

Proyecto Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Estudio mecánico de la conversión de una línea aérea
de 400 kV a una doble línea de 400/800 kV

Autor: Juan Manuel Rueda Vázquez

Tutor: Pedro Luis Cruz Romero

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Estudio mecánico de la conversión de una línea aérea de 400 kV a una doble línea de 400/800 kV

Autor:

Juan Manuel Rueda Vázquez

Tutor:

Pedro Luis Cruz Romero

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera: Estudio mecánico de la conversión de una línea aérea de 400 kV a una doble línea de 400/800 kV

Autor: Juan Manuel Rueda Vázquez

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

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento a mi familia por todo el apoyo que me ha dado en todos estos años de estudio que finalizan con la entrega de este trabajo. Sin vuestro esfuerzo y sacrificio diario hubiese sido imposible llegar a este momento, por lo que gran parte del mérito de que este trabajo sea una realidad es gracias a vosotros. A mi padre, mi madre y mi hermana, os quiero.

También agradecer todo el apoyo que me ha dado mi pareja, Cristina, la otra parte de mí que ha hecho que estos años de arduo estudio hayan sido mucho más amenos a tu lado, y que siempre quedarán en nuestro recuerdo con innumerables anécdotas. Muchísimas gracias por estar siempre ahí y hacerme sentir tan feliz a tu lado.

Al resto de mi familia; abuela, tías, tíos, primas, primos, y a familia política, por todo vuestro apoyo en este largo camino y por ayudarme siempre que lo he necesitado, sin vosotros este camino hubiese sido imposible de recorrerlo. Por supuesto, recordar a los que desgraciadamente ya no están, que estarán siempre en mí recuerdo y siempre han sido un ejemplo a seguir que me ha dado fuerzas en todas las etapas de mi vida.

Por último, agradecer al Departamento Técnico de Postemel S.L., en especial a David Cerro, Cayetano Martínez y Eduardo Romero, por toda vuestra confianza y vuestro esfuerzo en formarme y en enseñarme este fantástico mundo de las líneas eléctricas. Gracias por todo el tiempo que me dedicáis, en recomendarme materias que aprender para ser mejor en mi trabajo y por estar siempre ahí cuando lo necesito. Trabajar junto a vosotros es todo un privilegio u sé que sin vosotros este trabajo no hubiese sido posible.

Gracias a todos.

Resumen

En este proyecto se va a analizar desde un punto de vista mecánico la posibilidad de adaptar una línea aérea de alta tensión de 400 kV en doble circuito a otra de 800/400 kV, incluyendo un nuevo circuito de 800 kV al doble circuito ya existente. Para ello se deberá modificar el diseño del apoyo original o la construcción de un nuevo apoyo conforme a la normativa vigente para poder incluir el nuevo circuito, por lo que habrá que realizar el cálculo de la nueva estructura en un software de cálculo estructural. Para ello se calculará los esfuerzos que el conductor ejerce sobre el apoyo y se obtendrán los esfuerzos a considerar en cada hipótesis de cálculo que marca la normativa vigente.

Una vez diseñado el nuevo apoyo (estructura metálica y cimentación) se analizará el proceso de montaje de las modificaciones a realizar sobre la línea existente para instalar el nuevo circuito, y limitaciones que este proceso posee. Por último, se realizará un estudio económico en el que se analice el coste de implantación de este nuevo circuito y se discutirá finalmente su viabilidad.

Abstract

In this project it will be analyzed from a mechanical point of view the possibility of adapting a high voltage airline of 400 kv in double circuit to another of 800/400 kv, including a new circuit of 800 kv to the double circuit already existing. To do this, the design of the original support or the construction of a new support must be modified according to the current regulations in order to include the new circuit, so the calculation of the new structure in a structural calculation software will have to be done. This will calculate the efforts that the driver exerts on the support and will obtain the efforts to consider in each hypothesis of calculation that sets the current legislation.

Once the new support (Metal structure and foundation) is designed, the process of assembling the modifications to be carried out on the existing line will be analyzed to install the new circuit, and limitations that this process possesses. Finally, an economic study will be carried out in which the cost of implantation of this new circuit will be analyzed and the viability will be discussed.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	i
Índice de Tablas	iii
Índice de Figuras	iv
1 Introducción	1
1.1 <i>Justificación del proyecto</i>	3
1.2 <i>Objetivos</i>	3
2 Estado del arte	5
2.1 <i>Clasificación de los apoyos</i>	5
2.2 <i>Normativa</i>	6
2.3 <i>Clasificación de tensiones y sobretensiones</i>	6
2.4 <i>Esfuerzos sobre los apoyos</i>	7
3 Diseño de la línea de 400 kV	9
3.1 <i>Situación de la línea</i>	9
3.2 <i>Conductores</i>	9
3.3 <i>Apoyo de estudio</i>	10
3.4 <i>Cimentación</i>	12
4 Diseño de la línea de 800/400 kV	13
4.1 <i>Distancias de aislamiento mínimas</i>	13
4.2 <i>Modificación de la cabeza del apoyo original</i>	17
4.3 <i>Diseño de la nueva cabeza</i>	19
5 Cálculo de la línea de 800/400 kV	21
5.1 <i>Tabla de tendido y esfuerzos en el apoyo</i>	21
5.2 <i>Estructura metálica</i>	24
5.2.1 <i>Resumen para el modelado de la estructura en Tower</i>	24
5.2.2 <i>Cálculo del apoyo de 400 kV</i>	26
5.2.3 <i>Cálculo del apoyo de 800/400 kV</i>	30
5.3 <i>Cimentaciones</i>	37
5.3.1 <i>Comprobación de la cimentación original bajo las solicitaciones del nuevo apoyo.</i>	38
5.3.2 <i>Dimensionado del refuerzo de la cimentación.</i>	43
6 Instalación de la nueva línea	47
6.1 <i>Trabajos de instalación</i>	47
6.2 <i>Abaniquo de conductores</i>	48
7 Estudio económico	51
7.1 <i>Planteamiento de la ecuación</i>	51
7.2 <i>Resumen y resultado de la ecuación</i>	57

8. Conclusiones y trabajo futuro	59
8.1. Conclusiones	59
8.2. Trabajos futuros	59
Referencias	60
Anexos	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Tensiones a frecuencia industrial	6
Tabla 3-1. Características de la línea de 400 kV	9
Tabla 3-2. Características conductor LARL CONDOR	9
Tabla 3-3. Características conductor OPGW 48	10
Tabla 3-4. Alturas apoyos de la serie D4	10
Tabla 3-5. Dimensiones de la cimentación	12
Tabla 4-1. Clasificación de las distancias de aislamiento	13
Tabla 4-2. Expresiones de las distancias de aislamiento mínimas	14
Tabla 4-3. Valor del factor atmosférico k_a	15
Tabla 4-4. Valores del factor de desviación K_z	16
Tabla 4-5. Valores del factor de separación K_g	16
Tabla 4-6. Distancias de aislamiento para la tensión de 800 kV	17
Tabla 4-7. Distancias de aislamiento para la tensión de 400 kV	17
Tabla 5-1. Características conductor LARL CARDINAL	21
Tabla 5-2. Hipótesis de cálculo para un apoyo de suspensión en una línea de categoría especial	23
Tabla 5-3. Esfuerzos por conductor en el apoyo de suspensión.	24
Tabla 5-4. Esbelteces límite de las barras	25
Tabla 5-5. Calidad del acero	25
Tabla 5-6. Esfuerzos en el apoyo de 800/400 kV	30
Tabla 5-7. Aprovechamiento del apoyo en cada hipótesis de cálculo	36
Tabla 5-8. Peso del nuevo apoyo	36
Tabla 5-9. Dimensiones de la cimentación	37
Tabla 5-10. Reacciones en el nuevo apoyo de suspensión	38
Tabla 7-1. Peso de la nueva torre de suspensión	52
Tabla 7-2. Peso del fuste que se mantiene el del apoyo original de suspensión	53
Tabla 7-3. Peso medio de los apoyos de anclaje originales	54
Tabla 7-4. Peso medio del fuste de los apoyos de anclaje originales	54
Tabla 7-5. Relación De peso entre los fustes de suspensión y anclaje originales	54
Tabla 7-6. Peso medio de los nuevos apoyos de anclaje	54
Tabla 7-7. Resumen de los costes de cada partida	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Relación de costes entre las tecnologías HVDC y HVAC	1
Figura 1-2. Reconversión de un sistema HVAC en HVDC	2
Figura 2-1. Apoyo de suspensión(izquierda) y amarre (derecha)	5
Figura 3-1. Torre D4S2V (Izquierda) y D4A2 (derecha)	11
Figura 3-2. Cimentación tipo pata de elefante.	12
Figura 4-1. Apoyo tipo Delta (cara de gato)	18
Figura 4-2. Apoyo de 220 kV con tres vigas	18
Figura 4-3. Parte de la torre que se va a retirar para instalar la nueva cabeza	19
Figura 4-4. Esquema de la nueva cabeza	20
Figura 5-1. Datos introducidos en Postewin para el cálculo de la tabla de tendido y esfuerzos en apoyos	22
Figura 5-2. Definición de un nudo secundario en Tower	25
Figura 5-3. Excentricidades y restricciones al giro en Tower	26
Figura 5-4. Archivo .lca de la primera hipótesis del apoyo de 400 kV	27
Figura 5-5. Apoyo D4S2V modelado en Tower	28
Figura 5-6. Esfuerzos en la primera hipótesis del apoyo D4S2V	29
Figura 5-7. Nuevo apoyo de suspensión modelado en Tower	31
Figura 5-8. Esfuerzos en el fuste con la nueva cabeza	33
Figura 5-9. Esquema refuerzo del montante	33
Figura 5-10. Esfuerzos en la primera hipótesis del nuevo apoyo	34
Figura 5-11. Barra con mayor aprovechamiento de la estructura	35
Figura 5-12. Deformada del apoyo en la primera hipótesis (factor de escala 20)	35
Figura 5-13. Esfuerzos debidos a la torsión del fuste	36
Figura 5-14. Distribución de presiones en el cleat	41
Figura 5-15. Esquema y dimensiones de la nueva cimentación	43
Figura 5-16. Descomposición de volúmenes de la nueva cimentación	44
Figura 5-17. Volúmenes de tierra que gravitan sobre la cimentación	44
Figura 5-18. Volúmenes de las tierras arrancadas por el ángulo de talud	45
Figura 5-19. Hoja de cálculo para el cálculo de las comprobaciones	46
Figura 5-20. Esquema de la nueva cimentación.	46
Figura 6-1. Montaje de los apoyos	47
Figura 6-2. Apoyo autosoportado	48
Figura 6-3. Distancia entre fases para una cabeza de anclaje homóloga a la del apoyo de suspensión.	49
Figura 6-4. Disposición del conductores Condor en el apoyo original (izquierda) y nuevo (derecha)	50
Figura 6-5. Distribución de las catenarias en el paso del circuito antiguo al nuevo	50

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente las necesidades energéticas en la Unión Europea son cada vez más interdependientes debido a la integración de energía renovable en el sistema de transporte europeo. El aumento de generación de energía a partir de las fuentes renovables hace que sea necesario plantearse una nueva infraestructura de transporte de energía eléctrica que sea económicamente competitiva y que no suponga un gran impacto para la población.

En el mes de febrero de 2018 en España, las energías renovables han sido responsables del 38,5% de la producción total de electricidad, frente a los combustibles fósiles, que han aportado el 37,4% y la energía nuclear el 22%. La energía eólica está siendo la tecnología que más energía ha aportado al mercado español en el primer semestre de 2018, y se espera que en Europa haya una potencia instalada de eólica alrededor de 18,9 %. Para ello, se están instalando muchos parques eólicos, tanto offshore como onshore.

La potencia estimada que se inyectaría en el futuro debido a la integración de las distintas fuentes renovables en Europa es de 1 GW. Para favorecer la integración de esta energía, una posible solución es la creación de una superred, para la que resulta indispensable llevar a cabo una repotenciación del sistema de transporte. Esta superred conectaría diferentes fuentes de energía muy lejanas entre sí a la red existente, al mismo tiempo que contribuye a la seguridad y a la continuidad del suministro eléctrico en los sistemas interconectados.

La Unión Europea está desarrollando un proyecto, llamado Best Paths, en el que se desarrollan posibles soluciones para la creación de esta superred mediante el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan aumentar la capacidad de las redes de transporte en Europa. En este proyecto se persigue encontrar soluciones para realizar una transición de líneas de alta tensión en corriente alterna (HVDC, *High Voltage Direct Current*) a redes de alta tensión en corriente continua (HVAC, *High Voltage Alternating Current*), repotenciar la red existente de corriente alterna y mejorar las redes malladas en corriente alterna mediante la integración de enlaces superconductores de alta potencia.

En la actualidad, ambas tecnologías (HVDC y HVAC), están presentes en la actualidad. El uso de una tecnología u otra depende de varios factores técnicos, económicos y ambientales. Esta superred puede construirse empleando una de estas tecnologías e incluso ambas. Los sistemas de corriente alterna, en las líneas de transporte son una solución altamente desarrollada que marcaría una línea continuista en el diseño de esta nueva superred, mientras que es sabido que los sistemas de corriente alterna son una solución muy fiable para cubrir largas distancias, y que tienen menores pérdidas de potencia en relación con los sistemas de corriente alterna.

Desde un punto de vista económico, los sistemas de corriente alterna requieren una gran inversión inicial debido a la necesidad de convertir la corriente alterna en continua y viceversa al principio y final de la línea, mientras que los sistemas de corriente alterna son más económicos en ese aspecto debido al bajo coste que supone la creación de subestaciones. Sin embargo, los costes de los sistemas de corriente continua pueden llegar a ser inferiores a los costes de los sistemas de corriente alterna si la distancia de transmisión de energía es muy grande. En la figura 1-1 se representa esta relación entre el coste de inversión y la distancia de la línea.

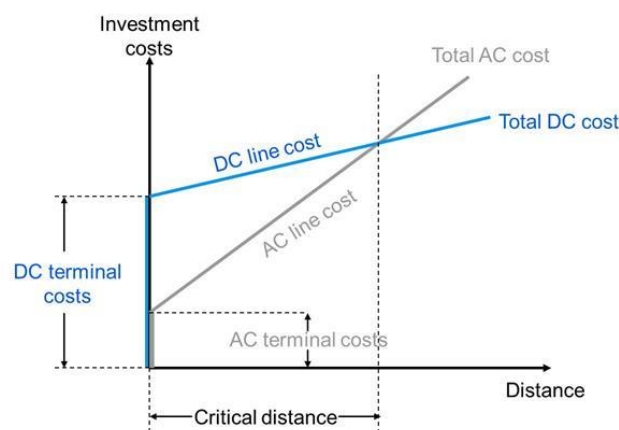


Figura 1-1. Relación de costes entre las tecnologías HVDC y HVAC

Desde un punto de vista meramente estructural, los apoyos para líneas basadas en corriente continua presentan

la ventaja de que para un circuito sólo poseen dos fases en lugar de las tres que poseen las líneas en alterna, lo que conlleva a pensar en que estos sistemas de corriente continua pueden transportar la misma potencia que un sistema de corriente alterna pero empleando apoyos de menor peso, o, para un mismo peso, transportar más potencia. En la figura 1.2. se muestra un esquema en el que cambia un sistema de corriente alterna por uno de continua en un apoyo ya existente, aumentando la potencia capaz de transportar en la línea.

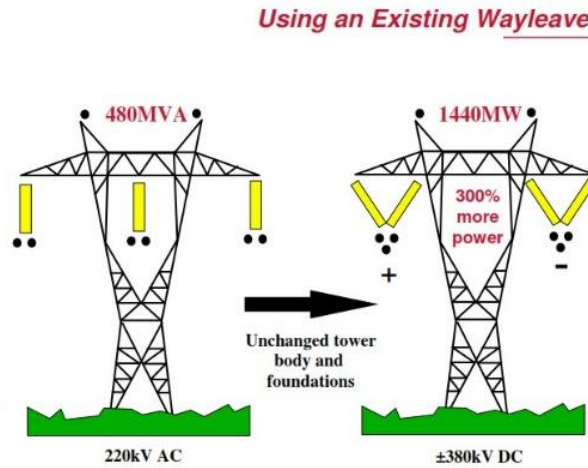


Figura 1-2. Reconversión de un sistema HVAC en HVDC

Es por ello que existen ciertas discrepancias entre los expertos del sector en cuanto a la tecnología que se debe emplear. Una buena solución sería la creación de nuevas líneas basadas en sistemas de corriente continua a la vez que se repotencian las líneas de corriente alterna existente en la actualidad para transportar mayor potencia y así formar un sistema híbrido para poder aprovechar las ventajas que ofrecen ambos sistemas.

1.1 Justificación del proyecto

La Unión Europea, mediante el aumento de las interconexiones entre los países que conforman la Unión Europea, junto con la conexión con el norte de África, hará que el sistema eléctrico formado en el continente sea uno de los mayores del mundo, lo que requiere unas grandes redes para reducir las pérdidas de potencia al cubrir unas distancias tan grandes.

En este Trabajo Fin de Máster se va a plantear una de las posibles soluciones para la creación de esta nueva superred, y consiste en realizar las modificaciones necesarias en los apoyos de las líneas de transporte actuales para poder añadir un nuevo circuito a un mayor nivel de tensión en corriente alterna que permita transportar mayor potencia, de tal forma que no sea necesario la construcción de nuevas líneas aéreas y se puedan reutilizar las ya existentes para transportar mayor potencia.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este Proyecto es comprobar la viabilidad, desde un punto de vista estructural, de una línea de transporte de España, realizando las modificaciones necesarias en la composición del apoyo y la cimentación para que cumpla con la normativa vigente en cuanto a criterios de diseño y sea apto para una posible implantación en una línea de la nueva superred.

Además, otro objetivo de este proyecto es comprobar la viabilidad en cuanto a la instalación de las modificaciones necesarias en los apoyos se refiere, ya que las modificaciones en el montaje del poste requieren un corte del suministro eléctrico de la línea, lo cual no es posible que se prolongue en un largo periodo de tiempo debido a la importancia de este tipo de líneas.

Por último, se va a realizar un estudio económico con objeto de obtener una expresión empírica que permita relacionar la longitud de la línea con el coste de implantación de estas modificaciones, para así establecer un costo aproximado de la repotenciación de las líneas de transporte existentes en la Unión Europea.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1. Clasificación de los apoyos

Los apoyos de las líneas eléctricas aéreas pueden clasificarse según su posición y según su función.

Según la posición, podemos diferenciar dos grandes grupos:

- **Apoyos de alineación:** Se emplean cuando el recorrido de la línea es en línea recta.
- **Apoyos de ángulo:** Se emplean en los vértices de los ángulos que forman dos apoyos de alineación.

Según su función, se pueden diferenciar cinco grupos:

- **Apoyos de suspensión:** Se utilizan con cadenas de suspensión, que tienen la particularidad de poder girar libremente en su punto de sujeción, lo que permite desviaciones en la dirección de la línea y en su perpendicular.
- **Apoyos de amarre:** Se diferencian de los anteriores en que, en lugar de utilizar una cadena de suspensión, utilizan una cadena de amarre.
- **Apoyos de anclaje:** Es un apoyo de amarre, pero que sirve además como punto rígido de la línea. Visualmente no se puede diferenciar un apoyo de amarre de un anclaje.
- **Apoyos Inicio/Fin de línea:** Son situados al principio y al final de la línea. Se emplean cadenas de amarre y soportan esfuerzos transmitidos por los conductores de sólo una de sus caras.
- **Apoyos especiales:** Son apoyos con funciones distintas a los anteriores, como por ejemplo los apoyos tipos bandera.

A continuación, se puede ver en la figura 2-1 imágenes de dos de estos apoyos.



Figura 2-1. Apoyo de suspensión(izquierda) y amarre (derecha)

2.2. Normativa

Para el cálculo y diseño de la nueva línea de 800 kV se va a tener cuenta la siguiente normativa:

Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión: El Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión (RLAT en adelante) y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09, fue aprobado por el Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero. Es de obligado cumplimiento desde el 19 de septiembre de 2008 para todas las instalaciones nuevas. En este proyecto se hará referencia constantemente al RLAT ya que el cálculo mecánico de conductores y las hipótesis de cálculo de apoyos, así como el cálculo de cimentaciones, se ha realizado en base a las prescripciones que recogen este reglamento.

Norma UNE-EN 50341: Es una norma básica aplicable a líneas eléctricas aéreas de tensiones superiores a 45 kV. El RLAT parte de las prescripciones de esta norma, ya que gran parte de los apartados del RLAT se pueden encontrar en esta norma, con la salvedad de que el RLAT nunca hace menciones a líneas con un nivel superior a 400 kV, mientras que esta norma no tiene un límite marcado a la hora de imponer un nivel máximo de tensión. Esta norma ha sido de gran utilidad a la hora de calcular las distancias mínimas de aislamiento para el nuevo circuito de 800 kV, que como se verá en el apartado 4 de este proyecto, posee un método teórico en el que se pueden calcular estas distancias mínimas de aislamiento para cualquier nivel de tensión y de una forma más eficiente que la descrita en el RLAT.

Norma ASCE 10-15: Esta norma proporciona requisitos para el diseño, fabricación, y prueba de miembros y conexiones para las estructuras de transmisión eléctricas de acero. Esta norma especifica criterios de diseño de componentes de estructura (miembros, conexiones y tipos) para resistir las cargas de pandeo o fractura. Entre los principales temas que esta norma trata se pueden destacar el diseño de conexiones en las que se especifican las distancias mínimas de los elementos de sujeción o los miembros estructurales y conexiones empleadas en fundaciones, pero sin lugar a duda para este proyecto el tema más importante de esta norma es el apartado en el que se analizan los esfuerzos en los elementos del apoyo, ya que en el software de cálculo que se va a emplear para el cálculo de los apoyos se va a realizar el estudio conforme a las prescripciones de esta norma.

2.3. Clasificación de tensiones y sobretensiones

El sistema eléctrico se caracteriza normalmente por un sistema de tensión nominal. El sistema de tensión es el valor eficaz de la tensión fase a fase a frecuencia industrial del sistema eléctrico. Las tensiones y sobretensiones aplicadas al aislamiento en servicio se clasifican de la siguiente forma:

Tensiones a frecuencia industrial

Se consideran constantes e iguales a la tensión más elevada del sistema (U_s). Es el mayor valor del voltaje de operación que se produce bajo condiciones normales de operación en cualquier momento y en cualquier punto del sistema (tensión de fase). [VEI 601-01-23]. Estos valores de tensión se muestran en la tabla 2-1 del ITC-LAT 07.

Tabla 2-1. Tensiones a frecuencia industrial

Tensión nominal de la Red (U_n) kV	Tensión más elevada de la Red (U_s) kV	Tensión nominal de la Red (U_n) kV	Tensión más elevada de la Red (U_s) kV
3	3.6	45	52
6	7.2	66	72,5
10	12	110	123
15	17,5	132	145
20	24	150	170
25	30	220	245
30	36	400	420

Sobretensiones temporales

Son sobretensiones oscilatorias a frecuencia industrial en una posición dada, de duración relativamente larga y que no están amortiguadas o muy poco amortiguadas [VEI 604-03-12]. Normalmente se originan debido a faltas, maniobras (por ejemplo, pérdidas de carga), condiciones resonantes, faltas de linealidad (ferro-resonancias) o una combinación de las anteriores. Las sobretensiones temporales representativas tienen una duración de un minuto a frecuencia industrial, pero normalmente no se consideran para las distancias de aislamiento de una línea.

Sobretensiones transitorias

Las sobretensiones transitorias se clasifican de la siguiente manera:

- Sobretensiones de frente lento: se pueden originar debido a faltas, maniobras o caídas de rayos atmosféricos distantes sobre las líneas aéreas. Las sobretensiones de importancia en las líneas aéreas son las sobretensiones debidas a faltas a tierra y las sobretensiones de enganche y reenganche.
- Sobretensiones de frente rápido: se deben principalmente a sobretensiones de rayo debidas a caídas directas de rayos atmosféricos en los conductores de fase o descargas de retorno o, para las tensiones del sistema menores (< 245 kV), tensiones inducidas debidas a caídas de rayos atmosféricos a tierra cerca de la línea.

2.4. Esfuerzos sobre los apoyos

El cálculo mecánico de los apoyos en las líneas aéreas se debe realizar conforme las indicaciones especificadas en el apartado 3.5.3 de la ITC-LAT 07, que será descrita en el próximo apartado de esta memoria. En dicho apartado de la norma se especifican las cuatro hipótesis de cálculo que han de cumplir todos los apoyos. Para cada una de las hipótesis, se especifican los esfuerzos que se deben considerar aplicados sobre el apoyo. Dichos apoyos se pueden clasificar en tres grupos.

- Esfuerzos verticales (V): Los esfuerzos verticales sobre el apoyo se deben a las llamadas cargas permanentes, especificadas en el apartado 3.1.1 de la ITC-LAT-07, y son debidas al peso de los conductores y cables de tierra, aisladores, herrajes y accesorios (seccionadores, interruptores, transformadores, etcétera).
- Esfuerzos longitudinales (L): Los esfuerzos longitudinales son debidos al desequilibrio de tracciones y a rotura de los conductores.

En el caso del desequilibrio de tracciones, los conductores transmiten un esfuerzo longitudinal al apoyo debido a la diferencia de tense del conductor en el vano anterior y posterior del apoyo. Según el reglamento, este esfuerzo longitudinal se obtiene a partir del tipo de apoyo a utilizar, como un porcentaje de las tracciones unilaterales de todos los conductores y cables de tierra.

En la rotura de conductores, se produce un esfuerzo longitudinal que produce una torsión en el apoyo. El conductor que se rompe provoca que se rompa el equilibrio en el apoyo y provoca que el esfuerzo que el apoyo esté soportando más esfuerzo en una cara que en otra, lo que produce un momento torsor que puede ser crítico para el apoyo.

- Esfuerzos transversales (T): Los esfuerzos transversales pueden deberse a la resultante del ángulo en apoyos en ángulo o al viento que actúa sobre cualquier tipo de apoyo, conductores, herrajes, accesorios y aisladores

3 DISEÑO DE LA LÍNEA DE 400 kV

3.1. Situación de la línea

Como punto de partida para comenzar el estudio, se van a considerar dos cantones de una línea aérea de alta tensión ideal formada por apoyos de suspensión y anclaje, los vanos de dichos cantones son de 500 m y no existe desnivel entre los apoyos. Supondremos que la línea discurre a una altura de 800 m sobre el nivel del mar, por lo que se encuentra en Zona B.

En la tabla 3-1 se muestran las principales características de la línea.

Tabla 3-1. Características de la línea de 400 kV

Sistema	Corriente alterna trifásica
Frecuencia	50 Hz
Tensión nominal	400 kV
Tensión más elevada de la red	420 kV
Nº de circuitos	2
Nº de conductores por fase	3
Tipo de conductor	LARL Condor
Nº de conductores compuesto tierra-óptico	2
Tipo de conductor	OPGW 48
Apoyos	Torres metálicas de celosía
Cimentación	Zapatas individuales tipo “pata de elefante”

3.2. Conductores

Como se ha mostrado en la tabla 3-1, los circuitos están formados por conductores tipo Cóndor AW, mientras que los cables de tierra son de tipo OPGW 48. En las tablas 3-2 y 3-3 se muestran las propiedades de estos conductores que serán tenidas en cuenta a la hora de realizar el cálculo mecánico de los conductores.

Tabla 3-2. Características conductor LARL CONDOR

LARL CONDOR	
Sección	454,5 mm ²
Peso	1,457 kg/m
Carga de rotura	12940 daN
Coefficiente de dilatación	0,0000195 1/C°
Módulo de elasticidad	6600 daN/mm ²
Diámetro aparente	27,7 mm
Viento sobre el conductor	1,15694 daN/m
Resultante P+V	2,366 daN
Resultante P+0.5V	1,712 daN
Resultante P+H	2,377 daN (Zona B)

Tabla 3-3. Características conductor OPGW 48

OPGW48	
Sección	180 mm ²
Peso	0,7 kg/m
Carga de rotura	9319,5 daN
Coefficiente de dilatación	0,000015 1/C°
Módulo de elasticidad	11772 daN/mm ²
Diámetro aparente	17 mm
Viento sobre el conductor	1,15694 daN/m
Resultante P+V	1,345 daN
Resultante P+0.5V	0,898 daN
Resultante P+H	1,429 daN (Zona B)

3.3. Apoyo de estudio

Los apoyos empleados en las líneas de transporte en España son diseñados por la compañía Red Eléctrica de España (en adelante REE).

Los apoyos seleccionados para estudio pertenecen a la normalización “D4” para líneas de 400 kV de doble circuito diseñada por REE. Los distintos apoyos que conforman esta serie son:

- D4S1V: Apoyo de alineación con cadenas en V
- D4S2V: Alineación y ángulo 4° con cadena en V
- D4A2: Anclaje y ángulo 15°
- D4A3: Anclaje y ángulo 35°
- D4A4: Anclaje y ángulo 60° y Fin de Línea

La altura total de los apoyos varía entre 44,38 y 79,38 metros, según la base escogida. En la tabla 3-4 se clasifican las distintas alturas posibles:

Tabla 3-4. Alturas apoyos de la serie D4

Bases	Altura a la cruceta inferior desde el suelo	Altura total
A0	19	44,38
AA	24	49,38
AB	29	54,38
AC	34	59,38
AD	39	64,38
AE	44	69,38
AF	49	74,38
AG	54	79,38

Para este proyecto en concreto, se va a estudiar el apoyo de suspensión D4S2V. El motivo por el que sólo se va a estudiar el apoyo de suspensión es porque este tipo de apoyos, por los esfuerzos a los que están sometidos, son los que más facilidad tienen para poder ser adaptados a la nueva disposición de la línea. El diseño de los apoyos de anclaje sería idéntico al de este apoyo, pero se ha decidido no estudiar estos tipos de apoyos con objeto de que el contenido del proyecto no sea monótono y se pueda hacer más hincapié en otros aspectos distintos al cálculo estructural del apoyo.

En la figura 3-1 se muestra un esquema de este apoyo de suspensión.

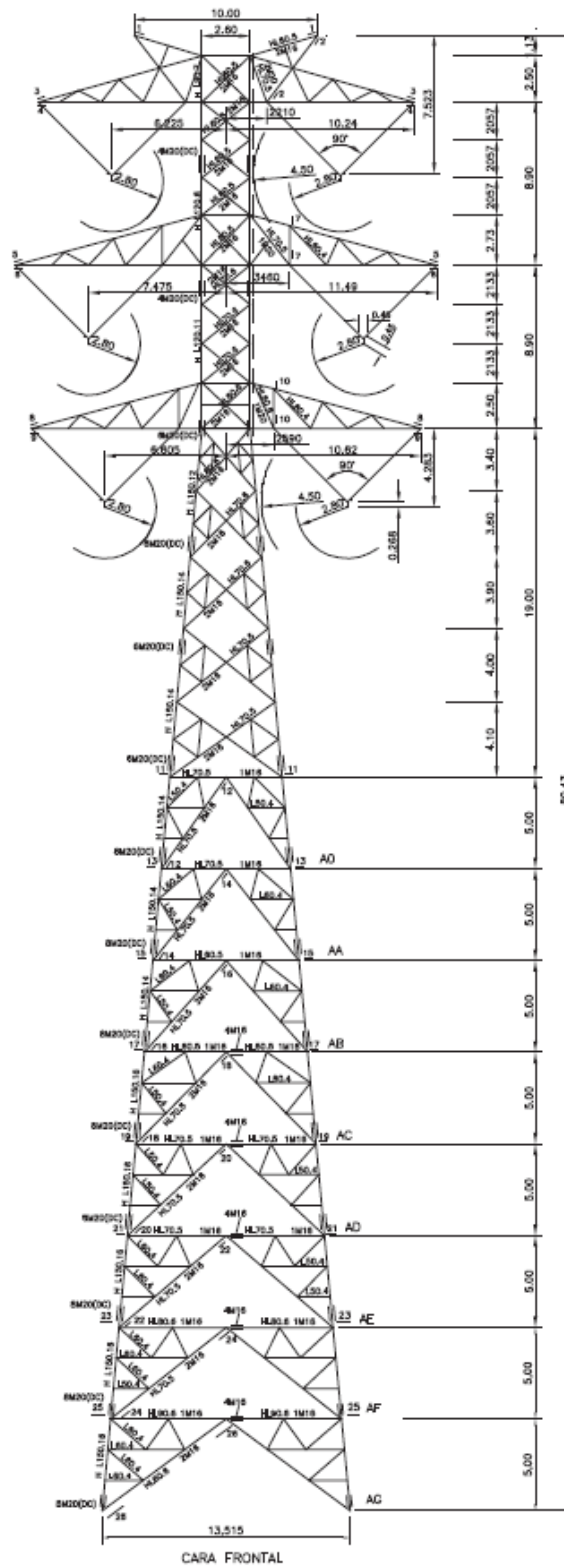


Figura 3-1. Torre D4S2V (Izquierda) y D4A2 (derecha)

En el anexo B se puede ver el árbol de cargas de este apoyo, es decir, los esfuerzos que pueden actuar en el apoyo sin que la estructura llegue a su límite de aprovechamiento.

3.4. Cimentación

Las cimentaciones de estos apoyos están formadas por un macizo de hormigón en masa en forma de pata de elefante con el anclaje de acero y unos pequeños casquillos de acero en la parte inferior de dicho anclaje, comúnmente denominados cleats. En la figura 3-2 se muestra un esquema de este tipo de cimentación y en la tabla 3-5 las dimensiones de esta en un terreno normal.

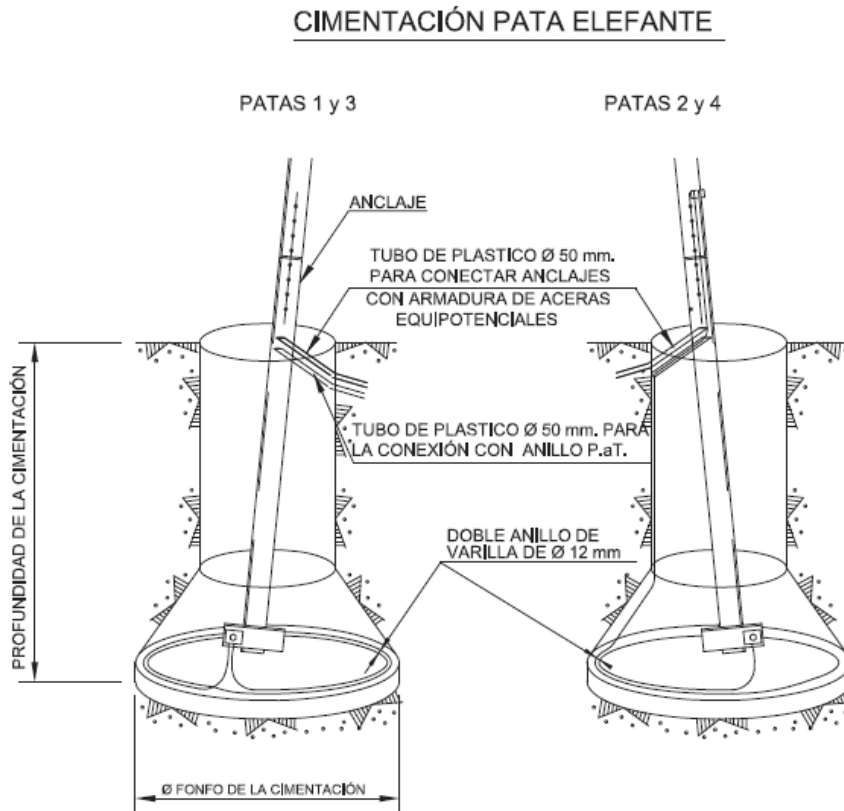


Figura 3-2. Cimentación tipo pata de elefante.

Tabla 3-5. Dimensiones de la cimentación

Macizo de hormigón		Anclaje y cleats	
Diámetro solera	2.5 m	Perfil de anclaje	L150x16
Altura de solera	0.1 m	Perfil de los cleats	L150x16
Diámetro del pilar	1.3 m	Ø Tornillos	20
Altura del pilar	2.8 m	Número de cleats	6
Altura del cono	1.1 m	Tornillos por cleat	2

4 DISEÑO DE LA LÍNEA DE 800/400 kV

4.1. Distancias de aislamiento mínimas

En la norma UNE-EN 50341-1:2017 se consideran cuatro tipos de distancias mínimas de aislamiento en el aire, que se resumen en la tabla 4-1:

Tabla 4-1. Clasificación de las distancias de aislamiento

Distancia mínima de aislamiento en el aire		
	Distancia mínima de aislamiento requerida para evitar la formación de descargas disruptivas entre:	
	Conductores de fase y objetos puestos a tierra.	Conductores de fase.
Durante sobretensiones de frente rápido o lento	D_{el}	D_{pp}
A tensión de frecuencia industrial	$D_{50Hz\ p\ e}$	$D_{50Hz\ p\ p}$

Siendo:

D_{el} es la distancia de aislamiento en el aire mínima especificada, para prevenir una descarga disruptiva entre conductores de fase y objetos a potencial de tierra en sobretensiones de frente lento o rápido. D_{el} puede ser tanto interna, cuando se consideran distancias del conductor a la estructura de la torre, como externas, cuando se considera una distancia del conductor a un obstáculo.

D_{pp} es la distancia de aislamiento en el aire mínima especificada, para prevenir una descarga disruptiva entre conductores de fase durante sobretensiones de frente lento o rápido. D_{pp} , al igual que $D_{50Hz\ p\ e}$ y $D_{50Hz\ p\ p}$ son una distancia interna.

Para el cálculo de D_{el} y D_{pp} se suele emplear el **método empírico** en que estas distancias se han obtenido basándose en un análisis de los valores usados comúnmente en Europa, los cuales han sido probados que son lo suficientemente seguros para el público en general. Este método es comúnmente utilizado en el ámbito profesional, pero para este proyecto, en el que existe un circuito con una tensión nominal de 800 kV, no disponemos de valores que nos permitan conocer la distancia de aislamiento necesaria, ya que el valor máximo de tensión U_s estudiado ha sido 765 kV.

Por tanto, se ha de recurrir al **método teórico** descrito en el apartado 5.5.2. y detallado en el anexo E de la norma UNE-EN 50341-1:2017. Este anexo proporciona un método teórico para determinar, para cada sobretensión transitoria (frente rápido y lento) y para la tensión a frecuencia industrial, la distancia de aislamiento en el aire mínima para cumplir con la tensión a soportar requerida para ciertas configuraciones en el aire y para un rango de altitudes dadas. Las sobretensiones temporales no se tienen en cuenta. Cuando se aplica este método, pueden usarse las tablas 5.3, 5.4 o 5.5 para condiciones normales de referencia (configuraciones en el aire y altitudes), o la formulación general de la tabla E.5 del anexo E para condiciones fuera de las normales. En este caso, se van a calcular estas distancias mediante la formulación general y luego se compararán los resultados obtenidos con los de las tablas 5.3, 5.4 y 5.5 de la norma.

La tabla 4-2 se corresponde con la tabla 5 del anexo E de la norma UNE-EN 50341-1:2017 y contiene las expresiones para el cálculo de las distancias mínimas de aislamiento en el aire.

Tabla 4-2. Expresiones de las distancias de aislamiento mínimas

	Fase a tierra	Fase a fase
	D_{el}	D_{pp}
Para sobretensiones de frente rápido	$D_{el} = \frac{U_{90\%_{ff_is}}}{530 k_a K_{z_ff} K_{g_ff}} = \frac{1}{k_a} = \frac{K_{g_ff_is}}{K_{g_ff}} d_{is}$	$D_{pp} = \frac{1,2 U_{90\%_{ff_is}}}{530 k_a K_{z_ff} K_{g_ff}}$
d_{is}	es la distancia de aislamiento entre los extremos de la cadena de aisladores;	
K_{g_ff}	es el factor de separación para el aire para impulso tipo rayo, que expresado en función de impulso tipo maniobra, $K_g, K_{g_ff} = 0,74 + 0,26 K_g$;	
$K_{g_ff_is}$	es el factor de separación para el aire de las cadenas de aisladores;	
K_{z_ff}	es el factor de desviación de la distribución de la tensión soportada en el aire para sobretensiones de frente rápido, $K_{z_ff} = 0,961$;	
k_a	es el factor atmosférico de acuerdo a la tabla E.2;	
$U_{90\%_{ff_is}}$	es el 90% de la tensión soportada por las cadenas de aisladores instaladas en una línea para impulsos tipo rayo.	
	D_{el}	D_{pp}
Para sobretensiones de frente lento	$D_{el} = 2,174 \left(\exp \left(\frac{K_{cs} U_{e2\%_{sf}}}{1080 k_a K_{z_sf} K_{g_sf}} \right) - 1 \right)$	$D_{pp} = 2,174 \left(\exp \left(\frac{1,4 K_{cs} U_{e2\%_{sf}}}{1080 k_a K_{z_sf} K_{g_sf}} \right) - 1 \right)$
K_{cs}	es el factor de coordinación estadístico;	
K_{g_sf}	es el factor de separación para impulsos tipo maniobra en el aire, $K_{g_sf} = K_g$ de acuerdo a la tabla E.2;	
K_{z_sf}	es el factor de desviación de la distribución de la tensión soportada en el aire para sobretensiones de frente lento, $K_{z_sf} = 0,922$;	
k_a	es el factor atmosférico de acuerdo a la tabla E.2;	
$U_{e2\%_{sf}}$	es el 2% de la sobretensión de frente lento entre fase y tierra (es decir, la sobretensión de frente lento que tiene una probabilidad del 2% de ser excedida).	
	$D_{50Hz_p_e}$	$D_{50Hz_p_p}$
Para tensiones de frecuencia industrial	$D_{50Hz_p_e} = 1,642 \left(\exp \left(\frac{U_s}{750\sqrt{3} k_a K_{z_pf} K_{g_pf}} \right) - 1 \right)^{0,83}$	$D_{50Hz_p_p} = 1,642 \left(\exp \left(\frac{U_s}{750 k_a K_{z_pf} K_{g_pf}} \right) - 1 \right)^{0,83}$
K_{g_pf}	es el factor de separación a frecuencia industrial en el aire, expresado en función del factor de separación de impulsos tipo maniobra, $K_g, K_{g_pf} = 1,35 K_{g_sf} - 0,35 K_{g_sf}^2$;	
K_{z_pf}	es el factor de desviación de la distribución de la tensión soportada en el aire para tensiones a frecuencia industrial, $K_{z_pf} = 0,91$;	
k_a	es el factor atmosférico de acuerdo a la tabla E.2;	
U_s	es la tensión más alta del sistema (kV rms).	

A continuación, se van a detallar los valores que adoptan cada una de las variables de esta tabla:

Tensiones $U_{90\%_{ff_is}}$, $U_{e2\%_{sf}}$ y U_s

Estos valores de tensión se obtienen a partir de la tensión nominal de la línea.

Para el circuito de 400 kV:

- $U_{90\%_{ff}} = 1550$ kV
- $U_{e2\%} = 1050$ kV
- $U_s = 420$ kV

Para el circuito de 800 kV

- $U_{90\%_{ff}} = 2000$ kV
- $U_{e2\%} = 1500$ kV
- $U_s = 800$ kV

Factor atmosférico k_a

El factor atmosférico, k_a , es generalmente válido para altitudes de hasta 1000 m. Todos los valores de k_a se indican en la tabla 4-3. k_a tiene diferentes valores para sobretensiones de frente lento y rápido y para tensiones de frecuencia industrial, así como para sus distancias de aislamiento fase a tierra y fase a fase.

Tabla 4-3. Valor del factor atmosférico k_a

Factor atmosférico, k_a					
Altitud (m)	Hasta 200 kV	De 201 kV hasta 400 kV	De 401 kV hasta 700 kV	De 701 kV hasta 1100 kV	Más de 1100 kV
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	0,994	0,995	0,997	0,998	0,999
300	0,982	0,985	0,990	0,993	0,996
500	0,970	0,975	0,982	0,987	0,992
1000	0,938	0,946	0,959	0,970	0,978
1500	0,904	0,915	0,934	0,948	0,960
2000	0,870	0,883	0,906	0,923	0,938
2500	0,834	0,849	0,875	0,896	0,913
3000	0,798	0,815	0,844	0,867	0,885

Para este proyecto se ha considerado que la línea estará situada en Zona B, por tanto, se va a escoger la altitud más alta (1000 m) para calcular las distancias de aislamiento.

Para el circuito de 400 kV:

Sobretensiones de frente rápido y lento:

Fase a tierra y fase a fase..... $k_a = 0.978$

Tensiones de frecuencia Industrial

Fase a tierra $k_a = 0.946$

Fase a fase $k_a = 0.959$

Para el circuito de 800 kV:

Sobretensiones de frente rápido y lento:

Fase a tierra y fase a fase $k_a = 0.978$

Tensiones de frecuencia Industrial

Fase a tierra $k_a = 0.959$

Fase a fase $k_a = 0.970$

Factor de desviación K_d

El factor de desviación depende del tipo de tensión (frente rápido, lento o frecuencia industrial), y viene expresado en la tabla 4-4 y en la tabla E13 de la norma.

Tabla 4-4. Valores del factor de desviación K_z

Tipo de tensiones	Tensión soportada requerida en el aire U_{rw}	Desviación estándar Z	Factor de desviación K_z
Sobretensiones de frente rápido (rayos)	$U_{rw} = U_{90\%} = U_{50\%} - 1,3 Z$	$0,03 U_{50\%}$	$K_{z_ff} = 0,961$
Sobretensiones de frente lento (maniobras)	$U_{rw} = U_{90\%} = U_{50\%} - 1,3 Z$	$0,06 U_{50\%}$	$K_{z_sf} = 0,922$
Frecuencia industrial	$U_{rw} = U_{100\%} = U_{50\%} - 3 Z$	$0,03 U_{50\%}$	$K_{z_pf} = 0,910$

Factor de separación K_g

Para cada tipo de tensión, el factor de separación puede expresarse en función del factor de separación para sobretensiones de frente lento:

- Sobretensiones de frente lento..... $K_{g_{sf}}$
- Sobretensiones de frente rápido $K_{g_{ff}} = 0.74 + 0.26 K_{g_{sf}}$
- Tensiones de frecuencia industrial..... $K_{g_{pf}} = 1.35 K_{g_{sf}} - 0.35 K_{g_{sf}}^2$

Los valores de separación, $K_{g_{sf}}$, a usar para sobretensiones de frente lento dependen de la configuración. En la tabla 4-5 se consideran cuatro tipos de configuraciones.

Tabla 4-5. Valores del factor de separación K_g

Naturaleza de la distancia de aislamiento en el aire	Configuración	Factores de separación para sobretensiones de frente lento $K_{g_{sf}} = K_g$
Distancias de aislamiento externas	Conductor-obstáculo (Distancias de aislamiento de seguridad).	1,30
Distancias de aislamiento internas	Conductor-ventana Por ejemplo, separación de aire entre un conductor en el interior de una ventana de la torre y la estructura de la torre. • Cadena vertical o cadena en V en el interior de la ventana.	1,25
	Conductor-estructura Por ejemplo, separación de aire entre un conductor, conectado a un aislador con oscilación libre en el extremo de una cruceta, y la estructura de la torre. • Cadena vertical en el extremo de una cruceta. • Cadenas en V.	1,45
	Conductor-conductor	1,60

Estos valores son independientes de la tensión del circuito, por tanto:

Sobretensiones de frente rápido

Conductor-obstáculo: $K_{g_ff} = 1.078$

Conductor-ventana: $K_{g_ff} = 1.065$

Conductor-estructura:	$K_{g_ff} = 1.117$
Conductor-conductor:	$K_{g_ff} = 1.156$
<i>Sobretensiones de frente lento:</i>	
Conductor-obstáculo:	$K_{g_sf} = 1.3$
Conductor-ventana	$K_{g_sf} = 1.25$
Conductor-estructura.....	$K_{g_sf} = 1.45$
Conductor-conductor	$K_{g_sf} = 1.6$
<i>Tensiones de frecuencia industrial:</i>	
Conductor-obstáculo:	$K_{g_sf} = 1.163$
Conductor-ventana	$K_{g_sf} = 1.141$
Conductor-estructura	$K_{g_sf} = 1.221$
Conductor-conductor.....	$K_{g_sf} = 1.264$

Una vez conocidos todos los valores de las expresiones de la tabla 4-2, se procede a calcular las distintas distancias de aislamiento para ambos circuitos. Estos valores se muestran en las tablas 4-6 y 4-7.

Tabla 4-6. Distancias de aislamiento para la tensión de 800 kV

	Conductor - Obstáculo	Conductor- Ventana	Conductor- Estructura	Conductor- Conductor
	$K_{g_sf}=1.3$	$K_{g_sf}=1.25$	$K_{g_sf}=1.45$	$K_{g_sf}=1.6$
Frente Rápido	3.724 m	3.770 m	3.594 m	4.167 m
Frente Lento	5.369 m	5.754 m	4.458 m	6.776 m
D50Hz	-	1.443 m	1.338 m	2.427 m

Tabla 4-7. Distancias de aislamiento para la tensión de 400 kV

	Conductor - Obstáculo	Conductor- Ventana	Conductor- Estructura	Conductor- Conductor
	$K_{g_sf}=1.3$	$K_{g_sf}=1.25$	$K_{g_sf}=1.45$	$K_{g_sf}=1.6$
Frente Rápido	2.886 m	2.921 m	2.785 m	3.23 m
Frente Lento	3.012 m	3.203 m	2.572 m	3.68 m
D50Hz	-	0.751 m	0.703 m	1.165 m

4.2. Modificación de la cabeza del apoyo original

Para que el apoyo pueda albergar las dos fases de 400 kV y además el nuevo circuito de 800 kV, se debe modificar el diseño original del apoyo sustituyendo la cabeza original por otra en la que se puedan pasar estos tres circuitos y que además cumplan con las distancias mínimas de aislamiento calculadas en el apartado anterior.

Entre los posibles diseños que se pueden plantear para estos circuitos, parece que el más conveniente es realizar una cabeza similar a la de los apoyos tipo Delta (también llamados Cara de Gato). Estos apoyos suelen albergar un simple circuito en el que las tres fases se encuentran a la misma altura, con dos hilos de tierra que aseguran la protección de los conductores. En la figura 4-1 se puede ver la geometría de este tipo de apoyos.



Figura 4-1. Apoyo tipo Delta (cara de gato)

Sin embargo, en este nuevo apoyo se pretende albergar tres circuitos en lugar de uno. Para poder albergar estos tres circuitos, se pretende realizar un diseño en el que la cabeza, en lugar de tener una viga como en el apoyo de la figura anterior, tenga tres vigas, una para cada circuito. En Sevilla, existe una línea de 220 kV que tiene un diseño como el planteado para este nuevo apoyo. En la figura 4-2 se puede ver este apoyo.



Figura 4-2. Apoyo de 220 kV con tres vigas

Esta geometría puede valer como punto de partida para el diseño de esta nueva cabeza, al menos en la forma de la cabeza, ya que este apoyo en la cara línea su conicidad es cero mientras que el nuevo apoyo la cabeza deberá tener una conicidad negativa para que pueda unirse al fuste original, como en el apoyo de la figura 4-1.

En la figura 4-3 se muestra en color rojo la parte de la estructura que se va a retirar y en negro la parte que se va a mantener del poste original, en principio. El motivo por el que se va a retirar también parte del fuste es porque la nueva cabeza va a tener una gran anchura (incluso mayor que la de los apoyos de las dos imágenes anteriores

debido a la gran distancia de aislamiento conductor-estructura que hay que dejar en el circuito de 800 kV) y la sección del fuste debe de ser lo más ancha posible para que pueda resistir a las torsiones que se puedan producir en la cabeza, por lo que la sección de la unión fuste cabeza es un punto crítico que es de vital importancia a la hora de calcular el nuevo apoyo.

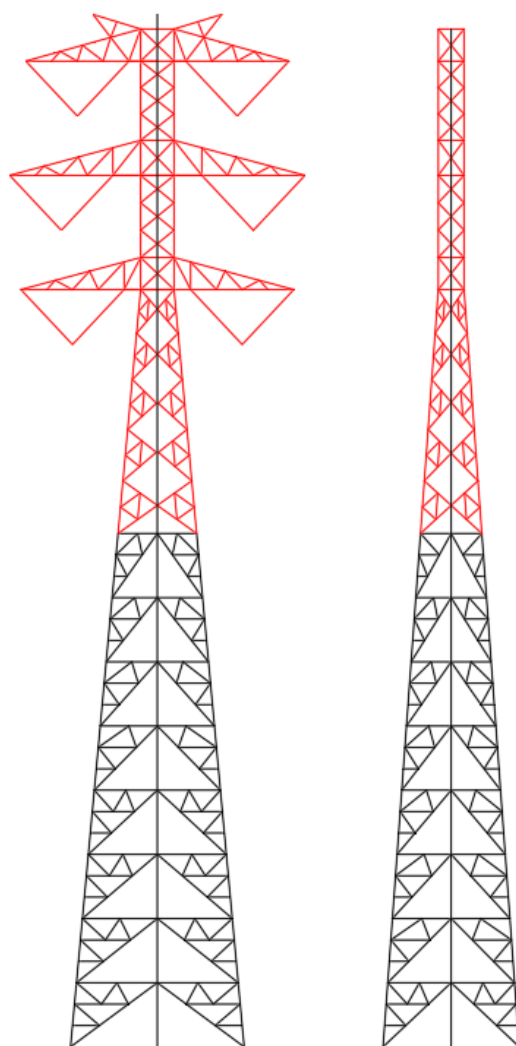


Figura 4-3. Parte de la torre que se va a retirar para instalar la nueva cabeza

4.3. Diseño de la nueva cabeza

La nueva cabeza estará formada por tres vigas que formarán un montaje denominado en triple bóveda. En la viga superior se ubicará el circuito de 800 kV mientras que en los otros dos niveles se ubicarán los circuitos de 400 kV de la torre original.

Un principio fundamental a la hora de diseñar esta nueva cabeza es que las fases de la altura más baja se encuentren al menos a la misma altura que en apoyo original, ya que, si se encontrase a una altura inferior, probablemente no se cumpliría con el RLAT y los conductores en su punto de flecha máxima se encontrarían a una distancia al suelo inferior a la reglamentaria para un tense igual al de la línea original, por lo que habría que realizar un recrecido en la base del apoyo, lo cual no es admisible si se va a diseñar el nuevo apoyo desde cero.

La figura 4-4 muestra el diseño de la nueva cabeza para el apoyo de suspensión.

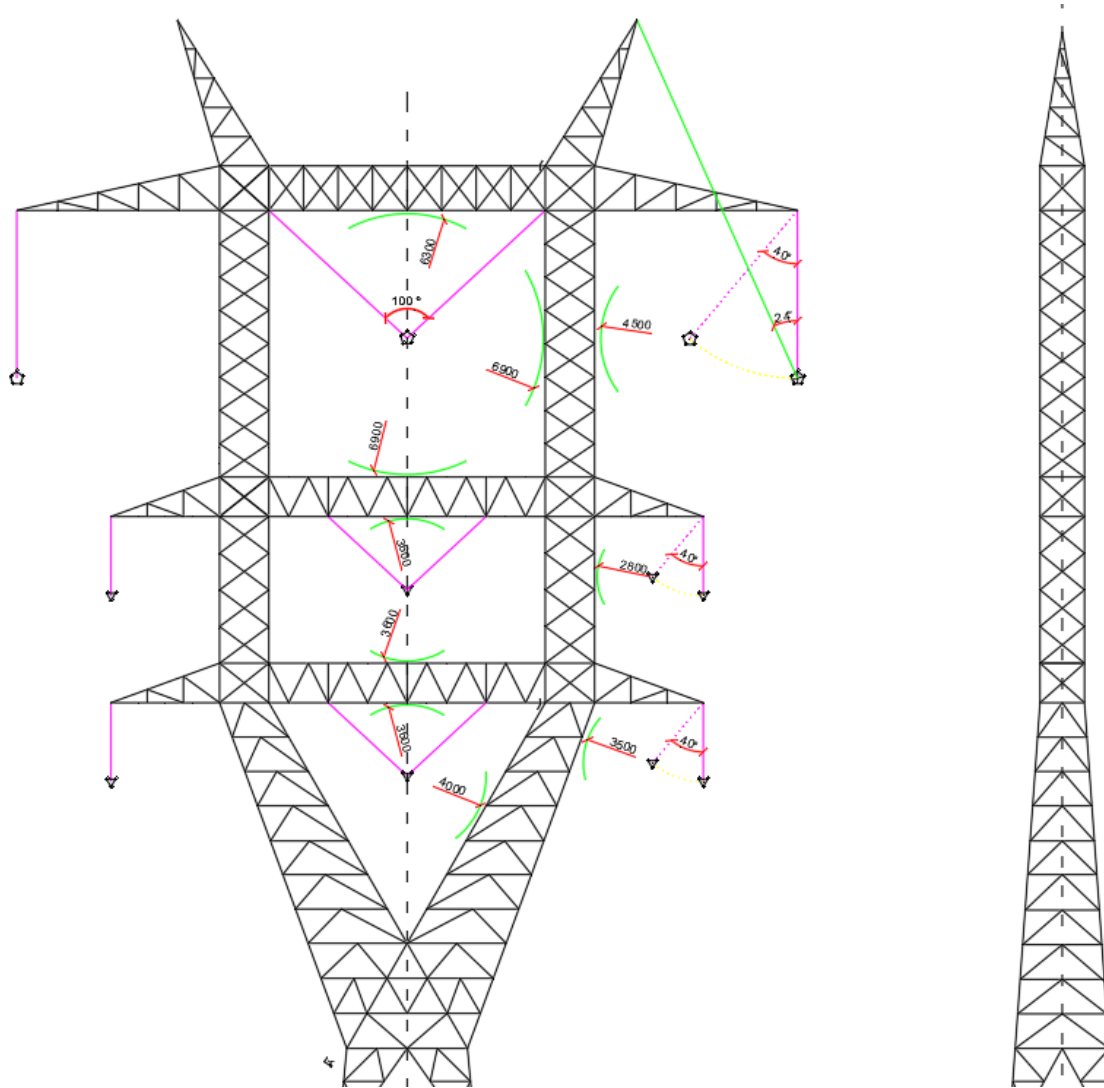


Figura 4-4. Esquema de la nueva cabeza

Como se puede ver en el esquema de la figura anterior, se ha diseñado la cabeza con dos pilares a los lados que están unidos a tres vigas que soportan la fase central de cada uno de los tres circuitos.

Para reducir al máximo posible la anchura de las crucetas, se van a emplear aisladores verticales en lugar de los aisladores en V de la torre original, salvo en la fase central de cada circuito donde sí que serán en V. La distancia mínima de aislamiento se produce cuando el ángulo de desvío de la cadena de aisladores es superior a 40° .

El castillete para el hilo de tierra forma un ángulo de 24° con el conductor, por lo que se cumple la condición de que el ángulo de seguridad sea inferior a los 35° que se emplea en España. Además, el castillete se ha diseñado con hacia afuera para que la distancia entre el cable de tierra con los conductores central y exterior sean iguales.

La unión entre la parte recta de la cabeza y el fuste se ha diseñado de forma análoga a los apoyos tipo Delta vistos en la sección anterior. Como se puede ver también el esquema, con este diseño se respetan todas las distancias de aislamiento calculadas anteriormente, ya que las cotas de los arcos dibujados en verde son siempre superiores a los valores obtenidos en las tablas 4-6 y 4-7.

5 CÁLCULO DE LA LÍNEA DE 800/400 kV

5.1. Tabla de tendido y esfuerzos en el apoyo

En este apartado se van a analizar los conductores y el cable de tierra de la nueva línea, con objeto de saber las sollicitaciones en los apoyos debidas a los esfuerzos que los distintos conductores ejercen sobre estos. Para ello, el primer paso es conocer los conductores en esta nueva línea.

Para el circuito de 400 kV se va a mantener el conductor LARL Condor de la línea original, al igual que se mantendrán los cables de tierra OPGW 48 originales. El único conductor que hay que añadir a la línea es el de 800 kV, que será un conductor LARL Cardinal con disposición “quíntuplex”. Se ha escogido este conductor y esta disposición a partir de otros proyectos de esta Escuela en los que se ha realizado el cálculo eléctrico en este nivel de tensión. A continuación, se muestra en la tabla 5-1 las principales propiedades de este conductor. (las propiedades del conductor LARL Condor e hilo de tierra OPG 48 se pueden ver en las tablas 3-2 y 3-3 respectivamente).

Tabla 5-1. Características conductor LARL CARDINAL

LARL CARDINAL	
Sección	547,3 mm ²
Peso	1.755 kg/m
Carga de rotura	15333 daN
Coefficiente de dilatación	0,0000195 1/C°
Módulo de elasticidad	6572 daN/mm ²
Diámetro aparente	30,42 mm
Viento sobre el conductor	2,07025 daN/m
Resultante P+V	2,693 daN
Resultante P+0.5V	2,009 daN
Resultante P+H	2,714 daN (Zona B)

Una vez elegidos los conductores de la nueva línea, se procede a calcular la tabla de tendido de la línea. Esta tabla proporciona los valores de la flecha máxima y la componente horizontal de la tensión (en adelante Tense) en distintas condiciones de temperatura. El cálculo de esta tabla de tendido importante en el cálculo de la nueva línea, ya que además de conocer la flecha máxima y el tense, también nos permite conocer el valor del tense máximo al que está sometido el conductor.

El tense en un valor característico de cada conductor, ya que se puede escoger un mayor tense cuanto mayor es la carga de rotura de este. El RLAT establece la hipótesis de tracción máxima del conductor para cada una de las zonas especificadas de forma diferente según se trate de líneas de categoría especial o del resto de categorías.

La tracción máxima del conductor en una línea de categoría especial en Zona B no resultará superior a su carga de rotura dividida por 2,5 en las siguientes condiciones:

- Sobrecarga de viento de 140 km/h a una temperatura de -10 °C
- Sobrecarga de hielo para la zona B y viento de 60 km/h a una temperatura de -15 °C

En el RLAT también existe una comprobación de fenómenos vibratorios en la que se recomienda que la tracción a una temperatura de 15% no supere el 22% de la carga de rotura si realizase un estudio de amortiguamiento y se instalan dispositivos anti vibratorios como los amortiguadores o los separadores, o bien no se supere el 15% de la carga de rotura en el resto de los casos. Con este fin, las compañías eléctricas particularizan unos límites de tracción mecánica del conductor habitual cada día normalizado a 15° (valor EDS Every Day Stress) y también la tracción del conductor en horas frías (valor CHS Cold Hour Stress normalizado generalmente a 5°. Estos valores se expresan en tanto por ciento de la rotura del conductor y depende de la zona y del tipo de conductor. Para este proyecto se va a tener en cuenta sólo el EDS.

El tense máximo es un parámetro de diseño que generalmente elige el proyectista, siempre menor que el valor de la carga de rotura dividida entre el coeficiente de seguridad (2,5). Para los tres conductores de esta línea, los tenses máximos a una temperatura de -15° más la acción del hielo con viento a 60 km/h y el valor en tanto por ciento del EDS a 15°C son:

- LARL Cardinal: 4600 daN, EDS = 21 %
- LARL Condor: 3973 daN, EDS = 20 %
- OPGW 48: 2358 daN, EDS = 20 %

En principio, el tense máximo se dará la temperatura de $-15^{\circ}\text{C} + H + 1/2V$. Aplicando la ecuación del cambio de condiciones para el estado inicial a $-15^{\circ}\text{C} + H + 1/2V$, se puede obtener el valor del tense para otras condiciones de temperatura y otros coeficientes de sobrecarga. En el caso de que, para otra condición, como por ejemplo el EDS a 15°C , se obtuviese un tense superior al de la condición de inicial, se asignaría el valor límite a esa condición y se volvería a recalcular toda la tabla de tendido bajo las nuevas condiciones. Este proceso es muy importante ya que una mala realización de la tabla de tendido conlleva a calcular de forma errónea el esfuerzo que los conductores ejercen sobre el apoyo, lo que provocaría que el estudio que se va a realizar en el próximo apartado fuese erróneo.

Para el cálculo de la tabla de tendido, se ha recurrido al software Postewin, un programa de cálculo de líneas creado por la empresa POSTEMEL S.L. con el que se pueden realizar de una forma rápida y sencilla cálculos de tablas de tendido y esfuerzos en sobre los apoyos, entre otras muchas herramientas. Este programa además ajusta la ecuación del conductor en forma de catenaria en lugar de parábola, que, aunque en vanos de 500 metros como estos sin desnivel, el error entre la ecuación de la catenaria y la ecuación de la parábola es despreciable. Este programa para la ecuación del cambio de condiciones no emplea la fórmula aproximada que aparecen en gran parte de la bibliografía, sino que realiza en método de Newton-Raphson para hacer un ajuste de la función.

En este programa se han diseñado dos cantones formados por sólo 4 apoyos, el primero de ellos es un apoyo existente que el programa no lo calcula, y que sólo sirve para indicar el vano anterior del primer apoyo que se quiere estudiar, el segundo apoyo es un apoyo de suspensión como el que se está estudiando, el tercero es un apoyo de anclaje de alineación, y por último el cuarto es un apoyo fin de línea. En la figura 5-1 se muestra una captura de pantalla del programa a la hora de introducir los distintos apoyos.

Apoyo número	Tipo	Angulo Comp-ºCent.	Altura metros	Vano ant metros	Vano post metros	Vano Medio metros	N
1	EXIST.		50	----	500,00	250,00	0,0000
2	AL		50	500,00	500,00	500,00	0,0000
3	AN		50	500,00	500,00	500,00	0,0000
5	FL		50	500,00	----	250,00	0,0000

Figura 5-1. Datos introducidos en Postewin para el cálculo de la tabla de tendido y esfuerzos en apoyos

Teniendo en cuenta el RLAT para líneas de categoría especial, se calcula la tabla de tendido y los esfuerzos en los conductores de forma simultánea.

El esfuerzo que los conductores ejercen sobre el conductor viene definido en el Apartado 3.5.3 del RLAT, anteriormente en el apartado 3 se mencionó los tres tipos de esfuerzos que se consideran en el cálculo mecánico de los apoyos. En este apartado también se definen las distintas hipótesis de cálculo que se tienen en cuenta para cada tipo de apoyo dependiendo de su función (suspensión de alineación o en ángulo, anclaje en de alineación o de ángulo...), de la zona en la que se encuentre y de la categoría de la línea.

Para esta línea de transporte, la categoría es especial, y se encuentra en la zona B. Como se ha visto en la anterior figura, en el programa Postewin se han introducido 3 tipos de apoyos, por lo que el programa devolverá los esfuerzos de cada uno de estos apoyos según las prescripciones del RLAT. En el anexo C se muestran los informes obtenidos en el programa Postewin, tanto de la tabla de tendido como de los esfuerzos de cada conductor en cada hipótesis.

En esta memoria se va a hacer una descripción detallada sobre las hipótesis de cálculo en el apoyo de suspensión de alineación, es decir, no existe un ángulo que afecte a los esfuerzos del conductor sobre la estructura. En la tabla 5-2 se muestra un resumen de estas hipótesis de cálculo para un apoyo de suspensión de una línea de categoría especial.

Tabla 5-2. Hipótesis de cálculo para un apoyo de suspensión en una línea de categoría especial

Tipo de Apoyo	Tipo de Esfuerzo	1ª Hipótesis Viento	2ª Hipótesis (Hielo + Viento)	3ª Hipótesis (Desequilibrio de Tracciones)	4ª Hipótesis (Rotura de Conductores)
Suspensión de alineación	V	Cargas permanentes (Aptdo. 3.1.1) considerando los conductores y cables de tierra sometidos a una sobrecarga de viento (Aptdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad de 140 km/h	Cargas permanentes (Aptdo. 3.1.1) considerando los conductores y cables de tierra sometidos a una sobrecarga de hielo mínima (Aptdo. 3.1.3) y a una sobrecarga de viento (Aptdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad de 60 km/h		
	T	Esfuerzo del viento (Aptdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad de 140 km/h, sobre: - Conductores y cables de tierra - Apoyo	Esfuerzo del viento (Aptdo. 3.1.2) correspondiente a una velocidad mínima de 60 km/h y sobrecarga de hielo (Aptdo.3.1.3), sobre: - Conductores y cables de tierra - Apoyo	-	-
	L	-	-	Desequilibrio de tracciones (Aptdo. 3.1.4.1)	Rotura de conductores y cables de tierra (Aptdo. 3.1.5.1)

En la primera hipótesis (viento), para apoyos a nivel, no hay que tener en cuenta el la sobrecarga de viento a 140 km/h en las cargas permanentes, ya que estas dependerán exclusivamente de la longitud del vano y del peso conductores, cables de tierra y cadenas de aisladores. Para las cargas transversales sí que hay que tener en cuenta esta temperatura, que para la zona B es de -10 °C y un viento de 140 km/h.

En la segunda hipótesis (hielo + viento) a las cargas permanentes y a la carga transversal hay que añadirle el peso del manguito de hielo que se forma en el conductor y considerar un viento de 60 km/h en lugar de 140 km/h para la carga transversal. Este valor de la carga vertical se mantiene para la tercera y cuarta hipótesis. Además del viento sobre el conductor, para estas dos hipótesis hay que tener en cuenta la carga de viento sobre el apoyo, que será calculada en el próximo apartado.

En la tercera (desequilibrio) y cuarta hipótesis (rotura del conductor) el esfuerzo transversal para apoyos alineados es cero, y la carga que afecta es la carga longitudinal. En la tercera hipótesis el valor del esfuerzo longitudinal viene definido por el RLAT y es, para un apoyo de alineación en suspensión en una línea superior a 66 kV, el 15% del tense máximo del conductor ($-15^{\circ}\text{C} + H + 0.5V$).

En la cuarta hipótesis, se debe calcular la rotura de un solo conductor (para apoyos de suspensión) de cada una de las fases que componen la línea, por tanto, la cuarta hipótesis se divide en 9 hipótesis, una para cada fase de los tres circuitos. El valor del esfuerzo longitudinal también se expresa en un tanto por ciento del tense máximo del conductor ($-15^{\circ}\text{C} + H + 0.5V$), según el número de conductores que haya por fase. Para el conductor Condor, el valor del esfuerzo longitudinal es el 75% del tense máximo del conductor, mientras que para el conductor Cardinal y el hilo de tierra el esfuerzo longitudinal es el 100% del tense de cada uno de estos conductores. El motivo por el que el circuito tríplex tiene un porcentaje menor es porque al romperse un conductor, la cadena de suspensión pivota y gira un ángulo mayor que cuando el número de conductores es mayor, por eso este porcentaje es menor cuando menor es el número de conductores por fase.

Tras haber descrito las condiciones de tendido y los esfuerzos para este tipo de apoyo, se procede a calcular en el software Postewin la tabla de tendido de cada conductor y los esfuerzos de cada fase para cada hipótesis. En el anexo C se muestran los informes que se exportan del programa con las tablas de tendido de conductor, los esfuerzos de cada conductor en cada fase para los distintos tipos de apoyos y un resumen con las cargas de los conductores Condor y Cardinal. A modo de resumen, en la tabla 5-3 se recoge de forma breve los valores que han tenido en cuenta a la hora de calcular el nuevo apoyo de suspensión con el circuito de 800 kV.

Tabla 5-3. Esfuerzos por conductor en el apoyo de suspensión.

Esfuerzos en el apoyo de suspensión									
Conductor	Cardinal			Condor			OPGW 48		
Tense máximo	4600 daN			3973 daN			2358 daN		
	L (daN)	T (daN)	V (daN)	L (daN)	T (daN)	V (daN)	L (daN)	T (daN)	V (daN)
1ª Hipótesis	0	1110	1047	0	986	823	0	578	343
2ª Hipótesis	0	334	1637	0	313	1350	0	246	714
3ª Hipótesis	690	0	1637	596	0	1350	354	0	714
4ª Hipótesis	2300	0	1637	1987	0	1350	1179	0	714

Una vez se tienen estos esfuerzos, se disponen de todos los datos para comenzar el diseño del nuevo apoyo, aunque primero se debe empezar modelando la estructura del apoyo original.

5.2. Estructura metálica

Una vez ha sido diseñada la nueva cabeza para el nuevo circuito de 800 kV y se han calculado los esfuerzos que los conductores ejercen sobre el apoyo, hay que modelar el apoyo en un software de cálculo para dimensionar esta nueva cabeza y también saber si el fuste necesita algún refuerzo para que pueda soportar las cargas de este nuevo circuito de 800 kV. Lo lógico sería tener que reforzar el fuste debido al aumento de peso de la estructura, salvo que el fuste estuviese muy sobredimensionado para el apoyo de la línea original, lo cual es improbable.

Para calcular la estructura, se va a utilizar el programa PLS Tower, un programa desarrollado por Power Lines Systems para el análisis y diseño de estructuras de transmisión. Nació en los años 70 y ahora es utilizado en más de ochenta países y es probablemente el programa de torres más ampliamente usado en el mundo, ya que el hecho de que se emplee exclusivamente para el cálculo de torres simplifica el número de herramientas a emplear en el programa y ya tiene implementadas las principales normas que se suelen emplear para el cálculo de este tipo de torres.

5.2.1. Resumen para el modelado de la estructura en Tower

En este apartado se va a hacer un breve resumen del proceso a seguir para modelar una torre en Tower. El primer paso es definir el tipo de normativa que se va a tener en cuenta a la hora de realizar las comprobaciones de cálculo de la estructura, que en este caso se va a emplear la norma ASCE 10-15 mencionada anteriormente, y seleccionar las bases de datos que se van a emplear para definir los materiales del acero, los tornillos o los aisladores entre otros.

En segundo lugar, a partir de los planos del apoyo tipo D4S2V, se comienza introduciendo los nudos de la estructura, definiéndose nudo como el punto de intersección entre dos o más barras. Es importante comprender el significado de nudo ya que en el modelo una barra que en la realidad es continua puede estar dividida en dos o más partes, y es debido a que hay un punto de unión entre esa barra y otra/s.

Tower define dos tipos de nudos, primarios y secundarios. Los nudos primarios son aquellos que se definen a partir de las coordenadas absolutas (X, Y, Z), mientras que los nudos secundarios son aquellos que se pueden definir en función de otros nudos (ya sean primarios o secundarios). Un ejemplo claro de nudo primario puede ser el nudo de la punta de la cruceta, que se introduce mediante sus coordenadas X, Y y Z. Supongamos que la unión del posa pies de la cruceta ya está definido y que la cruceta está dividida en tres vanos debido a las barras interiores que arriostran la cruceta. La forma más eficiente de definir los nudos de unión entre las barras de arriostramiento y el posa pies sería definiendo dos nudos (número de vanos menos uno) secundarios en función del nudo de unión del posa pies con la cabeza y la punta de la cabeza, ya que en la mayoría de los casos los vanos tienen la misma longitud. En la figura se muestra un ejemplo de definición de este tipo de nudos para dos

nodos que forman tres vanos.

	Joint Label	Symmetry Code	Origin Joint	End Joint	Fraction
236	1J	XY-Symmetry	N3P	CR3P	0.3333333
237	2J	XY-Symmetry	N3P	CR3P	0.6666666

Figura 5-2. Definición de un nudo secundario en Tower

Si la estructura es de grandes dimensiones, no se recomienda introducir todos los nudos, sino que es recomendable representar una parte de la estructura y dibujar las barras utilizando los nudos como puntos de inicio y final de esta. Cada barra debe estar definida dentro de un grupo de barras. En el grupo se define el perfil de la barra, el material, el tipo de elemento y el tipo de grupo. En estas torres los perfiles empleados serán perfiles en L (LPN en Tower). El tipo de elemento hace referencia al tipo de esfuerzos que puede soportar la barra, diferenciándose principalmente dos grupos:

- Beam (viga): El principal motivo por el que se emplean este tipo de barras es por estabilizar los nudos coplanares y mecanismos. Los esfuerzos cortantes y los momentos en los extremos de los elementos de viga son calculados internamente y participan en el equilibrio de la torre. Existen ciertas barras que el manual de Tower recomienda que se definan como viga, como por ejemplo los montantes.
- Truss (celosía): Como su nombre indica, estas barras trabajan como una celosía por tanto solo están sometidas a esfuerzos de tracción y compresión y no soportan ningún tipo de momento, a diferencia de las vigas.

El tipo de grupo de las barras hace referencia a la función que tiene la barra en la estructura, con objeto de definir la esbeltez máxima de la barra. La esbeltez límite para cada tipo de barra viene definida en el RLAT y se muestra en la tabla 5-4.

Tabla 5-4. Esbelteces límite de las barras

Tipo de barra	Nombre en Tower	Esbeltez límite (adm)
Montante	Leg	150
Diagonal	Other	200
Relleno	Redundant	250

Existe otro grupo de barras en Tower llamada Crossing Diagonal, que hace referencia a aquellas barras que se cruzan con un tornillo uniéndolas. Es importante definir en el modelo este tipo de barras ya que en función de cómo trabaje cada una de estas barras (tracción o compresión) calcula de una forma u otra las solicitaciones de cada barra.

En cuanto al material, para el diseño de este apoyo se va a mantener lo establecido por la normativa de REE para el diseño de apoyos, en la que la calidad del material depende del perfil de la barra.

Tabla 5-5. Calidad del acero

Ala de la barra	Calidad del acero
< 70 mm	Al menos S235 JR
>= 70 mm	Al menos S355 J2

Para el cálculo de la estructura la resiliencia del material no tiene efecto alguno en los resultados, por tanto, el último término de la denominación del acero se puede obviar.

Tras definir los grupos de barras, se puede ir dibujando la estructura señalando los nudos inicio y final de cada barra. Conforme se van dibujando estas barras, es importante definir estos cuatro parámetros:

- Sección a la que pertenece: normalmente se define una sola sección para toda la torre, salvo para casos de estudio especiales.
- Grupo de barras
- Excentricidad: este parámetro se emplea para definir las condiciones de las barras en su extremo, ya que los esfuerzos de las barras no son los mismos si es una barra continua a si es el final de una barra, al igual que no es lo mismo que una barra pueda girar libremente a que este fijada con dos tornillos en el extremo que impiden su giro. Para ello, Tower emplea unos coeficientes numerados del 1 al 6 para definir el tipo de excentricidad. Se deben definir dos valores por barra, uno para la excentricidad y otro para las condiciones de giro en los extremos, pero Tower sólo empleará uno de estos en función de la longitud de la barra. En la figura 5-3 se puede ver el valor de cada coeficiente en función de las condiciones en el extremo.

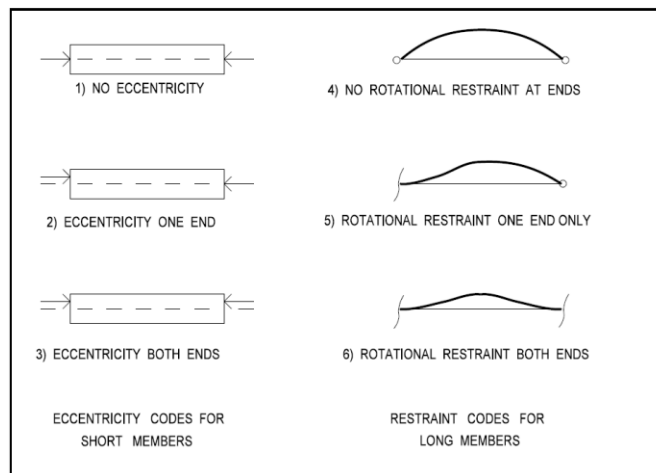


Figura 5-3. Excentricidades y restricciones al giro en Tower

- Coeficientes de pandeo: se deben asignar en los tres ejes de la barra los coeficientes de pandeo globales. Este valor es de vital importancia a la hora de diseñar la torre ya que una mala definición de estos coeficientes puede fácilmente desembocar en resultados muy lejanos al valor real de las solicitaciones y realizar un cálculo erróneo de la estructura.
- Tornillos: se debe definir el número de tornillos en el extremo, el número de planos de corte (simple y doble cortadura) y también identificar si el tornillo se encuentra en el ala larga o en el ala corta de la barra.

Siguiendo estos pasos, se puede dibujar la estructura completa en el programa.

5.2.2. Cálculo del apoyo de 400 kV

El primer paso que se ha realizado para calcular la nueva línea ha sido el modelado del apoyo D4S2V en Tower. El lector puede pensar que no es necesario modelar la estructura completa ya que no se va a utilizar la parte señalada en rojo en la figura X, pero interesa realizar este cálculo para saber si los resultados obtenidos son coherentes para así afirmar que no existe ningún problema en cuanto a la estructura original en el modelo que se realice con la nueva cabeza.

Los esfuerzos que se van a introducir en este apoyo no son los del conductor Condor y el hilo de tierra OPG 48 en el vano medio de 500 m que se ha calculado en Postewin, sino que se va a introducir el árbol de cargas que REE ha realizado para este apoyo. Este árbol de cargas representa los valores máximo de las cargas en las distintas hipótesis para que la estructura no llegue a colapsar, por lo que, si a realizar este cálculo se obtiene un valor que difiere mucho del 100% de utilización, será señal de que el cálculo se está realizando mal.

Los apoyos de la serie D4 pueden ser montados en distintas alturas, como se vio en el capítulo anterior. No tiene sentido hacer un estudio para cada altura, sino que, estudiando la altura más alta, si esta cumple, se podrá asegurar que el resto de las alturas también cumplen, ya que estas podrán soportar tensiones ligeramente superiores cuanto menor sea la altura del apoyo, ya que el área de incidencia del apoyo es menor cuanto más baja sea la altura del apoyo. En el anexo B se muestra el árbol de cargas que se ha empleado para este apoyo y en la figura 5-4 la

primera hipótesis (viento) del archivo *.lca* en el que se introducen las cargas en cada fase (el valor de las cargas longitudinales es 0 N).

	Joint Label	Vertical Load (N)	Transverse Load (N)
1	A1	43710	39580
2	A2	43710	39580
3	B1	43710	39580
4	B2	43710	39580
5	C1	43710	39580
6	C2	43710	39580
7	CRTP	9200	8570
8	CRTX	9200	8570

Figura 5-4. Archivo *.lca* de la primera hipótesis del apoyo de 400 kV

El motivo por el que se ha introducido el valor de la primera hipótesis es porque en los apoyos de suspensión, debido al ángulo nulo o casi nulo de la línea, la primera hipótesis es la más desfavorable. El viento sobre la estructura es lo que más afecta a este tipo de apoyos en la zona B, en la zona C puede ser que la segunda hipótesis sea más desfavorable a causa del hielo. Que esta sea la hipótesis más desfavorable no quiere decir que el resto de hipótesis no se calculen, ya que en una hipótesis que en cumple puede tener una barra cerca del 100% de utilización que en la hipótesis más desfavorable puede que esté lejos de ese 100%. Esta situación se da con la cuarta hipótesis, ya que introduce unas cargas de torsión en el apoyo que afectan a las diagonales interiores del apoyo y algunos encuadramientos que en el resto de hipótesis puede que no lleguen a un 50% de utilización.

Además del viento en los conductores, hay que considerar el viento sobre el apoyo. La presión del viento sobre la estructura es:

$$q = 170 \text{ daN/m}^2 \left(\frac{V_v}{120} \right)^2$$

Para velocidades de 140 km/h, esta presión es de 2314 Pa, y para velocidades de 60 km/h, 425 Pa.

En la figura 5-5 se muestra el modelado de la torre D4S2V clasificando las barras de dos formas distintas. En el apoyo de la izquierda las barras se clasifican en función del tipo de elemento, el color verde representa los elementos tipo beam (viga), mientras que el color azul representa los elementos tipo truss (celosía). Algunos encuadramientos del fuste están definidos como viga y otros como celosía, esto se debe a que en esa barra existe algún nudo coplanario. Si el nudo es coplanario, en la dirección perpendicular al plano de las barras la rigidez es nula, por tanto, un pequeño esfuerzo hace que el nudo tenga una deformación irreal, por lo que se define como viga.

En el apoyo de la derecha de la figura las barras se clasifican en 4 colores en función de tipo de grupo. En color verde se presentan los del grupo leg (montantes), en azul los del tipo other (diagonal), en naranja las del tipo redundant (relleno) y en rosa las del tipo crossing diagonal.

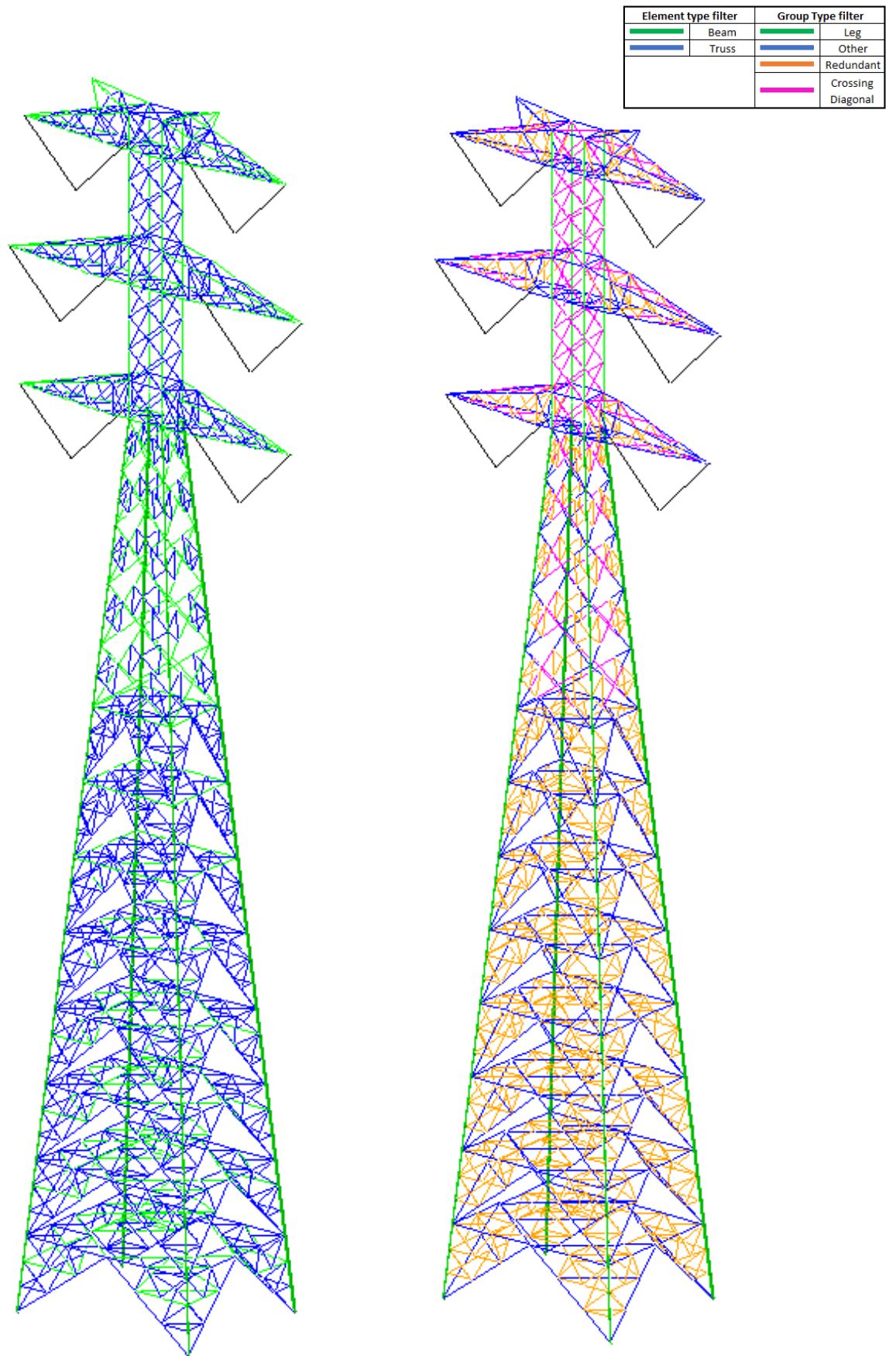


Figura 5-5. Apoyo D4S2V modelado en Tower

Como se puede apreciar en la figura anterior, se han modelado también los aisladores en V. Este tipo de aisladores son los únicos que realmente tiene sentido dibujar en Tower, ya que la disposición de los mismos afecta a la distribución de tensiones en el apoyo. El resto de los aisladores no se suelen dibujar porque al fin y al cabo el punto de aplicación del aislador está sólo está conectado con la punta de la cruceta, y al fin y al cabo los esfuerzos afectan de la misma forma independientemente de cuál de los dos sea el punto de aplicación de la carga.

A continuación, se va a calcular la estructura, pero antes de realizar cálculos es necesario verificar que la estructura no se comporta como un mecanismo, ya que esta estabilidad en este tipo de estructuras es inadmisibles. Para saber que la estructura no es un mecanismo, se debe realizar un análisis lineal y comprobar que la deformada del apoyo no tiene un nudo que tenga una deformación muy superior al resto de los nudos. Para calcular la estructura, se debe utilizar el archivo *.lca* de la figura 5-4 y realizar el análisis de la estructura. Tower puede realizar dos tipos de cálculos, el lineal y el no lineal. Con la opción lineal, los efectos secundarios de los desplazamientos estructurales, por ejemplo, los llamados efectos P-Delta, son ignorados. Con la opción no lineal, todas las fuerzas y momentos están en equilibrio en el estado deformado de la estructura; por ejemplo, los efectos P-Delta son tenidos en cuenta. Mientras que la opción no lineal toma en cuenta todas las no linealidades geométricas, las propiedades lineales de los materiales son aún utilizadas en todos los programas. Esto es consistente con todos los procedimientos actuales de diseño basados en códigos para estructuras de transmisión. Para este cálculo se va a emplear el análisis no lineal.

Tras finalizar el cálculo, el resultado es que el aprovechamiento de la estructura es del 100,40% en la primera hipótesis, como era de esperar. Este tanto por ciento es un valor que entra dentro de lo descrito en la definición del árbol de cargas (ver figura 5-6).

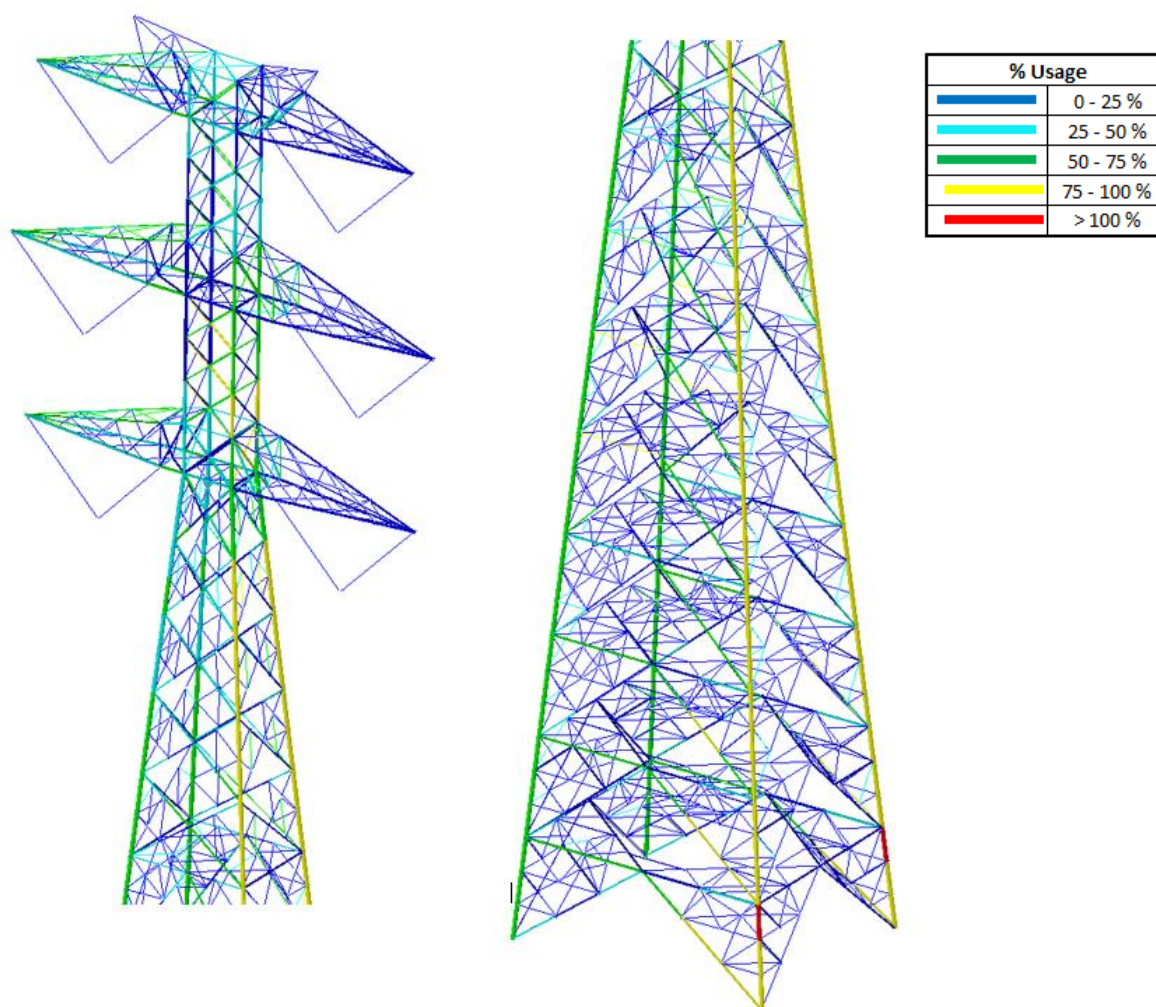


Figura 5-6. Esfuerzos en la primera hipótesis del apoyo D4S2V

Los colores de las barras representan el aprovechamiento de la estructura. El color azul representa un aprovechamiento inferior al 25 %, el cian entre el 25 y el 50%, el verde entre el 50 y el 75%, el amarillo entre el 75 y el 100% y por último el rojo superior al 100%.

La barra que se encuentra por encima del 100% es uno de los tramos del montante de la base de altura más alta, un resultado lógico debido a que el esfuerzo en los montantes se va haciendo mayor conforme más cerca del terreno se encuentre la barra. De hecho, las dos barras que se encuentran justo por debajo se encuentran al 99,49% de utilización, concluyendo que el modelado de la estructura y el cálculo se ha realizado de forma correcta. Por tanto, el fuste es apto para seguir modelando la nueva estructura.

El peso del apoyo es de 26663 kg, de los cuales 16283 kg corresponden a la parte del fuste que se mantiene para el nuevo apoyo de 800/400 kV y 10380 kg corresponden a la parte de la cabeza y fuste que se retiraban. Estos valores los proporciona Tower haciendo una sección para cada una de las dos partes que se han analizado del fuste. Este valor no es el peso total del apoyo, ya que no se tienen en cuenta elementos como los tornillos, chapas, casquillos o cubrejuntas, pero serán de especial interés para el análisis económico.

5.2.3. Cálculo del apoyo de 800/400 kV

Una vez comprobado que el apoyo de 400 kV original se ha calculado correctamente, comienza el proceso de cálculo del nuevo apoyo para los tres circuitos a partir del diseño de la nueva cabeza mostrada en la figura 4-4. Para ello se elimina la parte sobrante del apoyo original y se empieza a modelar la nueva cabeza de forma análoga a lo comentado en el anterior apartado del cálculo del apoyo original.

El proceso de modelado realmente se puede realizar de varias formas a gusto del proyectista, se puede dibujar toda la estructura con todas las barras incluidas dentro de un mismo grupo y luego ir dividiéndolas conforme se van haciendo los cálculos de la estructura, aunque en mi opinión no es aconsejable ya que el proceso de ir cambiando cada barra en cada nuevo cálculo puede llegar a ser muy tedioso y es sencillo cometer un error y olvidar introducir una barra dentro de su grupo. Por tanto, se recomienda ir dividiendo las barras en pequeños grupos con un perfil que resulte lógico (por ejemplo, no asignar a un montante un perfil L60x4 o a una diagonal redundante con un perfil L80x6) ya que son perfiles con total seguridad no van a ser estar bien dimensionados.

En la figura 5-7 se muestra la estructura ya modelada en Tower, habiendo definido ya cada barra dentro de su grupo correspondiente (tipo de elemento y tipo de grupo ya definidos). En la imagen de la derecha se muestra la estructura clasificándola en función del tipo de elemento (beam y truss) y en la figura de la izquierda en función del tipo de grupo (leg, other, redundant y crossing diagonal).

Una vez definida la estructura, se introducen las cargas que actúan sobre el apoyo, que se habían calculado en el software Postewin, que se pueden ver en los informes del anexo C y en la tabla 5-6 de esta memoria. Los valores indicados en estas tablas son los esfuerzos de un solo cable, por lo que estos valores deberán ser multiplicados por el número de conductores para obtener el valor del esfuerzo real en las tres primeras hipótesis. En la cuarta hipótesis, el esfuerzo longitudinal no se calcula de esta manera debido a que dicho esfuerzo está multiplicado por un coeficiente que depende del número de cables (del destensado que se produzca en el conductor). En la tabla 5-6 se muestran los valores de estos esfuerzos que serán introducidos en el archivo .lca de Tower para realizar el cálculo de la estructura.

Tabla 5-6. Esfuerzos en el apoyo de 800/400 kV

Conductor	Cardinal			Condor			OPGW 48		
	L (N)	T (N)	V (daN)	L (N)	T (N)	V (N)	L (N)	T (N)	V (N)
1ª Hipótesis	0	55500	52350	0	29580	24690	0	5780	3430
2ª Hipótesis	0	16700	81850	0	9390	40500	0	2460	7140
3ª Hipótesis	34500	0	81850	17880	0	40500	3540	0	7140
4ª Hipótesis	23000	0	81850	14903	0	4500	11790	0	7140

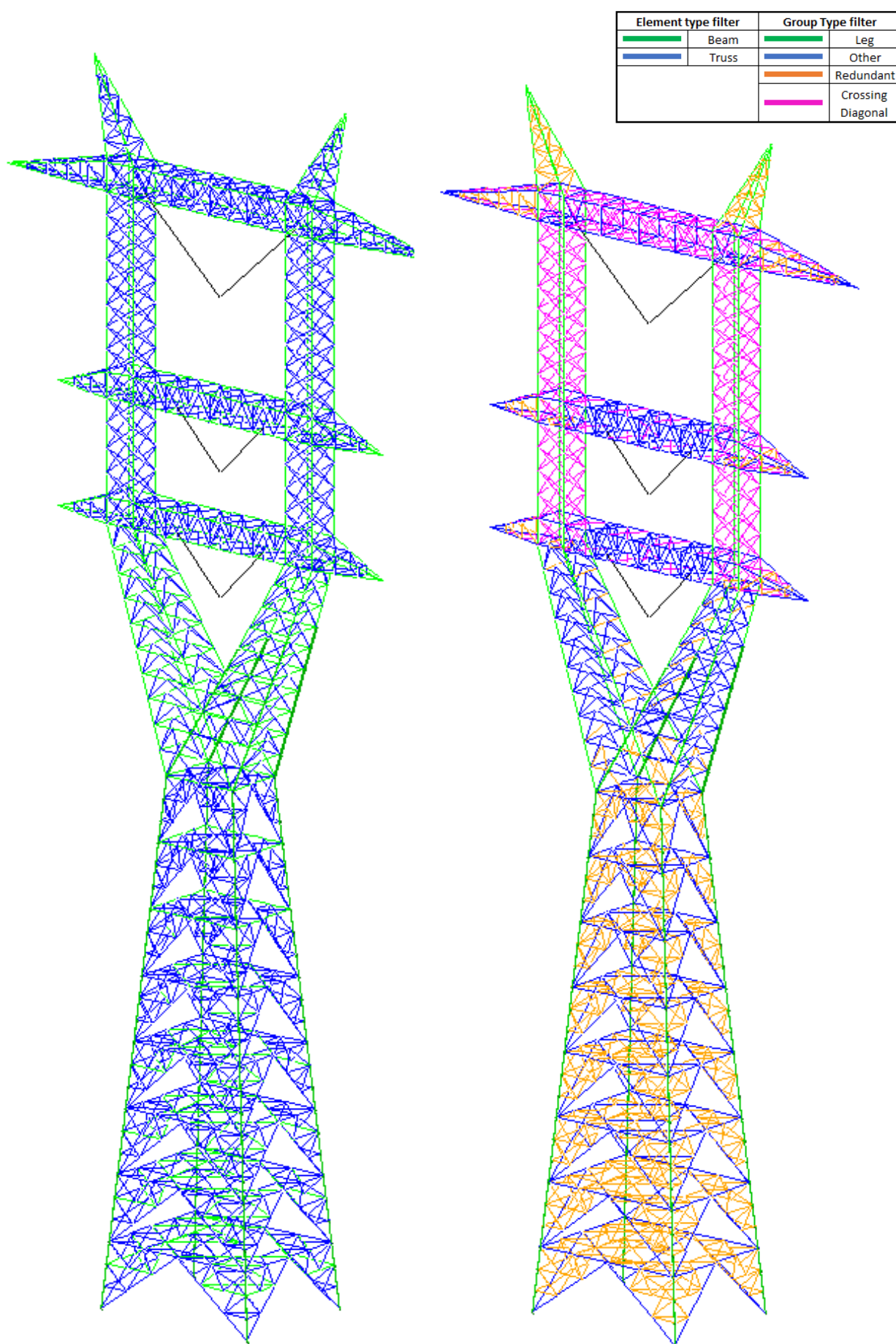


Figura 5-7. Nuevo apoyo de suspensión modelado en Tower

Estas cargas no están mayoradas por el coeficiente de seguridad, por lo que el valor real de las cargas es el múltiplo de los valores obtenidos en la tabla anterior por el coeficiente de seguridad de la hipótesis. Este coeficiente es 1,5 para la primera y segunda hipótesis (normales) y 1,2 para la tercera y cuarta hipótesis (anormales).

Además de los esfuerzos en los conductores, se debe tener en cuenta, como se ha mencionado anteriormente, el efecto del viento sobre la estructura en las dos primeras hipótesis de cálculo por tratarse de una línea de categoría especial. Para la primera hipótesis se considera la velocidad del viento de 140 km/h por lo que la presión del viento es de 2314 Pa. Para la segunda hipótesis, la velocidad es de 60 km/h, por lo que la presión del viento es de 425 Pa, como se ha descrito anteriormente en el cálculo de la torre de 400 kV.

Tras crear el archivo *.lca* con todas estas cargas, llega el momento de que el programa “corra” la estructura y calcule los esfuerzos en cada barra. Es lógico que en el primer intento la estructura no cumpla en ninguna hipótesis ya que no se sabe cómo va a reaccionar una estructura tan especial como esta. Una vez calculada la estructura y definido el aprovechamiento de cada barra, es hora de comenzar a dimensionar la estructura, tanto aquellos perfiles cuyo aprovechamiento es superior al 100%, como de aquellas barras cuyo aprovechamiento es muy bajo y están sobredimensionadas. Estas últimas barras pueden que tras finalizar el proceso de cálculo sigan teniendo un aprovechamiento muy bajo y no pueda reducirse el perfil de la barra, ya que hay barras que por definición no trabajan y se dimensionan exclusivamente en función de la esbeltez límite de la barra.

Es importante saber analizar los datos que Tower devuelve al analizar la estructura, ya que el dimensionado no consiste en aumentar el perfil de la estructura si la barra no cumple. Es necesario analizar los valores de tracción y compresión de las barras que colapsan y saber cuál de los dos comportamientos es el más desfavorable en la barra y comprobar si esa barra realmente debe estar sometida a ese esfuerzo, por ejemplo, resultaría inquietante que, en una cruceta de un apoyo como este a nivel, las barras de la parte inferior de la cruceta (posa pies) estén trabajando a tracción en lugar de a compresión. Un resultado así significaría que el problema quizás no esté en el perfil de la barra, sino que se haya producido un error en el modelado de la estructura o en la introducción del árbol de cargas. Así como el tipo de esfuerzo al que está sometida la barra, puede que la sección del perfil no sea lo que hace que la barra colapse, sino que sean los tornillos de unión en los extremos, que fallen bien por el cortante aplicado o bien por el aplastamiento de este. Si el fallo se produjese en el tornillo, aumentar la sección del perfil no haría que la barra cumpla, sino que la solución es aumentar el número de tornillos o bien aumentar el diámetro de estos.

El dimensionamiento de la estructura siempre ha de realizarse desde la parte más alta de la torre hacia abajo, ya que las barras que se encuentran a un nivel superior pueden afectar al resto que se encuentran a un nivel inferior, pero no a la inversa, por lo que si se realizase el dimensionado empezando por los montantes de la base, puede que al llegar a un tramo superior en el que se cambie un perfil, cambien también los esfuerzos de la barra que ya había sido dimensionada anteriormente para que cumpliera y ahora de nuevo vuelva a colapsar.

El dimensionado de la cabeza completa es un proceso largo que conlleva varias decenas de “corridos” de la estructura, que no merece la pena describir paso por paso en esta memoria ya que no es el objeto de estudio de este proyecto, sino que el objetivo es comprobar si el fuste resiste los esfuerzos que la cabeza transmite a este para saber si se puede hacer una adaptación en el diseño y reutilizar parte del apoyo existente.

Una vez que la cabeza ha sido dimensionada, intentando optimizar al máximo posible los perfiles de ésta, se llega al fuste en el que lógicamente existen barras que colapsan, principalmente debido a que esta nueva con total seguridad tiene un peso mayor que la original, ya que en esta nueva cabeza hay varias vigas, dos pilares y grandes crucetas para el circuito de 800 kV, y montantes con grandes perfiles en la cabeza que incrementan considerablemente su peso.

En la figura 5-8 se muestra una captura del fuste de la estructura una vez que la cabeza ya ha sido dimensionada. Los perfiles marcados en rojo son aquellos perfiles que han fallado, y que son sólo los montantes. El programa indica en que hipótesis es donde la barra tiene un comportamiento más desfavorable, y para este caso, todos los montantes tienen un peor comportamiento en la primera hipótesis, como era de esperar por lo comentado anteriormente de que los apoyos de suspensión normalmente están más solicitados en la primera hipótesis.

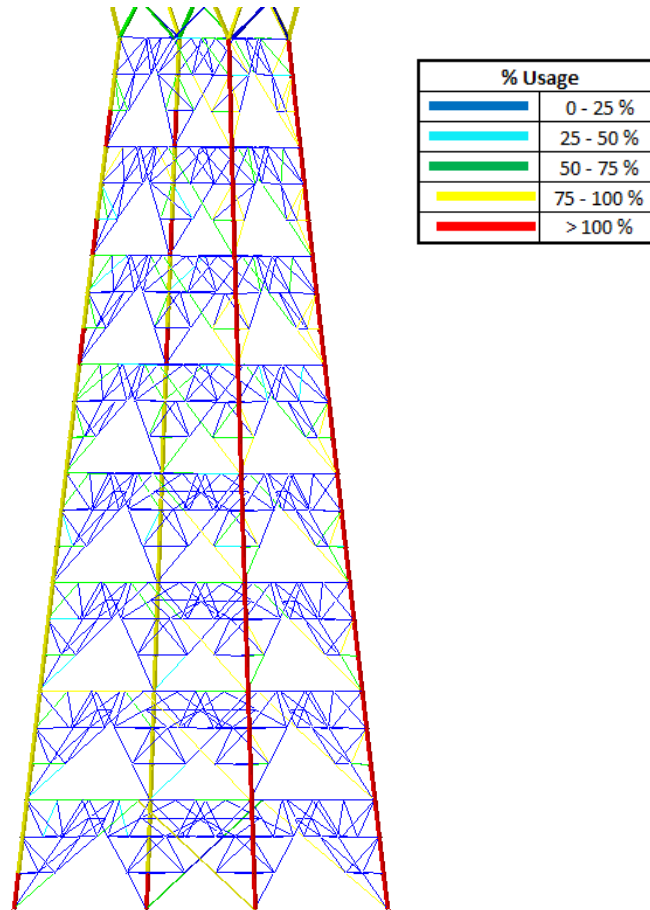


Figura 5-8. Esfuerzos en el fuste con la nueva cabeza

De esta figura se pueden obtener varios datos a partir de los colores de las barras. Los montantes de la cara derecha de la estructura fallan por completo mientras que los de la cara izquierda fallan sólo algunos, por lo que puede concluirse que los montantes de la cara derecha están trabajando a compresión y los de la parte izquierda están trabajando a tracción, ya que la carga de tracción suele ser siempre mayor a la compresión, debido a que las barras a compresión, además de resistir las solicitaciones producidas por los conductores, deben soportar las cargas permanentes, que siempre tienen el mismo sentido que la gravedad.

Para solucionar este problema de resistencia de los montantes, se propone realizar un refuerzo en el que se coloca enfrentado al montante original un nuevo perfil del mismo tamaño unido mediante presillas equiespaciadas al montante original, de tal forma que se consigue aumentar la sección que trabaja a tracción y compresión y además aumenta el número de tornillos del perfil, ya que se introducirán nuevos nudos a doble cortadura para unir estos nuevos montantes de refuerzo. En la figura 5-9 se muestra un esquema de este tipo de refuerzo.

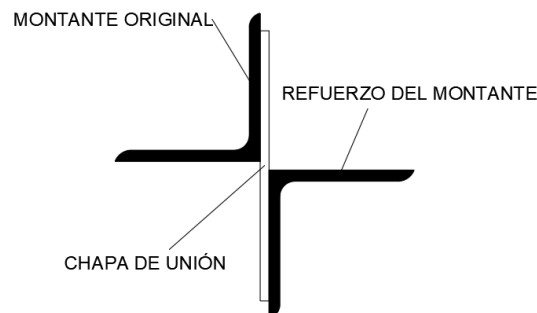


Figura 5-9. Esquema refuerzo del montante

Realizando sólo esta modificación de los montantes de la torre, se consigue que la estructura completa cumpla

con las solicitaciones calculadas, por lo que se puede concluir que es posible adaptar el apoyo para que albergue un circuito de 800 kV y dos circuitos de 400 kV, reforzando sólo los montantes del fuste. En la figura 5-10 se muestra la torre completa calculada con los refuerzos del montante y la cabeza dimensionada.

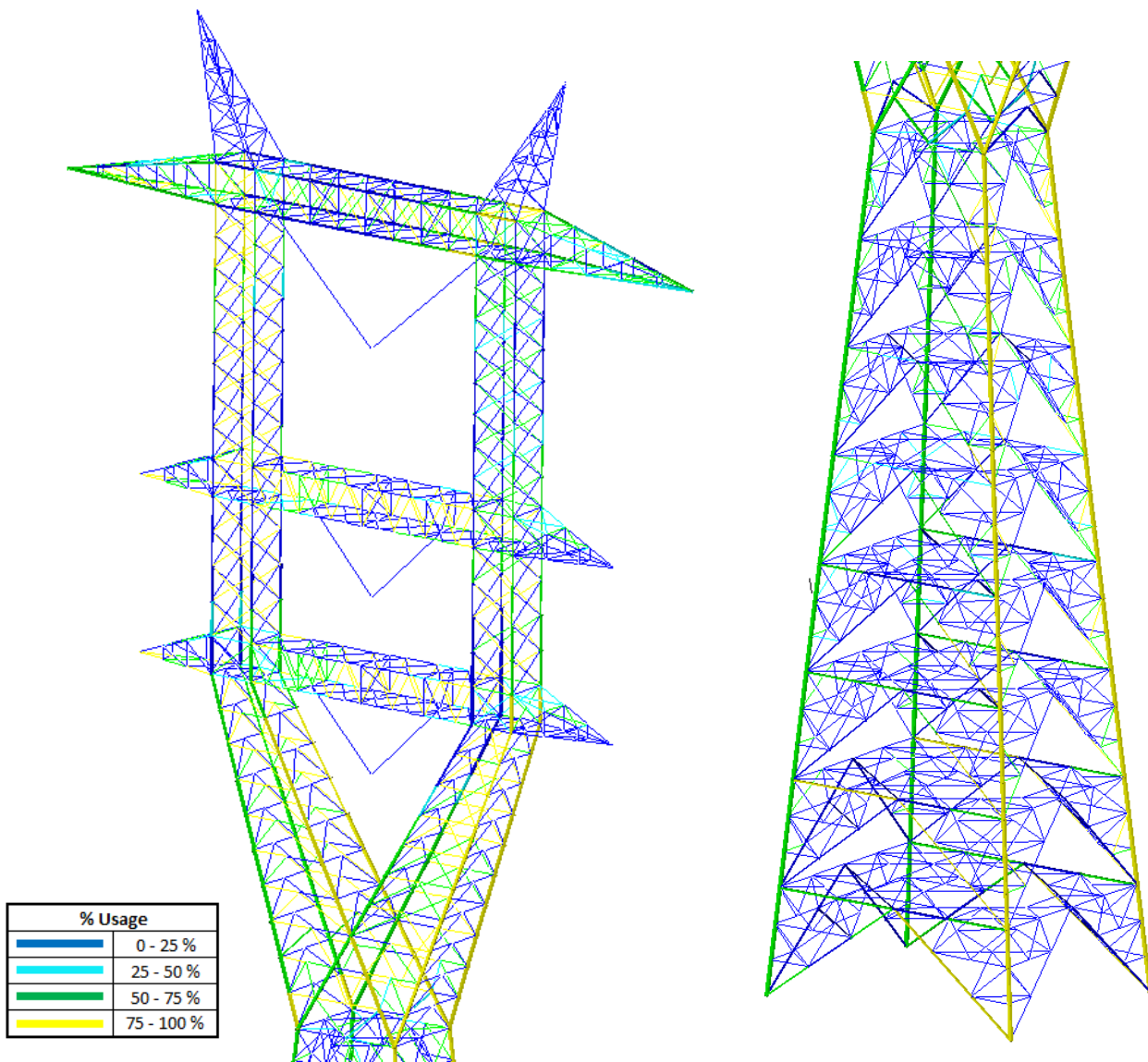


Figura 5-10. Esfuerzos en la primera hipótesis del nuevo apoyo

En este caso la torre sólo ha necesitado ser reforzada en los montantes, pero podría haber sido necesario reforzar las diagonales del fuste que forman una “K” que unen los montantes con el punto medio de las horizontales en las que se realizan los encuadramientos. Estas barras suelen fallar debido a la torsión que se produce en la cuarta hipótesis en la rotura del conductor, pero parece que la inclusión de los nuevos conductores Cardinal no hacen un gran daño a esta nueva estructura.

Para finalizar con el aptado del cálculo de esta estructura, se va a hacer un resumen en el que se hace referencia a algunos valores significativos en el resultado del cálculo de la estructura.

- En primer lugar, el aprovechamiento del apoyo es del 94,20%, y la barra que tiene este aprovechamiento es una de las diagonales de la viga del circuito superior de 400 kV que aparece señalada en color rojo en la figura 5-11. Este aprovechamiento máximo se produce en la primera hipótesis. Si se realiza una representación de la deformada en la que se multiplica el factor de escala de la deformada (figura 5-12), se aprecia que esta barra está trabajando a compresión y está sometido a un gran esfuerzo debido a la curva que forma la viga central de la estructura con la acción del viento.

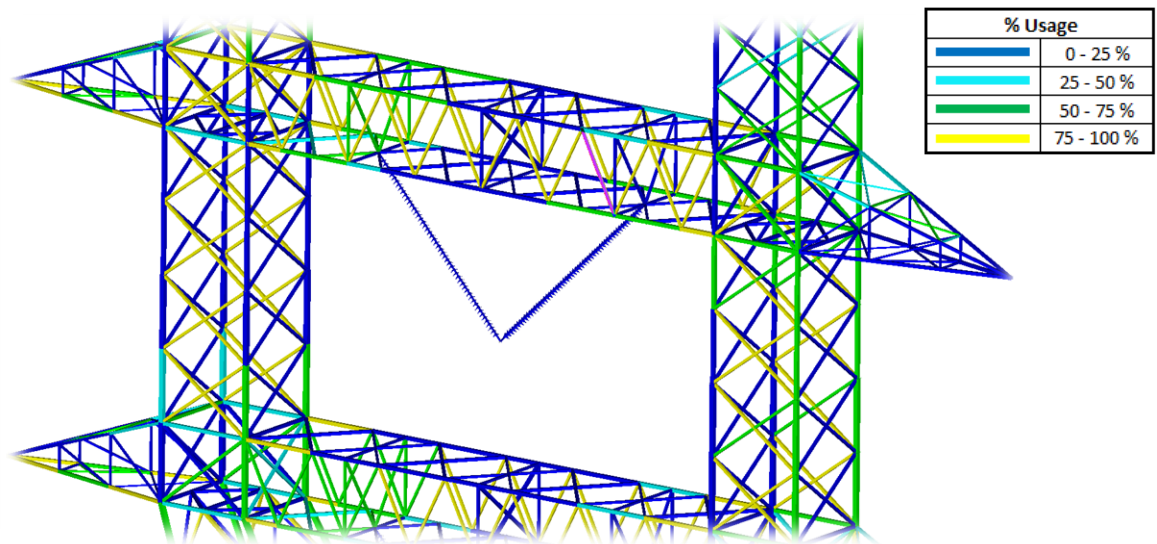


Figura 5-11. Barra con mayor aprovechamiento de la estructura

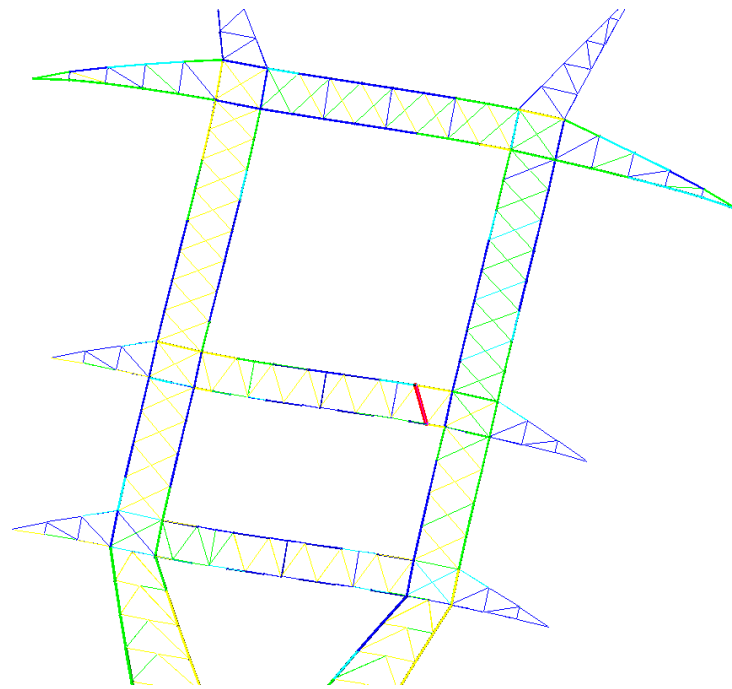


Figura 5-12. Deformada del apoyo en la primera hipótesis (factor de escala 20)

- En el fuste, la barra que mayor aprovechamiento tiene, o dicho de otro modo, la que más cerca se encuentra del colapso, es la diagonal que une el punto medio de la horizontal del primer encuadramiento del fuste con el montante con un aprovechamiento del 89%. Este aprovechamiento se produce, como es lógico, en la cuarta hipótesis debido a la torsión que produce la rotura de uno de los conductores de 800 kV.
- Los montantes del fuste, tras ser reforzados, trabajan con un aprovechamiento máximo del 78%, por lo que ejecutar esta solución es la solución para resolver este problema.

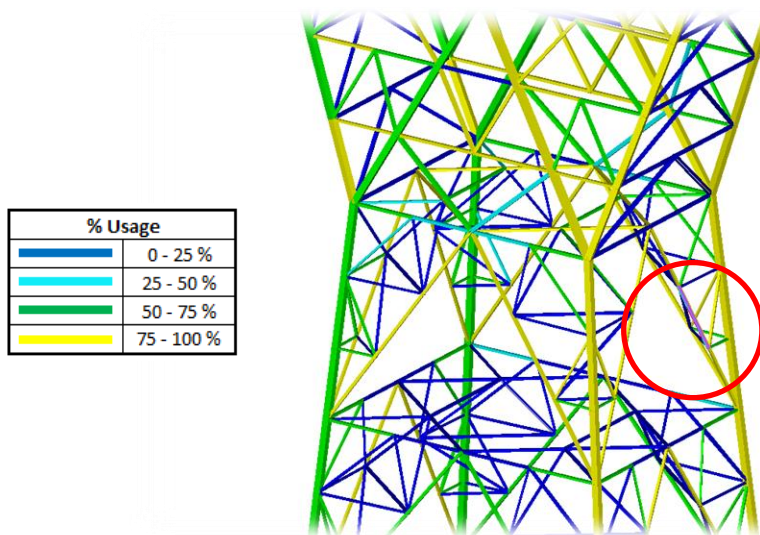


Figura 5-13. Esfuerzos debidos a la torsión del fuste

- También se debe hacer referencia a cuanto trabaja el apoyo para cada una de las 14 hipótesis de cálculo que se han introducido en el programa. Estos porcentajes se muestran en la tabla 5-7.

Tabla 5-7. Aprovechamiento del apoyo en cada hipótesis de cálculo

Hipótesis	% aprovechamiento	Hipótesis	% aprovechamiento
1	94	4e (Condor)	68
2	86	4f (Condor)	72
3	87	4g (Condor)	72
4a (Cardinal)	89	4h (Condor)	68
4b (Cardinal)	68	4i (Condor)	72
4c (Cardinal)	89	4j (OPGW 48)	68
4d (Condor)	72	4k (OPGW 48)	68

Cabe destacar de estos resultados que las cuatro hipótesis tienen un alto nivel de aprovechamiento, lo que tiende a considerar que el dimensionamiento de la estructura es correcto habiendo realizado la optimización de las barras que forman la cabeza. Si la estructura hubiese sido calculada en zona C en lugar de B, posiblemente hubiese sido más desfavorable que la primera hipótesis.

Por último, se ha comprobado el peso de este nuevo apoyo, realizando en Tower un filtro en función de la parte de la estructura a la que pertenece (fuste, cabeza o refuerzo), habiéndose obtenido los siguientes resultados.

Tabla 5-8. Peso del nuevo apoyo

Peso Tower (kg)	
Fuste	16283
Cabeza	27250
Refuerzo	7317
TOTAL	50850

Este peso es prácticamente el doble que el del apoyo original, debido al gran tamaño de la nueva cabeza y de los perfiles de ésta. Como se mencionó en el cálculo del apoyo de 400 kV, este valor no es el peso total del apoyo, ya que no se tienen en cuenta elementos como los tornillos, chapas, casquillos o cubrejuntas, pero serán de especial interés para el análisis económico.

En el anexo D se puede ver un plano del esquema unifilar del apoyo en el que se detallan todos los perfiles de las barras y sus uniones.

5.3. Cimentaciones

La manera más habitual de fijar los apoyos al suelo es mediante macizos de hormigón. Este macizo ha de sustentar el apoyo, transmitiendo al terreno todas las solicitaciones que existen en su base como consecuencia de la actuación de los diferentes esfuerzos a los que está sometido.

Las cimentaciones en forma de macizos se ejecutan en obra y sus dimensiones deben garantizar que el apoyo permanezca estable entre las diferentes solicitaciones. Esta estabilidad debe quedar garantizada por el equilibrio entre los esfuerzos solicitantes y las reacciones del terreno, considerando además un determinado coeficiente de seguridad, según prescribe el RLAT.

Para apoyos de 4 patas como los de este proyecto, la cimentación está formada por 4 macizos independientes, formando un cuadrado o rectángulo según la geometría del apoyo. Las cimentaciones de patas aisladas están solicitadas por esfuerzos sencillos como son la compresión y el arranque. Los esfuerzos de compresión, repartidos uniformemente en toda la superficie de la base de la cimentación, los soportan la mayor parte de los terrenos. Son los esfuerzos que tratan de arrancar la cimentación del terreno los que requieren una especial atención.

De los 4 macizos constituyentes de la cimentación para un determinado esfuerzo transversal o longitudinal aplicado sobre el apoyo, dos de ellos trabajan al arranque y los otros dos a la compresión. El cálculo de las cargas de compresión y arranque está basado en el método de talud natural o ángulo de arrastre de tierras.

Como se vio en el apartado 4 de este proyecto, el poste D4S2V de REE analizado en este proyecto tiene una cimentación en sus patas de tipo “pata de elefante” o prismática con cueva. Este tipo de cimentaciones tienen la desventaja de que suponen un cierto riesgo para las personas que las hacen en obra debido al desprendimiento del terreno, por lo que en varios libros se recomienda que se realicen zapatas con forma prismática recta en lugar de prismáticas con cueva. Sin embargo, el uso de este tipo de cimentaciones hace que el volumen de hormigón empleado en la cimentación sea inferior, ya que la cueva hace que la parte de terreno que se encuentra por encima de ella se oponga al arranque de la cimentación, evitando así rellenar dicho espacio de tierra por hormigón. En la tabla 5-9 se vuelven a mostrar las dimensiones de la cimentación del apoyo D4S2V.

Tabla 5-9. Dimensiones de la cimentación

Macizo de hormigón		Anclaje y cleats	
Diámetro solera	2.5 m	Perfil de anclaje	L150x16
Altura de solera	0.1 m	Perfil de los cleats	L150x16
Diámetro del pilar	1.3 m	Ø Tornillos	20
Altura del pilar	2.8 m	Número de cleats	6
Altura del cono	1.1 m	Tornillos por cleat	2
		Longitud anclaje	3,4 m

El peso específico del hormigón se considerará 2100 kg/m^3 , mientras que para el terreno se considerará un peso específico de 1700 kg/m^3 .

Para que la cimentación este diseñada de forma correcta se deben de cumplir las comprobaciones siguientes:

- Comprobación al arranque.
- Comprobación a la compresión.
- Comprobación de la adherencia entre anclaje y cimentación.

Para poder realizar estas comprobaciones, es necesario conocer las reacciones en la base de las cuatro patas para una combinación de cargas que hagan que la estructura entre en colapso. De esta forma se puede asegurar que la cimentación es válida para cualquier sollicitación a la que esté sometida la estructura. En la tabla 5-10 se pueden ver las reacciones del apoyo.

Tabla 5-10. Reacciones en el nuevo apoyo de suspensión

	Esfuerzo Longitudinal (kN)	Esfuerzo Transversal (kN)	Esfuerzo Vertical (kN)
PATA 1	-112,02 kN	-164,24 kN	1501,52 kN
PATA 2	79,37 kN	-125,97 kN	-1091,27 kN
PATA 3	-79,37 kN	-125,97 kN	-1091,27 kN
PATA 4	112,02 kN	-164,24 kN	1501,02 kN

Estas reacciones se producen en la primera hipótesis (viento), que era la hipótesis más desfavorable en los apoyos de suspensión y que ya se comprobó en el apartado anterior. El signo negativo en el esfuerzo vertical corresponde a las cargas de tracción debido a que Tower analiza el peso propio de la estructura en el sentido positivo.

5.3.1. Comprobación de la cimentación original bajo las sollicitaciones del nuevo apoyo.

Comprobación al arranque

Según el RLAT, se considerarán todas las fuerzas que se oponen al arranque del apoyo:

- Peso del apoyo.
- Peso propio de la cimentación.
- Peso de las tierras que arrastraría el macizo de hormigón al ser arrancado.

Se comprobará que el coeficiente de estabilidad de la cimentación, definido como la relación entre las fuerzas que se oponen al arranque del apoyo y la carga nominal de arranque, no sea inferior a 1,5 para las hipótesis normales y 1,2 para las hipótesis anormales.

En el caso de no disponer de las características reales del terreno mediante ensayos realizados en el emplazamiento de la línea, se recomienda utilizar como ángulo de talud natural o de arranque de tierras:

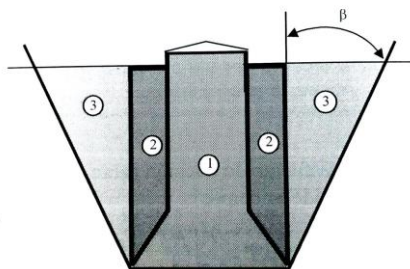
- 30° para terreno normal.
- 20° para terreno flojo.

Para este proyecto se va a considerar un terreno normal, por lo que el ángulo de talud es de 30°.

El esfuerzo de tracción sobre el montante (T) es de 1091270 daN.

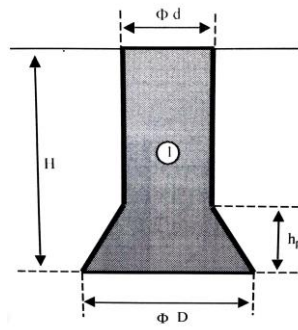
Los esfuerzos que se oponen al arranque son:

- Peso del macizo de hormigón (1).
- Peso de las tierras que gravitan sobre el terreno (2).
- Peso de las tierras arrancadas según el ángulo de talud del terreno β (3).



Peso del macizo de hormigón (1)

Para una cimentación circular con cueva:

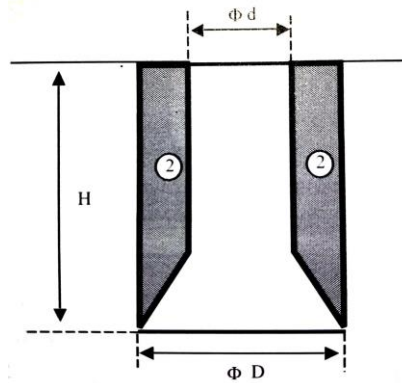


$$P_{macizo} = \delta_{horm} \left[(H - h_p) \left(\frac{d}{2} \right)^2 + \frac{h_p}{3} \left(\frac{D^2 + D \cdot d + d^2}{4} \right) \right]$$

$$= 2300 \frac{kg}{m^3} \left[(4 - 1.2) \cdot \left(\frac{1.3}{2} \right)^2 + \frac{1.2}{3} \left(\frac{2.5^2 + 2.5 \cdot 1.3 + 1.3^2}{4} \right) m^3 \right] = 17088,7 kg$$

Peso de las tierras que gravitan sobre el terreno (2)

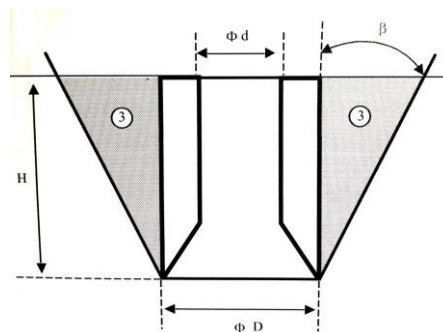
Para una cimentación circular con cueva:



$$P_t = \delta_{terr} \left[\pi H \frac{D^2}{4} - \frac{P_{macizo}}{\delta_{hormigón}} \right] = 1700 \frac{kg}{m^3} \left[4\pi \cdot \frac{2.5^2}{4} - \frac{17088,7}{2300} \right] m^3 = 20748,64 kg$$

Peso de las tierras arrancadas según el ángulo de talud del terreno β (3)

Para una cimentación circular con cueva, el peso de las tierras que serían arrancadas se corresponde con el volumen de tierras de un cono truncado al que se le restan los volúmenes de macizo de hormigón y del terreno que gravita sobre el hormigón.



$$\begin{aligned}
 P_{\beta} &= \delta_{terr} \left[\pi \frac{H}{3} \left[\left(\frac{D}{2} + H \tan\beta \right)^2 + \frac{D}{2} \left(\frac{D}{2} + H \tan\beta \right) + \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right] - \pi H \frac{D^2}{4} \right] \\
 &= 1700 \frac{kg}{m^3} \left[\pi \frac{4}{3} \left[\left(\frac{2.5}{2} + 4 \operatorname{tg}(30) \right)^2 + \frac{2.5}{2} \left(\frac{2.5}{2} + 4 \operatorname{tg}(30) \right) + \left(\frac{2.5}{2} \right)^2 \right] - 4\pi \frac{2.5^2}{4} \right] m^3 \\
 &= 99647,54 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Para que la cimentación sea válida para el estado actual de cargas, la suma de estos tres pesos que se oponen al arranque debe ser mayor que la reacción del apoyo a tracción, con un factor de seguridad de 1,5 ya que nos encontramos ante una hipótesis normal (viento).

Suma de los pesos que se oponen al arranque: 137484 kg.

Reacción de tracción del Terreno: 109127 kg.

Por tanto

$$\frac{137484 \text{ kg}}{109127 \text{ kg}} = 1.26 < 1.5$$

Al ser la relación menor que el factor de seguridad, la cimentación actual no es suficiente para oponerse al arranque de esta, por tanto, será necesario realizar un refuerzo en la cimentación para aumentar el valor de estos pesos.

Comprobación a la compresión

Según el apartado 3.6.3 del ITC-LAT-07, se considerarán todas las cargas de compresión que la cimentación transmite al terreno:

- Peso del apoyo.
- Peso propio de la cimentación.
- Peso de las tierras que actúan sobre la solera de la cimentación.
- Carga de compresión ejercida por el apoyo.

Se comprobará que todas las cargas de compresión anteriores, divididas por la superficie de la solera de la cimentación, no sobrepasa la carga admisible del terreno.

En el caso de no disponer de las características reales del terreno mediante ensayos realizados en el emplazamiento de la línea se recomienda considerar como carga admisible para terreno normal 3 daN/cm² y para terreno flojo 2 daN/cm². Para este proyecto se va a considerar un terreno normal, por lo que la carga admisible será de 3 daN/cm².

El esfuerzo de compresión sobre el montante es de 112020 kg.

La presión sobre el terreno viene dada por la relación entre la fuerza total sobre el terreno y la superficie afectada. Para una cimentación circular con cueva el valor de la presión sobre el terreno es:

$$\sigma_t = \frac{\text{Reacción}_{compresión} + P_{macizo} + P_t}{\pi \frac{D^2}{4}} = \frac{(112020 + 17088,69 + 20748,64) \text{ daN}}{\pi \frac{250^2}{4} \text{ cm}^2} = 3,05 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$$

Al ser la presión sobre el terreno superior a la carga máxima admisible, el terreno no es capaz de soportar todas las cargas de compresión, por lo que hay que aumentar la superficie de la cimentación mediante un refuerzo para que el terreno tenga que soportar menos peso por unidad de superficie.

Comprobación de anclajes y cleats.

Según el apartado 3.6.4 del ITC-LAT-07, de la carga mayor que transmite el anclaje a la cimentación, normalmente la carga de compresión, cuando el anclaje y la unión a la estructura estén embebidas en el hormigón, se considerará que la mitad de esta carga la absorbe la adherencia entre el anclaje y la cimentación y la otra mitad los casquillos del anclaje por la cortadura de los tornillos de unión entre casquillos y anclaje. Los coeficientes de seguridad de ambas cargas opuestas a que el anclaje deslice de la cimentación no deberán ser inferiores a 1,5.

El esfuerzo de compresión sobre el montante es de 112020 kg, mientras que el esfuerzo cortante es la resultante del esfuerzo longitudinal y el esfuerzo transversal, 19881 kg. El esfuerzo de tracción sobre el montante es de 109127 kg, mientras que el esfuerzo cortante es 14889 kg.

En este apartado se va a comprobar que tanto el anclaje, como los cleats y los tornillos resisten los esfuerzos de compresión y cortante, y también se va a comprobar la adherencia entre el hormigón y el anclaje.

Comprobación del anclaje

Esta comprobación consiste en calcular la sección necesaria para soportar los esfuerzos de tracción/compresión y cortante, y comparar dicha sección con la sección del anclaje, siempre teniendo en cuenta que la mitad de la carga la absorbe el anclaje y la otra mitad los casquillos (stubs).

$$S_{comp \text{ anclaje}} = \frac{Esfuerzo_{compresión} \cdot n}{F_y} + \frac{Esfuerzo_{cortante} \cdot n}{0.75 F_y}$$

$$= \frac{112020 \cdot 1,5 \text{ daN}}{355 \text{ daN/mm}^2} + \frac{19881 \cdot 1,5 \text{ daN}}{0.75 \cdot 355 \text{ daN/mm}^2} = 746,44 \text{ mm}^2$$

$$S_{trac \text{ anclaje}} = \frac{Esfuerzo_{tracción} \cdot n}{F_y} + \frac{Esfuerzo_{tracción} \cdot n}{0.75 F_y}$$

$$= \frac{109127 \cdot 1,5 \text{ daN}}{355 \text{ daN/mm}^2} + \frac{14889 \cdot 1,5 \text{ daN}}{0.75 \cdot 355 \text{ daN/mm}^2} = 544,98 \text{ mm}^2$$

Siendo n el coeficiente de seguridad y F_y el límite de fluencia mínimo del acero.

La sección para un perfil L150x16 es de 457 mm². Al no ser la ninguna de las dos secciones calculadas superior al doble de la sección del anclaje, se puede afirmar que el montante cumple con la comprobación.

Comprobación del cleat

Esta comprobación se hace de acuerdo con lo establecido en la norma ASCE 10-15, en la que se compara la carga a la que está sometida el cleat con carga que es capaz de soportar una determinada sección del perfil. El esfuerzo al que está sometido el cleat es;

$$C_{cleat} = \frac{Esfuerzo_{max(trac,comp)} \cdot n}{2 \text{ N}^\circ \text{ de cleats}} = \frac{112020 \cdot 1,5 \text{ daN}}{2 \cdot 6 \text{ cleats}} = 18769 \text{ daN}$$

Según la norma ASCE 10-15, la distribución de presiones en el cleat no se produce en toda el ala, sino de un valor menor que depende de un parámetro geométrico que se calcula a continuación. En la figura 5-14 se puede ver esta distribución de presiones.

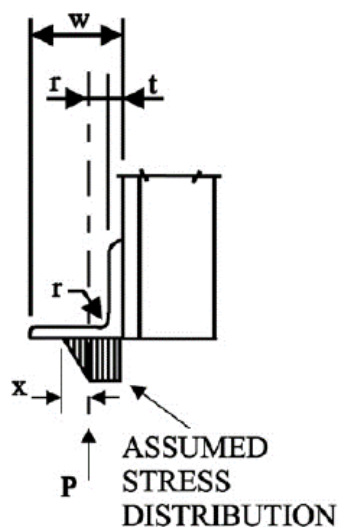


Figura 5-14. Distribución de presiones en el cleat

$$x = t \left[\frac{F_y}{1.19 f'_c} \right]^{0.5} \leq w - r - t$$

Siendo t el espesor (16 mm), r el radio (16 mm), w el ala del cleat (150 mm), mientras que f'_c es la resistencia característica del hormigón (20 N/mm²).

$$x = 16 \text{ mm} \left[\frac{355 \text{ N/mm}^2}{1.19 \cdot 20 \text{ N/mm}^2} \right]^{0.5} = 61,79 \text{ mm} < 118 \text{ mm}$$

Con este parámetro se puede calcular la resistencia que debe soportar el cleat.

$$P_{cleat} = 1.19 f'_c b \left(t + r + \frac{x}{2} \right) = 1.19 \cdot 2 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} \cdot 150 \text{ mm} \left(16 + 16 + \frac{61,79}{2} \right) \text{ mm} = 22454,2 \text{ daN}$$

Como la resistencia del cleat es mayor que el esfuerzo al que está sometido el cleat, se puede afirmar que tanto el perfil como el número de cleats son suficientes para que se cumpla la comprobación.

Comprobación del tornillo

En este tipo de estructuras, los tornillos suelen trabajar siempre a cortadura, por lo que habrá que calcular el esfuerzo cortante al que están sometidos los tornillos y compararlo con el esfuerzo cortante máximo que este puede soportar. El esfuerzo cortante al que está sometido el tornillo se va a calcular de forma análoga al cálculo del esfuerzo al que estaba sometido el cleat.

$$C_{tornillo} = \frac{\text{Esfuerzo}_{\max(\text{trac}, \text{comp})} \cdot n}{2 \cdot N^{\circ} \text{ Tornillos } N^{\circ} \text{ de cleats}} = \frac{112020 \cdot 1,5 \text{ daN}}{2 \cdot 2 \cdot 6 \text{ cleats}} = 9384,5 \text{ daN}$$

El cortante que puede soportar un tornillo se puede aproximar a que es el 80% de la resistencia máxima a tracción del tornillo. Estos tornillos serán M20 de calidad 8.8., por lo que la resistencia máxima a tracción de 800 N/mm². Por tanto:

$$P_{tornillo} = 0,8 f_u \pi \frac{D^2}{4} = 0,8 \cdot 800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \pi \frac{20^2}{4} \text{ mm}^2 = 16084,95 \text{ daN}$$

Por tanto, los tornillos también cumplen con la comprobación.

La última comprobación que se debe realizar es la adherencia entre el hormigón y el acero, calculando la longitud mínima que debe tener el anclaje para que la adherencia sea aceptable.

Según el RLAT, la fuerza de adherencia debe ser la mitad de la reacción máxima (compresión) con un coeficiente de seguridad de 1,5, es decir:

$$F_{adh} > 0.75 \text{ Reacción}_{\text{compresión}}$$

Esta fuerza de adherencia entre el hormigón y el acero embebido tiene por expresión:

$$F_{adh} = \tau_{adh} \cdot S_{\text{contacto}}$$

$$\text{Siendo } \tau_{adh} = 0.253 \sqrt{20} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 1.1314 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad S_{\text{contacto}} = 4 \cdot 150 \text{ mm} \cdot l_{\text{anclaje}}$$

Conocida la expresión de la fuerza de adherencia se puede despejar el valor de la longitud mínima del anclaje.

$$l_{\text{anclaje}} = \frac{0.75 \cdot 1501520 \text{ N}}{1.1314 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 4 \cdot 150 \text{ mm}} = 1659 \text{ mm}$$

Esta longitud es muy inferior a la longitud que tiene el anclaje, que es de 3,4 m.

Por tanto, el anclaje embebido en el hormigón cumple con todas las comprobaciones, por lo que no sería necesario alargar el refuerzo del montante hasta la cimentación, evitando así tener que picar la peana. Sin embargo, sí que es necesario aumentar el tamaño de la fundación ya que la reacción de tracción mayorada por el coeficiente de seguridad es superior al peso de todos los elementos que se oponen al arranque de la cimentación. Además, la superficie de la solera es insuficiente ya que se supera la tensión máxima admisible.

5.3.2. Dimensionado del refuerzo de la cimentación.

El refuerzo de la cimentación consiste en realizar una excavación junto a la cimentación existente y rellenar con hormigón armado en una zanja. El motivo por el que se realiza esta zanja es que no se puede reforzar el perímetro completo de la fundación, ya que el apoyo impide que las máquinas excavadoras puedan trabajar en el perímetro completo, por lo que se realiza un refuerzo en una única dirección de sección rectangular, ya que es la geometría más sencilla a la hora de escarbar. En la figura 5-15 se puede ver un esquema de esta nueva cimentación, donde la parte sombreada en verde representa la fundación original y el sombreado en amarillo representa el refuerzo que se va a dimensionar, con las dimensiones de fundación original y con una cota de valor X que indica el valor de la anchura del refuerzo que se va a dimensionar.

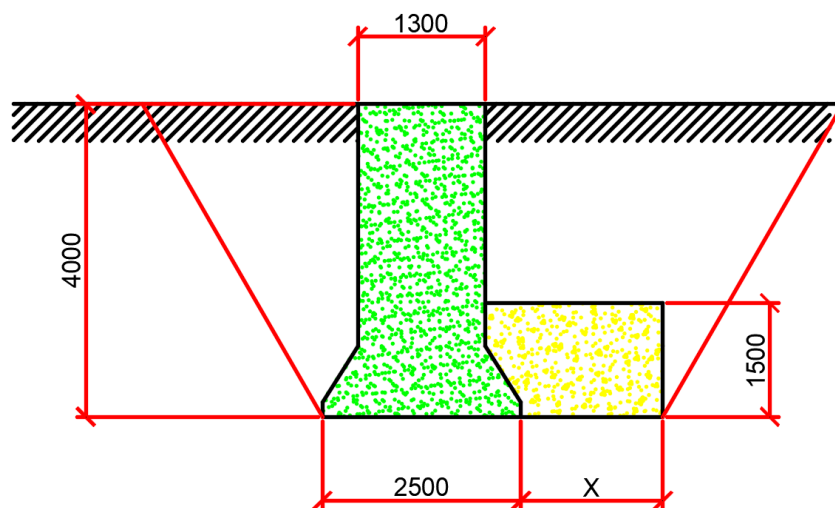


Figura 5-15. Esquema y dimensiones de la nueva cimentación

La altura de este nuevo refuerzo no tiene por qué llegar hasta el nivel del suelo, ya que supondría un gasto innecesario de hormigón, y la tierra que gravita encima del refuerzo favorece a impedir el arranque de la cimentación.

A continuación, se va a describir cómo se deben calcular las comprobaciones al arranque y a la compresión. El proceso seguido para realizar el dimensionado ha sido realizar una hoja de cálculo en Excel en la que se plantean todas las ecuaciones en función de la variable " X ". Modificando este valor, se comprueba el factor de seguridad y la tensión que soporta el terreno para poder verificar que se cumplen las dos comprobaciones.

Comprobación al arranque

Para esta nueva comprobación, se conserva el esfuerzo de tracción sobre el montante (T) es de 1091270 daN. El ángulo de talud también se mantiene en 30° y se van a calcular los mismos pesos que en la comprobación de la cimentación original. Debido a que el montante original falla a tracción, es necesario introducir el nuevo refuerzo dentro de la cimentación.

Peso del macizo de hormigón.

El peso del macizo de hormigón se va a calcular partiendo la nueva cimentación en tres partes cuyo volumen es sencillo de calcular. En la figura 5-16 se puede ver esta descomposición.

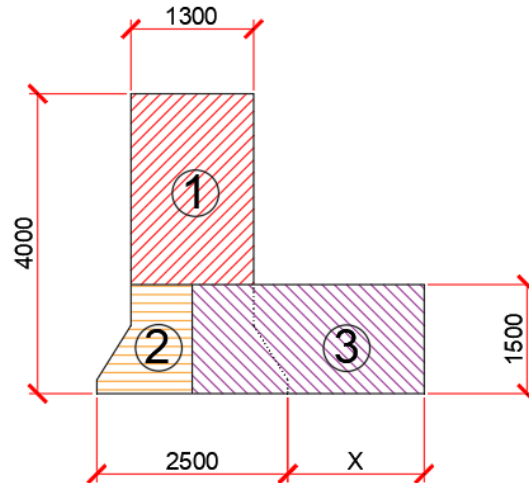


Figura 5-16. Descomposición de volúmenes de la nueva cimentación

El volumen 1 se calculará como un cilindro, el volumen 2 como la mitad de la diferencia del volumen del bloque original menos el volumen 1, mientras que el volumen 3 se calculará como un prisma rectangular.

$$P_1 = 2300 \text{ kg/m}^3 \left((4 - 1.5) \text{ m} \cdot \left(\pi \frac{1.3^2}{4} \right) \text{ m}^2 \right) = 7632.10 \text{ kg}$$

$$P_2 = 2300 \text{ kg/m}^3 \left(0.5 \left(\frac{17088,7}{2300} - 3.31 \right) \text{ m}^3 \right) = 4728.29 \text{ kg}$$

$$P_3 = 2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (1.25 + x) \cdot 1.5 \cdot 2.5 = 8625(1.25 + x) \text{ kg}$$

Peso de las tierras que gravitan sobre el terreno.

El peso de las tierras arrancadas se ha calculado como la mitad de las tierras que gravitaban en la fundación anterior más las tierras que gravitan sobre el refuerzo, que se calculan como un prisma rectangular.

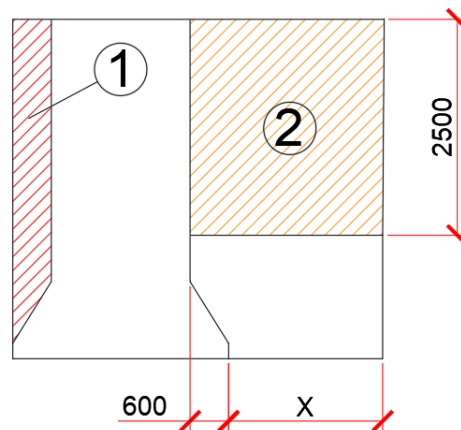


Figura 5-17. Volúmenes de tierra que gravitan sobre la cimentación

$$P_1 = 0.5 \cdot 20748,64 \text{ kg} = 10374,32 \text{ kg}$$

$$P_2 = 1700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0.6 + x) \cdot 2.5 \cdot 2.5 = 10625(0.6 + x) \text{ kg}$$

Peso de las tierras arrancadas según el ángulo de talud del terreno β .

En este caso el peso de las tierras arrancadas se calcula por partes. Por un lado, se calculará el volumen de las tierras arrancadas por las caras circulares y por otro lado el volumen de tierras arrancadas por las caras rectangulares. En ambos casos, se va a calcular el volumen total de las tierras arrancadas y se dividirá por dos. La suma de estas mitades formará el volumen de tierras arrancadas por esta cimentación mixta.

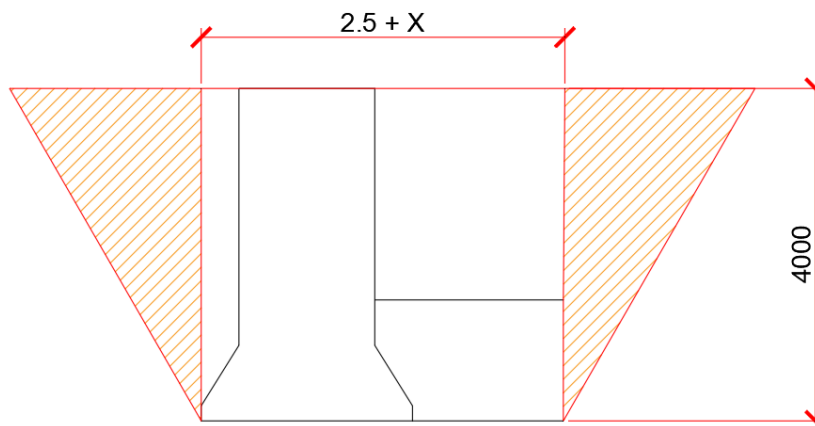


Figura 5-18. Volúmenes de las tierras arrancadas por el ángulo de talud

$$P_{cil} = 0.5 \cdot 99647.54 \text{ kg} = 49823.77 \text{ kg}$$

$$P_{rec} = 0.5 \cdot 1700 \text{ kg/m}^3 \left[\frac{4}{3} (A + a + \sqrt{A \cdot a}) - 4A \right]$$

$$\text{Siendo } A = 2.5(2.5 + 2x) \quad a = (2.5 + 8tg(30))(2.5 + 2x + 8tg(30))$$

Para que la nueva cimentación reforzada cumpla con esta comprobación, la suma de estos tres pesos debe ser mayor que la reacción de tracción mayorada por el coeficiente de seguridad, es decir, debe ser superior a 163690 kg.

Comprobación a la compresión

Mediante la hoja de cálculo creada en Excel, variando el ancho de la cimentación se puede obtener el peso del macizo de hormigón y de la tierra que gravita sobre la nueva cimentación. Con estos datos más la reacción de compresión se puede obtener la presión sobre el terreno y comprobar si es admisible.

Si una de estas dos comprobaciones no cumpliera, se debe aumentar el ancho del refuerzo (X) hasta que ambas comprobaciones se satisfagan.

Resultado

En la figura 5-19 se muestra una captura de pantalla de la plantilla que se ha creado para el estudio de esta nueva cimentación reforzada. Cada una de las tres comprobaciones queda recuadrada y los datos del estudio se encuentran en la parte superior y en la parte derecha. El recuadro rellenado en naranja representa el ancho del refuerzo, es decir, el valor de X, que al modificarlo el programa te indica si las comprobaciones se cumplen o no. Como se ve en la figura, el ancho de la cimentación mínimo para que las dos comprobaciones (la tercera ya se cumplía con el anclaje y los stubs existentes) se cumplan es de 1 m. Por lo que habría que escarbar una longitud igual a 1 m con una anchura de 2,5 m (el ancho de la cimentación existente), y hormigonar una altura de 1,5 m.

Además del hormigón, se han de colocar redondos de acero corrugado, tipo B400S, que es muy empleado a la hora de armar el hormigón. Estos redondos están equiespaciados a lo largo y ancho del nuevo refuerzo, y se añaden otros redondos que unen el hormigón nuevo con el hormigón de la cimentación original. Se perforará la cimentación original para introducir los redondos y la unión entre ambas partes se harán aplicando mortero adhesivo mediante inyección. En la figura 5-20 se muestra un esquema de la nueva cimentación reforzada con las dimensiones más significativas.

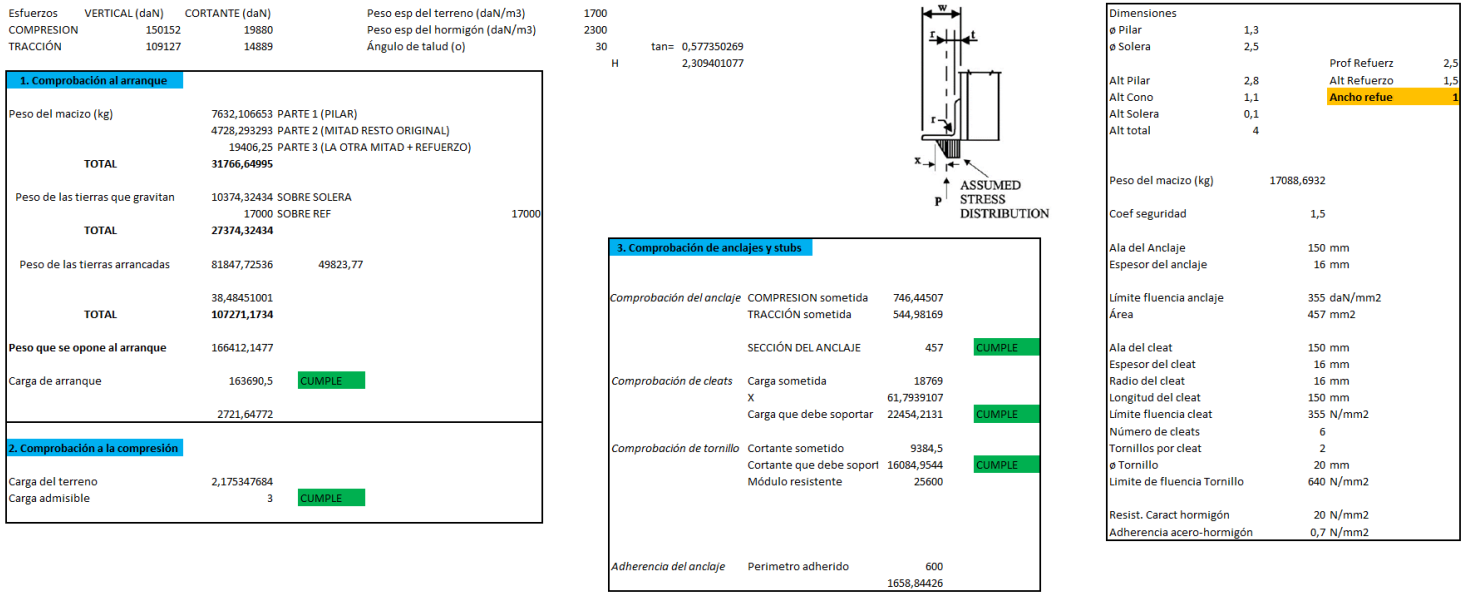


Figura 5-19. Hoja de cálculo para el cálculo de las comprobaciones

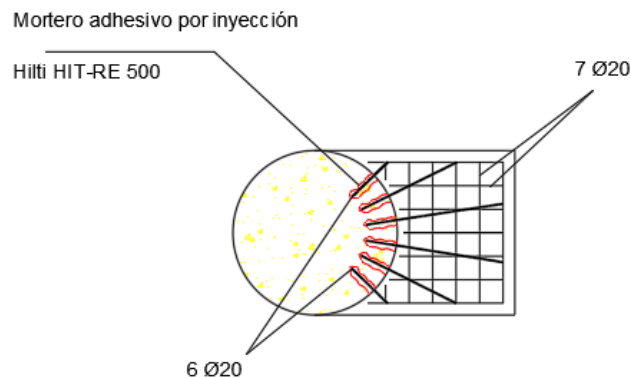
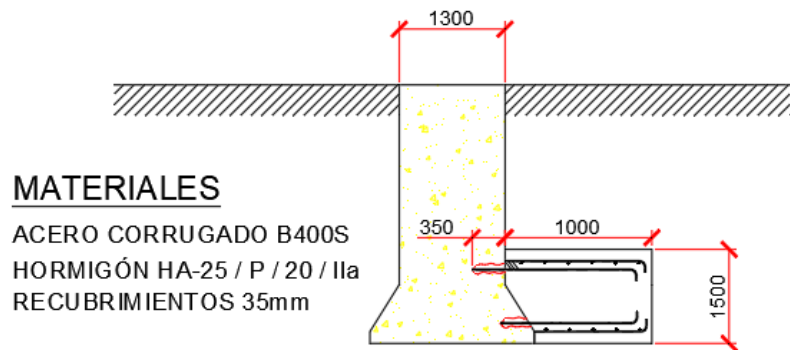


Figura 5-20. Esquema de la nueva cimentación.

6 INSTALACIÓN DE LA NUEVA LÍNEA

6.1. Trabajos de instalación

La nueva línea requiere que los apoyos de anclaje sean sustituidos por otros más resistentes, mientras que los apoyos de suspensión serán modificados con una nueva cabeza y unos refuerzos en el fuste ya calculados en el apartado anterior. Una obra de estas dimensiones requiere un plazo de ejecución amplio debido a que el montaje de un poste de estas dimensiones puede llevar varios días en función del proceso seguido para el montaje.

Si el terreno es llano y no hay grandes obstáculos en los alrededores (tales como grandes rocas o terraplenes), se monta el apoyo en horizontal sobre el terreno y posteriormente se va levantando por tramos mediante una o varias grúas y se va montando por módulos. Cuando el terreno tiene grandes desniveles, y no es posible montar el apoyo en horizontal junto a su ubicación, un helicóptero levanta un tramo montado en otro lugar distinto a las inmediaciones del apoyo y se va montando también por módulos, aunque esta operación es bastante costosa y el helicóptero no suele levantar más de 1000 kg debido a las limitaciones de peso máximo que posee. Es por ello por lo que el montaje de un apoyo puede ser una tarea larga y complicada. En la figura 6-1 se muestra el proceso de montaje para ambos casos.

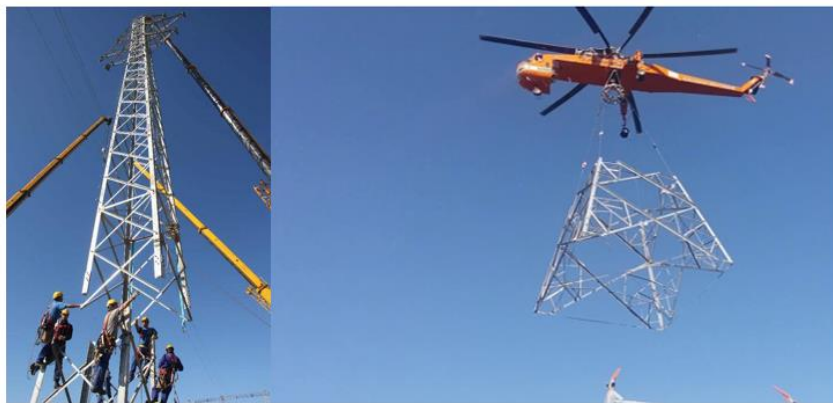


Figura 6-1. Montaje de los apoyos

Una línea de transporte suele tener varios kilómetros de longitud, por lo que la instalación de estas nuevas estructuras puede tener un plazo de varios meses, incluso años, ya que el mayor problema a la hora de operar en una línea eléctrica es que hay que realizar el descargo de la línea, es decir, cortar el paso de electricidad por los conductores mientras se realiza la instalación. El corte de una línea eléctrica y, sobre todo una línea de transporte no puede extenderse durante un tiempo prolongado debido a que el corte de este tipo de líneas puede poner en peligro el suministro eléctrico de una región.

Por este motivo hay que descartar la posibilidad de montar la línea eléctrica completo en un solo corte. Cabe la posibilidad de ir instalando la nueva línea “por tramos”, o mejor dicho, por cantones. Si la compañía eléctrica, en este caso REE, concede un corte temporal lo suficientemente amplio como para montar los dos apoyos de anclaje en los extremos y montar los refuerzos y la nueva cabeza de los apoyos de suspensión de los vanos intermedios, se podría ir instalando un cantón por cada corte hasta completar todos los cantones de la línea.

La secuencia de operaciones que se debe seguir para hacer la instalación por cantones es:

- 1) Antes de que se produzca el corte de la línea, en los días previos puede realizar el hormigonado de las nuevas cimentaciones para los apoyos de anclaje, así como el refuerzo de las cimentaciones de los apoyos de suspensión ya calculado en el apartado anterior. Una vez se hayan nivelado las testas del anclaje y la cimentación solidifique, ya se está en situación de poder montar los nuevos apoyos o tramos para los postes existentes que se van a modificar.
- 2) Cuando se produzca el corte de la línea, se deben descolgar los conductores de los apoyos de suspensión y posteriormente de los apoyos de anclaje, ya que, si se hace a la inversa, los apoyos de suspensión no van a soportar los esfuerzos del conductor y van a llegar al colapso. Al retirar el apoyo de anclaje, los

conductores del vano cuyo apoyo inicial o final es el de anclaje del cantón que se va a modificar quedarán también suspendidos y quedarán a la altura del terreno fijados por unos cubos de hormigón que impiden que estos conductores asciendan. Otra opción, muy usada sobre todo en líneas de menos nivel de tensión, es colocar un apoyo de avería que sirva para sustentar los conductores en lugar de dejar el cable del cantón anterior en el suelo. Debido a la gran distancia que hay entre conductores en una línea de 400 kV, esta opción queda descartada debido a que habría que instalar apoyos de avería para sustentar estos conductores.

- 3) Con los conductores ya en el suelo, es el momento de desmontar el apoyo de anclaje existente, para que en el espacio que este deja se monte el nuevo apoyo de anclaje, ya sea mediante grúa o mediante un helicóptero como en la figura anterior.
- 4) Mientras estos dos apoyos se van montando, si los recursos humanos lo permiten, se pueden ir desmontando los tramos de cabeza de los apoyos de suspensión que sobran e ir reforzando los montantes y las diagonales del fuste que ha sido necesario montar. Una vez se retire esta cabeza y el apoyo esté reforzado, se puede comenzar a montar por tramos la nueva cabeza calculada en el apartado anterior.
- 5) Cuando ya se haya terminado con el proceso de montaje de la estructura metálica, se procede a tender los conductores sobre los nuevos apoyos tomando como referencia los valores calculados en las tablas de tendido a la hora de diseñar la línea. Llegados a este punto es importante tener en cuenta que el apoyo de anclaje va a estar sometido a esfuerzos diferentes en el vano anterior y posterior, lo que puede producir un desequilibrio que la estructura por sí misma no pueda soportar. En esta situación temporal, el apoyo está trabajando con un apoyo fin de línea en lugar de un apoyo de anclaje, función que no ha de cumplir desde un punto de vista mecánico este apoyo. En España, no existe ninguna norma en la que se trate el tema de los esfuerzos en los apoyos durante la instalación de los conductores, mientras que en países de Sudamérica como Nicaragua o Guatemala sí que se añaden hipótesis de cálculo a la hora de calcular los esfuerzos en los apoyos en el momento del tendido.

Para compensar el esfuerzo que el otro cantón va a ejercer sobre el nuevo apoyo, se instalarán tirantes que trabajen a tracción para evitar que el apoyo colapse y caiga. En la figura 6-2 se puede ver un apoyo que se ha diseñado atirantado. En el caso de nuestra línea de estudio, esta situación es temporal.



Figura 6-2. Apoyo autosportado

Una vez que los conductores del cantón han sido tensados conforme a los datos de la tabla de tendido, se pueden retirar los tirantes de los apoyos de anclaje y volver a dar servicio a la línea hasta que se vuelva a instalar el siguiente cantón, hasta llegar al primer y último cantón, en el que se hará una derivación del circuito de 800 kV para que este entre por otra zona de la subestación que también debe ser diseñada a la hora de implantar este tipo de líneas.

Sin embargo, hay que destacar que la posición de los conductores de 400 kV se ven modificadas en el vano que une el cantón antiguo con el cantón moderno. Este tema será comentado detalladamente en el próximo apartado debido a su gran importancia.

6.2. Abaniquo de conductores

Cuando la disposición de los conductores se ve modificada en un vano, es necesario que la posición de los conductores de 400 kV se vea modificada en el vano que une el cantón antiguo con el cantón nuevo ya que la

línea original tenía las tres fases del circuito en uno de los lados del apoyo a distintas alturas, mientras que en la nueva línea las tres fases siguen un montaje en capa con las tres fases a la misma cota.

En el transcurso del vano en el que se produce esta variación, se ha de tener especial cuidado la distancia mínima entre los conductores, ya que se puede dar el caso de que dos conductores se encuentren a una distancia de separación inferior a la distancia mínima entre conductores que marca la norma. Por ello es necesario realizar un análisis de la catenaria que forman los conductores durante ese vano y comprobar si la distancia mínima entre los conductores se encuentra por debajo del valor mínimo que marca el RLAT.

Se ha supuesto que la anchura de la distancia desde el centro de la viga hasta el punto de fijación de la cadena de amarre es de 13,7 m, una distancia inferior a la del apoyo de suspensión debido a que se ha considerado que el desvío máximo de la cadena de amarre es de 15°, mientras que en el apoyo de suspensión se había considerado 40°. Con esta distancia de 13,7 m al eje de la torre se satisfacen las distancias mínimas de seguridad que se han calculado en el capítulo 4. En la figura 6-3 se muestra un esquema de la viga para este apoyo de anclaje.

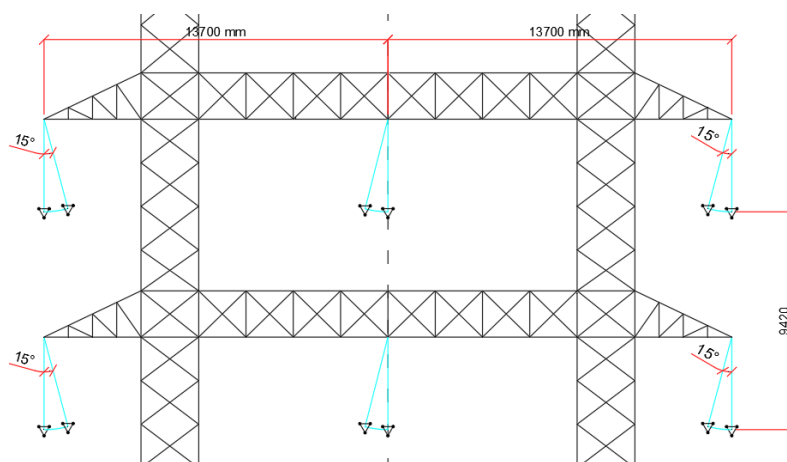


Figura 6-3. Distancia entre fases para una cabeza de anclaje homóloga a la del apoyo de suspensión.

Según el RLAT, la distancia entre los conductores de fase del mismo circuito o circuitos distintos debe ser tal que no haya riesgo alguno de cortocircuito entre fases, teniendo presente los efectos de las oscilaciones de los conductores debidas al viento y al desprendimiento de la nieve acumulada sobre ellos.

Con este objeto, la separación mínima entre conductores de fase se determinará por la fórmula siguiente:

$$D = K\sqrt{F + L} + K'D_{pp}$$

Siendo K un coeficiente que depende de la oscilación de los conductores con el viento, que para una línea superior a 30 kV y con un ángulo de oscilación máximo de 40° es 0,6.

F es la flecha máxima en metros según la hipótesis de flecha máxima del apartado 3.2.3. del RLAT, para las tres siguientes hipótesis.

- Hipótesis de viento. Sometidos a la acción de su peso propio y a una sobrecarga de viento, según el apartado 3.1.2, para una velocidad de viento de 120 km/h a la temperatura de + 15 °C. La aplicación de los parámetros de referencia en la hipótesis de viento es independiente de la categoría de la línea, siendo, para todas las líneas 120 km/h de velocidad de viento y 15°C de temperatura.
- Hipótesis de temperatura. Sometidos a la acción de su peso propio, a la temperatura máxima previsible, teniendo en cuenta las condiciones climatológicas y de servicio de la línea. Para las líneas de categoría especial, esta temperatura no será en ningún caso inferior a + 85 °C para los conductores de fase ni inferior a + 50 °C para los cables de tierra. Para el resto de líneas, tanto para los conductores de fase como para los cables de tierra, esta temperatura no será en ningún caso inferior a + 50 °C.
- Hipótesis de hielo. Sometidos a la acción de su peso propio y a la sobrecarga de hielo correspondiente a la zona, según el apartado 3.1.3, a la temperatura de 0 °C

Como puede verse en las tablas de tendido del anexo C, la flecha máxima de estas tres hipótesis se da en la

hipótesis de temperatura, en la que el conductor tiene una flecha de 22,28 m.

L es la longitud en metros de la cadena de suspensión, que se ha estimado una longitud de 5 m.

K' es un coeficiente que depende de la tensión nominal de la línea $K'=0,85$ para líneas de categoría especial y 0,75 para el resto de líneas.

Dpp es la distancia mínima aérea especificada, para prevenir una descarga disruptiva entre conductores de fase durante sobretensiones de frente lento o rápido, cuyo valor se obtiene de la tabla 4-7 y es 3,68 m.

Por tanto, el valor de la distancia mínima entre conductores es:

$$D = 0,6 \sqrt{22,28 + 5} + 0,85 \cdot 3,68 = 6,26 \text{ m}$$

Para analizar la catenaria, se va a emplear el software Postwin que se empleó anteriormente para calcular la tabla de tendido y los esfuerzos máximos en los conductores. En este programa basta introducir las coordenadas relativas de cada fase en el apoyo inicial y final del vano y el programa analiza la catenaria de cada uno de los conductores que forman la fase. En la figura 6-4 se muestra la disposición de los conductores en cada uno de los dos apoyos implicados.

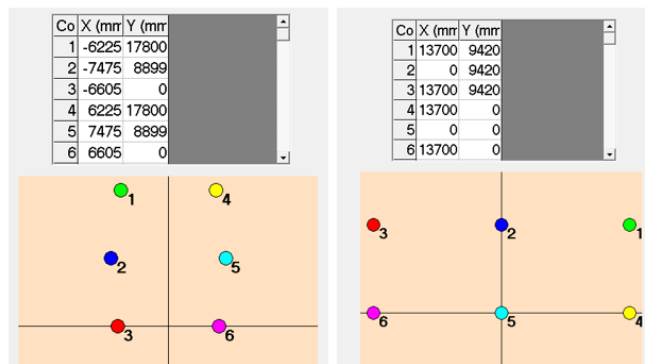


Figura 6-4. Disposición de los conductores Condor en el apoyo original (izquierda) y nuevo (derecha)

Con estos valores, se puede obtener el valor de la catenaria de una forma aproximada y obtener la distancia mínima entre los conductores en el transcurso del vano. En la figura 6-5 se puede ver una vista espacial de la catenaria de los conductores al pasar de un apoyo a otro, mostrándose en la parte inferior la distancia mínima entre los conductores.

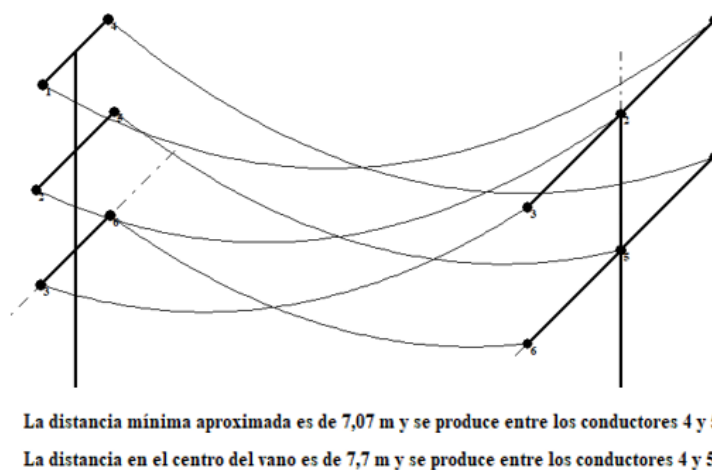


Figura 6-5. Distribución de las catenarias en el paso del circuito antiguo al nuevo

Como se muestra en la figura anterior, la distancia mínima entre los conductores es de 7,07 m, distancia superior a la mínima de seguridad calculada anteriormente (6,26 m), por lo que sería posible hacer este montaje y mantenerlo en esta disposición mientras la línea continúe transportando energía hasta el próximo corte del suministro.

7 ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se va a realizar un presupuesto con el que se pretende obtener de una forma aproximada el coste de realizar la conversión de la línea de 400 kV original en la nueva línea de 800/400 kV a partir de una ecuación empírica que relaciona el coste de la nueva línea por cada kilómetro de esta. Esta ecuación se va a obtener realizando un presupuesto detallado de los trabajos que se deben realizar y el coste por cada kilómetro que cada uno de estos tienen. En los sucesivos apartados se detallarán aquellos factores que se han tenido en cuenta a la hora de plantear la ecuación y las limitaciones que ésta tiene.

7.1. Planteamiento de la ecuación

El primer paso para plantear la ecuación es clasificar todos los trabajos y actividades que se van a tener en cuenta a la hora de realizar el presupuesto. Para ello, el trabajo se va a desglosar en partidas. Cada una de estas partidas están formadas por trabajos que están relacionados entre sí. Esta organización permite identificar de forma rápida todos los trabajos que se han tenido en cuenta y es sencillo obtener el coste total del proyecto.

Las partidas consideradas en este proyecto son:

1. Ingeniería del proyecto.
2. Materiales.
3. Obra civil.
4. Armado e izado de apoyos
5. Tendido del conductor

Todos estos costes se pueden clasificar como variables. Existen otros costes fijos como el presupuesto de la gestión de residuos o el presupuesto de seguridad que no se han tenido en cuenta a la hora de realizar el presupuesto, ya que es un coste que no está bien definido. En caso de conocerse este coste, se podría dividir entre los kilómetros de la línea y añadirlo al coste final de este presupuesto que se está realizando.

Cabe destacar que en este presupuesto sólo se ha tenido en cuenta costes que afectan a la línea aérea de alta tensión. Se han descartado otros costes que habría que añadir al coste de la conversión, como el costo de expansión de la subestación debido al aumento del nivel de tensión o todos los costes que conllevan la gestión y tramitación de licencias y proyectos.

A continuación, se van a clasificar los trabajos que la forman cada partida y el coste de esta.

1. Ingeniería del proyecto.

Los trabajos que forman esta partida son:

- Cálculos de la línea
- Elaboración de planos
- Elaboración del proyecto ejecución de obra
- Elaboración del estudio topográfico

El coste unitario que se ha considerado para esta partida es $C_{ui}=3500 \text{ €/km}$.

2. Materiales.

Los trabajos que forman esta partida son:

- Estructura metálica
- Conductor del circuito del 800 kV
- Aisladores

La fabricación de la estructura metálica es difícil de presupuestar, debido varios factores que se detallan a continuación.

- Cada línea, en función del terreno, puede tener apoyos con alturas muy diferentes, y puede que en una línea predominen apoyos de gran envergadura mientras que en otra predominen los de baja. Lo que afecta de gran manera al peso de los apoyos.
- De igual forma se pueden tener alturas diferentes, cada línea tendrá apoyos sometidos a esfuerzos muy diferentes. Una línea con muchos apoyos de alineación no tendrá el mismo esfuerzo en los apoyos que otra línea en la que éstos tengan que soportar ángulos muy grandes. De igual forma que los apoyos con grandes vanos no estarán sometidos al mismo esfuerzo que apoyos con vanos pequeños.
- En este proyecto no se ha estudiado en apoyo de anclaje de la línea y por tanto no se tiene un peso orientativo del mismo.

Es por ello por lo que se han tenido que hacer varias aproximaciones para calcular los pesos medios que atribuirle al apoyo de suspensión y anclaje.

Apoyo de suspensión

En el apartado 3 se hizo referencia al apoyo de suspensión de la línea de 400 kV original. El peso del apoyo tras modelarlo en el software Tower era de 26663 kg, de los cuales 16283 kg correspondían a la parte del fuste que se mantenía para el nuevo apoyo de 800/400 kV y 10380 kg correspondían a la parte de la cabeza y fuste que se retiraban.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el peso proporcionado por Tower difiere del peso original de la estructura debido a que en el software sólo se tiene en cuenta la longitud de los perfiles que forman la estructura, sin considerar todas las cartelas que son necesarias instalar en el apoyo ni los tornillos que sean necesarios en las uniones. Según REE, el apoyo D4S2V en su altura tipo AG, tiene un peso de 32488 kg. Conociendo este peso, se puede sacar el tanto por ciento que varía el peso proporcionado por Tower del peso original, un dato de vital importancia para realizar estas aproximaciones.

$$\Delta_{\text{peso}} = \frac{32488 \text{ kg}}{26663 \text{ kg}} = 1,2185 \approx 1,22$$

Es decir, la diferencia entre el peso proporcionado por Tower y el peso real de la estructura es del 22%.

Con este dato se va a obtener el peso del nuevo apoyo que se ha diseñado para el nivel de tensión superior. En el Apartado 5 se desglosó en la tabla 5-8 el peso del fuste, de la nueva cabeza y de los refuerzos necesarios en el apoyo. Con estos valores y la variación del peso del apoyo original se va a hacer una aproximación del peso del nuevo apoyo.

Tabla 7-1. Peso de la nueva torre de suspensión

	Peso Tower (kg)	Peso incrementado (kg)
Fuste	16283	19865
Cabeza	27250	33245
Refuerzo	7317	8927
TOTAL	50850	62037

A continuación, se va a calcular un peso medio del nuevo apoyo de suspensión, ya que suponer el peso del apoyo de mayor altura calculado supondría mayorar en demasía los kg de acero necesarios por apoyo. En la tabla 7-2 se muestra el peso real de cada apoyo de la serie D4S2V en función de su altura, y se le ha restado en la siguiente columna el peso de la cabeza y la parte del fuste que se le retira ($1,22 \times 10380 = 12663$ kg. Esta cantidad es fija para todos los apoyos independientemente de la altura de este).

Tabla 7-2. Peso del fuste que se mantiene el del apoyo original de suspensión

Altura (m)	Peso total (kg)	Peso total del fuste que se mantiene (kg)
A0	15163	2499,4
AA	17044	4380,4
AB	19075	6411,4
AC	21232	8568,4
AD	23679	11015,4
AE	26227	13563,4
AF	29261	16597,4
AG	32488	19824,4

Para obtener el peso medio del fuste del nuevo apoyo, bastaría con hacer la media aritmética de estos valores. Sin embargo, se ha decidido realizar únicamente la media de las alturas “AC”, “AD” y “AE”, debido a que en una línea estas tres alturas son las más empleadas, lo que haría una mejor aproximación del peso.

$$P_{m \text{ fuste}} = \frac{8568.4 + 11015.4 + 13563.4 \text{ (kg)}}{3} = 11049 \approx 11050 \text{ kg}$$

En cuanto al peso medio del refuerzo, se va a hacer una aproximación de que el total se divide proporcionalmente entre las 8 alturas del fuste, es decir, 8927 kg que se reparten entre las 8 alturas. Considerando el peso medio del refuerzo el de la altura “AD”:

$$P_{m \text{ refuerzo}} = 5580 \text{ kg}$$

Por último, el peso de la cabeza es fijo para todos los apoyos, independientemente de la altura de los mismos, por tanto:

$$P_{\text{cabeza}} = 33245 \approx 33250 \text{ kg}$$

Por tanto, el peso medio del apoyo de suspensión es:

$$P_{m \text{ apoyo de suspensión}} = 49880 \text{ kg}$$

Apoyo de anclaje

El apoyo de anclaje no se va a calcular como el peso de un solo apoyo en sí, sino que se va a dividir en función del ángulo máximo que forma el conductor en la línea, ya que los esfuerzos, y por tanto los pesos, pueden variar significativamente en función del tipo de apoyo.

En el diseño de líneas es usual dividir los apoyos de anclaje en función del ángulo máximo que puede formar la cadena amarre. En este caso, el límite para cada apoyo es de 15°, 30° y 60°. Estos apoyos se corresponden con los apoyos de la serie D4 que se ha estudiado en esta línea (ver apartado 4). En la tabla 7-3 se muestra el peso de dichos apoyos para las alturas “AC”, “AD” y “AE”. De forma análoga al apoyo de suspensión, se va a obtener un peso medio del apoyo en función de estas tres alturas.

Tabla 7-3. Peso medio de los apoyos de anclaje originales

	D4A2	D4A3	D4A4
	15°	30°	60° y FL
AC	24443	35253	49700
AD	27498	39092	54819
AE	30848	43200	60366
PESO MEDIO (kg)	27600	39200	55000

Volviendo a los datos proporcionados por Tower en el apoyo de suspensión original de 400 kV, el fuste (16283 kg) representa aproximadamente el 61% del peso total de la estructura (26663 kg). Este dato se va a emplear para obtener el peso del fuste del apoyo de anclaje mediante analogía.

Tabla 7-4. Peso medio del fuste de los apoyos de anclaje originales

	D4A2	D4A3	D4A4
	15°	30°	60° y FL
PESO APOYO (kg)	27600	39200	55000
PESO FUSTE (kg)	16835	23900	33530

Conocido el peso de los fustes de los apoyos de anclaje y del apoyo de suspensión, se puede obtener la relación entre el peso de ambos tipos de apoyos.

Tabla 7-5. Relación De peso entre los fustes de suspensión y anclaje originales

	D4A2	D4A3	D4A4
PESO FUSTE (kg)	16835	23900	33530
PESO FUSTE SUSPENSIÓN (kg)		11050	
RELACIÓN ANCLAJE/SUSPENSIÓN	1.52	2.16	3.03

Esta relación se empleará para obtener una aproximación del peso de los apoyos de anclaje multiplicando dicha relación por el peso del apoyo de suspensión.

Tabla 7-6. Peso medio de los nuevos apoyos de anclaje

	$(\alpha/2) < 15^\circ$	$(\alpha/2) < 30^\circ$	$(\alpha/2) < 60^\circ$
PESO APOYO DE SUSPENSIÓN (kg)		49880	
PESO DEL NUEVO APOYO (kg)	76000	108000	151400

El último paso para obtener el peso medio del apoyo de anclaje es considerar qué tanto por ciento de cada uno de estos apoyos suelen instalarse en una línea. Basándose en varios estudios de líneas realizados, el 45% de las cadenas de amarre de los apoyos de anclaje forman un ángulo inferior a 15°, el 45% un ángulo comprendido entre 15° y 30°, y el 10% restante un ángulo superior a 30° e inferior a 60°. Mediante esta relación se puede obtener entonces el peso medio del apoyo de anclaje.

$$P_m \text{ apoyo de anclaje} = 0.45 \cdot 76000 + 0.45 \cdot 108000 + 0.1 \cdot 151400 = 97878,65 \approx 97900 \text{ kg}$$

Una vez conocido el peso de ambos apoyos, habrá que establecer una relación que permita relacionar ambos apoyos en un tramo determinado de la línea. Para ello se va a suponer que:

- Se instalarán 2 apoyos por km, para cumplir con la condición de diseño de que el vano medio era de 500 m.
- En una línea aérea de alta tensión, el 75% de los apoyos son de suspensión, mientras que el 25% son de anclaje.

Por tanto, en un kilómetro de línea habrá 1.5 apoyos de suspensión y 0.5 apoyos de anclaje. Considerando un coste unitario del acero ya galvanizado de 1.8 €/kg, obtenemos el coste de fabricación de toda la estructura metálica.

$$C_{estructura} = (0.5 \cdot 97900) + (1.5 \cdot 49880) \text{ kg} \cdot 1.8 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 222786 \text{ €/km}$$

Este valor podría ser válido para obtener el costo unitario de la estructura. Sin embargo, este valor puede tener un error apreciable si gran parte de los apoyos son de gran altura o viceversa. Es por ello por lo que se van a crear dos coeficientes C_a y C_b que servirán para mayorar o minorar este peso de acero en función de las alturas de los apoyos de la línea. También se va a añadir al apoyo de suspensión un segundo coeficiente C_c que se podría emplear si hubiese otro apoyo de suspensión que soportase menos esfuerzo transversal por fase de 800 kV (T) y por tanto pesase menos. Por tanto, el coste de fabricación de la estructura modificado será:

$$C_{estructura} = 88110 C_a + 134676 C_b \cdot C_c \text{ €/km}$$

Siendo:

$$C_a = \begin{cases} 1.2 & \text{si } N^\circ \text{ Apoyos ancl } (H_u > 64 \text{ m}) > 2 \cdot N^\circ \text{ Apoyos ancl } (H_u < 64 \text{ m}) \\ 0.8 & \text{si } N^\circ \text{ Apoyos ancl } (H_u < 64 \text{ m}) > 2 \cdot N^\circ \text{ Apoyos ancl } (H_u > 64 \text{ m}) \\ 1 & \text{en el resto de los casos} \end{cases}$$

$$C_b = \begin{cases} 1.2 & \text{si } N^\circ \text{ Apoyos susp } (H_u > 64 \text{ m}) > 2 \cdot N^\circ \text{ Apoyos susp } (H_u < 64 \text{ m}) \\ 0.8 & \text{si } N^\circ \text{ Apoyos susp } (H_u < 64 \text{ m}) > 2 \cdot N^\circ \text{ Apoyos susp } (H_u > 64 \text{ m}) \\ 1 & \text{en el resto de los casos} \end{cases}$$

$$C_c = \begin{cases} 1.1 & \text{si } N^\circ \text{ Apoyos susp } T > 5500 \text{ kg} > 2 \cdot N^\circ \text{ Apoyos susp } T < 5500 \text{ kg} \\ 0.9 & \text{si } N^\circ \text{ Apoyos susp } T < 5500 \text{ kg} > 2 \cdot N^\circ \text{ Apoyos susp } T > 5500 \text{ kg} \\ 1 & \text{en el resto de los casos} \end{cases}$$

Una vez finalizado el apartado de la estructura del apoyo, se procede a calcular el coste del conductor del circuito de 800 kV, ya que se van a reutilizar los conductores del doble circuito de 400 kV. El conductor elegido para el circuito superior era del tipo LARL Cardinal, con cinco conductores por fase. Según los datos de la tabla X, el peso del conductor era de 1,755 kg/m. Asignando un coste del conductor de 2,60 €/kg de cable, el coste del conductor sería:

$$C_{cond} = 5 \text{ conductores} \cdot 3 \text{ fases} \cdot 1.755 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 1000 \frac{\text{m}}{\text{km}} \cdot 2.60 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 68445 \text{ €/km}$$

Para finalizar con esta partida, se procede a calcular el coste de los aisladores. Para el circuito de 800 kV, se debe contabilizar tanto el aislador en V como el aislador vertical, así como la cadena de amarre, mientras que en el circuito de 400 kV se reutilizarán los aisladores en V y la cadena de amarre, mientras que se contabilizarán los aisladores verticales.

Para la línea de 800 kV, el coste de los aisladores es:

- En V: 900 €/ud
- Verticales: 650 €/ud

- Cadena de amarre: 1200 €/ud

Para la línea de 400 kV, el coste de los aisladores verticales es de 250 €/ud.

Por tanto, el coste por cada kilómetro de los aisladores es:

$$C_{\text{aisladores}} = (1 \cdot 900 \cdot 1.5) + (2 \cdot 650 \cdot 1.5) + (3 \cdot 1200 \cdot 0.5) + (4 \cdot 250 \cdot 0.5) = 5600 \text{ €/km}$$

3. Obra civil.

Dentro de esta partida se incluye la construcción de la cimentación. En el precio de cada cimentación se incluye el transporte y acopio del material, la excavación de los hoyos, nivelación de las testas, hormigonado de las patas utilizando el método más apropiado para cada caso, y ensayos del hormigón, suministro y colocación de armaduras, extendido y retirada de tierras y demás actividades necesarias para la realización de la cimentación.

En los apoyos de suspensión se reforzará la fundación existente, mientras que en los apoyos de anclaje la cimentación será completamente nueva.

- Coste del refuerzo de la cimentación de un apoyo de anclaje: 18000 €
- Coste de la nueva cimentación de los apoyos de anclaje: 65000 €

Por tanto, el coste de la cimentación por cada kilómetro de línea es:

$$C_{\text{cimentación}} = (18000 \cdot 1.5) + (65000 \cdot 0.5) = 59500 \frac{\text{€}}{\text{km}}$$

4. Armado e izado de apoyos

Dentro de esta partida hay que considerar las siguientes actividades:

- Desmontaje de la cabeza de los apoyos de suspensión
- Montaje de la nueva cabeza de los apoyos suspensión
- Refuerzo de los apoyos de suspensión
- Desmontaje del poste completo de amarre
- Montaje del nuevo poste de amarre

En la instalación de apoyos, el coste de montaje de una estructura nueva es menor al coste de refuerzo debido a la mayor mano de obra que requieren los refuerzos. Igualmente sucede con el coste de desmontaje, que es más rápido que el montaje. Los costes para cada uno de los tres casos serán:

- Montaje: 1.2 €/kg
- Desmontaje: 0.8 €/kg
- Refuerzo: 1.8 €/kg

Para el apoyo de suspensión, recordemos que la cabeza original pesaba $1,22 \cdot 10380$ kg.

$$C_{\text{izado}_{\text{susp}}} = 1,5 \left(\left(33250 \text{ kg} \cdot 1.2 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) + \left(12663.6 \text{ kg} \cdot 0.8 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) + \left(C_b \cdot C_c \cdot 5580 \text{ kg} \cdot 1.8 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) \right) \\ = 75043,32 + 150600 C_b \cdot C_c \frac{\text{€}}{\text{km}}$$

Siendo C_b y C_c los coeficientes que dependen de la altura y el esfuerzo de los apoyos de suspensión de la línea.

Para el apoyo de anclaje, hay que tener en cuenta el coeficiente C_a en función de las alturas de los apoyos de la línea tanto en el montaje como en el desmontaje:

$$C_{\text{izado}_{\text{anc}}} = 0.5 \left(\left(C_a \cdot 35550 \text{ kg} \cdot 0.8 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) + \left(C_a \cdot 91460 \text{ kg} \cdot 1.2 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) \right) = 69096 C_a \text{ €/km}$$

5. Tendido del conductor

En esta partida se tienen en cuenta los tendidos de todos los conductores del vano, ya que los conductores de 400 kV habrá que volver a tenderlos y tensarlos.

El coste del tendido del doble circuito de 400 kV formado por tres conductores Condor en cada fase es de 80000 €/km, mientras que el tendido del simple circuito de 800 kV formado por cinco conductores Cardinal en cada fase es de 75000 €/km. Por tanto:

$$C_{tendido} = 155000 \frac{\text{€}}{\text{km}}$$

En este coste no están incluidos los posibles cruzamientos que puedan existir en la línea.

7.2. Resumen y resultado de la ecuación

A continuación, en la tabla 7-7 se muestra el coste total de cada una de las partidas que se han descrito en el apartado anterior, haciendo una separación entre aquellas que dependen de algún coeficiente y de las que no dependen de ninguno.

Tabla 7-7. Resumen de los costes de cada partida

PARTIDA	COSTE		COSTE (con coeficiente)	
1 Ingeniería del proyecto	3500 €			
2 Materiales	Conductores	68445 €	Estructura metálica	$88110 C_a + 134676 C_b \cdot C_c$ €
	Aisladores	5600 €		
3 Obra civil	59500 €			
4 Armado e izado de apoyos	75043.22 €		$69096 C_a + 150600 C_b \cdot C_c$ €	
5 Tendido del conductor	15500 €			
TOTAL	227588 €		$157206 C_a + 285276 C_b \cdot C_c$ €	

En el caso de que $C_a=C_b=C_c=1$, el coste total sería de 670.070 €/km (seiscientos setenta mil setenta euros por kilómetro)

Para finalizar con este análisis económico, se puede extrapolar el resultado obtenido para realizar una aproximación del coste que supondría modificar todas las líneas de transporte de la Unión Europea, para sí poder crear la superred que se ha comentado en este proyecto.

Según la Red Europea de Gestores de Redes de Transporte de Electricidad (ENTSO-E) (en inglés: European Network of Transmission System Operators for Electricity), se tendrían que reforzar alrededor de 520.000 km de líneas de transporte, por lo que la inversión necesaria para acometer este cambio, aplicando esta fórmula, sería de 4aproximadamente 350 G€. (trescientos cincuenta mil millones de euros).

8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

8.1. Conclusiones

Tras haber realizado un análisis de un cantón de una línea de transporte de 400 kV, y haber calculado un apoyo de suspensión con el árbol de cargas proporcionado por REE, se ha conseguido diseñar una cabeza que, unida al fuste del apoyo original, puede emplearse como apoyo de suspensión para el nuevo circuito de 800/400 kV reforzando el fuste existente (doblando los montantes hasta el nivel del terreno y ciertas diagonales del fuste que no soportaban los esfuerzos de compresión en la hipótesis de viento sobre la estructura) y aumentando la superficie de la cimentación para aumentar la carga que opone al arranque de la cimentación y además aumentar la superficie de contacto de la cimentación con el terreno para reducir la carga por unidad de superficie que la cimentación ejerce sobre el terreno.

También se ha establecido un plan de actuación para la instalación de estas modificaciones en una línea real que permita instalar una parte de la línea para no provocar que se tenga que realizar un corte del suministro eléctrico de la línea durante un largo periodo de tiempo y continuar con la instalación cuando pueda producirse el siguiente corte de la línea.

Por último, se ha planteado una ecuación que calcula el coste medio de implantación de estas modificaciones por cada kilómetro de línea, teniendo en cuenta el número de apoyos, los esfuerzos a los que están sometidos y la altura de estos.

En conclusión, esta alternativa de repotenciación de líneas aéreas de alta tensión parece una posible solución para la nueva superred que pretende mejorar las interconexiones con los países de la UE.

8.2. Trabajos futuros

Este trabajo ha supuesto un punto de partida para analizar desde un punto de vista mecánico la repotenciación de una línea de alta tensión de transporte. Debido al tiempo que supone modelar un apoyo en cualquier programa de cálculo estructural y optimizar al máximo posible el dimensionamiento de este, no se ha podido realizar el estudio de ningún otro tipo de apoyo.

Por ello, se propone que en próximos proyectos se analice un apoyo de anclaje para un ángulo pequeño (inferior a 15°), ya que los montantes originales pueden ser de grandes dimensiones en simple montante e instalando una cabeza similar a la del apoyo de suspensión y reforzando los montantes de la misma forma que en el apoyo de suspensión, y comprobar si es válido para no realizar el diseño de un nuevo apoyo desde cero.

Para apoyos con un ángulo superior, la única solución pasa por realizar un nuevo apoyo desde cero, el cual se puede realizar con la tabla de tendido y los esfuerzos de los conductores sobre los apoyos que se incluyen en este proyecto.

Por último, sería de gran interés realizar el estudio de una línea de transporte real en lugar de una aproximación teórica como la que se ha realizado en este proyecto, una vez que ya se ha demostrado que desde un punto de vista mecánico es posible reforzar apoyos de suspensión para repotenciaciones de la línea, e incluso estudiar el apoyo original para un sistema de corriente continua.

Desde aquí animo a cualquier estudiante que lea este trabajo a que continúe el desarrollo de este estudio, adentrándose en el maravilloso campo del estudio mecánico de los apoyos de las líneas de transmisión, una disciplina prácticamente desconocida por gran parte de los Ingenieros y que abarca muchas disciplinas dentro de la Ingeniería.

REFERENCIAS

- Checa, Luis María, Líneas de Transporte de Energía. Editorial Marcombo, 2ª Edición, Barcelona 1979.
- Dalekovod. Insulator strings from 500 kV - 1000 kV. Disponible en web < <https://www.dalekovod-proizvodnja.com/EasyEdit/UserFiles/Katalozi/2008-izolatorski-lanci.pdf>>. Consultado 25/08/2018.
- Design of Latticed Steel Transmission Structures (ASCE 10-15), American Society of Civil Engineers, 2015.
- ENTSOE. Mapa de redes de alta tensión en Europa. < <https://www.entsoe.eu/data/map/>>.
- Fernando Goñi Yeste, proyecto fin de carrera: CÁLCULO MECÁNICO DE CONDUCTORES Y HERRAJES, SEGÚN EL REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES TÉCNICAS Y GARANTÍAS DE SEGURIDAD EN LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. Universidad Carlos III de Madrid.
- Grupo Celsa. Perfiles angulares. Disponible en web < <http://www.celsa.com/Productos.mvc/PerfilesComercial?=&Angulares>>. Consultado 1/9/2018.
- Imse. Ventajas e inconvenientes de las tecnologías HVAC y HVDC. Disponible en web < <http://imseingenieria.blogspot.com/2016/08/ventajas-e-inconvenientes-de-las.html>>. Consultado 1/11/18.
- International Sign Association, Power Line Safety, disponible en web < <https://www.signs.org/codes-regulations/federal-regulations/power-line-safety>>. Consultado 15/8/2018.
- Jiménez Montoya, Hormigón Armado. Editorial Gustavo Gili. 15ª Edición. 2012.
- Juan Marín, Apuntes de la asignatura Estructuras Metálicas. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. Universidad de Córdoba.
- Manual de Microsoft Office. Excel 2010. Disponible en web, < <https://www.uv.mx/personal/llopez/files/2013/03/Manual-Microsoft-Office-Excel-2010.pdf>>. Consultado 5/9/2018.
- Marcela Stefani Ruiz de Abarca, trabajo Fin de Carrea, SOLUCIONES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES DE TORRES DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de el Salvador.
- Miguel Borau Rumbao, Trabajo Fin de Máster. POSIBILIDAD DE REPOTENCIACIÓN DE LÍNEAS ELÉCTRICAS AÉREAS PARA LA FUTURA SUPERRED EUROPEA. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.
- Moreno Clemente, Julián. Cálculo de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión. Segunda edición ampliada, Málaga 1988.
- Moreno Mohino, Jorge. Reglamento de líneas de alta tensión y sus fundamentos técnicos. Editorial Paraninfo. 2008.
- Narro Bañares, Daniel. Cálculo mecánico de Líneas eléctricas aéreas de Alta Tensión. Universidad de Navarra 2004.
- Norma UNE-EN 50341-1:2017. Líneas eléctricas aéreas de más de 1 kV en corriente alterna. Parte 1: Requisitos generales. Especificaciones comunes.

- Página web de Red Eléctrica de España (REE). < <https://www.ree.es/es/>>.
- POSTEMEL S.L. Manual de Postewin V4.21. Disponible en web. < http://postemel.com/post_descargas.php>. Consultado 15/11/2018.
- Power Lines Systems. PLS Tower Manual.
- 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 (RLAT). Consultada la ITC-LAT 07. Disponible en web < http://www.f2i2.net/documentos/lsi/LAT/Guia_ITC-LAT_07_oct13.pdf>. Consultado 18/7/2018.
- REE, << PROYECTO DE EJECUCIÓN DE LA LÍNEA AÉREA DE TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA A 400 kV DOBLE CIRCUITO GÜEÑES – ITXASO. Parte 1 >> Disponible en web < http://www.igorre.net/eu-ES/Zerbitzuak/Ingurumena/Tentsioa/09_2017-02-08%20Proyecto%20de%20Ejecucion%20_GUENES_ITXASO.visado%20PLAZO%20ALEGACIONES%2030%20DIAS_endi_72_Parte1.pdf>. Consultado 20/7/18.
- REE, << PROYECTO DE EJECUCIÓN DE LA LÍNEA AÉREA DE TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA A 400 kV DOBLE CIRCUITO GÜEÑES – ITXASO. Parte 1 >> Disponible en web < http://www.igorre.net/eu-ES/Zerbitzuak/Ingurumena/Tentsioa/10_2017-02-08%20Proyecto%20de%20Ejecucion%20_GUENES_ITXASO.visado%20PLAZO%20ALEGACIONES%2030%20DIAS_endi_72_Parte2.pdf>. Consultado 25/7/18.
- Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley. Editorial McGrawHill. Octava Edición. México 2008.
- Simón Comín, Pascual. Cálculo y Diseño de Líneas Eléctricas de Alta Tensión, aplicación al reglamento de líneas eléctricas de Alta tensión. Editorial Garceta, 1ª Edición, Madrid 2011.

ANEXOS

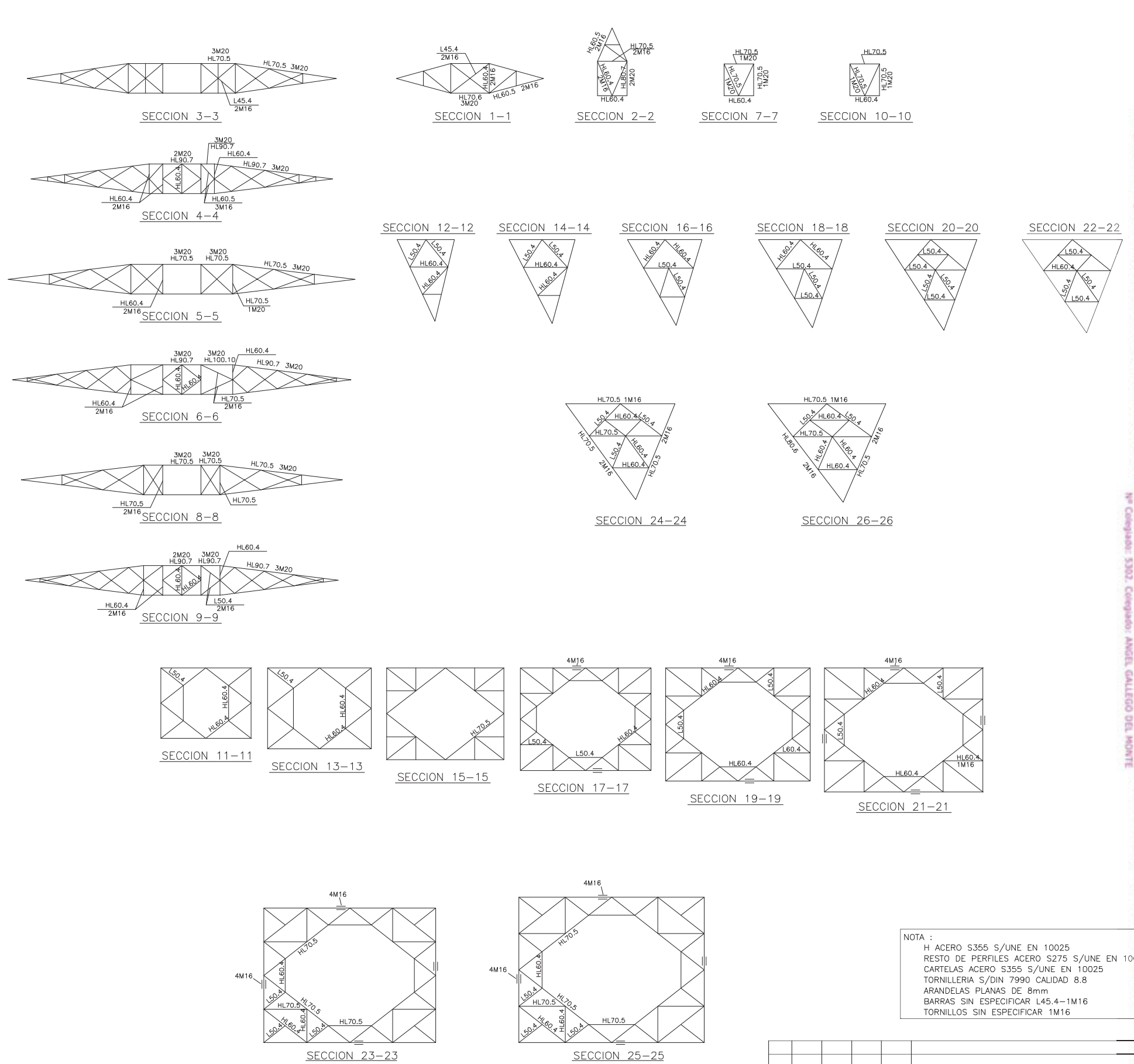
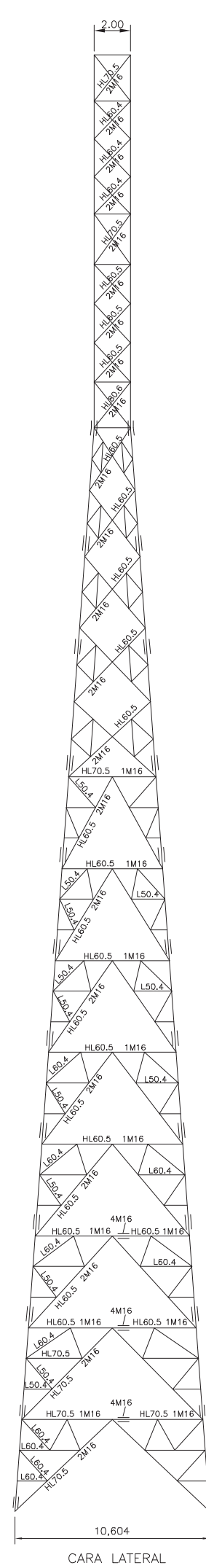
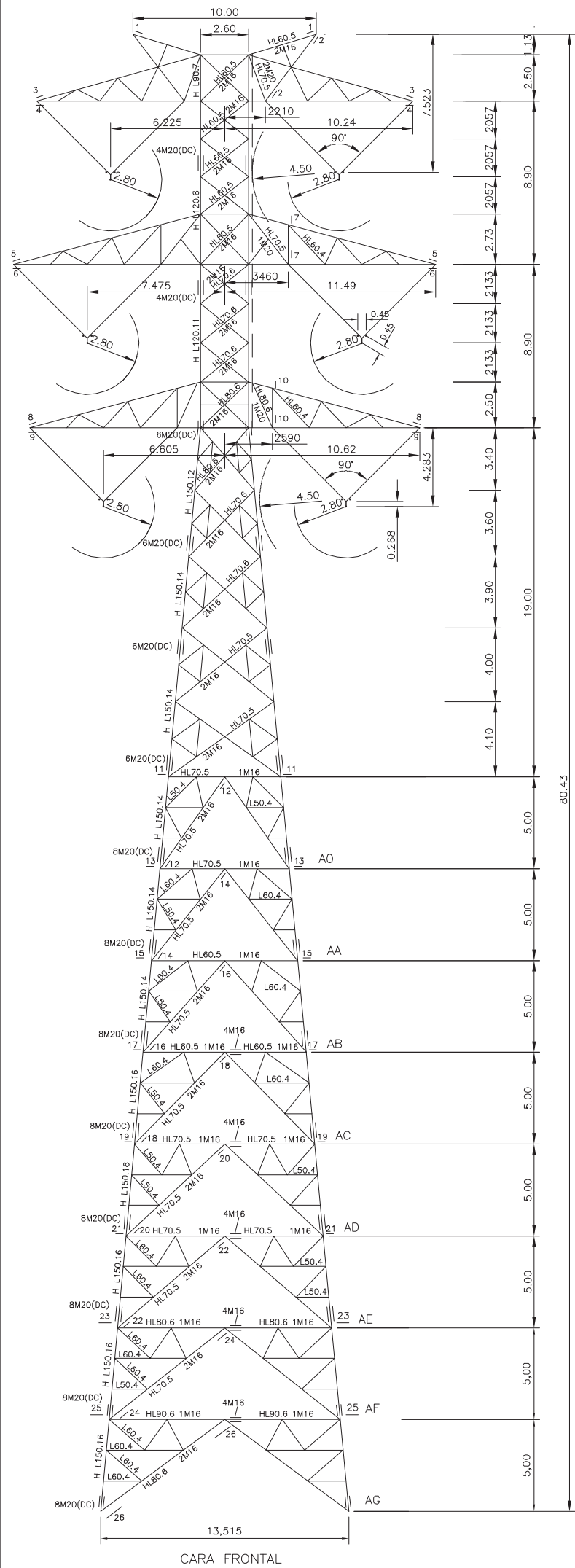
Anexo A: Plano del apoyo D4S2V de REE.

Anexo B: Árbol de Cargas del apoyo D4S2V.

Anexo C: Informes de tabla de tendido y esfuerzos en los conductores creados por el software Postewin.

Anexo D: Plano del nuevo Apoyo de Suspensión.

Anexo A: Plano del apoyo D4S2V de REE.



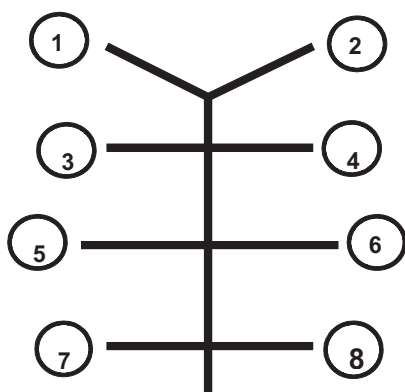
NOTA :
 H ACERO S355 S/UNE EN 10025
 RESTO DE PERFILES ACERO S275 S/UNE EN 10025
 CARTELAS ACERO S355 S/UNE EN 10025
 TORNILLERIA S/DIN 7990 CALIDAD 8.8
 ARANDELAS PLANAS DE 8mm
 BARRAS SIN ESPECIFICAR L45.4-1M16
 TORNILLOS SIN ESPECIFICAR 1M16

EDICION	A	03-16	REALIZADO	VERIFICADO	APROBADO	SE MODIFICA LA LONGITUD DEL CABLE DE TIERRA
MODIFICACION						
						DIRECCION GENERAL DE TRANSPORTE DIRECCION DE INGENIERIA Y CONSTRUCCION DPTO. DE INGENIERIA DE LINEAS
SUSTITUYE A: SUSTITUIDO POR:						FECHA NOMBRE FIRMA
INSTALACION						REALIZADO 10-15 A.L.A. VERIFICADO 10-15 J.C.P. APROBADO 10-15 A.G.M.
TITULO L/DOS CIRCUITOS, 400 KV APOYO TIPO D4S2V ESQUEMA						ESCALA 1:150 N° 185P001-1 HOJA DE

Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid. Visado: Nº 2016/03333. Fecha Visado: 10/11/2016. Firmado Electrónicamente por el COL.I.I.M. Para comprobar su validez: <http://www.coliim.es/verificador>. Código: ANGL GALLEGO DEL MONTE Nº Colegiador: 3302. Colegiador: ANGL GALLEGO DEL MONTE

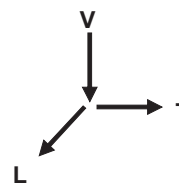
Anexo B: Árbol de Cargas del apoyo D4S2V.

APOYO TIPO: D4S2- 0°



Hipótesis

- 1 Viento (140 km/h)
- 2 Hielo
- 3 Desequilibrio
- 4a Rotura Cable de tierra
- 4b Rotura Conductor Superior
- 4c Rotura Conductor Medio
- 4d Rotura Conductor Inferior
- 5 Viento (60 km/h) y hielo



HIPÓTESIS Nº

FASE		1	2	3	4a	4b	4c	4d	5
1	V	920	2447	2447	2447	2447	2447	2447	2447
	T	857	0	0	0	0	0	0	473
	L	0	0	675	4502	0	0	0	0
2	V	920	2447	2447	2447	2447	2447	2447	2447
	T	857	0	0	0	0	0	0	473
	L	0	0	675	0	0	0	0	0
3	V	4371	10057	10057	10057	10057	10057	10057	10057
	T	3958	0	0	0	0	0	0	1657
	L	0	0	2444	0	4073	0	0	0
4	V	4371	10057	10057	10057	10057	10057	10057	10057
	T	3958	0	0	0	0	0	0	1657
	L	0	0	2444	0	0	0	0	0
5	V	4371	10057	10057	10057	10057	10057	10057	10057
	T	3958	0	0	0	0	0	0	1657
	L	0	0	2444	0	0	4073	0	0
6	V	4371	10057	10057	10057	10057	10057	10057	10057
	T	3958	0	0	0	0	0	0	1657
	L	0	0	2444	0	0	0	0	0
7	V	4371	10057	10057	10057	10057	10057	10057	10057
	T	3958	0	0	0	0	0	0	1657
	L	0	0	2444	0	0	0	4073	0
8	V	4371	10057	10057	10057	10057	10057	10057	10057
	T	3958	0	0	0	0	0	0	1657
	L	0	0	2444	0	0	0	0	0
c.s.		1.5	1.5	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.5
Viento		SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI

Anexo C: Informes de tabla de tendido y esfuerzos en los conductores creados por el software Postewin.

FLECHAS Y TENSIONES

LARL CARDINAL {1}

Sección	547,3 mm ²
Peso	1,755 Kg/m
Carga de Rotura	15333,03 daN
Coef. Dilatación	0,0000195 1/°C
Modulo Elasticidad	6572,7 daN/mm ²
Diametro aparente	30,42 mm
Viento sobre conductor	2,07025 daN/m
Resultante P+V	2,693 daN
Resultante P+½V	2,009 daN
Resultante P+H	2,714 daN (Zona B)

Zona B

T. max. a -15°+ .1V+H 4600 daN
 EDS a 15° 21 % (3220 daN)

Tenses en daN. Flechas en metros. Vanos en metros. Cs es la relación entre la carga de rotura del cable y su tracción máxima.

A. Ini.	Vano	Vano	A. Fin.	Regul.	CONDICIONES EN ZONA B											Cs	
					85°	50°	40°	30°	15°	15°+ .7V	10°	0°+H	-5°	-10°	-10°+V		-15°+ .1V+H
1	500,0	500,0	T		2442	2607	2661	2717	18,32%	3641	2841	4352	2944	2981	4415	4600	3,37
2			F	22,09	20,68	20,27	19,84	19,20	19,76	18,98	19,53	18,31	18,08	19,09	18,98		
2	500,0	500,0	T		2442	2607	2661	2717	18,32%	3641	2841	4352	2944	2981	4415	4600	3,37
3			F	22,09	20,68	20,27	19,84	19,20	19,76	18,98	19,53	18,31	18,08	19,09	18,98		
3	500,0	500,0	T		2442	2607	2661	2717	18,32%	3641	2841	4352	2944	2981	4415	4600	3,37
5			F	22,09	20,68	20,27	19,84	19,20	19,76	18,98	19,53	18,31	18,08	19,09	18,98		

FLECHAS Y TENSIONES

LARL CONDOR {1}

Sección	454,5 mm ²
Peso	1,457 Kg/m
Carga de Rotura	12940 daN
Coef. Dilatación	0,0000195 1/°C
Modulo Elasticidad	6600 daN/mm ²
Diametro aparente	27,7 mm
Viento sobre conductor	1,88513888888889 daN/m
Resultante P+V	2,366 daN
Resultante P+½V	1,712 daN
Resultante P+H	2,377 daN (Zona B)

Zona B

T. max. a -15°+ .1V+H 3973 daN
 EDS a 15° 20 % (2588 daN)

Tenses en daN. Flechas en metros. Vanos en metros. Cs es la relación entre la carga de rotura del cable y su tracción máxima.

A. Ini.	Vano	Vano Regul.		CONDICIONES EN ZONA B												Cs
				85°	50°	40°	30°	15°	15°+ .7V	10°	0°+H	-5°	-10°	-10°+V	-15°+ .1V+H	
1	500,0	500,0	T	2010	2144	2187	2232	17,82%	3109	2332	3747	2415	2445	3810	3973	3,31
2			F	22,28	20,88	20,47	20,05	19,41	20,05	19,19	19,86	18,53	18,30	19,44	19,34	
2	500,0	500,0	T	2010	2144	2187	2232	17,82%	3109	2332	3747	2415	2445	3810	3973	3,31
3			F	22,28	20,88	20,47	20,05	19,41	20,05	19,19	19,86	18,53	18,30	19,44	19,34	
3	500,0	500,0	T	2010	2144	2187	2232	17,82%	3109	2332	3747	2415	2445	3810	3973	3,31
5			F	22,28	20,88	20,47	20,05	19,41	20,05	19,19	19,86	18,53	18,30	19,44	19,34	

FLECHAS Y TENSIONES

OPGW 48 REE {1}

Sección	180 mm ²
Peso	0,7 Kg/m
Carga de Rotura	9319,5 daN
Coef. Dilatación	0,000015 1/°C
Modulo Elasticidad	11772 daN/mm ²
Diametro aparente	17 mm
Viento sobre conductor	1,15694444444444 daN/m
Resultante P+V	1,345 daN
Resultante P+½V	0,898 daN
Resultante P+H	1,429 daN (Zona B)

Zona B

T. max. a -15°+ .1V+H 2358 daN
 EDS a 15° 20 % (1864 daN)

Tenses en daN. Flechas en metros. Vanos en metros. Cs es la relación entre la carga de rotura del cable y su tracción máxima.

A. Ini.	Vano	Vano	A. Fin.	Regul.	CONDICIONES EN ZONA B											Cs	
					85°	50°	40°	30°	15°	15°+ .7V	10°	0°+H	-5°	-10°	-10°+V		-15°+ .1V+H
1	500,0	500,0	T		979	1030	1047	1064	11,70%	1680	1100	2192	1130	1140	2110	2358	4,10
2			F	21,98	20,88	20,55	20,22	19,72	20,37	19,55	20,41	19,03	18,85	19,97	20,07		
2	500,0	500,0	T		979	1030	1047	1064	11,70%	1680	1100	2192	1130	1140	2110	2358	4,10
3			F	21,98	20,88	20,55	20,22	19,72	20,37	19,55	20,41	19,03	18,85	19,97	20,07		
3	500,0	500,0	T		979	1030	1047	1064	11,70%	1680	1100	2192	1130	1140	2110	2358	4,10
5			F	21,98	20,88	20,55	20,22	19,72	20,37	19,55	20,41	19,03	18,85	19,97	20,07		

ESFUERZO SOBRE LOS APOYOS

LARL CARDINAL {1}

Tensión 800 KV
 N° Conductores 15
 Long. Cadena 9,50 m
 Viento Cadena 74,556 daN
 Peso Cadena 186,39 daN

Zona B

T. max. a -15°+ ,1V+H 4600 daN
 EDS a 15° 21 % (3220 daN)

En la 4ª hipótesis, para apoyos de ángulo, el esfuerzo que se muestra es en el conductor que se rompe. En el resto de conductores L=0 y T=doble del valor mostrado

Poste	Función Seguridad Zona	Ángulo Comp. ° Cent.	Vano Post. m	Desn. Post. m	N	D. Fases Teórica m	Esfuerzos Horizontales Según Hipótesis					T y F			Esf. Vert. por fase daN	Ang. Osc. Cadena Contrap.	
							Hip.	L(daN)	T(daN)	H(daN)	Cs	Temp.	F m	T daN			
1	EXIST.																
2	AL Normal Zona B		500,0	0,0	0,0000	3,65	1ª	0	1110	1110	1,500	50°	20,68	2607	1047	22,42°	
							2ª	-----	334	334	1,500	15°+V	20,12	4191	1047		
							3ª	690	0	690	1,200	0°+H	19,53	4352	1637		
							4ª	2300	0	-----	1,200	-15°+H	18,91	4495	1637		
3	AN Normal Zona B		500,0	0,0	0,0000	3,06	1ª	0	1184	1184	1,500	50°	20,68	2607	1234		
							2ª	0	347	347	1,500	15°+V	20,12	4191	1234		
							3ª	2248	0	2248	1,200	0°+H	19,53	4352	1916		
							4ª	4495	0	-----	1,200	-15°+H	18,91	4495	1916		
5	FL Normal Zona B		0,0	0,0	0,0000	3,06	1ª	4415	667	5082	1,500	50°	20,68	2607	617		
							2ª	4600	174	4774	1,500	15°+V	20,12	4191	617		
							3ª	-----	-----	-----	1,200	0°+H	19,53	4352	958		
							4ª	4495	0	-----	1,200	-15°+H	18,91	4495	958		

ESFUERZO SOBRE LOS APOYOS

OPGW 48 REE {1}

Tensión 0 KV
 N° Conductores 2
 Long. Cadena 0,00 m
 Viento Cadena 0 daN
 Peso Cadena 0,00 daN

Zona B

T. max. a -15°+ ,1V+H 2358 daN
 EDS a 15° 20 % (1864 daN)

En la 4ª hipótesis, para apoyos de ángulo, el esfuerzo que se muestra es en el conductor que se rompe. En el resto de conductores L=0 y T=doble del valor mostrado

Poste	Función Seguridad Zona	Ángulo Comp. ° Cent.	Vano Post. m	Desn. Post. m	N	D. Fases Teórica m	Esfuerzos Horizontales Según Hipótesis					T y F			Esf. Vert. por fase daN	Ang. Osc. Cadena Contrap.	
							Hip.	L(daN)	T(daN)	H(daN)	Cs	Temp.	F m	T daN			
1	EXIST.																
2	AL Normal Zona B		500,0	0,0	0,0000		1ª	0	578	578	1,500	50°	20,88	1030	343		
							2ª	-----	246	246	1,500	15°+V	20,75	2030	343		
							3ª	354	0	354	1,200	0°+H	20,41	2192	714		
							4ª	1179	0	-----	1,200	-15°+H	19,94	2244	714		
3	AN Normal Zona B		500,0	0,0	0,0000		1ª	0	578	578	1,500	50°	20,88	1030	343		
							2ª	0	246	246	1,500	15°+V	20,75	2030	343		
							3ª	1122	0	1122	1,200	0°+H	20,41	2192	714		
							4ª	2244	0	-----	1,200	-15°+H	19,94	2244	714		
5	FL Normal Zona B		0,0	0,0	0,0000		1ª	2110	289	2399	1,500	50°	20,88	1030	172		
							2ª	2358	123	2482	1,500	15°+V	20,75	2030	172		
							3ª	-----	-----	-----	1,200	0°+H	20,41	2192	357		
							4ª	2244	0	-----	1,200	-15°+H	19,94	2244	357		

ESFUERZO SOBRE LOS APOYOS

LARL CONDOR {1}

Tensión 400 KV
 N° Conductores 18
 Long. Cadena 5,50 m
 Viento Cadena 43,164 daN
 Peso Cadena 107,91 daN

Zona B

T. max. a -15°+ ,1V+H 3973 daN
 EDS a 15° 20 % (2588 daN)

En la 4ª hipótesis, para apoyos de ángulo, el esfuerzo que se muestra es en el conductor que se rompe. En el resto de conductores L=0 y T=doble del valor mostrado

Poste	Función Seguridad Zona	Ángulo Comp. ° Cent.	Vano Post. m	Desn. Post. m	N	D. Fases Teórica m	Esfuerzos Horizontales Según Hipótesis					T y F			Esf. Vert. por fase daN	Ang. Osc. Cadena Contrap.	
							Hip.	L(daN)	T(daN)	H(daN)	Cs	Temp.	F m	T daN			
1	EXIST.																
2	AL Normal Zona B		500,0	0,0	0,0000	6,15	1ª	0	986	986	1,500	50°	20,88	2144	823	24,72°	
							2ª	-----	313	313	1,500	15°+V	20,45	3623	823		
							3ª	596	0	596	1,200	0°+H	19,86	3747	1350		
							4ª	1987	0	-----	1,200	-15°+H	19,25	3866	1350		
3	AN Normal Zona B		500,0	0,0	0,0000	5,79	1ª	0	1029	1029	1,500	50°	20,88	2144	930		
							2ª	0	321	321	1,500	15°+V	20,45	3623	930		
							3ª	1933	0	1933	1,200	0°+H	19,86	3747	1512		
							4ª	3866	0	-----	1,200	-15°+H	19,25	3866	1512		
5	FL Normal Zona B		0,0	0,0	0,0000	5,79	1ª	3810	558	4368	1,500	50°	20,88	2144	465		
							2ª	3973	161	4134	1,500	15°+V	20,45	3623	465		
							3ª	-----	-----	-----	1,200	0°+H	19,86	3747	756		
							4ª	3866	0	-----	1,200	-15°+H	19,25	3866	756		

ESFUERZO SOBRE LOS APOYOS

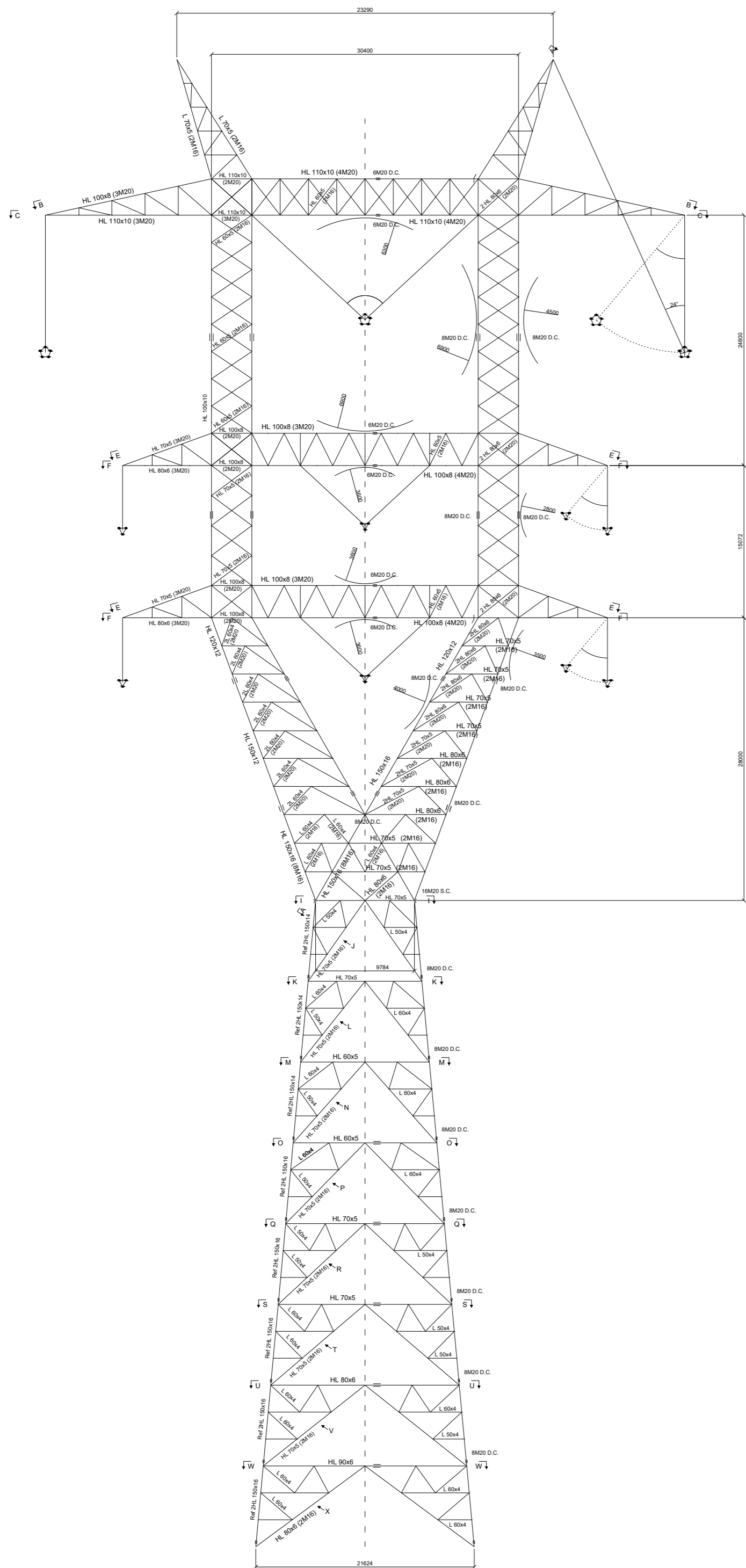
Esfuerzo Total

- Hu.- Altura útil del apoyo.
- L.- Esfuerzo longitudinal por cable.
- T.- Esfuerzo transversal por cable.
- H.- Esfuerzo horizontal total por cable.
- V.- Esfuerzo vertical por cable.
- d.- Distancia entre fases.
- FT.- Esfuerzo horizontal total.
- Cs.- Coeficiente de seguridad.

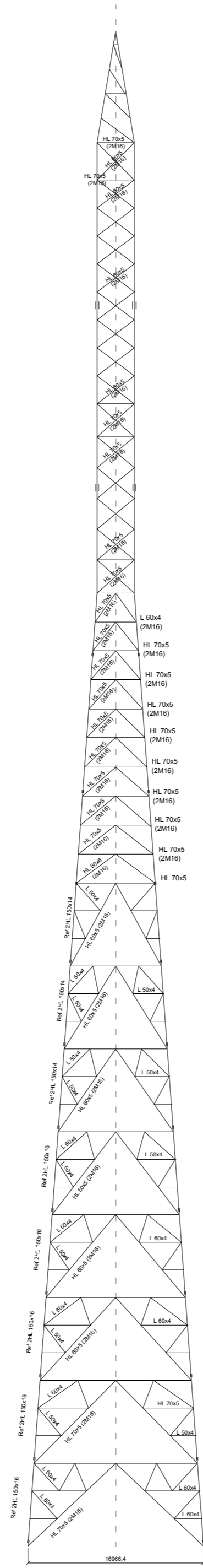
En la 4ª hipótesis, para apoyos de ángulo, el esfuerzo que se muestra es en el conductor que se rompe. En el resto de conductores L=0 y T=doble del valor mostrado

Poste	Función Segurid. Zona	Ángulo Comp. ° Cent.	Hip.	Cs	LARL CARDINAL {1}					LARL CONDOR {1}					TOTAL FT (daN)
					15 cables					18 cables					
					L (daN)	T (daN)	H (daN)	V (daN)	d (m)	L (daN)	T (daN)	H (daN)	V (daN)	d (m)	
1	EXIST.														
2	AL Normal Zona B		1ª	1,500	0	1110	1110	1047	3,65	0	986	986	823	6,15	35545
			2ª	1,500	----	334	334	1637		----	313	313	1350		11133
			3ª	1,200	690	0	690	1637		596	0	596	1350		21787
			4ª	1,200	2300	0	----	1637		1987	0	----	1350		
3	AN Normal Zona B		1ª	1,500	0	1184	1184	1234	3,06	0	1029	1029	930	5,79	37441
			2ª	1,500	0	347	347	1916		0	321	321	1512		11482
			3ª	1,200	2248	0	2248	1916		1933	0	1933	1512		70751
			4ª	1,200	4495	0	----	1916		3866	0	----	1512		
5	FL Normal Zona B		1ª	1,500	4415	667	5082	617	3,06	3810	558	4368	465	5,79	159648
			2ª	1,500	4600	174	4774	958		3973	161	4134	756		150987
			3ª	1,200	----	----	----	----		----	----	----	----		----
			4ª	1,200	4495	0	----	958		3866	0	----	756		

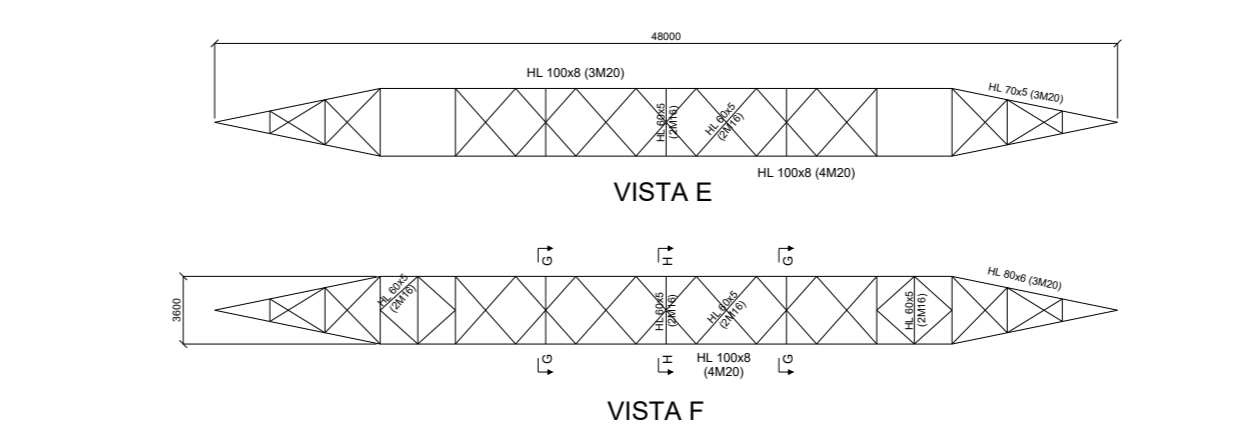
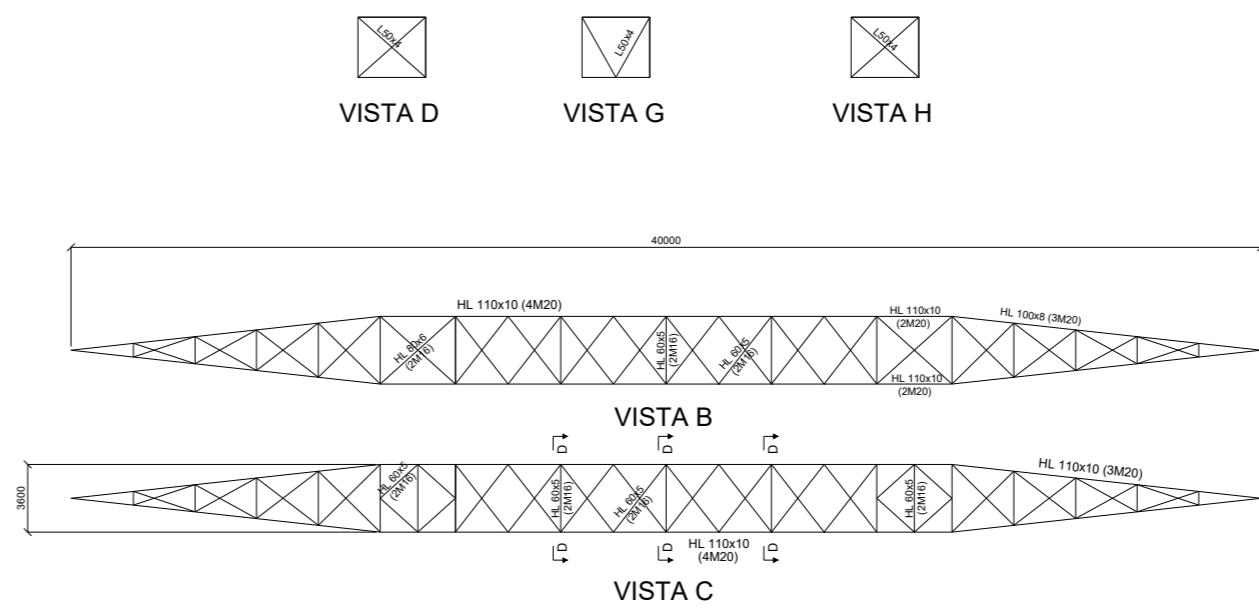
Anexo D: Plano del nuevo Apoyo de Suspensión.



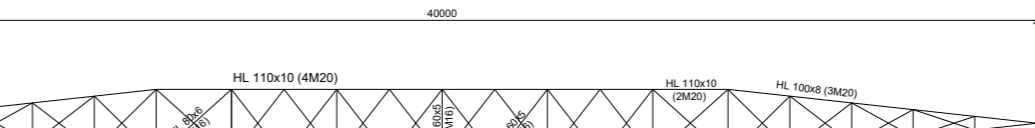
CARA LÍNEA



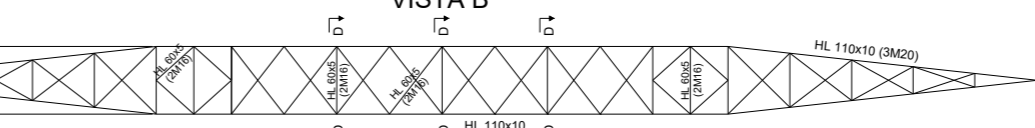
CARA CONTRALÍNEA



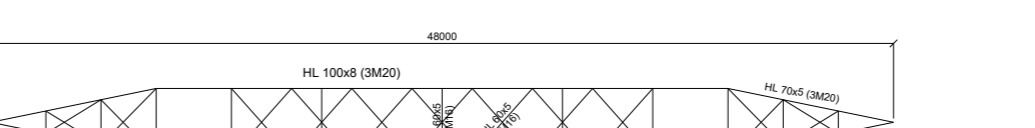
VISTA D VISTA G VISTA H



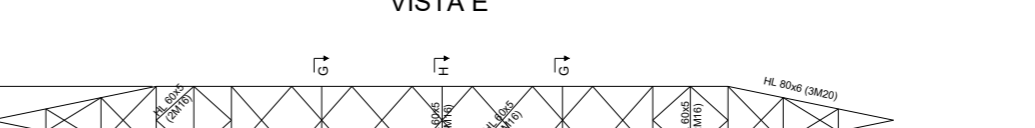
VISTA B



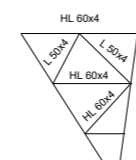
VISTA C



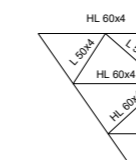
VISTA E



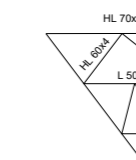
VISTA F



VISTA POR J



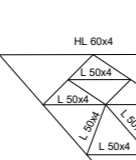
VISTA POR L



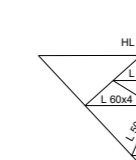
VISTA POR N



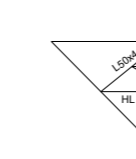
VISTA POR P



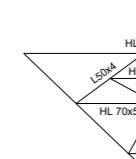
VISTA POR R



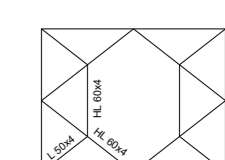
VISTA POR T



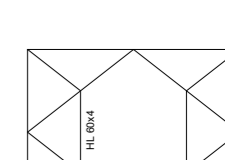
VISTA POR V



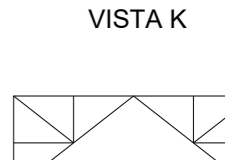
VISTA POR X



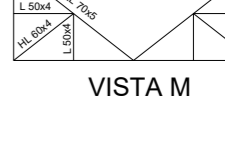
VISTA I



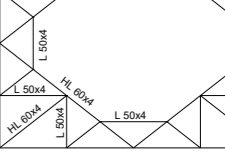
VISTA K



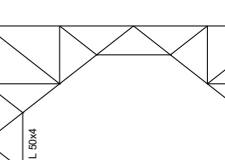
VISTA M



VISTA O



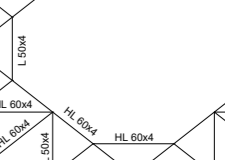
VISTA Q



VISTA S





VISTA U



VISTA W

NOTAS
 H: ACERO DE CALIDAD S355 J2
 RESTO DE PERFILES: S275 J0
 TORNILLERÍA SEGÚN DIN/7990 DE CALIDAD 8.8
 BARRAS SIN ESPECIFICAR: L45x5 (1M16)
 TORNILLOS SIN ESPECIFICAR: 1M16

ESCALA	FECHA	FIRMA	 Escuela Técnica Superior de INGENIERÍA DE SEVILLA	
1:250	NOVIEMBRE 2018	JUAN MANUEL RUEDA VÁZQUEZ		
TAMAÑO	A2		APOYO DE SUSPENSIÓN 800/400 kV	PLANO Nº
PESO ESTRUCTURA	50850 kg			1
ESTUDIO MECÁNICO DE LA CONVERSIÓN DE UNA LÍNEA AÉREA DE 400 kV A UNA DOBLE LÍNEA DE 400/800 kV				