} + FT_{cg})^2 + FL^2} \quad (6-3)$$

En la que FT_{cond} es la fuerza transversal de los conductores, FT_{cg} es la de los cables de guarda y FL es la fuerza longitudinal total en toneladas.

Con todo lo anterior calculamos el volumen de hormigón necesario VH , en m^3 , dado por la siguiente ecuación 6-4, que es experimental:

$$VH = 3,4256 - 0,0784 \cdot Ar + 0,00385 \cdot Ar^2 - 0,00001 \cdot Ar^3 \quad (6-4)$$

por cada pata del apoyo.

6.2.1 Refuerzo de la cimentación de la línea de 400 kV

Para ver el volumen de hormigón necesario que habría que añadir a la línea existente primero vamos a calcular el volumen de hormigón que actualmente tiene esta línea.

La resultante de las cargas, para los dos circuitos de 400 kV, es:

$$P = \sqrt{(FT_{cond} + FT_{cg})^2 + FL^2} = \sqrt{(6 \cdot 0,602 + 2 \cdot 0,147)^2 + 0^2} = 3,906 \text{ t}$$

El esfuerzo de arrancamiento es:

$$Ar = 2,5 \cdot P = 2,5 \cdot 3,906 = 9,765 \text{ t.}$$

Por lo tanto, el volumen de hormigón existente en los cimientos del apoyo de la línea de 400 kV es:

$$VH = 3,4256 - 0,0784 \cdot Ar + 0,00385 \cdot Ar^2 - 0,00001 \cdot Ar^3;$$

$$VH = 3,4256 - 0,0784 \cdot 9,765 + 0,00385 \cdot 9,765^2 - 0,00001 \cdot 9,765^3;$$

$$VH = 3,02 \text{ m}^3 \text{ por cada pata.}$$

Al añadir la parte del apoyo BOLD a la línea de 400 kV la resultante de fuerzas cambia debido a las 3 fases de la línea de 800 kV y la nueva configuración de la línea de 400 kV:

$$P = \sqrt{(FT_{cond} + FT_{cg})^2 + FL^2} = \sqrt{(6 \cdot 0,588 + 3 \cdot 1,472 + 2 \cdot 0,143)^2 + 0^2}$$

$$P = 8,23 \text{ t}$$

El esfuerzo de arrancamiento es:

$$Ar = 2,5 \cdot P = 2,5 \cdot 8,23 = 20,6 \text{ t}$$

Y el volumen de hormigón necesario es:

$$VH = 3,4256 - 0,0784 \cdot 20,6 + 0,00385 \cdot 20,6^2 - 0,00001 \cdot 20,6^3;$$

$$VH = 3,35 \text{ m}^3 \text{ por cada pata.}$$

Por lo que la diferencia de volúmenes sería el volumen necesario de hormigón que habría que añadir.

En nuestro caso VH a añadir = $4 \cdot (3,35 - 3,02) = 1,32 \text{ m}^3$ en total.

6.3 Coste de la modificación de la línea de 400 kV

El coste a grandes rasgos de la modificación de la línea de 400 kV está formado por el coste del apoyo de 800 kV, el cual estimaremos con el precio del acero, el coste de los refuerzos de acero y hormigón y los costes de mano de obra, materiales e ingeniería.

El coste total viene dado por la ecuación 6-5:

$$CT = C_{ref} + C_{hor} + C_{Mo} + C_{ing} \quad (6-5)$$

Donde:

C_{ref} es el coste del refuerzo de acero, C_{hor} es el coste del refuerzo de hormigón, C_{Mo} es el coste de mano de obra y materiales y C_{ing} el coste de ingeniería.

Para calcular el coste del refuerzo de acero hay que conocer el precio del acero el cual es muy variable ya que cada día tenemos diferentes precios.

Supondremos que el precio del acero será el precio medio de los últimos meses para acero en planchas.

$C_a = 2,45 \text{ €/kg}$, por lo que $C_{ref} = 2,45 \cdot 1753,4 = 4295,83$ euros por apoyo.

El precio del hormigón también es variable dependiendo de si lo suministra una empresa privada, suministración propia, si lleva o no mallazo etc...

Vamos a suponer que el suministro lo hace una empresa privada por lo que el precio del hormigón sería $54,45 \text{ €/m}^3$.

Por lo tanto, el coste del refuerzo de hormigón es $C_{hor} = 1,32 \cdot 54,45 = 60$ euros por apoyo.

El coste de mano de obra y materiales viene de las operaciones realizadas durante el proceso de modificación de la línea. Para el coste de materiales solo tendremos en cuenta los conductores de la nueva línea de 800 kV ya que los armados aislantes los suponemos incluidos en el coste del apoyo BOLD. Por otro lado, para el coste de la mano de obra tendremos en cuenta las operaciones de compactado de la línea de 400 kV, montaje del apoyo de 800 kV, tendido del nuevo circuito y cambio de ubicación de los cables de guarda.

El precio de cada partida de este coste podemos verlo en la siguiente figura. [26]

Montaje de torre acero galvanizado	0,35 €/kg
Desmontaje aisladores	20 € p.u.
montaje armados aislantes	40 € p.u.
Tendido de conductores	700 €/km
Desmontaje y montaje cable de guarda (reubicación)	500 €/km
Desmontaje y montaje conductor(compactación)	1100 €/km

Figura 6-1. Precios mano de obra

Teniendo en cuenta que el peso del apoyo BOLD es 1116,8 kg, que los aisladores a desmontar son 3, que los armados aislantes a montar son 11 (11 cables entre circuitos y cables de guarda), que los conductores a tender son 3 (línea de 800 kV), que los cables de guarda a reubicar son 2, que los conductores a compactar son 6, que una línea de 400 kV mide de media 100 km y tiene 455 apoyos de media para un vano de 220 m, el coste de mano de obra es:

$CMo = 1116,8 \cdot 0,35 + 20 \cdot 3 + 40 \cdot 11 + 700 \cdot 100/455 + 500 \cdot 100/455 + 1100 \cdot 100/455 = 1396,37 \text{ €}$ por apoyo.

Por último, el coste de ingeniería incluye el diseño de la línea de 800 kV, estudio del refuerzo de la cimentación, estudio del refuerzo del apoyo y estudio de la compactación de la línea de 400 kV cuyos precios se pueden ver en la siguiente figura.

Estudio refuerzo apoyo	400 € p.u.
Estudio refuerzo de cimentación	400 € p.u.
Diseño línea 800 kV	1000 €/km
Estudio compactación línea de 400 kV	1000 €/km

Figura 6-2. Precios ingeniería

Con estos datos el coste de ingeniería es $Cing = 400 + 400 + 1000 \cdot 100/455 + 1000 \cdot 100/455 = 1239,56 \text{ €}$ por apoyo.

La inversión total por apoyo es $CT = 4295,83 + 60 + 1396,37 + 1239,56 = 6991,76 \text{ €}$

Si la línea cuenta con 455 apoyos la inversión total para la modificación de la línea será de unos 3 M€ aproximadamente.

6.4 Desforestación

En este apartado vamos a estimar la desforestación que supondría la construcción de una nueva línea de 800 kV [14] para tener una visión del área que se dejaría de desforestar al modificar una línea actual de 400 kV, para ello es necesario conocer la franja de servidumbre de la línea.

La franja de servidumbre de una línea de transmisión es una franja de terreno que se deja a lo largo y ancho de la línea para garantizar que bajo ninguna circunstancia se presenten accidentes con personas o animales, haciéndose necesaria su delimitación.

Para las líneas mayores a 220 kV la mínima franja de servidumbre a lo ancho de la línea es de 30 m.

Si nuestra línea mide 100 km, el área a deforestar sería:

$$Ad = \text{franja servidumbre (km)} \cdot \text{largo de la línea (km)} \quad (6-6)$$

Por lo que en nuestro caso sería: $Ad = 0,03 \cdot 100 = 3 \text{ km}^2$

7 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Aprender sin reflexionar es malgastar energía.

- Confucio-

7.1 Conclusiones

Este trabajo tenía como objetivo presentar una alternativa viable a la construcción de nuevas líneas de transmisión para aumentar la capacidad de transporte del sistema eléctrico debido al aumento de demanda de transporte de energía previsible en el futuro, además de ir preparando nuestros sistemas de redes de transporte para que pueda albergar el nivel de extraalta tensión requerido por la futura superred europea que unirá centros de generación remotos, la mayoría de ER, con los mayores centros de consumo de Europa situados en el centro.

Se requería una alternativa que no acarreará los problemas que conlleva la construcción de nuevas líneas, tanto problemas medioambientales como conflictos sociales debidos al descontento que genera este tipo de construcciones en la población.

Para ello se ha tratado la alternativa de modificar apoyos actuales de líneas de 400 kV de REE, sobreponiendo una línea de mayor capacidad de transporte de tipo compacta, la cual tiene mayor aceptación social, reduce el número de interrupciones debidas a faltas fase-fase o fase-tierra y disminuye el impacto ambiental todo, ello comparado con la construcción desde cero de una nueva línea.

Para llevar a cabo todo esto se ha estudiado un tipo de apoyo compacto de la compañía AEP llamado BOLD, el cual se ha rediseñado y se ha dado una propuesta de modificación para luego realizar un estudio eléctrico, mecánico y económico con buenos resultados.

Tanto el estudio eléctrico como mecánico se encuentran en los parámetros normales de este tipo de líneas.

En conclusión, esta alternativa puede ser muy interesante para la repotenciación de las actuales líneas españolas con miras a la futura superred, no obstante, la realización de este proyecto conlleva una dificultad añadida debido a la negativa por parte de REE a dejar fuera de servicio temporalmente las líneas de 400 kV en las que se acometería dicho proyecto por lo que en un futuro habría que realizar un estudio para que las consecuencias de dejar las líneas fuera de servicio fueran mínimas.

7.2 Trabajo futuro

Este trabajo ha sido el comienzo del estudio de esta alternativa de construcción de líneas eléctricas y en el que se pretendía hacer una presentación de la idea sin llegar a ahondar en ningún punto del proyecto.

Por lo tanto, todavía quedan muchos aspectos por desarrollar los cuales no han tenido cabida en este proyecto como pueden ser el estudio detallado de la construcción del apoyo, un estudio económico más amplio y detallado, la viabilidad de construcción del nuevo diseño del apoyo BOLD para líneas de 800 kV, el estudio de construcción, la dificultad de dejar fuera de servicio las líneas de 400 kV, la conexión del conector troncopiramidal incluso un estudio de reducción del nivel de ruido audible de la línea reformada en los entornos establecidos por la OMS etc...

Desde aquí animo a cualquier estudiante que vea este trabajo a que continúe el desarrollo de esta buena alternativa que sin duda tiene grandes ventajas.

REFERENCIAS

[1] AEP, << Bold options >> [En línea]

Available: <http://www.boldtransmission.com/products/options/>, 2015

[2] REE, << SUBESTACIÓN ELÉCTRICA A 400 KV CARRIO Y LÍNEA ELÉCTRICA A 400 KV CARRIO-NUEVA TABIELLA DOCUMENTO INICIAL DEL PROYECTO>> [En línea]

Available:

http://www.ree.es/sites/default/files/04_SOSTENIBILIDAD/Documentos/tramitacion_ambiental/EIA/Documento%20Inicial%20SE.%20Goz%C3%B3n%20400%20SE.%20Reboira%20y%201%C3%ADneas%20asociadas.pdf, 2008

[3] REE, << DOCUMENTO COMPRENSIVO TRANSFORMACIÓN A DOBLE CIRCUITO DE LA LÍNEA A 220 kV MANGRANERSJUNEDA-L'ESPLUGA-MONTBLANCPENEDES-BEGUES >> [En línea]

Available:

http://www.ree.es/sites/default/files/04_SOSTENIBILIDAD/Documentos/tramitacion_ambiental/EIA/Documento%20Inicial%20L220%20kV%20Mangraners-Juneda-La%20Espluga-Montblanc-Pened%C3%A9s-Begues.pdf, 2007

[4] RODRIGO FERNANDO SABAJ SAAVEDRA, <<Implementación de un modelo a escala para el estudio del efecto corona y medición de sus pérdidas según diversas condiciones y calidad del aire>>

[En línea]

Available:

<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/134308/Implementacion-de-un-modelo-a-escala-para-estudio-del-efecto.pdf?sequence=1>, 2015

[5] IBERDROLA, <<PROYECTO TIPO LINEA AEREA DE 30 kV Doble circuito con conductor LA/LARL 175 y apoyos metálicos de celosía>> [En línea]

Available: http://www.f2i2.net/Documentos/LSI/nce/IBERDROLA/MT_2.21.54_2_sep13.pdf, 2013

[6] Maria Carmen de la Hoz Palacios, <<Estudio de la línea alta tensión set Almazán-set Soria>>

[En línea]

Available: <http://zaguan.unizar.es/record/5475/files/TAZ-PFC-2010-416.pdf>, Universidad de Zaragoza 2010.

[7] Carlos Tejada Martínez, <<Análisis de la interferencia electromagnética por el efecto corona>> [En línea]

Available: <http://www.sepielectrica.esimez.ipn.mx/tesise/2008/analisiscarlos.pdf>, México D.F, 2008

[8] Flavius Vinicius Caetano Bezerra, <<Proyecto electromecánico de líneas aéreas de transmisión de extraalta tensión>> [En línea]

Available: <https://es.scribd.com/doc/309065533/Calculo-de-Linha>, Río de Janeiro 2010.

- [9] Centro de investigación y transferencia de tecnología, <<diseño de líneas de transmisión>>, [En línea]
Available: <http://www.udb.edu.sv/udb/archivo/guia/electrica-ingenieria/diseño-de-lineas-de-transmision/2016/i/guia-2.pdf>, Universidad Don bosco, 2016.
- [10] TUVÉRAS, <<Parámetros de una línea eléctrica de alta tensión>>, [En línea]
Available: <http://www.tuveras.com/lineas/parametros/parametros.htm>
- [11] EMSA, <<Diseño línea de transmisión a 115 kV entre las subestaciones Ocoa y Guama>>, [En línea]
Available: http://www.emsa-esp.com.co/new/contratacion/docs/docs778/750-LTM-013%20MEMORIA%20DE%20CALCULOS%20ELECTROMECHANICOS_R1.pdf
- [12] EMSA, <<Construcción del segundo circuito a 115kV Suria-Puerto López>>, [En línea]
Available: http://www.emsa-esp.com.co/new/contratacion/docs/docs738/IEB-792-12-D012_0_%20Informe%20de%20arboles%20de%20Carga.pdf
- [13] Diego Joaquín Orellana Lineros, <<Estimación del presupuesto de línea de transmisión óptima a nivel de prefactibilidad>> [en línea]
Available: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/113801/cf-orellana_dl.pdf?sequence=1, Santiago de Chile, 2013
- [14] ETED, <<Declaración de impacto ambiental>>, [En línea]
Available: http://www.eib.org/attachments/pipeline/20070230_eia14_es.pdf, República Dominicana, 2010
- [15], Jhon A. Morales y Patricia Gavela <<DETERMINACIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS, Aplicación a casos reales >> 2015
- [16] CIGRE Working Group 36.01, << INTERFERENCES PRODUCED BY CORONA EFFECT OF ELECTRIC SYSTEMS >> 1966
- [17] Wikipedia, <<Efecto corona>>, [En línea]
Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_corona.
- [18] Coideasa <<Red aérea compacta>>, [En línea] Available:
http://www.coideasa.com/red_aerea_compacta.html
- [19] Ceac, <<Efecto corona en líneas de transmisión>>, [En línea]
Available: <http://www.ceac.es/blog/efecto-corona-en-lineas-de-transmision>
- [20] EEUU patents, <<BOLD Utility Patent USS 8952251 B2>>, 2015

[21] Flavius Dan Surianu, <<Determination of the induced voltaje by 220kV Electric overhead power lines working in parallel >> [En línea]

Available: <http://www.wseas.us/e-library/transactions/power/2009/29-926.pdf>, University of Timisoara, 2009

[22] Biblioteca digital Univalle, <<Línea eléctrica compacta a 33 Kv>> [En línea]

Available:

<http://bibliotecadigital.univalle.edu.co:8080/bitstream/10893/1323/6/Linea%20electronica%20compacta%20a%2033%20kV.pdf>

[23] Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09.

[24] Web de CEAC, <<Efecto corona en líneas de transmisión.>> [En línea]

Available: <https://www.ceac.es/blog/efecto-corona-en-lineas-de-transmision>

[25] Luis María Checa <<Líneas de transporte de energía 3° edición.>> [En línea]

Available:

https://books.google.es/books?id=J4qKMYB6wC4C&pg=PA273&lpg=PA273&dq=flecha+maxima+admisible+linea&source=bl&ots=yz8DuvJwEO&sig=RKmCD5QoV9cUtCbbn0FknTv1IA&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi1o77_-Y7bAhXCYpoKHbq0BukQ6AEIhgEwBw#v=onepage&q=flecha%20maxima%20admisible%20linea&f=false

[26] Miguel Borau Rumbao <<Posibilidad de repotenciación de líneas eléctricas aéreas para la futura superred europea.>> [En línea]

Available:

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70796/fichero/Posibilidad+de+repotenciación+de+OHL+para+la+futura+superred+europea.pdf>

[27] A. M. Mejía Solanilla <<Análisis Técnico y Económico de la Repotenciación de Líneas Aéreas AT. >> Universidad Tecnológica de Pereira; Codensa S.A. ESP

