



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

REDISEÑO DE LA CATENARIA EN UN TRAMO DE LA VÍA DE REINO UNIDO

Autor: Ángel Moro García

Director: Joaquín Ramos Rodríguez

Madrid

Junio de 2020

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título **REDISEÑO DE LA CATENARIA EN UN TRAMO DE LA VÍA DE REINO UNIDO** en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2019/2020 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Ángel Moro García

Fecha: 22/06/2020



Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Joaquín Ramos Rodríguez

Fecha: 22/ 06/ 2020





UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

REDISEÑO DE LA CATENARIA EN UN TRAMO DE LA VÍA DE REINO UNIDO

Autor: Ángel Moro García

Director: Joaquín Ramos Rodríguez

Madrid

Junio de 2020



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

REDISEÑO DE LA CATENARIA EN UN TRAMO DE LA VÍA DE REINO UNIDO

Autor: **Moro García, Ángel.**

Director: Ramos Rodríguez, Joaquín.

RESUMEN DEL PROYECTO

Contextualización

El proyecto se centra en el rediseño de la catenaria de un tramo concreto de la vía de un ferrocarril inglés. Este rediseño se debe a una deshabilitación de dos cambios de carriles, que se sitúan en dicho tramo, pero no van a permanecer activos. Según la normativa inglesa que atañe a este tipo de estructuras, cualquier elemento que ya no preste una función activa en la vía debe ser retirado o reubicado en otra localización en la que sí desempeñe dicho trabajo. Debido a esto, surge la necesidad de este proyecto.

La memoria se ha comenzado mediante la exposición de la tecnología del ferrocarril. Como ha ido evolucionando a lo largo de los años, su electrificación, las diferentes variantes de catenaria que se pueden encontrar en la actualidad, etc.

Posteriormente se han definido los distintos elementos que componen a una catenaria tradicional. Se ha aclarado su función, así como su localización en la vía y las alternativas a algunas tecnologías que en la actualidad se encuentran obsoletas.

También se han aclarado algunos conceptos mecánicos relacionados con la catenaria, que son de obligatorio conocimiento para la comprensión completa del proyecto y la justificación de las opciones expuestas durante la memoria.

A lo largo del proyecto se han analizado diferentes puntos de vista técnicos, que influyen en la elección de un posible diseño futuro para esta vía, con la finalidad de poder determinar cuál será el mejor diseño que desempeñe las nuevas funciones que requerirá la vía una vez el cambio de carril sea deshabilitado.

También se han tenido en cuenta otros factores como los económicos o el impacto medioambiental entre otros, que se aclaran en los últimos capítulos de la memoria. La decisión no ha sido tomada únicamente mediante factores ingenieriles.

Para concluir, se ha optado por un diseño final, que posee el mejor balance de resultados entre todos los ámbitos analizados y se han determinado cuales serían las próximas líneas de desarrollo que seguirían a este proyecto para llevarse a cabo.

Metodología y estructura del proyecto

Una vez definidos los conceptos necesarios para la comprensión de la memoria, se ha comenzado con el análisis del proyecto en sí.

La primera fase se basa en un estudio del terreno, que se lleva a cabo en la sección 4.1 Estudio del terreno. Aquí se ha analizado la localización de la vía en la que se va a llevar a cabo la modificación. Entre otras cosas, cabe destacar la detección de dos de los

problemas fundamentales, que aportan la complicación al proyecto. Uno de los desvíos se localiza sobre un puente de gran antigüedad, el cual no puede ser modificado debido al riesgo de colapso. Adicionalmente, posterior al puente se puede observar que hay un desnivel lo suficientemente elevado como para evitar la construcción de nuevas estructuras en dicha zona. Estas dos limitaciones añaden cierto grado de dificultad al proyecto, ya que limitan notablemente las opciones de rediseño en dichas áreas.

Seguido al estudio del terreno, se ha continuado con un estudio climatológico en la sección 4.2 Climatología. Esto se realiza ya que, para poder diseñar precisamente la catenaria, hay que tener en cuenta factores meteorológicos, como por el ejemplo las temperaturas máximas y mínimas en la zona de análisis, las precipitaciones, la velocidad del viento o la cantidad de nieve entre otras.

El siguiente punto consiste en la determinación de la catenaria actual. Se ha analizado el tipo de catenaria, su antigüedad, el tipo de sustentadores empleados, si es una catenaria compensada o sin compensar, etc. En función de todos estos parámetros, la vía ha de modificarse de diferentes formas, ya que cada tipo de catenaria precisa de diferentes elementos para su funcionamiento y no todos los tipos aceptan cualquier modificación.

Una vez realizado el análisis de la situación actual de la vía, se ha comenzado con el estudio detallado de cada estructura. Se ha comenzado por el primer cambio de carril, que corresponde con el cable B, y posteriormente se ha seguido con el cable D, encargado de alimentar el segundo cambio de carril y la vía que continua en dirección Tottenham Hale.

En el Capítulo 5: Modificaciones propuestas de la catenaria, se ha comenzado detallando los elementos que serán necesarios retirar de la vía debido a la normativa comentada anteriormente. Se ha analizado estructura a estructura, justificando las retiradas o reubicaciones de los diferentes elementos que formaban la catenaria y sustentaban los hilos de contacto B y D.

Posteriormente, en el Capítulo 6: Propuestas de diseño, ya se ha comenzado a plantear los primeros rediseños para la sustitución o reubicación del cable D, ya que el cable B no necesita reubicarse, solamente es necesaria su retirada íntegra. Se han planteado cinco diseños diferentes, en los cuales se ha comentado en detalle las modificaciones que serían necesarias para su puesta en funcionamiento y mediante estas modificaciones se ha justificado su validez o se ha rechazado la propuesta de diseño.

En la primera modificación se ha planteado el anclaje del cable a un pórtico situado posterior al cambio de carril. Esto favorece económicamente la consecución del proyecto debido a la menor cantidad de cable empleado, pero requiere de un tensor situado en el pórtico capaz de sostener el anclaje del cable, lo que a su vez requiere una cimentación para dicho tensor. Debido a que el pórtico se encuentra posicionado encima del puente comentado con anterioridad, este diseño es descartado, ya que no se podría instalar la cimentación del tensor en cuestión.

La segunda propuesta trata una opción similar, pero en vez de anclar al pórtico posterior al cambio de carril, esta opción propone el anclaje del cable en un poste simple, siendo este la estructura posterior al pórtico de la opción uno. Esto reduce nuevamente la longitud de cable a emplear, pero requiere del reemplazo del poste simple por uno mucho más

robusto y orientado de tal forma que sea capaz de aguantar la flexión que genera un anclaje de un cable. Esto significa nuevamente la modificación de la cimentación del poste, requiriendo una cimentación considerablemente superior que debería instalarse en el interior del puente, lo que llevaría al descarte de esta opción.

La tercera opción plantea una aproximación un tanto diferente. En vez de estudiar las estructuras posteriores al cambio de carril, al observar que son problemáticas sus modificaciones debido a la presencia del puente, en esta opción se plantea el anclaje en un pórtico anterior al puente, donde el cable D originalmente estaba anclado. La diferencia reside en el lado del anclaje, ya que en esta modificación se plantea el anclaje en el lado izquierdo del pórtico. El problema de este diseño reside en la estructura posterior al pórtico de anclaje, la cual es un poste simple que deberá pasar a soportar una tensión elevada extra debido a que es la estructura posterior al anclaje del cable. Esto podría dar problemas al tratarse de una estructura antigua, pero puede considerarse como un rediseño factible en cuanto a competencias técnicas.

En cuanto a la cuarta opción, trata de aliviar las tensiones localizadas en el poste del modelo anterior, haciendo que dicho poste sea un poste intermedio del cantón y no sea el que soporte las grandes tensiones. Esto se consigue anclando el cable una estructura antes que la opción anterior, pero en dicha estructura se encuentra un aislador de sección, por lo que dicho aislador debería desplazarse a la estructura inmediatamente anterior, ya que no se puede tener un aislador de sección en una estructura en la que hay presente un anclaje de un cable, aumentando notablemente el coste de la modificación y el tiempo requerido para su consecución.

Finalmente, la opción número cinco plantea una elevación del cable D, manteniéndolo en la misma localización que antes de la modificación. Al levantar el cable, el cambio de carril queda deshabilitado, ya que el pantógrafo no entraría en contacto con el cable D en ningún momento durante ese cambio de carril, pero de la misma forma, se permite mantener el cable en dicha localización. Pasado el pórtico siguiente a la finalización del cambio de carril, el cable comenzará su bajada solapándose con el cable que alimenta la vía de la izquierda y prosiguiendo durante el desvío hasta Tottenham Hale. Esta opción es la más adecuada según los criterios mencionados.

Finalmente, en los dos últimos capítulos se han valorado los aspectos económicos que engloban al proyecto, así como su impacto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, escogiendo de tal forma la opción que posea un mejor balance en todos los ámbitos.

Para concluir, se han expuesto las futuras líneas de desarrollo que seguirían a este proyecto para su puesta en marcha y su consecución.

REDESIGN OF THE OVERHEAD LINE EQUIPMENT ON A SECTION OF THE UK TRACK

Author: **Moro García, Ángel.**

Director: Ramos Rodríguez, Joaquín.

PROYECT SUMMARY

Contextualization

The project focuses on the redesign of a specific section of the overhead line equipment in an English railway. This redesign is due to the disability of two rail changes, which are located on that section, but will not remain active. According to English regulations concerning this type of structure, any element that has no longer an active role on the track must be removed or relocated to another location where it does so. Because of this, the need for this project arises.

The memory has been started by exposing the technology of the railway. How it has evolved over the years, its electrification, the different variants of overhead line systems that can be found nowadays, etc.

Subsequently, the different elements that a traditional catenary consists off have been defined. Their function has been clarified, as well as their location on the track and the alternatives to some technologies which are currently obsolete.

Some mechanical concepts related to overhead line systems have also been clarified, which are mandatory for a complete understanding of the project and the justification of the options displayed during the report.

Throughout the project, different technical points of view have been analyzed, which influence the choice of a possible future design for this track, in order to be able to determine the best design to perform the new functions that the track will require once the lane change is disabled.

Other factors have also been considered, such as economic factors or environmental impact, among others, which are clarified in the last chapters of the report. The decision has not been taken solely based on engineering factors.

To conclude, a final design has been chosen and developed. This design has been chosen due to the best balance of results among all the areas analyzed and the next lines of development that would follow this project have been determined.

Methodology and structure of the project

Once the necessary concepts for understanding the report have been defined, we have begun with an analysis of the project itself.

The first phase is based on a field study, which is carried out in section 4.1 Field study. Here, the location of the track on which the modifications are to be carried out, has been analyzed. Among other things, two of the fundamental problems have been identified,

which contribute to the complication of the project. One of the detours is located on a very old bridge, which cannot be modified due to the risk of collapse. In addition, after the bridge it can be seen that there is a sufficiently high slope to avoid the construction of new structures in that area. These two limitations add a certain degree of difficulty to the project since they significantly limit the options for redesigning these areas.

Following the field study, a climatological study has been continued in section 4.2 Climatology. This is done because, in order to design the catenary precisely, meteorological factors must be considered, such as maximum and minimum temperatures in the area of analysis, rainfall, wind speed or the amount of snow, among others.

The next point is to determine the current overhead line system. The type of system, its age, the type of handlers used, whether it is a compensated or uncompensated system, etc. All these factors have been analyzed. Depending on all these parameters, the track must be modified in different ways, as each type of catenary requires different elements for its operation and not all types accept any modification.

Once the analysis of the current situation of the track has been carried out, the detailed study of each structure has been started. We began with the first rail change, which corresponds to cable B, and then followed with cable D, which is responsible for feeding the second rail change and the track that continues in the Tottenham Hale direction.

In Chapter 5: Proposed modifications for the catenary, we began by detailing the elements that will need to be removed from the track due to the regulations mentioned above. Structure by structure was analyzed, justifying the removal or relocation of the different elements which made up the catenary and supported contact wires B and D.

Subsequently, in Chapter 6: Design proposals, the first redesigns for the replacement or relocation of cable D have begun, since cable B does not need to be relocated, only its integral removal must be done. Five different designs have been proposed, in each of them, detailed comments have been made on the necessary modifications for their implementation. Through these modifications the validity of the design proposal has been justified or rejected.

In the first modification, the anchoring of the cable to a gantry located after the change of lane was considered. This helps the economic achievement of the project due to the lower amount of cable used, but requires a tensor located in the gantry capable of holding the cable anchorage, which in turn requires a foundation for the tensor. Since the gantry is positioned above the bridge mentioned above, this design is rejected, since the foundation of the tensor could not be installed.

The second proposal deals with a similar option, but instead of anchoring to the gantry after the rail change, this option proposes the anchoring of the cable to a simple mast, this being the structure after the gantry of option one. This again reduces the length of cable to be used but requires the replacement of the simple mast by a much more robust and oriented one so that it is able to withstand the flexion generated by a cable anchorage, a “self-supporting mast”. This again means the modification of the mast foundation, requiring a considerably higher foundation that should be installed inside the bridge, which would lead to the discarding of this option.

The third option takes a somewhat different approach. Instead of studying the structures after the rail change, noting that their modifications are problematic due to the presence of the bridge, this option proposes anchoring in a gantry before the bridge, where the cable D was originally anchored. The difference lies in the side of the anchorage, since in this modification the anchorage is proposed on the left side of the gantry. The problem with this design lies in the structure after the anchorage gantry, which is a simple mast that will have to withstand an extra high tension because it is the structure after the cable anchorage. This could give problems as it is an old structure, but it can be considered as a feasible redesign in terms of a technical perspective.

As for the fourth option, it tries to alleviate the tensions located in the mast of the previous model, making that mast an intermediate mast of the tension length and not the one that supports the high tensions. This is achieved by anchoring the cable to a structure before the one on the previous option. However, in this structure there is a section insulator, so it should be moved to the structure immediately before since it is not possible to have a section insulator in a structure where a cable anchorage is present, increasing considerably the cost of the modification and the time required for its achievement.

Finally, option number five proposes an elevation of cable D, keeping it in the same location as before the modification. When the cable is lifted, the rail change is disabled, since the pantograph would not come into contact with the cable D at any time during this rail change, but in the same way, the cable can be kept in this location. Once past the gantry after the rail change has been completed, the cable will begin its descent by overlapping with the cable feeding the left lane and continuing during the turn-off to Tottenham Hale. This option is the most suitable according to the criteria mentioned.

Finally, in the last two chapters, the economic aspects of the project have been evaluated, as well as its impact on the Sustainable Development Objectives, choosing the option that has the best balance in all areas.

To conclude, the future lines of development that would follow this project for its implementation and achievement have been set out.

Índice de la memoria

Capítulo 1: Historia del ferrocarril	7
Capítulo 2: Sistemas de electrificación	9
2.1. Introducción de la electricidad en el ferrocarril	9
2.2. Tercer carril	10
2.3. Catenaria rígida	11
2.4. Catenaria flexible	12
2.5. Ventajas e inconvenientes	13
Capítulo 3: principios mecánicos	15
3.1 Componentes principales de la catenaria	15
3.1.1 Hilo de contacto	15
3.1.2 Vano	16
3.1.3 Hilo sustentador.....	16
3.1.4 Feeder de acompañamiento	17
3.1.5 Pórtico	18
3.1.6 Ménsula	18
3.1.7 Cantón de compensación.....	19
3.1.8 Equipos de compensación	20
3.1.9 Aislador	20
3.1.10 Knuckle	21
3.2 Características mecánicas.....	22
3.2.1 Esfuerzos en los brazos de atirantado, cargas horizontales.....	22
3.2.2 Cargas verticales	26
3.2.3 Momento de vuelco	27
3.2.4 Momento de torsión	28
3.2.5 Seccionamiento	29
3.2.6 Descentramiento.....	30
Capítulo 4: Análisis previo de localización e infraestructura actual	33
4.1. Estudio del terreno	33
4.2. Climatología.....	34
4.3. Análisis de la catenaria actual	36
Capítulo 5: Modificaciones propuestas de la catenaria	37
5.1. Modificaciones necesarias para la deshabilitación del primer desvío.....	37

5.2.	Modificaciones necesarias para la deshabilitación del segundo desvío	40
Capítulo 6: Propuestas de diseño		43
6.1.	Propuesta número 1	43
6.2.	Propuesta número 2	48
6.3.	Propuesta número 3	50
6.4.	Propuesta número 4	56
6.5.	Propuesta número 5	59
Capítulo 7: Análisis económico		61
Capítulo 8: Objetivos de Desarrollo Sostenible		63
Capítulo 9: Cálculos justificativos		65
9.1.	Análisis para el diseño 1A	65
9.2.	Análisis para el diseño 1B	72
9.3.	Análisis para el diseño 2	74
9.4.	Análisis para el diseño 3	75
Capítulo 10: Conclusiones		77
Capítulo 11: Desarrollos complementarios		79
Bibliografía		81

Índice de figuras

FIGURA 1: SISTEMA DE TERCER CARRIL INSTALADO EN VÍA FERROVIARIA.....	11
FIGURA 2: CATENARIA RÍGIDA EN EL METRO DE MADRID	12
FIGURA 3: EJEMPLO DE CATENARIA FLEXIBLE	12
FIGURA 4: SECCIÓN DE HILO DE CONTACTO.....	16
FIGURA 5: GRIFA.....	17
FIGURA 6: DISPOSICIÓN DE CATENARIA CON SUSTENTADOR	17
FIGURA 7: MÉNSULA DE CELOSÍA.....	19
FIGURA 8: MÉNSULA TUBULAR	19
FIGURA 9: CANTÓN CON COMPENSACIÓN INDEPENDIENTE Y AUTOMÁTICA.....	19
FIGURA 10: MUELLE TORSIONAL EN SISTEMA DE COMPENSACIÓN	20
FIGURA 11: AISLADORES EN UNA MÉNSULA.....	21
FIGURA 12: AISLADORES DE TENSIÓN	21
FIGURA 13: KNUCKLE AISLADOR	22
FIGURA 14: KNUCKLE SIN AISLADOR.....	22
FIGURA 15: ESQUEMA DE FUERZAS EN UN POSTE SITUADO EN VÍA RECTA. FUENTE: ADIF	23
FIGURA 16: ESQUEMA DE FUERZAS EN UN POSTE SITUADO EN VÍA CURVA. FUENTE: ADIF	24
FIGURA 17: VELOCIDADES DEL VIENTO EN REINO UNIDO.....	25
FIGURA 18: MÉNSULA DOBLE SIN MOMENTO TORSOR	28
FIGURA 19: SECCIONAMIENTO DE CANTÓN Y ZONA DE SOLAPAMIENTO	29
FIGURA 20: SISTEMA DE SECCIONAMIENTO POR LÁMINA DE AIRE	30
FIGURA 21: DEFORMACIÓN DEL HILO DE CONTACTO POR LA ACCIÓN DEL VIENTO	31
FIGURA 22: VISTA AÉREA DE LA LOCALIZACIÓN	33
FIGURA 23: VISTA DETALLADA DEL PUENTE Y ELEVACIÓN DEL TERRENO	34
FIGURA 24: ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURAS PROCEDENTE DE WEATHER SPARK	34
FIGURA 25: GRAFICO DE TEMPERATURAS PROMEDIO DE WEATHER SPARK	35
FIGURA 26: GRÁFICO DE LA VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO A LO LARGO DEL AÑO DE WEATHER SPARK.....	35
FIGURA 27: DETALLE DEL CABLE B CON AISLADOR.....	37
FIGURA 28: ÁNGULO DEL ATIRANTADO DEL CABLE B	38
FIGURA 29: ÁNGULO DEL ATIRANTADO DEL CABLE A	38
FIGURA 30: PÓRTICO C/04/22. AISLADOR DE SECCIÓN SEÑALADO EN ROJO	39
FIGURA 31: PÓRTICO C/04/23, MARCADO EN ROJO EL AISLADOR DOBLE.....	39
FIGURA 32: DETALLE DEL CABLE D.....	40
FIGURA 33: PLANO DE LA ZONA DE DETALLE	43
FIGURA 34: PÓRTICO C/04/25 CON TENSORES PARA SOPORTAR ANCLAJES	44
FIGURA 35: ESTRUCTURA DEL ANCLAJE PARA LA OPCIÓN 1	44
FIGURA 36: PLANO DE LA INSTALACIÓN DE LA PROPUESTA 1	45
FIGURA 37: PLANO DE LA INSTALACIÓN DE LA MODIFICACIÓN DE LA PROPUESTA 1	47
FIGURA 38: ESTRUCTURA C/04/29 CON TENSOR EN LADO DERECHO	48
FIGURA 39: POSTE DE LA ESTRUCTURA C/04/30	49
FIGURA 40: POSTE CON POSIBILIDAD DE ANCLAJE SIN TENSOR	50
FIGURA 41: ESTRUCTURA C/04/25.....	51
FIGURA 42: ESTRUCTURAS C/04/26 Y C/04/27 CON LAS MODIFICACIONES NECESARIAS.....	52
FIGURA 43: PLANO DE LA ESTRUCTURA C/04/26.....	53
FIGURA 44: PLANO DE LA ESTRUCTURA C/04/27	53
FIGURA 45: PLANO DE LA INSTALACIÓN DE LA MODIFICACIÓN DE LA PROPUESTA 3	55
FIGURA 46: ESTRUCTURA C/04/24.....	56
FIGURA 47: PLANO DE LA INSTALACIÓN DE LA MODIFICACIÓN DE LA PROPUESTA 4	58
FIGURA 48: MODIFICACIONES A REALIZAR EN LA ESTRUCTURA C/04/28.....	60
FIGURA 49: MODIFICACIONES A REALIZAR EN LA ESTRUCTURA C/04/29.....	60



FIGURA 50: PLANO DE LA ESTRUCTURA C/04/30	65
FIGURA 51: PLANOS DE LAS ESTRUCTURAS C/04/31 Y C/04/32	72
FIGURA 52: PLANO DE LA ESTRUCTURA C/04/27	75

Índice de ecuaciones

ECUACIÓN 1: PROYECCIÓN E FUERZAS DE ATIRANTADO EN RECTA.....	23
ECUACIÓN 2: SIMPLIFICACIÓN DE CÁLCULO DE CARGAS DE ATIRANTADO EN RECTA PARA N HILOS.....	23
ECUACIÓN 3: PROYECCIÓN DE LAS FUERZAS DE ATIRANTADO EN CURVA.....	24
ECUACIÓN 4: TEOREMA DEL SENO	24
ECUACIÓN 5: REORGANIZACIÓN DE LA ECUACIÓN 4.....	24
ECUACIÓN 6: ECUACIÓN DE CÁLCULO DE CARGAS DE ATIRANTADO EN CURVA PARA N HILOS	25
ECUACIÓN 7: VELOCIDAD DEL VIENTO PARTICULARIZADA PARA UNA ALTURA Z	26
ECUACIÓN 8: PRESIÓN DINÁMICA DEL VIENTO	26
ECUACIÓN 9: FUERZA POR UNIDAD DE LONGITUD CAUSADA POR EL VIENTO.....	26
ECUACIÓN 10: PESO POR UNIDAD DE LONGITUD.....	27
ECUACIÓN 11: FLECHA GENERADA POR EL VIENTO	31
ECUACIÓN 12: DESCENTRAMIENTO TOTAL DE LA CATENARIA.....	31
ECUACIÓN 13: LOCALIZACIÓN DEL PUNTO CON MÁXIMO DESCENTRAMIENTO	31
ECUACIÓN 14: DESCENTRAMIENTO MÁXIMO DEL HILO DE CONTACTO	32
ECUACIÓN 15: CÁLCULO DE CARGAS VERTICALES	67
ECUACIÓN 16: CÁLCULO DE CARGAS RADIALES	67
ECUACIÓN 17: CÁLCULO DEL MOMENTO EN LA BASE PARA CASO A.....	68
ECUACIÓN 18: CÁLCULO DE LA CARGA AXIAL.....	68
ECUACIÓN 19: CÁLCULO DE LA SIGMA DEL POSTE	68
ECUACIÓN 20: CARGA CAUSADA POR EL VIENTO.....	69
ECUACIÓN 21: EFECTO DEL VIENTO EN LAS ESTRUCTURAS.....	69
ECUACIÓN 22: CARGA AUXILIAR DEL HIELO	70
ECUACIÓN 23: FLECHA PARA LAS FUERZAS CAUSADAS POR EL HILO DE CONTACTO	71
ECUACIÓN 24: FLECHA EN HILO DE CONTACTO PARA LAS FUERZAS CAUSADAS POR EL RESTO DE HILOS	71

Índice de tablas

TABLA 1: VALORES DE PARÁMETRO Z_0 PARA DIFERENTES TIPOS DE ENTRONO SEGÚN EL EURO CÓDIGO ENV 1991-2-4.....	26
TABLA 2: DATOS DEL POSTE C/04/30.....	66
TABLA 3: DATOS DE LA MÉNSULA C/04/30	66
TABLA 4: PROPIEDADES DE LOS HILOS.....	66
TABLA 5: CARGAS DE LOS CABLES A LA TEMPERATURA MÍNIMA	67
TABLA 6: CARGAS DE LOS CABLES A LA TEMPERATURA PROMEDIO	68
TABLA 7: DISTANCIAS DEL PUNTO DE APLICACIÓN DE LA CARGA AL POSTE	68
TABLA 8: CASO DE CARGA A DE LA OPCIÓN 1A.....	69
TABLA 9: CARGAS GENERADAS POR EL VIENTO EN LOS HILOS	69
TABLA 10: CARGAS GENERADAS POR EL VIENTO EN EL POSTE.....	70
TABLA 11: CASO DE CARGA B DE LA OPCIÓN 1A	70
TABLA 12: CARGAS GENERADAS POR EL HIELO EN LOS HILOS Y POSTES.....	70
TABLA 13: CASO DE CARGAS D DE LA OPCIÓN 1A	71
TABLA 14: FLECHA PARA CASO DE CARGAS A DE LA OPCIÓN 1A	71
TABLA 15: FLECHA PARA CASO DE CARGAS B DE LA OPCIÓN 1A	72
TABLA 16: CARACTERÍSTICAS DEL POSTE C/04/32	72
TABLA 17: CASO DE CARGA A DE LA OPCIÓN 1B.....	73
TABLA 18: CASO DE CARGA B DE LA OPCIÓN 1B	73
TABLA 19: CASO DE CARGA D DE LA OPCIÓN 1B.....	73
TABLA 20: FLECHA PARA CASO DE CARGAS A DE LA OPCIÓN 1B	73
TABLA 21: FLECHA PARA CASO DE CARGAS B DE LA OPCIÓN 1B	73
TABLA 22: CASO DE CARGA A DE LA OPCIÓN 2	74
TABLA 23: CASO DE CARGA B DE LA OPCIÓN 2	74
TABLA 24: CASO DE CARGA D DE LA OPCIÓN 2	74
TABLA 25: FLECHA PARA CASO DE CARGAS A DE LA OPCIÓN 2	75
TABLA 26: FLECHA PARA CASO DE CARGAS B DE LA OPCIÓN 2	75
TABLA 27: CASO DE CARGA A DE LA OPCIÓN 2	76
TABLA 28: CASO DE CARGA B DE LA OPCIÓN 3	76
TABLA 29: CASO DE CARGA D DE LA OPCIÓN 3	76
TABLA 30: FLECHA PARA CASO DE CARGAS A DE LA OPCIÓN 3	76
TABLA 31: FLECHA PARA CASO DE CARGAS B DE LA OPCIÓN 3	76

Capítulo 1: Historia del ferrocarril

Los inicios del vehículo conocido como ferrocarril estrictamente datan del año 1771, cuando el 13 de abril Richard Trevithick construye la primera locomotora de vapor propulsada mediante la máquina de vapor, desarrollada previamente por Watt en 1770. Este hito se produjo en Inglaterra, concretamente en Merthyr Tydfil, donde fueron capaces de transportar a viajeros a una velocidad superior a la del paso del hombre. Posteriormente, dicha tecnología fue evolucionando a lo largo de los años consiguiendo aumentar tanto la velocidad de la locomotora como la carga capaz de transportar tras ella. Fue tan grande el progreso y la investigación en dicho transporte, que actualmente se poseen unas líneas capaces de conectar ciudades, e incluso países en trayectos de tan solo unas escasas horas mediante el uso de locomotoras, que nos permiten superar los 200 Km/h.

Lo sorprendente de dicha tecnología o forma de transporte es que, a pesar de ser oficialmente inaugurada en 1771, muchos años antes ya se disponían de conocimientos acerca de esta forma de transporte, pero no en su totalidad. Los primeros indicios se sitúan en el siglo VI a.C, donde se podían observar estructuras similares a raíles talladas en el pavimento, cuya función era dirigir la carga transportada en unas plataformas mediante la fuerza de los esclavos. Más adelante, esta tecnología de transporte mediante raíles también fue aplicada en la minería. En el siglo XVI, aproximadamente en 1550, los mineros alemanes implementaron el transporte mediante raíles en sus minas para poder transportar al exterior de la mina todos los recursos extraídos. Dichos raíles eran fabricados mediante dos planchas de madera planas sobre las cuales eran impulsados los carros con los minerales.

Se desarrollaron diferentes máquinas capaces de generar una fuerza de propulsión mediante el consumo de un combustible. Dichas máquinas fueron implementadas en este nuevo concepto de transporte, permitiendo de esta forma eliminar la acción del hombre para propulsar la mercancía.

Con todos los componentes que formaban la locomotora ya estudiados e implementados, se empezaron a desarrollar las distintas líneas de ferrocarril, siendo la primera del mundo la línea Liverpool-Manchester inaugurada el 15 de abril de 1830. Esta línea permitía la conexión de ambas ciudades mediante una locomotora capaz de alcanzar los 16 Km/h.

Debido al éxito de dicho transporte y al aumento de la movilización entre ciudades, otros países se sumaron a la creación de estas infraestructuras para agilizar el tiempo de conexión entre sus ciudades. Algunos de estos países fueron Estados Unidos, Francia, Alemania e Italia, sin embargo, no fue hasta 1848 que esta tecnología llegó a nuestro país.

En territorio peninsular, la primera línea ferroviaria se estableció entre Barcelona y Mataró, mientras que en Cuba se realizaron otras conexiones ferroviarias con anterioridad.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Capítulo 2: Sistemas de electrificación

2.1. Introducción de la electricidad en el ferrocarril

El proceso de electrificación, al igual que en la mayoría de los transportes en la actualidad, era cuestión de tiempo que llegase al ferrocarril. Debido al gran consumo de carbón u otros combustibles a lo largo de los años de desarrollo del ferrocarril, hicieron indispensable la implantación de una nueva tecnología alternativa que redujese la contaminación producida por esos combustibles empleados, lo que dio lugar a la instauración de un nuevo sistema electrificado encargado de abastecer y propulsar a las locomotoras.

A pesar de reducir la contaminación producida por las locomotoras, la introducción de la electricidad en el ferrocarril supuso otras mejoras para el transporte como, por ejemplo:

- Mayor capacidad de aceleración y frenado debido a la reducción del peso y la posibilidad de superar los límites de potencia en periodos cortos de tiempo mejorando el rendimiento en líneas con gran número de paradas.
- Mayor rentabilidad debido a un menor coste de mantenimiento por la reducción de piezas móviles y el coste del combustible empleado.
- Menor consumo mediante frenos regenerativos.

También conllevaba algunas desventajas, ya que dicho cambio iba a suponer un coste muy elevado. Este coste no solo se reflejaba en la instalación de toda la nueva infraestructura, sino también se iba a requerir de un control de seguridad muy exigente debido al manejo de voltajes tan elevados.

Otro de los problemas que suponía la electrificación era determinar qué tipo de electrificación se iba a implantar, es decir, se iba a emplear la corriente continua, la alterna, dentro de alterna iba a ser monofásica o trifásica, se iba a realizar mediante “tercer carril”, catenaria rígida, catenaria flexible, etc.

En la actualidad, las redes de transporte encargadas de electrificar los trenes son tanto de corriente continua como alterna, dependiendo del tipo de tren o de trayecto. Durante muchos años se ha estado investigando sobre ambos tipos de electrificación, para determinar cuál era la más adecuada para el ferrocarril, pero es difícil restringirse solo a una de ellas.

En los inicios se implementó mayoritariamente la corriente continua, debido al mejor rendimiento que proporcionaban los motores que funcionaban con dicho tipo de corriente, pero este tipo de corriente acarrea otros problemas adicionales. Al emplear corriente continua, los voltajes de las líneas de transporte eran reducidos, causando así un aumento considerable de corriente en los tramos en los que el tren demandaba una cantidad mayor de potencia. Esta elevada corriente no solo requería el uso de cables mucho más gruesos y por lo tanto costosos debido al aumento de cobre necesitado, sino que también producía unas mayores pérdidas. En una línea, las pérdidas producidas en los cables llevan una

proporción cuadrática con la intensidad de dicha línea. Si a esto además se le añade la extensión de las líneas de tren, se obtiene una gran potencia extra que se debe suministrar para compensar estas elevadas pérdidas.

Sobre el siglo XX, se decidió llegar a un compromiso que uniese ambos tipos de sistemas de electrificación, usar los motores de corriente continua, pero conectándolos a una única fase en alterna, permitiendo el transporte de energía mediante corriente alterna a elevadas tensiones para reducir pérdidas. Al implementar esta técnica se observaron varios problemas, como por ejemplo la descompensación del sistema eléctrico al usar únicamente una de las fases.

En Alemania se optó por implementar un sistema monofásico de corriente alterna a frecuencia 50/3 Hz o 16 2/3 Hz. Dicha frecuencia fue demostrada ser la óptima para trenes de alta velocidad o zonas de tráfico extenso.

No fue hasta 1940, también en Alemania, donde se consiguió establecer exitosamente la tecnología trifásica. Esto fue posible debido al gran avance conseguido en el estudio de la electrónica de potencia. La combinación elegida consistía en líneas que transportaban la corriente a una tensión de 25 kV y a una frecuencia de 50 Hz.

Como se ha mencionado anteriormente, en la actualidad la mitad de las líneas ferroviarias utilizan la corriente continua, normalmente a tensiones entre los 600 y los 750 V en líneas con distancias entre subestaciones cercanas y tensiones de entre 1500 y 3000 V para líneas con subestaciones más separadas. A medida que avanza la tecnología, se aumenta la potencia de las máquinas, requiriendo del mismo modo un aumento de las tensiones para evitar grandes pérdidas, lo que está causando una transformación lenta al sistema trifásico de toda la red eléctrica ferroviaria.

Una vez analizados y comprendidos los distintos sistemas de electrificación posibles, viendo sus ventajas y sus inconvenientes, también se debe analizar el sistema empleado para implementar esa distribución de electricidad. Hay una gran variedad de planteamientos mediante los cuales se pueden emplear las distintas distribuciones eléctricas previamente planteadas, entre los cuales se van a destacar y comentar los siguientes.

2.2. Tercer carril

El sistema de tercer carril surge como una alternativa a la catenaria tradicional compuesta por hilos de contacto, sustentadores, péndolas y el resto de los elementos que la forman.

El planteamiento de esta nueva disposición se basa en la implantación de un tercer riel o carril, como su nombre indica, mediante el cual se fije el hilo conductor al mismo, prácticamente a modo de conductor rígido, a través del cual se suministra la potencia necesaria al ferrocarril.

La zona de contacto entre el tercer carril y el ferrocarril puede variar. Se puede realizar el contacto en la zona superior del carril como se da en países como Francia o Inglaterra, en

la zona inferior como en Alemania o Austria o se puede realizar un contacto lateral como el empleado en el metro de Hamburgo.

Esta forma de transmisión de energía es la más antigua empleada y se usa sobre todo en ferrocarriles urbanos o en las líneas de metro. Dentro de la tecnología del tercer carril se encuentran variaciones derivadas de la necesidad de aumentar la potencia de los ferrocarriles, modificando de esta forma los materiales empleados. En sus inicios se empleó el acero y en la actualidad las líneas con esta tecnología emplean aleaciones de acero y aluminio.



Figura 1: Sistema de tercer carril instalado en vía ferroviaria

2.3. Catenaria rígida

Otro tipo de sistema alternativo a la catenaria tradicional es la conocida como catenaria rígida. Este tipo de catenaria tiene presente un perfil rígido situado sobre el galibo del ferrocarril, el cual tiene la función de soportar el hilo de contacto.

Este hilo de contacto sigue siendo el encargado de transmitir la corriente al ferrocarril, la diferencia es que ya no lo hace de forma elástica o libre como lo hace en una catenaria aérea sin la presencia de perfiles de vigas. La disposición de este tipo de sistema de catenaria es comúnmente empleada en túneles o en secciones de aguja por ciertos motivos, que se comentaran en la sección siguiente, en la que se compararan las ventajas e inconvenientes de la catenaria rígida y el tercer carril.

La disposición de los perfiles se realiza de forma senoidal, de tal forma que en caso de estrechamiento o ensanchamiento por la variación de temperaturas siempre se reduzca el descentramiento del hilo respecto del eje de la vía.



Figura 2: Catenaria rígida en el metro de Madrid

2.4. Catenaria flexible

Este tipo de catenaria se podría decir que es la más habitual y la más conocida. Está formada por diversos cables cuyas funciones van desde la transmisión de potencia a la locomotora, hasta la sustentación de otros cables de la catenaria. En la próxima sección se detallarán sus componentes más habituales y se desglosará con mayor precisión su funcionalidad, así como su representación o posicionamiento en diferentes catenarias.

Este tipo de transmisión de potencia es la más empleada debido a su menor coste. Al solo estar formada por cables, la presencia de perfiles rígidos de acero u otros materiales es considerablemente menor, ya que solo se emplearían para la construcción de postes de sujeción o pórticos rígidos. Esto permite también, la posibilidad de crear líneas de contacto de gran longitud y pasar de una conexión interprovincial a una conexión nacional. Adicionalmente, la flexibilidad de los cables frente a los perfiles rígidos aporta una mayor libertad a la hora de diseñar líneas de alta velocidad.

Dentro de los inconvenientes de este tipo de composiciones es sobre todo el galibo. Se debe tener el suficiente espacio para montar toda la estructura encima del ferrocarril, lo cual puede ser un problema en zonas de galibo reducido como túneles, en las que se emplearía la catenaria rígida, como se ha comentado anteriormente.



Figura 3: Ejemplo de catenaria flexible

2.5. Ventajas e inconvenientes

Una vez analizadas todas las disposiciones de sistemas de captación de corriente alternativos, se puede proceder a compararlas para determinar sus beneficios o desventajas frente al resto de sistemas empleados.

Comenzando por el tercer carril, este tipo de catenaria es más segura frente a posibles accidentes como la caída de un hilo de alta tensión en una catenaria aérea, al estar presente la sección de contacto a una altura similar a la de la vía. Por otro lado, esta disposición es más alcanzable por las personas que se encuentran en las proximidades, requiriendo una gran seguridad y control en los métodos de aislamiento empleados como las juntas aislantes. Otro de los principales problemas reside en la velocidad, ya que el tercer carril no permite velocidades tan elevadas como los otros dos sistemas mencionados. También es necesario emplear juntas de dilatación capaces de amortiguar y soportar las dilataciones y contracciones de los perfiles debido a la variación de las temperaturas. Adicionalmente, estas dilataciones pueden deformar secciones de la vía en localizaciones débiles.

Una ventaja de este tipo de sistema es que la resistencia en la zona de contacto de los perfiles empleados es muy elevada, causando un desgaste mínimo y reduciendo de esta forma los costes de mantenimiento.

Respecto de la catenaria rígida, el principal motivo por el que este sistema se emplea es por su reducido espacio. El espacio vertical empleado por este tipo de estructuras es muy reducido en comparación con las catenarias aéreas, haciendo posible su instalación en zonas de gálibo limitado como los túneles.

Otra de las ventajas es la posibilidad de suprimir las tomas a tierra debido a la gran fijación y sujeción del hilo de contacto, haciendo prácticamente imposible su caída. Además, la gran resistencia al fuego de los perfiles junto con la fácil transición de la zona flexible a la catenaria rígida son otros de los motivos por el cual su utilidad en túneles es muy adecuada. Una desventaja de este sistema es que nunca se puede adecuar la tensión de funcionamiento adecuada, ya que la zona rígida requiere de tensiones diferentes a la zona flexible, obligando de esta forma a llegar a una situación de compromiso entre ambos sistemas.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Capítulo 3: principios mecánicos

Para comprender el funcionamiento completo de la catenaria, en este capítulo se explicarán los distintos componentes que la forman, al igual que su función y las posibles variantes. Adicionalmente se mencionarán ciertas características mecánicas que son aplicables a todas las líneas aéreas de contacto, como por ejemplo esfuerzos en el atirantado o cargas verticales.

3.1 Componentes principales de la catenaria

3.1.1 Hilo de contacto

Es el elemento más importante de la catenaria, ya que es el encargado de la transmisión de la energía al pantógrafo del tren. Debe estar en contacto con el pantógrafo en todo momento. Su composición suele ser de cobre o aleaciones y la sección de este determina la potencia que debe ser transmitida al tren para su correcto funcionamiento, estando dicha sección normalizada.

Cabe destacar el término de descentramiento, que hace referencia al desplazamiento lateral del hilo respecto del pantógrafo y del eje central de la vía, para evitar que el desgaste debido a la fricción entre el hilo y el pantógrafo se produzca solo en una zona localizada. La normativa recoge las distancias máximas de descentramiento permitidas para evitar que dicho desplazamiento sea excesivo, causando que el hilo se introduzca en la parte inferior del pantógrafo dañando toda la estructura.

Otro de los parámetros a tener en cuenta y evaluar en todo momento, es la altura del hilo de contacto, la cual se regula mediante las péndolas, que serán explicadas en los puntos posteriores de este capítulo. Se debe mantener la altura lo más constante posible a lo largo de todo el vano para asegurar un contacto continuo entre el pantógrafo y el hilo de contacto. Al no poder garantizar una altura constante, la normativa recoge las variaciones máximas de altura del hilo de contacto en función de la velocidad de la vía, ya que en vías de alta velocidad se debe tener un control más preciso y unas variaciones de altura menores para asegurar el correcto funcionamiento de la línea.

Esta diferencia de alturas se mide comparando la altura del hilo en el apoyo y la altura de este en su punto más bajo, que es la zona más alejada de los apoyos o el punto medio del vano. Por ejemplo, según la normativa, para velocidades bajas entre los 40 y los 50 Km/h no se permite una diferencia de alturas entre esos dos puntos mayor a 0,001 veces la longitud del vano, siendo la diferencia máxima, independientemente de la longitud del vano, de 20 centímetros.

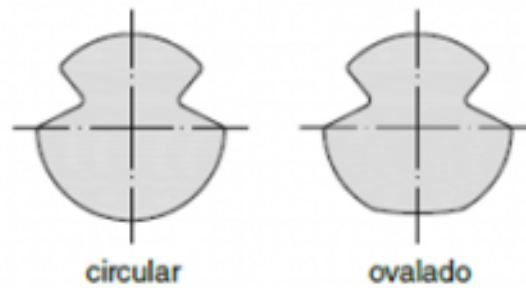


Figura 4: Sección de hilo de contacto

3.1.2 Vano

Se denomina vano a la sección de hilo de contacto que se encuentra entre dos estructuras contiguas. La consecución de vanos da lugar a un cantón. La longitud del vano es uno de los parámetros más importantes en una catenaria, ya que en función de dicha distancia se deberán posicionar más o menos estructuras de sujeción. Si el vano es demasiado largo, se corre el riesgo de obtener un descentramiento excesivo y que dicho hilo de contacto sobrepase la longitud del semipantógrafo, causando que el hilo se cuele debajo del mismo. Por el contrario, si la longitud del vano es demasiado corta, de deberán poner un gran número de postes o pórticos a lo largo de la vía, encareciendo considerablemente el presupuesto del proyecto.

Son por los anteriores motivos que un cálculo preciso sobre la longitud del vano es imprescindible. Para obtener dicho cálculo, se debe considerar la situación más desfavorable y calcular el descentramiento máximo que se produciría en dicho tramo. Para ello se supone una fuerza lateral debida al viento acorde con la localización de la vía (3.2.1 Esfuerzos en los brazos de atirantado, cargas horizontales) y un estado tensional de los hilos de la catenaria que será el menor posible, para provocar un mayor descentramiento con una menor fuerza. Basándose en esta situación se realizará el cálculo del descentramiento a la mitad del vano, que será el lugar en el que el desplazamiento será mayor.

Una vez expuesta la metodología de cálculo, se puede observar cómo dicho cálculo debe ser realizado para cada vano en particular, ya que el cálculo depende de si la vía es un tramo recto o si se trata de una curva, donde el vano máximo a calcular será de una longitud menor.

3.1.3 Hilo sustentador

Consiste en otro hilo que acompaña al hilo de contacto y se sitúa en la zona superior al mismo, cuya función reside en aguantar el peso y mantener la tensión mecánica del hilo de contacto. Este tipo de tecnología no siempre está presente en todas las catenarias. La conexión entre el hilo de contacto y el sustentador se realiza a través de péndolas, las cuales determinan la altura del hilo de contacto. Dependiendo de la catenaria hay péndolas cortas, de longitudes menores a 600 milímetros, o largas, si exceden esa medida. En caso

de poseer péndolas largas, se debe suplementar la estructura con cables supletorios de alimentación cada cierta distancia para garantizar una correcta conexión eléctrica, lo que genera puntos de separación del pantógrafo en la unión entre ambos cables. En su defecto, también existe la posibilidad de colocar péndolas flexibles con una grifa en el extremo que la une al hilo de contacto para garantizar la conexión de ambos hilos.

En las zonas cercanas a los apoyos, pueden encontrarse falsos sustentadores para componer una “Péndola en Y”. Finalmente, este hilo también ayuda a la conducción de potencia, ya que, al ser cables conductores, actúan de forma que la sección “activa” del cable es mayor al estar dividida en más cables, permitiendo el transporte de mayor potencia. Esta característica será analizada más a fondo en el análisis del siguiente elemento.

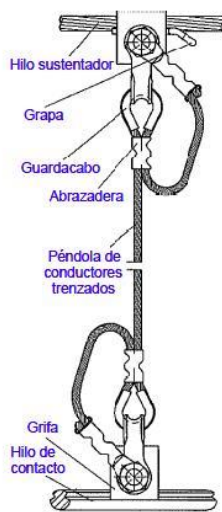


Figura 5: Grifa

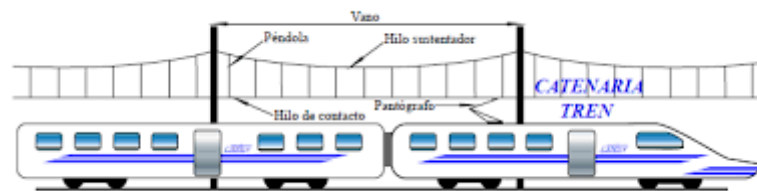


Figura 6: Disposición de catenaria con sustentador

3.1.4 Feeder de acompañamiento

Estos elementos son cables auxiliares que permiten la reducción de la sección del hilo de contacto en las vías cuyos ferrocarriles requieren la transmisión de altas potencias de funcionamiento, como se vio que también pasaba con los cables sustentadores en el punto anterior, aunque en estos era una propiedad derivada más que una funcionalidad del elemento. En las vías de ferrocarriles de alta velocidad, se requiere de una gran potencia, lo que derivaría en una sección del hilo de contacto mucho más grande, haciendo la catenaria considerablemente menos flexible y ligera. Para evitarlo se deriva parte de la corriente por los feeder, conectándolos a la catenaria cada cierta distancia a modo de aporte supletorio de potencia.

Adicionalmente, el seccionamiento del cable de contacto en varios cables para evitar un cable rígido y poco flexible también favorece las condiciones de calentamiento de la catenaria tras el paso de corriente. Al ser corrientes muy elevadas, este calentamiento puede provocar grandes deformaciones en el cable causando que este sobrepase los límites establecidos en medidas como la altura de cable o el descentramiento máximo.

3.1.5 Pórtico

En función de la estructura hay dos tipos de pórticos. Pueden ser pórticos rígidos o pórticos funiculares.

Los pórticos rígidos son estructuras trianguladas de metal de las que se sustentan los hilos de contacto. Son de un elevado coste y complejidad, pero tiene grandes propiedades mecánicas.

Por otro lado, los pórticos funiculares en vez de ser estructuras de hierro consisten en un pilar a cada lado de la vía conectados mediante cables de acero. Su coste es mucho más reducido, pero las vías no tienen independencia mecánica, por lo que son muy afectadas por las vibraciones generadas al pasar el tren por ellos. Adicionalmente, al tener cables de acero, estos deben ser correctamente aislados para poder separar eléctricamente las distintas vías.

Los pórticos se suelen utilizar en secciones de la vía en las que hay presentes varios carriles, siendo muy complicando la sujeción de la catenaria mediante postes simples independientes.

3.1.6 Ménsula

En caso de poder sujetar la catenaria mediante un poste independiente, a este se le fija lo que se denomina ménsula. En función de su diseño y aplicaciones se diferencian dos tipos diferentes

Por un lado, se disponen de las ménsulas de celosía, en las cuales hay presentes unos perfiles fijados en la zona inferior del poste y un tirante capaz de trabajar a tracción. Este tipo de ménsulas se encuentran en vías de baja velocidad principalmente.

Por otro lado, en vías de mayor velocidad se observan ménsulas tubulares. Este tipo de ménsulas están formados por perfiles tubulares unidos mediante juntas articuladas, las cuales permiten el desplazamiento correcto de la ménsula. Este tipo de ménsula se utiliza en aplicaciones de alta velocidad debido a su capacidad de soportar esfuerzos mayores.

Otra diferenciación también puede observarse en el tipo de anclaje al poste. El anclaje puede ser móvil o fijo. Las ménsulas con anclaje fijo se sitúan en el centro del cantón, elemento que se examinará en el punto siguiente, mientras que las que poseen un anclaje móvil se sitúan en el resto del tramo del cantón. Este anclaje móvil permite a la ménsula rotar junto con los desplazamientos de la catenaria, aportándola flexibilidad.



Figura 8: Ménsula tubular



Figura 7: Ménsula de celosía

3.1.7 Cantón de compensación

Se denomina cantón a las secciones en las que se divide el hilo de contacto durante toda la vía. Suele dividirse en secciones de hasta 1200 metros y en el centro se localiza un punto fijo.

Puede tener compensación automática o no estar compensados. Si no están compensados, la velocidad máxima que se puede alcanzar en dicha vía es de 120 Km/h, requiere de un gran mantenimiento y en la actualidad no se emplean ya que, como mínimo, actualmente se compensan los hilos de contacto. En este caso los cables se fijarían al poste mediante unos tensores manuales. En este proyecto, al ser una vía con cierta antigüedad, la catenaria no posee compensación.

En el caso de estar compensada, se realiza mediante un juego de poleas y pesos, que mantiene la tensión mecánica de los cables independientemente de la temperatura y garantiza una deformación constante.

Suelen estar compensados tanto los cables sustentadores como el hilo de contacto y se pueden compensar en la misma polea o en poleas diferentes. La ventaja de realizarlo en poleas diferentes es que la deformación de los cables que forman los sustentadores es diferente que la del hilo de contacto, ya que están formados de diferentes materiales y, por lo tanto, para la misma temperatura poseen deformaciones diferentes.



Figura 9: Cantón con compensación independiente y automática

3.1.8 Equipos de compensación

Como se ha comentado previamente, uno de los equipos de compensación que se pueden emplear, y quizá el más habitual, se trata de un conjunto de pesos y poleas encargados de mantener la tensión constante a lo largo del cantón independientemente de la temperatura y, por lo tanto, de la deformación del cable.

Son muy efectivos y no demasiado caros, por lo que pueden ser una buena opción, pero entre sus desventajas se encuentra que, en caso de situarse en una zona accesible, han de ser correctamente protegidos y aislados. Esto es debido a un posible vandalismo en el que se puedan retirar los pesos causando la caída de la catenaria. Por ello deben estar enrejados en todo momento y fuera del alcance de cualquier persona no autorizada para su manipulación.

Otra desventaja o inconveniente que sufre este tipo de compensación es la altura requerida por los equipos. Al funcionar para cualquier deformación de los hilos de la catenaria y que la temperatura no sea un factor que desestabilice la tensión, estos equipos deben tener el suficiente recorrido para desplazarse tanto como sea la deformación del cable, sin llegar en ningún momento a contactar con el suelo o con el tope de la polea superior.

En los casos en los que se disponga de un gálibo reducido, como puede ser por ejemplo un paso por túnel, se puede optar por otra alternativa como los equipos de compensación de tipo tensor o muelle.

Estos equipos sustituyen las poleas por unos muelles torsionales, que son conectados a los hilos de la catenaria. De esta forma, el hilo genera un momento torsor sobre el muelle que lo comprime, haciendo que este a su vez genere una reacción tensionando el hilo. De la misma forma que en el caso de los contrapesos, estos sistemas de compensación no son afectados por las deformaciones de los hilos con los cambios de temperatura.



Figura 10: Muelle torsional en sistema de compensación

3.1.9 Aislador

La función principal de estos elementos es la de aislar eléctricamente a ciertas estructuras conductoras de la corriente que circula por la catenaria, como pueden ser los postes metálicos. Además, también pueden ser empleados creando diferentes secciones en un mismo tramo con el objetivo, por ejemplo, de cortar localmente el paso de corriente por

un tramo que debe ser reparado sin la necesidad de tener que cortar el suministro eléctrico a toda la vía. Este concepto será detallado en la siguiente sección bajo el nombre de seccionamientos o seccionadores.

Dentro de los aisladores se diferencian varios tipos en función de su composición y proceso de fabricación. Los más predominantes son los siguientes: aisladores de porcelana, de vidrio, de materiales compuesto o de resina epoxi.

Sus aplicaciones varían en función de las propiedades que deben satisfacer dichos elementos, por ejemplo, los fabricados con resina epoxi son capaces de soportar grandes esfuerzos mecánicos y se suelen encontrar en soportes de seccionadores, por el contrario, los de vidrio presentan una gran rigidez y su precio es más reducido. Finalmente, los fabricados por materiales compuestos suelen presentar núcleos de fibra de vidrio, lo que les dotan de ser los aisladores menos pesados de todos sin sacrificar las especificaciones mecánicas de resistencia.



Figura 12: Aisladores de tensión



Figura 11: Aisladores en una ménsula

3.1.10 Knuckle

Estos componentes suelen emplearse en zonas de solapamiento, en las que hay presentes varios hilos de contacto simultáneamente para la misma vía. Su función reside en aportar rigidez y estabilidad a la catenaria y fijar la localización de los hilos de contacto en las zonas en las que no se dispone de una doble ménsula, una para cada hilo de contacto.

Estos elementos también pueden estar aislados y emplearse para la separación eléctrica de dos hilos de contacto que se encuentren muy cercanos entre ellos. Actualmente se encuentran en desuso y únicamente están presentes en líneas de cierta antigüedad debido a la presencia de una masa no soportada que afecta, tanto a la dinámica de la vía como al desgaste y la vida útil del pantógrafo. Los dos tipos de knuckles son los siguientes.



Figura 13: Knuckle aislador

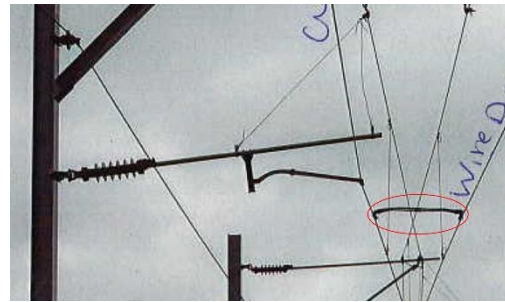


Figura 14: Knuckle sin aislador

Una vez descritos y analizados los principales componentes de la catenaria así como sus funciones, se procederá a la aclaración de algunos conceptos que serán empleados posteriormente a lo largo de la memoria, los cuales recogen algunas de las características más importantes a la hora de calcular y diseñar una catenaria.

3.2 Características mecánicas

3.2.1 Esfuerzos en los brazos de atirantado, cargas horizontales

Para provocar el descentramiento del hilo de contacto a lo largo de la vía mencionado previamente, se debe aplicar una serie de tensiones o esfuerzos en los brazos que sujetan a dicho hilo de contacto. Estos se dividen en dos según su dirección y pueden ser paralelos a la vía o perpendiculares a la misma. En caso de que los vanos sean igual de largos a ambos lados del brazo de atirantado o ménsula, no se obtienen esfuerzos en la dirección paralela a la vía.

Los factores que determinan dichos esfuerzos para dimensionar las ménsulas son, entre otros, el descentramiento que se pretende dar al hilo de contacto, la tensión mecánica del mismo, así como su longitud de vano y el número de hilos de contacto que posee la vía.

El cálculo de las cargas radiales soportadas por un poste debido al posicionamiento de los hilos de contacto se realiza de dos formas diferentes, dependiendo de si el tramo se encuentra en recta o por el contrario pertenece a una curva de la vía.

En el primer caso, el diagrama de fuerzas del poste en una recta se puede representar de la siguiente forma.

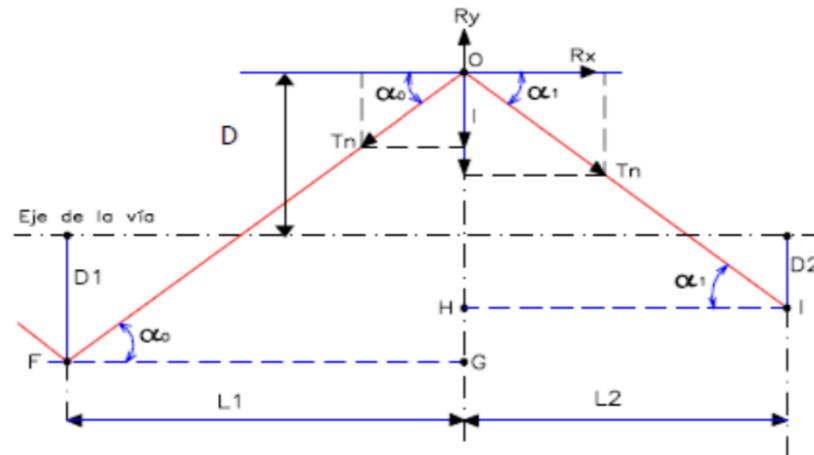


Figura 15: Esquema de fuerzas en un poste situado en vía recta. Fuente: Adif

En este diagrama, se observa en rojo la trayectoria del hilo de contacto y su característico posicionamiento alternativamente a cada lado del eje de la vía y en negro con línea punteada el eje central de la vía. Mediante un simple cálculo de proyección de fuerzas en la dirección vertical, se observa que la reacción ejercida por el poste, denominada R_y , debe ser igual a la proyección de las fuerzas de atirantado de la catenaria en dicha dirección, resultando la siguiente ecuación.

$$R_y = T * n * \text{sen}(\alpha_0) + Tn * \text{sen}(\alpha_1)$$

Ecuación 1: Proyección e fuerzas de atirantado en recta

Dicha ecuación puede ser aproximada asumiendo que los ángulos α_0 y α_1 son muy pequeños, por lo que la hipotenusa del triángulo se puede aproximar a las distancias L_1 y L_2 respectivamente. En el esquema se ha exagerado dicho ángulo para la correcta visualización de la explicación, pero en la aplicación práctica, dichos ángulos son muy cercanos a 0° . Aplicando dicha simplificación se obtiene la siguiente ecuación.

$$R_y = T * n * \left(\frac{D + D_1}{L_1} + \frac{D + D_2}{L_2} \right)$$

Ecuación 2: Simplificación de cálculo de cargas de atirantado en recta para n hilos

Esta aproximación no podrá ser utilizada en el caso de analizar los esfuerzos en el poste siguiente al anclaje de un hilo de contacto, ya que en las zonas de anclaje los ángulos que forman los cables son mucho más cerrados, por lo que los esfuerzos generados son mayores. Este fenómeno puede ser observado posteriormente en la [Figura 28](#) y la [Figura 29](#).

En las zonas de aguja, como la del tramo de vía en el que se centra este proyecto, puede reducirse la tensión del hilo para evitar grandes esfuerzos de atirantado compensando los ángulos cerrados debido a las bajas velocidades de la vía en esa sección.

Respecto al análisis en un tramo curvo, la ecuación tiene un grado mayor de complejidad. El esquema a analizar corresponde con la siguiente imagen.

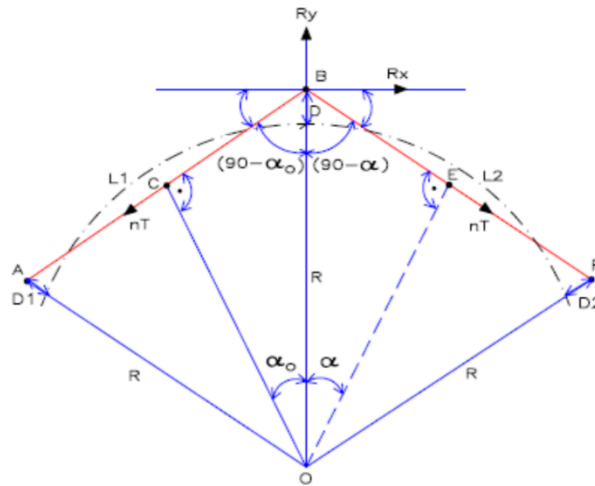


Figura 16: Esquema de fuerzas en un poste situado en vía curva. Fuente: Adif

Como se puede apreciar, la propia geometría de la curva es la encargada de alternar la zona de contacto entre el hilo y el pantógrafo, generando de nuevo la disposición en zigzag característica. Al ser la geometría de la vía la que genera el descentramiento, se suelen tener valores notablemente mayores en comparación con los tramos rectos de descentramiento, haciendo así a las zonas curvas uno de los puntos críticos a la hora de los cálculos de descentramientos máximos con acciones del viento añadidas.

Respecto al cálculo de la reacción generada por el poste R_y , se parte de la misma ecuación

$$R_y = T * n * \text{sen}(\alpha_0) + Tn * \text{sen}(\alpha_1)$$

Ecuación 3: Proyección de las fuerzas de atirantado en curva

Aplicando el teorema del coseno se llega la siguiente expresión

$$(R + D_1)^2 = L_1^2 + (R + D)^2 - 2 * L_1 * (R + D) * \cos(90 - \alpha_0)$$

Ecuación 4: Teorema del seno

Sustituyendo el seno por el coseno y ajustando los términos se obtiene la siguiente igualdad

$$\text{sen}(\alpha_0) = \frac{L_1^2 + (R + D)^2 - (R + D_1)^2}{2 * L_1 * (R + D)}$$

Ecuación 5: Reorganización de la ecuación 4

Por lo tanto, si se sustituye esta ecuación en la original, adaptada para α_0 y α se obtiene

$$R_y = T * n * \left(\frac{L_1^2 + (R + D)^2 - (R + D_1)^2}{2 * L_1 * (R + D)} + \frac{L_2^2 + (R + D)^2 - (R + D_2)^2}{2 * L_2 * (R + D)} \right)$$

Ecuación 6: Ecuación de cálculo de cargas de atirantado en curva para n hilos

Mediante la aplicación de estas dos fórmulas, se puede determinar la fuerza que ejercen los hilos de la catenaria sobre los postes de sujeción.

A parte de los esfuerzos por el atirantado, la otra fuerza horizontal más predominante en una catenaria se corresponde con la fuerza ejercida por la velocidad del viento.

Para el cálculo de la velocidad del viento, se debe realizar un estudio de las velocidades del viento durante los últimos cincuenta años en la localización de interés. Una vez obtenido ese margen de tiempos, se realiza el cálculo de la máxima media de velocidades comprendida durante diez minutos consecutivos y se obtiene la velocidad de viento base. Para obtener la velocidad de viento de diseño se le deben aplicar diversos factores, como puede ser una relación con la topografía del terreno, la altura a la que se encuentra la catenaria, etc.

Mediante el análisis de las velocidades del viento durante los últimos cincuenta años, se obtiene el siguiente gráfico en el que se muestra la velocidad del viento en función de la localización en Reino Unido.

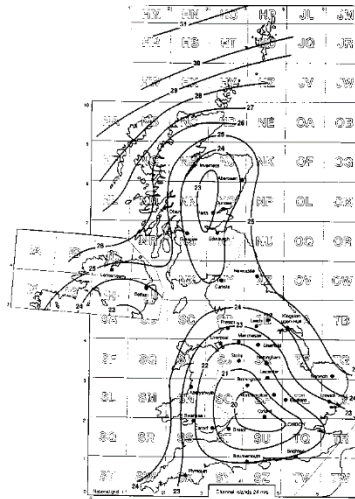


Figura 17: Velocidades del viento en Reino Unido

Esta velocidad suele ser calculada a una distancia de diez metros sobre el nivel del terreno, pero en el caso de necesitar dicha velocidad a una altura diferente, se deberá aplicar un factor en función del tipo de terreno, como se observa en la siguiente tabla.

Tipo de terreno	Características del terreno	Z ₀
I	Orilla del mar o de un lago con al menos 5 km de superficie de agua del lado de barlovento o en zona rural plana y sin obstáculos de ningún tipo	0.01
II	Zona rural con algunos obstáculos aislados tales como árboles o construcciones de pequeñas dimensiones	0.05
III	Zona suburbana, forestal o industrial	0.3
IV	Zona urbana en la que al menos el quince por ciento de la superficie esté edificada y la altura media de los edificios exceda de 15 m	1

Tabla 1: Valores de parámetro z₀ para diferentes tipos de terreno según el Euro código ENV 1991-2-4.

Una vez determinado el factor z₀, se calculará la velocidad del viento a una distancia z de la superficie del terreno aplicando la siguiente ecuación.

$$V_z = V_{10} * Ln * \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Ecuación 7: Velocidad del viento particularizada para una altura z

Con la velocidad del viento a la altura de interés para nuestro cálculo, se procede a la determinación de la presión dinámica ejercida por el viento, representada por q_z, siendo ρ la densidad del aire y G_q el factor de ráfaga definido en 2.05.

$$q_z = \frac{\rho}{2} * G_q * V_z^2$$

Ecuación 8: Presión dinámica del viento

Finalmente, con la presión dinámica se puede obtener la fuerza que ejerce el viento sobre la catenaria mediante el siguiente cálculo.

$$F'_W = q_z * G_C * C_W * d$$

Ecuación 9: Fuerza por unidad de longitud causada por el viento

G_C hace referencia a la respuesta estructural, se emplea habitualmente el valor 0.75 y C_W es el coeficiente de resistencia aerodinámica del cable, que suele aproximarse a la unidad. Finalmente, la d hace referencia al diámetro del cable sobre el que actúa la fuerza del viento.

3.2.2 Cargas verticales

Dentro de la disposición de cargas verticales se pueden destacar dos, que predominan frente al resto debido a su amplia presencia en un gran número de catenarias.

La primera de ellas es el peso. Los postes de sujeción de toda catenaria han de soportar el peso de los cables y sistemas de protección que la conforman. Para su cálculo, se emplea el peso por unidad de longitud. Esto es determinado calculando la masa de un cable, multiplicada por la acción de la gravedad para determinar el peso y dividida entre la

longitud del tramo pesado. Este factor viene estandarizado según el material del cable, su sección o su composición entre otros factores y es denominado con la letra G' .

$$G' = \frac{m * g}{L}$$

Ecuación 10: Peso por unidad de longitud

Este factor también es calculado para el resto de los componentes como aisladores, grifas, péndolas, sustentadores, etc. En estos casos se realiza una estimación de la distancia a la que se encuentra cada uno de estos componentes para hallar su peso por unidad de longitud. De esta forma, se puede determinar un peso por unida de longitud estandarizado para cada modelo de catenaria sumando los componentes que forman dicho modelo de catenaria.

La segunda fuerza que se debe tener en cuenta es la acción del hielo. Si la nieve o el hielo se posa sobre la catenaria o el resto de sus componentes, está aumentando su peso y, por tanto, debe ser mayor la fuerza a soportar por los postes de sujeción.

Al igual que en el caso del esfuerzo sometido por el viento, para cuantificar la fuerza ejercida por el hielo, se realiza una estimación en función de la región en la que se encuentre dicho tramo de catenaria, diferenciando cuatro clases según la Norma Europea EN 50125-2.

La clase I0 se corresponde con una localización sin ningún tipo de carga ejercida por el hielo. La clase I1 estima una carga pequeña de hielo, sustituida en un peso unitario de 3,5 N/m. La clase I2 se emplea en caso de carga media con 7,0 N/m de peso por unidad de distancia y finalmente la clase I3 simula una carga de hielo pesada equivalente a 15,0 N/m.

Este peso deberá ser sumado al calculado anteriormente para la acción del peso propio de la catenaria para poder determinar una fuerza media que simule el estado de fuerzas que será soportado por los postes en la dirección vertical.

3.2.3 Momento de vuelco

El momento de vuelco es uno de los cálculos más importantes a la hora de justificar el diseño de los postes empleados en una catenaria, ya que mide la capacidad de dicho poste a sufrir ciertos momentos flectores.

Para su correcto cálculo, se deben tener en cuenta todas aquellas fuerzas que se apliquen sobre el poste, ya sean verticales u horizontales. Algunas de las fuerzas verticales más importantes pueden ser el propio peso de la catenaria y sus componentes, así como la carga añadida que puede generar el hielo depositado sobre la misma, como se ha mostrado en el apartado anterior. Respecto a las fuerzas horizontales, se deben destacar naturalmente las tensiones de los hilos de la catenaria, así como las fuerzas generadas por el viento, principalmente.

Su cálculo no es de gran complejidad una vez se hallan localizado y reducido todas las fuerzas a acciones equivalentes puntuales. Se tomará como punto de referencia la cimentación del poste sobre el que se quiera calcular el momento de vuelco y se aplicarán los momentos generados por todas las cargas que actúan en la catenaria.

3.2.4 Momento de torsión

Al igual que los cables producen en los postes unos momentos capaces de tumbar el poste o flexionarlo, estas cargas también pueden crear otro tipo de momento sobre el poste, al que se le denomina momento torsor.

Este momento se da en postes, los cuales poseen una ménsula doble, es decir, en el mismo poste se localizan dos ménsulas, que soportan cada una a hilos de contacto diferentes. Este tipo de postes suele ser habitual en las zonas de seccionamiento, en la que se realiza el cambio de hilo de contacto o en zonas de cambios de carril, en las que hay presentes más de un hilo de contacto simultáneamente.

Cabe destacar que no todo tipo de ménsula doble produce un momento de torsión sobre su poste. Para producir dicho momento, las ménsulas deben estar desalineadas del eje del poste. De no ser así, las fuerzas radiales del atirantado no estarían generando un momento torsional en el poste. A continuación, se mostrará un ejemplos de ménsula doble en la que no hay peligro de que el poste tenga que soportar ningún esfuerzo o momento torsional.



Figura 18: Ménsula doble sin momento torsor

La fuerza causante de dicho momento, como se ha mencionado anteriormente, son las fuerzas de atirantado o fuerzas radiales. Al estar desplazadas del eje del poste, dichas fuerzas generan un momento sobre el poste, el cual produce su torsión. Para evitar este estado tensional en el poste, se podría realizar un equilibrio de fuerzas a ambos lados del poste.

Debido a que las fuerzas de atirantado de cada cable dependen de la tensión de dicho cable y del ángulo que formen en el momento de su sujeción, es realmente complejo que ambas fuerzas de los cables sean iguales, por el contrario, a parte de la fuerza, la distancia a la que se encuentran del poste también es una variable que modifica el momento producido en el poste, por lo que ajustando la distancia en función de las fuerzas radiales generadas por cada cable se podría dar lugar a un estado tensional ausente de momentos torsores a pesar de poseer ménsulas desplazadas del eje del poste.

Finalmente, también cabría remarcar el peligro ante una posible rotura de uno de los cables ya que, si se deja de tensionar uno de los extremos, el sistema ya no quedaría en equilibrio y el poste podría sufrir un momento de torsión superior al de su resistencia, llegando a quebrarse.

3.2.5 Seccionamiento

El seccionamiento, a diferencia de los otros conceptos, no es un cálculo de un esfuerzo o momento, sino un concepto que se basa en la fragmentación eléctrica y mecánica de una vía ferroviaria con la finalidad de poder puentear o cortar el suministro eléctrico de un tramo de la vía en caso de que deba ser reparada o revisada, sin la necesidad del corte total de la vía.

Estos seccionamientos se logran de diferentes maneras, principalmente dos y ambas se centran en el mismo concepto, fragmentar el hilo de contacto en diferentes secciones, las cuales, en el tramo de transición, se solapan permitiendo una segura transición de la conexión catenaria – pantógrafo de una sección a otra y garantizando una continuidad en el suministro eléctrico.

El primer tipo es el denominado seccionamiento de cantón y consiste en la fragmentación del cantón en tramos más pequeños con una zona común de solapamiento, para garantizar la correcta transición eléctrica de una sección a otra.

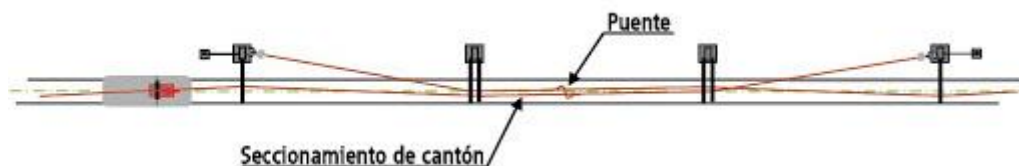


Figura 19: Seccionamiento de cantón y zona de solapamiento

El segundo tipo es algo más complejo y se denomina seccionamiento de lámina de aire. Su función consiste en aislar eléctricamente ambos tramos a la vez que mecánicamente. A diferencia de los seccionamientos de cantón, los de lámina de aire tienen la capacidad de aislar o interrumpir el paso de corriente de una sección a la siguiente, de esta forma, si el seccionamiento está cerrado y permite la continuidad eléctrica, este actúa como un seccionamiento de cantón. Debido a ello, suelen localizarse en las entradas y salidas de estaciones.

Una consideración a tener en cuenta es que debido a que este seccionamiento puede interrumpir la continuidad eléctrica, se debe tener en cuenta que donde se posicione este seccionamiento no debe haber ninguna ménsula que pase por encima de ningún cable que se encuentre en tensión una vez el seccionamiento se encuentre abierto. De esta forma se pueden evitar los accidentes de trabajo en caso de ruptura de alguna de las piezas del seccionador.

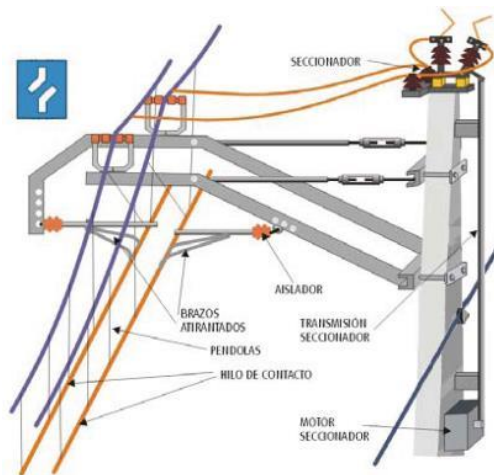


Figura 20: Sistema de seccionamiento por lámina de aire

3.2.6 Descentramiento

Este término ha sido mencionado con anterioridad en varias ocasiones, pero a continuación se desarrollará en profundidad debido a su gran importancia.

Como se ha mencionado anteriormente, el descentramiento hace referencia a la separación entre el hilo de contacto y la zona central de la vía del ferrocarril. La razón a la que se debe dicho descentramiento del hilo de contacto es para procurar conseguir una homogenización en el desgaste del pantógrafo. Si no se descentra el hilo de contacto, la fricción entre el hilo y el pantógrafo siempre se produciría en la zona media de dicho pantógrafo, causando un desgaste local y reduciendo notablemente el tiempo de vida útil del pantógrafo. Mediante el descentramiento, se provoca que la zona de fricción del pantógrafo se vaya alternando a medida que el tren recorre la vía.

Dicho descentramiento ha de conseguirse tensionando el hilo de contacto alternativamente a cada lado de la vía, lo que genera las fuerzas radiales en los postes que sostienen la catenaria. Cuanto más abrupto sea el cambio de dirección del hilo, mayor

será la fuerza radial que ha de soportar el poste. La variable condicionante a la hora de diseñar con mayor o menor descentramiento es la meseta del pantógrafo, que es la región del pantógrafo que puede mantener un contacto activo con la catenaria para la transmisión de potencia.

Una de las complicaciones es que este descentramiento no está generado únicamente por el diseño de los postes y la sujeción en zigzag. El viento también enfatiza esa distancia entre el eje central de la vía y el hilo de contacto.

En el caso de una vía recta, la deformada de un hilo por la aplicación de una fuerza puede representarse de la siguiente forma.

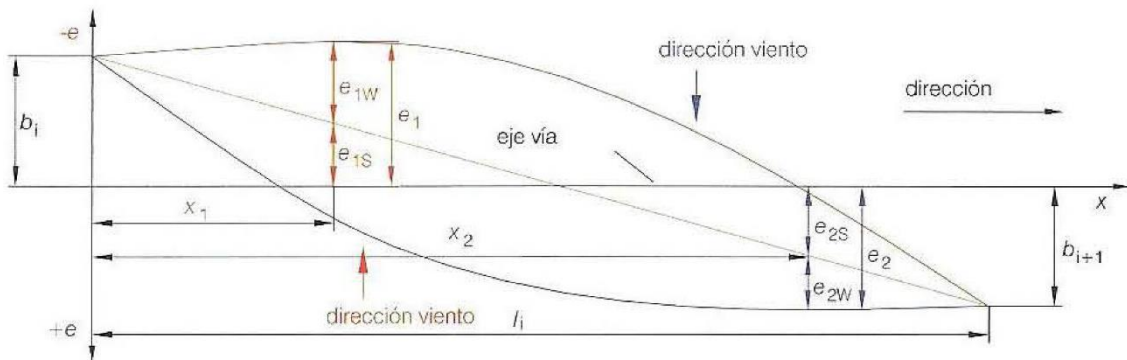


Figura 21: Deformación del hilo de contacto por la acción del viento

Como se observa en la figura anterior, la fuerza del viento provoca que el descentramiento máximo del hilo de contacto sea notablemente superior a la situación sin carga del viento.

Si se sustituye en la ecuación de la flecha de un hilo a la fuerza del viento, resulta la siguiente ecuación.

$$e_{2w} = F'_w * x_2 * \frac{l_i - x_2}{2 * H}$$

Ecuación 11: Flecha generada por el viento

Si al descentramiento intencionado del diseño de la catenaria se le suma el efecto del descentramiento generado por el viento se obtiene el descentramiento total de la catenaria.

$$e_2 = e_{2w} + e_{2s} = \left[F'_w * \frac{l_i - x}{2 * H} + \frac{b_{i+1} - b_i}{l_i} \right] * x + b_i$$

Ecuación 12: Descentramiento total de la catenaria

Derivando la ecuación e igualándola a 0 se obtiene cual es el punto en el que se produce el máximo descentramiento y cual es dicho valor resultado que

$$x_{max} = \frac{l_i}{2} - (b_i - b_{i+1})^2 * \frac{H}{F'_w * l_i}$$

Ecuación 13: Localización del punto con máximo descentramiento

Si se realiza la simplificación de descentramientos simétricos, lo cual suele ser habitual, se reduce la ecuación del descentramiento máximo a la siguiente expresión

$$e_{2max} = F'_w * \frac{l^2}{8 * H} + 2 * H * \frac{b^2}{F'_w * l^2}$$

Ecuación 14: Descentramiento máximo del hilo de contacto

En el caso de que la sección a analizar se encuentre en una curva, la aproximación al problema ha de hacerse de forma diferente y los cálculos son algo más complejos.

Capítulo 4: Análisis previo de localización e infraestructura actual

Una vez definidos los conceptos básicos y las principales cosas a tener en cuenta a la hora de los cálculos de la catenaria, se procederá a un estudio profundo de la localización concreta del tramo de la vía que va a sufrir modificaciones, así como del estado de la instalación actual y otras consideraciones.

4.1. Estudio del terreno

El tramo a examinar se encuentra situado en la localización de Reino Unido y conecta las estaciones de Clapton con Tottenham Hale y Sant James Street. Mas en detalle, este tramo en concreto es el lugar en el que se produce la bifurcación de la línea saliente de Clapton hacia ambas estaciones mencionadas anteriormente.

Las coordenadas de la localización son $51^{\circ}34'03.9''N$ $0^{\circ}03'04.0''W$, se sitúa una primera parte del tramo de la vía en una zona urbana, mientras que la parte de la bifurcación atraviesa una zona no edificada cercana a Walthamstow Marshes.



Figura 22: Vista aérea de la localización

Analizando la vista aérea de la [Figura 22](#) se observa, que la línea presenta algunas particularidades. Se sitúa atravesando el río Lea mediante un puente de más de 150 años de antigüedad, por lo que podría dificultar la colocación de nuevas estructuras en dicha zona y debe ser un dato a considerar en el futuro rediseño.

Adicionalmente, se puede determinar, que en la zona siguiente al puente se mantiene presente el desnivel entre la altura de la vía y la altura del suelo en las proximidades debida a la prolongación del puente anterior hasta la unificación de alturas del terreno. Esta longitud, que comprende desde el inicio del puente hasta retomar una zona de la vía

no elevada respecto del suelo en sus proximidades, consta de aproximadamente 120 metros.



Figura 23: Vista detallada del puente y elevación del terreno

4.2. Climatología

Respecto a la climatología, es de interés el análisis de la variación de temperaturas a lo largo del año en dicha zona, al igual que el estudio de las precipitaciones y de las rachas de viento que se dan en la localización y pueden afectar a los cálculos del diseño de la catenaria.

En lo que respecta a las temperaturas, al encontrarse en la zona central de Europa en cuanto a su latitud, observamos un clima bastante cambiante, aunque no llegan a darse temperaturas extremas. Los veranos suelen ser cálidos, mientras que los inviernos son frescos. La temperatura media a lo largo del año ronda los 20°C, con máximas de no más de 29 °C y mínimas que no suelen sobrepasar los -1°C. En la siguiente imagen, se puede observar la evolución de las temperaturas máximas y mínimas de la zona a lo largo del año.

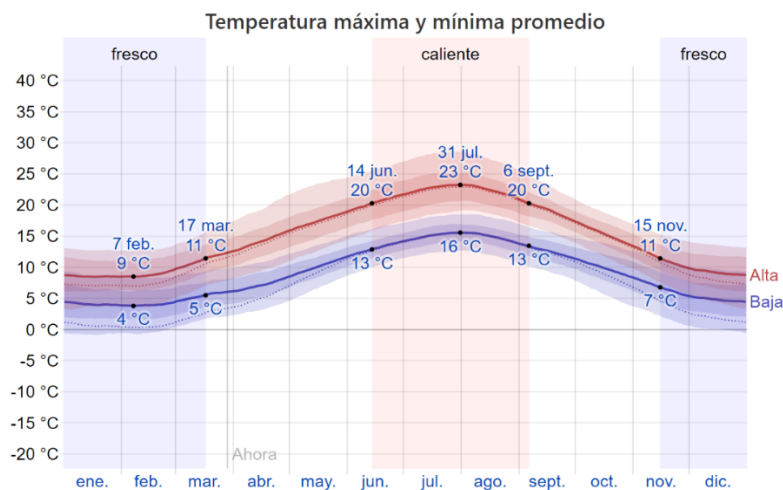


Figura 24: Estudio de la variación de temperaturas procedente de Weather Spark

Respecto a las precipitaciones, son bastante comunes e intensas, adicionalmente, no se localizan en ningún periodo estacional en concreto, aunque si se puede llegar a notar cierta subida en los últimos y primeros meses del año, correspondiendo con la época invernal y fría.

Precipitación de lluvia mensual promedio

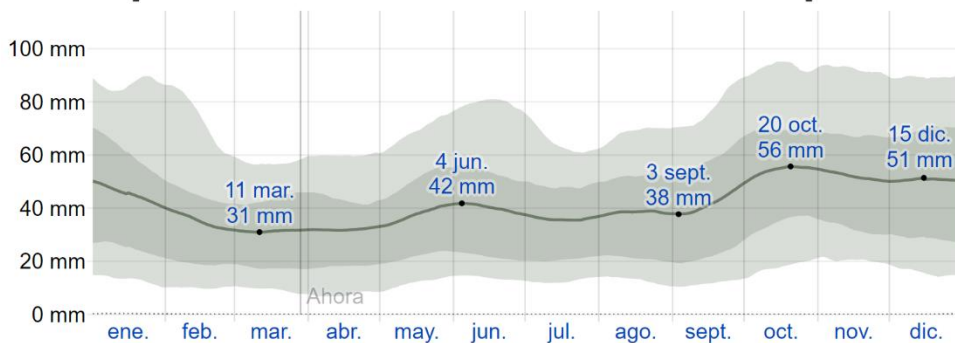


Figura 25: Gráfico de temperaturas promedio de Weather Spark

Finalmente, observando las graficas referentes al viento, se puede constatar que las rachas de viento no son demasiado agresivas en ninguna época del año. De todas formas, se observa un repunte en dichas velocidades en la estación invernal, llegando a velocidades superiores a los 20 Km/h. Durante el resto del año se mantienen mas o menos estables, llegando a valores mínimos en la época del verano con velocidades de 15 Km/h.

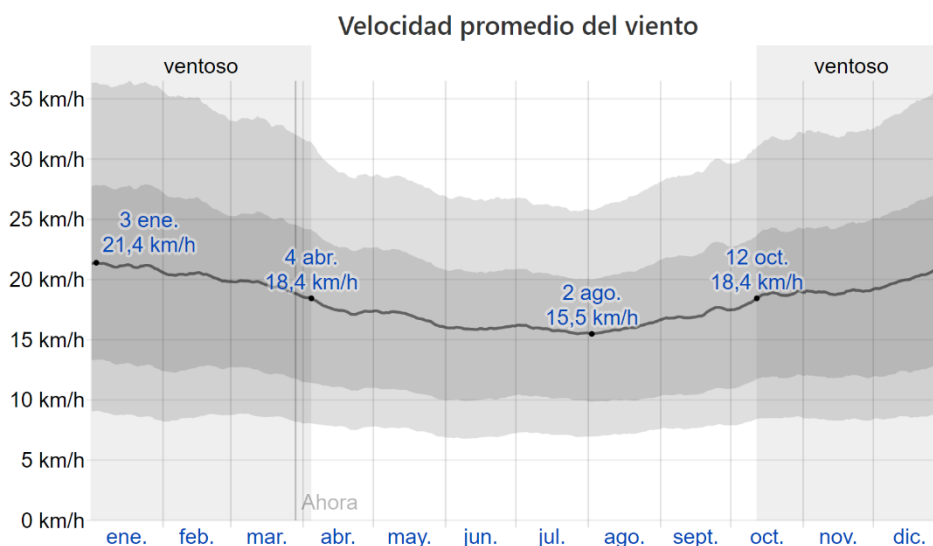


Figura 26: Gráfico de la variación de la velocidad del viento a lo largo del año de Weather Spark

4.3. Análisis de la catenaria actual

Previamente al comienzo del rediseño, se deberá observar el tipo de vía en la que se encuentra el tramo a modificar, así como la tecnología empleada en la vía, la normativa que se ha aplicado y los componentes actuales que forman la catenaria, con el fin de crear una adaptación lo mejor posible a la infraestructura actual.

Según la terminología del plano de la instalación, se observa que el tramo a analizar comienza en la estructura denominada C/04/17 prolongándose hasta la estructura C/04/43 en sentido Tottenham Hale y hasta la CH/04/08 en sentido Chingford (Sant James Street).

Se puede observar que en esta catenaria hay presentes algunos elementos de los mencionados anteriormente. Se trata de una catenaria con un hilo de contacto, un hilo sustentador unido al de contacto mediante una serie de péndolas y se destaca que no es una catenaria compensada. Ni el hilo de contacto ni el sustentador se encuentran compensados, ya que no vemos la presencia de ningún tipo de sistema de compensación a lo largo de la vía. Esto se puede deber a la antigüedad de la catenaria de esta vía.

En lo referente a las estructuras de sujeción de la catenaria, predominan los pórticos rígidos, con presencia de algún poste simple en el caso de los cambios de carril y de la línea en dirección Tottenham Hale.

Respecto a las ménsulas, son ménsulas tubulares que presentan tanto atirantados hacia dentro como hacia afuera con los pertinentes aisladores en las uniones entre las ménsulas y los postes o pórticos. También se observan varias ménsulas dobles en las secciones de cruces, capaces de sustentar dos hilos de contacto mediante un único poste.

Se puede apreciar también la presencia del cable de retorno, unido a cada uno de los postes, pero no está presente ningún tipo de feeder de acompañamiento, por lo que esto puede dar una indicación de que dicha línea no requiere una gran cantidad de potencia que deba ser transmitida al ferrocarril.

En el plano se aprecia que los cálculos de la catenaria actual están calculados para una velocidad de viento de unos 26 Km/h, lo que concuerda con el análisis realizado en la sección [4.2 Climatología](#), aplicando un factor de seguridad en caso de elevarse dicha velocidad en algún momento puntual.

Respecto a las longitudes de los vanos, se observa que se encuentran entorno a los cuarenta o cincuenta metros, registrando una distancia máxima de sesenta y dos metros, dicho cantón se sitúa en la zona de modificaciones, entre las estructuras C/04/24 y C/04/25, por lo que podría causar alguna problemática posteriormente.

En este análisis preliminar también cabría destacar que los cables a modificar serían los encargados de alimentar los dos cambios de carril, estos son los cables denominados por las letras B y D. Se resalta que el cable D es el encargado también de alimentar la continuación de la vía en dirección Tottenham Hale, por lo que su deshabilitación para el desvío podría ser más compleja.

Capítulo 5: Modificaciones propuestas de la catenaria

5.1. Modificaciones necesarias para la deshabilitación del primer desvío

El primer cambio de carril está alimentado por el cable B y se encuentra aislado del resto de la catenaria, como se puede observar en el plano de la infraestructura según se señala en la [Figura 27](#). El comienzo del cable B se encuentra anclado en el pórtico C/04/20 y finaliza anclado en el pórtico C/04/24. Estas estructuras, como viene a ser habitual según la normativa inglesa, son las anteriores y posteriores al comienzo y el final del desvío.

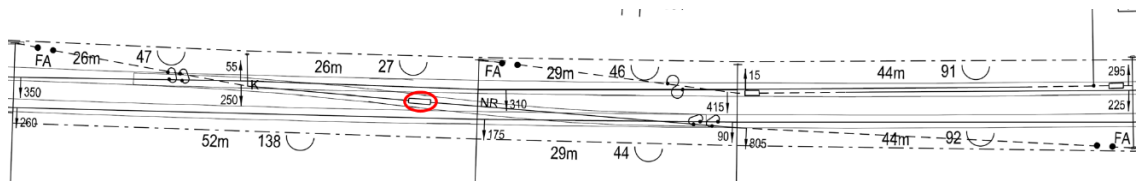


Figura 27: Detalle del cable B con aislador

Al realizar un cambio de seccionamiento o para alimentar un desvío, el cable debe comenzar por lo menos una estructura antes del inicio del desvío. A lo largo de dicha distancia el cable se baja, aproximándose a la altura del hilo de contacto de la catenaria, solapándose durante una distancia determinada. De la misma forma, durante la retirada se va subiendo progresivamente hasta que deja de estar en contacto con el pantógrafo y se ancla a la estructura siguiente después de la finalización del desvío o del cambio de seccionamiento.

Antes de entrar en contacto el cable B con el pantógrafo, se debe garantizar que se encuentra al mismo potencial que el hilo de contacto actual de la vía, es decir, el cable A. Esto se realiza para asegurar un comportamiento eléctrico correcto en la zona de solapamiento de ambos cables. Como se va a retirar el cable B para no alimentar el desvío, estos cables equipotenciales deberán ser eliminados. Adicionalmente, estos equipotenciales no solo se encargan de igualar el potencial de ambos cables, sino que también poseen la función de transmitir corriente entre ellos, alimentando de esa forma el cambio de sentido.

A continuación, se sitúa la estructura C/04/21 formada por una ménsula doble, que atiranta tanto el cable A como el B. El atirantado se realiza hacia el centro de la vía, ya que se prioriza el atirantado del cable B frente al cable A. Esto es justificado mediante el análisis de las fuerzas radiales generadas por los cables. Al estar el cable B incorporándose a la vía, el ángulo formado por dicho cable es mucho más acusado que el formado por el cable A, por lo que las fuerzas de atirantado son mayores. Si el cable no presenta una diferencia de ángulo entre la entrada y la salida de la ménsula, es decir, forma 180 grados, las tensiones a las que está sometido el cable son compensadas y no se produce ninguna fuerza radial.



Figura 28: Ángulo del atirantado del cable B



Figura 29: Ángulo del atirantado del cable A

Una vez se retire el cable B, se deberá retirar la placa de contacto cruzado, situada en la intersección entre los cables A y B. Esta tecnología permite unir el cable principal (Cable A) con el del desvío (Cable B). Se posicionan ambos cables dentro de la placa de metal, estando el cable de contacto debajo del que alimenta el desvío. Esta tecnología está en desuso y actualmente solo se puede emplear en líneas cuya velocidad es inferior a los 160 Km/h. También se deberá sustituir el brazo de atirantado por uno de mayor longitud ya que, observando las figuras anteriores, el cable atirantado por el brazo es el cable B, mientras que el A es sujetado por un knuckle, que deberá ser retirado junto con el cable B, obligando a prolongar el brazo de atirantado para que llegue hasta la posición del cable A tras la realización de la modificación.

La próxima estructura, la C/04/22, está formada por un pórtico rígido que sustenta los cables A, B y F. Adicionalmente, también se encuentra anclado el cable C, que será encargado de sustituir al cable A en el siguiente seccionamiento.

En esta estructura simplemente se necesitará retirar los elementos de sujeción y aislamiento relativos al cable B, ya que todos los cables deben estar aislados a las estructuras que los soportan. Cabría destacar la presencia del aislador de sección, que se visualiza cercano a la estructura. Esto es empleado para poder aislar eléctricamente ambas partes del desvío. Se basa en sustituir los cables, tanto hilo de contacto como sustentadores, por barras de vidrio que actúan como aisladores. Para proseguir con el suministro eléctrico, se emplean unas extensiones metálicas que entran en contacto con el pantógrafo cuando este atraviesa esta sección.



Figura 30: pórtico C/04/22. Aislador de sección señalado en rojo

Continuando con la siguiente estructura, la C/04/23, se vuelve a observar la palca de contacto cruzado, en este caso con el cable F perteneciente al otro lado del desvío. Una vez se retire el cable B, se deberá también retirar este elemento. Respecto al aislador, se observa cómo se unen los cables B y F eléctricamente mediante una barra de hierro, la cual es adecuadamente aislada en su sujeción con el pórtico. Este aislamiento también deberá ser modificado por un aislamiento convencional simple.

Observando el plano de la [Figura 27](#), se puede detectar también la presencia de cables equipotenciales con capacidades de transmisión de corriente, para asegurar la correcta conexión del cable B con el cable F en la zona de contacto. Estos elementos también deberán ser retirados en la modificación.



Figura 31: Pórtico C/04/23, marcado en rojo el aislador doble

Finalmente, se analiza la última estructura que posee relación con el cable B, la C/04/24. Este último tramo que recorre el cable, lo hace de tal forma que no está en contacto con el pantógrafo. Esto se debe a que paulatinamente, la altura del cable B se va elevando, dejando al cable F como único cable en contacto con el pantógrafo y por lo tanto el cable B finalizará en esta estructura mediante un anclaje fijo.

Al retirar dicho anclaje fijo no supone ningún problema de descompensación respecto a la estructura, ya que es un pórtico rígido y se podría retirar sin mayor problema.

5.2. Modificaciones necesarias para la deshabilitación del segundo desvío

El segundo desvío es algo más complejo que el primero, ya que sus cables no alimentan únicamente el cambio de carril, sino que prosiguen alimentando los carriles en dirección a Tottenham Hale.

Se comenzará primero con el análisis del cable D, es decir, el de dirección down Cambridge según es indicado en el plano de la siguiente figura.

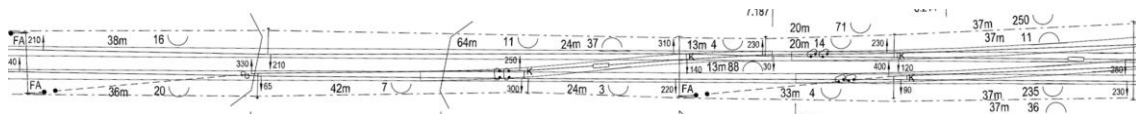


Figura 32: Detalle del cable D

El inicio de este cable comienza en la estructura C/04/25 y se encuentra anclado en la parte derecha del pórtico. La eliminación de este anclaje, al igual que los vistos en el estudio del cable B, no supondrán ningún problema de desequilibrio en las estructuras, ya que son pórticos rígidos las estructuras a los que se encuentran anclados los cables mencionados.

Prosiguiendo hacia la siguiente estructura, la C/04/26, se dejan de observar pórticos rígidos y en su lugar son sustituidos por postes simples situados uno a cada lado de la vía. Esto es debido a que, a partir de este punto, la vía se encuentra sobre el puente mencionado en la sección 4.1 Estudio del terreno. En este tipo de estructuras, si se podría tener un mayor peligro a la hora de quitar sujeciones fijas de cables, ya que no son tan rígidas como los pórticos y las tensiones de los cables suponen una gran carga sobre ellos.

En esta estructura, se puede observar como el cable empieza a entrar en contacto con el pantógrafo y comienza la fase de solapamiento de los cables D y F. En cuanto a la ménsula, es un ménsula simple, a diferencia de la doble que se observaba en la estructura C/04/21, pero se emplea uno de los perfiles tubulares de la ménsula para sujetar el cable D. Debido a esto, en la retirada del cable D no sería necesario modificar la ménsula.

También se necesitará retirar el cable equipotencial que une los cables D y F. Esta estructura se puede observar a la derecha de una figura posterior, la Figura 42.

La próxima estructura, la C/04/28, si requerirá alguna modificación a la hora de la retirada del cable D ya que, a diferencia de la anterior, esta posee una ménsula simple para atirantar ambos cables, pero con la presencia de un knuckle que sustenta el cable D en cuestión. Este knuckle será retirado junto con el cable. También observamos dos cables equipotenciales con capacidad de transmisión de corriente, los cuales no serán necesarios posterior a la retirada del cable D. De igual forma que la anterior, esta estructura se visualiza en una figura posterior del proyecto, la Figura 48.

Previo a la siguiente estructura, se localiza el aislador de sección observado en el anterior cambio de carril. Este también deberá ser retirado junto con el cable, ya que en la nueva función del cable D no se conectarán los carriles de ambos sentidos, por lo que no será necesario dicho aislamiento. Este aislador es del mismo tipo que el localizado en la Figura 30.

Respecto a la C/04/29, se vuelve a retomar la presencia de pórticos rígidos para ambos sentidos de la vía. En este caso se observa el anclaje del cable G, que alimentará la otra dirección de la vía de Tottenham Hale. A partir de este tramo, la modificación de la catenaria no se basará en la retirada de los elementos prescindibles, ya que se ha deshabilitado el cambio de carril y el nuevo desafío reside en modificar la estructura actual para acondicionar correctamente el cable D a su nueva función. Este pórtico se visualiza en la Figura 38.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Capítulo 6: Propuestas de diseño

En este capítulo se debatirán las diferentes propuestas de diseño analizadas para el rediseño de la catenaria en el segundo cambio de carril. Se analizarán todas las propuestas, tanto las intermedias como la solución final y se procederá seguidamente con la explicación del diseño y una justificación o aclaración sobre la validez de dicha propuesta.

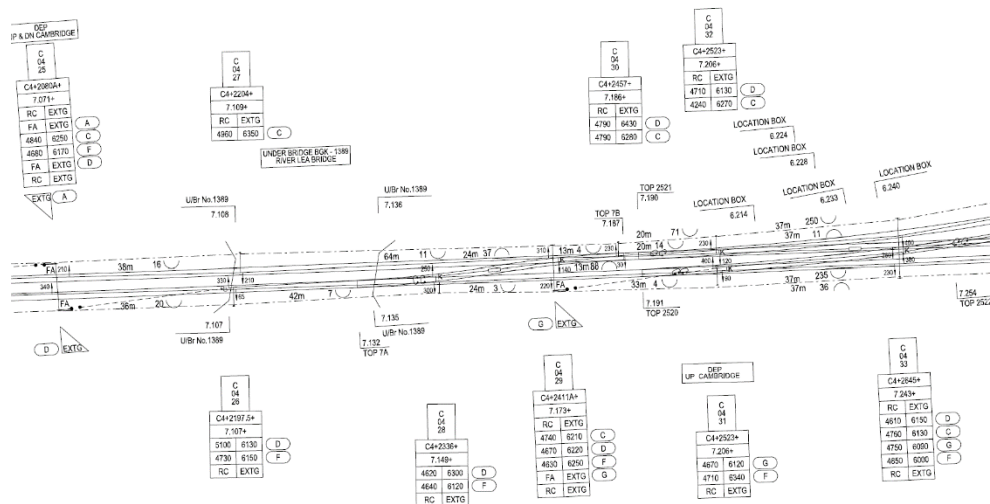


Figura 33: Plano de la zona de detalle

6.1. Propuesta número 1

Esta primera aproximación se observa desde la perspectiva del cable D. Este cable nace en la estructura C/04/25 y es el encargado de alimentar el cambio de carril, el cual queremos eliminar, por lo que para su nueva función no hay ninguna motivación para que dicho cable comience su recorrido en esta estructura.

Si analizamos la estructura C/04/25, se observa que se trata de un pórtico rígido, en el cual están anclados dos cables, el final del cable A, anclado al lado izquierdo del pórtico, y el comienzo del cable D, anclado al lado derecho. Esto se puede observar en el detalle del plano de la [Figura 33](#), donde en el recuadro referente a dicha estructura observamos las letras FA en los cables A y D. Dicha designación proviene del inglés y su nomenclatura indica “Fixed Anchor” o anclaje fijo.

Se observa que, en el lado derecho, la carga generada por la tensión del cable D no está compensada por ningún otro cable previo a la estructura, por lo que el desanclaje del cable D de la estructura C/04/25 puede realizarse sin ningún problema que afecte al equilibrio de fuerzas de la estructura.

Se puede observar en la imagen siguiente de la estructura en cuestión, que la carga generada por la tensión del anclaje del cable D es soportada por un tirante que trabaja a compresión y es el encargado de evitar la caída del pórtico debido a dicha fuerza. De forma análoga se localiza el mismo mecanismo empleado al lado izquierdo para el cable A.



Figura 34: Pórtico C/04/25 con tensores para soportar anclajes

Una vez retirado el cable D de su estructura original, en esta propuesta se ha planteado su posible anclaje en la estructura C/04/29. Se ha tomado esta estructura, ya que es el pórtico más cercano a la zona del desvío y siempre es recomendable realizar los anclajes de los cables a pórticos en vez de a postes simples, ya que los pórticos aportan un extra de rigidez y son capaces de soportar mayores cargas frente a postes simples.



Figura 35: Estructura del anclaje para la opción 1

Una vez anclado a este pórtico, se proseguiría con la trayectoria en zigzag habitual pasando por las estructuras C/04/30, C/04/32 y siguientes quedando de la siguiente forma.

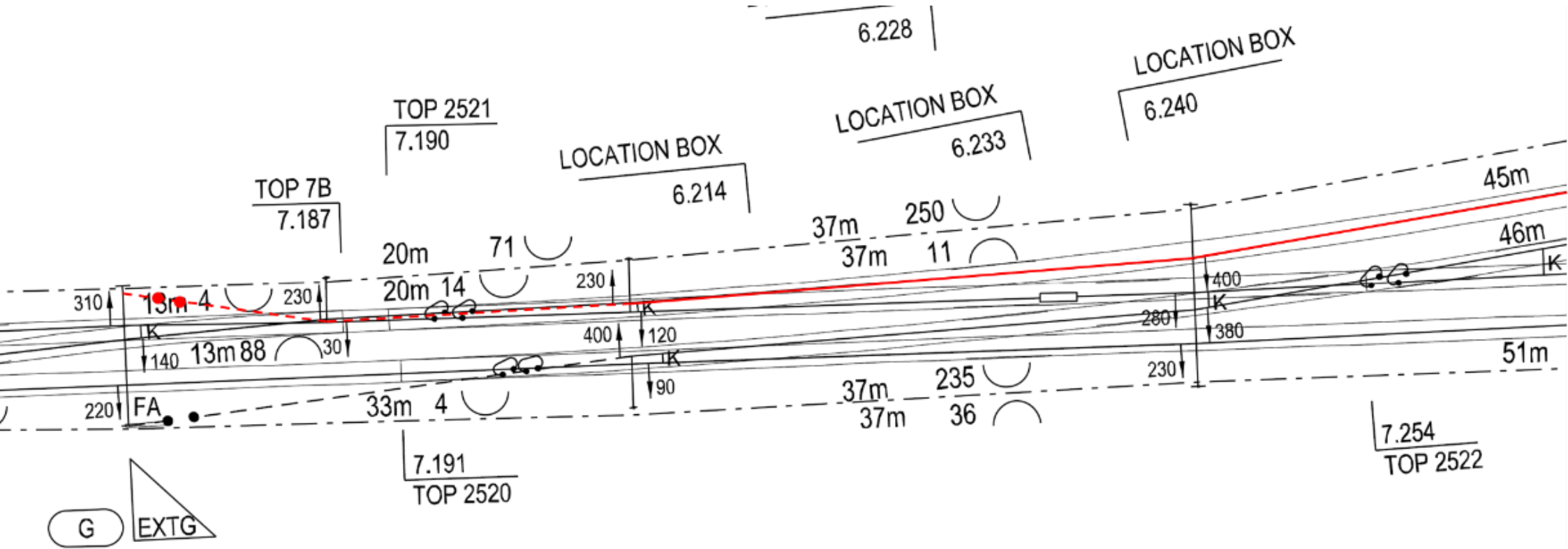


Figura 36: Plano de la instalación de la propuesta 1

Se observa como el cable no entra en contacto con el ferrocarril hasta que se produce el inicio del desvío en la estructura C/04/32.

Esta disposición puede ser la más intuitiva a la hora de abordar un rediseño como este, pero no puede ser factible, ya que presenta algunos inconvenientes. Se puede destacar que el primer vano que forma el cable D es notablemente menor respecto a las distancias medias que puede medir un vano, que suelen encontrarse entre los 35 y 50 metros. Esto no sería mayor inconveniente en caso de tratarse de un vano intermedio perteneciente a un cantón, siempre y cuando la transición de vanos largos a vanos más cortos se realice de forma progresiva para no afectar a la dinámica de la catenaria, pero en esta disposición, este vano constituye el inicio del cable D, lo que genera grandes problemas respecto a las fuerzas de atirantado.

Como se comentó en la sección 3.2.1 Esfuerzos en los brazos de atirantado, cargas horizontales, las zonas de anclajes de nuevos hilos o de seccionamientos son especialmente peligrosas debido a los ángulos cerrados generados por los hilos de contacto que se incorporan a la vía. Si a este fenómeno se le añade una corta distancia de aproximación desde el extremo del pórtico, donde se sitúa el anclaje, hasta la zona media de la vía, donde debe localizarse el cable en su estado de funcionamiento, obtenemos un ángulo aún más acusado, generando fuerzas de atirantado en la ménsula de sujeción mucho más grandes.

Para evitar estas fuerzas, se planteó una ligera modificación a esta propuesta de diseño que consistía en puentear la estructura C/04/30 y realizar la primera sujeción del cable en la siguiente estructura. Esto puede ser viable, ya que el hilo de contacto no entra en contacto con el pantógrafo hasta entonces y por lo tanto no es imprescindible la presencia de este en la vía en la estructura previa. Con esta modificación, no solo se reducen las fuerzas de atirantado en los postes, sino que también se respeta más adecuadamente la progresión de las longitudes de vanos consecutivos. Realizando dicha modificación, el plano de la sección quedaría de la siguiente forma.

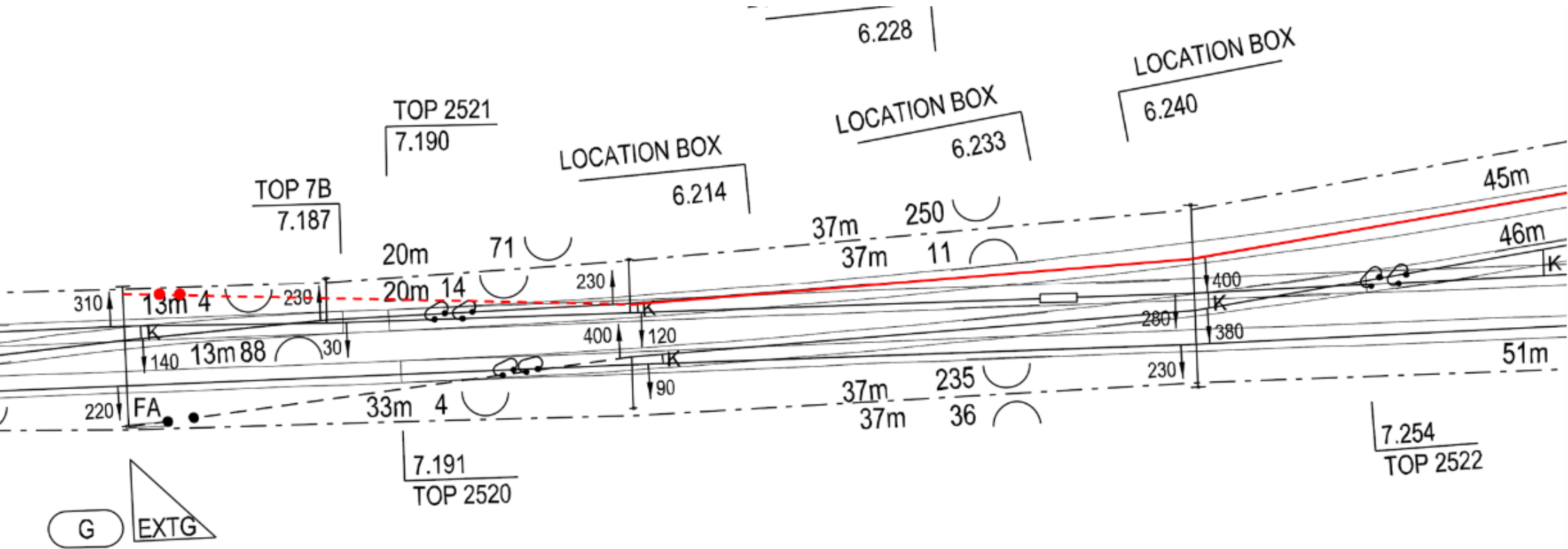


Figura 37: Plano de la instalación de la modificación de la propuesta 1

Como se puede apreciar, el ángulo en la estructura C/04/32 es considerablemente menor que en el caso anterior, resolviendo el problema de las fuerzas de atirantado, sin embargo, mediante esta opción no se consigue resolver otro problema que se localiza en la estructura de anclaje.

Mediante la fotografía siguiente, en la que se representa la estructura C/04/29, observamos en el lado derecho el anclaje del cable G con su respectivo tensor colocado para trabajar a compresión. Por el contrario, el lado izquierdo no presenta dicho tensor, por lo que habría que construir uno nuevo y posicionarlo en dicha estructura. Esta estructura está localizada en el puente de la vía, por lo que no se podría cimentar el tensor correspondiente en el suelo y debería ser cimentado en otro lugar, siendo el único posible el interior del puente. Debido a esto, esta modificación también será descartada.

Este puente no puede ser modificado debido a su gran antigüedad e inestabilidad respecto a nuevas modificaciones, ya que en su interior ya presenta algunas cimentaciones de otros elementos de la vía y podría suponer un peligro realizar más modificaciones en su estructura interna pudiendo llegar a colapsar.



Figura 38: Estructura C/04/29 con tensor en lado derecho

6.2. Propuesta número 2

Una vez analizadas las propuestas referentes al anclaje del cable D en el lado izquierdo del pórtico C/04/29, se procede al estudio de su anclaje en otras estructuras. El cable debe entrar en contacto con el pantógrafo en la estructura C/04/32 o en una estructura anterior, ya que el desvío comienza pasada dicha estructura. Debido a este motivo, la primera alternativa sería el anclaje en la C/04/30.

Esta estructura está formada por un poste simple, en la que hay presente una ménsula, que posee dos brazos de atirantado para el posicionamiento de los cables C y D. En caso de anclar el cable D a este poste, se debería eliminar el brazo de atirantado referente al cable D, quedando únicamente una ménsula simple con un único brazo de atirantado. Esto podría ser factible, ya que el brazo eliminado no ejerce ninguna función de contrapeso o equilibrio de fuerzas en la estructura.



Figura 39: Poste de la estructura C/04/30

Observando la [Figura 39](#), otra de las modificaciones a realizar en esta estructura para la validez de este diseño debería ser el reemplazo del poste por un poste mucho más robusto al que se denomina como “self-supporting anchor” y este sería el impedimento que obliga a que esta idea de diseño no pueda ser aplicada.

Siempre que se quiera anclar un cable a una estructura, dicha estructura debe complementarse con un tirante que retenga parte de la tensión del hilo a anclar. Como se ha observado, esta zona dificulta en gran medida la incorporación de dicho tensor, por lo que la única alternativa sería la de reemplazar el poste por otro cuya resistencia flexión sea mucho mayor.



Figura 40: Poste con posibilidad de anclaje sin tensor

Estos postes se consiguen mediante la orientación del perfil de viga empleado, o mediante la composición de la viga por varios perfiles soldados. El inconveniente de dicho nuevo poste reside en que, para su incorporación se debería instalar una nueva cimentación, mucho más robusta para la adecuada sujeción del poste, lo que nos obligaría a retirar la cimentación instalada actualmente en el puente y reemplazarla por una mucho mayor, haciendo esta opción inválida para el proyecto.

Una vez analizadas las estructuras C/04/30 y C/04/29, se llega a la conclusión de que el cable D debe situarse en una estructura anterior al comienzo del puente, ya que cualquier estructura que se localice en el puente debería sufrir algún tipo de modificación en cuanto a su cimentación o tensores en caso de anclar el cable a dicha estructura, volviendo de nuevo al problema actual.

Esto lleva a descartar todas las estructuras posteriores a la C/04/25, por lo que la siguiente propuesta de diseño se realizará sobre dicha estructura.

6.3. Propuesta número 3

Observando la estructura C/04/25, que es la última antes de comenzar el puente, se trata de un pórtico rígido sobre el cual se encuentra anclado actualmente el cable D, encargado de alimentar el cambio de carril. Esta propuesta de diseño consiste en cambiar el lado del anclaje, pasando el anclaje del cable del lado derecho del pórtico al lado izquierdo.

Esta modificación respecto al pórtico no solo reduce la torsión que sufre el pórtico, sino que también aprovecha la cimentación del tensor colocado en el lado izquierdo, para ahora soportar las fuerzas de anclaje de los cables D y A.



Figura 41: Estructura C/04/25

Una vez realizadas las modificaciones de la estructura C/04/25, se deberán analizar los cambios a realizar a lo largo del resto de estructuras hasta llegar al desvío para considerar la viabilidad de esta decisión.

Respecto a las próximas estructuras, la C/04/26 y la C/04/27, se deberían alternar y modificar los brazos de las ménsulas. El brazo de la estructura C/04/26 pasaría a ser un brazo simple encargado de sustentar un único hilo, mientras que la estructura C/04/27 debería modificar su brazo a uno doble para añadir la sujeción del nuevo hilo D. Este nuevo brazo deberá ser como el observado en la estructura C/04/26, el cual soporta ambos hilos con un único brazo de atirantado. Esta disposición se ha elegido para evitar los momentos torsores en las ménsulas desarrollados en el capítulo 3.2 Características mecánicas. Mediante esta disposición, ambos hilos se encuentran alineados con el poste. También se podría optar por la sujeción del segundo cable mediante un knuckle en caso de querer mantener ambos cables a la misma altura y que ambos estén en contacto con el pantógrafo.

Otra de las modificaciones a realizar sería intercambiar de lado, junto con el hilo de contacto D, los equipotenciales. En este nuevo diseño, dicho equipotencial debe conectar los cables D y C para asegurar una buena transición eléctrica en la zona en la que el cable D entra en contacto con el pantógrafo y se eviten saltos de potencial en ambos hilos.

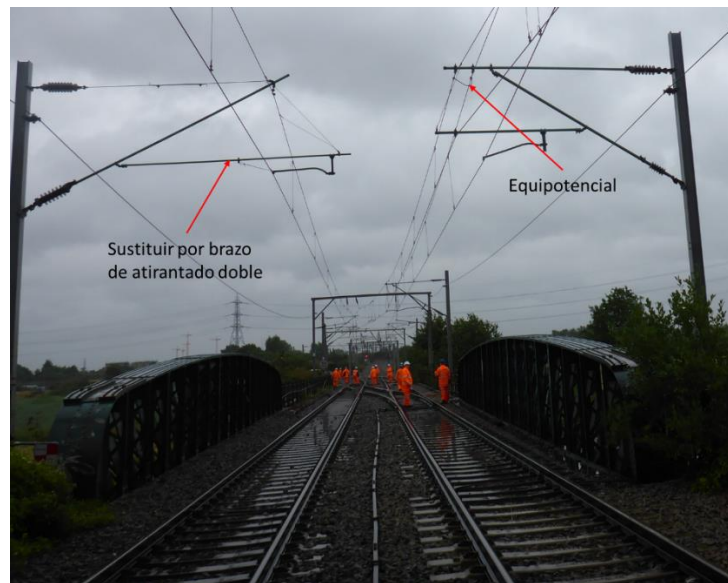


Figura 42: Estructuras C/04/26 y C/04/27 con las modificaciones necesarias

Este cambio se podría hacer, ya que mediante un análisis acerca de ambas estructuras y sus respectivas cimentaciones en el puente, se observa que son idénticas, por lo que, si en el pasado la estructura C/04/26 soportaba tanto el hilo de contacto D, que alimentaba el cambio de carril, como el hilo de contacto F, no hay ninguna indicación que impida que sea ahora la estructura C/04/27 la que soporte dos hilos. Estas justificaciones vienen recogidas en la normativa *NR/L2/CIV/073 Level 2 - Design of Overhead Line Structures*, más en concreto en la sección *B.6 Existing structures [Cl 6.2]*. En esta sección se analiza la posibilidad de que, al comprobar la resistencia a soportar las nuevas cargas de una estructura antigua, dicha estructura falle y el resultado sea negativo. En dicho caso, se podrán plantear diferentes aproximaciones que justifiquen que dicha estructura es capaz de soportar las fuerzas. Entre las diferentes justificaciones alternativas se encuentra, por ejemplo, realizar el cálculo de las fuerzas con un estado tensional límite real, en vez de emplear las características límites del material, realizar un estudio preciso a cerca del posicionamiento exacto de las cargas del viento u otro tipo de esfuerzos, en vez de trabajar con el caso más desfavorable u optar por emplear la normativa que estaba presente en el momento en el que se realizó la instalación de dicho poste, en vez de emplear las últimas versiones.

En la siguiente figura se observan los planos facilitados por National Records Group NRG referentes a ambas estructuras, en la que se puede determinar como el perfil y la longitud de los postes son idénticos a ambos lados del puente.

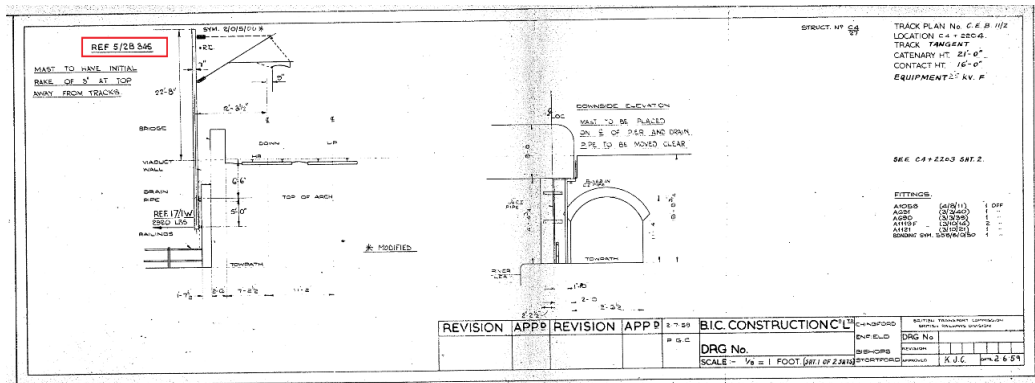


Figura 43: Plano de la estructura C/04/26

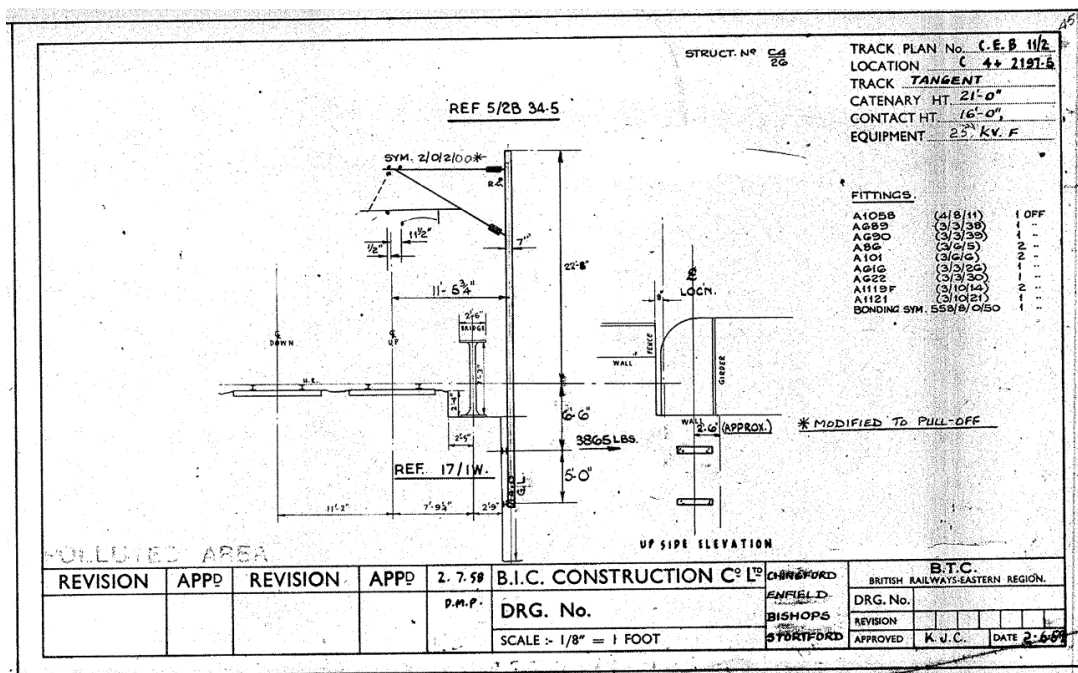


Figura 44: Plano de la estructura C/04/27

Respecto a la estructura C/04/28, se deberá eliminar el knuckle que permite la sujeción del hilo D, ya que pasaría a estar en el otro lado de la vía, quedando la ménsula de esta estructura como una ménsula simple, atirantando únicamente el hilo de contacto F. Esta estructura se puede observar más adelante en detalle en la [Figura 48](#).

Mas adelante, se llega al pórtico analizado en la sección [6.1 Propuesta número 1](#), sobre el cual no habría que realizar modificaciones, ya que, según la disposición actual antes de deshabilitar el cambio de carril, el cable D ya se encuentra en el lado izquierdo de la vía a dicha altura.

La única modificación que se debería hacer hasta llegar a la estructura C/04/32, en la que comienza el desvío, sería el salto de la estructura C/04/30. Esto se ha propuesto anteriormente para disminuir las fuerzas radiales de atirantado que sufre el poste, pero en este caso se propone por otro motivo.

Para garantizar una adecuada dinámica de la catenaria a lo largo de toda la vía, los cambios deben ser lo más progresivos posibles para evitar alteraciones bruscas en cualquier parámetro, entre los que se encuentra la longitud del vano.

Una variación en la longitud de un vano al siguiente demasiado grande puede ocasionar una mala dinámica de la catenaria, dando lugar a despegues del pantógrafo y pérdidas en la transmisión de potencia. Debido a esto, se decide que el cable D no debe anclarse en la estructura C/04/30, permitiendo una transición más adecuada de longitudes de vanos consecutivos. Realizando esta modificación se obtiene un vano de 64 metros, seguido de uno de 33 metros y el siguiente de 37 metros. De la otra forma, las longitudes de los vanos variarían de 64 metros a 13 metros seguido de 20 metros y de 37.

Al no pasar el hilo de contacto D por la estructura C/04/30, se debería eliminar la ménsula doble de la que dispone actualmente, ya que solo sustentaría uno de los hilos de contacto.

Con las modificaciones expuestas en esta sección, el hilo de contacto quedaría de la siguiente forma en el plano de la instalación.

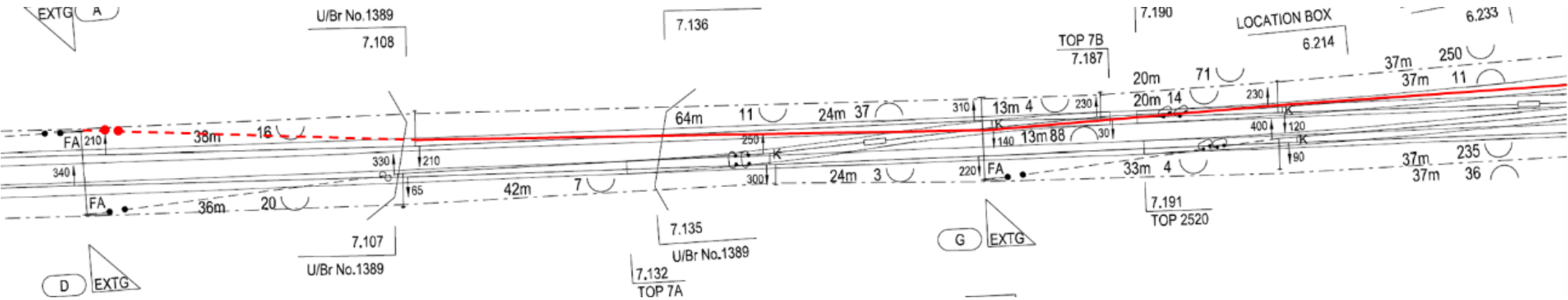


Figura 45: Plano de la instalación de la modificación de la propuesta 3

6.4. Propuesta número 4

En el caso de que la estructura C/04/27 no pudiese soportar la carga del hilo D adicional o en caso de querer tener una mayor certeza a cerca de la resistencia de dicha estructura, se podría plantear una nueva alternativa. En la propuesta anterior, se depende completamente de que la estructura C/04/27 pueda soportar sus nuevas cargas, pero la certeza de dicha afirmación está condicionada, ya que se trata de una estructura antigua que deberá validarse según la alternativa de estructuras existentes, ya que no cumpliría los requisitos para satisfacer la normativa que se exige a las nuevas estructuras.

También habría que tener en cuenta el estado de dicha estructura, ya que, aun siendo la misma, ha podido ser más dañada con el paso del tiempo y sufrir ciertos deterioros como una mayor oxidación del material, mayor fatiga debido a cambios de temperaturas u otros fenómenos ambientales, que reduzcan la durabilidad y resistencia del material frente a las cargas.

Para reducir lo máximo posible la carga en dicha estructura, el menor estado tensional del poste es no aguantar ningún hilo de contacto adicional, lo cual se ha observado que no es factible, debido a que el resto de las estructuras posteriores no pueden ser modificadas notablemente debido al puente en el que se encuentran. Una vez determinado esto, el siguiente estado tensional de menor carga reside en que la estructura C/04/27 sea una estructura intermedia del cantón. Al ser una estructura intermedia, no soporta las grandes fuerzas de atirantado generadas por el ángulo formado por el hilo de contacto en la primera estructura del cantón. Esto se puede observar en la [Figura 28](#) y [Figura 29](#)

Para poder realizar dicha modificación, se deberá retrasar nuevamente una estructura más el anclaje del hilo de contacto D, siendo la nueva estructura de anclaje la C/04/24.



Figura 46: Estructura C/04/24

Esta estructura está formada por un pórtico rígido, lo que permite el anclaje del hilo de contacto de una forma segura, mediante la instalación de los tensores en el lado izquierdo del pórtico, donde se realizaría el anclaje.

Prosiguiendo a la siguiente estructura, que se puede observar en la Figura 41, se debería modificar el brazo de la izquierda, de tal forma que sea un brazo doble capaz de sustentar ambos hilos de contacto, al igual que los de las siguientes estructuras hasta la C/04/32, momento en el cual se produce el desvío de ambos hilos de contacto.

De esta forma, se consigue una menor carga en la estructura C/04/27, pero requiere de mayor número de modificaciones, ya que el hilo de contacto D pasa por un mayor número de estructuras que deberán ser modificadas.

También se deberá desplazar el equipotencial que conecta ambos hilos de contacto a la estructura C/04/25, ya que es a partir de esta estructura en la que ambos hilos de contacto se encuentran en solapamiento hasta la llegada del desvío. Dicho equipotencial se observa en la Figura 42.

Este equipotencial siempre es recomendado situarlo en la estructura en la cual ambos cables se sitúan encima de la vía, es decir, cercano a la primera estructura posterior al anclaje del cable que se incorporará en dicha sección.

En esta opción de diseño también se saltará la estructura C/04/30, ya que dicha estructura se posicionó para satisfacer la posición correcta del cable encima del cambio de carril, pero debido a su eliminación, ya no es necesario que los hilos de contacto estén sujetos en dicha estructura, haciendo la transición de longitudes de vano mucho más uniforme favoreciendo, como se ha indicado previamente, la dinámica de la catenaria.

Finalmente, debido a que el cable es anclado a la estructura C/04/24, que posee un seccionamiento aislado, este seccionador ha de retrasarse a una estructura anterior, ya que no es recomendable situar un anclaje de un cable a una estructura que posea un seccionador.

Con los pertinentes cambios (sin representar el cambio de estructura del seccionador), los planos de la instalación quedarían modificados de la siguiente forma.

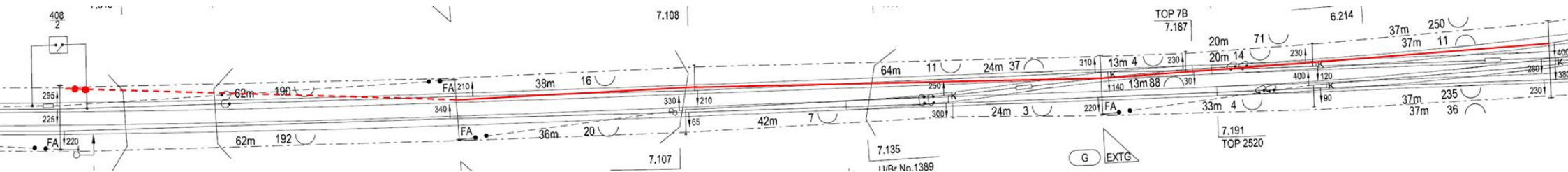


Figura 47: Plano de la instalación de la modificación de la propuesta 4

6.5. Propuesta número 5

Esta última propuesta plantea una alternativa completamente diferente a las otras 4 opciones explicadas anteriormente. Según indica la normativa inglesa acerca de los elementos que componen la catenaria, todo elemento el cual carezca de utilidad y ya no realice una función activa en el sistema debe ser retirado o reubicado a otra sección en la que desempeñe una función activa.

Debido a la deshabilitación del cambio de carril, se han planteado los distintos rediseños, aclarados en los puntos anteriores, los cuales planteaban distintas reubicaciones en las que se podría situar el hilo de contacto D para garantizar el suministro eléctrico pasado la zona del desvío, pero no se ha planteado una de las opciones, que consiste en dejarlo en la misma posición en la que se encuentra ahora.

Naturalmente, no habría que dejarlo tal cual se encuentra, ya que entonces no cumpliría la normativa, pero si pueden aplicarse ligeras modificaciones que no varíen su localización.

Esta propuesta consiste en aumentar la diferencia de alturas entre los hilos de contacto, de tal forma que de ninguna manera el pantógrafo del tren pueda llegar a estar en contacto con ambos hilos de contacto, deshabilitando de dicha forma el cambio de carril, aun permaneciendo presente el hilo de contacto.

Para ello se debería realizar el anclaje lo más alto posible e ir reduciendo su altura ligeramente tras su paso por las diferentes estructuras hasta llegar a la C/04/29, estructura en la que ya entraría en contacto dicho hilo de contacto solapándose con el otro hilo de contacto hasta la desviación.

Para ello se deberían emplear ménsulas del tipo de la estructura C/04/26, que se puede observar en la [Figura 42](#). Este tipo de ménsulas permite la sujeción de dos hilos de contacto simultáneamente, pero a diferentes alturas, lo que permite mantener uno de los hilos permanentemente fuera de contacto.

Al optar por dicha alternativa, se debería modificar ligeramente la próxima estructura, la C/04/28. Actualmente, la disposición presente la compone una ménsula simple, la cual es prolongada mediante un knuckle. Esto permite que ambos hilos se encuentren aproximadamente a la misma altura y por lo tanto se alimente la continuación de la vía o, por el contrario, el cambio de carril.

Para conseguir que el hilo de contacto D permanezca más elevado y nunca este en contacto con el pantógrafo, se deberá modificar la ménsula e implementar una del tipo comentado anteriormente. También se deberá retirar el knuckle, ya que las alturas de los hilos serán diferentes, mientras que los trasmisores de corriente, redondeados en la imagen siguiente, sí deberán permanecer aun variando la altura de los hilos. Adicionalmente, para facilitar la elevación del hilo de contacto, se sustituirá el aislador por una barra de vidrio como se observa en el hilo sustentador de la [Figura 30](#). Esto consigue reducir el peso de la catenaria y se puede implementar en el hilo de contacto, ya que en ningún momento estará en contacto con el pantógrafo.

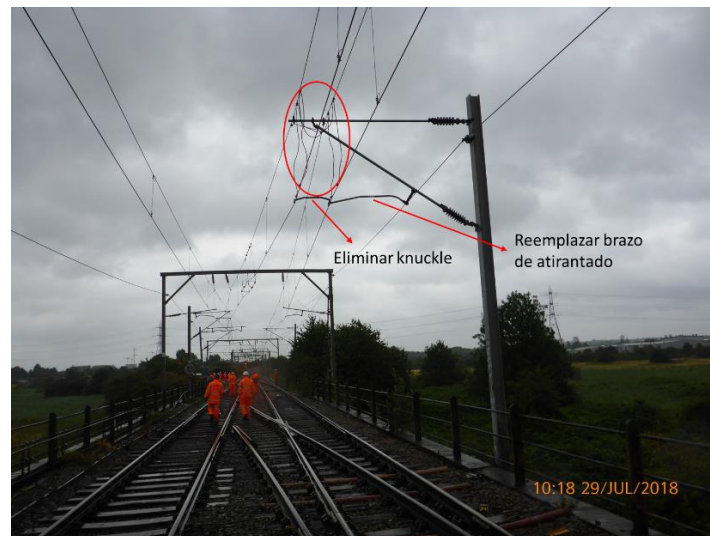


Figura 48: Modificaciones a realizar en la estructura C/04/28

La misma metodología deberá implementarse en el caso del pórtico C/04/29, en la que actualmente un knuckle soporta ambos hilos de contacto a alturas similares y deberán ser reemplazados por una ménsula con capacidad de sustentar hilos a dos alturas diferentes.

En la siguiente imagen se señalan los elementos a retirar o modificar del pórtico.



Figura 49: Modificaciones a realizar en la estructura C/04/29

Una vez el hilo de contacto D se encuentra sobre la vía del lado derecho, ya puede comenzar a reducir su altura y entrar en contacto con el ferrocarril, ya que no alimentaría el cambio de carril en ningún momento pasada esta estructura. Debido a ello, el resto de las estructuras posteriores no requieren de ninguna modificación, lo que supone un ahorro en costes al proyecto que se analizará en el siguiente apartado.

Capítulo 7: Análisis económico

En este capítulo analizaremos las propuestas expuestas en el Capítulo 6: Propuestas de diseño desde un punto de vista económico, en vez desde un punto de vista funcional o ingenieril como se ha hecho durante las justificaciones de los diseños.

Este factor es fundamental a la hora de analizar la validez de un proyecto, ya que un diseño puede ser muy funcional y haber sido pensado de forma muy minuciosa, pero si la puesta en marcha del diseño es excesivamente cara o las modificaciones a realizar suponen unos gastos excesivos en comparación con el presupuesto asignado para el proyecto, dicho diseño nunca será puesto en marcha por parte de la empresa.

Basado en la explicación anterior, se analizarán las ventajas e inconvenientes de todas las modificaciones propuestas, ya sean factibles o no desde el marco ingenieril.

Respecto a la propuesta número uno, que consistía en el anclaje del hilo en un pórtico cercano a la zona del desvío, podemos determinar que, económicamente supondría un riesgo alto en comparación con el resto de las posibilidades, que se analizarán posteriormente. Esto es debido a que, a pesar de poder reutilizar gran parte de los elementos que se encuentran presentes en la vía anteriores a las modificaciones, ya sean brazos de atirantado de las ménsulas, knuckles, aisladores, etc., la modificación que habría que realizar en caso de querer llevar a cabo esta opción sería la instalación de un tirante en el pórtico, que resistiese la fuerza del anclaje del cable. Esto no solo supondría la compra del propio tirante, sino también la fabricación de una nueva cimentación para dicho anclaje, el transporte de la cimentación hasta la vía y finalmente la apertura, colocación y cierre del puente para situar la cimentación en su interior. Debido a esto, aunque se determinó que esta opción no era viable técnicamente, tampoco lo sería económicamente.

Si analizamos la opción número dos, nos encontramos con un problema similar. Los costes de esta modificación son considerablemente elevados en comparación con las modificaciones que se analizarán posteriormente, ya que en esta se debe cambiar un poste completo, junto con su ménsula y demás elementos, por uno mucho más rígido que pueda soportar el anclaje de un hilo de contacto. Adicionalmente, a parte del coste del nuevo poste, que es considerablemente mayor que un poste sencillo, también habría que reemplazar la cimentación, ya que un poste de estas características requiere de una cimentación mayor. Por estas razones, esta opción de diseño también se considera económicamente inviable.

En cuanto a la propuesta número tres, el gasto económico que se debería realizar en dicha opción se podría determinar como un gasto medio. En esta modificación, también se plantea un anclaje a un pórtico, pero a diferencia de las anteriores propuestas, en este pórtico ya existe un anclaje previo, por lo que la cimentación ya se encuentra instalada. Para la consecución de este diseño, se debería proceder a la fabricación de una nueva ménsula con dos brazos de atirantado para la estructura situada en el puente, seguida de dicha misma ménsula, pero localizada en el pórtico siguiente. Por ello esta reforma es

mucho menor y considerablemente más barata que la planteada en las primeras opciones, lo que la convierte en una opción bastante asequible a términos globales y no solamente ingenieriles.

Continuando con la modificación número cuatro, esta sería el diseño más caro de los planteados en el capítulo anterior y sería un buen ejemplo de lo explicado al comienzo del capítulo. Este diseño es factible a términos técnicos, pero cuando analizamos la componente económica se convierte en una posibilidad completamente inasequible para una empresa. Esto es en mayor parte debido al aislador de sección que se sitúa en la estructura del anclaje. Como se ha explicado en el capítulo anterior, dicho seccionamiento ha de ser desplazado a la estructura anterior, ya que no se puede anclar un cable a una estructura en la que esté presente un divisor eléctrico de zonas como es el caso. Esto hace que no solo se deban modificar las estructuras situadas en el puente y las posteriores, como en la opción tres, sino que también deban ser modificadas las ménsulas y los anclajes de estructuras anteriores, haciendo inviable esta opción desde el marco económico.

Finalmente, la última propuesta es a su vez la más barata. En esta propuesta simplemente se plantea un cambio de alturas del hilo de contacto, permaneciendo este en la localización. Esto nos permite poder utilizar el mismo tensor y cimentación que se encuentra en la estructura original. Respecto a las ménsulas, esta opción es la que presenta un menor número de ménsulas afectadas por el cambio, siendo estas únicamente dos. Por ello, esta opción es la más económica al requerir únicamente la modificación de dos ménsulas y el cambio de un aislador. El resto de las modificaciones consisten en la retirada de elementos de la vía, lo que no supondría un coste de fabricación.

Capítulo 8: Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo sostenible fueron creados en el año 2015 por la ONU. La principal intención fue presentar una agenda global en la que, durante los próximos quince años, todos los países y empresas tomaran medidas respecto a un gran número de temas, en los que actualmente existen grandes problemas, desigualdades o no son sostenibles a largo plazo.

Esto también generó una mayor alerta social, con la finalidad de concienciar a la población acerca de los problemas a los que nos enfrentamos en la sociedad actual y promover una mayor colaboración, no solo por parte de las grandes empresas, sino también por parte de las personas individualmente.

Los temas en los que se solicitó tomar medidas fueron diecisiete y son los siguientes:

1. Fin de la pobreza.
2. Hambre cero.
3. Salud y bienestar.
4. Educación de calidad.
5. Igualdad de género.
6. Agua limpia y saneamiento.
7. Energía asequible y no contaminante.
8. Trabajo decente y crecimiento económico.
9. Industria, innovación e infraestructura.
10. Reducción de las desigualdades.
11. Ciudades y comunidades sostenibles.
12. Producción y consumo responsable.
13. Acción por el clima.
14. Vida submarina.
15. Vida de ecosistemas terrestres.
16. Paz, justicia e instituciones solidarias.
17. Alianzas para lograr los objetivos.

Este proyecto en concreto toma contacto con alguno de los desafíos mostrados en la numeración actual y a continuación se procederá a aclarar dichos desafíos más en detalle, tanto su finalidad, como su sinergia con el proyecto.

El objetivo principal que mayor relación presenta con este proyecto se corresponde con el desafío número nueve “Industria, innovación e infraestructura”. Según declara la ONU en su página web: *“para conseguir una economía robusta se necesitan inversiones en infraestructura. Estas son fundamentales para lograr un desarrollo sostenible, empoderar a las sociedades de numerosos países, fomentar una mayor estabilidad social y conseguir ciudades más resistentes al cambio climático”*. Mediante las acciones realizadas durante este proyecto, se está promoviendo a la sociedad de una mejor red de transporte ferroviario, permitiendo una mayor facilidad de movimiento. Esto ayuda a la mejora de las conexiones, reducción de tiempos de desplazamiento, mejor eficiencia del ferrocarril y dota de una mayor seguridad y resiliencia al sistema ferroviario de dicho

lugar. La ONU también destaca que no se puede mejorar en estos ámbitos a cualquier precio. *“Otro factor importante a considerar es la emisión de dióxido de carbono durante los procesos de fabricación. Las emisiones han disminuido en la última década en muchos países, pero esta disminución no ha sido uniforme en todo el mundo”*. Como se ha ido observando a lo largo del proyecto, todas las propuestas de diseño buscaban, no solo la funcionalidad del sistema, sino también evitar tener que crear nuevas estructuras, cimentaciones u otro tipo de elementos que encareciesen el proyecto, causasen un mayor impacto ambiental y supusiesen una producción de CO₂ durante su fabricación. Expresado de otra forma, se ha pretendido poder reutilizar la mayor parte de material ya existente en la vía posible.

Una vez aclarada la finalidad del desafío u objetivo número nueve, centrándose en mayor medida en las metas declaradas por la ONU para este tema, podemos destacar la 9.1 que dice lo siguiente: *“Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos”*. Como se ha comentado anteriormente, en este proyecto se procede a la renovación de una catenaria de cierta antigüedad por una más actual que permita una mayor calidad de la vía y requiera de menor mantenimiento mejorando así tanto la red de transporte como la calidad del servicio. Esto también se relaciona con el punto 9.4 que promueve que *“De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas”*.

Otro de los desafíos que posee cierta relación con el proyecto es el número 11 llamado “Ciudades y Comunidades Sostenibles” en el cual se afirma que hay que *“mejorar la planificación y la gestión urbanas para que los espacios urbanos del mundo sean más inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles”*. Esto vuelve a enlazar con la idea expuesta anteriormente de renovar las infraestructuras actuales por otras más modernas que permitan una mejora del servicio y garanticen su correcto funcionamiento durante un mayor periodo de tiempo. Adicionalmente, la reducción de los costes de mantenimiento puede dar lugar a una reducción posterior del precio de dicho medio de transporte, permitiendo su uso a un mayor número de personas. Esto se refleja en la meta 11.2 expuesta por la ONU que declara que *“De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad”*.

Capítulo 9: Cálculos justificativos

En este capítulo se expondrán los cálculos realizados sobre los postes afectados por cada una de las opciones de diseño consideradas. Mediante los siguientes cálculos, se comprobará la resistencia de los postes que componen la catenaria, así como las deformaciones que sufren debido a las fuerzas radiales generadas por los hilos de la catenaria.

Atendiendo a la normativa *NR/L2/CIV/073 Level 2 - Design of Overhead Line Structures*, en el apartado *5.4 Horizontal deflection criterion* se determina que toda estructura no puede tener una flecha superior a los 50 mm en la dirección trasversal a la vía (causada por las fuerzas radiales de los hilos) y en la dirección longitudinal no debe superar los 100 mm de flecha (generada por las cargas de los anclajes).

Una vez fijados los límites que determinarán el cumplimiento o no de la normativa por parte de las estructuras, se comenzará con el análisis de estas.

9.1. Análisis para el diseño 1A

En la primera aproximación del diseño número 1 se planteó el anclaje en la estructura 29, siguiendo el hilo de contacto por las estructuras 30 y 32. En este diseño, la estructura más crítica es la 30, ya que se trata de un poste simple que soporta una carga elevada generada por el hilo D incorporándose a la vía. Esto genera un ángulo cerrado, aumentando notablemente las cargas radiales que dicho hilo genera en el poste.

Primeramente, se debe determinar el tipo de poste, con la finalidad de conocer sus propiedades mecánicas y sus características. El poste que conforma la estructura C/04/30 es un perfil inglés equivalente al HEB, cuyas dimensiones se extraen del plano que se observa a continuación.

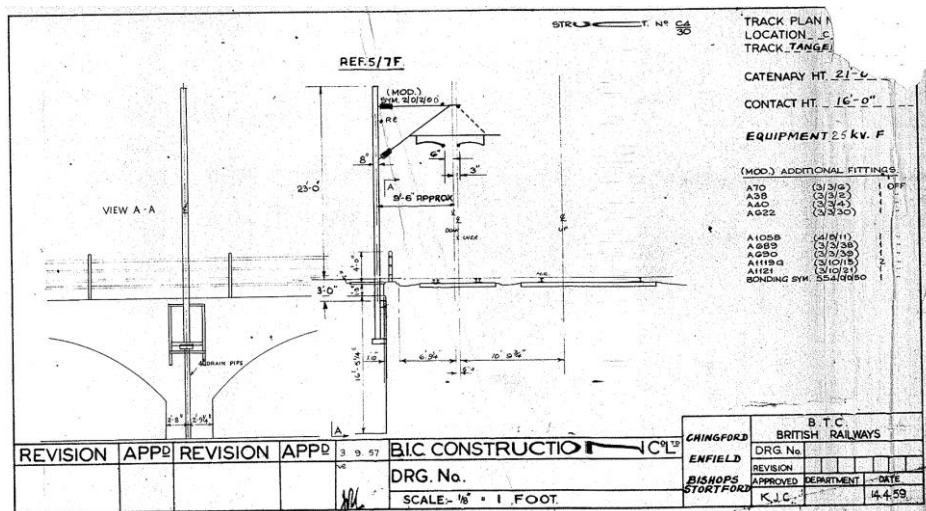


Figura 50: Plano de la estructura C/04/30

Se determina que es un poste de 8x8” por lo que sus propiedades son las siguientes

Poste					
Tipo	HEB	-	A	8535.4668	mm ²
Peso	914.44	Kg	W x	626149.7154	mm ³
H	203	mm	W y	225813.7419	mm ³
B	203	mm	Altura	7.925	m

Tabla 2: Datos del poste C/04/30

También se debe tener en cuenta el peso de la ménsula, para el cual se ha tomado un valor aproximado y en la siguiente tabla se determinan las longitudes de los vanos anteriores y posteriores a la estructura.

Ménsula		
Peso	45	Kg
Longitud de vano anterior	13	m
Longitud de vano posterior	20	m

Tabla 3: Datos de la ménsula C/04/30

Posteriormente se debe detallar el tipo de hilo, así como su peso promedio por metro y las tensiones a la temperatura mínima y a una temperatura promedio. Estos valores quedan recogidos en la siguiente tabla.

Hilo de contacto		
Tipo	107mm Cd Cu	-
Diámetro	12.32	mm
Masa	0.958	Kg/m
Tensión a 10°C	9897	N
Tensión a -5°C	13790	N
Hilo sustentador		
Tipo	19/2.1mm Cd Cu	-
Diámetro	10.5	mm
Masa	0.6	Kg/m
Tensión a 10°C	8176	N
Tensión a -5°C	9608	N
Hilo de retorno		
Tipo	19/3.25mm Cu	-
Diámetro	16.25	mm
Masa	1.42	Kg/m
Tensión a 10°C	7651	N
Tensión a -5°C	9452.5	N

Tabla 4: Propiedades de los hilos

Una vez conocidos los datos de los componentes de la catenaria, se calcularán las cargas radiales y verticales generadas por cada uno de los hilos. Respecto a las cargas verticales, estas son producidas por el propio peso de los hilos, por lo que su cálculo se puede realizar sencillamente aplicando la siguiente fórmula.

$$C_v = P_u * g * \frac{L_a + L_p}{2}$$

Ecuación 15: Cálculo de cargas verticales

Siendo C_v la carga vertical, P_u el peso por unidad de longitud, g la gravedad y L_a y L_p las longitudes de los vanos anteriores y posteriores respectivamente. Respecto a las cargas radiales, se debe considerar el ángulo que forma el hilo en la estructura. Al ser ángulos muy cercanos a 180° se toma como aproximación que la fuerza se produce siempre en la dirección perpendicular a la estructura para simplificar los cálculos. Esto da lugar a la siguiente fórmula.

$$C_r = 2 * T * \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Ecuación 16: Cálculo de cargas radiales

Siendo C_r la carga radial, T la tensión del hilo a la temperatura de interés y α el ángulo menor que forma el hilo en la estructura a analizar. Aplicando estas fórmulas, se puede extraer la siguiente tabla con los valores de las cargas que genera cada hilo para las temperaturas de interés.

Cargas existentes a -5°C			
Contacto C	Carga vertical	155.06667	N
	Ángulo	177	Grados
	Carga radial	721.960234	N
Contacto D	Carga vertical	310.13334	N
	Ángulo	164	Grados
	Carga radial	3838.39412	N
Sustentador C	Carga vertical	97.119	N
	Ángulo	177	Grados
	Carga radial	503.0162387	N
Sustentador D	Carga vertical	194.238	N
	Ángulo	164	Grados
	Carga radial	2674.350308	N
Hilo de retorno	Carga vertical	229.8483	N
	Ángulo	179	Grados
	Carga radial	164.9751536	N

Tabla 5: Cargas de los cables a la temperatura mínima

Cargas existentes a 10°C			
Contacto C	Carga vertical	155.06667	N
	Ángulo	177	Grados
	Carga radial	518.146515	N
Contacto D	Carga vertical	310.13334	N
	Ángulo	164	Grados
	Carga radial	2754.79236	N
Sustentador C	Carga vertical	97.119	N
	Ángulo	177	Grados
	Carga radial	428.0454587	N
Sustentador D	Carga vertical	194.238	N
	Ángulo	164	Grados
	Carga radial	2275.758547	N
Hilo de retorno	Carga vertical	229.8483	N
	Ángulo	179	Grados
	Carga radial	133.5334462	N

Tabla 6: Cargas de los cables a la temperatura promedio

Con estos datos se puede calcular el caso de carga A definido por la normativa inglesa, en el que únicamente se tienen en cuenta las cargas de los hilos a la temperatura mínima. Para verificar este caso, se ha calculado el momento que estas cargas generan en la base del poste junto con la carga axial que sufre el poste por los diferentes pesos. Una vez calculado ambos efectos, se ha verificado si el poste es capaz de aguantar las cargas según determina el Euro código.

A continuación, se muestran las fórmulas empleadas en los cálculos comentados anteriormente.

$$M = 1.2 * C_v * X + 1.3 * C_r * Z$$

Ecuación 17: Cálculo del momento en la base para caso A

$$N = 1.2 * (g * P + C_v)$$

Ecuación 18: Cálculo de la carga axial

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W}$$

Ecuación 19: Cálculo de la sigma del poste

Aplicando las fórmulas y realizando una hipótesis conservadora asumiendo que la sigma máxima que soporta el poste de acero es de 235 MPa se llegan a los siguientes resultados.

Distancias para cálculo de momentos					
Altura de hilo de contacto	5.7912	m	Distancia hilo C poste	2.9718	m
Altura de hilo sustentador	7.3152	m	Distancia hilo D poste	2.7432	m
Altura hilo de retorno	6.706	m	Distancia RC poste	-	m

Tabla 7: Distancias del punto de aplicación de la carga al poste

Load case A						
Momento en la base	Momento y	68546.7593	Nm	Sigma y	110.9353588	MPa
	Momento x	0	Nm	Sigma x	0	MPa
	Carga axial	12478.2141	N	Sigma máx.	235	MPa

Tabla 8: Caso de carga A de la opción 1A

La próxima comprobación corresponde con el caso B (viento máximo y temperatura promedio). Para ello se debe calcular la acción del viento, tanto en el poste como en los hilos. Esto se consigue mediante la presión ejercida por el viento y la carga radial que dicha presión causa en los hilos. Su cálculo se realiza de la siguiente forma.

$$C_{viento} = q * d * C_c * \frac{L_a + L_p}{2}$$

Ecuación 20: Carga causada por el viento

Siendo q la presión del viento, d el diámetro del hilo y C_c un parámetro cuyo valor es 0.8 para el hilo de contacto y 1 para el resto de los hilos sin hielo y 1.25 con hielo. Aplicando esta cuenta se pueden obtener las siguientes fuerzas.

Carga del viento		
qb	595.63	N/m ²
Hilo de contacto		
Sin hielo	96.86373312	N
Con hielo	384.7620893	N
Hilo sustentador		
Sin hielo	103.1928975	N
Con hielo	362.4036281	N
Hilo de retorno		
Sin hielo	159.7032938	N
Con hielo	433.0416234	N

Tabla 9: Cargas generadas por el viento en los hilos

Estas fuerzas son sumadas a las cargas radiales y aplicadas a la altura del cable a analizar. También se debe tener en cuenta la fuerza que genera el viento sobre el poste, la cual se aplica a la mitad de la altura del poste. Para su cálculo se emplea la siguiente ecuación.

$$C_{viento\ est\ r} = q * G_{ins} * C_{ins} * A$$

Ecuación 21: Efecto del viento en las estructuras

En la ecuación anterior, A hacer referencia al área proyectada del poste en la dirección del viento, C_{ins} es el coeficiente de drag de la estructura y G_{ins} es el factor de resonancia estructural. Por lo cual, las fuerzas del viento sobre la estructura son las siguientes.

Poste longitudinal		
Sin hielo	1724.822376	N
Con hielo	1886.258953	N
Poste trasversal		
Sin hielo	1724.822376	N
Con hielo	1886.258953	N

Tabla 10: Cargas generadas por el viento en el poste

Finalmente, con estos datos se recalcula el momento en la base aplicando el viento en la dirección transversal a la vía y viento en la longitudinal. Las ponderaciones según el euro código son: 1.3 las cargas radiales y las generadas por el viento y 1.2 el efecto de las cargas verticales, quedando los datos de la siguiente forma.

Load case B viento en x						
Momento en la base	Momento y	67775.2268	Nm	Sigma y	109.7031735	MPa
	Momento x	0	Nm	Sigma x	0	MPa
	Carga axial	12478.2141	N	Sigma máx.	235	MPa
Load case B viento en y						
Momento en la base	Momento y	54076.806	Nm	Sigma y	87.82594426	MPa
	Momento x	8884.99126	Nm	Sigma x	39.34654812	MPa
	Carga axial	12478.2141	N	Sigma máx.	235	MPa

Tabla 11: Caso de carga B de la opción 1A

Como última comprobación, se debe calcular el estado de cargas D, que se calcula mediante la aplicación del hielo, añadiendo el viento al 50% para la temperatura mínima de interés.

Para calcular el efecto del hielo, se ha supuesto un incremento de 9.5mm en el radio de todos los hilos según indica la norma, lo que generará un aumento de las cargas verticales debido al peso del hielo. Para su cálculo se determina cual es el área de la corona de hielo depositada sobre el hilo y se calcula su peso.

$$\text{Peso del hielo} = \left(\frac{\pi * d_h^2}{4} - \frac{\pi * d^2}{4} \right) * \rho_h * \left(\frac{L_a + L_p}{2} \right)$$

Ecuación 22: Carga auxiliar del hielo

Carga de hielo			Hilo de contacto			Hilo sustentador		
Radio adicional por hielo	9.5	mm	Diámetro con hielo	31.32	mm	Diámetro con hielo	29.5	mm
Densidad del hielo	9	kN/m3	Área de corona de hielo	651.2207412	mm2	Área de corona de hielo	596.9026042	mm2
			Peso del hielo	96.70628006	N	Peso del hielo	88.64003672	N
Cable de retorno			Poste					
Diámetro con hielo	35.25	mm	Perímetro	1218	mm			
Área de corona de hielo	768.5121029	mm2	Área de corona de hielo	11571	mm2			
Peso del hielo	114.1240473	N	Peso del hielo	825.301575	N			

Tabla 12: Cargas generadas por el hielo en los hilos y postes

Una vez se dispongan de los datos calculados anteriormente, se podrá calcular el momento que generan todas las cargas juntas aplicando un coeficiente de 1.3 para las fuerzas radiales de los cables, 0.65 a las fuerzas del viento, 1.3 a las cargas verticales del hielo y 1.2 a las cargas verticales del peso habitual de los cables.

Load case D viento en x						
Momento en la base	Momento y	83012.7466	Nm	Sigma y	134.2379778	MPa
	Momento x	0	Nm	Sigma x	0	MPa
	Carga axial	14181.3678	N	Sigma máx.	235	MPa
Load case D viento en y						
Momento en la base	Momento y	69923.7898	Nm	Sigma y	113.3341005	MPa
	Momento x	4858.29572	Nm	Sigma x	21.51461498	MPa
	Carga axial	14181.3678	N	Sigma máx.	235	MPa

Tabla 13: Caso de cargas D de la opción 1A

Si todos los casos son positivos, es decir, la estructura aguanta, se procederá al cálculo de su deformada para verificar que no se deforma mas de 50mm a la altura del hilo de contacto en la dirección transversal a la vía.

Para ello se vuelven a analizar los casos de cargas A y B empleando las siguientes fórmulas para el cálculo de la flecha.

$$flecha = \frac{F * z_c^3}{3 * E * I}$$

Ecuación 23: Flecha para las fuerzas causadas por el hilo de contacto

$$flecha = \frac{F * z_c}{2 * E * I} * \left(z_h^2 + \frac{z_h^3}{3 * z_c} \right)$$

Ecuación 24: Flecha en hilo de contacto para las fuerzas causadas por el resto de hilos

En estas ecuaciones z_c indica la altura del hilo de contacto, z_h la altura del hilo sobre el que se aplican las fuerzas y F las fuerzas radiales que generan los hilos. Adicionalmente se considera un giro en la cimentación cuya tangente es 0.005, cuyo desplazamiento hay que sumar a la flecha calculada anteriormente. Mediante estas cuentas, se calcula la flecha en la primera tabla para el caso de cargas A y en la segunda para el caso de cargas B.

Cálculo deformada transversal		
Por hilo de contacto	22.08914828	mm
Por hilo sustentador	21.46544873	mm
Por hilo de retorno	0.988438289	mm
Por cimentación	28.956	mm
Deformación total	73.49903529	mm

Tabla 14: Flecha para caso de cargas A de la opción 1A

Cálculo deformada trasversal		
Por hilo de contacto	16.32243103	mm
Por hilo sustentador	18.96332929	mm
Por hilo de retorno	1.756909542	mm
Por cimentación	28.956	mm
Deformación total	65.99866986	mm

Tabla 15: Flecha para caso de cargas B de la opción 1A

Al ser las deformaciones mayores a los 50 mm que permite la norma, esta opción de diseño debe ser descartada. En los siguientes apartados se realizará el mismo procedimiento de comprobación para verificar la validez de las estructuras más afectadas.

9.2. Análisis para el diseño 1B

En el diseño 1B, la estructura crítica es la C/04/32, ya que se decide puentear la C/04/30 para evitar tener las cargas excesivas vistas en el apartado anterior, que generan el fallo de la estructura.

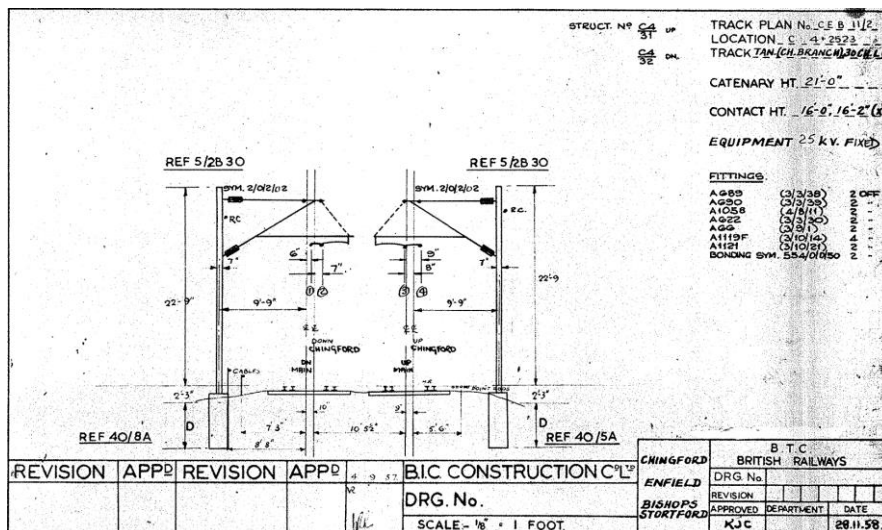


Figura 51: Planos de las estructuras C/04/31 y C/04/32

Si se observa el poste de la estructura izquierda, que es la que corresponde con la C/04/32, este poste es un perfil de 7x7" a diferencia del de 8x8" del análisis anterior. Las características de este nuevo poste son las siguientes.

Poste				
Tipo	HEB	-	A	6451.6 mm ²
Peso	462.66	Kg	W x	412790 mm ³
H	178	mm	W y	147320 mm ³
B	178	mm	Altura	7.315 m

Tabla 16: Características del poste C/04/32

Siguiendo el mismo procedimiento que en el apartado anterior, los resultados de los momentos para cada estado de cargas son los siguientes:

Load case A						
Momento en la base	Momento y	42598.876	Nm	Sigma y	104.3596454	MPa
	Momento x	0	Nm	Sigma x	0	MPa
	Carga axial	7498.01059	N	Sigma máx.	235	MPa

Tabla 17: Caso de carga A de la opción 1B

Load case B viento en x						
Momento en la base	Momento y	45508.596	Nm	Sigma y	111.4085565	MPa
	Momento x	0	Nm	Sigma x	0	MPa
	Carga axial	7498.01059	N	Sigma máx.	235	MPa

Load case B viento en y						
Momento en la base	Momento y	31765.3175	Nm	Sigma y	78.1149242	MPa
	Momento x	6637.60018	Nm	Sigma x	45.05566235	MPa
	Carga axial	7498.01059	N	Sigma máx.	235	MPa

Tabla 18: Caso de carga B de la opción 1B

Load case D viento en x						
Momento en la base	Momento y	61110.5819	Nm	Sigma y	149.5083137	MPa
	Momento x	0	Nm	Sigma x	0	MPa
	Carga axial	9454.99489	N	Sigma máx.	235	MPa

Load case D viento en y						
Momento en la base	Momento y	45273.3751	Nm	Sigma y	111.1420579	MPa
	Momento x	3673.05403	Nm	Sigma x	24.93248731	MPa
	Carga axial	9454.99489	N	Sigma máx.	235	MPa

Tabla 19: Caso de carga D de la opción 1B

Al ser todos los resultados de resistencias positivos se procede al cálculo de la flecha de la estructura para comprobar que no excede los 50mm en la dirección trasversal a la vía, obteniendo la siguiente tabla.

Cálculo deformada trasversal		
Por hilo de contacto	15.94852026	mm
Por hilo sustentador	16.21433286	mm
Por hilo de retorno	1.02190639	mm
Por cimentación	24.5	mm
Deformación total	57.68475951	mm

Tabla 20: Flecha para caso de cargas A de la opción 1B

Cálculo deformada trasversal		
Por hilo de contacto	11.42090806	mm
Por hilo sustentador	14.06520856	mm
Por hilo de retorno	2.535852942	mm
Por cimentación	24.5	mm
Deformación total	52.52196956	mm

Tabla 21: Flecha para caso de cargas B de la opción 1B

Se puede observar como la flecha del poste es superior a los 50 mm en la dirección transversal a la vía, lo que lleva a descartar así esta opción.

9.3. Análisis para el diseño 2

Respecto a este diseño, la estructura crítica a analizar es la C/04/32 junto con la C/04/30. La estructura 32 es crítica debido a las fuerzas de atirantado de los cables al variar su ángulo y la 30 ve aumentada su carga debido al posicionamiento del anclaje del hilo de contacto D en dicha estructura.

Se ha comenzado por el análisis de resistencia del poste de la estructura C/04/32, en el cual se han obtenido los siguientes resultados:

Load case A						
Momento en la base	Momento x	42727.7473	Nm	Sigma x	104.6718411	MPa
	Momento y	0	Nm	Sigma y	0	MPa
	Carga axial	7498.01059	N	Sigma máx.	235	MPa

Tabla 22: Caso de carga A de la opción 2

Load case B viento en x						
Momento en la base	Momento x	45496.0603	Nm	Sigma x	111.3781883	MPa
	Momento y	0	Nm	Sigma y	0	MPa
	Carga axial	7498.01059	N	Sigma máx.	235	MPa

Load case B viento en y						
Momento en la base	Momento x	31752.7818	Nm	Sigma x	78.08455599	MPa
	Momento y	6637.60018	Nm	Sigma y	45.05566235	MPa
	Carga axial	7498.01059	N	Sigma máx.	235	MPa

Tabla 23: Caso de carga B de la opción 2

Load case D viento en x						
Momento en la base	Momento x	61239.4532	Nm	Sigma x	149.8205095	MPa
	Momento y	0	Nm	Sigma y	0	MPa
	Carga axial	9454.99489	N	Sigma máx.	235	MPa

Load case D viento en y						
Momento en la base	Momento x	45402.2464	Nm	Sigma x	111.4542537	MPa
	Momento y	3673.05403	Nm	Sigma y	24.93248731	MPa
	Carga axial	9454.99489	N	Sigma máx.	235	MPa

Tabla 24: Caso de carga D de la opción 2

Al igual que en los anteriores casos, al ser positivo el análisis de resistencia del poste se ha comprobado la deformada tanto de la estructura 32 en la dirección transversal, que no debe sobrepasar los 50 mm, como la flecha de la estructura 30 en la dirección longitudinal de la vía, que no debe exceder los 100 mm. Los resultados del análisis son los siguientes.

Cálculo deformada trasversal		
Por hilo de contacto	17.17205919	mm
Por hilo sustentador	14.96270653	mm
Por hilo de retorno	1.02190639	mm
Por cimentación	24.5	mm
Deformación total	57.65667211	mm

Tabla 25: Flecha para caso de cargas A de la opción 2

Cálculo deformada trasversal		
Por hilo de contacto	11.4160794	mm
Por hilo sustentador	14.05938788	mm
Por hilo de retorno	2.535852942	mm
Por cimentación	24.5	mm
Deformación total	52.51132022	mm

Tabla 26: Flecha para caso de cargas B de la opción 2

Ambos casos de carga generar una deformación superior a la que recoge la normativa. Respecto a la deformada debido al anclaje, al ser un poste que no esta preparado para soportar el anclaje de un hilo, como se ha expuesto durante la memoria, su flecha debida a la carga del anclaje del hilo de contacto es de más de 360 mm, excediendo más de tres veces el límite permitido. Mediante este cálculo, se observa la importancia de la orientación del perfil a la hora de soportar las cargas, asi como de la elección de un perfil mas o menos robusto, lo que varía su momento de inercia y por lo tanto su capacidad de soportar nuevas cargas.

9.4. Análisis para el diseño 3

En este diseño, en el que el anclaje ya se sitúa anterior al puente de la vía, la estructura más afectada es la C/04/27, ya que se le añade la carga del hilo D. A continuación, se muestran los resultados de los análisis de cargas y deformaciones de la estructura C/04/27.

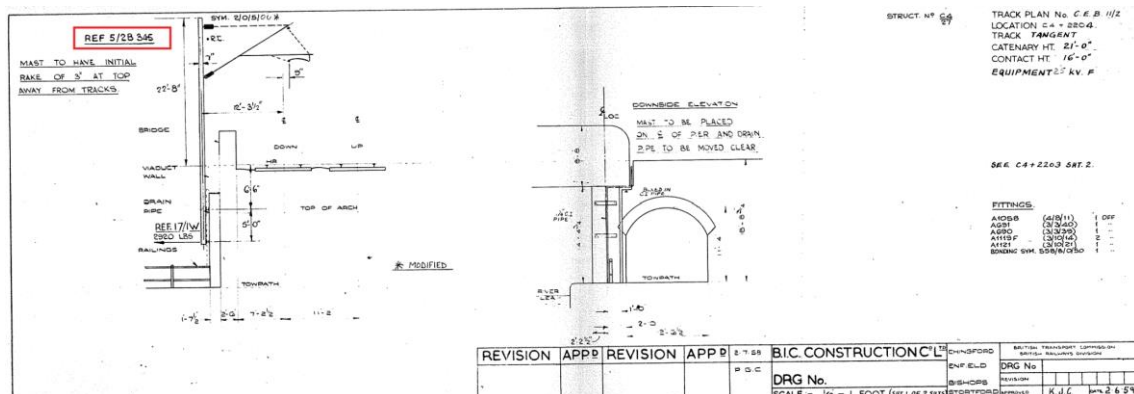


Figura 52: Plano de la estructura C/04/27

Load case A						
Momento en la base	Momento x	55337.30648	Nm	Sigma x	135.5317413	MPa
	Momento y	0	Nm	Sigma y	0	MPa
	Carga axial	9515.731392	N	Sigma máx.	235	MPa

Tabla 27: Caso de carga A de la opción 2

Load case B viento en x						
Momento en la base	Momento x	67880.59434	Nm	Sigma x	165.9183492	MPa
	Momento y	0	Nm	Sigma y	0	MPa
	Carga axial	9515.731392	N	Sigma máx.	235	MPa

Load case B viento en y						
Momento en la base	Momento x	44866.24787	Nm	Sigma x	110.1651903	MPa
	Momento y	9803.608274	Nm	Sigma y	66.54634994	MPa
	Carga axial	9515.731392	N	Sigma máx.	235	MPa

Tabla 28: Caso de carga B de la opción 3

Load case D viento en x						
Momento en la base	Momento x	88980.462	Nm	Sigma x	217.4991355	MPa
	Momento y	0	Nm	Sigma y	0	MPa
	Carga axial	12519.12886	N	Sigma máx.	235	MPa

Load case D viento en y						
Momento en la base	Momento x	61127.85263	Nm	Sigma x	150.0250945	MPa
	Momento y	5425.030421	Nm	Sigma y	36.82480601	MPa
	Carga axial	12519.12886	N	Sigma máx.	235	MPa

Tabla 29: Caso de carga D de la opción 3

Cálculo deformada transversal		
Por hilo de contacto	19.34776971	mm
Por hilo sustentador	19.79587728	mm
Por hilo de retorno	1.218377697	mm
Por cimentación	24.384	mm
Deformación total	64.74602469	mm

Tabla 30: Flecha para caso de cargas A de la opción 3

Cálculo deformada transversal		
Por hilo de contacto	15.3914684	mm
Por hilo sustentador	19.20103951	mm
Por hilo de retorno	4.631727525	mm
Por cimentación	24.384	mm
Deformación total	63.60823544	mm

Tabla 31: Flecha para caso de cargas B de la opción 3

Nuevamente se determina que la estructura C/04/27 aguanta las cargas, pero se deforma mas de lo que la normativa permite para ese tipo de estructuras.

Capítulo 10: Conclusiones

En este capítulo se expondrá una visión general del proyecto, se resaltarán nuevamente la finalidad de este y se concluirá con una selección final valorando todos los aspectos comentados anteriormente. Así mismo, se justificarán de igual forma los descartes del resto de las opciones que finalmente no serán escogidas.

Como bien se comentó en los primeros capítulos de la memoria, este proyecto consiste en el rediseño de la catenaria del tramo de vía analizado, debido a que se van a llevar a cabo diversas modificaciones. Esta vía contaba con dos cambios de carriles, los cuales van a ser deshabilitados, y consecuentemente con lo que dictamina la normativa inglesa, todos los elementos que carezcan de uso en la nueva funcionalidad de la vía deberán ser eliminados.

El estudio del proyecto comenzó con un análisis del terreno en el que se situaba dicha vía, ya que es uno de los problemas que dota de dificultad al proyecto. Así mismo también se hizo un estudio meteorológico característico de este tipo de proyectos.

Posteriormente se comenzó con el primer cambio de carril, el cual no presentaba excesivos problemas en su rediseño, ya que únicamente retirando todos los elementos que habilitan el desvío sería suficiente en esta zona, ya que el cambio de carril estaba alimentado por un único cable el cual no aportaba ninguna funcionalidad extra a la vía, por lo que su retirada se podía hacer limpiamente.

En lo que respecta al segundo cambio de carril y el desvío que le prosigue, se plantearon cinco opciones, de las cuales concluiremos con una selección final. La primera opción fue descartada tanto por motivos técnicos como económicos. No era posible instalar una nueva cimentación para colocar el tensor en la estructura de anclaje y además en caso de poder realizarse sería notablemente más caro en comparación con la elección final.

La número dos también fue descartada por ambos motivos. En lo técnico poseía la misma problemática que la opción uno, mientras que en el ámbito económico esta sería aún más cara que la opción uno, ya que requería no solo el cambio de cimentación, sino también la fabricación de un nuevo poste.

Analizando la propuesta número tres, se pudo concluir que es una opción factible económicamente, ya que las modificaciones son ligeras en las ménsulas en las que se situaría el hilo de contacto. En cuanto al aspecto técnico, también sería factible realizarla ateniéndose a la normativa del momento de su instalación, pero es posible que, aun que cumpla la normativa, podría generar algún problema técnico en el futuro debido a la antigüedad de las estructuras.

Continuando con la número cuatro, se determina que es una posibilidad en el marco técnico, pero nunca en el marco económico haciendo imposible su implantación y obligando a descartarla. Esta posibilidad es la que conlleva un mayor número de modificaciones.

Finalmente, se ha observado que la opción número cinco es la más factible en ámbitos técnicos y económicos. Las modificaciones a realizar son notablemente menores y consisten en simples cambios de ménsulas u otros elementos de menor coste. También no requiere modificaciones de estructuras ni cimentaciones, lo que permite llevarla a cabo con un presupuesto reducido. En lo que concierne a lo técnico, es perfectamente funcional y cumple la normativa vigente sin necesidad de apoyarse en la normativa anterior como la opción número tres.

Por todo ello se puede concluir con que la opción número cinco es la más adecuada para este proyecto y la que mejor se adapta a los requisitos exigidos. Se han logrado los objetivos expuestos y se ha conseguido seleccionar una de las opciones planteadas como diseño final para este proyecto.

Desde el punto de vista personal, se han aplicado los diversos conocimientos adquiridos sobre este tema a lo largo del desarrollo del proyecto.

Capítulo 11: Desarrollos complementarios

Para concluir la memoria del proyecto se expondrán las posibles siguientes líneas de desarrollo e investigación que se deberían hacer como siguientes pasos a seguir para concluir el proyecto en su totalidad. Estas tareas no han sido realizadas en la memoria, ya que pueden ser labores que requieran de un gran número de horas de trabajo en relación a lo que podrían aportar al proyecto, pero que deben ser realizadas en un futuro para dar por concluido el proyecto. También dentro de esta sección se pueden encontrar labores de detalle sobre lo expuesto anteriormente.

La principal vía de desarrollo que debería seguir el proyecto sería la realización de los planos de la nueva vía. Como se ha comentado anteriormente, la delineación de un plano requiere de un gran número de horas y detalles, cuya finalidad reside en representar el diseño final del proyecto. Debido a ello se ha optado por no realizarlo en este proyecto, ya que no aporta gran cantidad extra de dificultado o interés al proyecto en sí.

Otra línea que se debería seguir desarrollando es el análisis detallado de las estructuras que van a ser modificadas. A pesar de ser modificaciones leves la mayoría de ellas, las cuales no deberían causar ningún problema en cuanto a su justificación se refiere, deben estar validadas mediante ensayos o simulaciones para su aprobación oficial. Esto se podría hacer mediante el uso de programas de elementos finitos como ANSYS o mediante ensayos experimentales.

Finalmente, como otra alternativa de continuidad del proyecto, se debería proceder a la realización de la ingeniería de detalle. En cada país se requiere un grado de profundidad diferente en los proyectos y debido a ello se debería prestar atención a los proyectos internacionales, como es el caso.

En Reino Unido los proyectos ferroviarios requieren de una mayor profundidad en comparación con España, debido a ello, una ingeniería de detalle de un proyecto español equivale a una ingeniería básica de un proyecto de Reino Unido, requiriendo de tal modo un mayor detalle para la conclusión del proyecto.

Dentro de la ingeniería de detalle se engloban todos los desarrollos complementarios de los que se ha hablado en este capítulo. Además, también se mencionarían todo tipo de detalles, como por ejemplo los tornillos de sujeción de las ménsulas, el modelo exacto de ménsula a emplear, el procedimiento para realizar el montaje etc.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Bibliografía

- Academic. (2010). *Catenaria (ferrocarril)*. Obtenido de <https://esacademic.com/dic.nsf/eswiki/201129>
- Bates, W. (1991). *Historical Structural Steelwork Handbook*. London: The British Constructional Steelwork Association Limited.
- Carmona, M., & de la Torre, M. (s.f.). *Modelos de Catenaria de Adif*. Obtenido de http://www.adif.es/es_ES/comunicacion_y_prensa/fichas_de_actualidad/ficha_actualidad_00070.shtml
- Clemente, C. (2013). *Simulación por el Método de los Elementos Finitos de la interacción dinámica pantógrafo catenaria*. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/17989/PFC_Cesar_Clemente_Bueno.pdf?sequence=1
- Frost, R., & McManus, M. (2015). *NR_L2_CIV_073 Level 2 - Design of Overhead Line Structures*. Londres: Network Rail.
- Keenor, G. (2018). *Overhead Line Electrification for Railways*.
- Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., & Vega, T. (2008). *Líneas de contacto para ferrocarriles electrificados*. Erlangen: Siemens AG.
- La Fraga. (2020). *La Fraga Productos y Mercados*. Obtenido de <https://www.lafarga.es/es/productos-y-mercados/cables-ferroviarios/item/fil-contacte-ranurat>
- Montesinos, J., & Carmona, M. (2002). *Tecnologías de Catenaria*. Madrid: U.N. Mantenimiento de Infraestructura Renfe.
- NetworkRail. (2013). *The Network Rail archive*. Obtenido de <https://www.networkrail.co.uk/who-we-are/our-history/the-network-rail-archive/>
- Poinsa. (2020). *Aisladores para ferrocarril*. Obtenido de <https://poinsa.com/aisladores-para-ferrocarril/>
- United Nations. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Universidad de Zaragoza. (2020). *Introducción histórica (Orígenes del ferrocarril)*. Obtenido de [http://www.cps.unizar.es/~transp/Ferrocarriles/INTRODUCCION_HISTORICA\(Origenes_del_ferrocarril\).html](http://www.cps.unizar.es/~transp/Ferrocarriles/INTRODUCCION_HISTORICA(Origenes_del_ferrocarril).html)
- Vega, J. (2014). *Generación y cálculo de ménsulas tubulares para infraestructura ferroviaria*. Madrid: Trabajo Fin de Grado ICAI.
- Vía Libre. (2020). *Metro de Madrid instalará catenaria rígida en la línea 1*. Obtenido de <https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=19988>