COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA
ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

INGENIERÍA BÁSICA PARA LA REMODELACIÓN DE UN TRAMO DE LÍNEA AÉREA DE CONTACTO

Autor: Santiago Escobar Rodríguez

Director: Joaquín Ramos Rodríguez

Madrid

Agosto 2021

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

“Ingeniería básica para la remodelación de un tramo de línea aérea de contacto”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2020/21 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.: Santiago Escobar Rodríguez Fecha: 24/08/2021

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Joaquín Ramos Rodríguez Fecha: 24/08/2021

COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA
ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

INGENIERÍA BÁSICA PARA LA REMODELACIÓN DE UN TRAMO DE LÍNEA AÉREA DE CONTACTO

Autor: Santiago Escobar Rodríguez

Director: Joaquín Ramos Rodríguez

Madrid

Agosto 2021

INGENIERÍA BÁSICA PARA LA REMODELACIÓN DE UN TRAMO DE LÍNEA AÉREA DE CONTACTO

Autor: Escobar Rodríguez, Santiago.
Director: Ramos Rodríguez, Joaquín.
Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto consiste en el estudio, rediseño y elección del sistema de catenaria de un tramo de vía ferrovial que forma parte de la línea "Great Eastern Main Line" próximo a la estación de Chelmsford, Reino Unido.

Palabras clave: Catenaria, Línea aérea de contacto, Trazado, Desviación, Fuerza, Chelmsford.

1. Introducción

Con la invención del ferrocarril a principios del siglo XIX, pero sobre todo con la expansión de la locomotora eléctrica en Reino Unido a finales del mismo siglo, surge la necesidad de construcción constante de nuevas vías férreas y sus líneas aéreas de contacto correspondientes.

Y con ello, la importancia de renovar los equipos y líneas de la catenaria es cada vez mayor, tanto para certificar el rendimiento de los mismos, como para hallar posibles fallos que comprometan la seguridad del conjunto.

2. Definición del proyecto

En este contexto, el proyecto analizará un tramo de vía conflictivo, donde la necesidad de cambio de varios equipos debido al fin de su vida útil hace que se aproveche la oportunidad para replantear el esquema de la vía. En concreto, se estudiará el nuevo trazado de la línea aérea debido al desplazamiento de uno de los desvíos, con el fin de encontrar el diseño óptimo, respetando los límites impuestos por las distintas normas.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Este diseño óptimo se decidirá al final del proyecto, tras analizar cada una de las propuestas desde el punto de viabilidad técnica y económica. Para generar estas propuestas en primer lugar se profundizará en la funcionalidad de los elementos que componen la línea aérea de contacto. Más tarde se analizará la zona de trabajo con su respectiva problemática, para así poder razonar las distintas propuestas en vista a las necesidades de la vía.

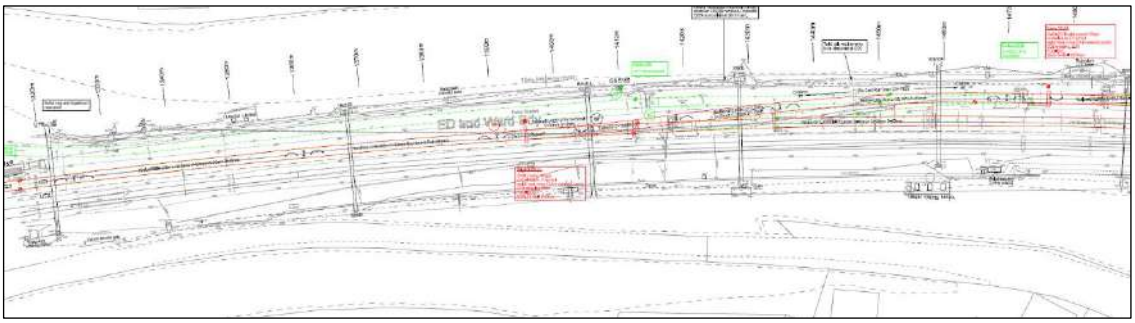


Ilustración 1 – Captura del plano, trazado original de la línea.

4. Resultados

Tras exponer las distintas propuestas, se realizan los cálculos pertinentes para poder rechazar aquellas opciones que quedan fuera de los límites establecidos y aceptar la solución final del diseño.

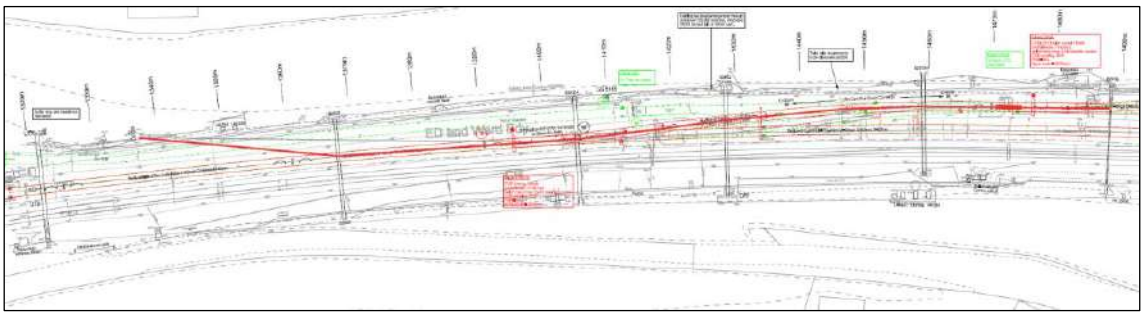


Ilustración 2 – Captura del plano, trazado final de la línea.

5. Conclusiones

- El análisis de un proyecto de esta escala ha de ser siempre proyectado desde la perspectiva técnica y económica de manera paralela y constante para garantizar un resultado óptimo.
- El conocimiento previo de la funcionalidad de los elementos de la línea aérea de contacto en este trabajo ha sido clave para el posterior razonamiento de las ideas y problemas expuestos.
- Gracias a la eliminación de la vía de la topera se permite perfeccionar el trazado de la vía “Down Main” con el fin de corregir mejorar la vía en términos de seguridad y rendimiento, y de esta forma reducir las cargas soportadas en las ménsulas.
- El movimiento de un aislador de sección tiene que estar motivado por el incumplimiento del límite de desviación lateral máxima y debe realizarse atendiendo a las necesidades de los distintos niveles de tensión presentes.

6. Referencias

[MONT02] Montesinos, J., & Carmona, M. (Febrero 2002). Tecnología de catenaria. RENFE.

[KIES08] Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., & Vega, T. (2008). Líneas de contacto para ferrocarriles electrificados: planificación, diseño, instalación, mantenimiento. Erlangen: Siemens AG.

[ADIF21] ADIF. (s.f.). Modelos de Catenaria de Adif. Recuperado el 11 de junio de 2021 de: http://www.adif.es/

[KEEN18] "Overhead Line Electrification for Railways", Garry Keenor, 2018

[EADI16] Eadic. (2016, 2 de mayo). Elementos de sustentación para la catenaria C-350. Recuperado el 18 de junio de 2021 de: https://www.eadic.com/elementos-de-sustentacion-para-la-catenaria-c-350/

[GOUR98] Gourvish, T. (1998). Los ferrocarriles como medio de transporte en Gran Bretaña, 1830 – 1990.

[RIO_08] del Río, E., Martí-Henneberg, J., & Valentín, A. (2008). La Evolución de la Red Ferroviaria en el Reino Unido (1825-2000).

[BRIT19] Britannica, T. E. (2019). Railroad history. Encyclopedia Britannica. Recuperado el 20 de junio de 2021 de: www.britannica.com/Railroad-history.

[LAMB21] Lambert, T. (2021, 14 de marzo). A history of Chelmsford. Recuperado el 2º de junio de 2021 en: https://localhistories.org/a-history-of-chelmsford/

BASIC ENGINEERING FOR THE REMODELING OF A SECTION OF OVERHEAD CONTACT LINES

Author: Escobar Rodríguez, Santiago.
Supervisor: Ramos Rodríguez, Joaquín.
Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

The project consists of the study, redesign and selection of the catenary system for a section of railway that forms belongs to the "Great Eastern Main Line" near the Chelmsford station, United Kingdom.

Keywords: Catenary, Overhead Contact Line, Tracing, Deflection, Force, Chelmsford.

1. Introduction

With the invention of the railway at the beginning of the 19th century, but especially with the expansion of the electric locomotive in the United Kingdom at the end of the same century, the need arises for the constant construction of new railways and their corresponding overhead contact lines.

And with this, the importance of renewing the equipment and lines of the catenary is increasing, both to certify their performance, and to find possible failures that compromise the safety of the assembly.

2. Project definition

In this context, the project will analyze a conflictive stretch of road, where the need to change various equipment due to the end of its useful life means that the opportunity is taken to rethink the road layout. Specifically, the new route of the catenary will be studied due to the displacement of one of the detours, in order to find the optimal design, respecting the limits imposed by the different regulations.

3. Description of the model / system / tool

This optimal design will be decided at the end of the project, after analyzing each of the proposals from the point of technical and economic viability. To generate these proposals, in the first place, the functionality of the elements that make up the overhead contact line will be deepened. Later, the work area will be analyzed with its respective problems, in order to be able to reason the different proposals in view of the needs of the road.

.

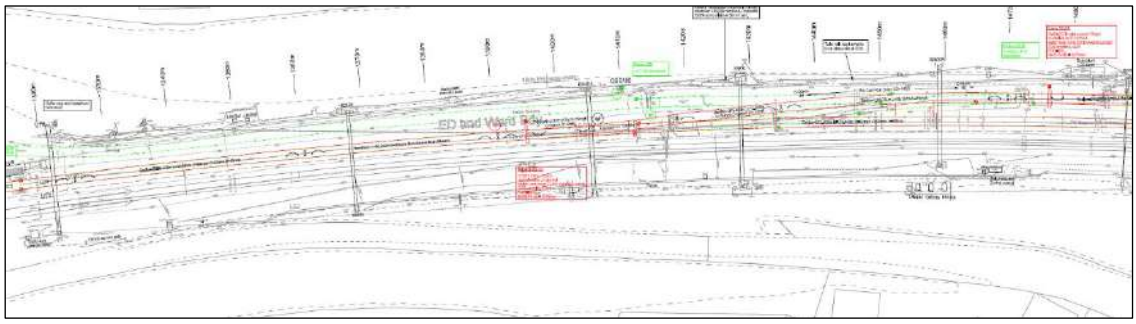


Illustration 1 - Capture of the plan, original drawing of the line.

4. Results

After exposing the different proposals, the pertinent calculations are made to be able to reject those options that fall outside the established limits and accept the final design solution.

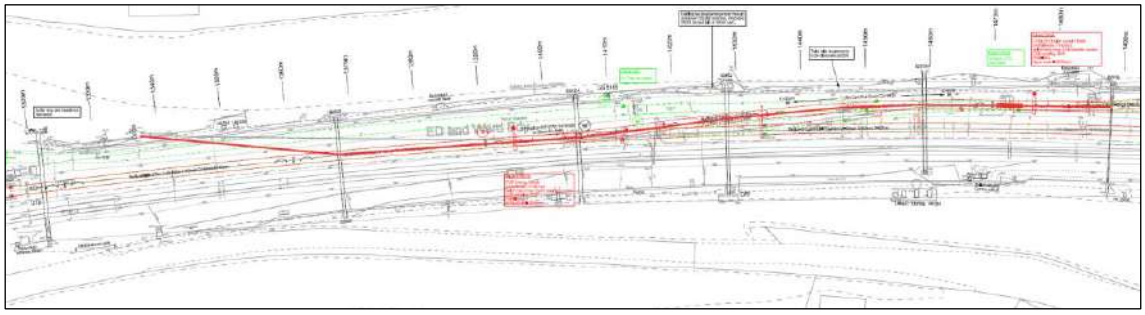


Illustration 2 - Capture of the plane, final drawing of the line.

5. Conclusions

- The analysis of a project of this scale must always be projected from the technical and economic perspective in a parallel and constant way to guarantee an optimal result.
- The prior knowledge of the functionality of the elements of the overhead contact line in this work has been key for the subsequent reasoning of the ideas and problems presented.
- Thanks to the elimination of the top track, it is possible to perfect the layout of the "Down Main" track in order to relieve the tension of the lines and alleviate the turning of the railway.
- The movement of a section insulator must be motivated by non-compliance with the maximum lateral deviation limit and must be carried out according to the needs of the different voltage levels present.

6. References

[MONT02] Montesinos, J., & Carmona, M. (February 2002). Tecnología de catenaria. RENFE.

[KIES08] Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., & Vega, T. (2008). Líneas de contacto para ferrocarriles electrificados: planificación, diseño, instalación, mantenimiento. Erlangen: Siemens AG.

[ADIF21] ADIF. (s.f.). Modelos de Catenaria de Adif. Accessed june 11th 2021 from: http://www.adif.es/

[KEEN18] "Overhead Line Electrification for Railways", Garry Keenor, 2018

[EADI16] Eadic. (2016, may 2nd). Elementos de sustentación para la catenaria C-350. Accessed june 18th 2021 from: https://www.eadic.com/elementos-de-sustentacion-para-la-catenaria-c-350/

[GOUR98] Gourvish, T. (1998). Los ferrocarriles como medio de transporte en Gran Bretaña, 1830 – 1990.

[RIO_08] del Río, E., Martí-Henneberg, J., & Valentín, A. (2008). La Evolución de la Red Ferroviaria en el Reino Unido (1825-2000).

[BRIT19] Britannica, T. E. (2019). Railroad history. Encyclopedia Britannica. Accessed june 20th 2021 from: www.britannica.com/Railroad-history.

[LAMB21] Lambert, T. (2021, march 14th). A history of Chelmsford. Accessed june 2nd 2021 from: https://localhistories.org/a-history-of-chelmsford/

A mis padres,

por ser el casco que mantiene este barco a flote.

A mis hermanos,

por mantener el timón siempre hacia delante.

Y a mis amigos,

porque sin velas ningún barco puede navegar.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción 23

1.1 Motivaciones 23

1.2 Introducción de la zona de trabajo 24

1.3 Objetivos 25

Capítulo 2. Historia del ferrocarril en Gran Bretaña 26

2.1 Origen del ferrocarril revolución del vapor 26

2.2 La máquina del vapor y el ferrocarril del siglo XIX 27

2.3 Expansión británica del ferrocarril en el siglo XX 30

2.4 El presente del ferrocarril de Reino Unido 32

Capítulo 3. Elementos de la catenaria 33

3.1 Líneas generales 33

3.2 Alimentación eléctrica 35

3.2.1 Línea aérea de contacto 35

3.2.2 Tercer carril 36

3.2.3 Catenaria rígida 37

3.3 Línea aérea de contacto 38

3.3.1 Hilo de contacto 38

3.3.1.1 Altura hilo de contacto y altura del sistema 39

3.3.2 Desviación lateral del hilo 39

3.3.2.1 Descentramiento 39

3.3.1.1 Fuerza del viento 40

3.3.2.3 Desviación en vías rectas o curvas 40

3.3.2.4 Desviación lateral máxima 43

3.3.2.5 Fuerza radial 44

3.3.3 Hilo sustentador 44

3.3.4 Péndolas 45

3.3.5 Feeder de acompañamiento 46

3.3.6 Sistema de retorno 47

3.4 Soportes, vanos y compensación 48

3.4.1 Ménsulas 48

3.4.2 Postes, pórticos y semipórticos 50

3.4.3 Vanos 53
3.4.4 Cantones y compensación 53
3.4.4.1 Cantones sin compensación automática 54
3.4.4.2 Cantones compensados automáticamente 54
3.4.4.3 Compensación independiente 54
3.4.5 Seccionamiento 55
3.4.5.1 Seccionamiento de cantón 56
3.4.5.2 Seccionamiento de lámina de aire 56
3.5 Agujas 57
3.5.1 Generalidades 58
3.5.2 Fit free area 59
3.5.3 Proceso de desvío de aguja cruzada 59
3.5.4 Proceso de desvío de aguja tangencial 60
3.5.5 Aisladores de sección 61

Capítulo 4. Diseño de las soluciones 63

4.1 Introducción 63
4.1.1 Criterio del programa Microstation 63
4.2 Estación de Chelmsford 65
4.3 Problemática del proyecto 67
4.3.1 Situación inicial 67
4.3.2 Cuestión a resolver 69
4.4 Soluciones propuestas 72
4.4.1 Propuesta #1 72
4.4.2 Propuesta #2 73
4.4.3 Propuesta #3 75
4.4.4 Propuesta #4 75

Capítulo 5. Cálculo de las soluciones 77

5.1 Introducción 77
5.2 Carga del viento 78
5.2.1 Algoritmo de cálculo 78
5.2.2 Cálculo analítico 82
5.2.3 Valor del "blow off" 87
5.2.4 Valor de la carga del viento añadida a las ménsulas 88

5.3 Desviación lateral del hilo 89
5.4 Corrección aislador de sección 90
5.4.1 Primera opción cambio aislador de sección 93
5.4.2 Segunda opción cambio aislador de sección 94
5.5 Fuerza radial 95
5.5.1 Procedimiento de cálculo 96
5.5.2 Cálculo analítico 97
5.6 Corrección de fuerza 98
5.6.1 Cambios en el pórtico B29/29 100

Capítulo 6. Análisis viabilidad económica 101

Capítulo 7. Objetivos de desarrollo sostenible 103

Capítulo 8. Conclusiones y desarrollos futuros 105

8.1 Introducción 105
8.2 Elección propuesta final 106
8.2.1 Argumentación propuesta #1 106
8.2.2 Argumentación propuesta #2 107
8.2.3 Argumentación propuesta #3 108
8.2.4 Argumentación propuesta #4 108
8.2.5 Elección final 108
8.3 Otras conclusiones 108
8.4 Desarrollos futuros 108

Capítulo 9. Bibliografía 110

ANEXOS 111

Anexo I 111
Anexo II 112
Anexo III 113
Anexo IV 114
Anexo V 115
Anexo VI 116

Índice de figuras

Ilustración 1. Vista aérea de la zona de trabajo *25*

Ilustración 2. Diolkos de la antigua Grecia *26*

Ilustración 3. Esquema de la máquina de vapor *27*

Ilustración 4. Locomotora Salamanca *28*

Ilustración 5. Locomotora The Rocket. *29*

Ilustración 6. Big Four gestoras ferroviales *30*

Ilustración 7. Catenaria moderna *34*

Ilustración 8. Alimentación por línea aérea de contacto *35*

Ilustración 9. Alimentación por tercer carril. *36*

Ilustración 10. Alimentación por catenaria rígida. *37*

Ilustración 11. Secciones de hilo de contacto. *38*

Ilustración 12. Descentramiento del hilo *39*

Ilustración 13. Esquema desviación tramo recto. *41*

Ilustración 14. Esquema desviación lateral tramo curvo. *42*

Ilustración 15. Esquema de zona de operación hilo – pantógrafo en tramo curvo. *44*

Ilustración 16. Esquema elementos de sustentación catenaria *45*

Ilustración 17. Péndola equipotencial *46*

Ilustración 18. Sistema de retorno de electricidad *47*

Ilustración 19. Componentes principales de la línea aérea de contacto *47*

Ilustración 20. Esquema ménsula tubular *49*

Ilustración 21. Esquema ménsula de celosía *49*

Ilustración 22. Poste de acero galvanizado *50*

Ilustración 23. Poste de hormigón. *50*

Ilustración 24. Pórtico B29/33 de la estación de Chelmsford *51*

Ilustración 25. Esquema pórtico funicular *52*

Ilustración 26. Semipórtico B30/03 de la estación de Chelmsford *52*

Ilustración 27. Esquema disposición cantones *53*

Ilustración 28. Compensación de poleas *55*

Ilustración 29. Esquema seccionamiento *56*

Ilustración 30. Aguja en el pórtico B29/32 de Chelmsford. *57*

Ilustración 31. Esquema aguja tangencial *58*

Ilustración 32. Esquema aguja cruzada *59*

Ilustración 33. Acercamiento del hilo al pantógrafo *60*

Ilustración 34. Fuerza de contacto en el pantógrafo *60*

Ilustración 35. Aislador de sección. *61*

Ilustración 36. Fit free area *62*

Ilustración 37. Ubicación ciudad de Chelmsford *65*

Ilustración 38. Tramo de vía de estudio *66*

Ilustración 39. Diagrama inicial de las vías *67*

Ilustración 40. Diagrama de modificación de vías *67*

Ilustración 41. Diagrama punto inicial de la reforma *68*

Ilustración 42. Diagrama punto final de la reforma *68*

Ilustración 43. Diagrama aguja 2353B *69*

Ilustración 44. Diagrama aguja 2353A *69*

Ilustración 45. Diagrama de aguja 2352. ..... *70*

Ilustración 46. Representación puntos de aguja en pórtico B29/31. ..... *70*

Ilustración 47. Diagrama de punto de anclaje inicial de los nuevos hilos. *71*

Ilustración 48. Diagrama de trazado de la propuesta 1. ..... *72*

Ilustración 49. Poste de compensación 29/28D. 73

Ilustración 50. Zona de obras próxima a la zona de trabajo 73

Ilustración 51. Diagrama de trazado de la propuesta 2. 73

Ilustración 52. Pórtico B29/28 en la estación de Chelmsford 74

Ilustración 53. Pórtico B30/01 de la estación de Chelmsford 74

Ilustración 54. Diagrama de trazado de la propuesta 3 75

Ilustración 55. Diagrama de trazado de la propuesta 4. 76

Ilustración 56. Esquema de procedimiento del capítulo 5. 77

Ilustración 57. Algoritmo de cálculo de carga de viento para zonas urbanas 80

Ilustración 58. Mapa de velocidades básicas del viento en Gran Bretaña 81

Ilustración 59. Mapa de altitudes de la ciudad de Chelmsford 82

Ilustración 60. Ubicación de Chelmsford en el mapa de velocidades básicas 82

Ilustración 61. Distancia de la ciudad de Chelmsford a la costa 83

Ilustración 62. Distancia de la estación de Chelmsford al límite de la ciudad. 84

Ilustración 63. Gráfico de obtención del factor de exposición 85

Ilustración 64. Gráfico de obtención del gráfico de corrección de exposición 86

Ilustración 65. Nomenclatura de los vanos 89

Ilustración 66. Captura del mapa eléctrico de la estación de Chelmsford 92

Ilustración 67. Diagrama de la primera opción del cambio del aislador de sección. 93

Ilustración 68. Diagrama de la segunda opción del cambio del aislador de sección. ...94

Ilustración 69. Diagrama del vano final del aislador de sección. 94

Ilustración 70. Ménsula tubular de 48mm con brazo de atirantado 96

Ilustración 71. Esquema de la descomposición de la fuerza radial. 96

Ilustración 72. Descripción del pórtico B29/29. 99

Ilustración 73. Ménsula tubular de 48mm sin brazo de atirantado. 100

Ilustración 74. Situación actual del pórtico B29/28 106

Ilustración 75. Diagrama de la propuesta final del proyecto 108

Índice de tablas

Tabla 1. Longitudes de los vanos de estudio. *79*

Tabla 2. Valores del Blow off *87*

Tabla 3. Resultados de la desviación lateral de los hilos. *91*

Tabla 4. Parámetros de la catenaria y del hilo de contacto. *95*

Tabla 5. Resultados de la fuerza radial en los pórticos de estudio. *97*

Tabla 6. Resultados de la fuerza total en los pórticos de estudio.. ..... *98*

Tabla 7. Resultados finales de la desviación lateral máxima... ..... *106*

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo consiste en el diseño de la adaptación de un tramo de catenaria para la optimización del trazado de una vía de ferrocarril escogida. En el mismo trataremos varias partes, como la historia de la línea férrea, los principales elementos de la vía contemporánea, el estudio de la zona de trabajo y la proposición de nuevas soluciones para su mejor funcionamiento.

Es así como el proyecto se divide en dos grandes bloques: uno de base teórica sobre la que se asientan todos los razonamientos y otro más práctico en el que se trabajará el caso escogido. Éste segundo será el más importante, ya que se estudiarán y propondrán las distintas ideas para la solución de la corrección de la catenaria.

1.1. MOTIVACIONES

La primera motivación para llevar a cabo este proyecto como mi Trabajo de Fin de Grado ha sido la necesidad real de una remodelación de la línea aérea de contacto en el sistema catenario de la estación de Chelmsford. Los equipos utilizados en las distintas vías de ferrocarril tienen una vida útil fija que determina su funcionalidad de manera óptima. Por lo tanto, a lo largo de los años se van observando en diferentes inspecciones técnicas con el fin de prever cualquier peligro de accidente. Cuando se acerca el final de este periodo (independiente de cada equipo) se requiere un reemplazo de éstos por su versión renovada.

Es en esta reforma, donde se estudia la posibilidad de cambiar algunos aspectos de la vía, de esta manera si alguno de los equipos a renovar tuviera la posibilidad de cumplir su función de una mejor manera, se aprovecha su cambio para replantear su situación.

En el caso de la estación de Chelmsford, como se verá más adelante, se cuestiona la eliminación de un tramo de línea en las proximidades de la estación. Esta decisión diverge

en múltiplos cambios de trazado de las vías que al aceptarlos se abre un gran abanico de opciones sobre cómo llevar a cabo la reforma de su línea aérea de contacto. Cada mínima acción ha de ser profundamente pensada, evaluando todos los factores afectados y analizando los parámetros en juego para poder tomar una decisión final.

Para todas estas modificaciones no sólo se argumentarán desde un punto de vista técnico. El presupuesto de un proyecto de esta escala es el factor más importante a tener en cuenta de cara a las empresas encargadas de financiar la reforma. Es por esto que en igual medida, existe también la motivación por encontrar la solución que de mejor manera optimice la viabilidad y el coste de dicha reforma del tramo de línea aérea de contacto de la estación de inglesa.

Por último, existe la motivación personal de conocer y manejar la tecnología existente sobre las líneas aéreas de contacto, así como ser capaz de saber distinguir entre los diseños de trazados de catenaria.

1.2. INTRODUCCIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO

La ciudad de Chelmsford está situada al sureste de Inglaterra, concretamente a unos 50 kilómetros al noreste de Londres, en el condado de Essex. Cuenta con una importante estación ferrovial, la cual juega un papel muy importante en la "Great Eastern Main Line" al ser el nexo entre otras ciudades del este como Norwich o Ipswich. Es por esto por lo que hoy en día es la estación más transitada de Reino Unido, fuera de la capital inglesa.

La estación fue construida en 1842 y debido a la orografía de la zona, ésta fue situada en uno de los tres viaductos que cruzan la ciudad. Esta particular cualidad implica diferentes planteamientos a la hora de diseñar el trazado de la catenaria, pero en el caso de estudio el tramo considerado se encuentra a nivel del suelo y por lo tanto no hará faltar cambiar nuestro planteamiento.

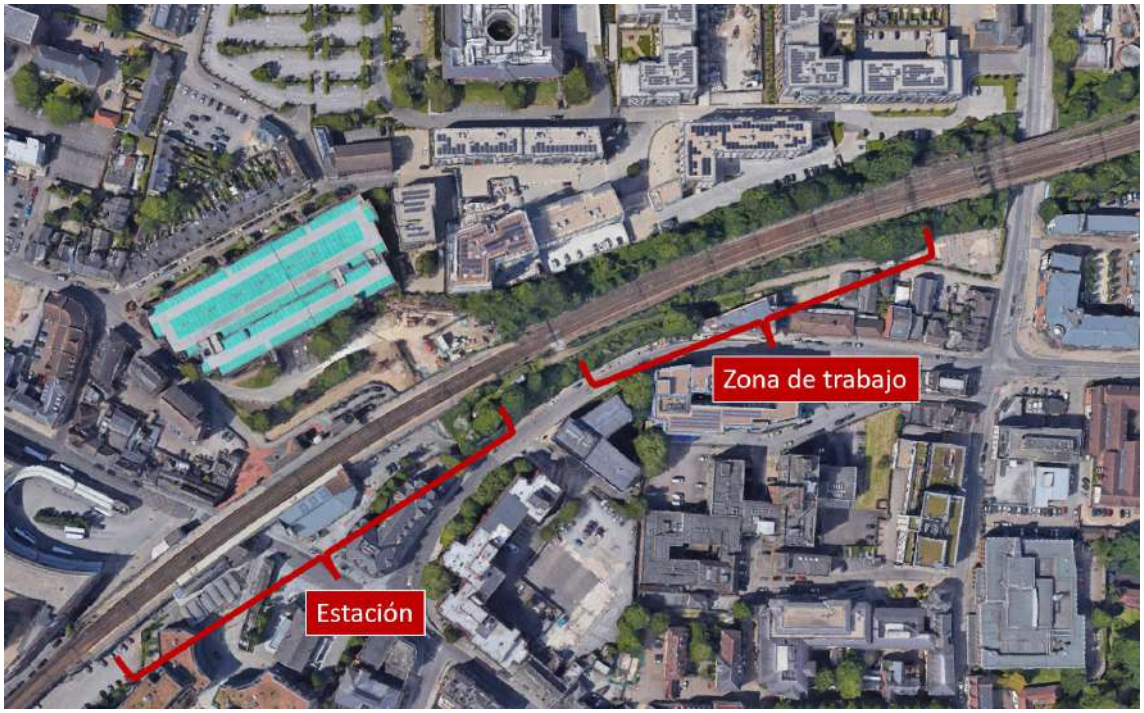


Ilustración 1. Vista aérea de la zona de trabajo. (Fuente: Google Earth)

1.3. OBJETIVOS

Entre todos los objetivos que se cubrirán en este proyecto, podemos destacar primariamente las siguientes intenciones:

- Resumir los hitos más importantes de la historia del ferrocarril en Gran Bretaña, centrados en su historia en el país anglosajón, así como estudiar los elementos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema catenario.
- Analizar el caso escogido del trazado de vía, según las técnicas de diseño establecidas y los elementos estudiados con anterioridad.
- Concluir con la solución óptima, dentro de los límites físicos, económicos y ecológicos y comparar las mejoras entre la nueva y antigua colocación de la catenaria.

2. HISTORIA DEL FERROCARRIL EN GRAN BRETAÑA

2.1. ORIGEN DEL FERROCARRIL Y LA REVOLUCIÓN DEL VAPOR.

Para poder hablar de la evolución del sistema ferroviario hasta como lo conocemos hoy en día, debemos retroceder varios siglos, en concreto hasta el siglo VI a. C. donde se data del primer uso de un medio de transporte guiado sobre una vía construida de forma particular para la movilidad de personas o mercancías de un punto a otro. Esto ocurrió en el istmo de Corinto, donde se confeccionó una ruta para transportar las naves en unas plataformas, guiadas sobre surcos en la piedra.

Ilustración 2. Diolkos de la antigua Grecia.

(Fuente: https://www.cienciahistorica.com/2017/03/22/petrocarril-la-antigua-grecia/*)*

A pesar de ser un sistema de transporte revolucionario en nuestros días, por aquel entonces, al ser accionado gracias a la fuerza humana o animal y no disponer de una avanzada red de vías edificadas para circular, este rudimentario sistema tenía muy pocas ventajas frente a un simple carromato tirado por caballos. Su uso fue escaso pero continuo, como podemos comprobar con la imagen de la vidriera de la catedral de Friburgo de Brisgovia de 1350, una de las primeras pruebas que tenemos del uso de los raíles, donde se puede divisar unas vías de madera para el transporte de personas.

Gracias a la explotación de la minería en Europa, en el siglo XVI empieza a extenderse el uso de carretas guiadas por raíles de madera para el transporte del excedente de material que generaba esta actividad. Es en este contexto donde se divisa un futuro claro a esta tecnología, lo que impulsan los continuos avances a finales del siglo XVI y principios del XVII, hasta que todo cambia con el motor de vapor.

2.2. LA MÁQUINA DEL VAPOR Y EL FERROCARRIL DEL SIGLO XIX

El principio básico de la locomotora de vapor consiste en generar un elevado nivel de presión en la caldera de la misma, de tal forma que sea capaz de mover los pistones conectados mecánicamente a las ruedas de ésta. Con ello se logra, por medio de la continua combustión del carbón, obtener el correspondiente vapor de agua en ebullición.

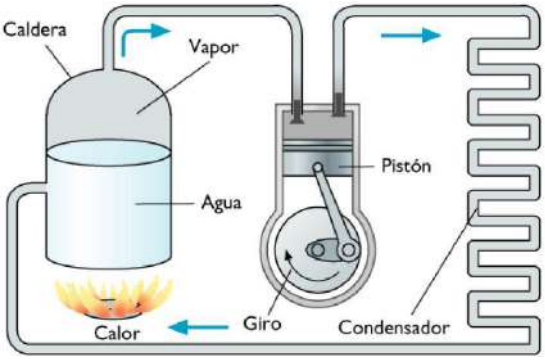


Ilustración 3. Esquema de la máquina de vapor. (Fuente: http://iessantabarbara.es/departamentos/fisica/tecnologia/webquest/maquinas/WebMaquinas/html2/maquina%20de%20vapor.html)

En la primera década del siglo XIX, James Watt realizó unas mejoras en la máquina de Newcomen, logrando la primera máquina de vapor, pero debido a su enorme masa y a la patente impuesta que no permitía a otros ingenieros trabajar sobre su proyecto, se quedó en una máquina estacionaria.

De esta forma, el británico Richard Trevithick logró adaptar la máquina utilizada para bombear agua con el fin de movilizar un vehículo de cinco vagones, diez toneladas de hierro y setenta hombres, hasta lograr una velocidad media de 3,9 km/h. Se la bautizó

como "Pennydarren". Aunque funcionaba correctamente, no logró mucha popularidad debido a que los raíles existentes no estaban pensados para la pesada maquinaria.

No fue hasta 1812 que el oficial de la marina británica Matthew Murray consiguió solucionar el problema del peso de la máquina: si era muy pesada, como la de Trevithick, acababa rompiendo los raíles de hierro y, por otro lado, si era muy ligera no conseguía el suficiente rozamiento para realizar su recorrido. Esto lo logró gracias a su invención de la locomotora de dos cilindros, llamada "Salamanca".

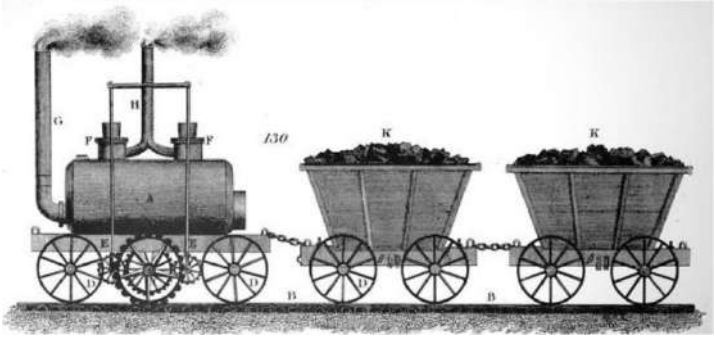


Ilustración 4. Locomotora Salamanca. (Fuente: https://www.alamy.es/imagenes/salamanca-locomotive.html)

Finalmente, un ingeniero inglés llamado George Stephenson recopiló todos los conocimientos anteriormente citados para crear en 1825 la máquina "Locomotion" utilizada en la vía de Stockton y Darlington, la primera vía del sistema de ferrocarril público. Cinco años más tarde creó una versión mejorada de su locomotora denominada "The Rocket", con la cual ganó el famoso concurso de locomotoras "Rainhill Trials" a partir del cual se convirtió en un referente mundial y fue considerado el padre de los ferrocarriles.

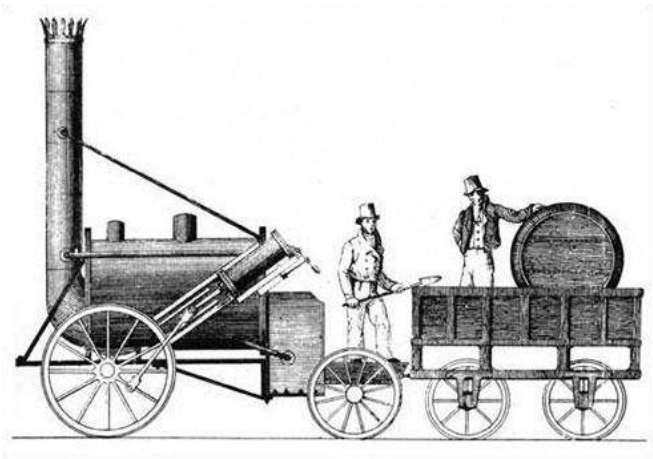


Ilustración 5. Locomotora The Rocket. (Fuente: https://www.nms.ac.uk/explore-our-collections/stories/science-and-technology/model-of-stephensons-rocket/)

A partir de esta invención, la isla británica padeció un importante crecimiento en los kilómetros de vía construidos durante el siglo XIX. Además, en 1830 se utilizó la locomotora de Stephenson para la primera vía ferroviaria pública moderna que conectaba las ciudades de Liverpool y Manchester. Fue tal la expansión que en la década de 1850, el país contaba con aproximadamente 9600 km de vía, y a finales del siglo la red había crecido hasta contar con más de 25000 km edificados.

En este contexto, hacia la segunda mitad del siglo XIX, el sistema ferroviario británico contaba con las empresas más poderosas del mundo: las 15 primeras empresas compartían el 75% de los ingresos del mercado ferrovial hacia 1850, cifra que creció hasta el 83% para 1870. Era tal el volumen de las empresas ferroviarias del momento que a finales del siglo el gobierno británico comenzó con la imposición de controles y leyes que redujeron el crecimiento del sector. Algunas de estas normas obligaban a ofertar una reducción en las tarifas de los billetes de los trabajadores o limitar el número de horas trabajadas.

2.3. EXPANSIÓN BRITÁNICA DEL FERROCARRIL EN EL SIGLO XX

Durante la primera década del siglo como respuesta de las fuertes reducciones del estado, surgieron una serie de acuerdos en forma de economías de explotación en el sector de las mercancías. De la misma manera hubo intentos de fusiones entre compañías de ferrocarril, los cuales fueron bloqueados por el gobierno.

Esta situación cambió por completo con el estallido de la Primera Guerra Mundial. Todas estas compañías pasaron a estar bajo el control del estado, el cual lo utilizaba como transporte de mercancía de guerra. De esta forma pasaron a estar pésimamente mantenidos debido al uso excesivo que se les dieron. En 1918 hubo un primer rechazo de parte del gobierno liberal-conservador, pero no fue hasta 1921 que se produjo un icónico cambio en la historia moderna de los ferrocarriles. La Ley de Ferrocarriles consiguió la

citada nacionalización, derivando en una fusión de las 123 compañías del momento en cuatro grandes ("Big Four") zonas de transporte: London, Midland & Scottish, Great Western y Southern, bajo el mandato del ministerio de transportes.

El objetivo de esta ley fue aumentar la productividad del sector, acabar con las rivalidades de precios, multiplicar los servicios ofrecidos y de esta manera conseguir maximizar los beneficios. Por lo tanto, la nueva etapa de los ferrocarriles de Gran Bretaña estuvo marcada por una fuerte regulación de los servicios.

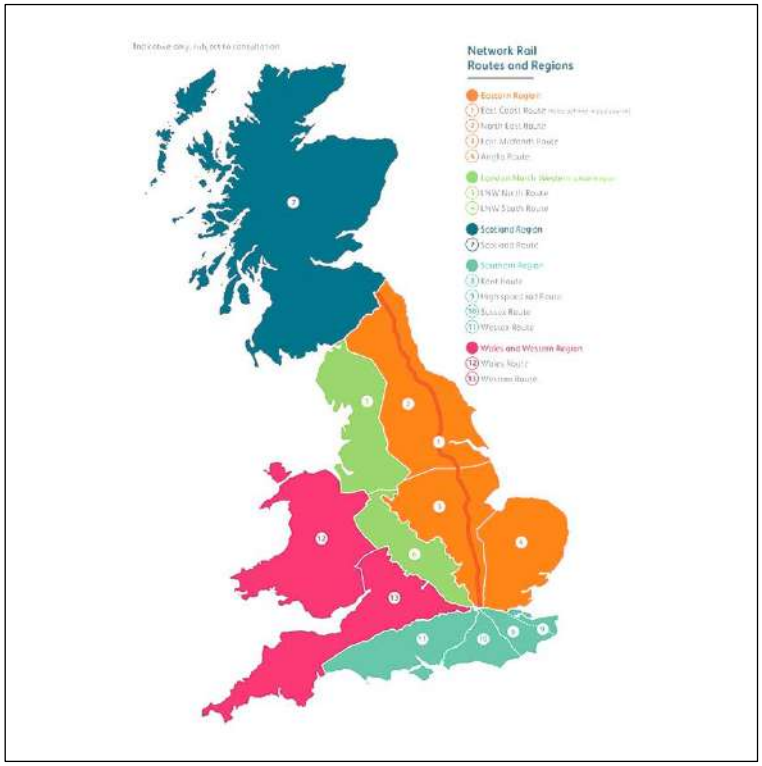


Ilustración 6. Big Four gestoras ferroviales. (Fuente: https://www.pikpng.com/pngvi/hxTiThT_map-of-network-rails-routes-and-regions-brexit-referendum-map-results-clipart/)

Pero en vez de desarrollarse como una etapa de expansión económico, en el periodo de 1923 a 1939, las imposiciones del estado no hicieron más que fortalecer la estructura estatal e inflexible que regía el sector ferroviario. El control estrecho de las tarifas junto con el resto de los deberes de las "Big Four" bajo el mandato gubernamental, impidieron la aparición de nuevas mejoras. Por otro lado, fue una época marcada por la rápida evolución de nuevas tecnologías y, con esto, la aparición y explotación de nuevas formas de transporte. Las carreteras y mares cobraban cada vez más importancia y se veía que la

reforma de 1921 no fue un acierto para los ferrocarriles británicos. Esto se juntó con la depresión económica de 1929 hundiendo todavía más el estado del sector. Las compañías no aguantaban más y pedían reformas de las obligaciones impuestas que les situaban en una clara desventaja frente a los otros medios.

El estallido de la Segunda Guerra Mundial impulsó finalmente al estado a la centralización y nacionalización del sector ferroviario. En 1947, se declaró que la única posibilidad de solución para las industrias de necesidades básicas era bajo la propiedad del estado. Por ello la Ley de Transporte englobó a un numeroso grupo de sectores que a partir de ese momento empezaron a formar parte del dominio público.

Además, con el "Transport Act" de 1947 terminó la división de las "Big four" y nació un nuevo sistema ferrovial nacionalizado llamado "British Railways" dividido en seis facciones inspiradas en su antecesor:

- Scottish Region of British Railways
- North Eastern Region of British Railways
- Western Region of British Railways
- Eastern Region of British Railways
- Southern Region of British Railways
- London Midland Region of British Railways

Durante la segunda mitad del siglo XX se produjeron numerosos cierres de líneas debido al declive que estaba sufriendo el "British Railways". El nuevo levantamiento de esta crisis del sector ferroviario sin duda fue motivado por dos acciones que supusieron un antes y un después en la industria moderna del ferrocarril.

Primero en 1963, se promulgó una ley que derivó en el reemplazo de la gestora "British Railways" por la nueva "British Railways Board". La nueva gestora promulgó un plan masivo de cierre de líneas secundarias por todo Reino Unido conocido con el nombre de "Bleeching Axe" mediante el cual la red ferroviaria se redujo en nada menos que 11 mil kilómetros de vías, con el fin de recortar gastos considerados inútiles derivados de todas estas vías.

Tras esta fatal noticia para la sociedad británica, "British Railways Board" se vio lógicamente afectada con una bajada masiva de pasajeros que no residían cerca de las grandes ciudades. En este contexto entra el segundo hito que frenaría esa crisis del sector: la electrificación y dieselización de las locomotoras para reemplazar las anticuadas máquinas de vapor en la década de 1960 y 1970.

De esta forma, el sector ferrovial en Reino Unido volvió a recuperar los pasajeros perdidos por el "Bleeching" durante la segunda mitad del siglo. Así, 1994 comenzó la privatización y se dividieron las funciones presentes. La gestora que pasó a encargarse del transporte de los pasajeros "per se", mientras que la implantación y mantenimiento de las vías pasó a manos de la empresa "Railtrack".

2.4. EL PRESENTE DEL FERROCARRIL DE REINO UNIDO

En medio de la expansión económica, ocurre en el año 2000 un terrible accidente cerca de la ciudad de Hatfield. Las cuatro muertes que dejó el accidente desencadenaron un sinfín de nuevas medidas de seguridad aplicadas a todas las líneas de la isla. De esta forma y con la mala reputación que quedó de la empresa, se reemplazó por el actual organismo "Network Rail", el cual toma las funciones del cuidado de las infraestructuras de las vías. Desde ese momento se redactó toda una nueva normativa que sigue vigente en nuestros días.

Esta entidad implantada por el gobierno británico, no tiene fines lucrativos, por lo que la financiación de todos estos proyectos de renovación y cuidado de líneas se basa en parte de las subvenciones recibidas por el estado y por otra parte, de las tarifas cobradas las empresas que quieren formar parte de la red.

3. ELEMENTOS DE LA CATENARIA

Para poder comprender la situación de la estación de Chelmsford es indispensable tener una base sólida de conocimientos sobre la ingeniería que rodea a todo el sistema técnico de la catenaria. Es por ello por lo que a lo largo de este capítulo se analizarán los elementos que han sido considerados más importantes para poder desarrollar de forma óptima las soluciones de nuestro problema.

3.1. LINEAS GENERALES

Como hemos visto en el anterior capítulo del trabajo, hace tiempo que los ferrocarriles pasaron de funcionar a base de la combustión del carbón para ser alimentados a través de energía eléctrica. Esta alimentación es recibida por medio de la constante fricción entre el *pantógrafo* (situado en la parte superior del ferrocarril y encargado de captar la corriente) y un elemento conductor por el cual transcurre la corriente eléctrica a lo largo de su recorrido.

Todo lo que resta de los elementos de la catenaria se diseñan para que este conductor (llamado *hilo de contacto*) sea lo más paralelo posible a la vía y así aumentar el rendimiento de la transmisión energética. Para garantizar este paralelismo, el hilo de contacto es sujetado a través de unas *péndolas* por un *hilo sustentador*, fijado a unos brazos (*ménsulas*) que salen de unos *postes* o *pórticos*, dependiendo de las necesidades del tramo de vía.

A causa de la constante bifurcación de las vías para formar nuevos caminos en la red ferroviaria, nace un elemento fundamental para asegurar la continuidad de la alimentación en la catenaria: la *aguja*. Como veremos más adelante, las agujas consiguen, gracias a un delicado y complejo proceso, alternar el contacto del pantógrafo con un nuevo hilo sin necesidad de modificar la velocidad del ferrocarril.

Ilustración 7. Catenaria moderna. (Fuente:https://www.trenvista.net/a-fondo/la-electrificacion-de-los-ferrocarriles/)

3.2. ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

Para lograr la transmisión de energía a lo largo del recorrido del ferrocarril, podemos encontrar distintos tipos de sistemas, de más a menos común:

- Línea aérea de contacto o catenaria
- Tercer carril
- Catenaria rígida

3.2.1 Línea aérea de contacto

La línea aérea de contacto, catenaria flexible o simplemente catenaria es el sistema de alimentación más utilizado globalmente, y el que se usará en el desarrollo de este proyecto, el cual consta de un conjunto de cables situados a una altura determinada del tren que captan la corriente a través del pantógrafo.

El término catenaria hace referencia a la forma que dejan los cables en suspensión, parecidos a la curva de la función catenaria. Por ello, cuando se mencione este término, se refiere a todo el conjunto de elementos que forman la línea aérea de transporte y captación de corriente.

Ilustración 8. Alimentación por línea aérea de contacto. (Fuente: https://radioguadalquivir.com/2021/03/30/adif-adjudica-obras-de-mejora-en-la-catenaria-entre-espeluy-y-montoro-en-las-provincias-de-jaen-y-cordoba/)

Por otro lado, como veremos en comparación con los otros sistemas de alimentación, que es el más seguro al estar a una cierta altura del nivel del suelo, disminuyendo el riesgo de accidentes por contacto físico.

3.2.2. Tercer carril

Para electrificar las líneas subterráneas o urbanas, que pueden presentar dificultades al instalar un sistema aéreo por limitaciones del gálibo, se utiliza este método. Consta de un conductor paralelo a los raíles, aislado del suelo y electrificado en su totalidad. Por otro lado, el ferrocarril cuenta con un elemento extensible captador de corriente, denominado patín.

Como ventaja, tenemos un importante ahorro en la estructura de la vía, ya que no necesitamos ningún soporte para mantener el conductor en una posición deseada, pero a su vez aumenta el riesgo de accidente por contacto de parte de personas o animales.

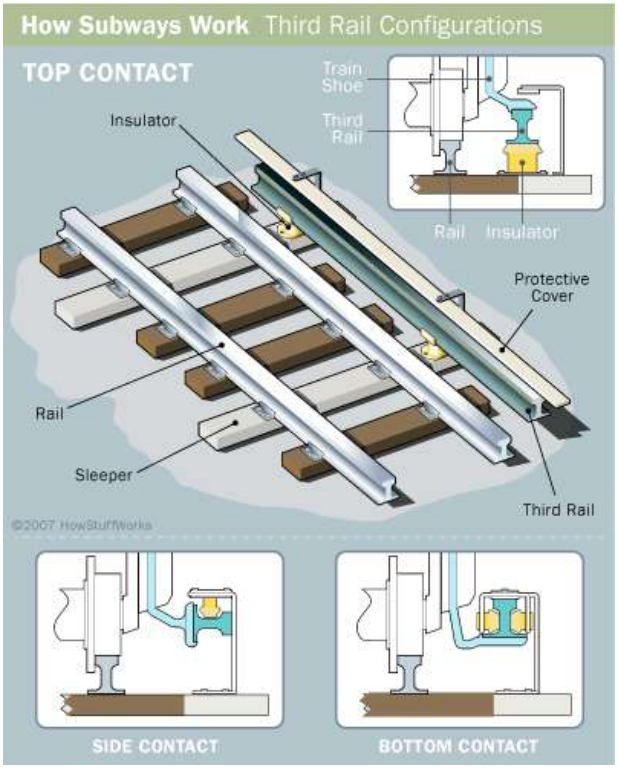


Ilustración 9. Alimentación por tercer carril. (Fuente: https://www.wikiwand.com/es/Sistema_de_electrificaci%C3%B3n_ferroviaria)

3.2.3. Catenaria rígida

Como combinación de los dos sistemas anteriores, nace la catenaria rígida: el conductor compuesto de un perfil rígido se sitúa en la parte superior del gálibo cuando el espacio disponible es reducido. También existe la posibilidad de diseñar un perfil extrusionado, donde en el interior se fija el hilo conductor que entra en contacto con el pantógrafo.

Como gran ventaja, se reduce el riesgo de accidente y el conductor solo ha de superar la altura mínima establecida para la línea de contacto al no requerir de la estructura de sujeción que veremos más adelante para la catenaria flexible. Por otra parte, aumenta el peso al necesitar un perfil rígido y sólo se usa para velocidades menores de los 100 km/h, por lo que resulta idóneo para tramos subterráneos como túneles, generando un menor coste de construcción y montaje.

Ilustración 10. Alimentación por catenaria rígida. (Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Barcelona_metro_pl_Espanya.JPG)

3.3. LINEA AÉREA DE CONTACTO

En este apartado trataremos lo que denominaremos como los "fundamentos internos" de la catenaria, es decir, aquellos elementos que forman la línea aérea de contacto y se encargan de transportar la corriente a lo largo de la vía.

Más adelante veremos los "fundamentos externos", donde se conocerán todos los elementos encargados de soportar la catenaria y asegurar su trazado.

3.3.1. Hilo de contacto

Como hemos mencionado anteriormente, el hilo de contacto es el elemento fundamental de la línea aérea de contacto, encargado de transmitir la corriente eléctrica a los motores gracias al rozamiento con el pantógrafo.

Se fabrican con dos ranuras a lo largo de su recorrido para facilitar su agarre y que pueda frotar sin interrupciones con el pantógrafo. Los materiales usados poseen una alta conductividad con objeto de aumentar el rendimiento de la transmisión, como puede ser el cobre electrolítico, o aleaciones de plata, cadmio y magnesio para soportar mayores tensiones de trabajo, necesario para tramos de alta velocidad.

Por lo general, se usa un único hilo cuando trabajemos en corriente alterna, y dos para corriente continua. La elección de la sección a utilizar variará en función de la tensión de la línea, siendo valores típicos 107, 120 y 150 milímetros cuadrados. Por otro lado, la forma de ésta podrá ser circular o plana dependiendo del ferrocarril que vaya a alimentar.

Ilustración 11. Secciones de hilo de contacto. (Fuente: https://lamifil.be/products/contact-wire/)

3.3.1.1. Altura hilo de contacto y altura del sistema

La primera hace referencia a la distancia vertical medida desde el plano de rodamiento de los raíles del ferrocarril hasta la posición del hilo de contacto. La segunda, por otro lado, tiene que ver con la diferencia existente entre la posición del hilo sustentador y el hilo de contacto. Para el modelo de catenaria CA-160, la altura del hilo de contacto es de 4,60 metros y la del sistema, 1,3 metros, según la norma Nr 440.1.0493_MAN_001.

3.3.2. Desviación lateral del hilo

Teóricamente, el hilo a lo largo del vano (como veremos más adelante, un vano es una unidad de espacio comprendido entre dos anclajes) recorrerá una línea recta al estar anclado al principio y al final de éste. Esa sería la posición óptima para la captación de corriente por parte del pantógrafo, pero existen tres factores que provocarán que los hilos se desvíen lateralmente de su posición inicial, trazando una curva: el descentramiento, el efecto del viento y la geometría de la vía: curva o recta.

3.3.2.1. Descentramiento

El posicionamiento teórico del hilo siempre centrado con el eje de la vía provocaría que el pantógrafo frotase siempre desde el mismo punto y terminaría fallando. Por eso se hace variar el desplazamiento horizontal del hilo, para minimizar este desgaste. Podrá ir variando a lo largo de la vía, pero siempre se considerará positivo hacia la derecha del eje de la vía, y positivo a su izquierda. Los valores exactos se especificarán en los cálculos más adelante.

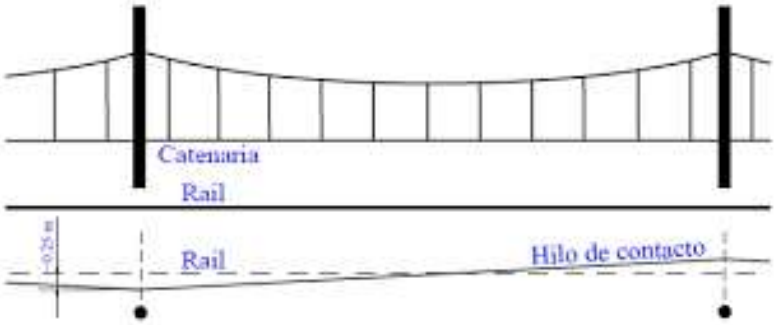


Ilustración 12. Descentramiento del hilo. (Fuente: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/17989/PFC_Cesar_Clemente_Bueno.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

3.3.2.2. Fuerza del viento

El viento será siempre un agente impredecible a la vez que extremadamente importante a tener en cuenta. Depende de muchos factores como la ubicación de la línea, la estación del año, la velocidad del mismo o la altura respecto del nivel del mar. La norma que combina todos estos parámetros consigue calcular la presión del viento por unidad de longitud (N/m) que sufrirán los distintos hilos. Se definirá como q_{wc} y su cálculo detallado se desarrollará a lo largo del capítulo 5 con los cálculos justificativos.

Por otra parte también conseguimos calcular el "blow off" o desviación del hilo en metros por culpa del efecto del viento. Ésta dependerá de la presión antes mencionada (q_{wc}), junto con la longitud del vano donde nos encontremos (a) y la tensión mecánica a la que están los hilos (T). Su fórmula se muestra a continuación:

$$d = \frac{q_{wc} \cdot a^2}{8 \cdot T}$$

Ecuación 1. "Blow off"

3.3.2.3. Desviación en vías rectas o curvas

Para poder estudiar la desviación del hilo en su totalidad, es necesario añadir un último factor que condicionará el punto de máxima desviación de la catenaria, para así poder diseñar nuestra línea con el objetivo de evitar sobretensiones y colapsos: tramos de vía rectos y curvos.

- Vanos rectos

En la ausencia de descentramiento, si el hilo recorriera siempre la vía paralela a ésta, el punto de máxima desviación sería el punto medio del vano en presencia de la fuerza del viento. Pero como hemos explicado antes, es necesario el descentramiento para evitar el desgaste excesivo del pantógrafo. Combinando estos dos factores podemos justificar que el punto de máxima desviación no será el centro del vano.

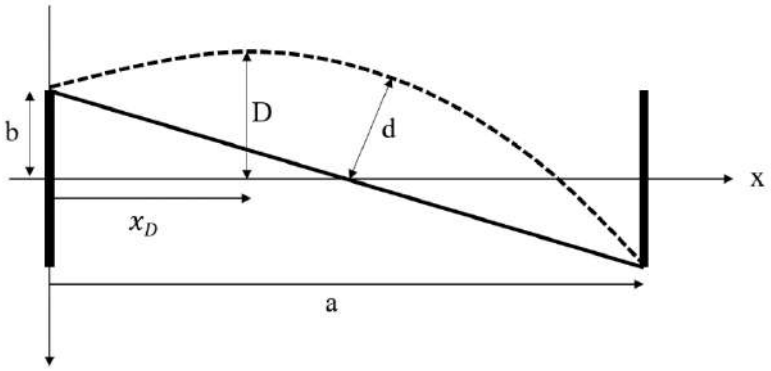


Ilustración 13. Esquema desviación tramo recto.

Como podemos observar de la imagen anterior, d será la desviación "blow off" provocada por el viento, D la máxima desviación en el tramo, x_D la posición del punto de máxima desviación, a la longitud del vano y b el descentramiento en los postes. De esta forma, todos los parámetros serán datos menos el descentramiento máximo y su posición.

El valor del "blow off" no es de mucha utilidad ya que no está en la dirección de la desviación máxima. Por lo tanto, en función de los ejes representados en la imagen, se diseñarán dos ecuaciones que calcularán la distancia al eje de la vía: una del cable sin acción del viento (línea continua, $y_{d'}$) y otra para el cable bajo la acción del viento (línea discontinua, y_d):

$$y_{d'}(x) = \frac{2b}{a} \cdot x - b$$

Ecuación 2. Desviación por descentramiento en tramo recto.

$$y_d(x) = \frac{q_{wc} \cdot x \cdot (a - x)}{2T}$$

Ecuación 3. Desviación por el viento en tramo recto.

Por lo tanto la suma de las anteriores dará la ecuación completa del desplazamiento lateral:

$$y_D(x) = \left[\frac{2b}{a} + \frac{q_{wc}(a - x)}{2T}\right] \cdot x - b$$

Ecuación 4. Desviación total en tramo recto.

Después de derivar e igualar a cero, se obtiene el punto donde el desplazamiento es máximo x_D, y sustituyendo de nuevo en la anterior ecuación, se conseguirá una sola ecuación que del valor del desplazamiento máximo:

$$D = \frac{q_{wc} \cdot a^2}{8 \cdot T} + \frac{2 \cdot T \cdot b^2}{q_{wc} \cdot a^2}$$

Ecuación 5. Desviación lateral máxima en tramo recto.

- Vanos curvos

Si se aplicaran las mismas ecuaciones del tramo recto al tramo curvo, el punto de máxima desviación resultante no sería el real, ya que el propio trazado de la vía curva ya genera una desviación que ha de tenerse en cuenta. El nuevo diagrama resultante para este caso es el siguiente:

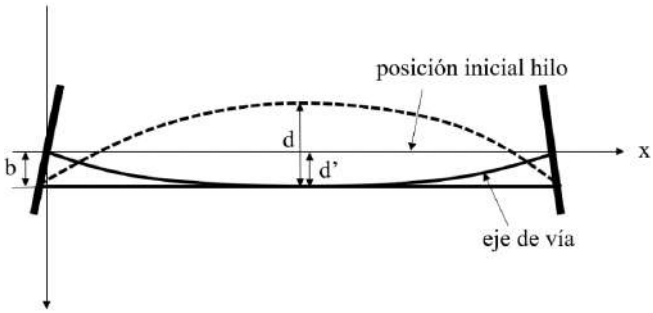


Ilustración 14. Esquema desviación lateral tramo curvo.

La curva inferior representa el eje de vía, cuyos extremos se unen por la posición del hilo sin viento ni descentramiento, la línea paralela a ésta indica la posición del hilo con el descentramiento. Por tanto la curva discontinua superior es el caso del hilo con la desviación del viento y con el descentramiento.

En la práctica se intenta aproximar el descentramiento (b) al valor de la desviación por el trazado de la curva (d') con el fin de que el hilo con el descentramiento y en su posición estática no tenga desviación en el centro del vano. Por eso el descentramiento siempre se posicionará en la dirección hacia afuera de la curva y restará en la ecuación de la desviación total con valor muy parecido a la desviación por el trazado.

Como se ha comentado, b es el ancho del descentramiento, d' la desviación debida a la curva y d la desviación debida al viento. Mientras que la desviación causada por el viento

la obtenemos del "blow off", la desviación por el trazado de la curva se razona considerando el término geométrico de la flecha de un círculo. De esta forma, la desviación total que buscamos es la suma de las dos anteriores.

$$d' = \frac{a^2}{8 \cdot R}$$

Ecuación 6. Desviación debida al trazado en tramo curvo.

$$D = d + d' - b$$

Ecuación 7. Desviación lateral máxima en tramo curvo.

3.3.2.4. Desviación lateral máxima

Como el descentramiento está pensado para que el hilo no recorra siempre por el mismo punto y acabe dañando los pantógrafos, existe una zona trabajo en éstos donde el hilo puede frotar sin riesgo de descarrilamiento del pantógrafo (el hilo se sale de la mesilla del pantógrafo) y acabe cortando la alimentación del ferrocarril. Esta zona se diseña teniendo en cuenta descentramientos, desviaciones por el trazado, cargas de viento y demás factores que juntos constituyen la desviación lateral máxima.

Aunque está más o menos estandarizado, existen variaciones entre países debido a factores como las normativas de las empresas que controlan el sector ferrovial en cada uno o las condiciones geográficas y climatológicas que puedan darse.

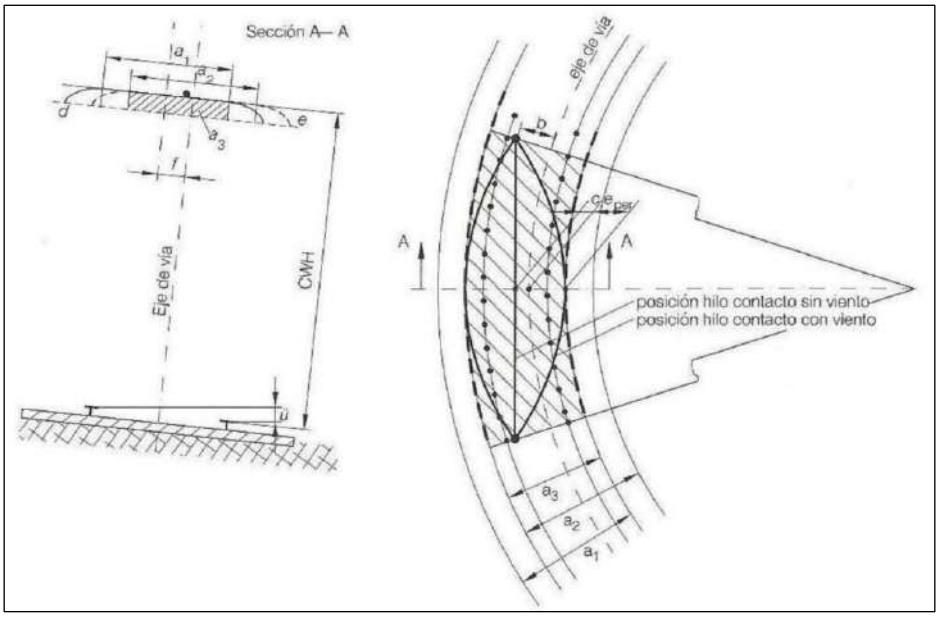


Ilustración 15. Esquema de zona de operación hilo – pantógrafo en tramo curvo. [KIES08]

3.3.2.5. Fuerza radial

La fuerza en dirección radial sufrida por el hilo de contacto se debe en gran parte por el descentramiento provocado para evitar el desgaste del pantógrafo, esto es, por el ángulo que forman los cables al girar entre vano y vano. Las péndolas, encargadas de sujetar el hilo, no se ubican todas a la misma distancia de sus postes, sino que fuerzan el "zig-zag" para generar el descentramiento comentado. Éstas son las encargadas de soportar esta tensión convertida en fuerza proveniente de los distintos hilos.

Esta disposición provoca en el hilo una serie de tensiones en la dirección de enganche, las cuales pueden variar dependiendo del trazado de la vía: no será la misma tensión, un tensionado del cableado en línea recta que a lo largo de una curva. Cuanto más cerrada sea la curva, menor el ángulo entre los cables y mayor la tensión que sufrirá la ménsula, por lo que el ángulo de trayectoria de los hilos será uno de los parámetros clave a la hora de diseñar la línea aérea de contacto.

Más adelante en el capítulo de cálculos justificativos, se enunciará el procedimiento necesario para poder calcular la fuerza que sufre la péndola en función del ángulo formado, para poder aceptar o descartar la solución en cuestión.

3.3.3. Hilo sustentador

Hilo que cuya función es, como su nombre indica, asegurar la suspensión del hilo de contacto, soportado las fuerzas mecánicas de los distintos elementos que cuelgan de él.

El material a utilizar varía en función del voltaje presente en ese tramo, usando secciones de cobre o bronce de hasta 300 milímetros cuadrados para corriente alterna, mientras que para corriente continua se empleará bronce de hasta 65 milímetros cuadrados.

Por otro lado, el cable más famoso se denomina Cooperwell, diseñado para líneas de alta velocidad, consta de alambres de acero rodeados por una capa de bronce. En vías secundarias se emplea un cable simple de acero, que aunque tiene una mayor resistencia

eléctrica, su menor coste hace de éste una opción muy viable para tramos de baja velocidad.

Dependiendo de su posición, se pueden denominar los distintos tipos de catenaria: suspendida, si el cable se encuentra colgando por debajo de la ménsula o apoyada, si pasa por encima de la misma.

En otras ocasiones se suelen utilizar falsos sustentadores: hilos intermedios cortos entre el sustentador y el de contacto que garantizan la estructura y rigidez de la catenaria, formando así lo que se denomina péndola en Y.

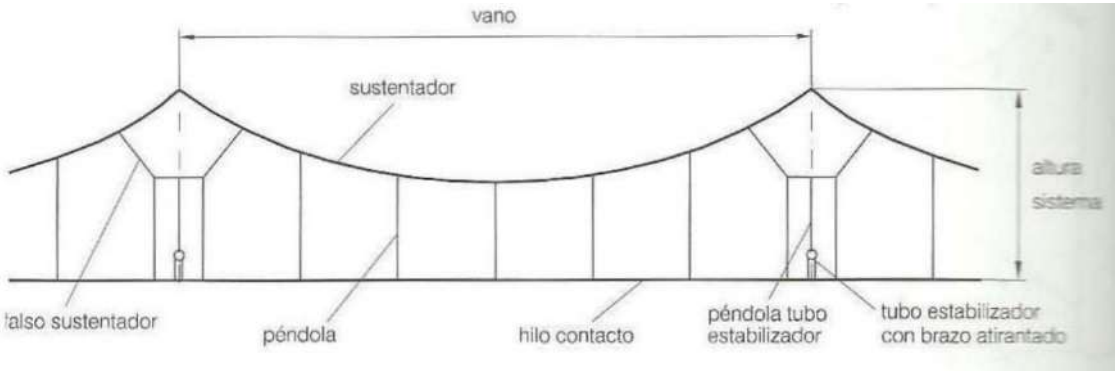


Ilustración 16. Esquema elementos de sustentación catenaria. [KIES08]

3.3.4. Péndolas

Elementos de conexión entre el hilo sustentador y el hilo de contacto cuyo objetivo es mantener la separación de la catenaria con los raíles invariable.

Consisten en cables de cobre o bronce de longitud variable dependiendo de su posición y la altura objetivo a la que ha de estar la catenaria, colocados a lo largo del recorrido de la vía. Para asegurar el paso continuo del pantógrafo, las péndolas cuentan con unas grifas en los extremos que se cierran en las ranuras de los hilos, minimizando así el movimiento de la catenaria al pasar el ferrocarril.

Puede darse el caso que se usen péndolas equipotenciales, que tienen además la ventaja de unir eléctricamente los cables de tal forma que se aumenta la sección equivalente para el transporte de corriente.

Ilustración 17. Péndola equipotencial. (Fuente: https://docplayer.es/49821984-Generacion-y-calculo-de-mensulas-tubulares-para-infraestructura-ferroviaria.html)

3.3.5. Feeder de acompañamiento

En zonas donde el conductor de la línea aérea transporte una alta intensidad de corriente y el consumo sea muy elevado, conviene aumentar la sección del cable para evitar sobrecalentamientos. Aumentar la propia sección cambiando a un conductor más grueso no es la mejor opción ya que presentaría problemas mecánicos con el diseño de sujeción de la catenaria. Es por ello por lo que se opta por aumentar la sección equivalente acompañando estos tramos con un conductor auxiliar, a la misma altura que el hilo de contacto, con el que se reparte el transporte de corriente para evitar accidentes por sobreconsumo.

3.3.6. Sistema de retorno

Toda corriente proporcionada al ferrocarril a través de los diferentes sistemas de alimentación necesita un sistema de retorno para poder cerrar el circuito eléctrico. El pantógrafo se encarga de captar la corriente del hilo de contacto y transmitirla hasta los motores y circuitos auxiliares, mientras que para el retorno a la subestación esta corriente viaja a través de la propia estructura metálica del ferrocarril, que hace de conductor neutro, hacia las ruedas y finalmente a los carriles conectados al negativo del rectificador de la subestación.

Otra opción de sistema de retorno es el denominado cuarto carril, situado en mitad de los dos raíles, por el cual circula la corriente de retorno para eludir su regreso por las vías. Así se consigue aumentar la vida útil de la instalación a la vez que evita posibles problemas de corrosión.

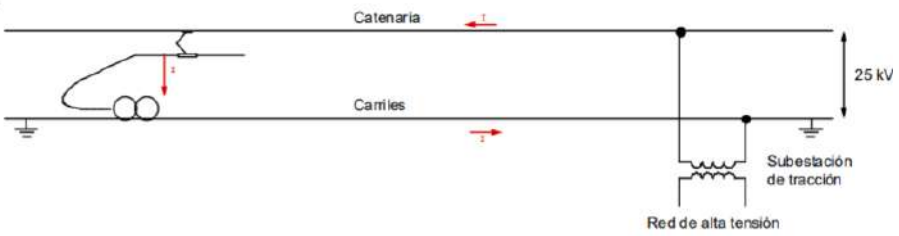


Ilustración 18. Sistema de retorno de electricidad. (Fuente: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/ferrocarriles/ESTUDIO18/AN07_Elec_IISSCC.pdf)

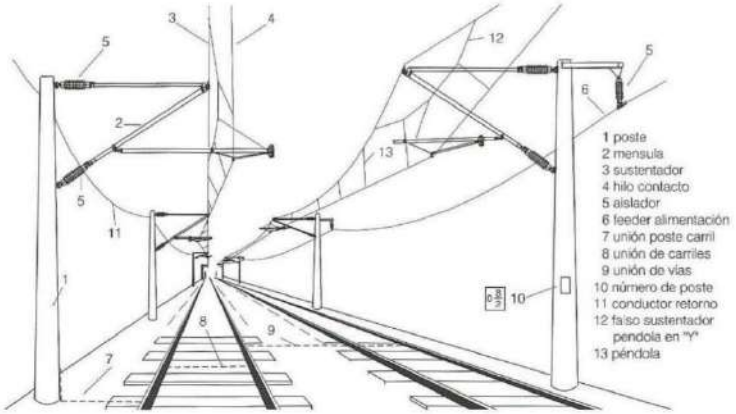


Ilustración 19. Componentes principales de la línea aérea de contacto. [KIES08]

3.4. SOPORTES, VANOS Y COMPESACIÓN

Una vez vistos los elementos principales de la línea aérea de contacto, centrados en el transporte de la corriente, en esta sección se analizarán los distintos mecanismos para asegurar el trazado y soporte de la catenaria, lo que podríamos denominar los "fundamentos externos" de la misma.

3.4.1. Ménsulas

Las *ménsulas* tienen el objetivo de sujetar toda la catenaria y al mismo tiempo asegurar el descentramiento, para evitar el desgaste del pantógrafo. Según su geometría, podemos clasificarlas en ménsulas tubulares o de celosía.

El primer tipo se caracteriza por poseer en un tubo central llamado *tubo de ménsula* (típicamente de aluminio o acero) el cual soporta el hilo sustentador por un extremo del tubo y por el otro va fijado al poste. En la parte inferior del tubo de ménsula se fija el *tubo estabilizador*, paralelo al suelo, del cual a su vez salen los *brazos de atirantado*, responsables de la sujeción del hilo de contacto. Estas uniones se realizarán con articulaciones que permitan el movimiento en caso de dilataciones por cambios de temperatura.

Para aumentar la rigidez, disponemos del *anclaje superior*, un tirante que une el poste y el extremo del tubo de ménsula, que puede trabajar a tracción o compresión, y el *puntual* que conecta el tubo estabilizador con el tubo de ménsula. Cabe destacar que este tipo de ménsula está electrificada en su totalidad, ya que los *aisladores* los encontramos junto al poste y los hilos electrificados, en contacto directo con la ménsula. Esto dificultará las operaciones de mantenimiento de las mimas.

Por otro lado, la ménsula de celosía consta de dos perfiles de acero unidos con forma de U invertida llamado *cuerpo de ménsula*. En la parte superior del mismo se encuentra el *aislador de suspensión*, encargado de fijar el hilo de contacto e impedir el paso de corriente a la celosía.

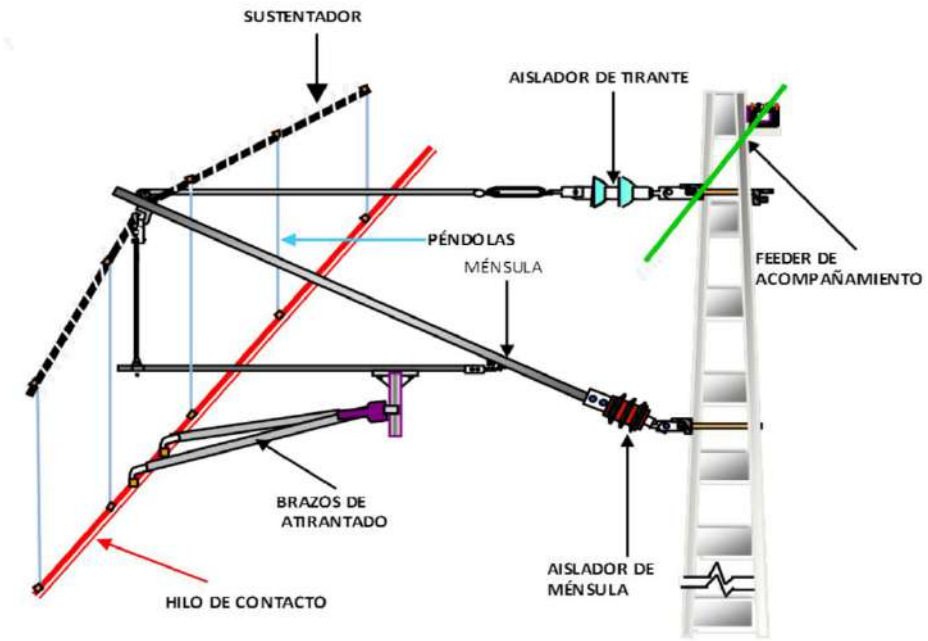


Ilustración 20. Esquema ménsula tubular. [ADIF21]

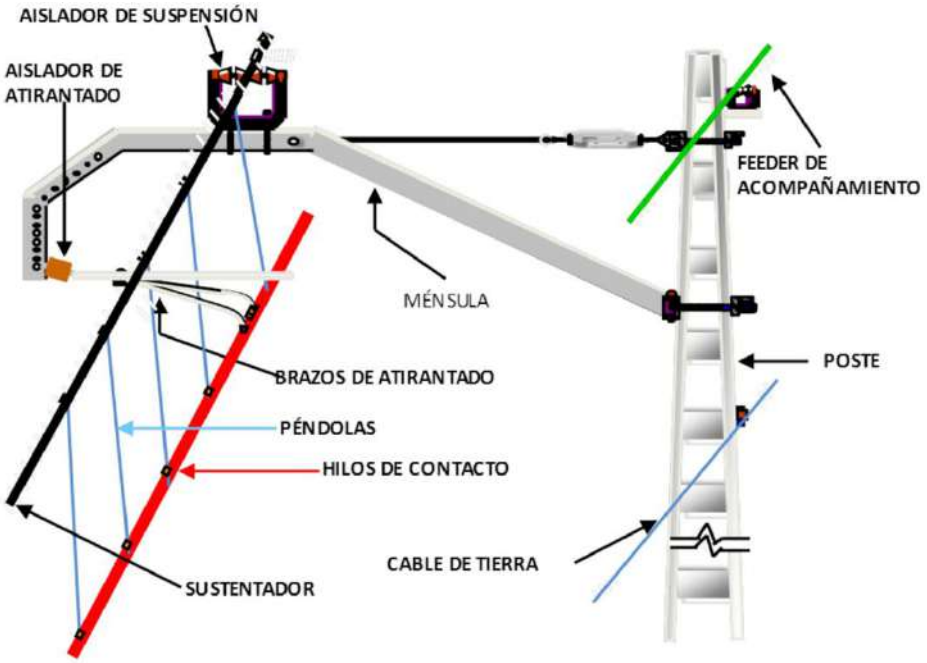


Ilustración 21. Esquema ménsula de celosía. [ADIF21]

De forma parecida a la ménsula tubular, en el extremo libre del cuerpo de ménsula se fija el *tubo de atirantado* (con su respectivo *aislador de atirantado*) el cual hace de soporte a los *brazos de atirantado*, cuya función es sostener el hilo de contacto, asegurando la continuidad del pantógrafo. Para evitar el fallo de la ménsula, añadimos un tirante de ménsula en la parte superior de los perfiles, uniéndolos al poste.

Según el descentramiento necesitado, podemos diseñar las ménsulas de celosía hacia dentro o hacia fuera. En el caso de necesitar cubrir un gálibo transversal muy amplio, es conveniente utilizar ménsulas de varias catenarias, aunque la mejor opción para estas ocasiones siempre será soportar la línea aérea de contacto con un pórtico.

3.4.2. Postes, pórticos y semipórticos

Los *postes* son aquellos elementos verticales responsables de la totalidad de las cargas que la catenaria ha de soportar durante su funcionamiento. Es por esto por lo que a la hora de diseñarlas, se deben tener muy en cuenta todos los esfuerzos tanto de pesos de los hilos, ménsulas y más elementos, como las cargas exteriores de viento o nieve que son capaces de generar tensiones no deseadas en la estructura.

Em zonas urbanas es típico el uso del hormigón con sección circular como material de composición de los postes, aunque para alta velocidad son más comunes por perfiles de acero galvanizado S275JR (UNE EN 10025), usando dos perfiles UPN unidos entre sí por presillas transversales.

Ilustración 22. Poste de acero galvanizado. (Fuente: https://es.dreamstime.com/imagen-de-archivo-catenaria-image21862361)

Ilustración 23. Poste de hormigón. (Fuente: http://empac.com.br/es/transporte/)

Los *pórticos*, por otro lado, se instalarán cuando un par de postes a cada lado de la vía no sea suficiente para soportar los esfuerzos cortantes y flectores ocasionados por el exceso de gálibo en la vía. Esto es muy típico en las proximidades de estaciones, donde confluyen numerosas vías y el exceso de cargas obliga a la instalación de pórticos, los cuales pueden ser de dos tipos, como veremos a continuación.

Cuando nos interesa mantener la independencia mecánica de las distintas catenarias, uniremos los postes con una viga transversal de la que colgarán las distintas líneas, lo que se llama *pórtico rígido*.

La ventaja principal que presenta es la permanencia de las condiciones estáticas y dinámicas de la catenaria, por lo que se consigue un paso del ferrocarril a velocidad homogénea allí donde se instale el pórtico. Cuando esto ocurre se dice que la catenaria de estación tiene tratamiento de vía general.

Ilustración 24. Pórtico B29/33 de la estación de Chelmsford.

Por otro lado, se encuentra el *pórtico funicular*, compuesto de tres distintos cables: cable superior, encargado de soportar el hilo sustentador; cable inferior, sujeta los brazos de atirantado del anterior hilo; y el cable funicular, desde la cabeza de los postes, se cuela para soportar el cable superior e inferior.

Este tipo de pórtico es óptimo cuando se necesite aliviar el efecto de los esfuerzos en la vía o un menor coste económico, aunque se perderá el efecto de independencia mecánica que comentábamos anteriormente. Por último, cabe destacar, tanto el pórtico rígido como en el funicular, la presencia de aisladores para mantener las distintas catenarias eléctricamente independientes.

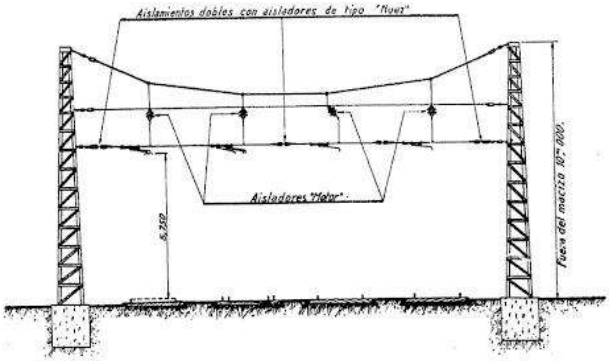


Ilustración 25. Esquema pórtico funicular. (Fuente: http://www.amigos-ferrocarril-villalba.es/secciones/historia/electrificaci%C3%B3n-mas/)

En otras situaciones es conveniente instalar un *semipórtico*, combinando los conceptos anteriores, cuando debido al gálibo máximo en un tramo establecido, necesitamos una estructura que cubra más de una línea férrea, pero instalar un pórtico completo excede nuestros límites de espacio, por ejemplo. En ellos se instalarán hasta dos líneas aéreas respetando la independencia eléctrica entre las mismas.

Ilustración 26. Semipórtico B30/03 de la estación de Chelmsford.

3.4.3. Vanos

Como comentábamos brevemente al principio del capítulo, los *vanos* son las distancias longitudinales que existen entre los distintos postes de la vía. Éstos varían dependiendo de distintos factores, como pueden ser la velocidad de dicho tramo o la geografía del terreno, en el caso de estudio de este proyecto, la longitud máxima del vano está establecida en 73 metros, según la norma Nr 440.1.0493_MAN_001.

Otro factor importante para tener en cuenta a la hora de diseñar el vano es el descentramiento: hace falta encontrar la relación longitud vano con distancia de descentramiento de tal forma que el hilo permanezca continuamente en contacto con el pantógrafo y no exceda por ninguno de los dos lados del mismo.

3.4.4. Cantones y compensación

Debido a la imposibilidad física de crear un único hilo para toda la vía, aparece el concepto de *cantón:* máxima división de una línea aérea de contacto en la que se agrupan distintos vanos compuestos por un mismo hilo de contacto y suelen tener una longitud de unos 900-1200 metros. Dicho hilo a su vez se fija a una ménsula en su punto medio (llamado *punto fijo*) mediante el cual se impide cualquier desplazamiento o giro que pueda sufrir el cable. Las dos mitades restantes del cantón se denominan *semicantones*.

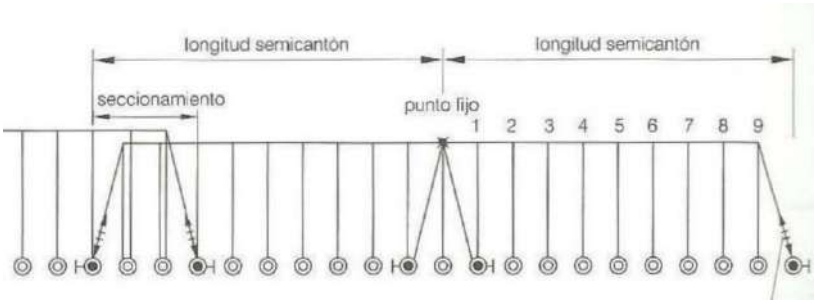


Ilustración 27. Esquema disposición cantones. [KIES08]

De forma paralela, nace el concepto de la *compensación* de la catenaria: la dilatación producida en los hilos por los cambios de temperatura, en su inmensa mayoría debido a causas meteorológicas, genera una variación de la longitud total del hilo que puede

derivar en distintos problemas, siendo el más grave la discontinuidad en el contacto entre pantógrafo y catenaria.

Es por ello por lo que los extremos de los cantones disponen de distintos mecanismos para compensar la tensión mecánica del cable en función de la temperatura ambiente y así evitar posibles averías en el sistema. Se dividen en dos grandes grupos dependiendo de si la compensación se realiza o no de forma automática.

3.4.4.1. Cantones sin compensación automática

Este tipo de compensación también se denomina de terminación fija, ya que consiste en fijar el hilo a los extremos del cantón de tal forma que al aumentar la temperatura ambiente, el hilo se expandirá y cuando desciendan las temperaturas, se contraerá.

Únicamente se podrá regular de manera manual con unos tensores aislados eléctricamente en los extremos, lo que hace de este método una forma muy costosa de mantener la catenaria en su posición idónea. Por lo tanto se suele utilizar en tramos diseñados para velocidades inferiores a 120 km/h, como pueden ser zonas de maniobras o vías secundarias de estaciones.

3.4.4.2. Cantones compensados automáticamente

La compensación automática consiste en un mecanismo regulado por poleas y contrapesos de tal forma que el hilo se enrolla en los extremos de una polea de diámetro menor, mientras que los contrapesos cuelgan de un hilo enrollado en una polea de mayor diámetro.

Así para compensar la flecha generada por la dilatación del hilo, los contrapesos forzarán, gracias a la relación de trasmisión entre las poleas, a mantener el hilo siempre en posición y así evitar posibles averías por desconexión.

3.4.4.3. Compensación independiente

Por lo general, se suele realizar la compensación de manera conjunta con los hilos de contacto y sustentadores, pero existen casos en los que es necesario tratar el problema de forma independiente. Este es el caso de los hilos de contacto que se componen de cobre,

que al tener un coeficiente de elasticidad menor que el acero, la flecha producida a la misma tensión tendrá un valor mayor que el hilo sustentador de acero.

Ilustración 28. Compensación de poleas . (Fuente: https://www.railastur.es/adif-instalara-sistema-inteligente-gestion-energetica/)

3.4.5. Seccionamiento

Como hemos visto en el anterior apartado, los cantones tienen como función principal asegurar la continuidad mecánica de la línea aérea, pero no garantiza el paso continuo de corriente de un tramo de catenaria al contiguo.

Es por eso por lo que surge la necesidad de una tecnología que permita controlar la continuidad eléctrica entre dos tramos de catenaria de tal forma que el pantógrafo no experimente momentos sin alimentación, que puedan provocar futuras averías. Para ello se diseñan los cantones de tal forma que el final de uno quede parcialmente solapado por el principio del siguiente. Esta zona de solape la llamaremos *seccionamiento*, y puede ser de dos tipos: seccionamiento de cantón y seccionamiento de lámina de aire.

Ilustración 29. Esquema seccionamiento. (Fuente: http://caed.edu.mx/manualcat/pages/energia02.htm)

3.4.5.1. Seccionamiento de cantón

Consigue independizar mecánicamente el tramo, para así asegurar una tensión constante en la catenaria sin verse afectada por la variación térmica.

3.4.5.2. Seccionamiento de lámina de aire

Posee el mismo objetivo que el anterior tipo al asegurar la independencia mecánica y eléctrica de los cantones, pero con la característica especial de que este tipo puede conmutar para dar o no continuidad a la electricidad a su paso por la catenaria, convirtiéndose en un seccionamiento de cantón en los casos que esté cerrado.

Esto lo convierte en un seccionamiento idóneo para zonas donde haga falta alterar el paso de corriente, como puede ser en las inmediaciones de una estación.

3.5. AGUJAS

Las agujas aéreas, o simplemente *agujas*, son los distintos montajes que encontramos en las bifurcaciones de las vías del ferrocarril para asegurar la continua alimentación del pantógrafo. Este es un concepto clave en este trabajo, ya que algunas de las situaciones a afrontar que se encontrarán en el caso real de la estación tienen que ver con la elección y el diseño de estos sistemas.

Podemos distinguir dos tipos, según su geometría y funcionalidad: *agujas tangenciales* y *agujas cruzadas*. Las primeras son idóneas para tramos donde no existan muchos desvíos (líneas de alta velocidad), ya que tienen como característica principal que el ferrocarril no mantiene contacto con la catenaria de la vía desviada y así evita desgastes innecesarios.

Las agujas cruzadas por otro lado se distinguen con las anteriores en que las catenarias de las dos vías se cruzan en vez de mantenerse paralelas, lo que resulta en una menor proporción de avería en los desvíos, aunque el pantógrafo tenga que soportar el rozamiento y los esfuerzos de los dos hilos a la vez. Es por esto por lo que se instalan en zonas de mucho trámite entre vías, como pueden ser áreas urbanas.

Ilustración 30. Aguja en el pórtico B29/32 de Chelmsford.

3.5.1. Generalidades

Para poder entrar más en profundidad en los conocimientos de estos dos tipos, debemos aclarar varios conceptos:

- Vía directa: de las dos que componen el desvío, la principal, de mayor radio o que se mantiene recta.
- Vía desviada: de las dos que componen el desvío, la secundaria, de menor radio, generalmente formando una curva.
- Junta de contraaguja: punto clave del desvío, donde se separan los raíles.
- Punto de aguja: medición que se refiere a la distancia en centímetros entre las dos catenarias para poder posicionar los distintos elementos. Ejemplo: poste de aguja situado a una altura en la que la distancia entre las catenarias es de 50 cm, aguja en el punto 50. Para las agujas tangenciales el punto óptimo suele ser el punto 90, mientras que para las cruzadas, el punto 50.
- Vano de anclaje: situado al principio del desvío en la vía directa, en el cual crece la catenaria desviada hasta anclarse en el siguiente poste.
- Vano de aguja: vano en el que se haya el punto de menor distancia entre las dos catenarias (para las agujas tangenciales) o vano donde se cruzan las catenarias (para agujas cruzadas).
- Vano de elevación: contiene la junta de contraaguja y se ocupa de elevar la altura absoluta de la catenaria desviada, manteniendo la catenaria directa constante, posicionándolas así para el poste de aguja.

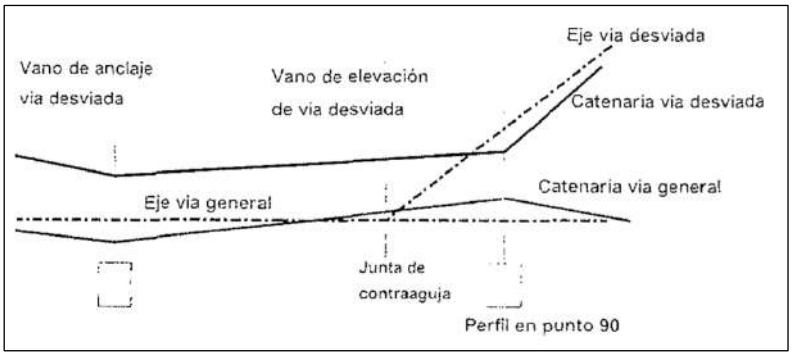


Ilustración 31. Esquema aguja tangencial. [MONT02]

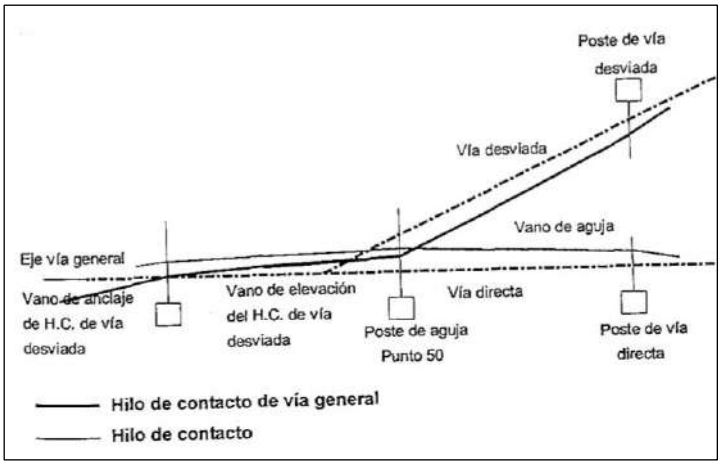


Ilustración 32. Esquema aguja cruzada. [MONT02]

3.5.2. Fit free area

A lo largo del tramo de las agujas, antes y después del desvío, se encuentran muchos elementos moviéndose de un lado a otro de la vía, incrementando el peligro de colisión entre dos cuerpos. Sobre todo por parte del pantógrafo, elemento delicado y más expuesto, capaz de girar por la elevación dinámica.

Es por ello por lo que cuando se diseñan las agujas, contamos con la zona denominada *"fit free area"*, un área imaginaria en la cual no se puede implementar ningún elemento que pueda de alguna forma poner en peligro la aguja. Por lo tanto se prescindirá de ménsulas, postes, grifas o aisladores hasta que estén las catenarias divididas.

3.5.3. Proceso de desvío aguja cruzada

Supondremos que el ferrocarril circula por la vía directa y se dispone a pasar a la vía desviada. De esa forma al principio de la vía directa solo encontramos el hilo de contacto de la vía directa tocando con el pantógrafo. El de la vía desviada sobrevuela a cierta altura, cada vez menor a medida que avanza el ferrocarril.

No es hasta pasado el punto de contraaguja que el hilo de contacto de la vía desviada alcanza el pantógrafo, mientras que el de la vía directa se va desplazando a lo largo del mismo, siguiendo el curso de su vía original.

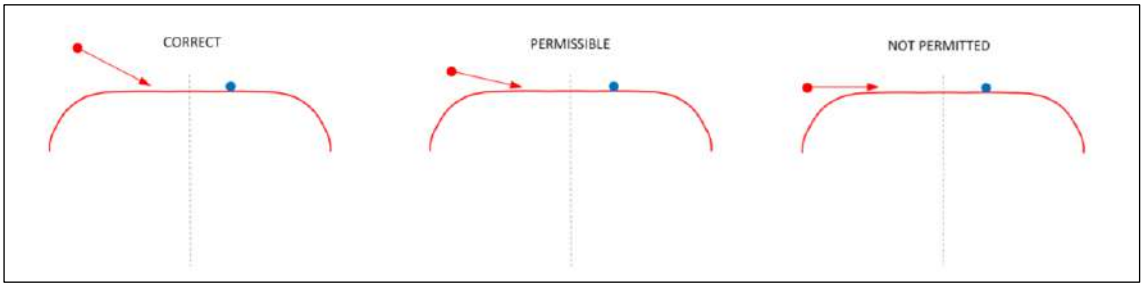
Al pasar el punto de aguja y cruzarse las dos catenarias, el hilo de la vía directa se encuentra ya en el extremo del pantógrafo dispuesto a despegarse. El último paso antes de volver a su línea, lo produce el pantógrafo girándose levemente hacia la vía directa para suavizar el momento de despegue y evitar tirones. A esto se le conoce como *elevación dinámica* y se suele hacer tanto para captar un hilo, como para soltarlo, pero siempre inclinando el pantógrafo hacia el lado en el que se suelte/capte el hilo.

3.5.4. Proceso de desvío aguja tangencial

El proceso de bifurcación de la catenaria con una aguja tangencial diferencia del de la aguja cruzada en que ahora se producen dos elevaciones dinámicas en el un mismo desvío.

Dado que en la aguja tangencial los dos hilos permanecen paralelos a alturas similares, se requiere una primera elevación mientras se acerca el hilo de la vía desviada y otra para soltar el hilo de la vía directa.

Entre medias el proceso es prácticamente el mismo: a medida que avanza el ferrocarril el hilo directo va acercándose más al extremo del pantógrafo por el lado de la vía principal y el desviado va centrándose poco a poco hasta que se produce la división de las catenarias.



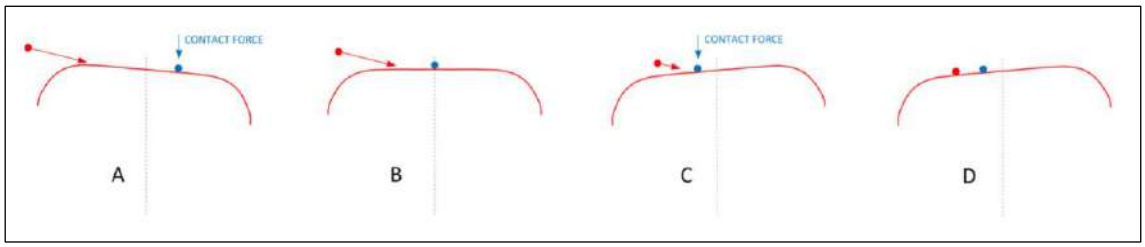


Ilustración 33. Acercamiento del hilo al pantógrafo. [KEEN18]

Ilustración 34. Fuerza de contacto en el pantógrafo. [KEEN18]

3.5.5. Aisladores de sección

Otro elemento clave en la compresión de la ingeniería de la línea aérea de contacto es el *aislador de sección*, el cual nos permitirá mantener la continuidad mecánica a la vez que separamos dos zonas eléctricamente, cuando nos interese variar la tensión en una vía. A este conjunto de equipos utilizados para conseguir la independencia eléctrica lo llamaremos paquete de vías.

Ilustración 35. Aislador de sección. [KEEN18]

El componente principal del aislador es el deflector, el cual está colocado de forma paralela a éste y es el que determina si se consigue o no el paso de corriente al pantógrafo. Por un lado tendremos un aislador de sección simétrico cuando por la posición del deflector exista intercambio de intensidad, y por el contrario, aislador de sección asimétrico, cuando no se permita el paso de corriente al pantógrafo.

Otras componentes del aislador son por ejemplo el aislador en sí, el cual se encarga de mantener unidos mecánicamente los dos lados del equipo, el apagachipas, disipador del arco eléctrico generado cuando circula el pantógrafo, o las grifas, que sujetan el aislador al hilo de contacto.

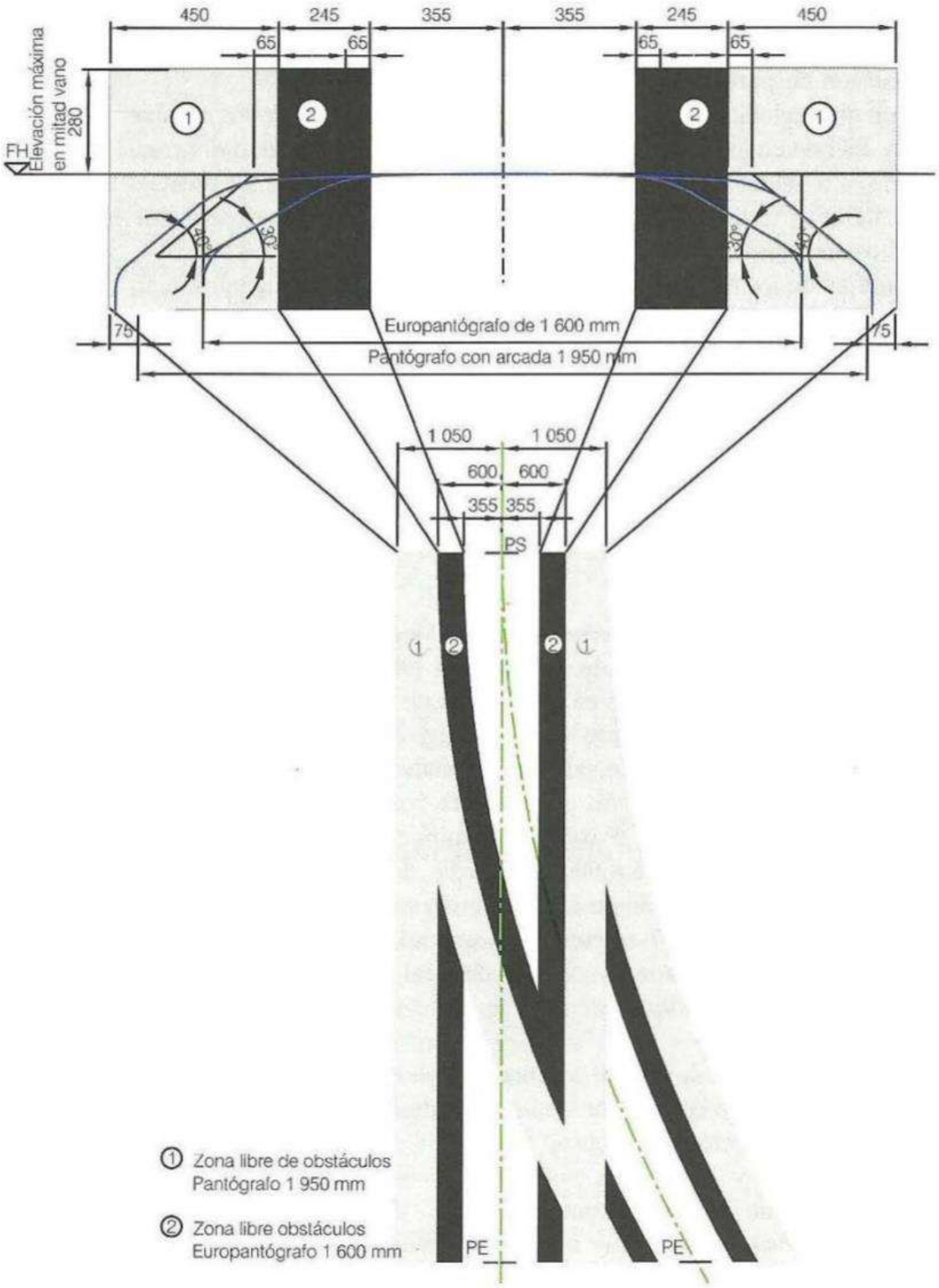


Ilustración 36. Fit free area. [KIES08]

4. DISEÑO DE LAS SOLUCIONES

4.1. INTRODUCCIÓN

Una vez definidos todos los elementos fundamentales de la catenaria para la correcta comprensión y seguimiento del trabajo, se procederá a analizar el diseño de la remodelación del tramo de línea aérea de contacto, con el fin de cumplir con el objetivo principal del proyecto.

Para dar con el diseño óptimo que optimice las máximas variables posibles, se deberá estudiar al detalle los distintos factores limitantes que entran en juego en la remodelación de la catenaria, entre los cuales se incluyen la geometría de la vía o la viabilidad económica o física de la misma.

De esta forma este capítulo se dividirá en un primer estudio del área de trabajo, donde atenderemos a las condiciones presentes de la vía, una exposición de la dificultad a vencer según la finalidad del proyecto de remodelación y un desarrollo de las distintas propuestas para el diseño de la solución final. En el próximo capítulo se realizarán los cálculos necesarios para la geometría de la vía y así encontrar la solución que mejor se adapte a nuestra situación.

4.1.1. Criterio del programa Microstation

Antes de comenzar con la exposición de la situación de nuestro proyecto y su problemática a vencer, es necesario aclarar el criterio de colores del programa Microstation.

Este software es una herramienta excelente para el tratado de mapas de trazado de vías ferroviarias, por lo que a lo largo del trabajo se verán distintas capturas de mapas con las vías de distintos colores. Las vías en negro son aquellas que no se ven afectadas por el proyecto de remodelación, verdes las que se eliminan por completo, el color rojo nos indica aquellas que son instaladas de nuevo y las azules son modificadas.

Es más, estos colores no se aplican sólo a los raíles de la vía en sí, que es lo primero que se suele observar, sino cualquier elemento que cumpla una función dentro de la línea aérea de contacto. En nuestro caso nos fijaremos sobre todo en las líneas discontinuas que representan los hilos de contacto de la catenaria.

Para la mejor comprensión de los mapas técnicos de las vías, se han resaltado con un grosor mayor los hilos (de contacto y sustentador a la vez) cuya posición trataremos de diseñar, así como el aislador de sección, representándolo como un rectángulo más grande para su mejor interpretación.

4.2. ESTACIÓN DE CHELMSFORD

Para introducir las opciones de diseño, primero se debe hablar un poco del área de trabajo para así responder a preguntas como dónde se sitúa, qué importancia tiene o cuál es en concreto el tramo que se rediseñará.

Ilustración 37. Ubicación ciudad de Chelmsford. (Fuente: Google Maps)

El área de trabajo, como ya se ha comentado previamente, será la estación de ferrocarril de la ciudad de Chelmsford, capital del condado de Essex. Cuenta con una población de 168 mil habitantes en todo el distrito y la encontramos a tan sólo 50 kilómetros al nordeste de Londres (aproximadamente a unos 30 minutos en tren), conectada a ésta por la carretera A12 o por medio del ferrocarril perteneciente a la línea Great Eastern Main Line.

La cercanía a la capital junto con su posición estratégica, convierten a la estación británica en la más concurrida fuera de la capital inglesa: 14 mil pasajeros diarios en promedio. La encontramos entre las ciudades de Londres y Witham.

La estación se encuentra en mitad de la zona urbana de la ciudad y tiene la peculiaridad de que está situada en uno de los tres viaductos construidos en la ciudad para el transcurso de la vía. Está compuesta por dos andenes, los cuales dan acceso a las dos vías que circulan por la estación, una en dirección Londres ("Up main") y otra en dirección Witham ("Down main"). Nuestro diseño se basa en la remodelación de esta última línea, que vista desde el mapa corresponde a la vía superior de las dos.

En particular nuestro estudio se entrará en la aguja 2352, como veremos a continuación, por lo que la zona de trabajo queda en la parte norte de la estación.

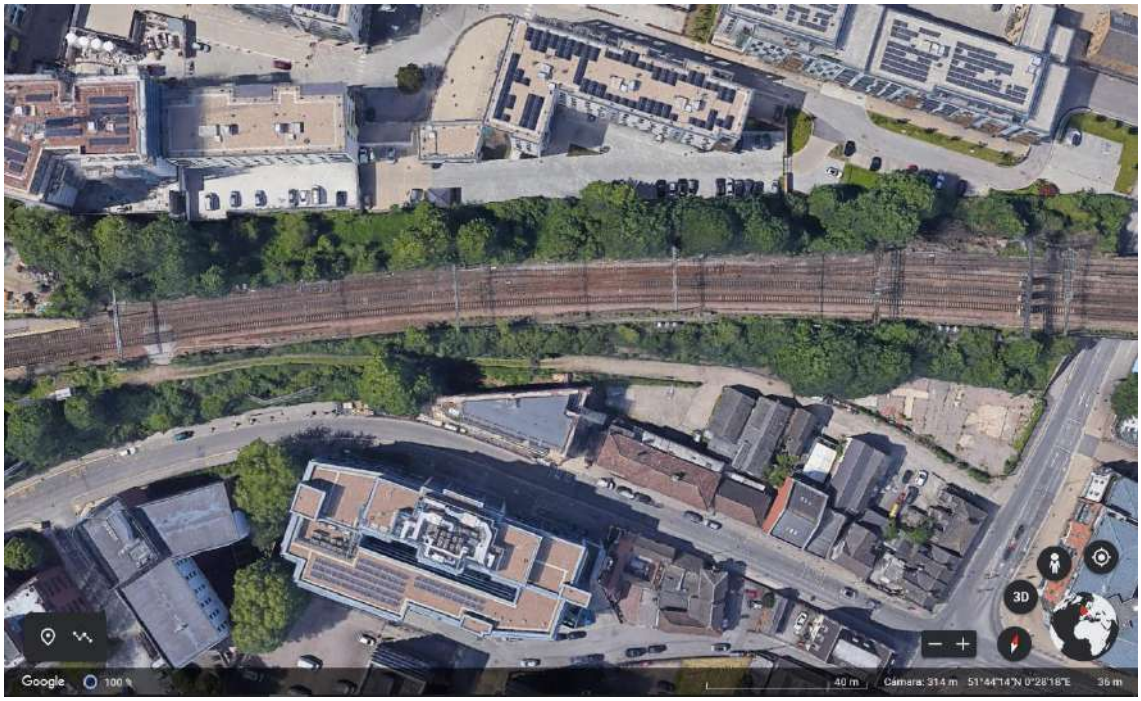


Ilustración 38. Tramo de vía de estudio. (Fuente: Google Earth)

4.3. PROBLEMÁTICA DEL PROYECTO

4.3.1. Situación inicial

Como bien se ha anunciado antes, ahora se procederá a exponer las diversas razones por las que se lleva a cabo este proyecto, así como los problemas a los que nos enfrentaremos, con la finalidad de entenderlos en su totalidad y poder ofrecer unas soluciones acordes.

Al principio del proyecto, en el apartado de motivaciones se comentó que los dispositivos de la estación han llegado al final de su vida útil, y al requerirse un reemplazo de estos, se aprovecha para rediseñar algunos aspectos de la vía, aquellos puntos que pueden resultar conflictivos.

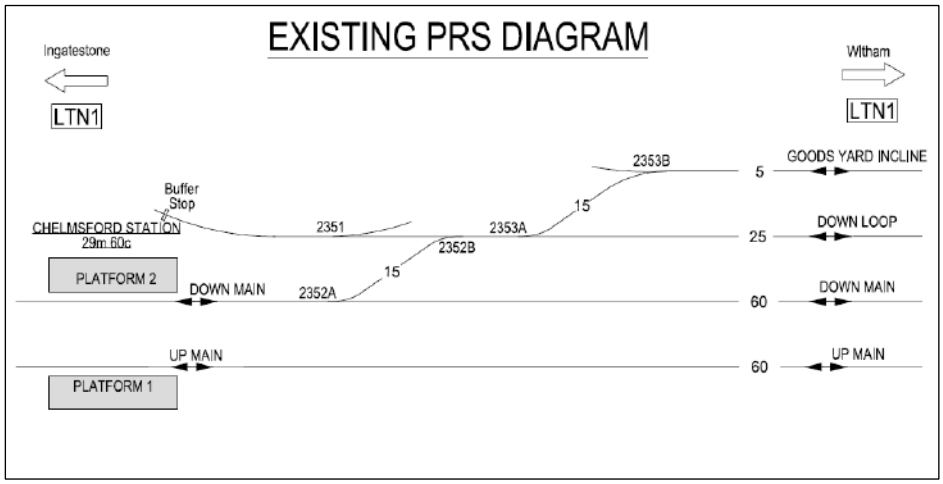


Ilustración 39. Diagrama inicial de las vías.

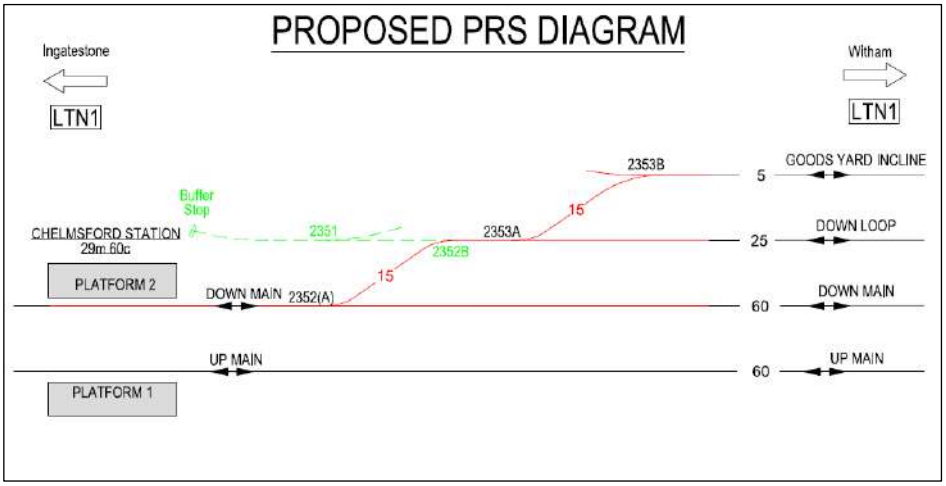


Ilustración 40. Diagrama de modificación de vías.

Como podemos observar en los esquemas anteriores que resumen la remodelación a realizar (ANEXO I), dentro de las vías que salen de la vía "Down Main", en dirección Withan, encontramos el final de vía "Buffer Stop" del cual nos queremos deshacer. Este final de vía es lo que conocemos como topera, donde se incluyen unos frenos para los finales de tramos. La eliminación de este tramo causará por lo tanto el retiro también de las agujas 2351 y 2352B.

La realidad es que al deshacernos de la topera "Buffer Stop" se aprovecha para retirar las vías 60, 25 y 5, por lo comentado de la vida útil, y reemplazarlas por unas nuevas. Estos tramos van desde el andén de la estación (punto 1060 m) hasta el primer paso a nivel en dirección Witham (punto 1570 m), lo que resulta en una reforma de 510 metros de vía.

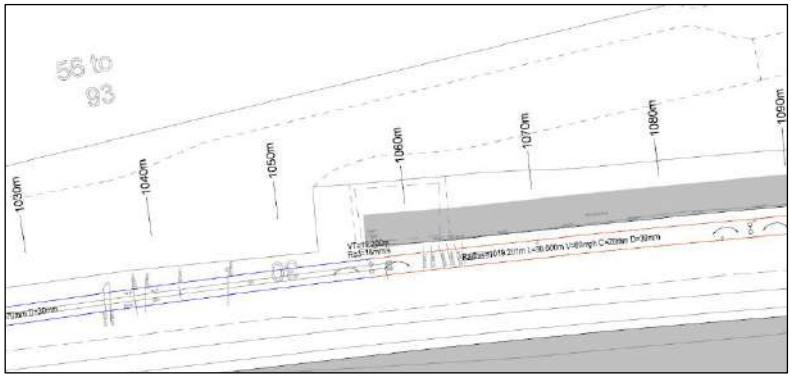


Ilustración 41. Diagrama punto inicial de la reforma.

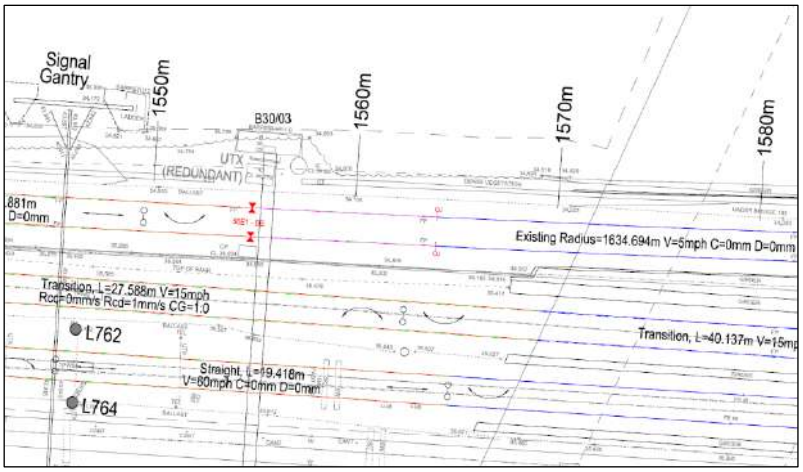


Ilustración 42. Diagrama punto final de la reforma.

4.3.2. Cuestión a resolver

Como podemos observar en el plano (ANEXO I), la aguja la aguja 2353B permanece en el mismo sitio, de la misma manera que la 2353A se desplaza apenas un metro. Al hacer el diseño del trazado se consideró que estas dos agujas no necesitan una recolocación muy diferente. Apenas se corrige el radio de curvatura de las vías, ya que no se dispone de mucho espacio para hacer grandes reformas.

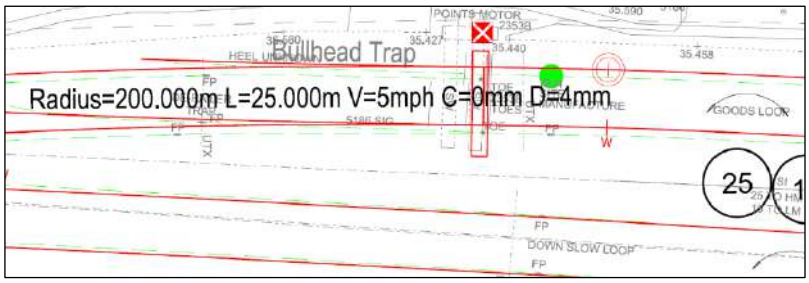


Ilustración 43. Diagrama aguja 2353B

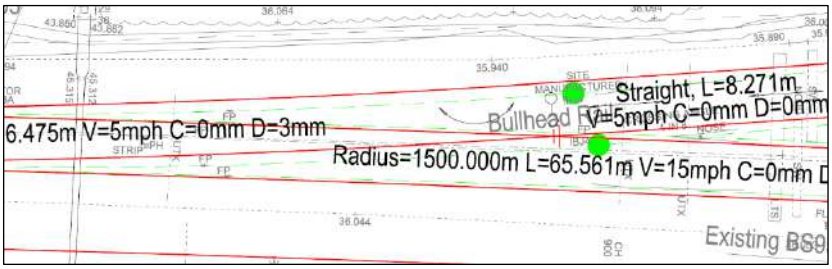


Ilustración 44. Diagrama aguja 2353A

No pasa lo mismo con la aguja 2352. En ésta, al considerar en el diseño la eliminación de la topera "Buffer Stop" se consigue mucho más espacio para poder hacer la bifurcación de manera considerablemente más suave, con el fin de reducir el riesgo de accidente o de aliviar tensiones en los cables, al conseguir que el ángulo formado por estos sea notablemente mayor.

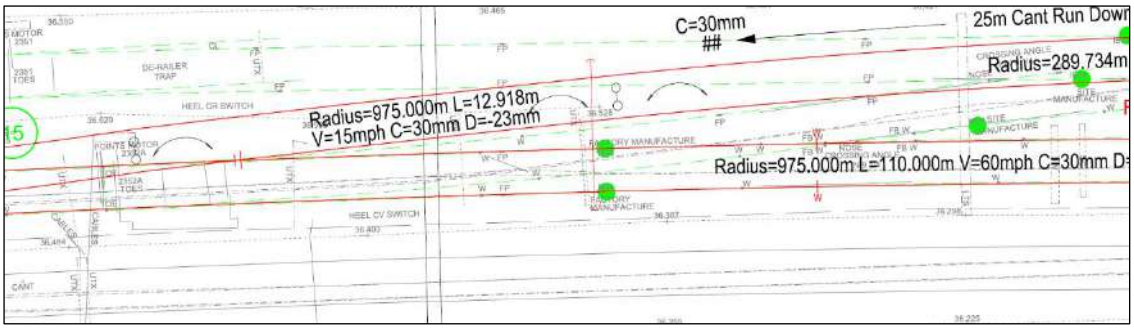


Ilustración 45. Diagrama de aguja 2352.

Existe además una segunda razón por la que se retrasa esa distancia la aguja 2352. Como vimos en el capítulo de conceptos, cada aguja tendrá su propio punto de aguja, es decir, una distancia entre ejes de las dos vías, la cual viene estandarizada ya que servirá para colocar el pórtico donde se sustentarán los distintos cables.

Por lo tanto, si ponemos por ejemplo que el punto 200 debe ser el punto de aguja donde se colocará el pórtico para sustentar los cables, inicialmente ese punto caía en el pórtico B29/32, pero en el momento que se decide atrasar las vías para aliviar el desvío, el punto de aguja 200 se queda en el aire, por lo que hace falta retrasarlo hasta el anterior B29/31 para evitar tener que construir un elemento sustentador entre estos dos pórticos.

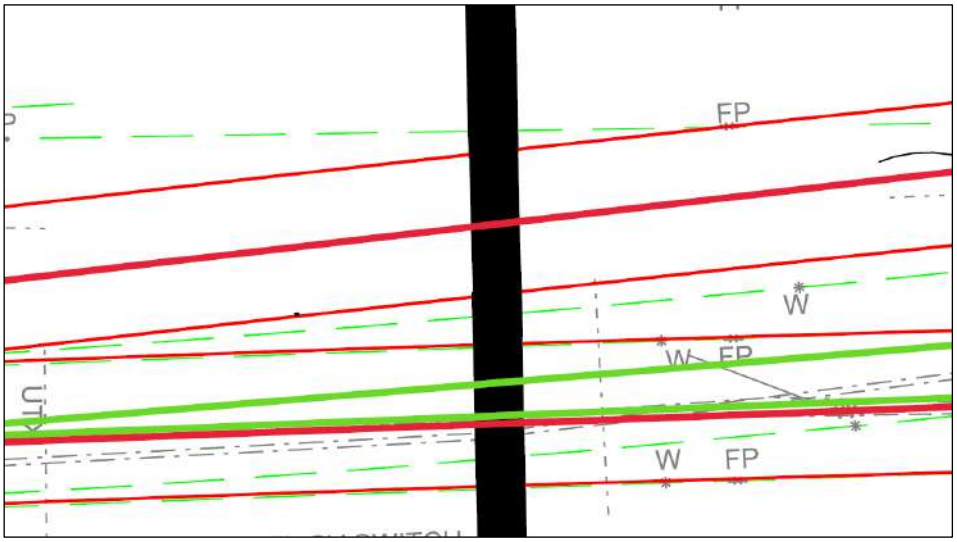


Ilustración 46. Representación puntos de aguja en pórtico B29/31.

En la captura anterior, se observa cómo para el pórtico B29/32 se han resaltado los ejes de las dos vías, tanto para la versión antigua como para la nueva. Las vías en verde cumplen con las limitaciones de la aguja 200, ya que la distancia entre sus ejes de vía mide 200 milímetros. Por otro lado, para la nueva versión de las vías en rojo ha tenido que retrasarse el punto de aguja hasta el pórtico anterior, por lo que en este supera con creces las limitaciones de distancia entre ejes para instalar ahí la aguja.

Es por esto por lo que el punto de aguja se retrasa unos 20 metros hacia la estación, facilitando la bifurcación con un mayor ángulo de apertura de los cables, pero el problema viene con los hilos de la vía renovada y su anclaje de origen, donde se encuentra la compensación

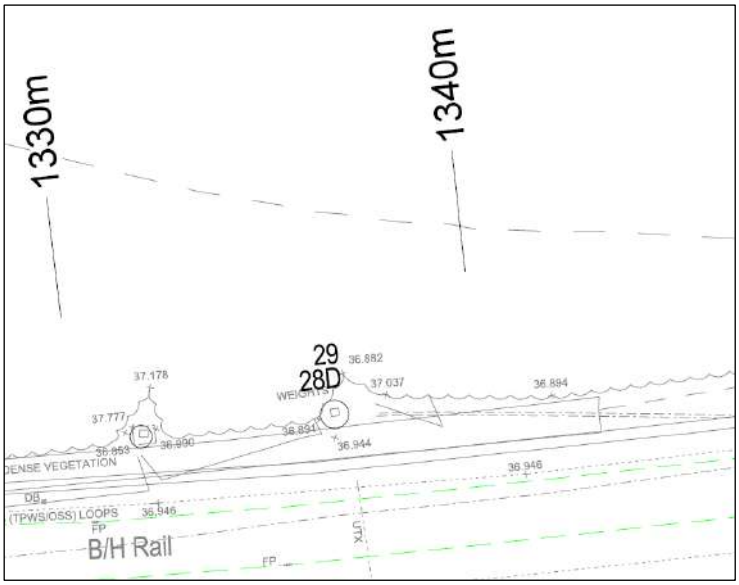


Ilustración 47. Diagrama de punto de anclaje inicial de los nuevos hilos.

Antes de la reforma, los hilos de la catenaria estaban anclados al poste de compensación 29/28D, como muestra la imagen anterior, unos metros antes del punto 1340 m, pero el diseño de la remodelación no muestra un cambio de posición de estos, por lo tanto, el radio de curvatura, o mejor dicho, el ángulo que formen los hilos en la péndola será mucho menor, al tener menos espacio para abrirse. Esto se traduce en un aumento considerable de los esfuerzos radiales y, en el peor de los casos, el colapso de la estructura donde se ancla o de los propios cables para alimentar la vía. Por lo tanto, necesitaremos una solución de diseño que asegure el correcto trazado de los ejes para evitar que esto ocurra.

4.4. SOLUCIONES PROPUESTAS

Tras realizar un estudio de la zona, conocer la remodelación de la vía y comprobar el nuevo trazado, se llega a cuatro diferentes propuestas, cada una con sus ventajas e inconvenientes, los cuales tendremos en cuenta para los cálculos de comprobación del siguiente capítulo.

4.4.1. Propuesta #1

La primera propuesta puede llegar a parecer lo más lógico una vez se ha expuesto el problema: llevar el poste de anclaje una cierta distancia a calcular en dirección a la estación. De esta forma se aliviarán las tensiones de los cables al disponer de un radio de curvatura de mayor en comparación con el original (ver ANEXO II).

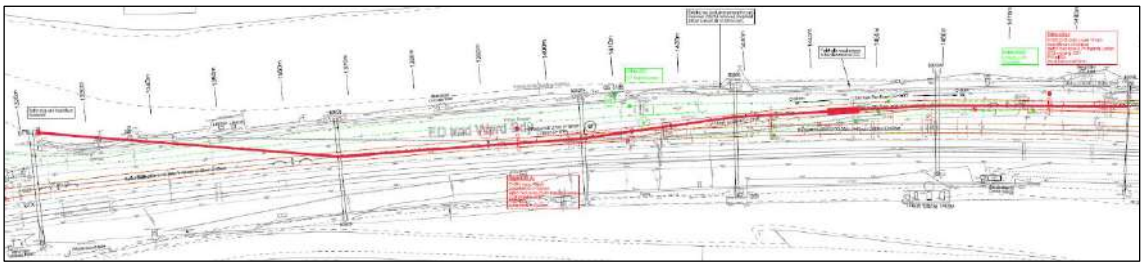


Ilustración 48. Diagrama de trazado de la propuesta 1.

Al retrasar el anclaje de posición, el nuevo lugar del poste quedaría muy cerca del pórtico 29/28B (el primero por la izquierda, próximo al andén), lo que podría derivar en problemas de la cimentación de este, ya que por razones de resistencia de los propios materiales de cimentación, no suele ser muy conveniente producir dos cimentaciones muy juntas, puntos donde se suelen aliviar las tensiones de la estructura.

Además, si nos fijamos en la zona del anclaje observando las imágenes satélites de Google Earth, encontramos un camino que accede a la vía por la parte norte, junto con una zona de obras. Estas imágenes al ser de este mismo año nos dan pistas de que situar nuevas estructuras en una zona conflictiva donde puede haber riesgo por accidente de obra o por ser un camino de entrada de vehículos, no debe ser una buena idea.

Ilustración 49. Poste de compensación 29/28D.

Ilustración 50. Zona de obras próxima a la zona de trabajo. (Fuente: Google Earth)

4.4.2. Propuesta #2

La propuesta viene de la mano de la primera: si en el caso de poner las dos estructuras pueden surgir problemas de cimentación, esta propuesta intentará unir las dos estructuras en una sola, aprovechando así la cimentación del pórtico 28/29B para usar también el anclaje de los hilos y la compensación del cantón (ver ANEXO III).

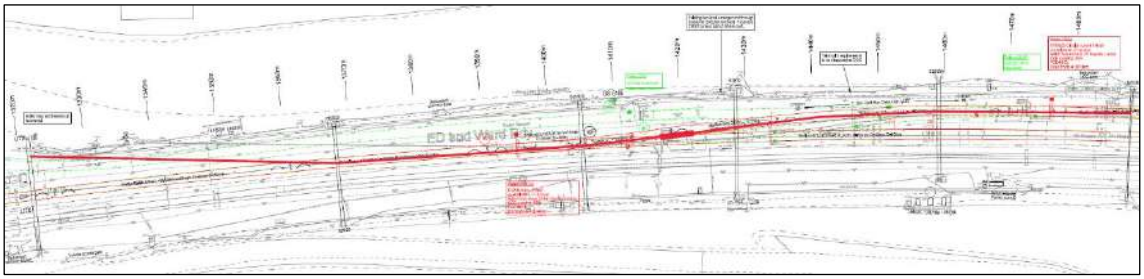


Ilustración 51. Diagrama de trazado de la propuesta 2.

La desventaja de esta propuesta está escondida en la geometría del poste. Si nos fijamos en los laterales de la fotografía del poste 29/28B, los refuerzos de los pórticos que lo sujetan están orientados de forma contraria. El refuerzo del lado "Down Main" apuntando hacia Witham, y el del "Up Main" hacia Londres. Se desconoce la causa exacta de esta

elección, puesto que a primera vista el pórtico no parece estar soportando esfuerzos exagerados por alguna razón que se salga de los límites comunes.

Ilustración 52. Pórtico B29/28 en la estación de Chelmsford.

Además existe una razón por la que podemos descartar esta opción rápidamente entes de comprobarla en los cálculos justificativos: el pórtico no está equipado para el anclaje de la compensación de los hilos. Para poder combinar la compensación de los hilos con la función del pórtico, éste último debe tener una estructura parecida al punto de anclaje, es decir, haría falta disponer de un pórtico con dos niveles de alturas para así garantizar el paralelismo de los dos hilos.

Si nos fijamos en la imagen anterior, el pórtico consta únicamente de un nivel de sujeción y si añadimos una péndola en vertical, no será lo suficientemente resistente como para aguantar el soporte de la compensación requerida. Obviamente, sustituir todo el pórtico no es una opción viable, ya que encarecería exponencialmente el coste de la obra, pero en el caso de hacerlo se necesitaría uno parecido al B30/01.

Ilustración 53. Pórtico B30/01 de la estación de Chelmsford.

4.4.3. Propuesta #3

Para la tercera propuesta comprobaremos la viabilidad de la situación original, es decir, la premisa de la problemática que se ha comentado antes, para ver si ciertamente hace falta desplazar el poste de compensación.

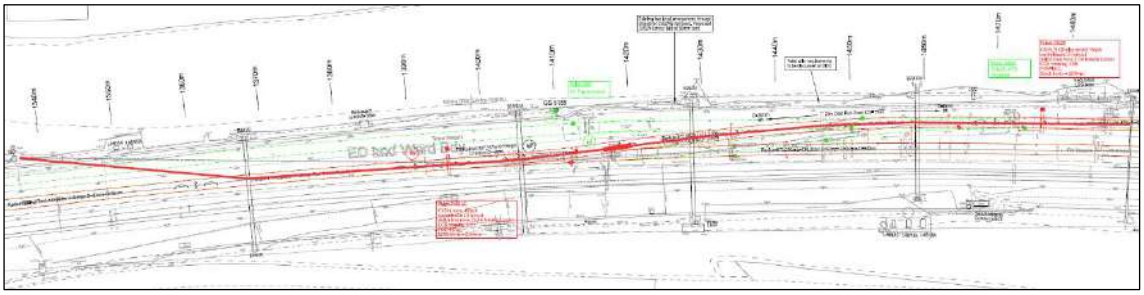


Ilustración 54. Diagrama de trazado de la propuesta 3.

El objetivo de retrasar el poste es poder aumentar el ángulo que forman los cables que recorren desde el poste de compensación donde están anclados, hasta la aguja 2352, teniendo en cuenta que ésta se ha de retrasar para adaptarse al nuevo trazado de la vía por lo comentado anteriormente del punto de aguja. De esta forma, esta propuesta estudiará la posibilidad de no mover el poste de posición, forzando a los cables a abrirse antes y recorriendo menos distancia, lo que causará un aumento en las tensiones que se deberá estudiar (ver ANEXO IV).

4.4.4. Propuesta #4

Como última propuesta y parecida a la anterior, consideramos la opción de no mover el poste de su ubicación original, de esta forma se descartan los posibles problemas que puedan nacer de la proximidad con el pórtico; pero ahora el hilo, en vez de recorrer un vano entero antes de encontrarse con la aguja, directamente irá hasta el pórtico B29/31 donde se produce el desvío y se bifurcará para poder alimentar a las dos vías.

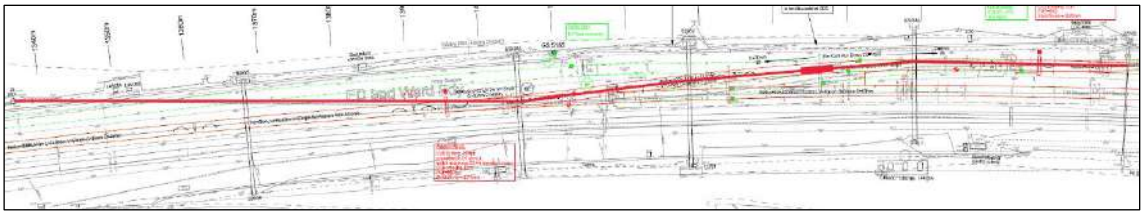


Ilustración 55. Diagrama de trazado de la propuesta 4.

Esta opción nace de la necesidad de asegurar que las fuerzas radiales que sufrirán las péndolas en los distintos pórticos no deben superar un valor límite estandarizado. De esta manera al prescindir de un vano entero por el que el cable iría en paralelo a la vía, por un lado se consigue aumentar significativamente el ángulo de entrada formado por los cables en la péndola del pórtico B29/31, mientras que por otro lado, el ángulo de salida que se forma por la derecha disminuye. Por lo tanto en el siguiente capítulo se verá analíticamente si esta opción termina siendo una ventaja o una desventaja para alcanzar nuestro objetivo (ver ANEXO V).

5. CÁLCULOS DE LAS SOLUCIONES

5.1. INTRODUCCIÓN

Una vez expuestas las diferentes propuestas pensadas para la remodelación de la línea aérea de contacto, en este capítulo se llevarán a cabo los cálculos necesarios para la elección de la solución óptima, con el fin de dar una conclusión al proyecto aquí descrito.

Entre los distintos factores a tener en cuenta, la fuerza radial y la carga del viento son los dos parámetros que se tendrán más en cuenta. Por lo tanto, aunque ya se han introducido brevemente con anterioridad, se tratará de comprender en profundidad y así poder encontrar los valores numéricos que nos guiarán en la elección de nuestra solución.

Para una mejor comprensión de los cálculos de este capítulo, se aclara que los dos parámetros que se analizarán para la decisión final de las propuestas son: por un lado la fuerza ejercida en las ménsulas de cada pórtico y por el otro la desviación que aparece en los distintos vanos da la línea. A su vez, la fuerza total será la suma de la fuerza radial y la fuerza del viento, mientras que la desviación total será la suma de la ocasionada por el viento y por el propio trazado de la vía.

Ilustración 56. Esquema de procedimiento del capítulo 5.

5.2. CARGA DEL VIENTO

La fuerza del viento es uno de los factores principales a considerar en el diseño profesional de trazado y cálculo de una línea aérea de contacto. Al fin y al cabo para reducir el gasto económico, se optimiza el número de soportes para fijar la catenaria, lo que provoca que la longitud de los vanos sea de una magnitud considerable.

En estos espacios el viento es la causa primera del movimiento de los hilos y según algunos parámetros como la localización o la estación del año, éste puede alcanzar unas velocidades que, al provocar una desviación en la catenaria, podría acabar con colapsar el sistema entero.

5.2.1. Algoritmo de cálculo

Para el cálculo numérico, se seguirán las indicaciones de la norma NR/L2/CIV/072 la cual detalla todos los pasos a seguir y parámetros a tener en cuenta para obtener una aproximación de la fuerza que ejerce el viento sobre la catenaria lo más fiel posible a la realidad.

Lo primero que debemos aclarar para seguir uno de los algoritmos que la norma expone, es decidir sobre la orografía, si bien es urbana o rural. Como bien se ha podido observar, nuestra área de trabajo está situada en una zona urbana lo suficientemente plana como para suponer un coeficiente de orografía $C_o = 1$. Esto por lo tanto nos lleva al algoritmo de cálculo de zona urbana de la rama de la derecha que se muestra más adelante.

Los distintos parámetros necesarios para el cálculo se describen en la siguiente lista:

- V_b, velocidad del viento corregida: se intenta llegar a una aproximación de la velocidad media del viento. Ésta depende de distintos parámetros.
- C_{dir}, coeficiente direccional del viento: será 1 siempre que se consideren todas las direcciones posibles.
- C_{season}, coeficiente de la estación del año: será 1 siempre que se consideren todas las estaciones del año.
- C_{prob}, coeficiente de probabilidad: tomará dos valores distintos, 1 cuando se quiera calcular cargas de viento y 0,8143 cuando se quiera hallar la desviación.

- C_{alt}, coeficiente de altitud de la zona de trabajo, que se rige por la siguiente ecuación, donde A es la altitud respecto del nivel del mar:

$$C_{alt} = 1 + 0{,}001 \cdot A$$

Ecuación 8. Coeficiente de altitud.

- $V_{b,map}$, velocidad básica del viento: estandarizada para cada país dependiendo de la zona de la ciudad en cuestión. Ver mapa inferior.
- $C_e(z)$, factor de exposición: desarrollado más adelante.
- $C_{e,T}$, factor de corrección de exposición: desarrollado más adelante.
- G_c, factor de respuesta estructural: para los conductores tiene un valor de 0,75.
- d, el diámetro del conductor en metros: 0,0132 m según la norma Nr 440.1.0493_MAN_001.
- φ, el ángulo de incidencia del viento sobre el hilo, siendo el más crítico 0º.
- C_c, factor de resistencia (drag): 0,8 según la norma del viento NR/L2/CIV/072.
- T, tensión mecánica del hilo: 13,2 kN según la norma Nr 440.1.0493_MAN_001.
- a, distancia absoluta del vano: mostrada en la siguiente tabla.

Pórtico	B29/28	B29/29	B29/31	B29/32	B29/33
Longitud vano	53,31 m	42,84 m	26,11 m	33,27 m	
Vano número	1	2	3	4	

Tabla 1. Longitudes de los vanos de estudio.

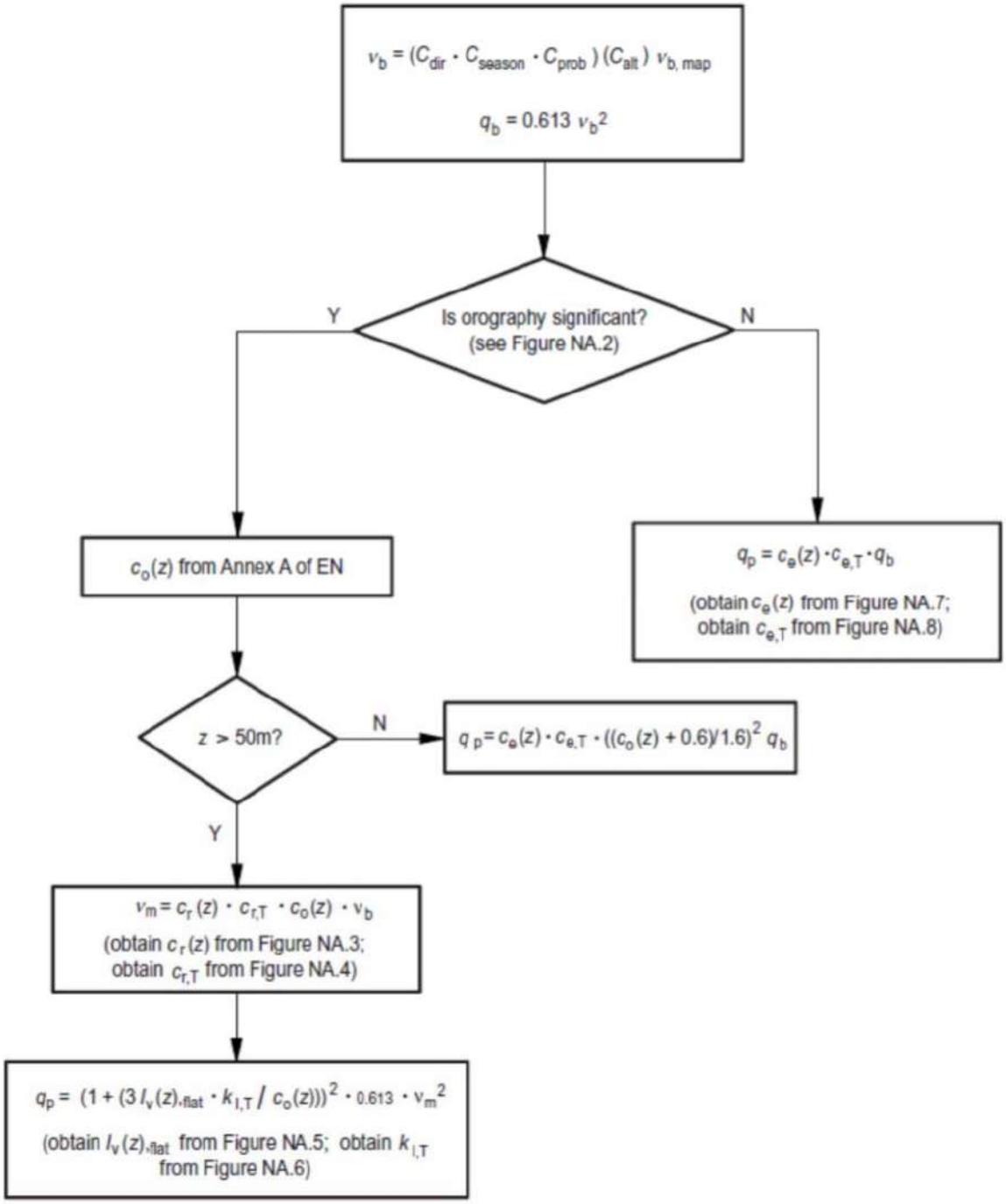


Ilustración 57. Algoritmo de cálculo de carga de viento para zonas urbanas. (NR/L2/CIV/072)

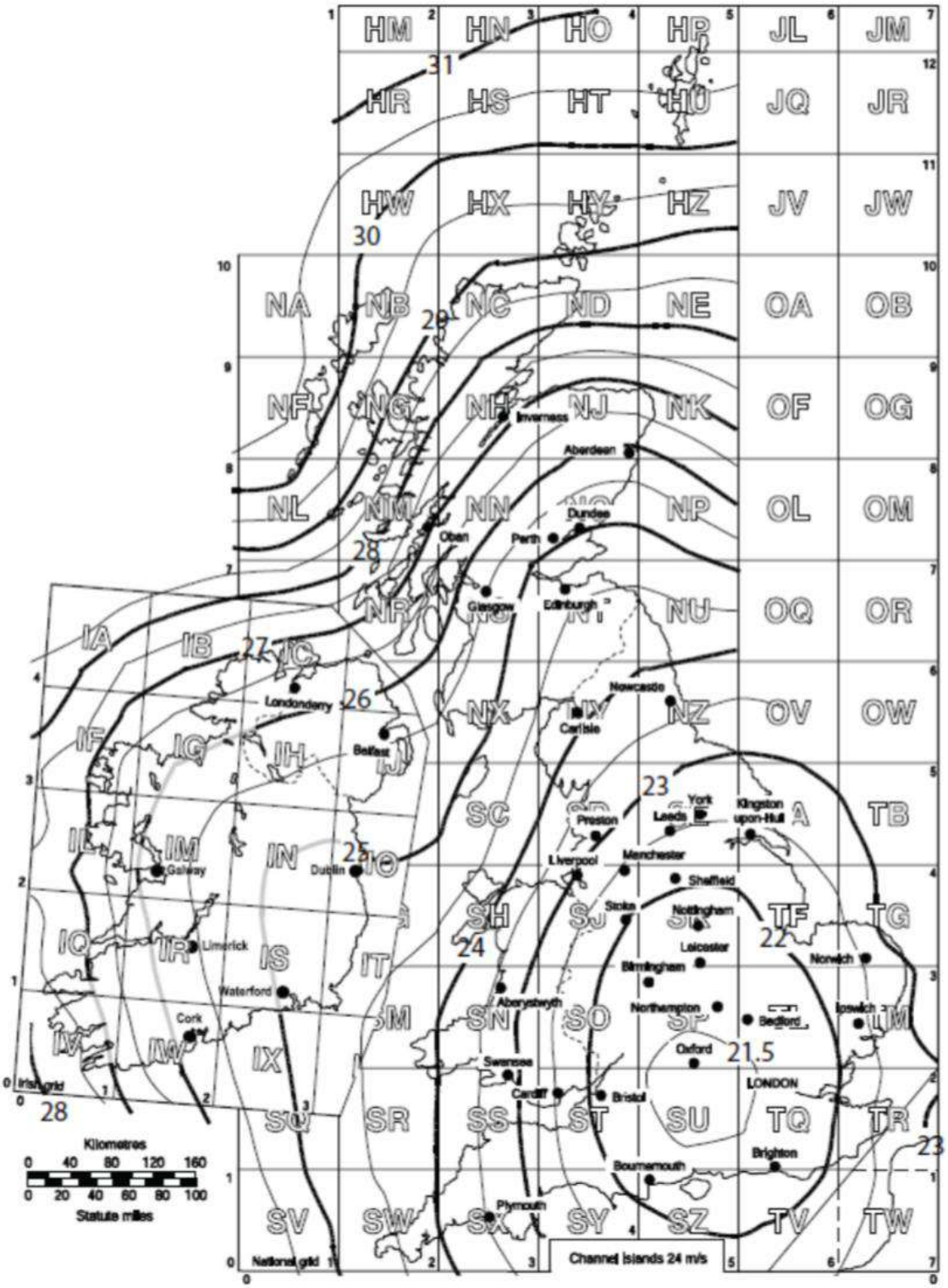


Ilustración 58. Mapa de velocidades básicas del viento en Gran Bretaña. (NR/L2/CIV/072)

5.2.2. Cálculo analítico

Siguiendo la norma antes citada, la ecuación que nos marca el algoritmo para hallar la **velocidad corregida del viento** es la siguiente:

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot C_{prob} \cdot C_{alt} \cdot V_{b,map}$$

Ecuación 9. Velocidad corregida del viento.

Donde quedan por definir los valores del coeficiente de altitud y de la velocidad básica. El coeficiente de altitud se calcula fácilmente encontrando la altitud del punto de trabajo respecto del nivel del mar: 33m. Por lo tanto:

$$C_{alt} = 1 + 0{,}001 \cdot 33 = 1{,}033$$

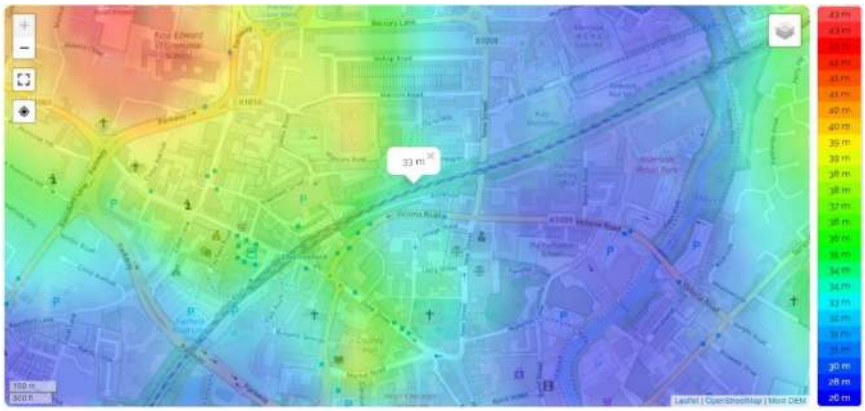


Ilustración 59. Mapa de altitudes de la ciudad de Chelmsford. (Fuente: https://es-uy.topographic-map.com/maps/2zy5/Chelmsford/)

Por otra parte, la velocidad básica tendrá un valor de 22m/s, fijándonos en el mapa adjunto:

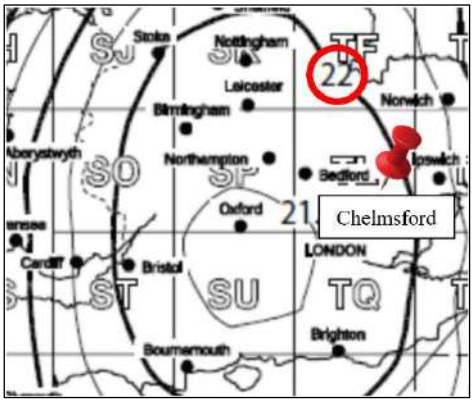


Ilustración 60. Ubicación de Chelmsford en el mapa de velocidades básicas. (NR/L2/CIV/072)

Con todo lo anterior, obtenemos una velocidad corregida del viento de:

$$V_b = 1 \cdot 1 \cdot 0{,}8143 \cdot 1{,}033 \cdot 22 = 18{,}506\ m/s$$

El siguiente paso será sustituir este valor en la ecuación de q_b para hallar la **presión del viento sobre el hilo**:

$$q_b = 0{,}613 \cdot V_b^2 = 0{,}613 \cdot 18{,}506^2 = 209{,}93\ N/m^2$$

Ecuación 10. Presión del viento sobre el hilo.

Continuando con el algoritmo, calcularemos la **presión máxima del viento sobre el hilo** con la siguiente fórmula:

$$q_p = C_e(z) \cdot C_{e,T} \cdot q_b$$

Ecuación 11. Presión máxima del viento sobre el hilo.

- Factor de exposición $C_e(z)$:

Para este cálculo hará falta la tabla adjunta a continuación, donde se necesitará otros dos parámetros para poder entrar a ella:

- *"Distance upwind to shoreline"*: que como su nombre indica, es la distancia desde la zona de trabajo hasta la costa, en este caso 34,16 kilómetros.

Ilustración 61. Distancia de la ciudad de Chelmsford a la costa. (Fuente: Google Earth)

- $z - h_{dis}$, altura de desplazamiento: la diferencia de cotas entre el suelo y la catenaria, que es lo mismo que la suma de la altura del hilo de contacto y la altura del sistema. $z - h_{dis} = 6\ m$.

Resumiendo lo anterior, se entra a la tabla del factor de exposición por el eje horizontal con los 34 km de distancia y por el eje vertical con los 6 m de altura, lo que se obtiene un factor $C_e(z) = 2{,}1$.

- Factor de corrección de exposición:

De la misma manera, para el factor de corrección de exposición también se usará una tabla, pero para entrar a ella se utilizará por un lado el mismo parámetro $z - h_{dis}$ para el eje vertical, pero el horizontal ahora será *"Distance inside town terrain"*.

- $z - h_{dis} = 6\ m$ (ya calculada).
- *"Distance inside town terrain"*: es la mínima distancia desde el área de trabajo hasta el límite de la ciudad, en kilómetros: 2,58 km.

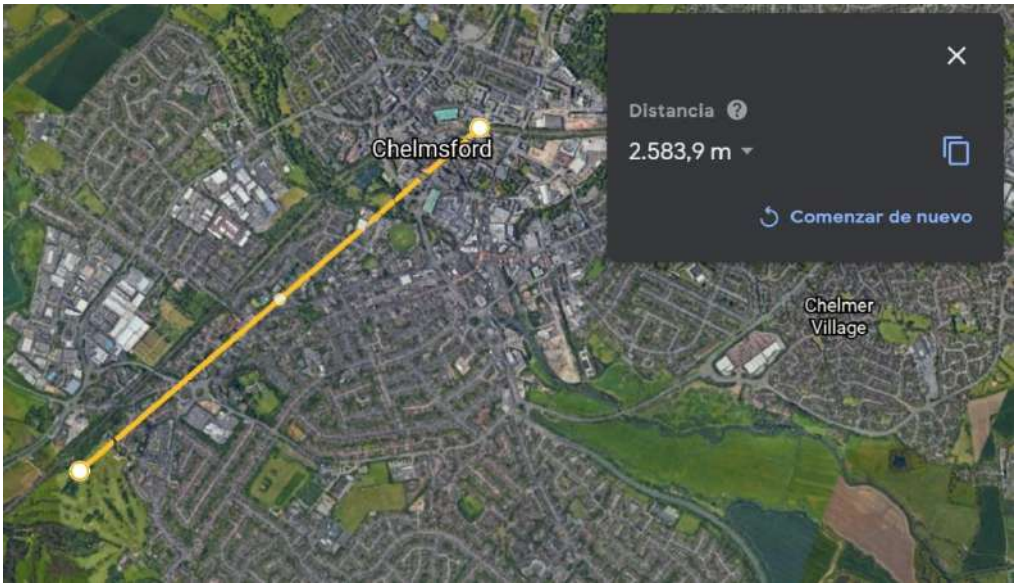


Ilustración 62. Distancia de la estación de Chelmsford al límite de la ciudad. (Fuente: Google Earth)

Con estos datos, accedemos a la tabla, de donde se obtiene un factor $C_{e,T} = 0{,}8$.

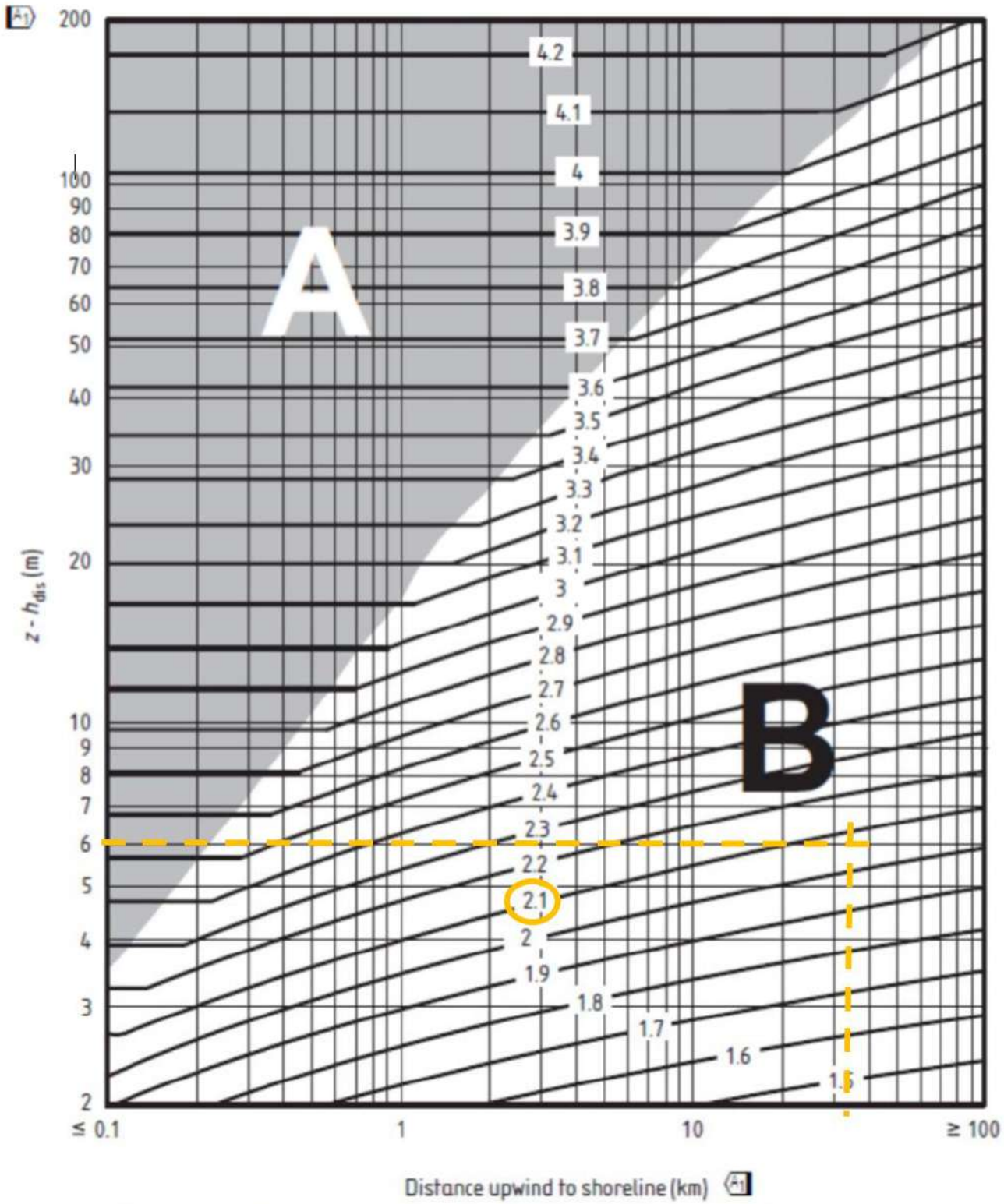


Ilustración 63. Gráfico de obtención del factor de exposición. (NR/L2/CIV/072)

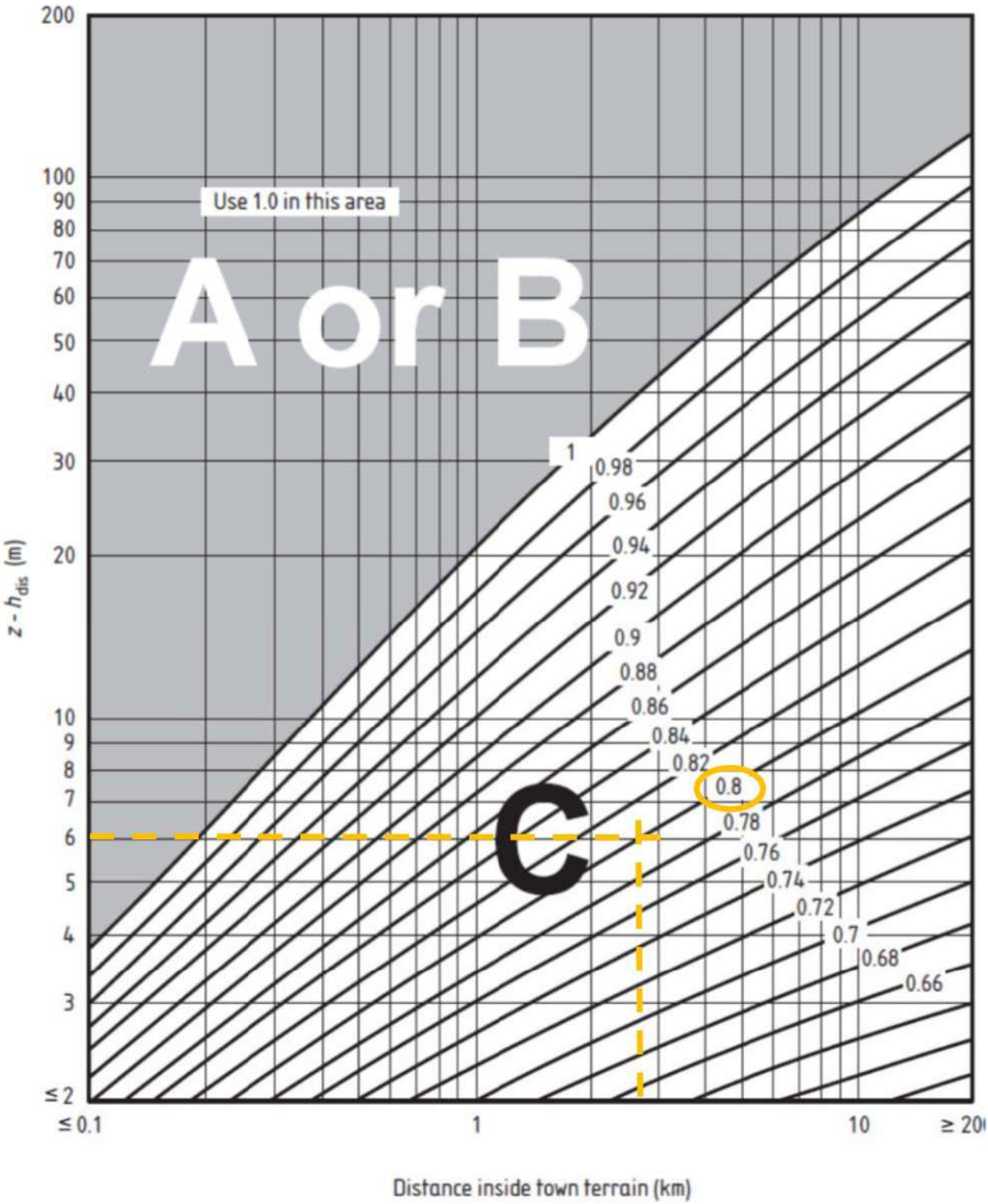


Ilustración 64. Gráfico de obtención del gráfico de corrección de exposición. (NR/L2/CIV/072)

Con estos dos factores calculados, se puede proceder al cálculo de la presión máxima del viento sobre el hilo:

$$q_p = 2{,}1 \cdot 0{,}8 \cdot 209{,}93 = 352{,}68\ N/m^2$$

Una vez calculada la presión, la **fuerza del viento sobre el hilo**, medida por unidades de longitud, queda de la siguiente forma:

$$q_{wc} = q_p \cdot G_c \cdot d \cdot C_c \cdot \cos^2 \varphi$$

Ecuación 12. Fuerza del viento sobre el hilo.

Como todos los parámetros de la anterior ecuación ya han sido descritos, sustituimos sus valores en la ecuación anterior y la fuerza del viento sobre el hilo resulta:

$$q_{wc} = 352{,}68 \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}0132 \cdot 0{,}8 \cdot 1 = 2{,}79\ N/m$$

5.2.3. Valor del "blow off"

En último lugar, sólo quedaría calcular la desviación o "blow off" provocada por el viento en los dos vanos que se están estudiando. Para facilitar la comprensión se utilizará una nomenclatura para nombrar a los distintos vanos: los dos primeros pertenecientes a la vía principal serán los vanos 1 y 2, mientras que en los dos siguientes, 3 y 4, donde ya se ha producido el desvío, se calculará únicamente para la vía desviada, es decir la superior.

Como se explicó en el capítulo de elementos de catenaria, la ecuación del "blow off" que rige la desviación provocada por el viento, sigue la siguiente fórmula:

$$d = \frac{q_{wc} \cdot a^2}{8 \cdot T}$$

Sustituyendo con los valores de longitud del vano de la tabla 1, concluimos que las desviaciones "blow off" causadas por el viento en los cuatro vanos son:

	Vano 1	Vano 2	Vano 3	Vano 4
"Blow off"	0,0751 m	0,0485 m	0,018 m	0,029 m

Tabla 2. Valores del Blow off

5.2.4. Valor de la carga de viento añadida a las ménsulas

Para hallar el valor de la **fuerza del viento en las ménsulas** que se debe sumar a la ya calculada fuerza ejercida por la proyección de la tensión de los cables, el factor de probabilidad pasará a ser 0,8143 y la distancia donde se estudiará será la semisuma de las longitudes de los dos vanos adyacentes a la ménsula, ya que la fuerza del viento se reparte igual en un lado del pórtico como en el otro. Por lo tanto la ecuación de la fuerza del viento queda:

$$F_v = \frac{q_{wc}}{0{,}8143^2} \cdot \frac{a_1 + a_2}{2}$$

Ecuación 13. Fuerza del viento en las ménsulas.

La fuerza ejercida en la péndola del **pórtico B29/29** queda de la siguiente forma:

$$F_v = \frac{2{,}79}{0{,}8143^2} \cdot \frac{53{,}31 + 42{,}84}{2} = 202{,}28\ N$$

Y por otro lado en el **pórtico B29/31**, contando con que la distancia al siguiente pórtico es de 26,11 m:

$$F_v = \frac{2{,}79}{0{,}8143^2} \cdot \frac{42{,}84 + 26{,}11}{2} = 145{,}06\ N$$

5.3. DESVIACIÓN LATERAL DEL HILO

Como anunciamos en el capítulo 3, la desviación lateral que sufre el hilo de contacto a lo largo del vano está compuesta por la superposición de dos desviaciones: la provocada por el viento ("Blow off") y la provocada por la combinación del trazado de la vía con el descentramiento.

Esta desviación no dependerá de la propuesta considerada, ya que la longitud de los vanos es constante independientemente de las propuestas predichas. En este apartado se tratará por lo tanto de hallar el valor límite de la desviación por el trazado de la vía, para así encontrar la desviación total y comprobar que queda dentro de los límites establecidos.

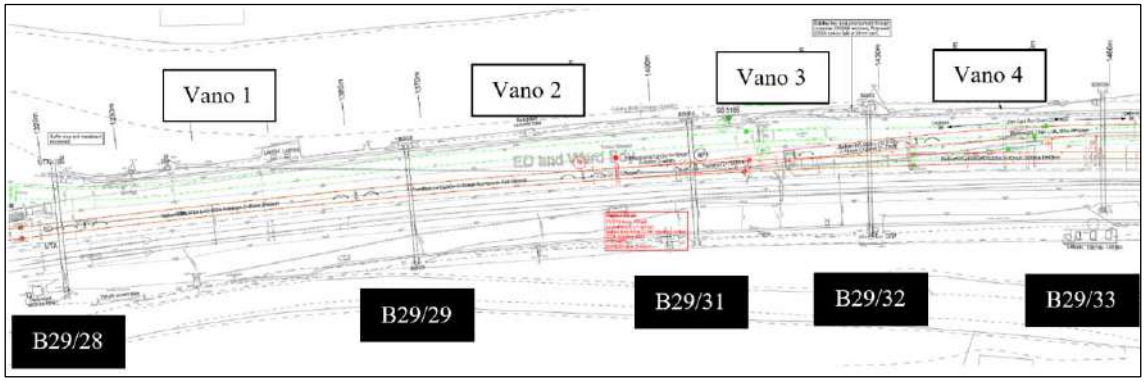


Ilustración 65. Nomenclatura de los vanos.

Tenemos que diferenciar por lo tanto entre los tramos rectos y curvos. Los vanos 1 y 2 siendo los más próximos al andén, apenas tienen algo de curvatura. En el plano proporcionado de hecho se muestra un radio de 1486,375 m para ese tramo, lo que se considera prácticamente como una línea recta.

Los otros dos vanos tienen curvatura pero no queda muy bien definida: en la teoría vimos la forma de calcular la desviación de un tramo curvo en el supuesto de que este estuviese regido a lo largo de todo el vano por la misma curva, pero en la realidad no es así. En el último tramo del vano 2 las vías empiezan a curvarse hacia la izquierda con un radio de 327,3 m, después en mitad del vano 3 la curva cambia de cóncava a convexa con un radio de 975 m para luego acabar el vano 4 con una curva de radio 289,7 m. Como se puede

observar, la realidad siempre es mucho más compleja. Por ello se asumirá una curva de radio 975 m para el vano 3 y otra de radio 289,7 m para el vano 4.

Recordando las ecuaciones de la desviación lateral:

- Vanos rectos:

$$D = \frac{q_{wc} \cdot a^2}{8 \cdot T} + \frac{2 \cdot T \cdot b^2}{q_{wc} \cdot a^2}$$

- Vanos curvos:

$$d' = \frac{a^2}{8 \cdot R}$$

$$D = d + d' - b$$

Donde:

- d, es la desviación por el viento "Blow off".
- a, es la longitud del vano.
- q_{wc}, fuerza del viento sobre el hilo: 2,79 N/m (constante).
- T, tensión mecánica en los hilos: 13,2 kN (constante).
- R, es el radio del trazado de la vía.
- b, el descentramiento que se supondrá:
    - Para tramos rectos, 230 mm siendo éste el nominal de la recta según la norma Nr 440.1.0493_MAN_001 y en curva .
    - Para tramos curvos, el valor de d' siempre que sea menor que 380 mm siendo éste el máximo admisible para estos tramos, como dicta la norma antes citada.
- d', el descentramiento ocasionado por el trazado de la curva.
- D, el descentramiento total del hilo.

Los resultados obtenidos de las distintas desviaciones se muestran en la siguiente tabla:

Parámetros:	Vano 1 (recto)	Vano 2 (recto)	Vano 3 (curvo)	Vano 4 (curvo)
d (m)	0,0751	0,0485	0,018	0,029
a (m)	53,31	42,84	26,11	33,27
b (m)	0,23	0,23	0,100	0,380
R (m)	-	-	975	289,7
Incógnitas:				
d' (m)	-	-	0,087	0,478
D (m)	0,251	0,320	0,005	0,127

Tabla 3. Resultados de la desviación lateral de los hilos.

Siguiendo la norma Nr 440.1.0493_MAN_001 del Network Rail que dicta los parámetros de este proyecto, el hilo de contacto guarda una desviación lateral máxima permisible de 400 milímetros. Como se comentó en el capítulo de elementos, este valor se establece en función de la anchura admisible del pantógrafo para que el hilo permanezca siempre dentro de esta zona de trabajo y no suceda haya riesgo de accidente por el descarrilamiento del pantógrafo.

Por lo tanto, como se puede observar de la tabla anterior, en los cuatro vanos se consigue mantener la desviación total dentro de los límites establecidos por la norma Nr 440.1.0493_MAN_001.

5.4. CORRECCIÓN AISLADOR DE SECCIÓN

El aislador de sección instalado en el vano 4, según la nomenclatura antes citada en la ilustración 65, no se ha tenido muy en cuenta hasta ahora y limita el descentramiento a un valor menor que los antes citados. Si se observa la norma Nr 440.1.0493_MAN_001, se encuentra un capítulo donde dicta los valores máximos que debe poseer la desviación lateral máxima para el correcto funcionamiento de los aisladores de sección. Éstos son elementos imprescindibles para el funcionamiento de la vía y requieren de condiciones distintas que otro tipo de equipos.

Leyendo la norma antes citada, aquellos vanos que cuenten con un aislador de sección no podrán superar una desviación lateral de $\pm$100 mm. Por lo tanto, al dar problemas con la geometría de la vía, se requerirá desplazar el equipo a otro vano distinto, donde sí se cumplan las especificaciones predichas.

Para ello se debe estudiar el mapa eléctrico de la estación (ver ANEXO VI), donde vienen marcadas las zonas de los distintos niveles de tensión, con el fin de modificar lo menos posible estas áreas para no necesitar de mayores cambios de equipos.

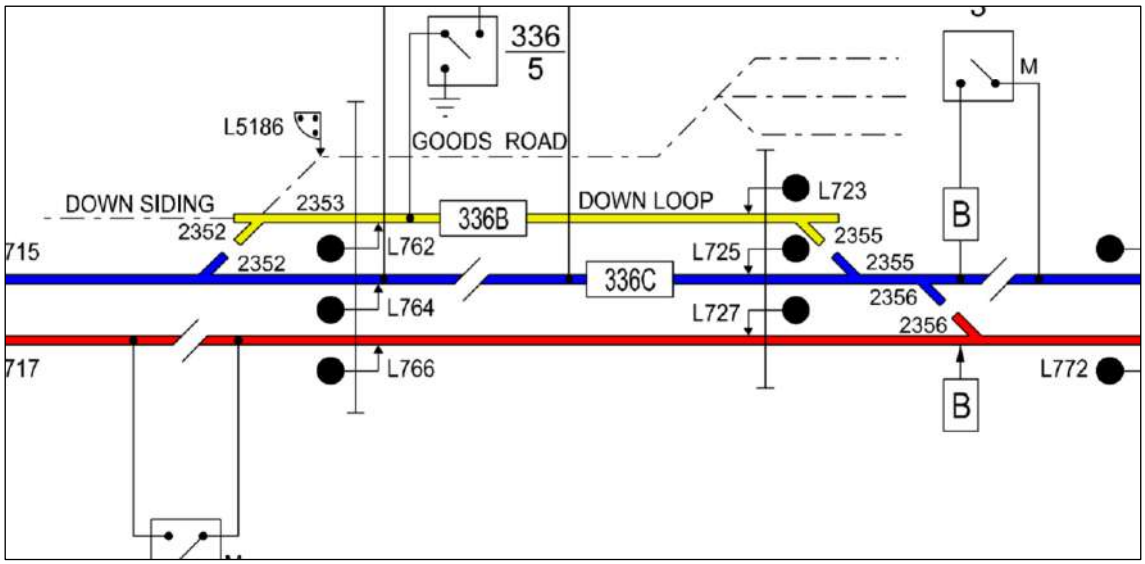


Ilustración 66. Captura del mapa eléctrico de la estación de Chelmsford

Como se puede intuir, cada una de las distintas líneas corresponde a una zona eléctrica distinta, que puede coincidir un poco con el mapa de la catenaria. En el capítulo de

elementos ya se adelantó que los aisladores de sección son elementos fundamentales para el funcionamiento de una línea aérea de contacto, ya que están encargados de dividir eléctricamente las distintas zonas de tensión operativas de la línea. Por esta razón, si nos fijamos en la captura del mapa antes adjunto, las conexiones entre líneas de distinto color están separadas por un pequeño espacio en blanco con una pareja de números en su proximidad. Esto representa un aislador de sección, junto con la aguja donde va instalado.

Para el caso de estudio de este apartado, se encuentra en el lado izquierdo de la captura, entre la línea amarilla y la azul, el aislador de sección a analizar, junto con el nombre de la aguja 2352 representado. Por lo tanto, se requerirá mover este aislador, con el fin de encontrar un lugar que afecte lo menos posible a las áreas eléctricas.

5.4.1. Primera opción cambio aislador de sección

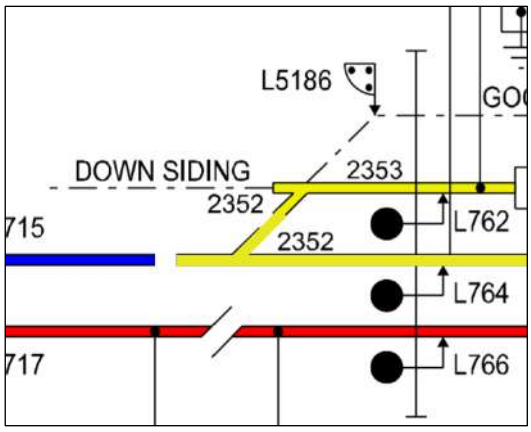


Ilustración 67. Diagrama de la primera opción del cambio del aislador de sección.

Como primera opción, se considera la posibilidad de mover el aislador de sección a una zona anterior a la aguja, pero esto ocasiona que el resto de la vía "Down main" que queda por la derecha del aislador se convierta en la misma zona eléctrica, cambiando así toda la configuración y requiriendo entonces de otro aislador de sección al otro lado de la aguja para conseguir el nivel de tensión deseado en esa zona.

Esta opción encarece más la reforma y por consiguiente se descarta.

5.4.2. Segunda opción cambio aislador de sección

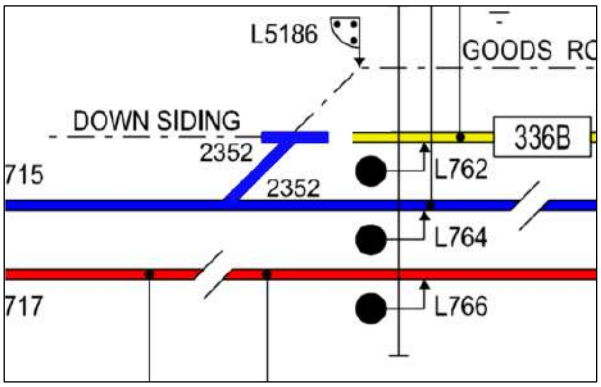


Ilustración 68. Diagrama de la segunda opción del cambio del aislador de sección.

En esta segunda opción se puede ver cómo, al contrario de la anterior, situando el aislador de sección más adelante en la nueva línea después de la aguja 2352, se consigue no alterar eléctricamente las zonas ya existentes. Esto se consigue gracias a que la vía de la izquierda de la aguja 2352 no está electrificada (la línea punto-raya) y por lo tanto se podrá situar el aislador en este nuevo punto para que no tenga problemas con la geometría.

Aunque en este mapa eléctrico no se especifique exactamente, se podrá suponer que el aislador de sección ha de moverse un vano hacia la derecha, lo que sería después del pórtico B29/33, por lo que se deberá comprobar la desviación para instalar allí nuestro equipo. Al tratarse de un vano cuya curva no tiene un radio definido, sino que va cambiando a lo largo de su recorrido, llamada clotoide, el cálculo de su desviación lateral se complica demasiado, por lo que se tratará como un vano con una curvatura con un radio de 293 m, ya que desde el plano vemos que es el radio que más predomina.

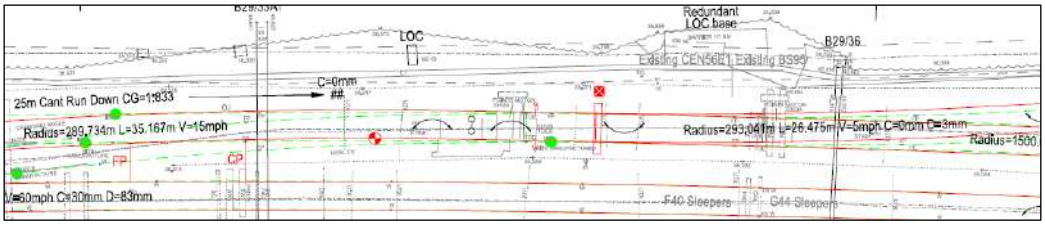


Ilustración 69. Diagrama del vano final del aislador de sección.

Siguiendo el algoritmo de cálculo de desviaciones laterales para curvas expuesto ya con anterioridad, llegamos a un resultado de 0,074 m, inferior al límite de los 100 mm necesarios para la instalación de los aisladores de sección.

5.5. FUERZA RADIAL

La fuerza radial es uno de los factores limitantes más importantes a la hora de diseñar una línea aérea de contacto, ya que todos los equipos que forman parte de la catenaria, especialmente aquellos cuya función forma parte de la sujeción de los hilos, están pensados para cumplir su función dentro de unos límites de tensión aplicada, es por esto por lo que el límite bajo el que se intentará diseñar será el del equipo de sujeción en cuestión.

De esta forma, las propuestas del capítulo anterior no se han pensado dependiendo de si soportarían o no la fuerza radial, sino de si eran o no soluciones viables que podrían funcionar para este proyecto. Por lo tanto, como se ha mencionado antes, en este capítulo se expondrá el procedimiento a seguir para el cálculo óptimo y así poder escoger la mejor solución.

Pero antes de ello hace falta aclarar un concepto importante. La tensión mecánica a la que deben estar los cables es una constante para el tipo de catenaria utilizada en cada zona. Este valor de la tensión no lo calculamos, sino que viene estandarizado y reglado. En nuestro caso, se han proporcionado las tablas inferiores, provenientes de un documento del Network Rail, con los distintos parámetros con los que trabajará nuestro diseño.

Catenary	Cross Sectional Area	$70mm^2$	
	Diameter	10.5mm	
	Conductor Make Up	19/2.1mm	
	Material	BzII	
	Tension	12.00kN	10.00kN
	Weight	0.60kg/m	
	Coefficient of Thermal Expansion	$1.80x10^{-5}$	
	Ice load – 9.5mm radial	5.366N/m	
	Ice load – Greater London area – 4mm radial	1.638N/m	
	OLEMI Reference	148/439/998	
Contact Wire	Cross Sectional Area	$120mm^2$	
	Diameter	13.2mm	
	Material	CuAg	
	Tension	13.20kN	7.50kN
	Weight	1.07kg/m	
	Coefficient of Thermal Expansion	$1.70x10^{-5}$	
	OLEMI Reference	148/373/998	
	Radial load limit on standard registration arms including wind load	1400N [2]	

Tabla 4. Parámetros de la catenaria y del hilo de contacto.

Nos fijaremos en la tabla primera, que lista los parámetros del hilo de contacto. En ella podemos observar dos valores distintos para la tensión mecánica, lo que suponemos como un valor máximo y mínimo. Que es normal en estas ocasiones se utiliza el valor máximo de los dos, para así diseñar en el peor de los casos, y si la tensión resulta ser un poco menor, que entre dentro del rango de valores admisible, pero que nunca sobrepase el máximo. Por lo tanto tendremos que diseñar la tensión del hilo a 13,2 kN.

Por otra parte, para la sujeción del hilo en los pórticos, se cuenta con unas ménsulas tubulares de 48 mm de diámetro, las cuales terminan en un brazo de atirantado diseñado para soportar tensiones menores de 1,4kN. Una vez realizados los cálculos se deberá comparar los resultados con este límite, y en función de éstos aprobar, o rechazar propuestas, o pensar en otras soluciones en el caso de que ninguna sea viable.

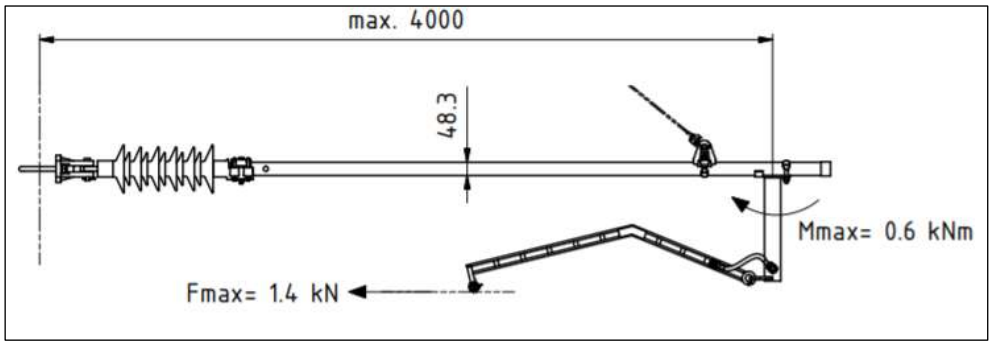


Ilustración 70. Ménsula tubular de 48mm con brazo de atirantado.

5.5.1. Procedimiento de cálculo

Con el algoritmo a seguir se tratará de calcular las tensiones soportadas en ambas ménsulas de los pórticos B29/29 y B29/31, que son los dos pórticos que más carga radial soportarán al ser los encargados de la aguja 2352.

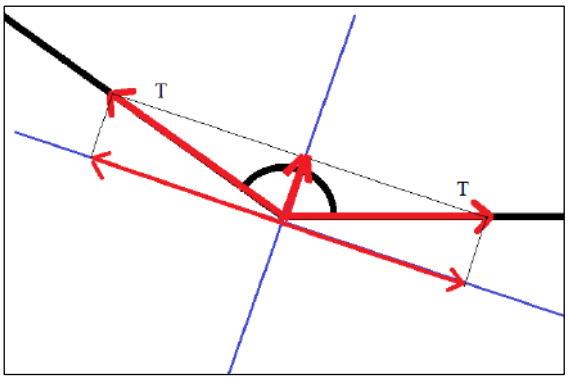


Ilustración 71. Esquema de la descomposición de la fuerza radial.

En el esquema anterior se ha tratado de representar en la misma figura el hilo de contacto (negro), que cambia de dirección en la péndola (azul) que se encuentra en dirección de la bisectriz que forma el ángulo de los cables para poder repartir la fuerza equitativamente. La tensión ejercida por los hilos sobre la péndola por lo tanto ejercerá dos fuerzas que tirarán de ésta hacia fuera. Dichas fuerzas se pueden descomponer con simple trigonometría si suponemos el sistema de referencia en la misma péndola. De esta forma, las componentes horizontales de la tensión se anularán entre sí, mientras que las verticales se sumarán.

Esta componente es la que se considerará como la fuerza radial, por lo tanto resumiendo todo lo anterior en la misma ecuación obtenemos:

$$F_R = 2 \cdot T \cdot cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Ecuación 14. Descomposición de la fuerza radial.

5.5.2. Cálculo analítico

Como se conoce que el límite máximo de la fuerza radial ha de ser la fuerza máxima que soporta la péndola con 1,4 kN, basta con medir los ángulos que forman los hilos en estos dos pórticos de los planos antes adjuntos para elaborar la siguiente tabla que resume las tensiones aplicadas en las péndolas.

	B29/29		B29/31	
	Ángulo (º)	Fuerza (kN)	Ángulo (º)	Fuerza (kN)
Propuesta #1	172	1,84	176	0,92
Propuesta #2	175	1,15	177	0,69
Propuesta #3	170	2,30	177	0,69
Propuesta #4	180	0	173	1,61

Tabla 5. Resultados de la fuerza radial en los pórticos de estudio

Para las soluciones propuestas 1, 3 y 4, la fuerza radial supera el límite máximo de la ménsula, mientras que para la propuesta 2 no acaba llegando a ese límite, pero esta última ya se descartó en el anterior capítulo debido a que el pórtico no estaba adaptado para la instalación de la compensación de los hilos. Esto significa que se deberá de cambiar el tipo de ménsula como se comentará más adelante.

Otra forma de comprobar las cargas que sobrepasan el límite de las péndolas sería hallar el ángulo mínimo que los cables pueden formar al girar en los pórticos. Para ello bastará con sustituir en la ecuación la carga máxima y despejar el ángulo resultante:

$$1{,}4 = 2 \cdot 13{,}2 \cdot cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{1{,}4}{2 \cdot 13{,}2}$$

$$\alpha = 2 \cdot arccos\left(\frac{1{,}4}{2 \cdot 13{,}2}\right)$$

$$\alpha = 173{,}92°$$

Como podemos observar, cualquier ángulo por debajo de 173,92º causará una fuerza radial mayor de 1,4 kN que la ménsula tubular de 48 milímetros no será capaz de aguantar.

Sumando los valores anteriores de la fuerza del viento con estos últimos calculados a causa de la tensión, obtenemos una **fuerza total** de:

Fuerza total	B29/29	B29/31
Propuesta #1	2,042 kN	1,065 kN
Propuesta #2	1,352 kN	0,835 kN
Propuesta #3	2,502 kN	0,835 kN
Propuesta #4	0,202 kN	1,755 kN

Tabla 6. Resultados de la fuerza total en los pórticos de estudio.

5.6. CORRECIÓN FUERZA

Antes de encontrar una solución final para nuestro proyecto se deben dar la condiciones necesarias para que los valores de fuerza y desviación del hilo queden dentro de los límites establecidos. Para ello habrá que realizar alguna modificación al equipo instalado en la vía. Se empezará en este apartado con la corrección del problema de la fuerza total en las ménsulas de los pórticos.

Como se pudo observar al realizar los cálculos de las fuerza resumidos en la tabla 6, si se ajustara la ménsula del pórtico B29/29, se conseguiría que las tres primeras opciones cayeran dentro de los límites de la fuerza radial. Por lo tanto se diseñará la fuerza para la propuesta 3, que tiene el mayor valor de 2,502 kN de fuerza total en su ménsula, para así poder contar con las tres primeras posibilidades para decidir.

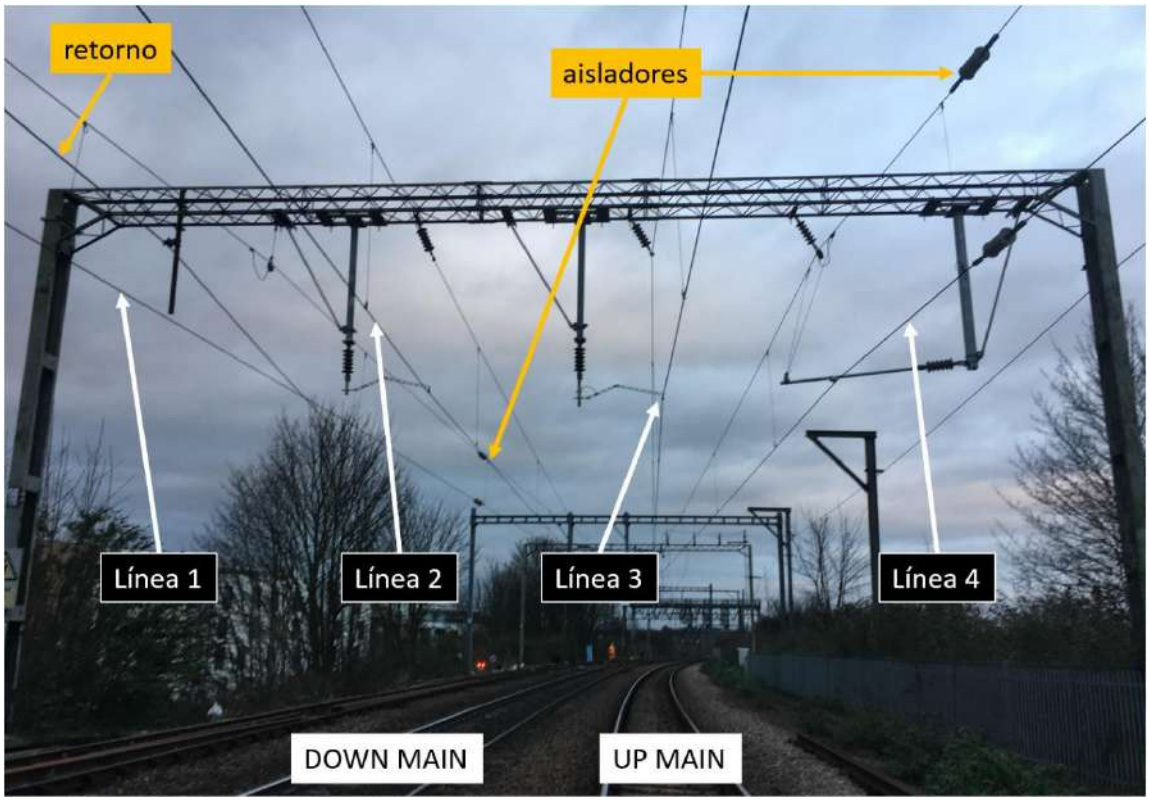


Ilustración 72. Descripción del pórtico B29/29.

5.6.1. Cambios en el pórtico B29/29

En la imagen anterior se muestra una descripción de la situación del pórtico B29/29, donde podemos distinguir las vías "Down main" a la izquierda y la "Up main" a la derecha. Cada una contará con su línea aérea principal (2 y 3) y con una auxiliar que va a anexionarse en el pórtico siguiente (1 y 4).

Para que la ménsula soporte la fuerza a la que está sometida, la solución más sencilla será cambiar la actual ménsula por una que pueda adaptarse a las condiciones requeridas. En el caso presente, la ménsula de la línea 2 es la tubular de 48 mm con brazo de atirantado ya descrita en el anterior apartado, el cual sólo es capaz de soportar 1,4 kN de fuerza radial.

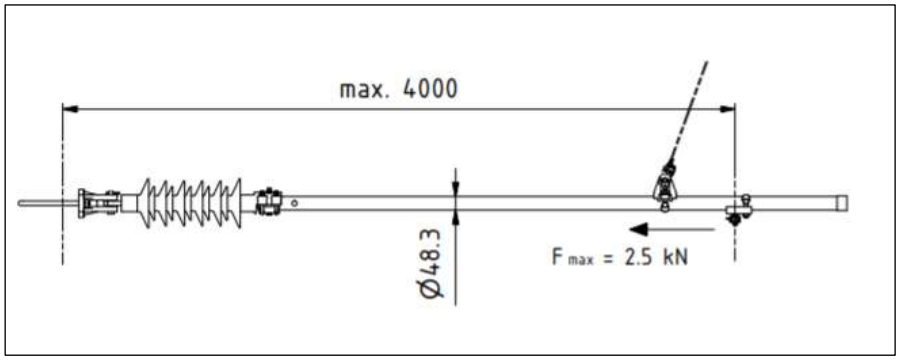


Ilustración 73. Ménsula tubular de 48mm sin brazo de atirantado.

En esta ocasión, se dispondrá de una ménsula también de 48 mm pero que prescinde del brazo de atirantado. De esta forma es el propio tubo de la ménsula el que soporta la fuerza radial del hilo, pero por otro lado no permite tanto movimiento como la anterior. Este tipo es el que podemos ver en la foto instalado para la ménsula de la línea 3. En esta ocasión se soportarán 2500 N de fuerza radial, justo el valor máximo obtenido antes.

Por otra parte, la instalación de esta ménsula requiere de un poste de acero más grueso, lo que provocará que se necesite recolocar el enganche de la línea 1 y el hilo de retorno, el cual pasará al lado derecho con sus aisladores, para evitar posibles contactos entre hilos.

Por último, se puede ver una pequeña toma a tierra entre la línea 2 y la 3, sujeta en el pórtico. Si se desea que el hilo forme parte de la vía desde este pórtico, se deberá mover los aisladores que se ven en el fondo, antes del pórtico y así poder electrificar el hilo.

6. ANÁLISIS VIABILIDAD ECONÓMICA

Como todo proyecto que requiera la participación de un organismo de gran escala, donde tengan que intervenir diferentes inversores, empresas o el gobierno de una localidad, se requiere un estudio económico detallado donde quede reflejado las intenciones de gasto por parte de los promotores del proyecto. Sobre todo aquellos que tengan que ver con la reforma o remodelación de cualquier tipo de estructura, uno de los factores más importantes para determinar la decisión final entre las propuestas de la reforma, es la viabilidad económica de cada una: aquella empresa encargada de financiar el proyecto no se hará cargo de gasto que no sean absolutamente fundamentales para el desarrollo y conclusión del mismo.

Para este proyecto, por motivos de privacidad y competencia de las empresas involucradas en la compraventa de equipos de catenaria, no se ha podido disponer de la información necesaria para concluir con una cifra exacta de coste de cada propuesta.

Además, uno de los propósitos de este trabajo ha sido comprender la "ingeniería básica" y no la "ingeniería de detalle" necesaria para llegar al nivel de exactitud profesional requerido por la gestora de la red ferrovial "Network Rail" (nada comparable con el nivel exigido hoy en día en España). De la otra forma, el proyecto se alargaría demasiado y no se podría centrar en su objetivo principal. Aun así, sería una buena opción para considerar como desarrollos futuros.

Por lo tanto, se tratará de dar una aproximación de las propuestas analizadas en el capítulo anterior, independientemente de si son viables técnicamente, con el fin de aclarar un poco la idea de la viabilidad económicamente hablando de cara a las conclusiones.

La **primera propuesta** cuenta el cambio de posición de toda la instalación del poste de compensación de la línea aérea, retirar la actual para retrasarla junto al pórtico B29/28. Aunque algún elemento podría reutilizarse, algunos equipos que ya hayan cumplido su vida útil tendrán que reemplazarse, aparte del coste que genere la nueva cimentación, por la cual se ha establecido que esta propuesta no era viable técnicamente.

Además se añadiría el coste del cambio de vano por parte del aislador de sección y la reforma del pórtico B29/29 que se ha mencionado anteriormente, donde cuenta con la instalación de la nueva ménsula y el cambio de posición de los hilos y del conductor de retorno.

Seguida de esta, la **segunda propuesta** es la que sin duda hace que encabece la lista de presupuestos de las cuatro: el reemplazo del pórtico actual B29/29 por uno de doble nivel para lograr la altura deseada de los hilos sería el mayor coste en todo el proyecto de un equipo por sí mismo.

Esto forzaría a cambiar también todos los equipos de enganche de las ménsulas para adaptarse a la nueva geometría del pórtico, lo que se combinaría con la reforma del poste que ya se necesitaba para superar el límite de la fuerza radial. El cambio de posición del aislador de sección también se contaría dentro del presupuesto.

Para la **tercera propuesta** nos encontramos ante la solución más viable seguida de cerca de la cuarta. Al no necesitar del cambio de posición del poste de compensación del cantón, éste se reutilizaría reemplazando únicamente aquellos elementos cuya vida útil haya expirado. Por otro lado, la remodelación comentada de los equipos del pórtico B29/29 sí que haría falta, al igual que la relocalización del aislador de sección.

Por último, la **cuarta propuesta**, como se acaba de comentar es también bastante viable ya que al no necesitar de sujeción en el pórtico B29/29, se puede prescindir de la remodelación de éste y esto a su vez sería excelente para el presupuesto del proyecto.

Aunque por otro lado, habría que rediseñar la ménsula del siguiente pórtico B29/31 donde el hilo sí se enganchará y desde éste se desviará hacia la nueva vía, sin permanecer durante un vano en paralelo con la vía principal, lo que es inusual y podría derivar en la necesidad de algún equipo extra. Además por supuesto del coste del aislador de sección ya mencionado.

Para todas las propuestas existirán costes fijos no mencionados en este capítulo que involucran la renovación de los equipos debido a que llegan al final de su vida útil, siendo esta la principal motivación para la realización del proyecto.

7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Entre todos los objetivos de desarrollo sostenible que propone la Organización de Naciones Unidas, podemos recalcar cuatro que sin duda se mantienen en la misma línea con nuestro proyecto, aunque se han acabado tratando algunos otros en mayor o menor medida.

El primer y principal objetivo afín con el proyecto es el noveno:

"Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación"

Este está directamente relacionado con nuestras metas del proyecto, ya que se ha tratado de optimizar la reforma de una estructura existente, fomentando la innovación, al calcular y estudiar todos los factores posibles que nos hagan conseguir un mejora del trazado de la línea de catenaria. De esta forma se obtienen unas vías más eficientes que nos permiten una conexión más rentable entre los destinos de la misma. Por ello, el trabajo que concluye en estas páginas está alineado con el noveno Objetivo de Desarrollo Sostenible

Seguido de éste, tenemos el séptimo objetivo de desarrollo sostenible:

"Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna"

Gracias a las innovaciones en la infraestructura se podrá incrementar el rendimiento eléctrico de la línea, lo que significa menos pérdidas de energía. Esto conlleva a una menor generación destinada a la alimentación del pantógrafo que puede ser utilizada en otras necesidades de la sociedad. Aunque los límites del proyecto no han englobado esta temática, se considera una opción viable para el caso de desarrollos futuros.

En tercer lugar, el proyecto se puede relacionar también con el objetivo decimotercero:

"Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos"

Este está muy relacionado con el anterior, ya que con unos pocos cambios en los objetivos de nuestro proyecto, se puede conseguir una valiosa reducción de contaminantes y malgasto de energía, al conseguir mejorar el rendimiento energético de nuestro tramo de la vía, pero sobre todo al no tener que producir tanto.

La mayoría de la energía con la que se alimentan estas vías proviene de centrales de energía no renovables (térmica, nuclear…) debido a la constante demanda que estas instalaciones necesitan. De esta manera la reducción en la generación de energía provocará una menor emisión de gases y residuos tóxicos al ambiente.

Por último, podemos decir que nuestro proyecto también se verá condicionado de una manera más secundaria por el decimoquinto objetivo:

"Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad"

Al estudiar las nuevas posibilidades del trazado de la vía, sin duda se han tenido en cuenta las repercusiones que ésta podrán tener sobre el ecosistema que las rodea. A la hora de diseñar este tipo de proyectos, el factor medioambiental suele cobrar poca importancia, cuando se trata de definir el posicionamiento de trazado de las vías del ferrocarril.

Es muy fácil pensar que no influye mucho el hecho de construir a través de un campo o un bosque, pero la realidad es que este tipo de construcciones alteran en su totalidad el ecosistema en el cual se llevan a cabo. Flora y fauna se ven condicionados a estos cambios y es nuestra total responsabilidad cuidar estas zonas naturales para poder garantizar la sostenibilidad de nuestras ciudades.

8. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

8.1. INTRODUCCIÓN

Para dar por finalizado el presente proyecto, este capítulo tendrá por objetivo principal el razonamiento y la elección de la propuesta final para la remodelación del sistema de catenaria de la estación de ferrocarril de la ciudad de Chelmsford, Inglaterra. Con este fin, se valorarán tanto los aspectos técnicos analizados en el capítulo 5, como los económicos estudiados en el capítulo 6.

Como se comentaba al inicio del trabajo, los equipos pertenecientes a la línea aérea de contacto, al igual que cualquier elemento fabricado bajo un plan de producción, tienen una vida útil determinada, la cual debe ser observada con atención durante las supervisiones técnicas para evitar colapsos y accidentes. En este caso, se aprovecha el reemplazo de dichos equipos que están a punto de cumplir su vida útil para planificar una reforma de un tramo próximo a la estación antes comentada.

De esta forma, se estudia la viabilidad de modificar el posicionamiento de la aguja 2352 con sus correspondientes hilos, lo que generará una serie de problemas, siendo los primordiales la fuerza radial ejercida en las ménsulas ($F_{Rmax} = 2{,}5\ kN$) y el descentramiento producido en cada vano ($D_{max} = 400\ mm$). A continuación se incluyen las tablas ya comentadas para su mejor comprensión con las diferentes propuestas

Fuerza total	B29/29	B29/31
Propuesta #1	2,042 kN	1,065 kN
Propuesta #2	1,352 kN	0,835 kN
Propuesta #3	2,502 kN	0,835 kN
Propuesta #4	0,202 kN	1,755 kN

Tabla 6. Resultados de la fuerza total en los pórticos de estudio.

	Vano 1	Vano 2	Vano 3	Vano 4
D (m)	0,251	0,320	0,005	0,127

Tabla 7. Resultados finales de la desviación lateral máxima.

8.2. ELECCIÓN PROPUESTA FINAL

Después de analizar por separado cada una de las propuestas descritas en el capítulo de diseño de soluciones, obtenemos las siguientes conclusiones:

8.2.1. Argumentación propuesta #1

La opción de retrasar el poste de anclaje de la compensación de los hilos es una buena propuesta desde el punto de vista teórico, ya que permite obtener un ángulo mayor de entrada en la vía y disminuir la fuerza radial. Cumple por tanto con el límite de fuerza radial y de desviación lateral.

La zona de anclaje es una zona que está rodeada completamente por una frondosa vegetación que habría que eliminar para poder operar en esa zona. Además el poste de compensación no puede encontrar ningún obstáculo que dificulte el sistema de poleas para asegurar la continua tensión de los hilos.

Pero el problema principal de esta propuesta no es la vegetación que dificulta el trabajo, sino los distintos problemas estructurales que pueden derivar de la instalación próxima al pórtico B29/28. El aumento del riesgo de colapso de la estructura es un peligro que no se puede estar dispuesto a correr y por eso se considera que esta opción no es válida.

Ilustración 74. Situación actual del pórtico B29/28

8.2.2. Argumentación propuesta #2

La segunda propuesta busca una solución al problema de la cimentación de la opción anterior mediante la instalación del poste de compensación directamente en el pórtico B29/28 y, aunque es técnicamente viable debido a que no supera el límite ni de fuerza radial ni de desviación lateral, se argumentó en el capítulo de diseño que no es una opción económicamente viable.

Como se puede observar en la anterior imagen, el pórtico cuenta únicamente con un nivel horizontal, y para la instalación de la compensación de los cables es necesario que se pueda instalar con la altura del sistema determinada, por lo que habría que cambiar todo el pórtico por uno adaptado para la instalación de los nuevos cables. Esto encarece mucho el proyecto y en consecuencia se descarta esta opción como solución final.

8.2.3. Argumentación propuesta #3

En principio, la propuesta 3 es la más viable económicamente hablando de las 4 comentadas. Al ser la más fiel al diseño original, necesita por lo tanto cambiar muy poco para satisfacer las necesidades de la vía.

Por parte de los límites técnicos, cumple la desviación lateral sin problema, pero la fuerza radial se queda 2 N por encima del límite máximo que marca el plano de la nueva ménsula, lo que pasado a unidades de masa, serían 200 gramos por encima del límite. Esto podría ser perfectamente un error de redondeo de cálculo o de medida de ángulo, por lo tanto también consideramos esta opción como técnicamente viable.

8.2.4. Argumentación propuesta #4

Por último, la propuesta 4 introduce la idea de, dejando el poste de compensación en su lugar original, omitir el vano de elevación que se suele dejar en la agujas y así pasar del anclaje al desvío de la catenaria en un mismo pórtico. Esta técnica poco común no es muy recomendable ya que se necesita ese espacio para elevar la altura absoluta de la catenaria y poder posicionar el hilo para el poste de aguja.

Por el ámbito económico, como se ha mencionado en el anterior capítulo, es después de la tercera propuesta, la que mejor presupuesto tiene de las cuatro, pero ha de descartarse para cumplir con la seguridad de la vía.

8.2.5. Elección final

Con todo lo argumentado en el anterior apartado y en vista de los resultados numéricos expuestos durante el capítulo de cálculos, se concluye que la **tercera propuesta** es la opción que optimiza en mejor y mayor medida las necesidades técnicas y económicas expuestas a lo largo del proyecto. Su plano, con la posición final del aislador de sección, se muestra a continuación (ver ANEXO IV).

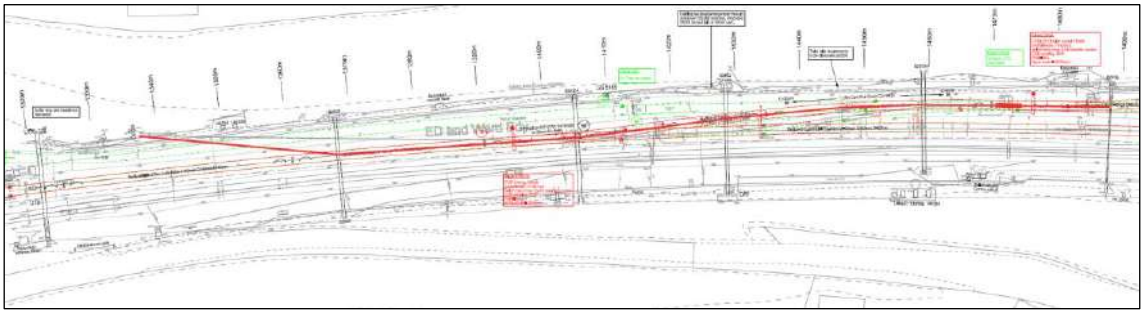


Ilustración 75. Diagrama de la propuesta final del proyecto.

8.3. OTRAS CONCLUSIONES

Entre otras conclusiones que pueden derivar de este proyecto, se encuentran:

- El análisis de un proyecto de esta escala ha de ser siempre proyectado desde la perspectiva técnica y económica de manera paralela y constante para garantizar un resultado óptimo.
- Al cambiar el trazado de una vía hace falta prestar especial atención a la posición de los nuevos puntos de aguja, con la posibilidad de cambiar las agujas de pórtico y evitar así que caigan en mitad de un vano.
- El movimiento de un aislador de sección tiene que estar motivado por el incumplimiento del límite de desviación lateral máxima y debe realizarse atendiendo a las necesidades de los distintos niveles de tensión presentes.

- El conocimiento previo de la funcionalidad de los elementos de la línea aérea de contacto en este trabajo ha sido clave para el posterior razonamiento de las ideas y problemas expuestos.
- Gracias a la eliminación de la vía de la topera se permite perfeccionar el trazado de la vía "Down Main" con el fin de corregir mejorar la vía en términos de seguridad y rendimiento, y de esta forma reducir las cargas soportadas en las ménsulas.

8.4. DESARROLLOS FUTUROS

Entre los diagramas futuros derivados de este proyecto, se pueden destacar los siguientes:

- Rediseño del pórtico B29/29 en profundidad: estudio de las cargas en la estructura, posicionamiento óptimo de las ménsulas y aisladores, determinación del anclaje de los nuevos hilos, etc.
- Estudio económico de la reforma de la línea aérea: incluyendo los minuciosos requisitos de planos impuestos por "Network Rail" para los proyectos de reforma y todos sus correspondientes presupuestos de compra, instalación y mantenimiento.
- Análisis matemático de las desviaciones laterales en aquellos vanos con curvas clotoides y encontrar un algoritmo de aproximación útil para extrapolar a proyectos de gran escala.
- Búsqueda de soluciones para reducir el impacto medioambiental producido en las renovaciones de catenaria.
- Estudio de la variación del rendimiento de transmisión eléctrica por medio del pantógrafo a la locomotora, a lo largo de un tramo de línea aérea de contacto.

9. BIBLIOGRAFÍA

[MONT02] Montesinos, J., & Carmona, M. (Febrero 2002). Tecnología de catenaria. RENFE.

[KIES08] Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., & Vega, T. (2008). Líneas de contacto para ferrocarriles electrificados: planificación, diseño, instalación, mantenimiento. Erlangen: Siemens AG.

[ADIF21] ADIF. (s.f.). Modelos de Catenaria de Adif. Recuperado el 11 de junio de 2021 de: http://www.adif.es/

[KEEN18] "Overhead Line Electrification for Railways", Garry Keenor, 2018

[EADI16] Eadic. (2016, 2 de mayo). Elementos de sustentación para la catenaria C-350. Recuperado el 18 de junio de 2021 de: https://www.eadic.com/elementos-de-sustentacion-para-la-catenaria-c-350/

[GOUR98] Gourvish, T. (1998). Los ferrocarriles como medio de transporte en Gran Bretaña, 1830 – 1990.

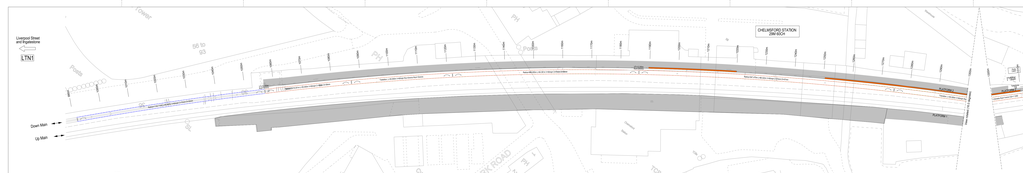
[RIO_08] del Río, E., Martí-Henneberg, J., & Valentín, A. (2008). La Evolución de la Red Ferroviaria en el Reino Unido (1825-2000).

[BRIT19] Britannica, T. E. (2019). Railroad history. Encyclopedia Britannica. Recuperado el 20 de junio de 2021 de: www.britannica.com/Railroad-history.

[LAMB21] Lambert, T. (2021, 14 de marzo). A history of Chelmsford. Recuperado el 2 de junio de 2021 en: https://localhistories.org/a-history-of-chelmsford/

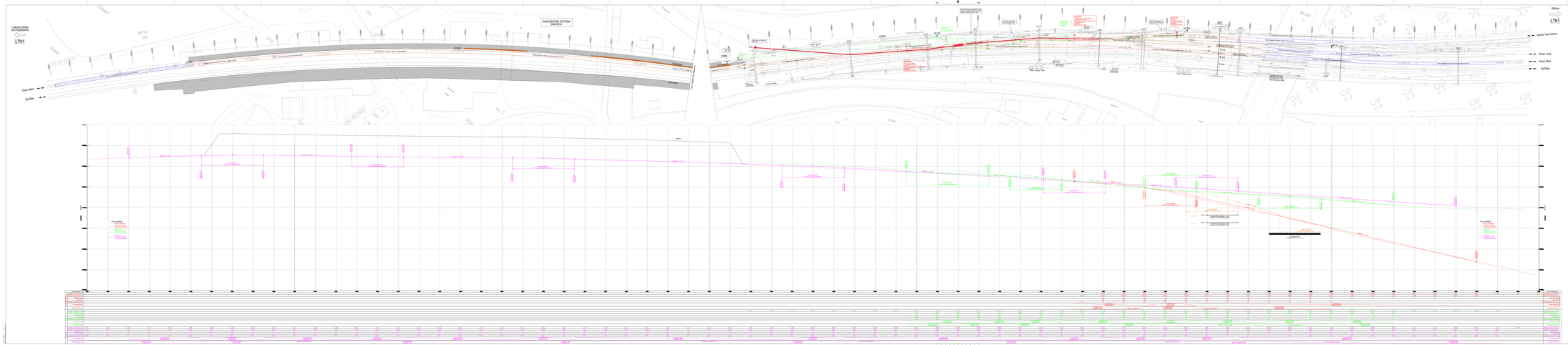
Anexo I

Diagrama trazado original


Liverpool Street and Bishopsstone
LTN1
Down Main
Up Main
CHELMSFORD STATION
DMI MSCP
OAK ROAD
Chelmer
Road
Station
Road
Rectangular Concrete Platform
Rectangular Concrete Platform
Tactile Paving
Tactile Paving
Tactile Paving

Anexo II

Diagrama trazado primera propuesta



TRENTY, HECK TO LINE ENVIRONMENTAL INFORMATION
THIS DRAWING IS TO BE READ IN CONJUNCTION WITH ALL OTHER ENVIRONMENTAL DRAWINGS
ANY DIMENSIONS TO BE CHECKED ON SITE PRIOR TO COMMENCEMENT OF WORKS
ANY DISCREPANCIES TO BE REPORTED TO THE ENGINEER IMMEDIATELY

Rev	Date	Amendment Details
1	-	Issued
2	-	Issued
3	-	Issued
4	-	Issued
5	-	Issued
6	-	Issued
7	-	Issued
8	-	Issued
9	-	Issued
10	-	Issued
11	-	Issued

LOCATION DIAGRAM

NOT TO SCALE

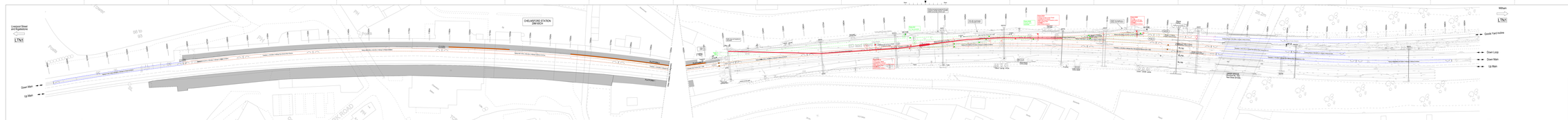
Cross section(s) to be added

EXISTING PRS DIAGRAM

Southend
Chelmsford
LTN1
Wickford
Shenfield
Down Main
Up Main
Down Loop
Up Loop
Down Goods
Up Goods

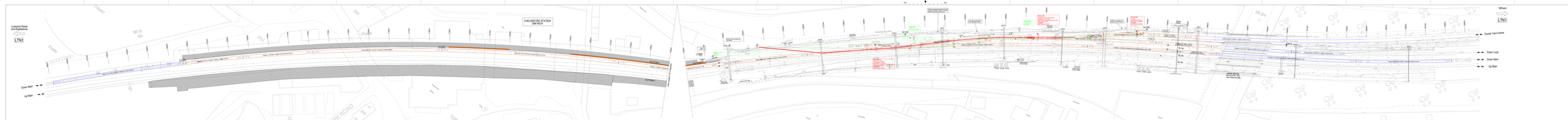
Anexo III

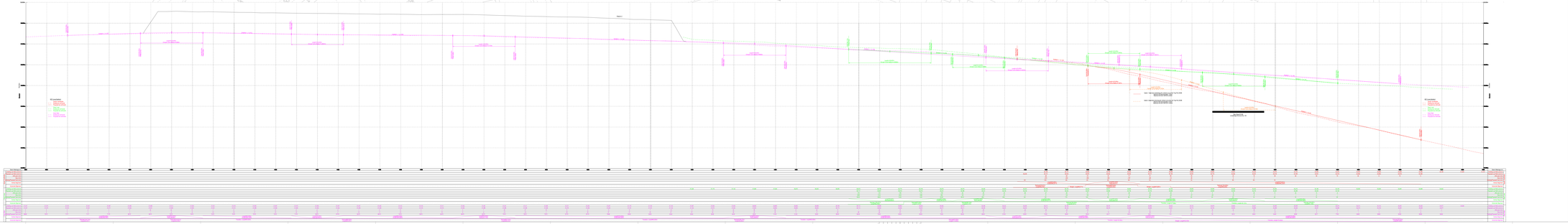
Diagrama trazado segunda propuesta


Liverpool Street and Hyderstone
LTN1
Down Main
Up Main
CHELMSFORD STATION
DMI MDCF
Wolham
Quoin Yard Incline
Down Loop
Down Main
Up Main
OLD COURTHOUSE
OLD COURTHOUSE
OLD COURTHOUSE

Anexo IV

Diagrama trazado tercera propuesta

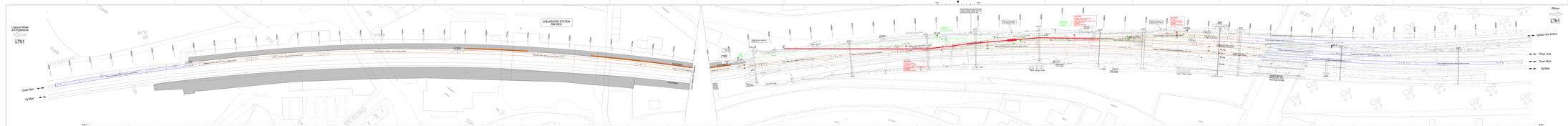


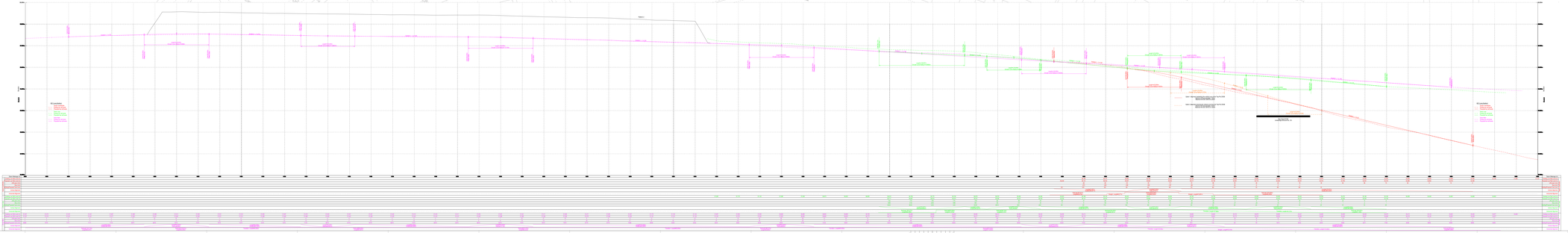


CAUTION - UNDER THIS ROOF THERE ARE OVERHEAD ELECTRIC WIRES

Anexo V

Diagrama trazado cuarta propuesta





CAUTION! - HEALTH AND ENVIRONMENTAL INFORMATION	
THIS DRAWING MAY CONTAIN ASBESTOS, REFER TO ASBESTOS REGISTER AND ASSOCIATED DOCUMENTS BEFORE ANY WORK IS UNDERTAKEN.	
ASBESTOS REGISTER CONTACTS: ALAN WHITE (ABW@NETWORKRAIL.CO.UK) / ANDY HOLDEN (ANDY.HOLDEN@NETWORKRAIL.CO.UK)	
Revision	Description
1	Issued
2	Issued
3	Issued
4	Issued
5	Issued
6	Issued
7	Issued
8	Issued
9	Issued
10	Issued
11	Issued

LOCATION DIAGRAM

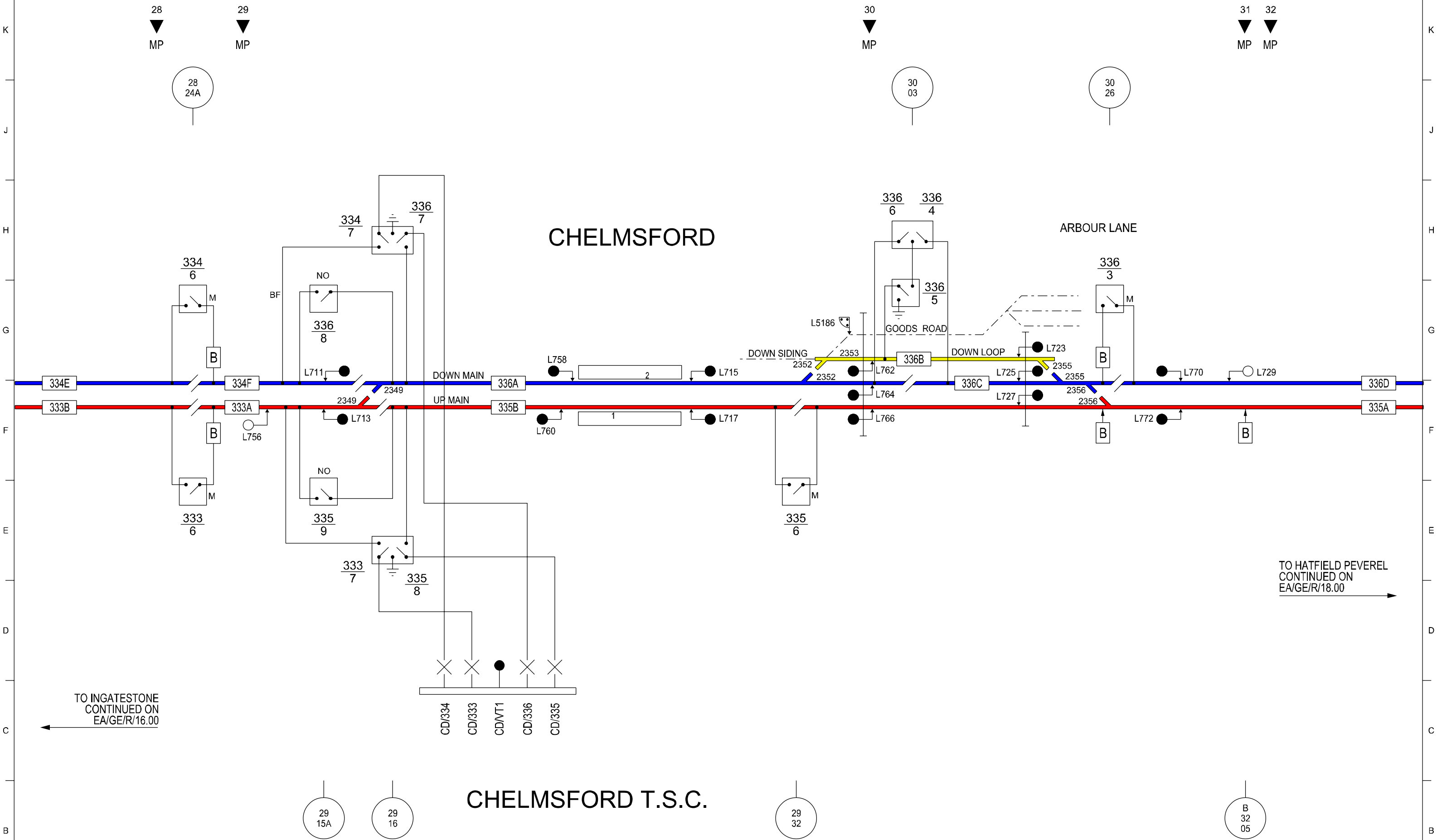
NOT TO SCALE

EXISTING PRS DIAGRAM

Southend Victoria
LTN1
Wilham
LTN1
Down Main
Up Main
Down Loop
Up Loop
Down Main
Up Main
Down Loop
Up Loop
Down Main
Up Main
Down Loop
Up Loop

Anexo VI

Diagrama eléctrico de la estación



CHELMSFORD T.S.C.

IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE INDIVIDUAL TO ENSURE THAT THEY USE THE LATEST VERSION OF THE ISOLATION DIAGRAMS OR INSTRUCTIONS. IF IN DOUBT, CONTACT THE RELEVANT ELECTRICAL CONTROL ROOM:

ROMFORD ECR

CONTROLLED DOCUMENTATION
(UNCONTROLLED WHEN PRINTED OR SAVED LOCALLY)

Issue:90
(ensure this is the latest issue)
03-Aug-2017 Date printed:

REVIEWED	GY HARNESS
CHECKED	GINA ZEBREIRO
APPROVED	CARL HUNT

REVISION COMMENTS
1. ISOLATOR 334/5 RENUMBERED 334/6. (GR 2G)
2. ISOLATOR 334/6 RENUMBERED 334/7. (GR 4H)
3. ISOLATOR 333/5 RENUMBERED 333/6. (GR 2E)
4. ISOLATOR 333/6 RENUMBERED 333/7. (GR 4E)
5. SUB SECTION 334D RENUMBERED 334E. (GR 1F)
6. SUB SECTION 334E RENUMBERED 334F. (GR 3F)

GREAT EASTERN

CHELMSFORD T.S.C.

ISOLATION DIAGRAM

NetworkRail

DRG. NO. EA/GE/R/17.00 | REV. AA | DATE. 26-09-2016