



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

**“DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE
UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”**

Autor:

Mikolaj Alfonso Navas Nawrot

Tutor:

Ángel Luís Zorita Lamadrid

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Valladolid, Mayo de 2.018



TRABAJO FIN DE GRADO



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD

**Tutor: Ángel Luís Zorita Lamadrid.
Grado en Ingeniería Eléctrica
Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Convocatoria: 2017-2018.**

ALFONSO NAVAS NAWROT



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





INDICE GENERAL





**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



INDICE:

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	12
1.- INTRODUCCIÓN	12
1.1- Antecedentes del proyecto	14
1.2- Objetivos del proyecto.....	15
1.3- Situación y emplazamiento	17
1.4- Estructura del proyecto	20
1.5- Abreviaturas empleadas.....	21
1.6- Programas informáticos	22
CAPÍTULO 2.- ALGUNOS DATOS SOBRE ALTA VELOCIDAD	24
2.- ALGUNOS DATOS SOBRE ALTA VELOCIDAD	26
2.1- Introducción	26
2.2- Resumen de la alta velocidad ferroviaria.....	26
2.3- Sistemas de captación de la corriente	29
2.3.1- Sistema de captación por tercer carril.....	29
2.3.1.1- Sistema de captación por tercer carril tradicional	29
2.3.1.2- Sistema de captación por tercer carril aéreo: catenaria rígida	30
2.3.2- Sistema de captación por línea aérea de contacto.....	31
2.3.2.1- Sistema de captación por suspensión tranviaria	31
2.3.2.2- Sistema de captación por catenaria.....	31



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



2.4- Tensiones de alimentación en tracción eléctrica.....	34
2.5- Tracción eléctrica en alta velocidad.....	35
CAPÍTULO 3.- INFRAESTRUCTURA Y SUPERSTRUCTURA	38
3.- INFRAESTRUCTURA Y SUPERESTRUCTURA	40
3.1- Introducción	40
3.2- Infraestructura.....	41
3.3- Superestructura	43
3.3.1- Balasto.....	44
3.3.2- Traviesas	45
3.3.3- Carril	45
3.3.4- Aparamenta de vía.....	46
3.4- Montaje de la catenaria.....	47
3.4.1- Ejecución de macizos de postes y apoyos	47
3.4.2- Colocación de postes y pórticos.....	48
3.4.3- Montaje de equipos de compensación	48
3.4.4- Montaje de ménsulas y aisladores.....	49
3.4.5- Tendido de conductores y cables	49
CAPÍTULO 4.- LÍNEA AÉREA DE CONTACTO O CATENARIA.....	50
4.- LÍNEA AÉREA DE CONTACTO O CATENARIA.....	52
4.1- Introducción	52



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



4.2- Descripción.....	53
4.3- Elementos de la catenaria	54
4.3.1- Hilo de contacto.....	55
4.3.2- Hilo sustentador	55
4.3.3- Péndolas.....	56
4.3.4- Grifas y terminales de conexión.....	57
4.3.5- Ménsulas	58
4.3.6- Aisladores	59
4.3.7- Seccionadores	60
4.3.8- Feeder de alimentación.....	60
4.3.9- Puesta a tierra.....	61
4.3.10- Postes.....	62
4.3.11- Macizos de poste y de anclaje.....	63
4.4- El Pantógrafo.....	63
4.5- Compensación mecánica de la catenaria	65
4.5.1- Cantones de regulación	65
4.5.2- Seccionamientos eléctricos	67
4.5.3- Equipos de compensación	67
CAPÍTULO 5.- CATENARIAS DE LA RED FERROVARIA ESPAÑOLA.....	70
5.- CATENARIAS DE LA RED FERROVIARIA ESPAÑOLA.....	72



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



5.1- Generalidades.	72
5.2- Tensiones de alimentación en la tracción eléctrica.....	73
5.3- Catenarias para red ferroviaria convencional.	74
5.4- Catenarias para red ferroviaria de alta velocidad.	75
CAPÍTULO 6.- ANEXO A: HIPÓTESIS Y CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO	78
6.- HIPÓTESIS Y CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO	80
6.1- Introducción	80
6.2- Características generales del trazado y de la red	80
6.3- Características de la catenaria y configuración del tendido	83
6.3.1- Selección del pantógrafo y comportamiento dinámico	83
6.3.2- Selección de los conductores y comportamiento dinámico	86
6.3.3- Hilo de contacto, sustentador, péndolas e hilo de guarda	88
6.3.4- Feeder y cable de guarda.....	89
6.3.5- Postes y macizos.....	90
6.3.6- Ménsulas	92
6.3.7- Aisladores	94
6.3.8- Elementos de compensación de línea	96
6.3.9- Seccionadores de cantón	96
6.4- Vano, cantón de regulación y seccionamientos.	97
6.6- Circuito de retorno y red de tierras	98



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



6.5.1- Tensiones de contacto y accesibles, y de paso.	98
6.5.2- Tensión de puesta a tierra.	99
CAPÍTULO 7.- ANEXO B: CÁLCULOS DE LA CATENARIA.....	102
7.- CÁLCULOS DE LA CATENARIA	104
7.1- Introducción.	104
7.2- Determinación de la corriente de carga de la línea.....	105
7.3- Calculo de los descentramientos máximos.....	106
7.3.1- Descentramiento en recta.....	107
7.3.2- Descentramiento en curva.....	109
7.4- Hilo de contacto: velocidad crítica, tensiones y elasticidad.....	114
7.5- Calculo de las tensiones y flechas en la catenaria.	116
7.6- Tensiones en hilo de contacto y sustentador.	123
7.7- Determinación del pendolado	124
7.7.1- Pendolado simple	124
7.7.2- Pendolado en “Y”	127
7.8- Calculo de esfuerzos radial y transversal en postes.	128
7.9- Cálculo del momento de vuelco de la catenaria.....	130
7.9.1- Introducción	130
7.9.2- Momento de vuelco de poste intermedio (PI)	135
7.9.3- Momento de vuelco de poste de anclaje de sección (AS)	138



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



7.9.4- Momento de vuelco de poste de anclaje de punto fijo (APF)	141
7.9.5- Momento de vuelco de poste de eje de sección (ES).....	144
7.9.6- Momento de vuelco de poste de semieje de sección (SS).....	147
7.9.7- Momento de vuelco de poste de punto fijo (PF)	150
7.9.8- Cuadro resumen de momentos de los postes	153
7.10- Cálculo de postes.....	155
7.10.1- Cálculo de la altura de los postes	155
7.10.2- Cálculo de la sección de los postes	155
7.11- Cálculo de los macizos.....	163
CAPÍTULO 8.- CONCLUSIONES	168
8.- CONCLUSIONES	170
CAPÍTULO 9.- BIBLIOGRAFÍA	172
9.- BIBLIOGRAFÍA	174
9.1- Textos.....	174
9.2- Internet.....	174
9.3 - Normas.....	175
CAPÍTULO 10.- PLANOS	176
10.- PLANOS	178



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





1.- INTRODUCCIÓN

1.1- Antecedentes del proyecto

Los proyectos de líneas de ferrocarril, ya sean convencionales o de alta velocidad, y su posterior ejecución, son actividades que, además de suponer una gran inversión en tiempo y dinero, comportan también la realización de labores no exentas de dificultad por los muchos aspectos técnicos que hay que abordar y resolver. El primer aspecto es, sin duda, el que tiene que ver con el acondicionamiento del terreno y la preparación de la plataforma de la vía para el posterior tendido de la misma. El segundo aspecto, y del que trata este proyecto fin de grado, es el correspondiente a la electrificación de la vía.

La electrificación de una vía, ya sea mediante CC o CA, supone ejecutar, entre otras instalaciones, dos principales y bien diferenciadas para alcanzar el objetivo buscado: conseguir el desplazamiento de máquinas y unidades eléctricas a lo largo del trazado de la línea. Estas dos instalaciones son, por un lado, las de adaptación de la tensión eléctrica de suministro de la red a la tensión de funcionamiento de los trenes (subestaciones de red y subestaciones de tracción); y, por otro, las del tendido eléctrico que ha de llevar la corriente eléctrica a lo largo de la vía (catenaria).

Ya en Mayo de 2013, para las instalaciones mencionadas en primer lugar, y como proyecto fin de carrera, se elaboró un documento con el título de “Diseño y cálculo de las subestaciones de red y tracción asociadas a una línea ferroviaria de alta velocidad”, tomando en ese momento como punto de referencia tramos en fase de proyecto del caso real del corredor Madrid – Galicia. Ahora, como proyecto fin de grado y continuación del propósito de abarcar todas las partes que suponen electrificar una vía de ferrocarril, se aborda el diseño y cálculo de la catenaria de un tramo de una línea de alta velocidad.

El diseño y cálculo de una catenaria ferroviaria es un tipo de proyecto que, si bien reúne aspectos comunes con el diseño de líneas eléctricas, incorpora



elementos específicos para los cuales los conocimientos y expresiones hasta ahora conocidos del diseño de líneas eléctricas resultan insuficientes o no son válidos. Por otro lado, y al igual que en el proyecto previo no teníamos documentos en los fondos de la Biblioteca de la Escuela de Ingenierías Industriales de los que tomar referencia para el desarrollo de aquel proyecto, seguimos careciendo de documentación y proyectos similares que nos ayuden a la realización de los pertinentes cálculos.

A lo ya mencionado, hay que añadir el hecho de que los títulos de libros que traten el diseño y cálculo de las líneas de contacto de tendidos eléctricos en líneas de ferrocarril son muy escasos y/o de difícil adquisición

1.2- Objetivos del proyecto

El objetivo principal es el diseño, dimensionado, y cálculo de la catenaria correspondiente al tramo de un trazado ferroviario en fase de proyecto, asociado, a su vez, a la pertinente subestación de tracción. Dentro de este objetivo principal pretendemos de forma más específica:

- 1) Ampliar los conocimientos en relación a las formas de suministro eléctrico a trazados de vía de ferrocarril.
- 2) Aportar cierta información de interés general en cuanto a terminología empleada, tipos y elementos de catenarias.
- 3) Considerar qué aspectos hay que tener presentes a la hora de dimensionar y calcular una catenaria.
- 4) Mostrar las diferentes disposiciones de un tendido eléctrico.
- 5) Analizar las funciones y describir las características constructivas de cada uno de los elementos de los que consta un tendido eléctrico.
- 6) Realizar los planos necesarios que definan el tramo de la vía en cuanto a disposición de los postes, descentramiento, etc...



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



Cubierta, pues, la primera parte de la fase de proyecto de electrificación de un tramo de línea de alta velocidad, la correspondiente al de las subestaciones de red y de tracción, el proyecto de la catenaria del tramo de línea viene a cubrir la otra fase de cualquier proyecto de electrificación total de un tramo; o lo que es lo mismo, es la forma específica, con elementos y sus características, de determinar el modo de llevar la energía eléctrica desde la fuente de alimentación (subestaciones) hasta la carga (tren).

Previamente al desarrollo de los proyectos, los casos reales requieren establecer la potencia adecuada de la subestación y determinar el correcto dimensionado de los dispositivos de protección y de otros elementos de la misma, situación que se hace extensiva a la catenaria por tener que determinar la intensidad máxima admisible y con ello la sección mínima de los conductores. Para ello hay que seguir una técnica muy específica del sector ferroviario, que ante la complejidad del cálculo se hace mediante el uso de programas informáticos de simulación. Para ello es preciso conocer datos correspondientes a la línea a la que va a alimentar la subestación, tales como:

- El perfil de la línea: Indica donde están situadas las estaciones, el desnivel de las rampas y su situación, los radios de las curvas, los peraltes, etc.
- Las características del material móvil: Se trata de las curvas de esfuerzo en KN en función de la velocidad, el consumo de corriente, peso en vacío y en carga de los trenes, carga máxima y carga media.
- Las características de la explotación: Hace referencia al intervalo entre trenes, velocidades máximas permitidas y tiempos de parada en estaciones. El factor de simultaneidad es básico.
- Las características de la línea aérea de contacto o catenaria y de la vía del ferrocarril.
- La tensión de trabajo, que en nuestro caso será de 25 kV, longitud de los cables, resistencia óhmica y tipo de carril.

Con los datos obtenidos de los anteriores puntos se crea un modelo matemático de la línea. Se pueden determinar los valores medios, máximos y desviaciones de la corriente y de la potencia que se está demandando en cada tramo en cuestión. Podemos así obtener las necesidades de potencia y distancia óptima entre subestaciones contiguas.

1.3- Situación y emplazamiento

El proyecto de catenaria que en este documento queda expuesto tiene como finalidad establecer el recorrido de un tramo comprendido entre las localidades de Quintanavides y Pancorbo, del corredor de alta velocidad Madrid – País Vasco, en el último tramo que discurre por la provincia de Burgos, desplazándose en sentido noreste; y de la disposición de los elementos fundamentales que constituyen la catenaria y que han de servir para suministrar energía a las máquinas y trenes de alta velocidad. Actualmente esta línea se encuentra en fase de proyecto, y tiene prevista su llegada hasta la frontera con Francia.



Imagen 1.1 - Plano de proyecto informativo (línea azul de puntos) de la línea Madrid – País Vasco – Francia, correspondiente al tramo entre Burgos y Vitoria.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Recordemos que para la electrificación de cualquier catenaria en CA es preciso, además del concurso de una subestación de tracción, también el de una subestación de red que sirva como elemento de conexión a la red de transporte. Ambas subestaciones supondrán el conjunto de instalaciones básicas y fundamentales que acondicionarán la tensión de la red de alimentación a la tensión de servicio, o mediante la cual funcionan los trenes de alta velocidad. El tramo a electrificar, cuya longitud es inferior a la habitual de tramos electrificados por un mismo transformador de subestación, podrá recibir el suministro de la subestación de tracción emplazada cerca de la localidad de Venta de Baños

Recordemos que ejecutar la obra de una subestación eléctrica de red comporta realizar una modificación del vano de una línea de transporte entre los dos apoyos más cercanos a la futura ubicación de ambas subestaciones, con el fin de que, desde la subestación de red, se suministre de forma independiente una tensión de entrada de 400 o 220 kV, en pares de fases diferentes, a dos transformadores de potencia ubicados en una subestación de tracción aledaña. Los dos transformadores suministrarán una tensión de salida de 25 kV cada uno, con los que energizar la catenaria de los tramos laterales (de una longitud aproximada de entre 40 y 50 km), teniendo, no obstante, la capacidad de alimentar todo el corredor.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD ”

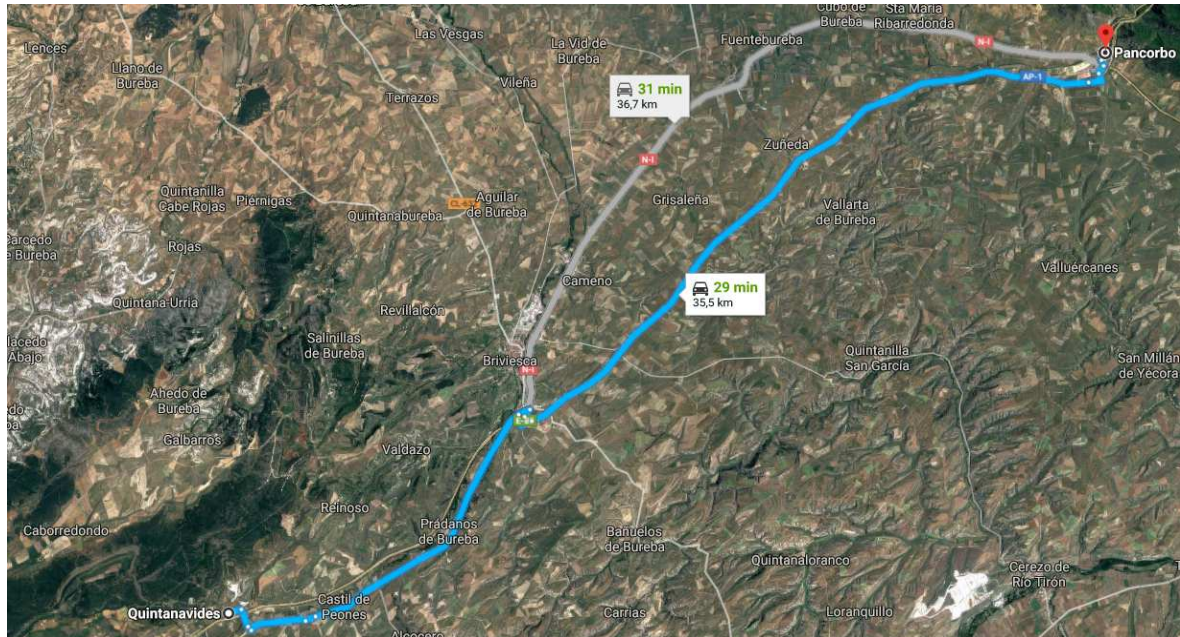


Imagen 1.2 - Recorrido en la zona de la autopista (azul) entre los puntos del trazado.

Dado que no hay previstas paradas en este tramo del trazado, éste evita los nucleos urbanos, si bien no podrá evitar los numerosos cruces que se van a dar con las carreteras del entorno. Hay que señalar que el trazado de nuestra línea en esta zona sigue un curso similar al de la autopista (línea azul), y que al no variar significativamente las alturas entre extremos del trazado, no se contempla la construcción de viaductos.

Conociendo, pues, los puntos entre los que va a discurrir nuestro tramo de línea de alta velocidad, queda precisar la forma del trazado de del mismo. Partiendo del hecho de que este trazado va depender en gran medida de los cálculos relativos a la longitud de los vanos, los cuales van a determinar el radio de las curvas y la orografía, aunque en menor término éste último, no sé va a poder precisar, a priori y con exactitud, por dónde va discurrir tal trazado. Sin embargo, dadas las particulares características de los trazados de alta velocidad, podemos asegurar que el trazado no presentará grandes desniveles, dado que la zona por la que él discurre se encuentra en plena meseta, y ello no



plantea un trazado con curvas de un radio por debajo de los límites marcados para líneas de características como la nuestra.

1.4- Estructura del proyecto

Pese a que este proyecto es distinto del trabajo del que es continuación, ya en la memoria anterior se introducían descripciones de elementos correspondientes a aspectos relacionados con el objeto del presente proyecto y que guardaban cierta relación; por esta razón, la memoria de este proyecto no presentará grandes novedades en cuanto a información y documentación relativa respecto a la presentada por el proyecto anterior, más allá de algunas ampliaciones y detalles más precisos en cuanto a elementos ya mostrados previamente.

Tomando como referencia el texto original del proyecto previo de las subestaciones, en el **segundo capítulo** del presente documento se llevará a cabo un recordatorio de algunos aspectos relativos a la alta velocidad ferroviaria con la correspondiente actualización, así como de los sistemas de captación de corriente en líneas ferroviarias.

En el **tercer capítulo** daremos una visión de las fases que conlleva el montar total de una línea de ferrocarril.

En el anterior proyecto de las subestaciones, se hizo una descripción de la catenaria. Dado que en aquel momento el diseño de esta estructura no era el objeto del proyecto, no se entró al detalle de cada uno de los elementos que constituyen del conjunto. En el **cuarto capítulo** ampliaremos, pues, con datos nuevos la información que ya se aportó relativa a la catenaria.

Ya a partir del **quinto capítulo**, se hace un repaso, en cuanto a la tipología, de todas las catenarias presentes en la red ferroviaria española. Esta tipología se centra en los tendidos para líneas de vía ancha, y que van desde las destinadas a líneas convencionales, por lo general las más antiguas y las que suministran tensión continua, hasta las más modernas, las destinadas para llevar corriente



alterna monofásica a trenes de alta velocidad. En este repaso se hará, sobre todo, una presentación de todas las características mecánicas de las catenarias presentadas, tales como cargas de rotura de los cables conductores, cables soporte, etc., así como algunas características eléctricas relevantes de los elementos que constituyen las mismas, sin olvidar otros aspectos asociados a las catenarias,

En el **capítulo sexto** se dan una serie de consideraciones previas acerca de elementos a tener en cuenta en el diseño y cálculo de la catenaria, desde materiales empleados en la construcción de elementos tales como las ménsulas, características de aquellos, hasta valores tipificados de tensiones y otras magnitudes empleados en tendidos de líneas de alta velocidad.

En el **capítulo séptimo** de este documento se mostrará toda la relación de cálculos justificativos que han de conducir a una especificación precisa de los elementos a emplear en el tendido de la catenaria, así como de los valores y parámetros a tener presentes durante la fase de tendido de la catenaria.

1.5- Abreviaturas empleadas

Las abreviaturas que se emplearan quedaran reflejadas en la siguiente lista que se muestra a continuación:

- **RGLAT:** Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión.
- **RCE:** Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en centrales eléctricas, subestaciones, y centros de transformación.
- **RBT:** Reglamento electrotécnico de baja tensión.
- **BT:** Baja tensión. Comprende tensiones inferiores a 1kV.
- **MT:** Media tensión. Tensiones comprendidas entre 1 - 66 kV.
- **AT:** Alta tensión. Comprende tensiones superiores a 66 kV.
- **CA:** Corriente alterna.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



- **CC:** Corriente continua.
- **SS.AA:** Servicios auxiliares.
- **RENFE:** Red nacional de ferrocarriles españoles.
- **ADIF:** Administrador de infraestructuras ferroviarias.
- **AVE:** Alta velocidad española.
- **CRF:** Comité de regulación ferroviaria.
- **UNE:** Una Norma Española.
- **EN:** Norma Europea.
- **LAV:** Línea de alta velocidad.
- **LAC:** Línea aérea de contacto.
- **RFIG:** Red ferroviaria de interés general.
- **ETI:** Especificación técnica de interoperabilidad

1.6- Programas informáticos

Los programas informáticos para la realización de este proyecto son

- Qcad.
- Excel



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





CAPÍTULO 2.- ALGUNOS DATOS SOBRE ALTA VELOCIDAD



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





2.- ALGUNOS DATOS SOBRE ALTA VELOCIDAD

2.1- Introducción

En este apartado hemos rescatado y actualizado parte de la información del anterior proyecto relativa a la alta velocidad en España y a la diferente tipología sistemas de captación de energía eléctrica.

2.2- Resumen de la alta velocidad ferroviaria

La alta velocidad ferroviaria se inicia en Japón, en la década de los años 60, del siglo XX. En años posteriores, países como Francia y Corea adoptaron este sistema para nuevos tendidos ferroviarios. Recientemente más países poseen entre sus infraestructuras líneas de alta velocidad operativas, y otros tantos las tienen en fase de proyecto.

Estas líneas denominadas de alta velocidad se desarrollan en base a dos aspectos:

1. La velocidad que pueden llegar a alcanzar los trenes.
2. El tipo de infraestructura que requiera.

Si tomamos como base el primer criterio se puede llegar a definir la línea de alta velocidad bajo tres interpretaciones:

- a) Líneas construidas y diseñadas para trenes que circulan a velocidades iguales o superiores a 250 Km/h.
- b) Para la unión de ferrocarriles europeos, la LAV es aquella por la que se circula a velocidades superiores a 200 Km/h.

Para la Directiva Europea 91/440/CEE es aquella infraestructura adecuada para alcanzar velocidades comprendidas entre los 180 y los 350 Km/h en condiciones específicas.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



Si tomamos en cuenta el segundo criterio, tenemos que las características de una L.A.V. son:

- a) Alimentación en corriente alterna para disminuir las pérdidas asociadas a la corriente continua y por ende reducir el número de subestaciones a lo largo de todo el recorrido.
- b) Trazados con curvas de amplios radios (3.000 - 3.500 m y superiores).
- c) Túneles con una sección mayor a los convencionales para evitar los efectos aerodinámicos y ondas de presión.
- d) Un mantenimiento especial de las vías, las cuales se encuentran valladas a lo largo de todo el recorrido.
- e) Ausencia de señales visuales y uso de sistemas sofisticados de control.
- f) Disponibilidad de trenes con una configuración más rígida y menos pesada con lo que se traduce en mayor eficiencia energética y por ello contaminan menos que el resto de los medios de transporte.

Como algunos ya saben, en España la alta velocidad ferroviaria comienza su andadura en el año 1.986 con la implantación de una serie de políticas de inversión, del Gobierno de aquel entonces, en las que se pretendía impulsar un medio de transporte rápido y eficiente que pudiera hacer frente al transporte aéreo y por carretera de un modo competitivo. Tendrían que pasar 6 años hasta verse materializada la primera línea de ferrocarril de alta velocidad, la cual uniría Madrid con Sevilla, y en la que se podría circular a una velocidad de 300 km/h



Imagen 2.1- Tren AVE S-100. Trayecto Madrid- Sevilla. Año 1992.

En el proyecto de las subestaciones el lector podía encontrar una relación de las líneas de ferrocarril AVE (ancho UIC) que en aquel momento se encontraban operativas; obviamente, desde entonces, éstas se han incrementado, ampliando la red de alta velocidad

- Madrid – Sevilla. (1 x 25 kV).
- Córdoba – Málaga. (2 x 25 kV).
- Madrid – Toledo. (2 x 25 kV).
- Madrid – Barcelona – Francia. (2 x 25 kV).
- Madrid – Olmedo – León (ampliación Madrid – Valladolid) (2 x 25 kV).
- Madrid – Olmedo – Zamora (ampliación Madrid – Olmedo) (2 x 25 kV)
- Madrid – Levante (contempla líneas a Castellón y Valencia) (2 x 25 kV).
- Orense – Santiago (tramo del corredor Madrid Santiago) (2 x 25 kV)

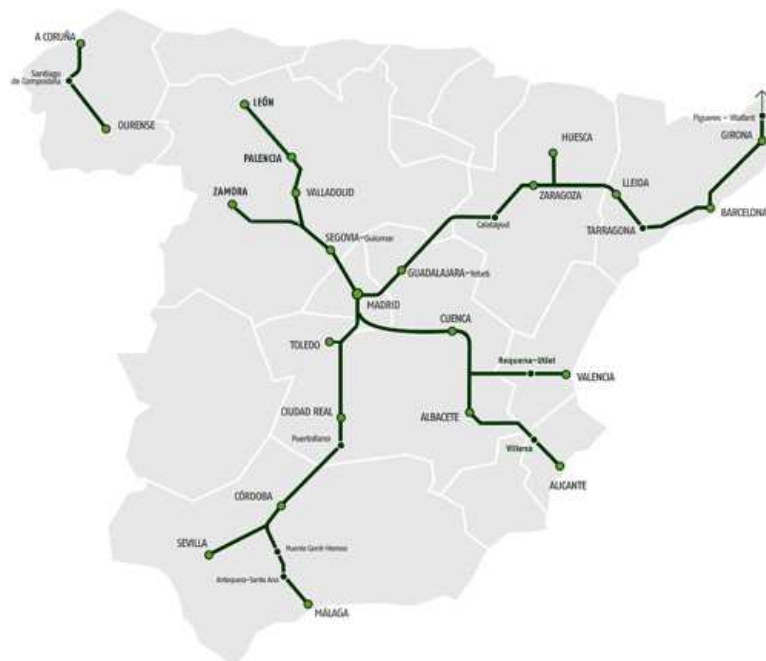


Imagen 2.2 - Red de alta velocidad (julio 2.017)



2.3- Sistemas de captación de la corriente

El sistema de captación de la corriente eléctrica hace referencia a los diferentes sistemas de explotación del sistema ferroviario que se han ido implantando para transportar y suministrar la energía eléctrica a lo largo de la línea aérea de contacto para que el vehículo ferroviario pueda captar la electricidad.

En la actualidad existen cuatro sistemas de captación de corriente que bien podemos agrupar en aquellos que emplean hilos conductores, más conocidos como catenarias, y en aquellos que emplean raíles conductores.

Dentro de los sistemas de captación de corriente eléctrica del ferrocarril nos encontramos con dos sistemas:

2.3.1- Sistema de captación por tercer carril

2.3.1.1- Sistema de captación por tercer carril tradicional

Son aquellos sistemas en los cuales el conductor que suministra la corriente es un tercer raíl que está dispuesto de forma paralela a las vías férreas. Dicho conductor en forma de perfil de acero laminado, tal como se aprecia en la figura siguiente, se puede ver que está sobreelevado del plano de rodadura y paralelo a la vía férrea soportado por diversos aisladores, los cuales reposan a lo largo de las traviesas de la vía. Dicha captación de corriente se realiza mediante el empleo de una serie de frotadores que rozan con el carril para originar el contacto eléctrico.



Imagen 2.3- Sistema de captación por tercer carril tradicional

2.3.1.2- Sistema de captación por tercer carril aéreo: catenaria rígida

Son aquellos sistemas en el cual la captación de corriente se realiza a través de un perfil metálico suspendido denominado genéricamente catenaria rígida. Se basa en la colocación de un perfil de aluminio extruido situado por encima de la vía del ferrocarril y que está dispuesto de manera análoga al tendido del hilo de contacto en una catenaria convencional. Este perfil dispone una forma de mordaza que mantiene fijado y sujeto el hilo de contacto de cobre ofreciendo al conjunto una gran rigidez a dicho sistema desde el punto de vista mecánico y por el cual se transmite un mayor paso de flujo de corriente eléctrica debido a su gran sección, lo que le convierte en un sistema muy empleado en los tramos ferroviarios con túneles.



Imagen 2.4 - Sistema de captación por tercer carril aéreo: catenaria rígida.



2.3.2- Sistema de captación por línea aérea de contacto

2.3.2.1- Sistema de captación por suspensión tranviaria

Son aquellos sistemas en los cuales la línea de contacto es un hilo conductor que esta tendido paralelamente al plano de rodadura de la vía del ferrocarril. Dicho hilo esta sostenido mediante ménsulas a través de cables laterales de suspensión denominados tirantillas. Los inconvenientes que presenta dicho sistema es que su propio peso provoca una flecha que cuando el tren circula a una velocidad superior de 80 km/h, al pantógrafo le cuesta seguir el propio trazado de la catenaria, los amarres del hilo de contacto constituyen puntos duros y se añade la presencia de un conductor *feeder*. Esto significa que su campo de aplicación de este sistema está limitado principalmente al uso de tranvías, metropolitanos y vías de servicio en estaciones.

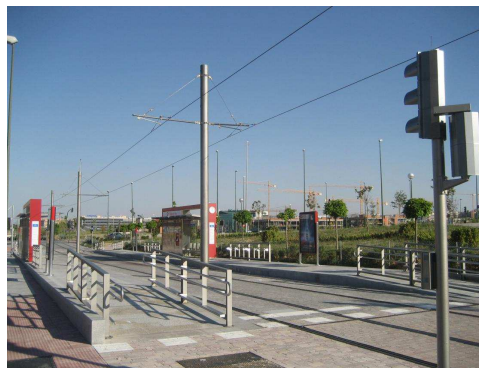


Imagen 2.5 - Sistema de captación por suspensión tranviaria.

2.3.2.2- Sistema de captación por catenaria.

Son aquellos sistemas en los cuales la captación de corriente se realiza a través del tendido de uno o dos conductores, generalmente de cobre, dependiendo si disponemos de un sistema de alimentación de C.A., o bien de C.C, que están dispuestos por encima y a lo largo del recorrido de la vía del ferrocarril a través de una serie de ménsulas de postes o pórticos, por los cuales se transportara la energía eléctrica desde la subestación de tracción hasta la línea aérea de contacto. Con el hecho de no disponer de una flecha excesiva en el tendido de la

catenaria, se tendera a tal efecto un hilo denominado sustentador que servirá para sostener el hilo o hilos de contacto a lo largo de la vía del ferrocarril por medio de diferentes conductores verticales denominados péndolas.

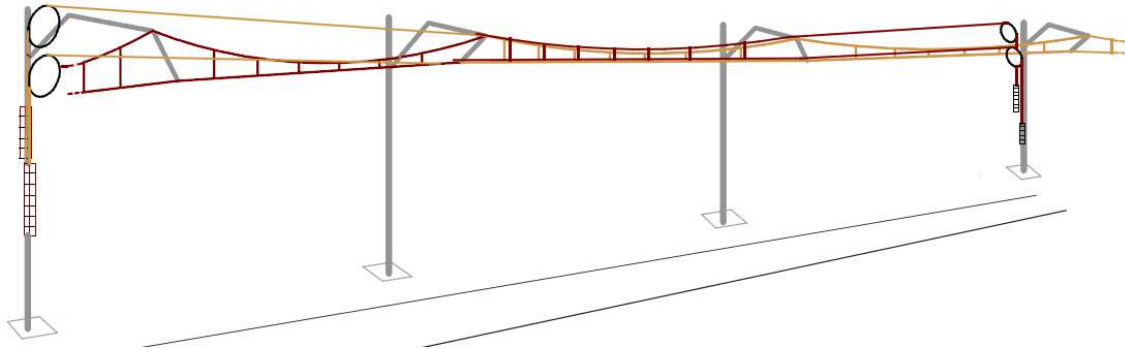


Imagen 2.6 - Sistema de captación por catenaria.

Dentro de los sistemas de captación de corriente por medio de la catenaria podemos encontrar los siguientes casos:

Catenaria simple

La catenaria simple se caracteriza por ser la más sencilla desde el punto de vista de su montaje y de su mantenimiento. Se suele emplear en las líneas convencionales de corriente continua, con trayectos en los que no se supere una velocidad de 160 Km/h, ya que sus propiedades estáticas y dinámicas no resultan lo más idóneas para líneas de alta velocidad.

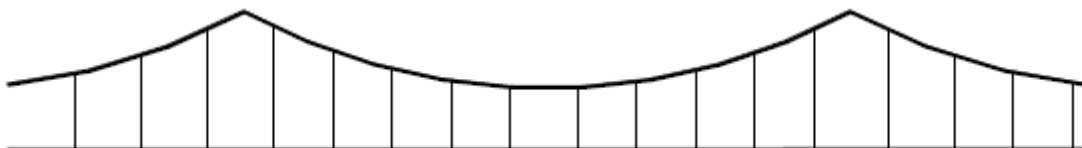


Imagen 2.7 - Catenaria Simple.



Catenaria con péndola en Y

La catenaria con péndola en Y se caracteriza por mejorar las prestaciones estáticas y dinámicas del sistema de captación anterior, es decir, de la catenaria simple, ya que esta configuración incluye un segundo hilo sustentador, siendo más empleadas en las líneas de alta velocidad; no obstante, se han ido desechando por ser complicado en su montaje y su mantenimiento.

En la figura del detalle, podemos ver que a lo largo del recorrido del ferrocarril el hilo de contacto está unido al hilo sustentador mediante péndolas, mientras que en cada poste la unión del hilo de contacto no se realiza directamente con la péndola al hilo sustentador, sino que se realiza a través de dos falsos sustentadores que refuerzan la rigidez y la uniformidad del sistema, en especial en estos puntos concretos donde el ferrocarril es impulsado a gran velocidad.

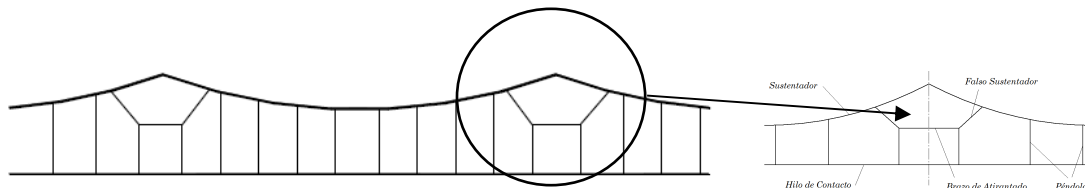


Imagen 2.8 - Catenaria con péndola en “Y”.

Catenaria compuesta

La catenaria compuesta, o también llamada *compound*, dispone de un mayor número de péndolas a lo largo de la vía del ferrocarril, con lo que permite en su conjunto unas características más uniformes, concretamente en la flexibilidad y en su rigidez, pero el coste asociado y la dificultad en el montaje de este sistema no han sido buenos para su implantación.

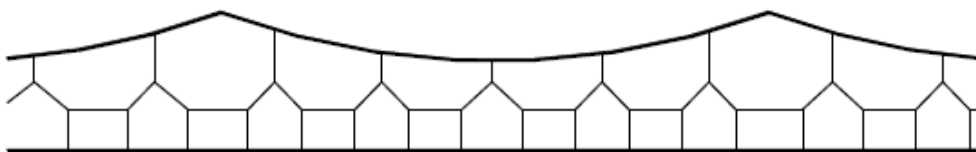


Imagen 2.9 - Catenaria compuesta.



2.4- Tensiones de alimentación en tracción eléctrica

Los valores de tensión empleados en el impulso de máquina de ferrocarril eléctricas son muy dispares, debido a los innumerables avances que se han desarrollado en materia de motores eléctricos y sistemas de alimentación, y por la inexistencia de un organismo a nivel mundial que establezca una unificación en materia de uso de tensiones en tracción eléctrica ferroviaria. Sin embargo, ha habido determinado valores de tensión que prevalecen sobre otros tanto en V_{cc} como en V_{ca} .

Inicialmente, los primeros valores de tensión empleados en ferrocarril eléctrico, fueron de señal alterna de diferentes frecuencias, ya que los motores eléctricos en CC no eran de gran potencia; sin embargo, años después, se desarrollaron más sistemas en alterna, con diferentes frecuencias, que evolucionaron a sistemas que sólo hoy se emplean en redes de ferrocarril de larga distancia y redes de ferrocarril de alta velocidad, prevaleciendo los 25 kV a 50 Hz y los 15 kV a 16,7 Hz.

Actualmente en España coexisten los siguientes valores de tensión empleados en tracción eléctrica ferroviaria:

- 25 kV y 50 kV a 50 Hz en C.A. para líneas de alta velocidad.
- 3 kV en C.C. para líneas convencionales.
- 1,5 kV en C.C. para líneas de vía estrecha y algunas de metro.
- 0,75 kV en C.C. para metro y tranvía.
- 0,60 kV en C.C. para metro



2.5- Tracción eléctrica en alta velocidad

Una vez introducido el circuito de tracción de las máquinas de ferrocarril, es ocasión de hablar de la aparamenta y dispositivos que porta una unidad de alta velocidad para adoptar la corriente de suministro a la corriente de funcionamiento de los motores eléctricos que han de hacer que las unidades se desplacen.

Una característica muy común de los trenes de alta velocidad de última generación, y de las unidades más modernas del parque móvil de RENFE, es el uso predominante de motores asíncronos tanto en modelos con tracción distribuida como en modelos con unidades motrices, en comparación con unidades de primera generación, algunas aún en servicio, que emplean motores síncronos.

Los trenes de alta velocidad funcionan bajo una tensión nominal de 25 kV, como ya se ha mencionado, sin embargo esta tensión no es la apropiada para el funcionamiento de los motores trifásicos que desplazan éstas unidades; es por esto que para un correcto funcionamiento de la máquina se han de adaptar los valores y características de tensión de entrada. Para conseguirlo, toda unidad incorpora transformadores que reducen la tensión de entrada a valores acordes a las características de los motores, y convertidores que transforman la señal monofásica en una señal trifásica.



Imagen 2.10 - Unidad S-103 (izq.), motorización asíncrona; unidad S-100 (dcha.) motorización síncrona.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



En este punto, debemos recordar que en toda máquina síncrona las posiciones de los campos magnético y eléctrico permanecen inalterables la una respecto de la otra, dando lugar a velocidades constantes, solo variables mediante la frecuencia de la tensión de entrada (f) y el número de polos (p) de la máquina:

$$N = (60 \cdot f) / p \text{ [r.p.m.]}$$

Sin embargo, al contrario que en el anterior, en las máquinas asíncronas, en las cuales la posición relativa de los campos magnético y eléctrico puede ser alterada, la máquina puede intercambiar las funciones de motor por la de generador, tan pronto como un campo adelante al otro. Esto hecho presenta la ventaja de que durante las fases de deceleración, en las cuales el motor funciona como generador, se está devolviendo corriente a la red. Es lo que se conoce como frenado regenerativo.

Un notable avance que ha hecho el uso habitual de la corriente alterna en la alta velocidad es la aparición de la llamada “electrónica de potencia”, presente en los denominados onduladores, o convertidores, que no son más que dispositivos que convierten C.C. en C.A., ya sea monofásica o trifásica, y que son a su vez circuitos y montajes electrónicos a base de dispositivos electrónicos con características concretas cuyo funcionamiento es posible mediante valores altos de corriente y tensión eléctricas. Así, componentes tales como transistores, tiristores, GTO’s, triacs, etc., admiten, convenientemente refrigerados, altas densidades de corriente, y ocupan relativamente poco espacio. Con ellos ya es posible trocear, rectificar u ondular cualquier tipo de onda para ajustarla a las necesidades de la marcha.

Con la introducción de los convertidores a base de tiristores, se tiene la posibilidad de variar la tensión y la frecuencia de la señal; pudiendo así conseguir un control eficaz del motor de C.A., muy superior al de C.C., en lo que se ha denominado control vectorial de motores.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





**CAPÍTULO 3.-
INFRAESTRUCTURA Y
SUPERSTRUCTURA**



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





3.- INFRAESTRUCTURA Y SUPERESTRUCTURA

3.1- Introducción

Antes de proceder al tendido de una vía de ferrocarril electrificada– en primer lugar con el tendido de la propia vía y posteriormente con el de la catenaria – es preciso realizar operaciones de acondicionamiento y preparación del terreno sobre el que van a descansar todos los elementos que la constituyen, la vía principalmente. El conjunto de esas operaciones llevan a la formación de lo que, en términos técnicos, se conoce como infraestructuras, paso previo para llevar a cabo el otro conjunto de operaciones de tendido, que constituyen la superestructura.

Una vía de la alta velocidad debe garantizar tres aspectos básicos: la seguridad, la regularidad y la conformidad. Para ello debe proporcionar a los trenes un camino de rodadura continuo y estable que transmita de manera homogénea las cargas producidas por el paso de las circulaciones a la infraestructura.

El montaje de vía con los niveles de exigencia que requiere una línea de alta velocidad conlleva una topografía de precisión, y el establecimiento de bases de referencia fijas a lo largo de la traza que permitan conseguir la construcción de la vía dentro de las tolerancias prescritas que no superan el orden de los pocos milímetros.

Una vez definida y preparada la traza del tramo, la primera fase del montaje de la vía consiste en la topografía previa y establecimiento de puntos de marcaje que definirán el proceso. A continuación, se han de llevar a cabo las operaciones para acondicionamiento de la superficie del terreno y preparación de la plataforma sobre la que va a descansar la vía, para posteriormente ejecutar las operaciones de tendido de la misma y proceder a hacer lo mismo con la catenaria.



3.2- Infraestructura

Antes de proceder a la realización de las operaciones de tendido de la vía es preciso acondicionar y preparar el terreno. Estas operaciones abarcan otras que van desde el mantenimiento de rasantes, la excavación de trincheras, o la construcción de cunetas, hasta el salvamento de terraplenes o el levantamiento de muros,

Rasantes

Más importantes, si cabe, son este tipo de acciones en trazados de alta velocidad, que en trazados de líneas convencionales. Se trata de mantener la inclinación entre dos puntos del trazado lo más baja posible. Se denomina horizontal, cuando no hay pendiente; en rampa, cuando se recorre en sentido ascendente; y en pendiente, cuando se hace lo propio pero en sentido descendente.

La rasante implica un menor esfuerzo de tracción por parte de las máquinas durante los ascensos (rampa), y un menor esfuerzo, también, durante los descensos (pendiente) por la capacidad de frenado de las máquinas.

Terraplenes

Los terraplenes son áreas con superficies que presentan cierto grado de inclinación en dirección transversal al eje de la vía. Para salvar este tipo de accidentes, se emplea material de relleno para crear una superficie por encima de la del terreno completamente horizontal.

Trincheras

La trinchera es una operación cuyo fin es similar al de salvamento de los terraplenes, pero mientras aquella se ejecutaba mediante el añadido de material, ésta se efectúa por medio de la retirada de él. Que se lleve a cabo una u otra responde a si el nivel del trazado está por encima o por debajo del trazado.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Imagen 3.1 – Trinchera para LAV.

Media ladera

Se trata de una solución intermedia a las dos anteriores, y se practica cuando la vía bordea un saliente, montículo, o colina cuya ladera es de una inclinación más pronunciada que la de un terraplén, pero no tanto como para tener que excavar una trinchera: se retira parte del material que obstaculiza el paso de la mitad del ancho de la vía para ser empleado como relleno para la otra mitad del paso del ancho

Taludes

Son el nombre que reciben las inclinaciones de las tierras en los terraplenes y en las trincheras; es decir, es la que corresponde a las superficies que van desde el plano de la vía a la superficie del terreno

Muros

Que según su finalidad recibirán un nombre u otro; así, tenemos los muros de contención, de sostenimiento, o de revestimiento.

Túneles y viaductos

En ambos casos, su construcción es por la necesidad de tener que atravesar grandes obstáculos del terreno, y salvar o evitar otros; en el primer caso,



montañas, colinas, promontorios, etc...; en el segundo, valles, cruces con otras vías de comunicación e infraestructuras, etc.



Imagen 3.2 – Túnel y viaducto para LAV

3.3- Superestructura

El trazado de una vía, o mejor dicho de un corredor ferroviario, se lleva a cabo mediante tramos que varían entre los cincuenta y cien kilómetros (en un sentido similar, el montaje de la catenaria también se lleva de un modo similar, en este caso los tramos son cantones de regulación).

Previamente a las operaciones de montaje, se han dispuesto zonas de acopio de materiales a lo largo del trazado de la vía. En ellas se acumulan, con sus zonas de carga de carga y apartaderos para las maquinas, los principales elementos y materiales para el montaje. Estos son básicamente:

- a) Balasto
- b) Traviesa
- c) Carril
- d) Aparamenta de vía: desvíos



La primera cosa que ha de tener en cuenta el lector es que, aunque son los que los empleados en líneas convencionales, presentan características mecánicas distintas.

3.3.1- Balasto

El balasto que es la capa de asiento sobre la que descansan las traviesas, no son más que fragmentos de roca de naturaleza silíceo, con una granulometría determinada y la dureza suficiente para reducir el desgaste que supone el paso de las circulaciones. Aportan al conjunto de la vía la elasticidad necesaria para absorber las tensiones producidas por el paso de los trenes.

Además, el balasto transmite los esfuerzos soportados por el carril y las traviesas a la plataforma, garantiza la estabilidad longitudinal y transversal del emparrillado de vía –conjunto de carril y traviesas-, facilita, por otra parte, el drenaje de las aguas pluviales y reduce el ruido de la interacción rueda-carril.

La existencia del balasto permite mediante el bateo – acción de golpear y ahuecar el balasto para deshacer apelmazamientos y aumentar su elasticidad y capacidad de drenaje, acción que se realiza por medio de dresinas- la restitución de la geometría de la vía cuando el paso de los trenes la ha deteriorado.

Al ser un producto de bajo coste relativo, la logística de su transporte cobra especial importancia.

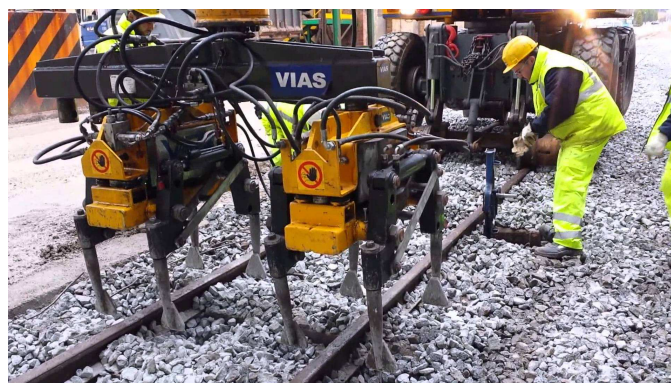


Imagen 3.3 – Máquina bateando balasto.



3.3.2- Traviesas

El carril ha de asentarse sobre las traviesas. Éstas son de hormigón pretensado y de 315 kilos de peso cada una. Sus dimensiones son 2,6 metros de largo, treinta centímetros de ancho y veintidós de alto, y se disponen en la vía cada sesenta centímetros. Las traviesas mantienen la distancia entre los carriles - el ancho de vía, que en este caso es de 1.435 mm -, y transmiten y reparten las cargas producidas por el tráfico de los trenes al balasto. Además, garantizan el aislamiento eléctrico entre carriles.

Entre carril y traviesas se disponen placas de asiento que regularizan las imperfecciones de las superficies de apoyo de ambos elementos, participan en el reparto de las cargas y son un elemento amortiguador. El carril queda fijado a la traviesa por medio de sujeciones elásticas -evitan el deslizamiento longitudinal del carril por causa de las acciones térmicas, de aceleración y frenado, y la posibilidad de vuelco-, clips de vía y tirafondos.

Durante el montaje, las traviesas se distribuyen a lo largo de la traza de la línea en el lugar donde serán montadas. Posteriormente se extiende la primera capa de balasto. Sobre esta primera capa se monta la vía auxiliar aledaña a la vía que se está montando que permitirá el transporte y la descarga del carril mediante trenes carrileros, que proviene de las bases en las que se han dispuesto los parques de acopio.

3.3.3- Carril

La continuidad del camino de rodadura la proporciona el carril, que se monta en barras de largas. Estas barras largas, cuya longitud puede alcanzar entre 200 y 300 metros, son el resultado de la soldadura de tramos más cortos en fábrica. Sirva como ejemplo los tramos de 288 metros que se emplearon para el montaje del tramo de vía entre Córdoba y Málaga.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Las barras se transportan al tajo mediante trenes carrileros generalmente con doble tracción. Siguiendo con el ejemplo anterior, en la línea Córdoba-Málaga se transportaron 36 barras de 288 metros cada una, lo que supuso 10.368 metros de carril o una longitud de 5.184 metros de vía sencilla por sentido de marcha. Estas barras largas fueron posteriormente unidas entre sí en la vía por soldadura aluminotérmica, de manera que no produjesen discontinuidades que afectasen a la confortabilidad de los viajeros y a la estabilidad de la vía.



Imagen 3.4 – Tendido de vía en LAV Madrid – Valencia.

3.3.4- Aparamenta de vía

Al margen de los elementos descritos, las líneas de alta velocidad cuentan con instalaciones para banalización y apartado de trenes. Dentro de la superestructura de la vía se disponen además determinados aparatos de vía que permiten el cambio de vía y absorción de movimientos longitudinales de grandes viaductos de tablero continuo.

El aparato o dispositivo más habitual de estos son los desvíos que, en el caso de estar situados en las vías generales, se diseñan con corazón de punta móvil para garantizar la continuidad del camino de rodadura. La velocidad de paso por vía desviada está determinada por el radio de la rama curva.

Otro tipo de elementos, no menos importantes son los aparatos de dilatación de vía en la zona de los apoyos móviles de los tableros continuos de los viaductos tableros. Son elementos que evitan movimientos longitudinales debidos a las



variaciones térmicas, retracción y fluencia, y que es necesario disponer de ellos para no provocar la aparición de un exceso de tensiones en el carril.

En definitiva, estos aparatos permiten el desplazamiento relativo de una parte de la vía sobre la parte fija y mantienen las características fundamentales de la vía, especialmente la continuidad del carril y el ancho de vía. En la línea tomada como modelo, Córdoba-Málaga, para los siete viaductos hiperestáticos que se proyectaron fue necesario disponer catorce apartados de dilatación, que evitarán las tensiones de la dilatación de los tableros.

Estos trabajos de montaje se llevan a cabo mediante equipos constituidos, al menos, por una bateadora, niveladora-alineadora de vía, una perfiladora para distribuir correctamente el balasto y una estabilizadora dinámica de vía que produce un efecto similar al del paso de 100.000 t. de circulaciones y consigue adelantar y minimizar los asentamientos de vía que provoca ría n los primeros trenes permitiendo desde las primeras circulaciones a las velocidades máximas previstas.

3.4- Montaje de la catenaria

El tendido de la catenaria conlleva la ejecución de una serie de pasos, estos son:

3.4.1- Ejecución de macizos de postes y apoyos

La ejecución de macizos de postes conlleva horadar el terreno allá donde vayan a ir emplazados los postes. Los orificios – de profundidad variable, según las características del terreno y del momento de vuelco – se efectuarán mediante una máquina excavadora dotada de un barreno de vaciado, o bien mediante una máquina pilotadora. Tras la realización de los orificios, se procede al vertido de hormigón para obtener el macizo o pilar del poste. En apoyos sobre tableros de viaductos, los anclajes se realizan mediante pernos y tornillos.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Imagen 3.5 – Máquina en labores de ejecución de macizos.

3.4.2- Colocación de postes y pórticos

La colocación de postes requiere la descarga del apoyo metálico mediante una grúa y su posicionamiento vertical sobre el macizo. En caso de ser necesaria la instalación de pórticos entre postes, el proceso de colocación requiere igualmente el empleo de una grúa o similar.

3.4.3- Montaje de equipos de compensación

Determinados cables y conductores de los que constituyen la catenaria, debido a la función que desempeñan, requieren mantener una fuerza de tensado invariable ante las posibles contracciones y dilataciones que puedan sufrir debido a los cambios de temperatura. La forma de mantener esta estabilidad pasa por instalar sistemas de compensación y atirantado formados por tirantes metálicos, contrapesos, poleas y elementos multiplicadores. Esta operación se lleva a cabo mediante grúas y/o ferrocarriles biviales dotados de una plataforma de trabajo en altura.



3.4.4- Montaje de ménsulas y aisladores

El montaje de ménsulas y aisladores es realizado sobre los postes previamente colocados. Al igual que en el montaje de equipos de compensación, su instalación se lleva a cabo mediante ferrocarriles biviales dotados de una plataforma de trabajo en altura.

3.4.5- Tendido de conductores y cables

Para ejecutar esta operación, se emplean trenes de tendido de conductor, generalmente formados por una máquina de tracción (locomotora, locotractor o vehículo similar) y una composición a base de plataformas sobre las que se sitúan las bobinas de conductor y los equipos mecánicos de tendido. Se precisa también el empleo de camiones ferroviarios con plataforma para trabajos en altura.



Imagen 3.6 – Tendido de cables en LAV Valladolid - León



CAPÍTULO 4.- LÍNEA AÉREA DE CONTACTO O CATENARIA



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





4.- LÍNEA AÉREA DE CONTACTO O CATENARIA

4.1- Introducción

Sabiendo que el objeto de este proyecto es el cálculo de la catenaria de un tramo de una LAV y que en el anterior proyecto de cálculo de las subestaciones de tracción y red, para este mencionado tramo de línea de alta velocidad, ya se introdujeron definiciones relativas a la línea de contacto y a los diversos elementos que la constituían, consideramos pertinente volver a recordar todo aquello efectuando una revisión y ampliando la información aportada.

La introducción de la tracción eléctrica en el transporte ferroviario supuso la necesidad de crear instalaciones fijas que llevaran esa energía hasta el punto donde estuviese el tren y hacer que éste se desplazase a lo largo de la vía. Los sistemas que surgieron a principios del S. XX, y que aún se emplean, respondían a dos formas de hacer llegar la energía eléctrica hasta las máquinas eléctricas:

- Sistemas mediante **tercer carril**
- Sistemas mediante **línea aérea**

El primer conjunto de sistemas es empleado, sobre todo, en zonas donde es escasa o nula la presencia de personas o animales, por el poco o nulo riesgo de contacto. Este sistema consiste en un rail o carril adicional colocado a la misma altura y entre los otros dos railes, y del cual, a través de un patín, se toma la energía eléctrica para alimentar los motores.

El otro conjunto de sistemas constituye una línea eléctrica de contacto como conjunto de diversos elementos convenientemente colocados entre sí. Esta línea eléctrica, convenientemente aislada y generalmente apoyada en postes regularmente espaciados, a una altura ligeramente superior a la del tren, y situada sobre el mismo trazado de la línea, tiene la finalidad de llevar corriente



eléctrica a esas mismas máquinas y/o trenes que se desplazan a lo largo de la vía. Excepcionalmente a esta forma, existe la variante **rígida**, que consiste en sustituir la flexibilidad de la línea de contacto por la rigidez de un perfil de cobre o aluminio, y por la que va deslizar, en este caso insertado, el patín de contacto.

Así, desde la implantación por primera vez de esta forma de hacer llegar corriente a máquinas eléctricas de ferrocarril, la catenaria ha variado y evolucionado acorde a las características técnicas de la vía, a las de la tensión de suministro y a las de explotación comercial de la línea.

4.2- Descripción

En el contexto ferroviario se denomina **catenaria** al conjunto de elementos necesarios que constituyen la línea aérea que tiene como fin el transporte y el suministro de energía eléctrica a trenes y máquinas eléctricas de ferrocarril para poder desplazarse por la vía.

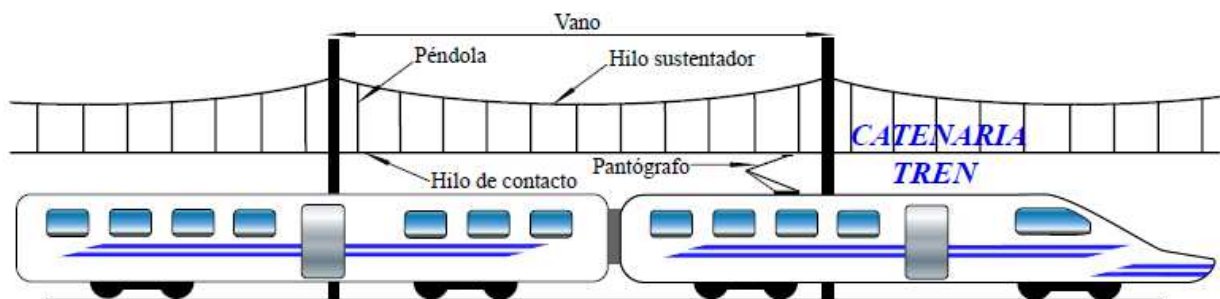


Imagen 4.1 - Línea aérea de contacto o catenaria.

Dentro del grupo de conductores que conforman la línea aérea de contacto o catenaria los clasificaremos en:

- a) **Circuito positivo aéreo:** Es el circuito formado por aquellos conductores que toman la tensión positiva de la catenaria: a) la línea o hilo de contacto del cual toma la corriente el pantógrafo del tren; b) el cable sustentador, que discurre de forma paralela a la línea de contacto y que cada cierto tramo se une a dicha línea, permite mantener un valor constante de la

tensión de la catenaria debido a las pérdidas originadas por el consumo del ferrocarril; y c), el conductor que transporta la energía eléctrica desde la subestación de tracción hasta la catenaria reciben el nombre genérico de *feeder* de alimentación. En los sistemas de alimentación 1x25 kV y 2x25 KV este conductor recibe el nombre de *feeder* de refuerzo y *feeder* positivo respectivamente.

- b) **Circuito negativo o de tierra:** Es el circuito por el que retorna la corriente a la subestación eléctrica de tracción. El circuito lo constituyen un carril, el terreno y un conductor de retorno o de guarda, que va dispuesto de forma paralela a la vía férrea, ya que hay una parte de la corriente eléctrica que no retorna a la subestación eléctrica por el carril y el terreno, sino que asciende por las columnas de electrificación y va discurriendo a lo largo de dicho conductor hasta descender a través del terreno para retornar nuevamente a la subestación de tracción.

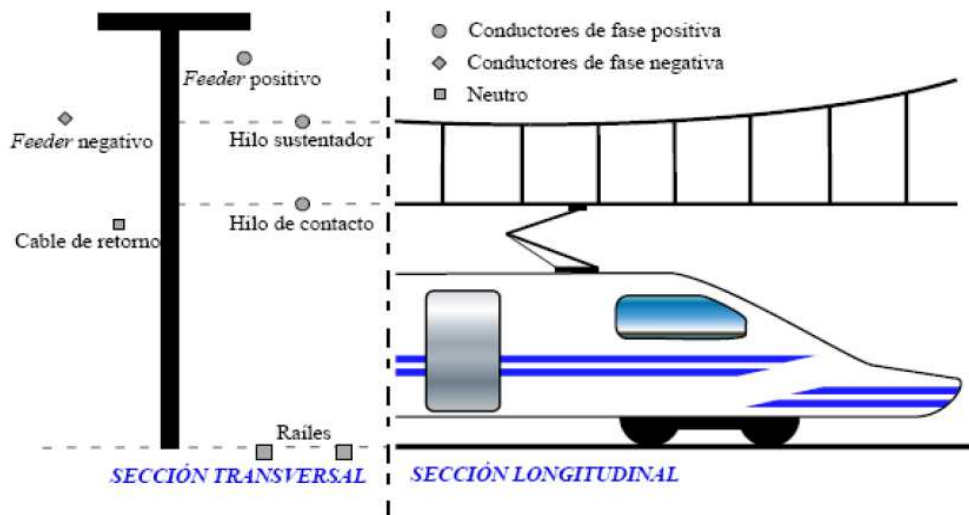


Imagen 4.2 - Conductores constituyentes de la catenaria ferroviaria.

4.3- Elementos de la catenaria

La línea aérea de contacto en su forma más simple y elemental consta de los siguientes elementos:

4.3.1- Hilo de contacto

El hilo de contacto se considera como el elemento esencial del sistema de tracción eléctrica ferroviaria, ya que por él se transmite la energía eléctrica desde las subestaciones de tracción para alimentar al conjunto de la catenaria, y del cual el pantógrafo capta la corriente necesaria para el desplazamiento del tren. Éste se encuentra dispuesto tal y como se representa en la figura: a una determinada altura sobre el plano de rodadura y del eje de la vía del ferrocarril; y en forma de zigzag, para que con el paso del tren pueda originar un rozamiento uniforme con la superficie de frotación del pantógrafo.

Explicación algo más detallada merece lo que antes se describía como zigzag, que no es más que un descentramiento del hilo de contacto (línea continua fina) respecto del eje longitudinal de la vía (línea de trazos), tal y como se va en el dibujo, y cuyos valores óptimos oscilan entre los 20-25 cm.

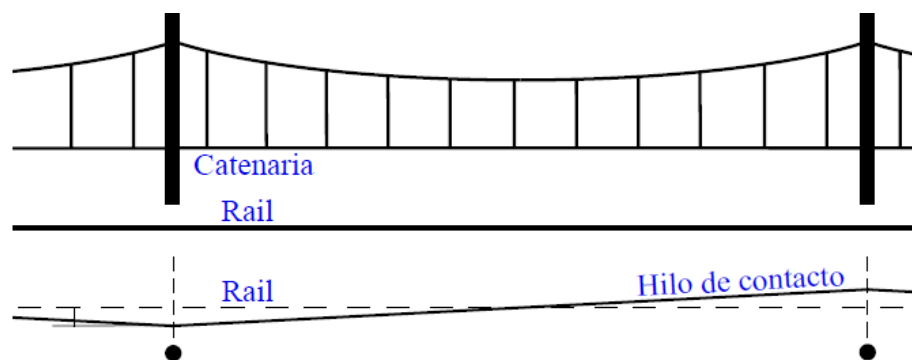


Imagen 4.3 - Disposición geométrica de la catenaria respecto al eje de la vía.

4.3.2- Hilo sustentador

El hilo sustentador tiene una doble función: por una parte soporta todo el peso del sistema de la catenaria manteniéndola bajo una determinada tensión mecánica; y por otra, coopera en el dimensionado eléctrico de la línea para hacer llegar la corriente desde la subestación de tracción hasta la catenaria. También aporta otra posible clasificación de la catenaria: si el sustentador pasa



por debajo de la ménsula, la catenaria es suspendida; y si se apoya sobre ella, la catenaria es apoyada.

4.3.3- Péndolas

Las péndolas son todos aquellos tramos verticales de cable, normalmente de cobre o bronce, que mantienen el hilo de contacto suspendido a una cierta y uniforme altura respecto al plano de rodadura de la vía del ferrocarril, empleando para ello unos sistemas de fijación denominados grifas. Las péndolas variarán su longitud según la posición del vano en la que nos encontremos, y en número según la uniformidad de la altura del hilo de contacto que se quiera mantener.

Como alternativa al anterior sistema de pendolado anterior, tenemos el pendolado en Y.

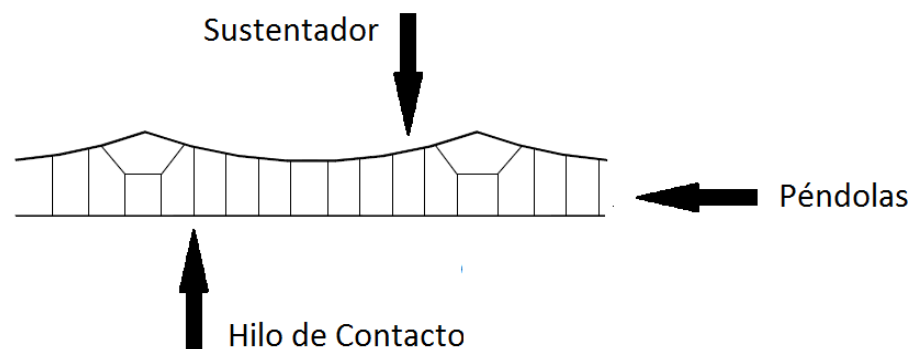


Imagen 4.4 - Disposición de los elementos de la catenaria

La clasificación de estos elementos responde principalmente a criterios de tipo mecánico y eléctrico. Así, según el primero de ellos, las péndolas puede ser rígidas, flexibles o deslizantes, con las características mínimas requeridas para la catenaria proyectada; en cuanto al segundo criterio, las péndolas pueden funcionar como elementos conductores o actuar como elementos aislantes. Como tercera forma está la tiene que ver con los elementos que las constituyen (Fig. 17).

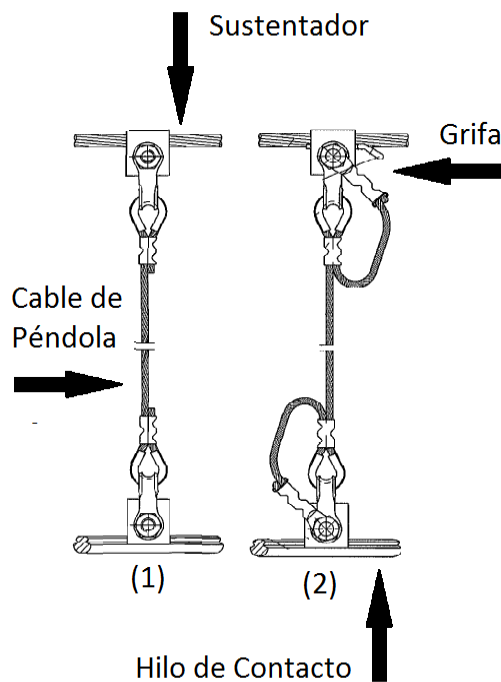


Imagen 4.5 - (1) Péndola mecánica y (2) Péndola equipotencial.

Para la unión de estos cables es preciso el empleo de una serie de elementos como grifas y elementos de conexión.

4.3.4- Grifas y terminales de conexión

El conjunto formado por el hilo de contacto, el hilo sustentador, y las péndolas constituyen la línea aérea de contacto. Para materializar la unión mecánica de un modo tal que se garantice también la unión eléctrica de todos ellos, es preciso el empleo de grifas y terminales de conexión.

Para cumplir lo anterior, estos elementos, generalmente hechos de cobre y sus aleaciones, presentarán valores altos de conductividad a la vez que las características mecánicas requeridas para la labor de empalme o unión de hilos de contacto de cobre y sustentadores del cobre o aleaciones.



4.3.5- Ménsulas

Estructuras geométricas de tubos rígidos, generalmente de aluminio o acero, con aisladores acoplados, ensambladas por medio de bridas y otros elementos de fijación, que, amarradas a la parte superior de los postes, sirven de apoyo de la catenaria para el desempeño de la función de ésta, y como medio de transmitir los esfuerzos que la propia línea aérea ejerce, y sobre ella ejercen otros elementos, a la base de los postes.

Una primera forma de clasificar o diferenciar ménsulas es por el sistema de electrificación de la catenaria (Imagen 4.6).



Imagen 4.6 - Ménsula tubular para alta velocidad, 25 kV (izq.); en celosía para línea convencional, 3.000 V (dcha.)

Otra tipología de esta estructura responde a la posición que ocupa dentro de la configuración de la línea, o del lugar del trazado en el que el poste correspondiente al que va amarrada esté situado. Así, un técnico debe saber diferenciar entre ménsulas para una vía, ménsulas para varias vías, pórticos funiculares, pórticos rígidos y ménsulas con atirantados en curva.

Merecen comentario aparte las ménsulas giratorias, usadas en líneas aéreas de contacto compensadas automáticamente, y las ménsulas destinadas para el



interior de túneles, las cuales van fijadas a las paredes o al techo de los mismos mediante estructuras de apoyo.

4.3.6- Aisladores

Los aisladores son elementos cuya finalidad en la catenaria es la de separar elementos en tensión de la línea aérea de contacto de los feeders entre sí y entre estos y tierra. Además de satisfacer los requisitos eléctricos correspondientes a los niveles de tensión a los que están sometidos, también han de cumplir una serie de requisitos mecánicos que, según la posición que ocupen en el sistema de la catenaria, estarán sometido a esfuerzos de tracción, compresión o flexión.

La elección de estos dispositivos responde a las condiciones ambientales de la zona y a los esfuerzos a los que se van a ver sometidos.

Una forma de clasificar los aisladores es por el material de que están fabricados. Estos elementos destinados a la línea aérea de contacto están hechos de porcelana, vidrio, resina, y fibra de vidrio con envoltorio de silicona. También es posible encontrar aisladores que combinen más de un material de los anteriores dando lugar a aisladores compuestos; así, con tal variedad y combinación de materiales, los aisladores ofrecerán unas prestaciones u otras, y su fabricación requerirá seguir una norma u otra.

También es posible establecer una clasificación de los aisladores por su forma; en este sentido, encontramos aisladores de barra larga, aisladores de caperuza-perno y aisladores sobre poste.



Imagen 4.7 – Conjunto de aisladores para ferrocarril.

4.3.7- Seccionadores

Dispositivos que abren o cierran un circuito eléctrico asegurando la continuidad eléctrica de una línea aérea. Pueden ser de lámina de aire, cuando la catenaria se encuentra alimentada por *feeders* distintos; o de cantón, que dan continuidad eléctrica a la línea aérea de contacto de cantones contiguos (váyase al Apartado 4.5.2)

4.3.8- Feeder de alimentación

A fin de evitar elevadas intensidades en el hilo de contacto, cable sustentador y péndolas, se suelen aumentar la sección del cable conductor adicionando otro cable conductor denominado *feeder* de alimentación, el cual se conecta al sustentador cada 100 metros.

Ahora bien, dependiendo de si la catenaria es alimentada por corriente continua o por corriente alterna, su misión será una u otra. Así, en el caso de que sea corriente continua, el *feeder* tiene como función principal la de colaborar en la sección de alimentación de la línea aérea de contacto o catenaria; pero si es una catenaria para corriente alterna en 2x25 KV, el *feeder* colabora en parte en el retorno de la circulación de corriente.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Los materiales empleados en corriente continua son por lo general de cobre desnudo siendo las secciones más empleadas: 150, 225, 300 mm². Por lo que respecta a los materiales empleados en corriente alterna, éstos son por lo general de aluminio siendo las secciones más empleadas: 110, 185, 250, 380 mm².

Los *feeders*, procedentes de una subestación eléctrica de tracción, a través de un pórtico de salida alimentan dos líneas aéreas de contacto de una doble vía de ferrocarril de alta velocidad en corriente alterna y con un sistema de alimentación de 2 x 25 KV (Imagen 4.8). Debido a que en este sistema debe colocarse una zona neutra de la catenaria enfrente de la subestación, para la circulación de una vía de ferrocarril se instalan dos *feeders* (*feeder* positivo y otro conectado al carril) para alimentar una zona de la catenaria hacia una dirección y los otros dos *feeders* (*feeder* negativo y otro conectado al carril) hacia la zona opuesta.



Imagen 4.8 - Pórtico de salida o de catenaria-feeder.

4.3.9- Puesta a tierra

Los cables de guarda son de aluminio-acero, presentan secciones que pueden ir desde los 110 a los 185 mm², van montados en cada uno de los postes de la catenaria, y tienen el cometido de unir entre si todas las estructuras metálicas de la vía mediante una serie de picas, postes incluidos, para la protección contra las derivaciones o sobretensiones derivadas a tierra.



4.3.10- Postes

La forma que se tiene de sostener una catenaria es mediante el empleo de postes dispuestos de forma regular a lo largo de los bordes del trazado de la línea y fuera del contorno del gálibo. Soportan la línea aérea de contacto, y el resto de cables y elementos auxiliares que constituyen la catenaria.



Imagen 4.9 – Postes de doble U que sostiene catenaria para alta velocidad.

Las características y dimensiones de los postes han de ser tales que el momento producido por la acción del peso de los propios elementos que sostiene el poste – hielo incluido – la del viento, y la de los esfuerzos de atirantado por el descentramiento, puedan ser contrarrestados en la base del poste por la forma, las dimensiones y las características de los macizos.

La tipología de los postes responde a la función que desempeña cada uno de ellos por la posición que ocupa dentro del cantón; podemos así distinguir:

- Poste de punto fijo.
- Poste de anclaje de punto fijo
- Poste intermedio.
- Poste de semieje de seccionamiento
- Poste de eje de seccionamiento
- Poste de anclaje de seccionamiento



La diferencia que hay entre ellos es la acción de las cargas longitudinales. Mientras en los postes intermedios (de suspensión) éstas se contrarrestan, en los postes de los extremos (de compensación) o de mitad de cantón (de punto fijo), al ser postes de amarre de la línea aérea, aparecen momentos de torsión que han de ser contrarrestadas por los esfuerzos de cables de amarre.

Los materiales más empleados son el acero galvanizado, pero también se pueden encontrar de hormigón armado y pretensado.

4.3.11- Macizos de poste y de anclaje.

Se trata de cimentaciones, bloques de hormigón enterrados en el suelo cuya finalidad es la de asegurar la fijación de los postes al suelo y evitar así el desplome de los mismos por la acción de las cargas de la catenaria (pesos de cables y hielo, acción del viento, atirantado, etc...)

Los hay de diversos tipos que responden a la forma; así, podemos encontrar macizos tipo D (paralelepípedo), tipo T (trapezoidales), o cilíndricos, los cuales son empleados en alta velocidad.

4.4- El Pantógrafo

Por las características y por su ubicación, el pantógrafo merece ser descrito al margen del resto de elementos de la catenaria. La razón es que es el primer conjunto de elementos de contacto de la máquina que toma la energía de la catenaria; es, por tanto, un doble elemento móvil: 1) móvil por desplazarse solidariamente con la máquina de ferrocarril o tren; y 2), móvil por disponer de mecanismos de elevación/bajada, y hacer contacto así con la catenaria.

Es de suma importancia que este conjunto funcione correctamente, ya que de ello dependerá el correcto contacto que tenga el conjunto con la catenaria. Se compone de cuatro partes fundamentales:



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”

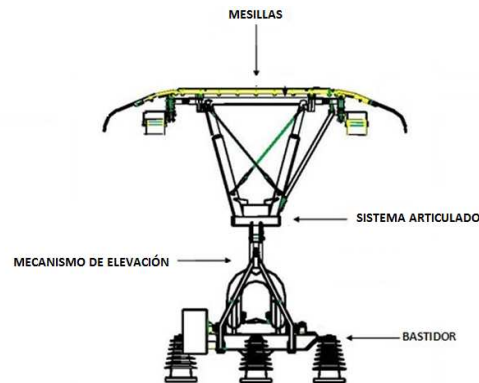


Imagen 4.10 – Detalle de pantógrafo y partes.

- **Bastidor**, que es el elemento que soporta el resto de partes y mecanismos del conjunto
- **Sistema articulado** constituido por una estructura tubular y de perfiles metálicos que puede adoptar diversas alturas.
- **Mecanismo de elevación**, el cual, a su vez, viene constituido por:
 - Un cilindro con uno o dos émbolos de desplazamiento vertical.
 - Muelles antagónicos a la acción de los émbolos.
 - Resortes de elevación.
 - Válvula electropneumática.
- **Mesillas**, cuya finalidad es captar la corriente del hilo de contacto. Constan a su vez de:
 - **Zapata**, que es el soporte de los frotadores o pletinas.
 - **Frotadores**, cuya finalidad es hacer contacto con la catenaria.
 - **Trocadores**, zonas de los frotadores plegadas hacia abajo para evitar enganchones con el hilo de contacto durante la marcha.



4.5- Compensación mecánica de la catenaria

Un funcionamiento correcto y continuo de las unidades de alta velocidad en sus desplazamientos pasa por el mantenimiento de una altura constante de la línea aérea para que el contacto con el pantógrafo, durante las circulaciones, sea permanente. Sin embargo, los cables experimentan dilataciones por la acción del viento, el hielo, las variaciones de temperatura, y el paso de corriente, lo que en último lugar se traduce en variaciones de su longitud

Las variaciones significativas de la longitud de los cables que constituyen la línea aérea de contacto conllevan un aumento significativo de las flechas en los vanos, y por ende, de la variación de los valores de tensión de los cables. Este hecho, de no revertirse por medio de los sistemas adecuados, puede suponer un funcionamiento irregular del sistema, dando lugar a fenómenos de “despegue” del pantógrafo de la línea aérea de contacto durante el desplazamiento, fenómeno que es más notable a medida que las velocidades aumentan.

4.5.1- Cantones de regulación

No es posible mantener constante el valor de la tensión de los cables a lo largo de todo el recorrido pretendiendo mantener la continuidad física de la línea aérea de contacto en todo el trazado; por esta razón, la línea aérea no se constituye como un entramado continuo, sino como una sucesión de tramos, denominados **cantones**, por lo general de compensación, de una longitud que puede variar entre los 900 y 1.200 metros.

En casos de vías en los que no se superen los 120 km/h de velocidad de circulación, de escasa longitud, y que por regla general sirvan como apartaderos, no hay necesidad de incorporar elementos que contrarresten esas pérdidas de tensión, dando lugar a cantones sin compensación; en el resto de casos se instalan sistemas de poleas y contrapesos que actúan, o bien de manera conjunta sobre el cable del sustentador y del hilo de contacto por medio de una polea, o bien de forma independiente por medio de dos poleas (Imagen 4.11),



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



dando lugar en cualquiera de los casos, a sistemas de **cantones compensados**. Se aportan más detalles de estos últimos sistemas en el Apartado 4.5.3.



Imagen 4.11 - Sistema de compensación independiente de la catenaria.

Sin embargo, para garantizar la continuidad del contacto del pantógrafo con la línea aérea, se establecen zonas de transición o de solapamiento en los extremos de salida y entrada de los cantones contiguos, en las que el pantógrafo durante algunos metros mantiene contacto con la línea aérea de ambos cantones.

A su vez, los cantones presentan también tramos y elementos característicos

- **Punto fijo.** Se trata de un poste fijo emplazado en la mitad del cantón cuya finalidad es evitar el desplazamiento de los equipos de la línea de contacto y asegurar su estabilidad a lo largo del cantón.
- **Puntos de anclaje.** Postes situados en los extremos de los cantones de compensación. Son los postes que constan de los equipos de compensación mecánica.
- **Semicantones.** Dos divisiones del cantón de igual longitud a ambos lados del punto fijo.



- **Seccionamientos.** Nombre con el que se denomina a las zonas de transición o de solapamiento entre cantones. Estos tramos de cantón pueden comprender uno, tres o cinco vanos, produciéndose el contacto simultáneo del pantógrafo con las líneas aéreas de contacto de ambos cantones en el vano del medio.

4.5.2- Seccionamientos eléctricos

Mientras la continuidad de los valores de la tensión mecánica de una línea aérea de contacto se efectúa mediante la sucesión de cantones de compensación, la continuidad eléctrica se hará a través de seccionamientos eléctricos de la línea aérea de contacto, empleando para ello dos tipos de estos aparatos:

- **Seccionadores de cantón.** Se trata de puentes realizados en los seccionamientos solapados de los cantones; dan continuidad eléctrica a tramos de línea aérea de contacto de cantones contiguos. Son un tipo de aisladores no aptos para circulaciones por encima de los 160 km/h, ya que por su elevado peso, la línea, a velocidades de ese orden, perdería elasticidad.
- **Seccionadores de lámina de aire.** Al contrario que los anteriores, si se tiene la posibilidad de dar continuidad eléctrica o no a la línea mediante el accionamiento del aparato, y son los que se instalan en líneas, o en tramos de éstas, en las que se va a circular a velocidades superiores a los 160 km/h.

4.5.3- Equipos de compensación

Estos sistemas tienen como misión la de mantener constante la tensión mecánica de la línea aérea de contacto, para así mantener también constantes la altura y el desplazamiento del hilo de contacto respecto al plano de rodadura y al eje de la vía respectivamente, y todo ello como consecuencia de las dilataciones de los cables por la variación de la temperatura.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Para esta labor existen diversos sistemas de compensación que van desde sistemas hidráulicos, electromecánicos, con resortes, etc..., pero ninguno de ellos tan utilizado como los de polipastos, o los de poleas y contrapesos, ya mencionados en el punto 4.5.1. En estos últimos, la tensión de los cables se mantiene por medio de un serie de contrapesos que cuelgan de sendas poleas acopladas solidariamente a sus correspondientes tambores, y en cada uno de ellos se arrolla el hilo de contacto y el cable sustentador. Estos sistemas incorporan sistemas de seguridad (o retención) en el caso de ruptura de los cables, similar a los mecanismos de trinquete.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





CAPÍTULO 5.- CATENARIAS DE LA RED FERROVARIA ESPAÑOLA.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





5.- CATENARIAS DE LA RED FERROVIARIA ESPAÑOLA

5.1- Generalidades.

Ya se ha comentado ampliamente en apartados anteriores qué es una catenaria, de qué modo cumple su función, y cuáles son los elementos de los que consta. Sin embargo, no todas son iguales; así, en función del tipo de circulación de la vía como del tipo de tensiones que se van a emplear, la catenaria presentará unas características u otras, las cuales vendrán determinadas por los elementos y componentes que las constituyan.

Sí por algo se caracteriza la red ferroviaria española es por no ser una red especialmente homogénea, si nos atenemos al tipo de ancho de vía, tensiones de alimentación, y velocidades de circulación. Esto ha dado pie a que las características técnicas de los tendidos eléctricos también sean de lo más diverso.

El lector podrá dar cuenta de lo dicho en el párrafo anterior si lee los primeros capítulos del presente proyecto y del proyecto previo de cálculo de las subestaciones de red y tracción de una línea de alta velocidad.

A fin de simplificar la clasificación de los tipos de catenarias presentes en la red ferroviaria española, diremos que hay dos:

- a) Catenarias para red ferroviaria convencional, por lo general de ancho ibérico, y de una tensión de funcionamiento de $3.000 V_{cc}$.
- b) Catenarias para red de alta velocidad, de ancho internacional, de una tensión de funcionamiento de $25.000 V_{ca}$.



5.2- Tensiones de alimentación en la tracción eléctrica

Los valores de tensión empleados en el impulso de máquina de ferrocarril eléctricas son muy dispares, debido a los innumerables avances que se han desarrollado en materia de motores eléctricos y sistemas de alimentación, y por la inexistencia de un organismo a nivel mundial que establezca una unificación en materia de uso de tensiones en tracción eléctrica ferroviaria. Sin embargo, ha habido determinado valores de tensión que prevalecen sobre otros tanto en V_{cc} como en V_{ca} .

Inicialmente, los primeros valores de tensión empleados en ferrocarril eléctrico, fueron de señal alterna de diferentes frecuencias, ya que los motores eléctricos en CC no eran de gran potencia; sin embargo, años después, se desarrollaron más sistemas en alterna, con diferentes frecuencias, que evolucionaron a sistemas que sólo hoy se emplean en redes de ferrocarril de larga distancia y redes de ferrocarril de alta velocidad, prevaleciendo los 25 kV a 50 Hz y los 15 kV a 16,7 Hz.

Actualmente en España coexisten los siguientes valores de tensión empleados en tracción eléctrica ferroviaria:

- 25 kV y 50 kV a 50 Hz en C.A. para líneas de alta velocidad.
- 3 kV en C.C. para líneas convencionales.
- 1,5 kV en C.C. para líneas de vía estrecha y algunas de metro.
- 0,75 kV en C.C. para metro y tranvía.
- 0,60 kV en C.C. para metro.



5.3- Catenarias para red ferroviaria convencional.

La red ferroviaria española de este tipo, cuyo ancho de vía es de 1.685 mm y que funciona bajo una tensión de 3.500 V_{cc}, presenta dos modelos de catenaria:

- **CR – 160**
- **CR – 220**

Los modelos son el resultado de un antiguo desarrollo de RENFE a resultas de un concurso de anteproyectos que tuvo lugar en el año 1.953 y al que posteriormente le fueron añadidas modificaciones. Estas evoluciones fueron recogidas en el “Libro Línea Aérea de Contacto CA – 160 / CA – 220”

CATENARIAS	CR - 160	CR - 220
Hilo de contacto	Cu - Ri 107	Cu - Ri 150
Número de hilos de contacto	2	2
Fuerza de tensado del hilo de contacto	9,8 kN (1.000 kg)	20 kN (2.040 kg)
Sustentador	Cobre 153 mm ²	Bz II 184 (mm ²)
Fuerza tensado cable sustentador (kN)	13,6 kN (1.389 kg)	24 kN (2.450 kg)
Péndolas	Varilla Cu 5 mm ²	Varilla Cu 25 mm ²
Flecha máxima del hilo de contacto (mm)	30	36
Corriente permanente máxima (A)	1200	2.200
Longitud máxima del vano (m)	60	60
Altura del sistema (m)	1,4	1,4
Descentramiento (m)	0,25	0,2
Altura del hilo de contacto (m)	5,3	5,3
Elasticidad de centro de vano (mm/N)	0,65	0,3
Elasticidad en su punto de apoyo (m)	0,32	0,25

Tabla 5.1 - Características generales de catenaria de ancho ibérico.



Figura 5.1 - Fotos de ménsulas correspondientes a las catenarias CR – 160 (izq.), y CR – 220 (dcha.).

El sistema CR – 160 es el más extendido en las líneas de ancho convencional. Por lo que hace referencia a la CR – 220, ésta aparece instalada en el Corredor del Mediterráneo.

5.4- Catenarias para red ferroviaria de alta velocidad.

Los dos tipos principales de conjuntos de catenaria para alta velocidad presentes en la red española son:

- **C – 250**
- **C – 350**

Cada una de ellas, al igual que las dos anteriores, son un compendio de las características mecánicas (ver Tabla 5.2) de los diferentes elementos que las constituyen, entre los cuales se encuentran el hilo de contacto, el cable sustentador, cable de las péndolas, así como las dimensiones características de tendido.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



CATENARIAS	250	350
Hilo de contacto (mm ²)	Cu – Ag – Ri 120	Cu – Mg 0.6 150
Número de hilos de contacto	1	1
Cable de retorno	Al 240 mm ²	La-110 116,2 mm ²
Feeder (- 25 kV)	-	La-280 281 mm ²
Fuerza de tensado del hilo de contacto	15 kN (1.530 kg)	31,5 kN (3.214 kg)
Sustentador	BZ II 70 mm ²	Cu 95 mm ²
Fuerza tensado cable sustentador (kN)	15 kN (1.530 kg)	15 kN (1.530 kg)
Cable resorte en Y (Péndola en Y)	BZ II 70 mm ²	BZ II 70 mm ²
Fuerza tensado del cable resorte (kN)	2,8	2,8
Longitud del cable resorte (m)	18	18
Péndolas	BZ II 16 mm ²	BZ II 16 mm ²
Flecha máxima del hilo de contacto (mm)	36	36
Corriente permanente máxima (A)	670	670
Longitud máxima del vano (m)	65	65
Altura del sistema (m)	1,4	1,4
Descentramiento (m)	0,3	0,3
Altura del hilo de contacto (m)	5,3	5,3
Elasticidad de centro de vano (mm/N)	0,6	0,4
Elasticidad en su punto de apoyo (m)	0,5	0,5

Tabla 5.2 - Características generales de catenaria de alta velocidad.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





**CAPÍTULO 6.- ANEXO A:
HIPÓTESIS Y
CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO**



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





6.- HIPÓTESIS Y CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

6.1- Introducción

La catenaria de una LAV, en la cual concurren elementos cuyas dimensiones y características dependen de parámetros medioambientales, meteorológicos, de otras características propias del terreno, así como de otros elementos constitutivos de la catenaria, conlleva el diseño y la realización de cierto número de cálculos, algunos de cierta complejidad, que sin la asistencia de programas informáticos serían difíciles de llevar a cabo. No obstante, a fin de facilitar las labores de proyectos de nuevas líneas, y las tareas de renovación y reparación de líneas existentes, los propios gestores de las redes de ferrocarril tienen preestablecidas ya determinadas dimensiones y distancias a respetar a la hora de realizar proyectos de nuevas vías.

A fin de restar complejidad al proyecto, se han excluido del mismo el diseño y cálculo de pórticos como elementos de los que suspende la catenaria, y también el cálculo de la catenaria en agujas. Por la situación del trazado, no se ha considerado la realización de túneles ni cualquier otro tipo de obra civil que suponga cambios en las hipótesis y parámetros de diseño.

6.2- Características generales del trazado y de la red

La catenaria, objeto de este proyecto, es un sistema constituido por un conjunto de elementos convenientemente unidos, de los cuales el principal es una línea aérea de contacto constituida, a su vez por un hilo de contacto, (tipo 1) y un cable sustentador (tipo 2), unidos ambos por tramos verticales de cable espaciados entre sí distancias que varían entre los 5 y 12 m. Esta línea, estará convenientemente aislada y quedará suspendida de postes con una longitud máxima de vano de 64 m (la máxima es de 65 m), y pudiendo ser inferior en 10 m, a una altura preestablecida por el gestor, con los correspondientes equipos de compensación por cantón, y situada sobre el mismo trazado de la línea, con



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



la finalidad de llevar la corriente eléctrica a las máquinas y/o trenes que se desplazan a lo largo de la misma.

Se ha adoptado un tipo de catenaria que permite la máxima velocidad de circulación de servicios comerciales. Ésta es la *EAC - 350*, implantada por ADIF y desarrollada por Siemens, la cual permite una máxima velocidad de 350 km/h, hecho que da lugar a un mayor esfuerzo del pantógrafo sobre la catenaria demandando valores de elasticidad más bajos. Las características de esa catenaria aparecen en los Apartados 6.3.3. y 6.3.4

La catenaria proyectada es para electrificar el tramo comprendido entre las localidades de Quintanavides y Pancorbo (en la comarca de la Bureba, provincia de Burgos), tramo cuya línea a la que pertenece presenta las siguientes especificaciones:

INFORMACIÓN SOBRE LA LÍNEA	
Tramo / Longitud /Altitud (1):	Fuentebureba – Pancorbo / 7,8 km / 633 m
Tramo / Longitud /Altitud (2):	Briviesca – Fuentebureba / 11,9 km / 726 m
Tramo / Longitud /Altitud (3):	Prádanos de Bureba – Briviesca / 7,3 km / 765 m
Tramo / Longitud /Altitud (4):	Quintanavides – Prádanos de Bureba /10,1 km / 825 m
Radio mínimo de curva (m)	6.000 (para 350 km/h)
Vel. máxima de servicio (km/h)	300 km/h
Ancho de la vía (mm)	1.435 mm
Longitud del corredor (km)	250 km
Número de vías	2
Corredor ferroviario / Línea	Madrid – Irún

Tabla 6.1 – Información general del tramo.

Para la realización de cálculos y del dimensionado de algunos de los elementos de la catenaria, se ha partido de los valores establecidos para la propia red en cuanto a distancias (ver Tabla 6.2). En este sentido es útil también tener presentes las medidas del gálibo.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



GEOMETRÍA DEL TRAZADO: DISTANCIAS (ADIF)		
Altura de la catenaria en vía general y estaciones (CWH) Norma UNE 50367 (v > 250 km/h) alturas entre 5,08 y 5,3 m.	Mínimo	4,6 m
	Normal	5,3 m
	Máximo	6,0 m
Altura máxima del hilo de contacto al sustentador (SH)	1,4 m	
Altura de la base del poste al plano de la vía (e)	0,9 m	
Distancia entre ejes de la vía (min)	4,3 m	
Distancia entre eje de vía y eje de poste contiguo	3,5 m	
Longitud de vano (máx)	65 m	
Peralte máximo adoptado	5,6 °	
Sección de túnel	85 m ²	

Tabla 6.2 – Geometría del trazado.

Los valores de las tensiones empleados para la electrificación de este tramo son, según la norma EN-50163, los que figuran en la Tabla 6.3.

TENSIONES ELÉCTRICAS DE LA RED	
Sistema de electrificación / Frecuencia	Corriente alterna (2x25 kV) / 50 Hz
Tensión no permanente mínima	17.500 V
Tensión permanente mínima	38.000 V (19.500V, en 1 x 25 kV)
Tensión nominal	50.000 V (25.000 V, en 1 x 25 kV)
Tensión permanente máxima	55.000 V (27.500 V, en 1 x 25 kV)
Tensión no permanente máxima	29.000 V

Tabla 6.3– Sistema eléctrico del trazado.

Por lo que respecta a las condiciones medioambientales, en la Tabla 6.4 se da una relación de los valores del lugar del trazado.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES DEL TRAZADO	
Zona climática (Interior / exterior)	Interior - zona B
Rango de alturas de la zona	[500 m – 1.000 m]
Rango de temperaturas de la zona [máx. / mín.]	[-30 °C / 45°C]
Temperatura máxima del hilo de contacto	100 °C
Temperatura máxima del sustentador	100 °C
Velocidad del viento según IAP (Región 1 y 2)	24 m/s (Tipo1) / 28 m/s(Tipo 2)
Velocidad del viento según RLAT	33,33 m/s (B ó C) /sin viento en A
Peso del manguito de hielo por zona [A / B / C]	- / 180 \sqrt{d} [g/m] / 360 \sqrt{d} [g/m]

Tabla 6.4– Características medioambientales de la zona del trazado.

Se ha tomado como valor de referencia de la velocidad del viento para los cálculos de los esfuerzos el recogido por el *Reglamento de Líneas de Alta Tensión* (RLAT), cuyo valor es de 33,33 m/s, por ser más exigente que los valores asignados a los de la regiones, Tipo 1 y 2 según el IAP, que son sensiblemente menores.

Para determinar las tensiones de contacto y de paso, en lo relativo al cálculo de la red de tierras, se deberán tomar medidas in situ de la resistividad y la compresibilidad del suelo en áreas aledañas al trazado de la línea.

6.3- Características de la catenaria y configuración del tendido

La línea aérea de contacto a instalar constará de hilo de contacto, sustentador, y péndulas como elementos de unión de los dos primeros. De la interacción entre el hilo de contacto y el pantógrafo, y las características propias de la circulación ferroviaria determinarán parte de las características de los conductores.

6.3.1- Selección del pantógrafo y comportamiento dinámico

La interacción del pantógrafo con la línea aérea de contacto condiciona dos conjuntos de valores que son, por un lado, el radio de las curvas y la longitud de los vanos (que guardan relación con la longitud de la superficie de trabajo del



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



dispositivo); y, por otro, y para casos de líneas en las que se superen los 200 km/h, las características constructivas de la catenaria, determinadas por la fuerza de contacto del pantógrafo sobre el hilo y la influencia que tiene la elasticidad de la catenaria en la permanencia del contacto entre el hilo y el pantógrafo, cualquiera que sea la velocidad de desplazamiento de éste.

Cuando se desarrolló la ETI (especificación técnica de interoperabilidad) para los sistemas de alta velocidad, se determinó que todos los trenes interoperables debían utilizar el mismo tipo de pantógrafo. A este pantógrafo se le denominó Euro-pantógrafo (Figura 6.1), del cual se ha tomado como referencia la dimensión de la zona de trabajo (1,2 m) para verificar que el valor del descentramiento en postes (0,3 m) y longitud máxima de vano (65 m) son válidos. Posteriormente, se ha determinado el trazado determinando la longitud de los vanos para curvas de radio inferior al de curva de vano máximo

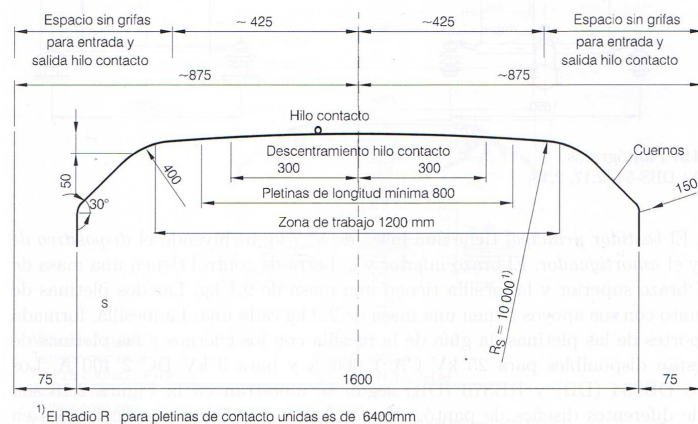


Figura 6.1- Perfil del Euro-pantógrafo para cálculos asociados a la catenaria.

Para que la línea de contacto escogida cumpla con la ETI, se han verificado los requisitos relativos al comportamiento dinámico y elevación dinámica del hilo de contacto, tal y como queda recogido en la norma UNE 50367.

Parte de la determinación de ese comportamiento dinámico pasa por establecer previamente la fuerza de contacto dinámica (F_s) del pantógrafo sobre el hilo de



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



contacto, a fin de mantener un nivel de captación de corriente de calidad, por lo que tiene de influencia en la vida del hilo.

$$F_c = 0,00097 \cdot v^2 + F_s \pm \gamma \cdot (M) \quad [N] \quad [6.1]$$

Siendo:

- La F_s la fuerza de contacto estática (norma 50 206-1) cuyo valor para líneas nuevas es de 70 N (valor TSI).
- V es la velocidad de desplazamiento
- $\gamma \cdot (M)$ término que es el producto de un factor “ γ ” dependiente de la velocidad y de la masa del conjunto del pantógrafo

Esta fuerza, F_c , que es variable con la velocidad, presenta valores que oscilan en torno al valor estático F_s (máquina parada con pantógrafo desplegado). Las oscilaciones que aparecen son cada vez mayores a medida que aumenta la velocidad, siendo, a su vez, más pronunciados en los centros de los vanos (+) y menos en la vertical de los postes (-). La forma de atenuar este fenómeno es por medio de:

- a) Un mayor grado de elasticidad de la catenaria (ver Apartado 6.3.2), implementando pendolado en “Y”, lo que produce que las oscilaciones sean de menor amplitud.
- b) De la alteración de la frecuencia de las oscilaciones, valor función de la tensión mecánica a la que se encuentra sometido el cable, de modo que la velocidad de propagación de las oscilaciones (c) quede por encima de la velocidad máxima de desplazamiento, o de explotación de la línea, evitando así la coincidencia de ambas y la aparición de un fenómeno de resonancia. La Especificación Técnica de Interoperabilidad marca que la velocidad de desplazamiento de sea un 70% la de la onda (la frecuencia de las oscilaciones),



6.3.2- Selección de los conductores y comportamiento dinámico

Se han considerado dos aspectos a la hora de seleccionar los cables de la línea aérea de contacto.

- a) **Las características eléctricas** requeridas del hilo de contacto y del sustentador, tales que, al menor coste posible, satisfagan los requisitos impuestos por el diseño, entre ellos, permitir la máxima intensidad de circulación prevista en la línea aérea de contacto (Apartado 6.2).

- b) **Las características mecánicas**, cuyo objetivo es la obtención de una longitud máxima de vano, con la máxima tensión mecánica de trabajo, manteniendo la calidad de la captación a través de un contacto permanente entre el hilo de contacto y el pantógrafo durante todo el desplazamiento (comportamiento dinámico de la línea aérea), independientemente de la velocidad, y todo ello al menor coste posible (Apartados 7.3 y 7.4).

Características eléctricas

La intensidad máxima prevista determina la sección del conductor, aquella se obtiene en función de tres parámetros:

- a) Del **sistema de electrificación** del trazado, que lleva del uso de dos cables (3.000 V en D.C.) a un cable (2 x 25kV en C.A.)

- b) De la **densidad del tráfico ferroviario** de la línea, prevista alta por transcurrir por zonas de notable afluencia turística y por unir la capital con una de las regiones más industrializadas.

- c) **Del perfil de la línea**, que por las características propias de la alta velocidad, presenta rampas de poca pendiente.

Determinar esta intensidad puede hacerse de una forma bastante fiable en sistemas de alimentación por corriente continua por medio de la expresión que



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



relaciona el esfuerzo en llanta (E) que ha de realizar una máquina en función de la velocidad (v), la carga remolcada (Q) y la pendiente de la rampa (i); tal y como resulta de la expresión, según norma RENFE:

$$E = [1,5 + (V^2/4500)+i] \cdot Q + (106 + 0,84 \cdot V + 0,03 \cdot V^2) + (0,84 \cdot i) \quad [6.2]$$

Mediante las gráficas características aportadas por el fabricante de la máquina o la unidad, podemos determinar la potencia y de ahí obtener la intensidad demandada. A esa intensidad se ha de añadir las corrientes auxiliares de alimentación a los circuitos internos del tren o de la máquina: iluminación, tomas de fuerza, aire acondicionado, etc...

Con la intensidad determinada, se calculan las caídas de tensión a lo largo del trayecto considerando aspectos como la distancia entre subestaciones y la existencia de un feeder de acompañamiento y que repercutirá en un descenso del esfuerzo de llanta y por tanto una corrección en la velocidad.

Con máquinas de iguales características circulando con poca frecuencia, es relativamente sencillo determinar la intensidad; sin embargo los cálculos se tornan más complejos cuando las características del material rodante varían y la frecuencia es elevada; aún más cuando el sistema es de corriente alterna. Es por esto que habitualmente los gestores de redes y los proyectistas se apoyen de programas informáticos de cálculo y simulación, a menudo propios, para obtener el valor de la intensidad.

Características mecánicas

Para que la línea de contacto escogida cumpla con la ETI, se han de verificar los requisitos relativos al comportamiento dinámico y elevación dinámica del hilo de contacto, tal y como queda recogido en la norma UNE 50367.

El comportamiento dinámico de la catenaria escogida ha supuesto, además, verificar que las características de elasticidad de los conductores de la línea aérea de contacto permiten una velocidad de propagación de la onda (c)



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



superior a la velocidad de explotación de la línea, determinando así su idoneidad por el hecho de evitar un fenómeno de resonancia, tal y como se describe en el Apartado 7.3.1. En base a esa velocidad de propagación, se han seleccionado los materiales y los valores de tense del hilo de contacto.

Los cálculos mecánicos han ido asociados a los conductores sometidos a tensión permanente de trabajo – hilo de contacto y sustentador –, y al del resto de conductores en cuanto al tendido.

6.3.3- Hilo de contacto, sustentador, péndolas e hilo de tierra

Ya introdujimos las características de la catenaria C-350 en el Apartado 5.4. En la Tabla 6.5 se muestran las características de los cables, sometidos a tense, que constituyen la línea aérea de contacto.

CATENARIAS	Hilo de contacto	Sustentador	(*) Falso Sustentador	Péndolas
Designación	RIM 150	Cu 100	Bz-35 (**)	Bz-16
Sección (mm²)	150	95	35	16
Diámetro (mm)	14,5	12,95	7,5	5,1
Material	Cu-Mg 05	Cu electrolítico	Bz-II	Bz-II
Carga de rotura (kN)	75,7	38,82	20,17	9,33
Tensión de trabajo (kN)	31,50	15,75	3,15	-
Coefficiente seguridad	2,40	2,46	6,40	-
Peso por metro (kg/m)	1,335	0,890	0,310	0,143
Corriente permanente	80°C – 400 A	80°C – 400 A	80°C – 160 A	80°C – 100 A
Módulo elástico (N/m)	13,10	8,29	-	-
Coefficiente dilatación	-	-	-	-
(*) Para la péndola en Y ; (**) según norma DIN 48201				

Tabla 6.5- Características principales de la línea aérea de contacto



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



El hilo de contacto permanece suspendido del sustentador por medio de péndolas, cuya distribución dependerá del tipo de pendolado escogido. Así,

- **Pendolado en “Y”.** Constará de Dos péndolas, una en cada extremo del vano a 5 m del poste; y en el medio, cinco péndolas más (en total siete) con una separación $d_p \approx 9,17$ m.
- **Pendolado simple.** El hilo de contacto estará suspendido del sustentador por medio de 12 péndolas, estando las de los extremos a 6 m del poste de su correspondiente lado, manteniendo las restantes un equiespaciado de 5,2 m.

6.3.4- Feeder y cable de tierras.

A esta catenaria vienen asociados cables de *feeder* (ver Tabla 6.6):

CATENARIAS	Feeder (*)	Feeder (-) (**)	Feeder(+) (***)	Tierra
Designación	La – 180	La – 280	La – 380	La – 110
Sección Al (mm ²)	147,3	241,7	337,3	94,2
Sección Ac (mm ²)	34,4	39,4	43,7	22
Sección total (mm ²)	181,6	281	381,0	116,2
Diámetro (mm)	17,5	21,8	25,38	14
Carga de rotura (kN)	651	842	1.065	440
Resistencia eléctrica	0,196 (Ω/km)	0,119 (Ω/km)	0,0875 (Ω/km)	0,307 (Ω/km)
Peso por metro (kg/m)	0,676	0,976	1.275	0,432
Corriente permanente	a 80°C, 426 A	a 80°C, 575 A	A 80°C, 600,	80°C - 303
Módulo elástico	8.200 kg/mm ²	7.700 kg/mm ²	7.000 kg/mm ²	8.200 kg/mm ²
Coefficiente dilatación	17,8 · 10 ⁶	18,9 · 10 ⁶	19,3 · 10 ⁶	17,8 · 10 ⁶
(*)	Feeder de aumento de sección o guarda.			
(**)	Feeder aumento de sección o negativo.		Norma UNE-EN-50.149	
(***)	Feeder positivo.			

Tabla 6.6- Características de cables de feeder y de guarda



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



Otros valores característicos de la catenaria C – 350, determinantes a la hora de verificar la idoneidad para una línea de alta velocidad, aparecen recogidos en la Tabla 6.7.

CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS	
Desviación máxima al contacto con el pantógrafo: Elasticidad	0,39 mm/N
Desviación máxima del hilo de contacto con viento. Uniformidad	12%
CARATERÍSTICAS DINÁMICAS	
Velocidad de propagación de las ondas (*)	70 %
Factor Doppler (según EN-50119) (**)	> 0.17
Coeficiente de reflexión (según EN -50119) (***)	< 0,14
Factor de amplificación	< 2,2
Fuerza de contacto	70 N (Valor ETI)
Elasticidad de la catenaria (según ETI) (****)	< 8 cm
<p>(*) La velocidad del tren (máx. 350 km/h) no ha de superar la velocidad de propagación de las ondas en el tanto por cierto de indicado.</p> <p>(**) Marca la relación entre la velocidad de propagación de la onda y la velocidad de desplazamiento del tren.</p> <p>(***) Defina la magnitud relativa de la onda reflejada respecto de la emitida.</p> <p>(****) Máxima elevación del hilo de contacto al paso del pantógrafo.</p>	

Tabla 6.7- Características estáticas y dinámicas de la línea.

6.3.5- Postes y macizos

Los postes diseñados y fabricados para el tendido de la catenaria están constituidos por dos perfiles en U de longitud determinada, y normalizada, unidos por sus alas gracias a una serie de cartelas, o pares de pletinas, dispuestas en ángulo y unidas por los extremos.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Este tipo de postes presentan una gran resistencia a la flexión y cuya verificación queda probada en el Apartado 7.9.

Han sido dimensionados, por otro lado, para soportar las hipótesis de cargas de la zona del trazado, tanto permanentes como variables, en función del tipo de poste, o por la posición que van a ocupar dentro del cantón, siempre siguiendo lo marcado por la norma EN 50119. Sabiendo que las longitudes (alturas) de los postes están normalizadas, con escalones de 0,25 o 0,50 m, y habiendo considerado todas las alturas a salvar (ver Apartado 6.10.1) y los momentos de vuelco de los postes (ver Apartado 7.10.2), las dimensiones de los postes del tramo figuran en la Tabla 6.9.

Perfil	Altura (mm)	Largo de la sección (mm)	Ancho de la sección (mm)
Doble U	8.550	350	180
Doble U y pletinas	8.550	350	180

Tabla 6.9- Dimensiones del poste tipo para sustentar la catenaria.

Los postes van protegidos mediante una capa de pintura u otro tipo especial de protección contra fenómenos de oxidación y corrosión (galvanizado, etc.), todos ellos conformes a las normas:

- UNE – EN 10025
- EN ISO 1461
- Color RAL 6009 (verde abeto), según ISO 12944.

Fabricados con los correspondientes orificios para el montaje de los restantes elementos y conjuntos de piezas; ménsulas aisladores... También incorporarán elementos de seguridad. Los postes a su vez estarán fijados al suelo mediante macizos de hormigón de 0,75 m de diámetro y 2,4 m de altura.



6.3.6- Ménsulas

Las ménsulas son estructuras geométricas cuya principal función es la de servir como apoyo y sujeción del tendido aéreo - hilo de contacto y sustentador principalmente - montadas a partir de tubos de aluminio de sección circular, con sus correspondientes elementos de fijación y de protección; cada uno de los conjuntos irá adosada en la parte superior de cada poste y en un lateral.

Las ménsulas quedarán constituidas por los siguientes elementos:

- Aisladores, interpuesto entre los extremos de los tubos principales de la ménsula y las zonas de amarre de los postes.
- Tubo superior u horizontal.
- Tubo en ménsula o principal.
- Brazo de registro.
- Tirante del brazo de registro.
- Brazo de atirantado.
- Rótulas en los puntos de amarre de la ménsula al poste para permitir el giro y el movimiento de ésta ante posibles variaciones de las tensiones en los cables y conductores.

El dimensionado de las ménsulas consistirá en determinar las fuerzas internas que actúan sobre la estructura de la ménsula, y los correspondientes momentos como resultado de la acción de esas fuerzas. Las diversas cargas y sus combinaciones pueden derivar de:

- La posición del poste respecto de la curva: interior o exterior.
- Dirección del esfuerzo de atirantado: hacia adentro o hacia afuera de la curva.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



- Las acciones del viento y del hielo, ya sean por separado o de forma combinada.

Los componentes de las cargas, en el dimensionado de las ménsulas, son los mismos componentes de las cargas que actúan sobre los cables de la catenaria. El cálculo de esta estructura entraña cierta dificultad, para lo cual es habitual el uso de programas informáticos que nos digan si la geometría y los tubos son los adecuados; no obstante, y partiendo de instalaciones previas y con el fin de garantizar el soporte de las cargas, las características del tubo que habrá de emplearse serán:

Tubo (Material)	Norma	Diámetro	Sección	Peso
EN AW - AlSiMgMn	EN 756	55 mm	6 mm	2,50 kg

Tabla 6.10- Características del tubo de ménsula

Además, las estructuras habrán de reunir estas otras características

- Estar constituidas por el menor número de piezas de sujeción y amarre que permitan un correcto funcionamiento de la catenaria y su intercambiabilidad, evitando así un incremento del tipo de piezas y el peso de la ménsula.
- Emplear materiales resistentes a la corrosión y a la oxidación
- Estar protegidas contra los agentes meteorológicos y elementos corrosivos de modo que alarguen su vida útil y reduzcan las labores de mantenimiento.
- Sustentar el conjunto de la catenaria y el resto de elementos asociados a ésta tales, tales como aisladores, bridas y otros elementos de fijación.
- Garantizar el movimiento de todos los conductores en cualquier situación medioambiental y meteorológica.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



- Incorporar conexiones eléctricas que garanticen la continuidad del suministro y asegurar así la equipotencialidad de todas las partes.
- Estar dimensionadas para soportar todos los esfuerzos que sobre ella van a recaer, tal y como indica la norma UNE – EN 50119

6.3.7- Aisladores

Mediante la norma CEI 60815 se han establecido las características y líneas de fuga mínimas de los dispositivos de aislamiento.

Características eléctricas:

La zona por la que transcurre el trazado es de nivel 1 de contaminación por ser esencialmente agrícola, con poca presencia de actividad industrial y apenas contaminada. Los valores de fuga son los de la Tabla 6.11:

Nivel de contaminación	Línea mínima de fuga AC	Línea mínima de fuga DC
Ligera 1	28 mm/kV	32 mm/kV

Tabla 6.11- Valores de línea mínima de fuga

La relación de tensiones nominales y tensiones tipo impulso son según la norma EN 50124-1. Para los sistemas de electrificación en 25 kV, tenemos:

Tensión nominal de la L.A.C.	Tensión permanente más alta	Valor límite de las tensiones tipo impulso para las categorías de sobretensiones
25.000 V	27.500 V	170 kV
50.000 V	55.000 V	300 kV

Tabla 6.12- Valores límite de tensiones.

También establecemos las distancias mínimas en el aire en mm, según la norma EN 50119 :



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



Tensión nominal de la L.A.C.	Tensión soportada tipo impulso	A tierra		Entre fases	
		Estática	Dinámica	Estática	Dinámica
25.000 V	170 kV	270	150	540	300
-	250 kV	-		-	

Tabla 6.13- Distancias

Según la norma UNE – EN 50.125, para elementos fijos cuyo destino es estar conectados a catenaria o feeder, la tensión máxima admisible de los dispositivos o elementos corresponderá con la tensión que hay entre las fases del sistema bifásico, o entre los feeders (+) y (-) de la catenaria.

Características mecánicas

Los aisladores están dimensionados para soportar todos los esfuerzos a los que se vea sometido la catenaria.

Los aisladores del tubo de cuerpo en ménsula o principal son capaces de soportar esfuerzos de tracción, compresión y torsión.

El factor de seguridad deberá ajustarse a lo dictado por la norma EN 50.119 “Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Tracción eléctrica mediante línea aérea de contacto”.

Los aisladores del tirante presentan valores capaces de soportar esfuerzos de tracción y en ciertas circunstancias de compresión.

Con los valores de tensión y los valores de líneas de fuga asociados al nivel de contaminación, la línea de fuga mínima es de 770 mm, para la cual los aisladores tipo instalados son los de la Tabla 6.14:



Diseño aislador	Aplicación	Parámetros eléctricos		Parámetros mecánicos	
		Línea de fuga	Tensión nominal	MDCL	STL
Ojal - tubo	Tubo superior	1.215 mm	25 kV	1,9 kN	1,9 kN
Tubo	Tubo ménsula	1.215 mm	25 kV	60 kN	60 kN

Tabla 6.14- Características eléctricas y mecánicas de los aisladores de ménsula.

6.3.8- Elementos de compensación de línea

Recordemos que el rango de funcionamiento del equipo formado por el conjunto de poleas y contrapesos (equipo de compensación), limita la variación de la longitud permitida L , en vertical, del conjunto de contrapesos que cuelgan de las poleas en los postes correspondientes.

En nuestro caso adoptaremos la misma relación de poleas presente en los conjuntos de compensación de la catenaria en la línea de alta velocidad Madrid – Barcelona (EAC – 350). La relación de poleas será, pues, de 5:1 para un valor de tensado del hilo de contacto de 30,87 kN, y de 3:1 para un valor de tensado del cable sustentador de 15,43 kN.

6.3.9- Seccionadores de cantón

La línea aérea de contacto de cualquier catenaria tiene establecida su continuidad o discontinuidad por medio de la conexión de secciones a través de los correspondientes dispositivos.

En nuestro caso, al tratarse de una línea de alta velocidad, se dispondrán a lo largo del tendido, y en las zonas de solapamiento de secciones seccionamientos de lámina de aire por ser la opción que mejor captación ofrece a velocidades altas ($v > 160$ km/h).



6.4- Vano, cantón de regulación y seccionamientos.

La longitud del cantón de regulación viene determinada por: a) el rango de temperaturas de funcionamiento de los equipos de la línea aérea de contacto; b) el rango de funcionamiento del dispositivo de compensación automática de la tensión mecánica; c) la variación de la tensión mecánica a lo largo del vano; y d) las variaciones permitidas en el descentramiento y altura del hilo del contacto

Buscando la minimización del uso de postes, y el consiguiente coste, la longitud de vano es de 65/64 m, tal y como queda recogido en el Apartado 6.2, y cuyo valor viene establecido de partida con las características del hilo de contacto de la catenaria designada; no obstante, éste es un valor sujeto a la longitud de la arcada del pantógrafo, la velocidad del viento, y el trazado de la vía, y que se verifica mediante la sustitución de los valores, correspondientes a nuestro caso, en las expresiones que relacionan los tres parámetros (ver Apartado 7.3) .

Para determinar la longitud en función del vano, partimos de La expresión:

$$L = 11,8 \cdot l - 55$$

Siendo l la longitud del vano. Las longitudes redondeadas de los cantones quedan reflejadas en la Tabla 6.15.

	Vanos 65 m	Vanos 64 m	Vanos 61 m	Vanos 53 m
Cantón de 1.430 m	22	-	-	-
Cantón de 1.408 m	-	22	-	-
Cantón de 1.281 m	-	-	21	-
Cantón de 1.105 m	-	-	-	17

Tabla 6.15- Determinación de los vanos



6.6- Circuito de retorno y red de tierras

Recordemos que el circuito de retorno incluye todos los conductores que forman o constituyen el camino de retorno de la corriente desde el punto en el que se encuentra la máquina a la fuente de alimentación, o subestación eléctrica, tanto en condiciones de funcionamiento normal, como en situación de fallo. Formarán parte del circuito de retorno: a) el cable de retorno (o *feeder* negativo); b) el carril de rodadura; y c) el terreno circundante a la vía por estar ésta conectada a electrodos de puesta a tierra

6.5.1- Tensiones de contacto y accesibles, y de paso.

Las tensiones de contacto y accesibles viene establecidas en función de la duración de la tensión; establecemos, pues, dos campos de tensiones: tensiones de contacto ($t < 0,5$ s) y accesibles ($t > 0,5$ s). Para ello se parte de las normas HD 637 S1 (sistemas trifásicos para subestaciones de alta y media tensión), y EN 50 122-1, (sistemas de tracción ferroviaria). En talleres y depósitos estos valores están limitados a $25 V_{rms}$. Estas normas especifican las tensiones de contacto y en base a la expresión:

$$U_t = U_{c1} + R_a \cdot I_{c1} \cdot 10^{-3}$$

Siendo:

- I_{c1} , corriente tolerada por el cuerpo, [mA].
- U_{c1} , tensión correspondiente a I_{c1} , según la norma CEI 60479-1, [V].
- R_a es la resistencia considerando la resistencia del zapato (R_{a1}) y la resistencia del terreno (R_{a2}) de forma conjunta. Valor de 1.000Ω .



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



duración t(s)	Corriente en el cuerpo Ic1 (mA)	Tensión Uc1 (Vrms)	Tensión de Contacto – Permissible Ut (Vrms)
0,02	500	440	940
0,05	500	435	935
0,1	442	400	842
0,2	350	320	670
0,3	252	245	497
0,4	145	160	305
0,5	100	125	225
0,6	78	105	160
0,7	66	95	130
0,8	58	90	110
0,9	52	85	90
1	50	80	80
≤ 300	-	-	65
permanente			60

Fuente: Líneas de contacto para ferrocarriles electrificados. Kiessling Puschmann – Schneider – Vega. Ed.: Siemens

Tabla 6.16- Tensiones de contacto y accesibles según la norma EN-50122-1

No tenemos, por el contrario, tensiones de paso especificadas por norma, y que su valor es mucho menor que las de contacto.

6.5.2- Tensión de puesta a tierra.

El sistema de puesta a tierra de un tendido ferroviario alimentado mediante corriente alterna estará formado por la unión, a través del conductor de retorno, de una serie de electrodos tales como las cimentaciones de los postes de la línea aérea de contacto, viaductos, pasos superiores, y a la que también se conectan las tierras de redes de baja, media y alta tensión, así como las de telecomunicaciones y señalización, y redes aéreas.

El objetivo de la correcta puesta a tierra en asociación con el circuito de retorno implica conectar las masas de los elementos que puedan ponerse en tensión dentro de la zona de la línea aérea de contacto y el pantógrafo, para que, en caso de fallo, salten las protecciones.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



Por tanto, la garantía de la protección y seguridad de personas y a fin de evitar la aparición de tensiones de contacto peligrosas en condiciones de explotación de la línea y en situación de cortocircuito, deberán ponerse a tierra elementos tales como: puentes, armaduras y estructuras de túneles, subestaciones, cimentaciones y, sobre todo, envolventes metálicas de los equipos y los elementos metálicos.

El RGLAT en lo relativo a la comprobación de las tensiones de contacto admisibles, distingue dos tipos de apoyos: a) frecuentados (sin mención a la comprobación); y b) no frecuentados. Nuestra instalación constará de apoyos no frecuentados por estar vallada en toda la longitud del tramo; no obstante, de tener que comprobarse esta tensión, el RLGAT en su apartado 7.3.4.3, punto 5, afirma que la puesta a tierra será correcta si el valor U_E es menor que dos veces la tensión de contacto admisible.

Duración t(s)	Tensión de Tierra (U_e) [<2·Ut]
0,02	< 940·2
0,05	< 935·2
0,1	< 842·2
0,2	< 670·2
0,3	< 497·2
0,4	< 305·2
0,5	< 225·2
0,6	< 160·2
0,7	< 130·2
0,8	< 110·2
0,9	< 90·2
1	< 80·2
≤ 300	< 65·2
permanente	< 60·2

Tabla 6.17- Tensiones de puesta a tierra.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





**CAPÍTULO 7.- ANEXO B:
CÁLCULOS DE LA CATENARIA**



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





7.- CÁLCULOS DE LA CATENARIA

7.1- Introducción.

El dimensionado de una catenaria comprende tener en cuenta diversos aspectos que podemos englobar en dos tipos de cálculos:

a) Cálculos eléctricos.

b) Cálculos mecánicos.

Los principales cálculos eléctricos se centrarán en verificar la capacidad de la catenaria, esto es, la de poder soportar la máxima intensidad que va a circular por la línea, o máxima corriente de carga, debida al tráfico ferroviario, y en dimensionar la red de tierras.

Por lo que respecta a los cálculos mecánicos se pretende establecer los siguientes aspectos

- Máxima longitud de los vanos en el tramo de línea que se pretende diseñar. Tanto en recta como en curva, la longitud va a venir determinada por el descentramiento que presente el hilo de contacto escogido para la catenaria. También
- Los valores de los tensiones mecánicas que van a aparecer en los cables son consecuencia de la variación de las condiciones meteorológicas, así como de la consideración de la zona por la que transcurra la línea (A, B, ó C según el criterio marcado por el R.G.L.A.) y que no hace más que determinar esos esfuerzos en base a una serie de expresiones y valores en función de altitud de la zona por la transcurre esa línea.
- La longitud de las péndolas con el fin último de determinar las flechas



- Los momentos de vuelco de los postes, magnitudes que suponen el previo cálculo de las tensiones que sobre los postes van a aparecer, producto del hielo y el viento sobre los cables, y el peso propio de la propia catenaria, entre otros.

7.2- Determinación de la corriente de carga de la línea

Para establecer la corriente máxima esperada de carga (I_{max}) es preciso conocer las características del tráfico ferroviario, y otras asociadas que va a tener nuestra LAV; sin embargo, al carecer de estos datos no es posible determinar dicha corriente. La capacidad máxima de transporte de la catenaria en régimen continuo (I_{dOCL}), cumple:

$$I_{dOCL} > I_{max} \quad [7.1]$$

Podemos, pues, estimar las características de la propia catenaria partiendo de la expresión de la potencia; por tanto:

$$P' = V \cdot I'_{m\acute{a}x} \cdot \cos \sigma \quad [7.2]$$

Donde:

- P' es la potencia por unidad de longitud. $P' = 650$ (kW/km), 50 % del valor de referencia para alta velocidad (300 km/h), frecuencia de paso de 6 min (Tabla 10.16, pág. 708. Líneas de contacto para ferrocarriles – Kiessling)
- V es la tensión de la línea. $V = 2 \times 25$ kV.
- $\cos \sigma$ es el factor de potencia, se asume el valor más desfavorable 0,98.

$$I'_{m\acute{a}x} = 650 / (25 \cdot 0,98) = 26,53 \text{ A/km}$$

Al ser vía doble, la corriente I'_{oCL} se divide entre dos y se multiplica por la distancia entre subestaciones, distancia que fijaremos en 90 km, lo que corresponde a una sección de alimentación de 45 km



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



$$I_{\text{máx}} = (26,53 / 2) \cdot 45 = 596,93 \text{ A}$$

La catenaria C – 350 (o también AEC – 350) admite una corriente nominal a 70 °C de 850 A, (Tabla 6.3 página 332, Líneas de contacto para ferrocarriles electrificados. Kiessling Ed.: Siemens) lo que la hace apta para nuestro caso.

En caso de tener potencias de 1.300 (kW/km), el valor de la corriente sería el doble; habría que optar por una catenaria Sicat H 1.0, tal y como muestra la Tabla 7.1 (página 749, *Líneas de contacto para ferrocarriles electrificados*. Kiessling Ed.: Siemens):

Tipo línea contacto	Feeder refuerzo	Conductor retornar	Hls	Temp. hls contacto °C	Ambiente °C			
					-20	0	20	40
Sicat S1.0	no	no	50	80	1230	1100	944	755
	no	no	16,7		1080	960	820	690
	si	no	50		2120	1890	1620	1300
	si	no	16,7		1950	1610	1490	1190
	si	si	50		1970	1730	1500	1200
	si	si	16,7		1950	1610	1490	1190
Re 250	no	no	50	100	1350	1230	1100	950
	no	no	16,7		1270	1130	970	770
	no	si	50		1350	1230	1100	950
	no	si	16,7		1270	1130	970	770
	si	no	50		2250	2000	1720	1370
	si	no	16,7		2080	1850	1590	1270
	si	si	50		2030	1810	1550	1240
	si	si	16,7		2030	1790	1540	1230
Sicat H1.0	no	no	50	100	1620	1480	1300	1040
	no	no	16,7		1550	1430	1280	1030
	si	no	50		2360	2100	1800	1440
	si	no	16,7		2110	1870	1600	1280
	si	si	50		2040	1810	1550	1240
	si	si	16,7		2040	1810	1550	1240

Tabla 7.1- Capacidades de transporte de las catenarias Re- 250 y Sicat H 1.0

Por tanto, dado el valor de la intensidad máxima que es capaz de admitir la cada catenaria, se optará por la C – 350 (ó AEC – 350 según su denominación original), como alternativa a la Sicat H 1.0

7.3- Calculo de los descentramientos máximos.

El fin del cálculo del descentramiento máximo es determinar una relación óptima entre el descentramiento del hilo de contacto respecto del eje de la vía, y la longitud del vano, considerando la influencia del viento y teniendo presente que

el valor a obtener nunca sobrepase la mitad de la longitud del frotador del pantógrafo.

7.3.1- Descentramiento en recta.

El descentramiento en recta consiste en determinar la flecha máxima horizontal D_{max} que puede alcanzar el hilo de contacto debido a la acción del viento, tal y como se muestra en la Figura 7.1.

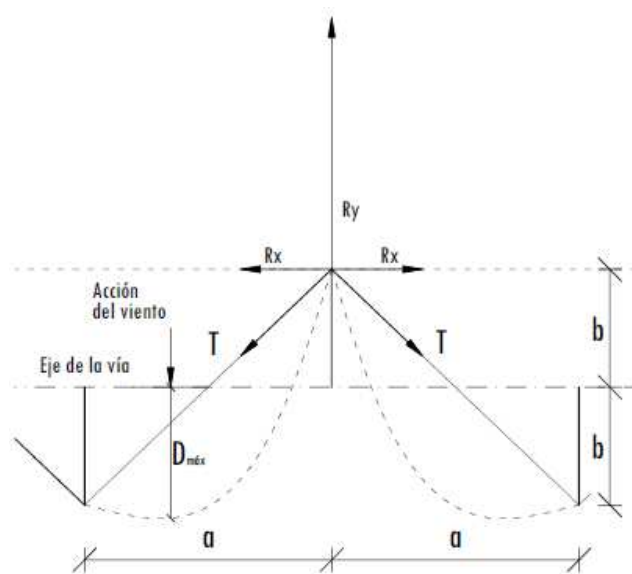


Figura 7.1 – Esquema de descentramiento en recta.

Para ser válida, nunca deberá superar la mitad de la longitud del frotador del pantógrafo.

$$D_{max} = \left(\frac{a^2 \cdot V}{16 \cdot T} + \frac{T}{V} \right) - \left(-\frac{a^2 \cdot V}{16 \cdot T} + \frac{T}{V} \right) \cdot \sqrt{\frac{a^2}{a^2 + 4b^2}} \quad [7.3]$$

Donde:

- a es la longitud del vano.
- V es la presión del hilo por efecto del viento (ver Tabla 7.2).



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



- T es la suma de las tensiones del hilo de contacto y del sustentador:
- b es el descentramiento del hilo de contacto en postes:

Tal y como recoge el art. 16 del “Reglamento Técnico de Líneas de Aéreas de Alta Tensión”, a los cables que constituyen la catenaria aplicaremos los valores de presión según lo marcado por la Tabla 7.2.

Tipo de cable	Presiones (kg/m)
Hilo de contacto de 150 mm ² (D 14,5 mm)	0,87
Hilo de contacto de 120 mm ² (D 12,92 mm)	0,77
Sustentador de 70 mm ² (D 10,5 mm)	0,63
Sustentador de 95 mm ² (D)	0,71
Cable de péndolas de 16 mm ² (D 5 mm)	0,3

Tabla 7.2- Presiones ejercidas por el viento sobre los conductores.

Sustituyendo valores en la expresión 7.3, obtenemos los valores que quedan recogidos en la Tabla 7.3.

Cate.	a [m]		b [m]		Tensiones (T): [kgf]		Presiones (V): [kg/m]			D _{máx} [m]
	Vano	Desc. hc	Hilo de contacto	Sustentador	V _{hc}	V _{sust}	V _{pen}	Desc.		
C-250	65	0,25	1.530,0	1.530,0	0,77	0,63	0,3	0,3467		
C-350	65	0,25	3.214,3	1.530,0	0,87	0,71	0,3	0,2839		

Tabla 7.3- Descentramiento en recta.

Con ambas catenarias se puede circular, pero, como se observa, la catenaria C – 250 da un valor de descentramiento máximo (D_{máx}) en mitad de vano más desfavorable que el de la C – 350.

7.3.2- Descentramiento en curva.

El descentramiento en curva consiste en determinar la flecha máxima horizontal que puede alcanzar el hilo de contacto debido a la acción del viento soplando éste hacia el interior de la propia curva (+ d_v), a la distancia perpendicular en plano que hay entre el hilo de contacto, en la mitad del vano, y el eje de la vía (+ d), y al propio descentramiento (- b) en los apoyos hacia el exterior del hilo de contacto.

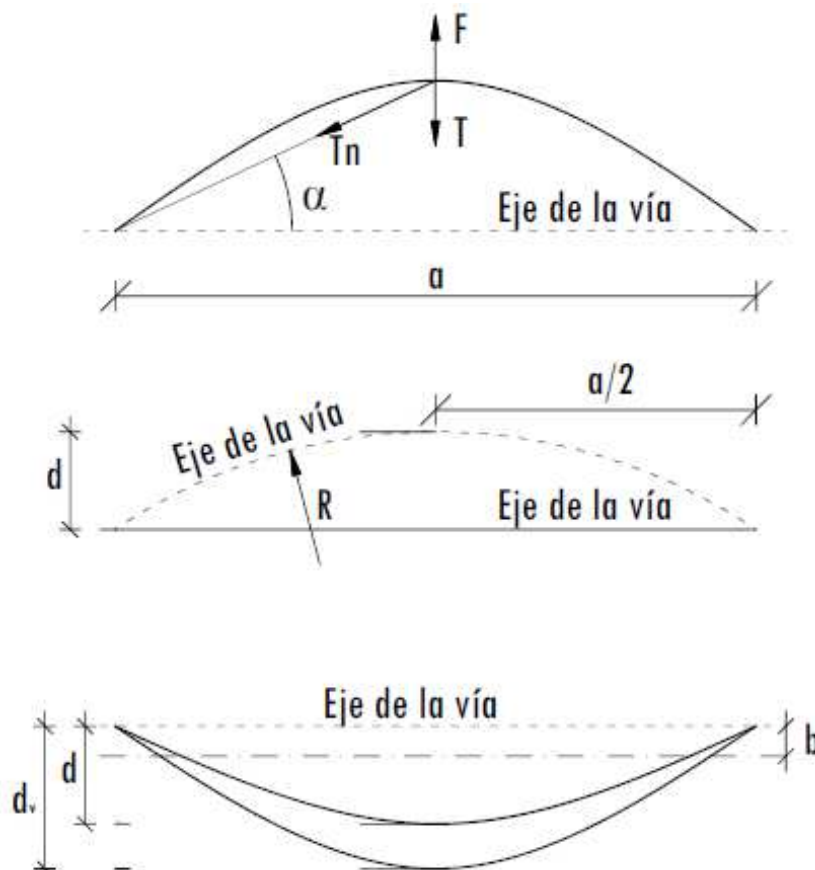


Figura 7.2 – Esquema de descentramiento en curva.

Distancias d y d_v

La determinación del descentramiento es relevante por cuanto influye en la determinación de la longitud de los vanos y en el radio de las curvas; es decir, condiciona el trazado de la línea. Para ello, la suma de los parámetros



anteriormente descritos no ha de superar en ningún momento la semilongitud del frotador del pantógrafo, esto supone que los valores del radio de curva y de la longitud de vano estarán sujetos al cumplimiento de la siguiente desigualdad:

$$d + d_v - b \leq d_{max} \quad [7.4]$$

Donde

$$d = \left(\frac{a^2}{8 \cdot r} \right) \quad [7.5] \quad d_v = \left(\frac{a^2 \cdot V}{8 \cdot T} \right) \quad [7.6]$$

Siendo:

- a la longitud del vano [m].
- r el radio de la curva [m].
- b el descentramiento en postes [m].
- V el esfuerzo por unidad de longitud debido al viento en el hilo de contacto, el sustentador y la péndola [kg/m].
- T la tensión del hilo de contacto y del sustentador [kgf].

Tomamos de nuevo los valores de presión que ejerce el viento sobre los conductores (Tabla 7.2). Fijando, además, un valor de descentramiento (d_{max}) que nos asegure un contacto permanente entre el frotador y el hilo de contacto, siempre muy por debajo de la semilongitud de frotador (pantógrafo), podemos establecer el valor mínimo de radio para la longitud máxima de vano y variaciones de éstos con la reducción del valor de los radios.

$$a \leq \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot (d_{max} + b) \cdot T}{(V \cdot R) + T}} \quad [7.7]$$



Mínimo radio de curva para máxima longitud de vano

Tomando una $d_{m\acute{a}x}$ de referencia de 0,2 m, y, a fin de mantener la longitud del vano, los radios mínimos obtenidos a través de la expresión 7.7, quedan reunidos en la Tabla 7.2.

	Descen. Máx. [m]	Descen. poste [m]	Tensiones (T): [kgf]		Presiones (V) : [kg/m]			Long. vano [m]	Radio [m]
	$d_{m\acute{a}x}$	b	T_{hc}	T_{sust}	V_{sust}	V_{hc}	V_{pen}	a	R
C-250	0,2	0,3	1.530,0	1.530,0	0,77	0,63	0,30	65	2.556,30
C-350	0,2	0,3	3.214,30	1.530,0	0,87	0,71	0,30	65	1.816,59

Tabla 7.4- Descentramiento en recta.

Para un vano de 65 m, establecido por el gestor de la red, ADIF, las curvas a implementar tendrán radios mínimos de 2.750 m, en el caso de la catenaria C – 250, y de 2.000 m, en el caso de la C – 350.

Partiendo, de nuevo, de la expresión 7.7, pero tomando como valores iniciales el del radio y el vano, la distancia d es:

d	Long. vano (a) [m]	Radio (r) [m]	Distancia (d) [m]
C-250	65	2.750	0,192
C-350	65	2.000	0,264

Tabla 7.5- Descentramiento en mitad de vano.

Según la correspondiente expresión, los valores de desviación por viento (d_v) para ambas catenarias figuran en la siguiente Tabla 7.6.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



d_v	Presiones (V): [kg/m]			Tensiones (T): [kgf]		Vano [m] (a)	Distancia [m] (d_v)
	Sustentador (V_{sust})	Hilo de contacto (V_{hc})	Péndola ($V_{pén}$)	Hilo de Contacto (T_{hc})	Sustentador ($T_{sust.}$)		
C-250	0,77	0,63	0,3	1.530	1.530	65	0,293
C-350	0,87	0,71	0,3	1.530	3.214,30	65	0,209

Tabla 7.6- Descentramiento por viento.

Las sumas de todas las distancias, separadas por casos, y con y sin descentramiento b, quedan recogidas en la Tabla 7.7.

$d_{máx}$	Distancia (d)	Distancia (d_v)	Desc. en poste (b)	Descent. máx [m] ($d_{máx}$)	Descent. máx (+b) [m] ($d_{máx}$)
C-250	0,192	0,293	-0,3	0,485	0,185
C-350	0,264	0,209	-0,3	0,473	0,173

Tabla 7.7- Descentramiento máximo.

Partiendo de los radios indicados en la primera de las tablas y sin considerar de entrada el descentramiento en los postes (b), la $d_{máx}$ sobrepasa la semilongitud del frotador, Esto, desde un punto de vista del funcionamiento y la seguridad, es inaceptable puesto que el pantógrafo perdería contacto durante la marcha. Por eso mismo, en los apoyos se compensa esta flecha con el valor negativo del descentramiento (b) hacia el interior de la curva que permita obtener un valor final dentro de los márgenes de seguridad y funcionamiento correctos, es decir, un descentramiento por debajo de la ($d_{máx}$) establecida de origen.

Para curvas de radios mayores, los descentramientos se irán reduciendo hasta acercarse a los valores de la recta.



Longitud de vano en función del radio de curva

Manteniendo el descentramiento, la implementación de curvas de menores radios supone tender la catenaria con longitudes de vano por debajo de los 65 m, que irán disminuyendo en la medida en que lo hagan los radios.

	Descen. Máx. [m]	Descen. en poste [m]	Tensiones (T): [kgf]		Presiones (V) : [kg/m]			Radio [m]	Long. vano [m]
	$d_{m\acute{a}x}$	b	T_{hc}	T_{sust}	V_{sust}	V_{hc}	V_{pen}	R	a
C-250	0,2	0,3	1.530,00	1.530,00	0,77	0,63	0,30	2.500	64,70
C-350	0,2	0,3	3.214,30	1.530,00	0,87	0,71	0,30	1.750	64,29

Tabla 7.8- Longitud de vano para radio por debajo del radio límite.

La variación de la longitud de los vanos con la variación de los radios es:

C - 250		C - 350	
Radio [m]	Longitud de vano [m]	Radio [m]	Longitud de vano [m]
2.500	64,70 (64)	1.750	64,29 (64)
1.500	57,21 (57)	1.500	61,34 (61)
1.000	50,71 (50)	1.000	53,52 (53)
750	46,02 (46)	750	48,09 (48)
500	39,56 (39)	500	40,86 (40)

Tabla 7.9- Radios y sus correspondientes longitudes de vano.

De los resultados se desprenden las siguientes conclusiones:

- a) La catenaria C – 350, por sus características mecánicas, a igual longitud de vano, permite un radio mínimo de curva menor que el de la catenaria C - 250
- b) Para el tipo de pantógrafo seleccionado, la catenaria C – 350 (hilo de contacto, sustentador y péndolas) cumple con los parámetros impuestos de longitud de vano y descentramiento, mientras que la C – 250 no.



7.4- Hilo de contacto: velocidad crítica, tensiones y elasticidad

Velocidad crítica

Sabiendo, pues, que la velocidad máxima de desplazamiento de los trenes (350 km/h) es un 70% de la velocidad crítica “c” o la velocidad de desplazamiento de la onda); para determinar las características mecánicas del hilo de contacto – tensiones y valores de tense – se toma de partida esa velocidad “c” incrementada en 40 km/h.

Tensiones

Partimos de la expresión:

$$c = 3,6 \sqrt{\frac{\sigma_{cw}}{\rho_{cw}}} = 3,6 \sqrt{\frac{H_{cw}}{m'_{cw}}} \quad [7.8]$$

En la que:

- c es la velocidad crítica, que según la Norma 732/2002/CE ha de ser elevada en 40 km/h para determinar la fuerza de tense:

$$350 \text{ (km/h)} \cdot 1,43 = 500 \text{ (km/h)} ; (+ 40) \text{ (km/h)} ; 540 \text{ (km/h)} = 150 \text{ (m/s)}$$

- ρ_{cw} es la densidad del hilo de contacto: $8,9 \cdot 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
- m'_{cw} es la masa por unidad de longitud del hilo: $1,335 \text{ (kg/m)}$

Y que con una sección de cable de 150 mm^2 , los valores de tensión y fuerza de tensado son:

$$H_{cw} = 70,1 \text{ kN} \quad ; \quad \sigma_{cw} = 3,141 \text{ kN}$$

Valores que indican que el cable presenta una gran resistencia mecánica.



Factor Doppler

Otra manera de confirmar la idoneidad del hilo de contacto es a través de la expresión del factor Doppler:

$$\alpha = (c - v) / (c + v) \quad [7.9]$$

Sabiendo que el factor Doppler ha de estar comprendido entre 0,15 y 0,20, las velocidades que resultan de sustituir los valores $c = 540$ km/h, $\alpha=0,15$ y $\alpha =0,20$ son:

$$V_{(\alpha = 0,15)} = 399,13 \approx 400 \text{ (km/h)} \quad ; \quad V_{(\alpha = 0,20)} = 360 \text{ (km/h)}$$

Valores que, además de cumplir con que la velocidad de la onda ha de ser superior a la velocidad de explotación, obligan, de nuevo, el empleo de un hilo de contacto de elevada resistencia.

Elasticidad

Para confirmar que el pendolado en “Y” que se va instalar aporta las características de elasticidad que se requieren para la velocidad máxima de explotación de la línea, tomamos la expresión [7.10]:

$$e \approx l / [k_e \cdot (H_{cw} + H_{sus})] \quad [7.10]$$

Siendo:

- l la longitud de vano: 65 m.
- k_e un coeficiente que depende del tipo de pendolado: 4, si es convencional, 3,5 si es en “Y”.
- H_{cw} el valor del tense del hilo de contacto: 31,50 kN.
- H_{sus} el valor del tense del sustentador: 15,75 kN

El valor resultante es:



$$e_Y (k_e \approx 3,5) = 0,393 \text{ N/mm} \quad ; \quad e (k_e \approx 4) = 0,345 \text{ N/mm}$$

Y en ambos caso se cumple que el valor no supera los 0,5 mm/N, tal y como se recomienda.

Efectuando los mismos cálculos tomando los valores correspondientes a los de la catenaria C – 250, tendríamos:

$$e_Y (k_e \approx 3,5) = 0,590 \text{ N/mm} \quad ; \quad e (k_e \approx 4) = 0,516 \text{ N/mm}$$

Valores que la hacen inapropiada para muy altas velocidades.

7.5- Calculo de las tensiones y flechas en la catenaria.

El tendido de una catenaria supone que los cables que la constituyen - esto es, hilo de contacto, sustentador y cable de guarda – presenten determinados valores de tensión que dependen de parámetros tales como las propias características del material de los cables, la longitud del vano, la altura de la zona, y por la variabilidad de las condiciones meteorológicas.

Las variaciones de los valores se obtienen a través de la ecuación de cambio de condiciones (expresión 7.11), que relaciona los valores inicial y final de la tensión de cable con las condiciones meteorológicas finales e iniciales respectivamente.

$$\frac{V^2}{24} \left(\frac{P_2^2}{T_2^2} + \frac{P_1^2}{T_1^2} \right) = \delta \cdot (\theta_2 - \theta_1) + V \cdot (T_2 - T_1) \cdot \frac{1}{E \cdot S} \quad [7.11]$$

La cual se puede traducir en la expresión 7.12:

$$T_2^2 \cdot [T_2 - A] = B \quad [7.12]$$



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



Donde en 7.11, cada término es:

- θ_1 : Temperatura inicial de tendido [$^{\circ}$ C].
- θ_2 : Temperatura final de tendido [$^{\circ}$ C].
- T_1 : Tensión del vano en las condiciones iniciales [kg].
- T_2 : Tensión del vano en las condiciones finales [kg].
- δ : Coeficiente de dilatación del cable [m / (m· $^{\circ}$ C)].
- E : Módulo de elasticidad del cable [kg/mm 2].
- V : Longitud del vano [m].
- P_1 : Carga lineal del cable inicial [kg/m/mm 2].
- P_2 : Carga lineal del cable final [Kg/m/mm 2].
- S : Sección de cable [mm 2]

Los términos de la ecuación 7.12 son:

- $A = A_1 + A_2 + A_3$; siendo, a su vez, cada sumando:

$$A_1 = \frac{V^2 \cdot E}{24} \cdot \left(\frac{P_1^2}{T_1^2} \right) \cdot E \cdot S \quad A_2 = \delta \cdot (\theta_1 - \theta_2) \cdot E \cdot S \quad A_3 = -T_1$$

Quedando la expresión 7.13:

$$A = \frac{V^2 \cdot E}{24} \cdot \left(\frac{P_1^2}{T_1^2} \right) \cdot E \cdot S + \delta \cdot (\theta_1 - \theta_2) \cdot E \cdot S - T_1 \quad [7.13]$$



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



- **B** cuya expresión es 7.14:

$$B = \left(\frac{V^2}{24} \right) \cdot F \cdot S \cdot (P_2^2) \quad [7.14]$$

- **T₂** es la tensión en el cable en las nuevas condiciones meteorológicas

Los valores de partida que conforman la catenaria son los que figuran en la Tabla 7.10 y que corresponden al cable de guarda o tierra (LA – 110), al cable de *feeder* (LA – 280) y al de *feeder* de acompañamiento (LA – 380):

CABLE	LA-110	LA-280	LA-380
Sección [mm ²]	116,2	281,1	380
Diámetro [mm]	14	21,8	25,38
Módulo E [kgf/mm ²]	8.200	7.700	7.000
Coef. De dilatación [m/m ·°C]	1,78E-05	1,89E-05	1,93E-05
Peso [kg/m]	0,43	0,98	1,28
Carga de rotura [kgf]	4.400	8.820	11.135
Resistencia óhmica [Ohm/m]	0,307	0,122	0,087
Intensidad admisible (A)	290	575	714

Tabla 7.10- Características de los cables no sometidos a tensión permanente.

Para obtener los valores de tensión y flecha en los cables se ha optado por las dos formas de tendido más habituales en líneas eléctricas: que son el EDS y el límite elástico.

EDS

Tender al EDS (Every Day Stress), esto es, a 15 °C y sin sobrecargas en vano de 64 m, la tensión en el cable no ha de superar el 15 % de la carga de rotura. Bajo este criterio, y partiendo de la base de que las condiciones meteorológicas no variaran habrá menos vibraciones y los esfuerzos, por lo general, serán menores.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Cable de tierra	Hipótesis 0	Hipótesis 1	Hipótesis 2	EDS
LA-110	-20 °C, zona C, con viento de 120 km/h	-15 °C, zona B, con viento de 120 km/h	0 °C, zona A, con viento de 120 km/h, sin hielo	15 °C, sin viento y hielo
Peso (P)	0,43	0,43	0,43	0,43
Carga del viento (V)	0,84	0,84	0,84	0
Carga de hielo (H)	1,35	0,67	0	0
Carga result. (kgf/m)	1,97	1,39	0,94	0,43
Temperatura (°C)	-20	-15	0	15
Tensión (kgf)	1.100,00	890,95	623,70	309,97
Flecha (m)	0,85	0,65	0,36	0,71
C.S.	4	4,94	7,05	14,19
EDS (vano de 64 m)	7%			

Tabla 7.11- Tabla de tendido al EDS del cable de guarda.

Feeder	Hipótesis 0	Hipótesis 1	Hipótesis 2	EDS
LA-280	-20 C, zona C, con viento de 120 km/h	-15 C, zona B, con viento de 120 km/h	0 C, zona A, con viento de 120 km/h, sin hielo	15 °C, sin viento y hielo
Peso [kgf/m]	0,98	0,98	0,98	0,98
Carga de viento [kgf/m]	1,31	1,31	1,31	0
Carga de hielo [kgf/m]	1,68	0,67	0	0
Carga resultante [kgf/m]	2,96	2,11	1,63	0,43
Temperatura [°C]	-20	-15	0	15
Tensión [kgf]	2.205,00	1.826,89	1302,27	447,64
Flecha [m]	0,64	0,48	0,40	1,12
C.S.	4	4,83	6,77	19,70
EDS	5%			

Tabla 6.12- Tabla de tendido al EDS del cable de guarda.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Feeder de acompañamiento	Hipótesis 0	Hipótesis 1	Hipótesis 2	EDS
LA-380	-20 °C, zona C, con viento de 120 km/h	-15 °C, zona B, con viento de 120 km/h	0 °C, en zona A, con viento de 120 km/h, sin hielo	15 °C, sin viento y hielo
Peso [kgf/m]	1,28	1,28	1,28	1,28
Carga de viento [kgf/m]	1,52	1,52	1,52	0
Carga de hielo [kgf/m]	1,81	0,91	0	0
Carga resultante [kgf/m]	3,45	2,66	1,99	1,28
Temperatura [°C]	-20	-15	0	15
Tensión [kgf]	2.783,75	2.373,01	1689,96	1013,91
Flecha [m]	0,59	0,49	0,40	0,65
C.S.	4	4,69	6,59	10,98
EDS	9%			

Tabla 7.13- Tabla de tendido al EDS del feeder de acompañamiento.

Límite Elástico

Tender al límite elástico en un vano de 65 m, supone que en las condiciones meteorológicas más desfavorables, aquellas de máxima tensión en el conductor, no se sobrepasará el tercio de la carga de rotura del mismo. Tender de esta forma nos aportará menores flechas, pero mayores esfuerzos sobre apoyos de anclaje y de línea (o cantón, en este caso)

La obtención de los diferentes valores de tensión T_2 , en la zona B, en función de los valores de la temperatura tendiendo al límite elástico queda resumido en las siguientes tablas:



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



CABLE DE GUARDA. LA - 110								
Viento [km/h]	120	120						120
Temperatura [°C]	-15	-5	-5	0	5	10	15	15
A1	266,62	266,62	266,62	266,62	266,62	266,62	266,62	266,62
A2	169,61	169,61	169,61	254,41	339,21	424,01	508,82	508,82
A3	-1100	-1100	-1100	-1100	-1100	-1100	-1100	-1100
B	2,33E+08	3,10E+07	1,49E+08	3,10E+07	3,10E+07	3,10E+07	3,10E+07	1,49E+08
Tensión (T ₂)	1100,00	849,87	966,76	773,92	699,05	630,54	564,91	740,4
Flecha (f) [m]	0,53	0,267	0,235	0,293	0,325	0,360	0,402	0,307
condiciones iniciales en zona B de hielo (0,18 D) y viento (120 km/h)		20	25	30	35	40	45	80
		266,62	266,62	266,62	266,62	266,62	266,62	266,62
Peso cable [kgf/m]	0,43	593,62	678,42	763,22	848,03	932,83	1017,63	1611,25
Carga viento [kgf/m]	0,84	-1100	-1100	-1100	-1100	-1100	-1100	-1100
Carga hielo [kgf/m]	0,67	3,10E+07	3,10E+07	3,10E+07	3,10E+07	3,10E+07	3,10E+07	3,10E+07
Carga resultante [kgf/m]	1,39	504,69	450,76	403,66	363,38	329,75	301,07	193,53
C.S.	4	0,450	0,504	0,563	0,625	0,689	0,754	1,173

Tabla 7.14 - Tabla de tendido al límite elástico del cable de guarda.

FEEDER LA - 280								
Viento [km/h]	120	120						120
Temperatura [°C]	-15	-5	-5	0	5	10	15	15
A1	393,80	393,80	393,80	393,80	393,80	393,80	393,80	393,80
A2	409,08	409,08	409,08	613,63	818,17	1022,71	1227,25	1227,25
A3	-2205	-2205	-2205	-2205	-2205	-2205	-2205	-2205
B	3,76E+08	3,66E+08	1,02E+09	3,66E+08	3,66E+08	3,66E+08	3,66E+08	1,02E+09
Tensión (T ₂)	2.205	1553,71	1738,78	1387,62	1233,53	1094,16	971,6	1242,86
Flecha (f) [m]	0,44	0,333	0,298	0,373	0,420	0,473	0,533	0,416
Cargas Iniciales de viento y hielo		20	25	30	35	40	45	80
Peso cable[kgf/m]	0,98	393,80	393,80	393,80	393,80	393,80	393,80	393,80
Carga viento [kgf/m]	1,31	1431,80	1636,34	1840,88	2045,42	2249,97	2454,51	3886,31
Carga hielo [kgf/m]	0,84	-2205	-2205	-2205	-2205	-2205	-2205	-2205
Carga resultante[kgf/m]	2,24	3,66E+08	3,66E+08	3,66E+08	3,66E+08	3,66E+08	3,66E+08	3,66E+08
C.S.	4	3,66E+08	3,66E+08	3,66E+08	3,66E+08	3,66E+08	3,66E+08	3,66E+08
Tensión (T ₂)		866,63	778,56	705,51	645,1	594,97	553,06	385,63
Flecha (f) [m]		0,597	0,665	0,734	0,802	0,870	0,936	1,342

Tabla 7.15 - Tabla de tendido al límite elástico del feeder de alimentación.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



FEEDER LA-380 (refuerzo)								
Viento [km/h]	120	120					120	
Temperatura [°C]	-15	-5	-5	0	5	10	15	15
A1	429,10	429,10	429,10	429,10	429,10	429,10	429,10	429,10
A2	513,38	513,38	513,38	770,07	1026,76	1283,45	1540,14	1540,14
A3	-2783,75	-2783,75	-2783,75	-2783,75	-2783,75	-2783,75	-2783,75	-2783,75
B	4,47E+08	7,67E+08	1,85E+09	7,67E+08	7,67E+08	7,67E+08	7,67E+08	1,85E+09
Tensión (T ₂)	2783,75	2027,84	2217,96	1816,97	1620,16	1440,78	1281,58	1568,09
Flecha (f) [m]	0,41	0,333	0,305	0,372	0,417	0,469	0,527	0,431
Cargas iniciales de viento y hielo								
Peso cable [kgf/m]	1,28	20	25	30	35	40	45	80
Carga viento [kgf/m]	0,87	429,10	429,10	429,10	429,10	429,10	429,10	429,10
Carga hielo [kgf/m]	0,69	1796,83	2053,52	2310,21	2566,90	2823,59	3080,28	4877,11
Carga resultante [kgf/m]	2,15	-2783,75	-2783,75	-2783,75	-2783,75	-2783,75	-2783,75	-2783,75
C.S.	4	7,67E+08	7,67E+08	7,67E+08	7,67E+08	7,67E+08	7,67E+08	7,67E+08
Tensión (T ₂)		1144,02	1025,57	930,54	849,89	782,87	725,27	502,31
Flecha (f) [m]		0,591	0,659	0,726	0,795	0,863	0,932	1,346

Tabla 7.16 - Tabla de tendido al límite elástico del feeder de refuerzo.



7.6- Tensiones en hilo de contacto y sustentador.

Al contrario que los cables de *feeder* y el cable de guarda, los cables que conforman la catenaria propiamente dicha; esto es, el hilo de contacto y el sustentador, han de estar compensados mecánicamente presentando siempre valores de tensión y de flecha constantes con independencia de las condiciones.

Los valores de tensión de y de flecha normalizados para estos cables son:

Sustentador:

- Tensión: 1.575 kgf
- Carga de rotura: 3.961 kgf
- Coeficiente de seguridad de 2,5, por encima de lo exigido por las norma (UNE-EN-50119, 2002)

Hilo de contacto:

- Tensión: 3.150 kgf
- Carga de rotura: 7.717 kgf
- Coeficiente de seguridad de 2,45, por encima de lo exigido por las norma (UNE-EN-50119, 2002)

También, según la norma anterior, la tensión de trabajo del hilo de contacto no ha de sobrepasar le tensión de rotura del cable en 65% corregido según algunos factores tales como la temperatura, el desgaste, la carga y el esfuerzo; así, tenemos que el esfuerzo máximo resulta de la siguiente expresión:

$$\sigma = 75,7 \cdot 10^3 \text{ (N)} \cdot 0,65 \cdot 1,0 \cdot 0,85 \cdot 0,9 \cdot 0,95 = 3760 \text{ N} = \mathbf{3.650 \text{ kgf}}$$



El resultado anterior es superior a la tensión del hilo de contacto que es de **3.150 kgf**

7.7- Determinación del pendolado

7.7.1- Pendolado simple

El procedimiento de cálculo y dimensionado del pendolado es por medio de programas informáticos; no obstante, para determinados sistemas, como es el del pendolado simple, sí es posible establecer la longitud de las péndolas por medio de momentos.

Las longitudes de las péndolas se determinan considerando que el sustentador se comporta como un cuerpo en equilibrio, con una carga lineal y uniforme, representada por su propio peso, y que las péndolas representan una carga puntual. El hilo de contacto y el propio peso de las péndolas constituyen las cargas puntuales que se encuentran repartidas a lo largo del sustentador.

Los datos de partida para el cálculo de la catenaria son los de la Tabla 7.17.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



Elemento	C 350
Longitud del vano [m]	64
Distancias: [poste – péndola] / [péndola – péndola]	[6] / [5,2]
Sección del sustentador [mm ²]	281,5
Peso del sustentador [kg/m·l]	0,89
Sección del hilo de contacto [mm ²]	150
Peso lineal del hilo de contacto [1,335kg/m·l]	1,335
Número de hilos de contacto [-]	1
Tensión mecánica del sustentador [kg]	1.607
Tensión mecánica de cada HC [kg]	3.214
Flecha inicial del HC [mm]	36
Tipo de péndola [mm ²]	Bronce flexible 16 mm ²
Peso conjunto péndola	0,1 kg/(m·l) (catenaria) 0,12 kg (grifa sustentador) 0,35 kg (grifa hilos de contacto)
Descentramiento [m]	0,3
Decremento peso péndolas con flecha [kg]	0,57852
Nuevo valor peso hilos de contacto [kg]	0,75648

Tabla 7.17- Características del hilo de contacto de la catenaria C – 350.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Mediante los datos de la tabla anterior determinamos los momentos de las péndolas respecto a los postes y con ellos la longitud de las péndolas.

Distancias [m] / Reacciones en [kg]	D [m]	D/2 [m]	Reacci. [kg]	Pesos [kg]	Peso total [kg]	Momentos [kg·m]	
Apoyo A	-	-	28,48	28,48		-	-
A - R1 / R1	6	3	25,51	47,67	76,15	M1 a apoyo	440,89
R1 - R2 / R2	5,2	2,6	4,92			M2 a apoyo	643,98
R2 - R3 / R3	5,2	2,6	4,92			M3 a apoyo	1052,37954
R3 - R4 / R4	5,2	2,6	4,92			M4 a apoyo	1360,43274
R4 - R5 / R5	5,2	2,6	4,92			M5 a apoyo	1644,42034
R5 - R6 / R6	5,2	2,6	2,46			M6 a apoyo	1917,14395
R6 - R5' / R6'	5,2	2,6	2,46			47,67	76,15
R5' - R4' / R5'	5,2	2,6	4,92	M5' a apoyo	1644,42034		
R4' - R3' / R4'	5,2	2,6	4,92	M4' a apoyo	1360,43274		
R3' - R2' / R3'	5,2	2,6	4,92	M3' a apoyo	1052,37954		
R2' - R1' / R2'	5,2	2,6	4,92	M2' a apoyo	643,98		
R1' - A' / R1'	6	3	25,51	M1' a apoyo	440,89		
Apoyo A'	-	-	28,48	28,48		-	-
Tensión máxima en sustentador [kgf]					1.607		
Peso del semivano en apoyo [kgf]					76,15		
Tensión horizontal en sustentador [kgf]					1605,19		

Tabla 7.18- Momentos de péndolas.

Tabla en la que quedan determinadas las longitudes de las péndolas en base a los momentos determinados antes, así como la flecha del sustentador en el punto de localización de las mismas.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



Péndola	Momentos [kg·m]	Flecha sustentador [m]	Long. péndola [m]	Long. final [m]
Apoyo A	0,00	0	1,4	1,4
P1	440,89	0,27	1,13	1,13
P2	643,98	0,40	1,00	1,00
P3	1052,38	0,66	0,74	0,74
P4	1360,43	0,85	0,55	0,55
P5	1644,42	1,02	0,38	0,38
P6	1917,14	1,19	0,21	0,21
P6´	1917,14	1,19	0,21	0,21
P5´	1644,42	1,02	0,38	0,38
P4´	1360,43	0,85	0,55	0,55
P3´	1052,38	0,66	0,74	0,74
P2´	643,98	0,40	1,00	1,00
P1´	440,89	0,27	1,13	1,13
Apoyo A´	0,00	0,00	1,40	1,40

Tabla 7.19- Momentos de péndolas.

7.7.2- Pendolado en “Y”

Para evitar que el pantógrafo varíe significativamente de altura entre el centro del vano y los apoyos, se han desarrollado diversos sistemas. Dos de esos sistemas consisten, por un lado, en bajar el hilo de contacto en el centro del vano, tanto como fuera a elevarlo teóricamente el pantógrafo, lo que se conoce como catenaria con flecha; por otro, es el uso de una catenaria en “Y”.

Es la flecha del hilo de contacto entre péndolas la que determina la distancia entre péndolas en una catenaria en “Y”. Y todo ello es función del valor de tense mecánico del hilo de contacto. La determinación de la distancia entre péndolas responde a los siguientes motivos:



- Por la reducción de la flecha. La práctica ha demostrado que para ello la distancia entre péndolas no debe ser superior a 12 m. $l_{\text{máx}} = 12$
- Por la rotura del hilo de contacto. De producirse, la longitud del extremo roto no debe superar la distancia ente el plano de rodadura y la altura del hilo de contacto; por tanto, al ser $l_{\text{hc}} = 5,3$, $l_{\text{mín}} = 5$.

La flecha de este tipo de pendolado lo obtenemos mediante la expresión 7.15:

$$f_{\text{máx}} = (G \cdot L^2) / (8 \cdot T) \text{ [m]} = 13,10 \text{ (N/m)} \cdot 64^2 \text{ (m}^2\text{)} / 8 \cdot 31,50 \text{ (kN)} = 0,211 \text{ m} \quad [7.15]$$

7.8- Calculo de esfuerzos radial y transversal en postes.

El descentramiento del hilo de contacto respecto del eje de la vía no tiene más fin que el de homogeneizar el desgaste de la superficie de frotamiento del pantógrafo durante la circulación o marcha de la máquina o tren. Este descentramiento supone la aparición de tensiones en los brazos de atirantado de los postes, y que es preciso tener presentes para el cálculo de los momentos de vuelco de los postes y dimensionar posteriormente los postes y los macizos de éstos.

Es preciso tener en cuenta en los cálculos la acción del viento y del hielo, y que las expresiones y, por ende los valores de la reacciones, variarán según sea el tramo recto o curvo, y en el caso de estos últimos, el radio también influirá en los esfuerzos de atirantado.

Para los tramos rectos, y considerando de entrada longitudes distintas de vanos anterior y posterior así como de descentramiento, las expresiones de las tensiones R_x y R_y son las siguientes:

$$R_y = n \cdot T \cdot \left(\frac{D + D_0}{Lv_0} + \frac{D + D_1}{Lv_1} \right) \quad [7.16]$$



$$R_x = n \cdot T \cdot \left(\sqrt{1 - \left(\frac{D + D_1}{L_v}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{D + D_0}{L_{v0}}\right)^2} \right) \quad [7.17]$$

Siendo:

- R_y es el esfuerzo radial resultante que soporta el brazo de atirantado [m].
- n el número de hilos de contacto.
- T es la tensión mecánica de un hilo de contacto [m].
- D es el descentramiento [m].
- L_v es la longitud del vano [m].

Para **tramos curvos**, las expresiones de las reacciones son:

- La componente longitudinal R_y es:

$$R_y = n \cdot T \cdot \left(\frac{L_{v0}^2 + (R + D)^2 - (R + D_0)^2}{2 \cdot L_{v0} \cdot (R + D)} \right) + \left(\frac{L_v^2 + (R + D)^2 - (R + D_1)^2}{2 \cdot L_v \cdot (R + D)} \right) \quad [7.18]$$

- La componente transversal R_x es:

$$R_x = - n T \left[\sqrt{1 - \left(\frac{L_{v0}^2 + (R + D)^2 - (R + D_0)^2}{2 \cdot L_{v0} \cdot (R + D)}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{L_v^2 + (R + D)^2 - (R + D_1)^2}{2 \cdot L_v \cdot (R + D)}\right)^2} \right] \quad [7.19]$$



7.9- Cálculo del momento de vuelco de la catenaria.

7.9.1- Introducción

El tendido de una catenaria supone la aparición de esfuerzos sobre los postes, producto del peso de los cables, de las estructuras de apoyo (ménsulas, aisladores, etc...) y la acción de factores meteorológicos que se traducen en la presencia, a veces, de hielo y viento. Es preciso, pues, dimensionar el tipo de macizo que ha de servir como apoyo de los postes con el fin único de evitar que el momento total, producto de la acción conjunta de todas las tensiones sobre el poste, origine un vuelco. Por tanto, el proceso de dimensionado del macizo pasa por determinar los valores de las diferentes tensiones, tanto verticales como horizontales.

EL desglose de las diferentes fuerzas se hace entre **esfuerzos radiales** (viento y atirantado), y **esfuerzos horizontales** (pesos y hielo).

Los **esfuerzos verticales** son el resultado del peso de los cables que constituyen la catenaria y otra serie de elementos forman parte del poste a los que hay que incluir el peso que supone la formación de hielo en los supuestos en que se dé..

- P_{cat} Peso de los semivanos de la catenaria (y elementos asociados)
- P_{fed} Peso de los semivanos del feeder.
- P_{grd} Peso del cable de guarda
- P_{sus} Peso del conjunto de suspensión.
- P_b Peso de la ménsula con atirantado hacia
- P Peso del conjunto de atirantado



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Los **esfuerzos horizontales (o radiales)** que hay que tener presentes son producto de la acción del viento así como los resultados del atirantado del hilo de contacto en las ménsulas.

- R_{hc} Esfuerzo por tensión del hilo de contacto (R_y).
- R_{sust} Esfuerzo por tensión mecánica del sustentador.
- R_{grd} Esfuerzo por tensión del cable de tierra.
- R_{fed} Esfuerzo por tensión de los feeders de acompañamiento (*)
- R_{hc} Esfuerzo por tensión de segundo hilo de contacto.
- R_{sust} Esfuerzo por tensión mecánica del segundo sustentador.
- R_v Esfuerzo debido al viento

Esfuerzos verticales

La mayor parte del peso que soporta cada poste es el peso del conjunto de los cables en una longitud equivalente a la de una vano.

	Hilo de contacto	Cable sustentador	Feeder La-280	Feeder La-380	Cable de retorno
Peso	1,335 kg/m	0,890 kg/m	0,976 kg/m	1,275 kg/m	0,432 kg/m
Diámetro	14,5 mm	12,95 mm	21,8 mm	25,38 mm	14 mm

Tabla 7.20- *Radio y sus correspondientes longitudes de vano.*

Para el cálculo del peso del hielo, es preciso determinar la sobrecarga adicional que supone el manguito que se forma alrededor del cable partiendo de una expresión que será, según la zona por la que transcurra el tramo de línea, de la forma $180 \cdot \sqrt{D}$ (zona B) o $360 \cdot \sqrt{D}$ (zona C), donde D es el diámetro del cable y cuyo valor resultante es en (kg/m).



El peso del conjunto de la ménsula comprende el peso de las barras que conforman la estructura de la ménsula, el conjunto de atirantado, los aisladores, elementos de fijación y sujeción tales como bridas, tornillos, placas, etc.

Esfuerzos horizontales (o radiales)

Para determinar los esfuerzos que aparecen sobre los cables por la acción del viento, del mismo modo que lo hace sobre los postes, partimos de lo recogido en el art. 16 del Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión, para el cálculo de las presiones que sobre los conductores y apoyos ejercen el viento se tendrá en consideración la acción de un viento de 120 km/h (33,33 m/s) y se supondrá que el viento es horizontal, actuando de forma perpendicularmente a las superficies sobre las que incide y en el sentido más desfavorable de trabajo para el poste, en función de la posición del poste con respecto a la curva.

También han de tenerse en cuenta por separado los tramos rectos de los curvos del conjunto total del tramo, ya que la expresión del valor de la reacción en las curvas depende del radio de la misma.

Las reacciones radiales por el atirantado de los conductores en tramos rectos responden a las expresiones de 7.20:

$$R_x = 0 \quad ; \quad R_y = 2 \cdot n \cdot T \cdot \left(\frac{2 \cdot D}{L_v} \right) \quad [7.20]$$

Con una longitud de vano y un descentramiento constantes, las reacciones de atirantado en curvas son según las expresiones de 7.21.:

$$R_x = \frac{n \cdot T \cdot L_v}{R + D} \quad ; \quad R_y = 2 \cdot n \cdot T \cdot \text{sen } \alpha \quad [7.21]$$

Siendo:

$$\text{sen } \alpha = \frac{L_v^2}{2 \cdot L_v \cdot (R + D)} \quad [7.22]$$



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Donde:

- n es el número de conductores.
- T es la tensión mecánica del conductor [kg].
- D es el descentramiento de la catenaria [D].
- L_v es la longitud del vano [m].

La acción del viento (ver Tabla 7.21) genera momentos en la base de los postes por esfuerzos en el conjunto de cables de la catenaria.

PRESIONES DE VIENTO SOBRE ELEMENTOS DE CATENARIA		
Conductores y cables de tierra	D inferior a 16 mm	60 kg/m ²
	D superior a 16 mm	50 kg/m ²
Superficies planas		100 kg/m ²
Superficies cilíndricas de los apoyos: postes de madera, hormigón, tubos		70 kg/m ²
Estructuras de celosía de cuatro caras. (*)	Realizadas con perfiles metálicos	Cara de barlovento: 160 (1-n) kg/m ²
		Cara de sotavento: 80 (1-n) kg/m ²
	Realizadas con perfiles cilíndricos	Cara de barlovento: 90 (1-n) kg/m ²
		Cara de sotavento: 45 (1-n) kg/m ²
(*) Relación entre el área definida por la silueta de la cara opaca y el área real de la misma.		

Tabla 7.21- Valores de presión por unidad de superficie

En nuestro caso la superficie real del poste es de 3,055 m², mientras que la de la silueta es de 1,723 m², dándonos una relación de 0,56. Adoptaremos el valor de 0,5 al ser sólo valores válidos aquellos que estén por debajo de éste.

Distinguiremos hasta seis valores de momentos de vuelco según la posición o función del poste que ocupe el poste dentro del cantón:



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



- a) Poste tipo o poste intermedio
- b) Poste de anclaje de sección (x2)
- c) Poste de anclaje de punto fijo (x2)
- d) Poste de punto fijo (x1)
- e) Poste de eje de sección (x4)
- f) Poste de semieje de sección (x2)

Los cálculos quedan desglosados según la dirección de aplicación de los esfuerzos: en horizontal, viento (R_v) y atirantado (R); y en vertical, peso (P). Los elementos sobre los que actúan los esfuerzos son:

Cable	Diámetro (mm)	Sección (mm²)	Denominación
Hilo de Contacto	14,5	150	Hc
Sustentador	12,95	95	Sus
Péndolas	5,1	16	Pen
Hilo de guarda	14	116,2	Grd
Feeder negativo	25,8	381	Fed -
Feeder positivo	21,8	281	Fed +
Poste	-	8903	Pos
Ménsula 1 (tubo)	55	-	Pb1
Ménsula 2 (tubo)	55	-	Pb2

Tabla 7.22- Valores de diámetro y sección de catenaria.

En las siguientes tablas quedan reunidos los momentos que ejercen el viento, el hielo, el atirantado, los conductores, y el propio peso de éstos, en la base de los postes, y la suma de todos ellos.

Los momentos más desfavorables son los que apuntan a la caída del poste sobre la vía por la acción del viento, y de aquéllos, el más desfavorable es el que corresponde a los postes con descentramiento hacia el interior (ménsula B2).



Los valores de los momentos de vuelco de los postes se incrementan, por otra parte, a medida que disminuye la longitud del vano en relación directa con la disminución del radio de la curva. Teniendo en cuenta este hecho y que los vanos de la LAV Madrid-Barcelona son de 64 m (no de 65), los momentos de vuelco obtenidos serán considerando esta longitud y un radio mínimo de curva de 1.750 m.

Las distancias (planos 3 y 4) se toman en origen a la base del poste.

7.9.2- Momento de vuelco de poste intermedio (PI)

Se consideran postes intermedios, o postes tipo, los postes comprendidos entre los postes de mitad de punto fijo (mitad de cantón) y anclajes de punto fijo, y los seccionamientos.

El momento será el resultado de la acción de las diversas fuerzas que actúan sobre los elementos del poste por la distancia de esos elementos (d_y o d_x según la dirección del esfuerzo) a la base del poste.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Esfuerzos verticales en vano de 64 m (Pesos de los elementos)						Ménsula B2 (kgf·m)	
Des.: 0,3 m	P. cable (kg/m)	P. hielo (kg/m)	Vano (m)	P. cable (kg)	P. hielo (kg)	Distancia d _y (m)	Momento (kgf·m)
Pcat:	1,34	0,69	64	85,504	43,87	3,15	407,52
Psust:	0,82	0,65	64,05	52,40	41,49	3,15	295,74
Ppen:	0,14	0,41	10,75	1,53	4,37	3,15	18,57
Pgrd:	0,43	0,67	64	27,648	43,10	-0,29	-20,52
Pfed (-):	1,28	0,91	64	81,6	58,04	-0,7	-97,75
Pfed (+):	0,98	0,84	64	62,464	53,79	0,7	81,38
Pb2:	2,50	1,33	9,89	24,73	13,20	2,277	86,39
Total							771,33

Tabla 7.23- Tabla de cargas: pesos de cable y hielo (PI)

Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por viento).						Momentos (kgf·m)	
(**) Poste de estructura de celosía de cuatro caras realizadas con perfiles metálicos (**) P=100 kg/m ²						Ménsula B2	
Des.: 0,3 m	D. cable (mm)	P. viento (kgf/m ²)	Vano (m)	-	Esf. rad. (kgf)	Distancia d _x (m)	Momento (kgf·m)
Rvhc:	16,0	60	64	-	61,44	6,18	379,70
Rvsus:	12,6	60	64,05	-	48,42	7,58	367,05
Rpen:	2,3	60	10,75	-	1,45	6,18	8,97
Rvgrd:	14,0	60	64	-	53,76	6,25	336,00
Rvfed (-):	25,8	50	64	-	82,56	8,23	679,47
Rvfed (+):	21,8	50	64	-	69,76	8,23	574,12
Rvpos:(**)	-	100	-	1,17	117,00	4,25	497,25
Total							2842,56

Tabla 7.24- Tabla de cargas: viento (PI)



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por descentramiento)						Momentos (kgf·m)	
(*) Sin viento, hielo, ni atirantado, el cable de guarda y los feeder no adquieren tensión.						Ménsula B2	
RECTA	T. Nom. (kg·f)	Desc. (m)	Vano (m)	-	Esf. Rad. (kgf)	Distancia dy (m)	Momento (kgf·m)
Rhc:	3.214	0,3	64	-	60,26	6,18	372,42
Rsus:	1.607	0,3	64	-	30,13	7,58	228,39
Rpen: (*)	0	0,3	10,75	-	0,00		0
Rgrd: (*)	0	0,3	64	-	0,00		0
Rfed1: (*)	0	0,3	64	-	0,00		0
Pfed2: (*)	0	0,3	64	-	0,00		0
Total							600,82

Tabla 7.25- Tabla de atirantados en recta (PI)

Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por descentramiento)						Momentos (kgf·m)	
(*) Sin viento, hielo, atirantado, el cable de guarda y los feeder no adquieren tensión.						Ménsula B1	
CURVA: (R=1.750)	T. Nom. (kg·f)	Desc. (m)	Vano (m)	sen α	Esf. Rad. (kgf)	Distancia dy (m)	Momento (kgf·m)
Rhc:	3.214	0,3	64	0,018	235,04	6,18	1452,55
Rsus:	1.607	0,3	64	0,018	117,52	7,58	890,80
Rpen: (*)	0	0,3	10,75		0,00		0
Rgrd: (*)	0	0,3	64		0,00		0
Rfed1: (*)	0	0,3	64		0,00		0
Pfed2: (*)	0	0,3	64		0,00		0
Total							2343,36

Tabla 7.26- Tabla de atirantados en curva (PI)



7.9.3- Momento de vuelco de poste de anclaje de sección (AS)

A los momentos que ya aparecen en cualquier poste, independientemente de la función o posición que ocupe en el cantón (caso anterior), hay que considerar los momentos debidos a los esfuerzos de amarre del hilo de contacto y del sustentador en el último de los postes del cantón.

Para esta posición hay que tener presente que los anclajes del sustentador y del hilo de contacto quedan amarrados al eje del poste justo en el extremo del cantón (que también lo es del seccionamiento), y que la tensión a considerar tanto para el sustentador como para el hilo de contacto será la propia de los cables en su componente transversal. La componente longitudinal se compensa con la tensión del cable de anclado.

El poste de anclaje sostiene la línea aérea de contacto de un lado, por eso las acciones del peso, del hielo y del viento serán sólo la mitad del valor de la situación anterior (poste intermedio). El momento de vuelco correspondiente a las cargas producto de la acción de estos elementos será un cincuenta por ciento el valor del poste tipo intermedio.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



Esfuerzos verticales en vano de 64 m (Pesos de los elementos)						Ménsula B2 (kgf·m)	
Des.: 0,3 m	P. cable (kg/m)	P. hielo (kg/m)	Vano (m)	P. cable (kg)	P. hielo (kg)	Distancia d _y (m)	Momento (kgf·m)
Pcat:	1,34	0,69	64	85,504	43,87	3,15	407,52
Psust:	0,82	0,65	64,05	52,40	41,49	3,15	295,74
Ppen:	0,14	0,41	10,75	1,53	4,37	3,15	18,57
Pcat: (AS)	1,34	0,69	64	85,50	43,87	0	0,00
Psust:(AS)	0,82	0,65	64,05	52,40	41,49	0	0,00
Ppen:(AS)	0,14	0,41	10,75	1,53	4,37	0	0,00
Pgrd:	0,43	0,67	64	27,648	43,10	-0,29	-20,52
Pfed (-):	1,28	0,91	64	81,6	58,04	-0,7	-97,75
Pfed (+):	0,98	0,84	64	62,464	53,79	0,7	81,38
Pb2:	2,50	1,33	9,89	24,73	13,20	2,277	86,39
Total							771,33

Tabla 7.27- Tabla de cargas: pesos de cable y hielo (AS)

Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por viento).						Momentos (kgf·m)	
(**) Poste de estructura de celosía de cuatro caras realizadas con perfiles metálicos (**) P=100 (1-n) kg/m ²						Ménsula B2	
Des.: 0,3 m	D. cable (mm)	P. viento (kgf/m ²)	Long. (m)	-	Esf. rad. (kgf)	Distancia d _x (m)	Momento (kgf·m)
Rvhc:	16,0	60	64	-	61,44	6,18	379,70
Rvsus:	12,6	60	64,05	-	48,42	7,58	367,05
Rpen:	2,3	60	10,75	-	1,45	6,18	8,97
Rvhc: (AS)	16,0	60	64	-	61,44	6,18	189,85
Rvsus: (AS)	12,6	60	64,05	-	48,42	7,58	183,53
Rpen: (AS)	2,3	60	10,75	-	1,45	6,18	4,48
Rvgrd:	14,0	60	64	-	53,76	6,25	336,00
Rvfed (-):	25,8	50	64	-	82,56	8,23	679,47
Rvfed (+):	21,8	50	64	-	69,76	8,23	574,12
Rvpos:(**)	-	100	-	1,17	117,00	4,25	497,25
Total							3220,43

Tabla 7.28- Tabla de cargas: viento (AS)



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por descentramiento)						Momentos (kgf·m)	
(*) Sin viento, hielo, ni atirantado, el cable de guarda y los feeder no adquieren tensión.						Ménsula B2	
RECTA	T. Nom. (kg·f)	Desc.(m) Dist.(m)	Vano (m)	-	Esf. Rad. (kgf)	Distancia d _y (m)	Momento (kgf·m)
Rhc:	3.214	0,3	64	-	60,26	6,18	372,42
Rsus:	1.607	0,3	64	-	30,13	7,58	228,39
Rhc: (AS)	3.214	3,3	64	-	165,65	6,18	1023,71
Rsus: (AS)	1.607	3,3	64	-	82,82	7,58	627,81
Rpen: (*)	0	0,3	10,75	-	0,00		0
Rgrd: (*)	0	0,3	64,00	-	0,00		0
Rfed1: (*)	0	0,3	64,00	-	0,00		0
Pfed2: (*)	0	0,3	64,00	-	0,00		0
Total							2252,33

Tabla 7.29- Tabla de atirantados: recta (AS)

Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por descentramiento)						Momentos (kgf·m)	
(*) Sin viento, hielo, atirantado, el cable de guarda y los feeder no adquieren tensión.						Ménsula B2	
CURVA: (R=1.750)	T. Nom. (kg·f)	Desc.(m) Dist.(m)	Vano (m)	sen α	Esf. Rad. (kgf)	Distancia d _y (m)	Momento
Rhc:	3.214	0,3	64	0,018	235,04	6,18	1452,55
Rsus:	1.607	0,3	64	0,018	117,52	7,58	890,80
Rhc: (AS)	3.214	3,3	64	-	165,65	6,18	1023,71
Rsus: (AS)	1.607	3,3	64	-	82,82	7,58	627,81
Rpen: (*)	0	0,3	10,75	-	0,00		0
Rgrd: (*)	0	0,3	0,00	-	0,00		0
Rfed1: (*)	0	0,3	0,00	-	0,00		0
Pfed2: (*)	0	0,3	0,00	-	0,00		0
Total							3994,87

Tabla 7.30- Tabla de atirantados: curva (AS)



7.9.4- Momento de vuelco de poste de anclaje de punto fijo (APF)

Los postes de anclaje de punto fijo se sitúan a ambos lados del poste de punto fijo, y como su propio nombre indica son los postes de amarre de los extremos (de cola) del sustentador.

En cada uno de estos postes aparecen las mismas cargas que en el poste intermedio, pero las relativas a los amarres (colas) presentan diferente expresión; así, las acciones del viento y del atirantado suponen sólo la mitad que en el punto fijo, mientras que la acción del peso es nula.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Esfuerzos verticales en vano de 64 m (Pesos de los elementos)						Ménsula B2 (kgf·m)	
Des.: 0,3 m	P. cable (kg/m)	P. hielo (kg/m)	Vano (m)	P. cable (kg)	P. hielo (kg)	Distancia d _y (m)	Momento (kgf·m)
Pcat:	1,34	0,69	64	85,504	43,87	3,15	407,52
Psust:	0,82	0,65	64,05	52,40	41,49	3,15	295,74
Psust:(APF)	0,82	0,65	64,05	52,40	41,49	0	0,00
Ppen:	0,14	0,41	10,75	1,53	4,37	3,15	18,57
Pgrd:	0,43	0,67	64	27,648	43,10	-0,29	-20,52
Pfed (-):	1,28	0,91	64	81,6	58,04	-0,7	-97,75
Pfed (+):	0,98	0,84	64	62,464	53,79	0,7	81,38
Pb2:	2,50	1,33	9,89	24,73	13,20	2,28	86,39
Total							771,33

Tabla 7.31- Tabla de cargas: pesos de cable y hielo (APF)

Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por viento).						Momentos (kgf·m)	
(**) Poste de estructura de celosía de cuatro caras realizadas con perfiles metálicos (**) P=100 (1-n) kg/m2						Ménsula B2	
Des.: 0,3 m	D. cable (mm)	P. viento (kgf/m ²)	Vano (m)	-	Esf. rad. (kgf)	Distancia d _x (m)	Momento (kgf·m)
Rvhc:	16,0	60	64	-	61,44	6,18	379,70
Rvsus:	12,6	60	64,05	-	48,42	7,58	367,05
Rvsus: (APF)	2,3	60	10,75	-	1,45	6,18	8,97
Rpen:	12,6	60	64,05	-	48,42	7,58	183,53
Rvgrd:	14,0	60	64	-	53,76	6,25	336,00
Rvfed (-):	25,8	50	64	-	82,56	8,23	679,47
Rvfed (+):	21,8	50	64	-	69,76	8,23	574,12
Rvpos:(**)	-	100	-	1,17	117,00	4,25	497,25
Total							3026,09

Tabla 7.32- Tabla de cargas: viento (APF)



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por descentramiento)						Momentos (kgf·m)	
(*) Sin viento, hielo, ni atirantado, el cable de guarda y los feeder no adquieren tensión.						Ménsula B2	
RECTA	T. Nom. (kg·f)	Desc.(m) Dist.(m)	Vano (m)	-	Esf. Rad. (kgf)	Distancia d _y (m)	Momento (kgf·m)
Rhc:	3.214	0,3	64	-	60,26	6,18	372,42
Rsus:	1.607	0,3	64	-	30,13	7,58	228,39
Rsus:(APF)	1.607	3,15	64	-	79,06	7,58	599,29
Rpen: (*)	0	0,3	10,75	-	0,00		0
Rgrd: (*)	0	0,3	64	-	0,00		0
Rfed1: (*)	0	0,3	64	-	0,00		0
Pfed2: (*)	0	0,3	64	-	0,00		0
Total							1200,11

Tabla 7.33- Tabla de atirantado: recta (APF)

Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por descentramiento)						Momentos (kgf·m)	
(*) Sin viento, hielo, atirantado, el cable de guarda y los feeder no adquieren tensión.						Ménsula B2	
CURVA: (R=1.750)	T. Nom. (kg·f)	Desc.(m) Dist.(m)	Vano (m)	sen α	Esf. Rad. (kgf)	Distancia d _y (m)	Momento (kgf·m)
Rhc:	3.214	0,3	64	0,018	235,04	6,18	1452,55
Rsus:	1.607	0,3	64	0,018	117,52	7,58	890,80
Rsus: (AS)	1.607	3,15	64	-	79,06	7,58	599,29
Rpen: (*)	0	0,3	10,75	-	0,00		0
Rgrd: (*)	0	0,3	0,00	-	0,00		0
Rfed1: (*)	0	0,3	0,00	-	0,00		0
Pfed2: (*)	0	0,3	0,00	-	0,00		0
Total							2942,65

Tabla 7.34- Tabla de atirantados: curva (APF)



7.9.5- Momento de vuelco de poste de eje de sección (ES)

Los dos postes de eje de sección encierran el vano intermedio del seccionamiento. Este tipo de poste es en esencia un poste intermedio al que se le ha acoplado una ménsula adicional para sostener un segundo hilo de contacto a la misma altura que el primero y un cable sustentador con una altura de sistema de 2,5 m.

En este poste, además, los dos conjuntos de pares de cables hilo de contacto – sustentador presentan diferentes valores de descentramiento.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Esfuerzos verticales en vano de 64 m (Pesos de los elementos) (S) de salida - (E) de entrada						Ménsula B2	
Des: 0,3 m	P. cable (kg/m)	P. hielo (kg/m)	Long. (m)	P. cable (kg)	P. hielo (kg)	Distancia dx (m)	Momento (kgf·m)
Phc(x2):	1,34	0,69	64	85,50	43,87	3,15	815,04
Psust:(E)	0,82	0,65	64,05	52,40	41,49	3,15	295,74
Psust:(S)	0,82	0,65	64,05	52,40	41,49	3,15	295,74
Ppen(x2):	0,14	0,41	10,75	1,53	4,37	3,15	37,15
Pgrd:	0,43	0,67	64	27,65	43,10	-0,29	-20,52
Pfed (-):	1,28	0,91	64	81,60	58,04	-0,7	-97,75
Pfed (+):	0,98	0,84	64	62,46	53,79	0,7	81,38
Pb2:	2,50	1,33	9,89	49,46	26,41	2,277	172,77
Total							1579,55

Tabla 7.35- Tabla de cargas: pesos de cable y hielo (ES)

Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por viento).						Momentos (kgf·m)	
(**) Poste de estructura de celosía de cuatro caras realizadas con perfiles metálicos (**) P=100 kg/m ²						Ménsula B2	
Des.: 0,3 m	D. cable (mm)	P. viento (kgf/m ²)	Long. (m)	-	Esf. rad. (kgf)	Distancia dx (m)	Momento (kgf·m)
Rvhc(x2):	16,0	60	64	-	61,44	6,18	759,40
Rvsus(E):	12,6	60	64,053	-	48,42	10,08	488,11
Rvsus(S):	12,6	60	64,053	-	48,42	7,58	367,05
Rpen(x2):	2,3	60	10,75	-	1,45	6,18	8,97
Rvgrd:	14,0	60	64	-	53,76	6,25	336,00
Rvfed (-):	25,8	50	64	-	82,56	8,23	679,47
Rvfed (+):	21,8	50	64	-	69,76	8,23	574,12
Rvpos:(**)	-	100	-	1,17	117,00	4,25	497,25
Total							3710,38

Tabla 7.36- Tabla de cargas: viento (ES)



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por descentramiento)						Momentos (kgf·m)	
(*) Sin viento, hielo, ni atirantado, el cable de guarda y los feeder no adquieren tensión. (E) Entrante (S) Saliente						Ménsula B1	
RECTA	T. Nom. (kg·f)	Desc.(m) Dist.(m)	Vano (m)	-	Esf. Rad. (kgf)	Distancia d _y (m)	Momento (kgf·m)
Rhc(S):	3.214	0,3	64	-	60,26	6,18	372,42
Rhc(E):	3.214	0,15	64	-	30,13	-6,18	-186,21
Rsus(S):	1.607	0,3	64	-	30,13	10,08	303,72
Rsus(E):	1.607	0,15	64	-	15,07	-7,58	-114,20
Rpen: (*)	0	0,3	10,75	-	0,00		0
Rgrd: (*)	0	0,3	64	-	0,00		0
Rfed1: (*)	0	0,3	64	-	0,00		0
Pfed2: (*)	0	0,3	64	-	0,00		0
Total							375,74

Tabla 7.37- Tabla de cargas: pesos de cable y hielo (ES)

Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por descentramiento)						Momentos (kgf·m)	
(**) Sin viento, hielo, atirantado, el cable de guarda y los feeder no adquieren tensión. (*) Sustentador a 2,5 m						Ménsula B2	
CURVA: (R=1.750)	T. Nom. (kg·f)	Desc.(m) Dist.(m)	Vano (m)	sen α	Esf. Rad. (kgf)	Distancia d _y (m)	Momento (kgf·m)
Rhc(S)(*)	3.214	0,3	64	0,018	235,04	6,18	1452,55
Rhc(E):	3.214	0,15	64	0,018	235,06	-6,18	-1452,68
Rsus(S)(*)	1.607	0,3	64	0,018	117,52	10,08	1184,61
Rsus(E):	1.607	0,15	64	0,018	117,53	-7,58	-890,88
Rpen:(**)	0	0,3	10,75		0,00		0
Rgrd: (**)	0	0,3	64		0,00		0
Rfed1:	0	0,3	64		0,00		0
Pfed2:	0	0,3	64		0,00		0
Total							293,60

Tabla 7.38- Tabla de cargas: pesos de cable y hielo (ES)



7.9.6- Momento de vuelco de poste de semieje de sección (SS)

La situación de los conductores de este tipo de postes es similar a la del poste de eje de sección: se le acoplado una doble ménsula que sostiene una catenaria con dos hilos de contacto a la misma altura, y dos sustentadores, uno a una altura de 1,4 m y el otro a 2,5 m de altura del hilo de contacto.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Esfuerzos verticales en vano de 64 m (Pesos de los elementos) . (*) sustentador a 2,5 m del hilo de contacto						Ménsula B2	
Des.: 0,3 m	P. cable (kg/m)	P. hielo (kg/m)	Long. (m)	P. cable (kg)	P. hielo (kg)	Distancia dx (m)	Momento (kgf·m)
Pcat:	1,34	0,69	64	85,504	43,87	3,15	407,52
Psust:	0,82	0,65	64,05	52,395	41,49	3,15	295,74
Ppen:	0,14	0,41	10,75	1,527	4,37	3,15	18,57
Pcat: (AS)	1,34	0,69	64	85,50	43,87	3,15	203,76
Psust: (AS)	0,82	0,65	64,05	52,40	41,49	3,15	147,87
Ppen: (AS)	0,14	0,41	10,75	1,53	4,37	3,15	18,57
Pgrd:	0,43	0,67	64	27,648	43,10	0,29	20,52
Pfed (-):	1,28	0,91	64	81,6	58,04	0,7	97,75
Pfed (+):	0,98	0,84	64	62,464	53,79	-0,7	-81,38
Pb2:	2,50	1,33	9,89	49,46	26,41	2,277	172,77
Total							1301,69

Tabla 7.39- Tabla de cargas: pesos de cable y hielo (SS)

(**) P=100 kg/m2 sobre el plano exterior de la vía del poste y paralelo al eje (*) sustentador a 2,5 m del hilo de contacto (AS) = anclaje de seccionamiento						Ménsula B2	
Des.: 0,3 m	Diá. cable (mm)	Presión viento (kgf/m ²)	Long. (m)	Sup. Poste (m ²)	Esf. radial (kgf)	Distancia dy (m)	Momento (kgf·m)
Rvhc:	16,0	60	64	-	61,44	6,18	379,70
Rvsus:	12,6	60	64,05	-	48,42	7,58	367,05
Rpen:	2,3	60	10,75	-	1,45	6,18	4,48
Rvhc: (*)	12,6	60	64,05	-	48,42	10,08	244,06
Rvsus: (AS)	16,0	60	64	-	61,44	6,18	189,85
Rpen: (AS)	2,3	60	10,75	-	1,45	6,18	4,48
Rvgrd:	14,0	60	64	-	53,76	6,25	336,00
Rvfed (-):	25,8	50	64	-	82,56	8,23	679,47
Rvfed (+):	21,8	50	64	-	69,76	8,23	574,12
Rvpos:(**)	-	100	-	1,17	117,00	4,25	497,25
Total							3276,47

Tabla 7.40- Tabla de cargas: viento (SS)



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por descentramiento)						Momentos	
(**) Sin viento, hielo, ni compensación, cable de guarda y feeder no adquieren tensión						Ménsula B2	
(*) sustentador a 2,5 m del hilo de contacto							
RECTA	Tensión nominal (kg·f)	Vano (m) Cable - Eje poste (m)	Vano (m)	-	Esf. radial (kgf)	Distancia dy (m)	Momento (kgf·m)
Rhc:	3.214	0,3	64	-	60,26	6,18	372,42
Rsus:	1.607	0,3	64	-	30,13	7,58	228,39
Rsus: (AS)(*)	1.607	3,3	64	-	331,44	10,08	1670,48
Rhc: (AS)(*)	3.214	3,3	64	-	165,65	6,18	511,85
Rpen:	0	0,3	10,75	-	0,00		0
Rgrd:(**)	0	0,3	64	-	0,00		0
Rfed1:(**)	0	0,3	64	-	0,00		0
Pfed2:(**)	0	0,3	64	-	0,00		0
Total							2783,15

Tabla 7.41- Tabla de atirantados: recta (SS)

Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por descentramiento)						Momentos	
(**) Sin viento, hielo, ni compensación, cable de guarda y feeder no adquieren tensión						Ménsula B2	
(*) sustentador a 2,5 m del hilo de contacto							
CURVA Radio: 1.750 m	Tensión Nominal (kg·f)	Des. (m) Cable - Eje poste (m)	Vano (m)	sen a	Esf. radial (kgf)	Distancia dy (m)	Momento (kgf·m)
Rhc:	3.214	0,3	64	0,018	235,04	6,18	1452,55
Rsus:	1.607	0,3	64	0,018	117,52	7,58	890,80
Rhc:(AS)(*)	1.607	3,3	64	0,018	117,32	10,08	1182,58
Rsus:(AS)	3.214	3,3	64	-	165,65	6,18	1023,71
Rpen:	0	0,3	10,75	-	0,00		0
Rgrd: (**)	0	0,3	0	-	0,00		0
Rfed1:(**)	0	0,3	0	-	0,00		0
Pfed2: (**)	0	0,3	0	-	0,00		0
Total							4549,64

Tabla 7.42- Tabla de atirantados: curva (SS)



7.9.7- Momento de vuelco de poste de punto fijo (PF)

Para determinar este momento, hay que considerar los mismos esfuerzos que de los postes intermedios más la acción de los elementos sobre la cola de los anclajes (colas del sustentador)

Las colas de anclaje no son más que los extremos que presenta el sustentador en mitad del cantón (en el poste de punto fijo), siendo éstos anclados a los postes anterior y posterior. Se considera para estos extremos de cable la acción del viento, de los pesos y del atirantado, por dos veces, en la longitud de todo un vano.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Esfuerzos verticales en vano de 64 m (Pesos de los elementos)						Ménsula B2 (kgf·m)	
Des.: 0,3 m	P. cable (kg/m)	P. hielo (kg/m)	Vano (m)	P. cable (kg)	P. hielo (kg)	Distancia d _y (m)	Momento (kgf·m)
Pcat:	1,34	0,69	64	85,504	43,87	3,15	407,52
Psust:	0,82	0,65	64,05	52,40	41,49	3,15	295,74
Psust:(PF)	0,14	0,41	10,75	1,53	4,37	3,15	18,57
Ppen:	0,82	0,65	11,06	9,05	7,16	3,15	51,07
Pgrd:	0,43	0,67	64	27,648	43,10	-0,29	-20,52
Pfed (-):	1,28	0,91	64	81,6	58,04	-0,7	-97,75
Pfed (+):	0,98	0,84	64	62,464	53,79	0,7	81,38
Pb2:	2,50	1,33	9,89	24,73	13,20	2,277	86,39
Total							822,40

Tabla 7.43- Tabla de cargas: pesos de cable y hielo (PF)

Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por viento).						Momentos (kgf·m)	
(**) Poste de estructura de celosía de cuatro caras realizadas con perfiles metálicos (**) P=100 kg/m ²						Ménsula B2	
Des.: 0,3 m	D. cable (mm)	P. viento (kgf/m ²)	Vano (m)	-	Esf. rad. (kgf)	Distancia d _x (m)	Momento (kgf·m)
Rvhc:	16,0	60	64	-	61,44	6,18	379,70
Rvsus:	12,6	60	64,053	-	48,42	7,58	367,05
Rvsus: (PF)	2,3	60	10,750	-	1,45	6,18	8,97
Rpen:	12,6	60	64,053	-	48,42	7,58	367,05
Rvgrd:	14,0	60	64	-	53,76	6,25	336,00
Rvfed (-):	25,8	50	64	-	82,56	8,23	679,47
Rvfed (+):	21,8	50	64	-	69,76	8,23	574,12
Rvpos:(**)	-	100	-	1,17	117,00	4,25	497,25
Total							3209,62

Tabla 7.44- Tabla de cargas: viento (PF)



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por descentramiento)						Momentos (kgf·m)	
(*) Sin viento, hielo, ni atirantado, el cable de guarda y los feeder no adquieren tensión.						Ménsula B2	
RECTA	T. Nom. (kg·f)	Desc.(m) Dist.(m)	Vano (m)	-	Esf. Rad. (kgf)	Distancia d _y (m)	Momento (kgf·m)
Rhc:	3.214	0,3	64	-	60,26	6,18	372,42
Rsus:	1.607	0,3	64	-	30,13	7,58	228,39
Rsus:(APF)	1.607	3,15	64	-	79,06	7,58	1198,59
Rpen: (*)	0	0,3	10,75	-	0		0
Rgrd: (*)	0	0,3	64	-	0		0
Rfed1: (*)	0	0,3	64	-	0		0
Pfed2: (*)	0	0,3	64	-	0		0
Total							1799,41

Tabla 7.45- Tabla de atirantados: recta (PF)

Esfuerzos horizontales en vano de 64 m (Por descentramiento)						Momentos (kgf·m)	
(*) Sin viento, hielo, atirantado, el cable de guarda y los feeder no adquieren tensión.						Ménsula B2	
CURVA: (R=1.750)	T. Nom. (kg·f)	Desc.(m) Dist.(m)	Vano (m)	sen α	Esf. Rad. (kgf)	Distancia d _y (m)	Momento (kgf·m)
Rhc:	3.214	0,3	64	0,018	235,04	6,18	1452,55
Rsus:	1.607	0,3	64	0,018	117,52	7,58	890,80
Rsus: (AS)	1.607	3,15	64	-	79,06	7,58	1198,59
Rpen: (*)	0	0,3	10,75	-	0		0
Rgrd: (*)	0	0,3	0	-	0		0
Rfed1: (*)	0	0,3	0	-	0		0
Pfed2: (*)	0	0,3	0	-	0		0
Total							3541,95

Tabla 7.46- Tabla de atirantados: curva (PF)



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



7.9.8- Cuadro resumen de momentos de los postes

En recta:

Momentos	Poste Intermedio (PI)		Anclaje de Sección (AS)	
RECTA	Pesos	Viento + Atirantado	Pesos	Viento + Atirantado
	771,33	2842,56 600,82	771,33	3220,43 2252,33
	771,33	3443,38	771,33	5472,76
TOTAL (kgf·m)		4214,71		6244,09
Momentos	Anclaje de Punto Fijo (APF)		Punto Fijo (PF)	
RECTA	Pesos	Viento + Atirantado	Pesos	Viento + Atirantado
	771,33	3026,09 1200,11	822,40	3209,62 1799,41
	771,33	4226,20	822,40	5009,02
TOTAL (kgf·m)		4997,53		5831,42
Momentos	Eje de Sección (ES)		Semieje de Sección (SS)	
RECTA	Pesos	Viento + Atirantado	Pesos	Viento + Atirantado
	1579,55	3710,38 375,74	1251,72	3744,88 2294,67
	1579,55	4086,11	1251,72	6039,55
TOTAL (kgf·m)		5665,66		7291,26

Tabla 7.47- Tabla de momentos de vuelco en recta.



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



En curva:

Momentos	Poste Intermedio (PI)		Anclaje de Sección (AS)	
CURVA	Peso	Viento + Atirantado	Pesos	Viento + Atirantado
	771,33	2842,56	771,33	3220,43
		2343,36		3994,87
	771,33	5185,92	771,33	7215,30
TOTAL (kgf·m)		5957,25		7986,63
Momentos	Anclaje de Punto Fijo (APF)		Punto Fijo (PF)	
CURVA	Peso	Viento + Atirantado	Pesos	Viento + Atirantado
	771,33	3026,09	822,40	3209,62
		2942,65		3541,95
	771,33	5968,74	822,40	6751,56
TOTAL (kgf·m)		6740,07		7573,96
Momentos	Eje de Sección (ES)		Semieje de Sección (SS)	
CURVA	Peso	Viento + Atirantado	Pesos	Viento + Atirantado
	1579,55	3710,38	1251,72	3744,88
		293,60		4549,64
	1579,55	4003,98	1251,72	8294,52
TOTAL (kgf·m)		5583,52		9546,24

Tabla 7.48- Tabla de momentos de vuelco en curva.

Resumen:

Momentos (kgf·m)	Pesos	Anclaje de Sección	Anclaje de Punto fijo	Punto Fijo	Eje de Sección	Semieje de Sección
Recta	4214,71	6244,09	4997,53	5831,42	5665,66	7291,26
Curva	5957,25	7986,63	6740,07	7573,96	5583,52	9546,24

Tabla 7.49- Tabla resumen.



7.10- Cálculo de postes

7.10.1- Cálculo de la altura de los postes

Los postes irán emplazados fuera de las dimensiones del gálibo de la vía, quedando el plano de rodadura de las vías por encima de la base de aquellos (parte superior del cimiento o macizo) a una altura (e) que no supera el metro. La altura mínima queda establecida considerando la altura del hilo de contacto (C_{WH}); la separación vertical entre el sustentador y el hilo de contacto, denominada también altura del sistema (SH); la separación vertical entre el punto de sujeción del tubo superior de la ménsula y el punto de apoyo del feeder si existiese (TPLH); una distancia vertical medida desde la altura máxima del sistema (o del sustentador en postes) hasta el punto superior de amarre de la ménsula al poste (AL); y una altura, a mayores, equivalente a la longitud de los aisladores de feeder de la línea de contacto (AIS)

e (m)	CWH (m)	SH (m)	AL(m)	AIS (m)
0,844	5,300	1,400	0,393	0,357

Tabla 7.50- Alturas de los cables de hilo de contacto y sustentador..

Sabiendo que las longitudes (alturas) de los postes están normalizadas, con escalones de 0,25 o 0,50 m, y que la altura final del poste ha de ser superior a la suma de las distancias de la tabla 5.8 más una distancia, a mayores, equivalente a la longitud de los aisladores de feeder; tenemos que:

$$\text{Alt.} = e + C_{WH} + SH + AL + AIS = 8,294 \Rightarrow \text{Altura} = 8,550 \text{ m}$$

7.10.2- Cálculo de la sección de los postes

Perfil 2UPN

Se calcularán los momentos flectores de diferentes medidas de dos tipos de perfil de poste, verificando que la solución adoptada es válida.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



Tomaremos de partida un perfil en doble U, habitual en tendidos de alta velocidad, cuyo momento flector máximo sea suficiente para soportar las cargas a las que se ve sometido el poste. La expresión de la que partiremos es:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_y} \Rightarrow M_{max} = \sigma_{max} \cdot W_y \quad [7.23]$$

Siendo:

- M_{max} es el momento máximo admisible por el poste [kgf·m]
- σ_{max} es la tensión máxima del material, en este caso acero. [kgf/m²]
- I_y es el momento de Inercia respecto al eje Y del poste [m⁴]

Las características de cualquier perfil UPN son:

- $I_{y'}$ es el momento de inercia respecto al eje y' del perfil.
- $I_{x'}$ es el momento de inercia respecto al eje x' del perfil.
- $w_{y'}$ es el módulo resistente de la sección respecto al eje y' .
- $w_{x'}$ es el módulo resistente de la sección respecto al eje x' .
- Otras características tales como el área de la sección (A), grosor del alma (e), etc.

En este caso, al tener una nueva sección a partir de dos secciones conocidas, el momento de inercia se obtiene por medio del Teorema de Steiner:

$$I_y = I_{y'} + A \cdot (x - x_G)^2 \quad [7.24]$$

Expresión en la que:

- I_y es el nuevo momento de inercia [m⁴].
- $I_{y'}$ es el momento de inercia de una sección en U [m⁴].

- A es el área de la sección del poste en doble U [m²].
- (x – x_G) es la distancia entre el centro de gravedad de cualquiera de las dos perfiles al centro del nuevo perfil, [m].

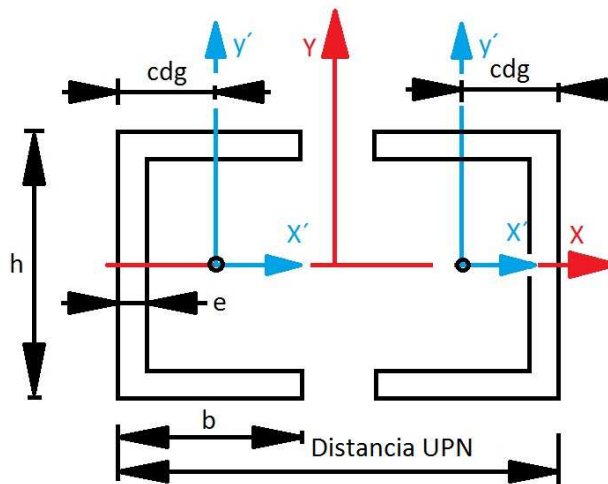


Figura 7.3 – Sección de poste 1

De otra forma y considerando que intervienen dos perfiles U iguales:

$$I_y = 2 \cdot [I_{y'} + A \cdot (x - x_G)^2] = 2 \cdot [I_{y'} + A \cdot ((\text{Distancia UPN}/2) - \text{cdg})^2] \quad [7.25]$$

Determinado el momento I_y , obtenemos el módulo resistente w_y :

$$w_y = (I_y / x) \quad [7.26]$$

Siendo x la distancia entre el centro del nuevo perfil a punto más alejado de la éste; es decir, la mitad de la distancia UPN.

$$w_y = (2 \cdot I_y) / \text{Distancia UPN} \quad [7.27]$$

Yéndonos al eje X, tenemos que el módulo resistente del nuevo perfil es:

$$w_x = 2 \cdot w_{x'} \quad [7.28]$$



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Se ha de verificar que el momento resultante M_{res} de las cargas F que soporta el poste cumple

$$M_{res} < M_{max}$$

Ha de estar por debajo del momento máximo admisible por el poste, de tal modo que:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{w_y} \quad [7.29]$$

Sustituyendo los valores de las dimensiones del perfil U obtenemos los valores de los momentos resultantes transversales a la vía:

Den.	UPN(x)	cdg (x _G)	I _y ' (cm ⁴)	A (cm ²)	I _y (cm ⁴)	σ (kg/m ²)	w _y (cm ³)	M _{res} (kgf·m)
UPN 80	35	1,45	19,4	11	5.706,06	14 · 10 ⁶	0,000326	4.565
UPN 100	35	1,55	29,3	13,5	6.927,47	14 · 10 ⁶	0,000396	5.542
UPN 120	35	1,6	43,2	17	8.681,94	14 · 10 ⁶	0,000496	6.946
UPN 140	35	1,75	62,7	20,4	10.246,35	14 · 10 ⁶	0,000586	8.197
UPN 160	35	1,84	85,3	24	11.941,91	14 · 10 ⁶	0,000682	9.554
UPN 180	35	1,92	114	28	13.821,24	14 · 10 ⁶	0,000790	11.057
UPN 200	35	2,01	148	32,2	15.748,14	14 · 10 ⁶	0,000900	12.599
UPN 220	35	2,14	197	37,4	18.041,53	14 · 10 ⁶	0,001031	14.433
UPN 240	35	2,23	248	42,3	20.222,43	14 · 10 ⁶	0,001156	16.178

Tabla 7.51- Momentos de poste de doble UPN (dirección longitudinal a vía).

Para los momentos de las tablas, los postes que les corresponden, según los valores reflejados en la tabla anterior son los que aparecen a continuación:



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



Momentos (kgf·m)	Poste Tipo	Punto Fijo	Anclaje de Punto fijo	Eje de Sección	Semieje de Sección	Anclaje de Sección
Recta	4214,71	5831,42	4997,53	5665,66	7291,26	6244,09
	UPN 80	UPN 120	UPN 100	UPN 120	UPN 140	UPN 120
Curva	5957,25	7573,96	6740,07	5583,52	9546,24	7986,63
	UPN 120	UPN 140	UPN 140	UPN 120	UPN 180	UPN 140

Tabla 7.52- Momentos de vuelco con su correspondiente perfil de sección.

De los resultados mostrados en las tablas, se observa que los mayores momentos de vuelco aparecen en el poste de semieje de seccionamiento, y como consecuencia de ello, es el poste que requiere mayor sección.

La única carga que supone la aparición de un momento flector en la dirección transversal a la vía es el viento, y cuyos valores son claramente inferiores a los producidos por las cargas ejercidas en dirección transversal (momento longitudinal), tal y como queda reflejado en la Tabla 6.

Perfil	σ (kg/m ²)	w_x (cm ³)	M (kgf·m)
UPN 80	$14 \cdot 10^6$	53	742
UPN 100	$14 \cdot 10^6$	82,4	1153,6
UPN 120	$14 \cdot 10^6$	121,4	1699,6
UPN 140	$14 \cdot 10^6$	172,8	2419,2
UPN 160	$14 \cdot 10^6$	232	3248
UPN 180	$14 \cdot 10^6$	300	4200
UPN 200	$14 \cdot 10^6$	382	5348
UPN 220	$14 \cdot 10^6$	490	6860
UPN 240	$14 \cdot 10^6$	600	8400

Tabla 7.53- Momentos de poste de doble UPN (dirección transversal a la vía).

Por tanto, el cálculo de la sección de los postes sólo vendrá determinado por los esfuerzos transversales. Así, tomando como referencia máxima el perfil UPN 180, la sección de poste es:

$$S = upn \cdot h \Rightarrow S = 0,35 \cdot 0,18 = 0,063 \text{ m}^2$$

Perfil 2UPN y doble pletina.

Dejamos planteada la situación en la que el poste pudiera verse sometido a la acción de esfuerzos adicionales que llevasen al incremento de los momentos. Para el cálculo del momento flector en el segundo tipo de poste (poste 2), – fabricado mediante la unión soldada de dos perfiles UPN con dos pletinas (rectángulos azules) por los extremos de las alas –, tenemos una sección cuyo esquema es el de la Figura 7.4:

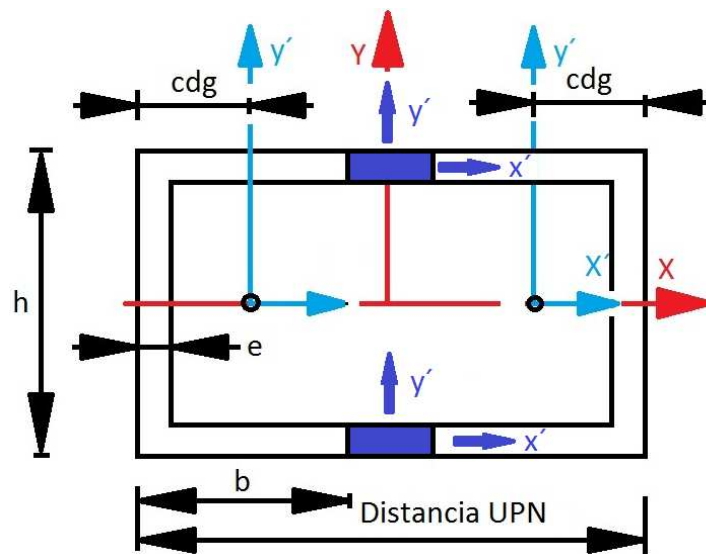


Figura 7.4– Sección del poste 2.

Al cálculo del momento de inercia de los perfiles UPN (Steiner):

$$I_Y = 2 \cdot [I_{Y'} + A \cdot (x - x_G)^2] = 2 \cdot [I_{Y'} + A \cdot ((D_{UPN}/2) - cdg)^2] \quad [7.30]$$

Hay que añadir el cálculo del momento de inercia de las pletinas (o chapas); así:

$$I_{Y \text{ pletina}} = 2 \cdot I_{Y' \text{ pletina}} \quad [7.31]$$

Al ser pletinas de sección rectangular (figura), el momento de inercia es:

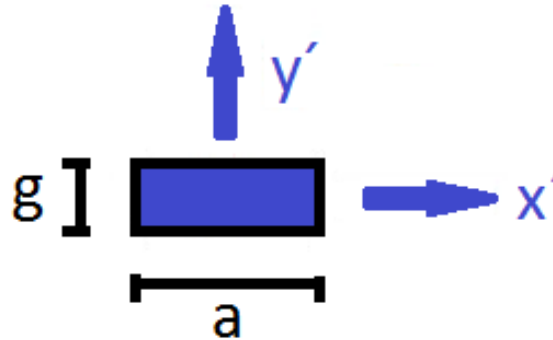


Figura 7.5 – Sección de la pletina

$$I_{y'chapa} = \frac{1}{12} \cdot a^3 \cdot g \quad [7.32]$$

El momento de inercia del conjunto de las dos chapas es:

$$I_y = 2 \cdot I_{y'chapa} = 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot a^3 \cdot g \right] = 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot (D_{UPN} - 2 \cdot b_{UPN})^3 \cdot g \right] \quad [7.33]$$

Donde:

- g es el grosor de la chapa
- a es el ancho de la chapa
- b_{UPN} es la longitud del ala del perfil
- D_{UPN} es la distancia entre perfiles UPN (ancho del poste)

El momento de inercia del conjunto respecto del eje Y queda:

$$I_Y = [I_{YUPN} + I_{chapas}] \quad [7.34]$$

O sea:



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



$$I_Y = 2 \cdot \left[I_{Y'UPN} + A \cdot \left(\frac{\text{Separación UPN}}{2} + cdg \right) \right] + 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot (D_{UPN} - 2 \cdot b_{UPN})^3 \cdot g \right] \quad [7.35]$$

El módulo w_y se obtiene a partir de la expresión [7.4] y su relación con el momento de inercia a través de la expresión [7.5]. La expresión del momento flector es:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot x}{I_y} \Rightarrow M_{max} = \sigma_{max} \cdot \frac{I_y}{x} = \sigma_{max} \cdot w_y \quad [7.36]$$

En lo relativo al módulo de resistencia del eje x, tenemos que en el conjunto del par de chapas:

$$W_X = W_{XUPN} + W_{XChapas} = 2 \cdot W_{X'UPN} + \frac{I_{XChapas}}{Y} \quad [7.37]$$

Siendo:

$$I_{XChapas} = 2 \cdot \left[I_{X'Chapa} + A \cdot (X - X_G)^2 \right]$$

$$I_{X'Chapa} = 2 \cdot \left[I_{X'Chapa} + A_{chapa} \cdot \left(\frac{\text{Separación UPN}}{2} + cdg \right) \right] \quad [7.38]$$

Donde el área de la sección de la pletina, A_{chapa} , es, según figura 7.3:

$$A_{chapa} = e_{chapa} \cdot (D_{UPN} + 2 \cdot b_{UPN}) \quad [7.39]$$

Y el momento de inercia de las chapas con respecto al eje X' es:

$$I_{X'Chapa} = \frac{1}{12} \cdot g^3 \cdot a = \frac{1}{12} \cdot g^3 \cdot (D_{UPN} - 2 \cdot h_{UPN}) \quad [7.40]$$

Por lo tanto:

$$I_{XChapas} = 2 \cdot \left[I_{Y'UPN} + A \cdot (X - X_G)^2 \right] \quad [7.41]$$

$$I_{XChapas} = 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot g^3 \cdot (D_{UPN} - 2 \cdot b_{UPN}) + A_{chapa} \cdot \left(\frac{h_{UPN}}{2} - \frac{g}{2} \right)^2 \right]$$



El módulo respecto al eje x es:

$$W_x = W_{xUPN} + W_{xChapas} \quad [7.42]$$
$$W_x = 2 \cdot W_{x'UPN} + \frac{2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot g^3 \cdot (D_{UPN} - 2 \cdot b_{UPN}) + A_{Chapa} \cdot \left(\frac{h_{UPN}}{2} - \frac{g}{2} \right)^2 \right]}{Y}$$

Siendo $Y = (h_{UPN} / 2)$. La expresión del momento flector respecto del eje X queda de la manera:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot y}{I_x} \Rightarrow M_{max} = \sigma_{max} \cdot \frac{I_x}{y} = \sigma_{max} \cdot W_x \quad [7.43]$$

7.11- Cálculo de los macizos

Los postes de catenaria no se fijan al terreno de forma directa, necesitan un base que les aporte la firmeza o la capacidad de soportar los momentos y esfuerzos a los que se van a ver sometidos producto de las diferentes cargas a las que se va a ver sometida la catenaria.

Estos macizos presentan diversas formas que responden al tipo de línea de ferrocarril a la que van a servir; así, mientras en las líneas convencionales los macizos habituales presentan forma de paralelepípedo, en los líneas de alta velocidad, los macizos son de forma cilíndrica. También, en función de por dónde discorra la vía o el trazado de la misma, los macizos reciben una denominación u otra, de tal modo que si la vía discurre por terreno llano o en trinchera, el macizo es de fundación en desmonte; mientras que si lo hace por terreno llano o en trinchera, se denomina macizo de fundación en terraplén. A los macizos de postes hay que añadir los macizos de anclaje que sirven como compensación en puntos de anclaje y ejes de seccionamiento.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



El método empleado para el cálculo de las cimentaciones fue desarrollado por la U.I.C. en 1957 por medio de l'Office de Recherches et Essais en 1957, denominado **método ORE** [UIC 719 R: 1957]. La capacidad resistente al vuelco viene dada por: a) las dimensiones de la cimentación, b) el sentido del momento de vuelco en relación a la vía, c) las características del terreno, y d) el peso específico del suelo.

Las fórmulas de inicio para el cálculo de las cimentaciones corresponden a las del método IRSIA son las siguientes:

$$M_{rp} = k_1 \cdot e \cdot N + k_2 \cdot A \cdot b \cdot h^3 \text{ [kgf} \cdot \text{m]} \quad [7.44]$$

Expresión en la que los términos k_1 y k_2 se obtienen mediante:

$$k_1 = 0,5136 - \frac{0,175}{0,54 + \frac{b}{e}} \quad [7.45]$$

$$k_2 = 2,8 - \frac{96,5}{68,5 + 3375 \cdot \left(\frac{N}{10 \cdot A \cdot b \cdot e \cdot a}\right)^3} \cdot \left(1 + 0,45 \cdot \frac{e}{b}\right) \quad [7.46]$$

Las expresión [6.22] se relaciona con las del método ORE por medio de la fórmula:

$$M_B = (1 - E_p) \cdot M_{rp} \quad [7.47]$$

Siendo:

$$(1 - E_p) = 3,44 \cdot \left(1 + \left(\frac{h_1}{h}\right)^3\right) - 2,44 \cdot \sqrt{\left(1 + \left(\frac{h_1}{h}\right)^2\right)^3}$$

$$T \cdot H_{limites} = k \cdot 27,45 \cdot M_B^{2/3}$$

Siendo los términos de las expresiones:



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



- $T \cdot H$ límite el momento límite ORE, debido a una fuerza horizontal (T) situada a una altura (H); es decir, máximo momento de vuelco del macizo. [kgf·m]
- M_B el momento límite obtenido según IRSIA. [kgf·m]
- h la altura del macizo. [m]
- h_1 la altura de terreno vegetal que no trabaja o terreno retirado. [m]
- e la dimensión del macizo paralela al esfuerzo de vuelco. [m]
- b la dimensión del macizo perpendicular al esfuerzo de vuelco. [m]
- a el más pequeño de los valores “e” y “b”. [m]. En el caso de macizos cilíndricos $e = b = a = 0.8 \cdot d$, siendo d el diámetro del macizo
- N la carga vertical total (macizo, poste, etc.) [kgf]
- A la densidad del terreno. [kgf/m³]
- $1-E_P$ el coeficiente de corrección para tener en cuenta la altura h_1 de terreno muerto.
- K_1 el coeficiente que tiene en cuenta las cargas verticales.
- K_2 el coeficiente que tiene en cuenta la profundidad de la cimentación.
- K el coeficiente corrector de la configuración del terreno y del sentido del momento, obtenido a partir de los ensayos ORE. En nuestro caso k toma valor 1 para desmonte y 1,3 para terraplén.

El resultado de sustituir los valores de la tabla en las expresiones anteriores, obtenemos los valores de los momentos de vuelco admisibles por los macizos:



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



D [m]	A [m]	a [m]	b [m]	e [m]	h1 [m]
0,75	1.800	0,6	0,6	0,6	0,5
1	1.800	0,8	0,8	0,8	0,5

Tabla 7.54- Tabla de dimensiones de macizos.

h [m]	N/2 [kgf·m]	k1	k2	1-Ep	Mrp [kgf·m]	Mb [kgf·m]	M [kgf·m] (Desmorte)	M [kgf·m] (Terraplén)
2	1.038	0,4	1,75	0,82	15.332	12.595	6.439	4.953
2,1	1.090	0,4	1,82	0,84	18.471	15.442	9.589	7.376
2,2	1.142	0,4	1,89	0,85	22.027	18.699	10.894	8.380
2,3	1.194	0,4	1,96	0,86	26.020	22.386	12.283	9.448
2,4	1.246	0,4	2,02	0,87	30.470	26.525	13.754	10.580
2,5	1.298	0,4	2,08	0,88	35.395	31.136	15.304	11.773
2,6	1.350	0,4	2,13	0,89	40.813	36.236	16.933	13.026
2,7	1.402	0,4	2,18	0,90	46.740	41.844	18.638	14.337
2,8	1.453	0,4	2,23	0,90	53.172	47.959	20.412	15.702
2,9	1.505	0,4	2,27	0,91	60.166	54.632	22.264	17.126
3	1.557	0,4	2,31	0,91	67.718	61.864	24.188	18.606
3,1	1.609	0,4	2,35	0,92	75.843	69.670	26.182	20.140
3,2	1.661	0,4	2,38	0,92	84.558	78.066	28.245	21.727

Tabla 7.55- Tabla de momentos de macizos (D = 0,75 m).

Se ha tomado como referencia el terraplén, por ser la menor; por tanto, las dimensiones de los macizos figuran en las Tablas 7.56 y 7.57:

Momentos (kgf·m)	Poste Tipo	Punto Fijo	Anclaje de Punto fijo	Eje de Sección	Semieje de Sección	Anclaje de Sección
Recta	4214,71	5831,42	4997,53	5665,66	7291,26	6244,09
h (Terr.)	2	2,1	2,1	2,1	2,2	2,1
Curva	5957,25	7573,96	6740,07	5583,52	9546,24	7986,63
h (Des.)	2,1	2,2	2,1	2,1	2,4	2,2

Tabla 7.56- Momentos de vuelco con altura de macizos (D =0,75 m).



“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD”



h [m]	N/2 [kgf·m]	k1	k2	1-Ep	Mrp [kgf·m]	Mb [kgf·m]	M [kgf·m] (Desmote)	M [kgf·m] (Terraplén)
2	1.038	0,4	0,89	0,82	10.604	8.711	5.036	3.874
2,1	1.090	0,4	0,91	0,84	12.501	10.451	7.392	5.686
2,2	1.142	0,4	0,93	0,85	14.662	12.447	8.305	6.388
2,3	1.194	0,4	0,95	0,86	17.114	14.724	9.289	7.146
2,4	1.246	0,4	0,98	0,87	19.888	17.313	10.349	7.961
2,5	1.298	0,4	1,00	0,88	23.016	20.246	11.487	8.836
2,6	1.350	0,4	1,03	0,89	26.532	23.557	12.707	9.775
2,7	1.402	0,4	1,06	0,90	30.471	27.280	14.013	10.779
2,8	1.453	0,4	1,09	0,90	34.854	31.437	15.403	11.848
2,9	1.505	0,4	1,12	0,91	39.752	36.096	16.889	12.992
3	1.557	0,4	1,15	0,91	45.189	41.282	18.471	14.208
3,1	1.609	0,4	1,18	0,92	51.206	47.038	20.150	15.500
3,2	1.661	0,4	1,21	0,92	57.844	53.403	21.929	16.868

Tabla 7.57- Tabla de momentos de macizos ($D = 1 m$).

Momentos (kgf·m)	Poste Tipo	Punto Fijo	Anclaje de Punto fijo	Eje de Sección	Semieje de Sección	Anclaje de Sección
Recta	4214,71	5831,42	4997,53	5665,66	7291,26	6244,09
h (Terr.)	2,1	2,2	2,2	2,2	2,4	2,3
Curva	5957,25	7573,96	6740,07	5583,52	9546,24	7986,63
h (Des.)	2,2	2,4	2,3	2,2	2,7	2,5

Tabla 7.58- Momentos de vuelco con altura de macizos ($D=1 m$).



CAPÍTULO 8.- CONCLUSIONES



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





8.- CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se llega tras la realización de este trabajo son esencialmente que las principales características de la catenaria, en concreto las que tienen que ver con los cables que constituyen la línea aérea de contacto, vienen determinadas por la tipo de tránsito ferroviario - frecuencia, velocidad y perfil de la línea - y que en definitiva, condicionan el tipo de trazado.

Otro aspecto importante del campo de la electrificación ferroviaria es el de la enorme cantidad de normativa que se maneja y el de la innumerable cantidad de aspectos técnicos a tener en cuenta.

En cualquier caso, pese a que instalaciones de este tipo abarcan muchos aspectos técnicos a considerar, y requieren cálculos que sin el uso de programas informáticos sería imposible realizar de una forma rápida, hay a disposición del ingeniero soluciones probadas que facilitan el diseño y cálculo de la electrificación de líneas de alta velocidad.



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





CAPÍTULO 9.- BIBLIOGRAFÍA



**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**





9.- BIBLIOGRAFÍA

9.1- Textos

1. Líneas de contacto para ferrocarriles electrificados. Kiessling – Puschmann – Schneider – Vega. Ed.: Siemens
2. La tracción eléctrica en la alta velocidad ferroviaria (A.V.F). Roberto Faure Benito. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección Señor
3. Tecnología de Catenaria. Jesús Montesinos, Manuel Carmena.
4. PFC: Cálculo mecánico de la catenaria de la línea de alta velocidad Madrid-Galicia; tramo: Olmedo-Zamora. Zacarías Barcenilla Torres (Julio 2.010. Universidad Carlos III).
5. TFG: Proyecto constructivo para el cálculo electromecánico de las instalaciones de línea aérea de contacto para el ferrocarril de alta velocidad. Alfonso Argüeso López (2.016. Universidad de La Coruña)

9.2- Internet

1. www.adif.es
2. www.renfe.es
3. www.fomento.gob.es: Estudio informativo de la conexión de las líneas de alta velocidad Madrid-Sevilla y Córdoba-Málaga en el entorno de Almodóvar del Rio (Córdoba).
4. www.fomento.gob.es: Estudio informativo de la línea ferroviaria Valencia – Alicante (Tren de la Costa).



9.3 - Normas

- EN-50119 (2008) Railway applications – Fixed installations – Electric traction overhead contact lines.
- EN-50122-1 (2008) Railway applications – Fixed installations – Part 1: Protective provisions relating to electrical safety and earthing.
- EN-50125 – 2 (2002) Railway applications – Fixed equipment – Environmental conditions for equipment – Part 2: Fixed installations.
- EN -50163 (2004) Railway applications – Supply voltages of traction systems.
- EN-50206-1 (1998) Railway applications – Rolling Stock – Pantographs: Characteristics and tests – Part 1: Pantographs for main line vehicles.
- EN- 50367 Railway applications – Current collection systems – Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead contact lines.
- CEI-60815 Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions
- HD 637 Instalaciones eléctricas de tensión nominal superior a 1 kV.



CAPÍTULO 10.- PLANOS



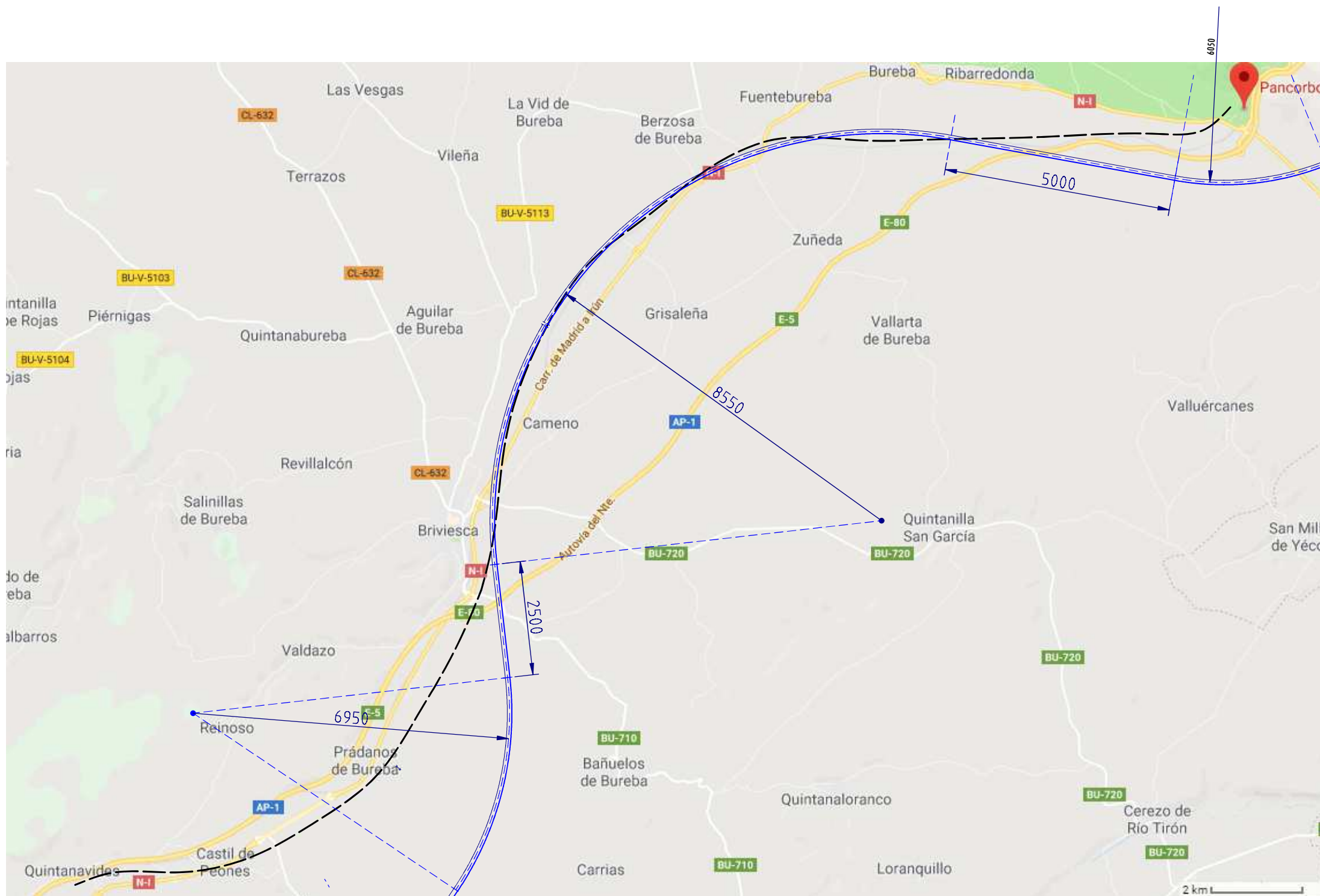
**“ DISEÑO Y CÁLCULO DE LA LÍNEA AÉREA DE
CONTACTO DEL TRAMO DE UNA LÍNEA DE FERROCARRIL
DE ALTA VELOCIDAD”**



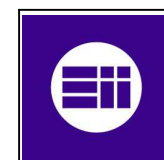


10.- PLANOS

1. Plano de situación.
2. Sección transversal.
3. Fuerzas horizontales sobre los conductores y distancias.
4. Fuerzas verticales sobre los conductores y distancias.
5. Pendolado en “Y” (vano de 64 m).
6. Pendolado simple (vano de 64 m)
7. Pendolado simple calculado (vano de 64 m)
8. Conjunto ménsula 1
9. Conjunto ménsula 2
10. Conjunto poste
11. Seccionamientos de cantón
12. Punto fijo de cantón
13. Cantón de regulación



---	FF.CC. Madrid - País Vasco (ancho 1.685 mm)
—	Catenaria: hilo de contacto y sustentador
- - -	Feeder de retorno y carril
— —	Seccionamiento de lámina de aire
⌋⌋⌋	Subestación de tracción



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Plano de Situación
(Circuito de la línea de contacto)



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

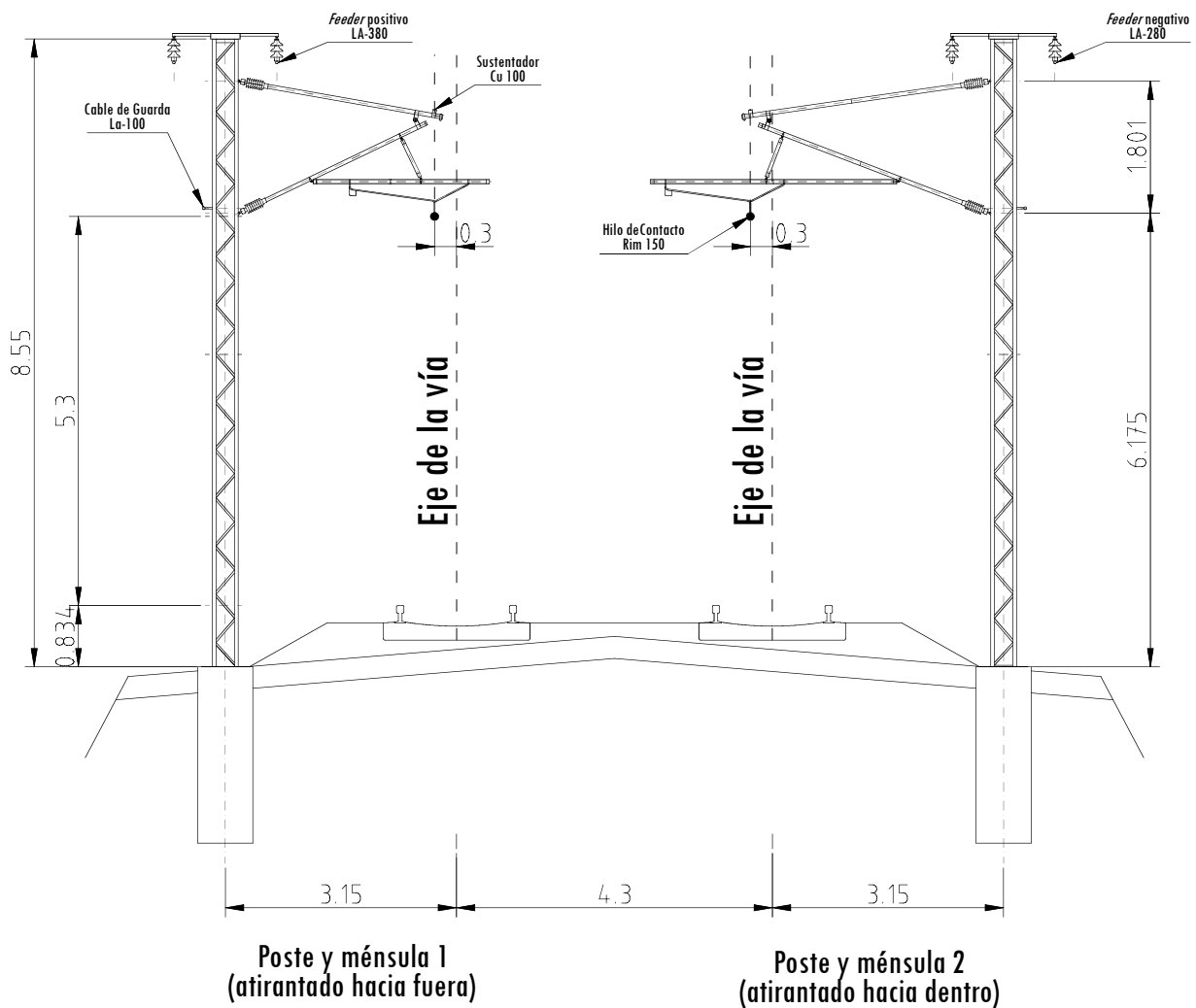
Plano nº:
1

El Ingeniero

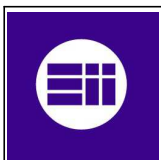
Alfonso Navas Nawrot

Escala: 1 : 100.000

Fecha: 17.05.2018



Nota: unidades en metros



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Sección transversal



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

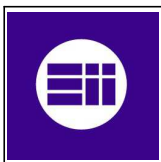
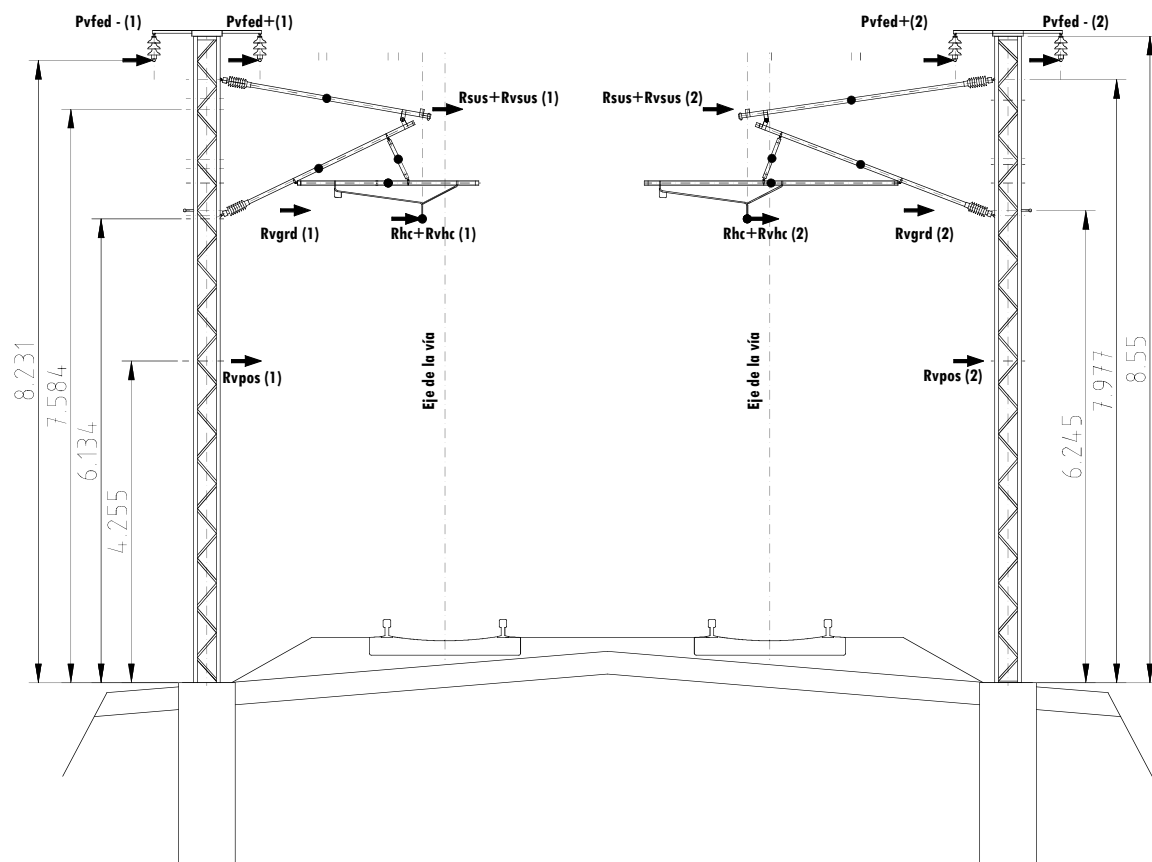
Plano nº:
2

El Ingeniero:

Alfonso Navas Nawrot

Escala: 1 : 20

Fecha: 17.05.2018



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Fuerzas horizontales
sobre los conductores



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

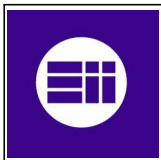
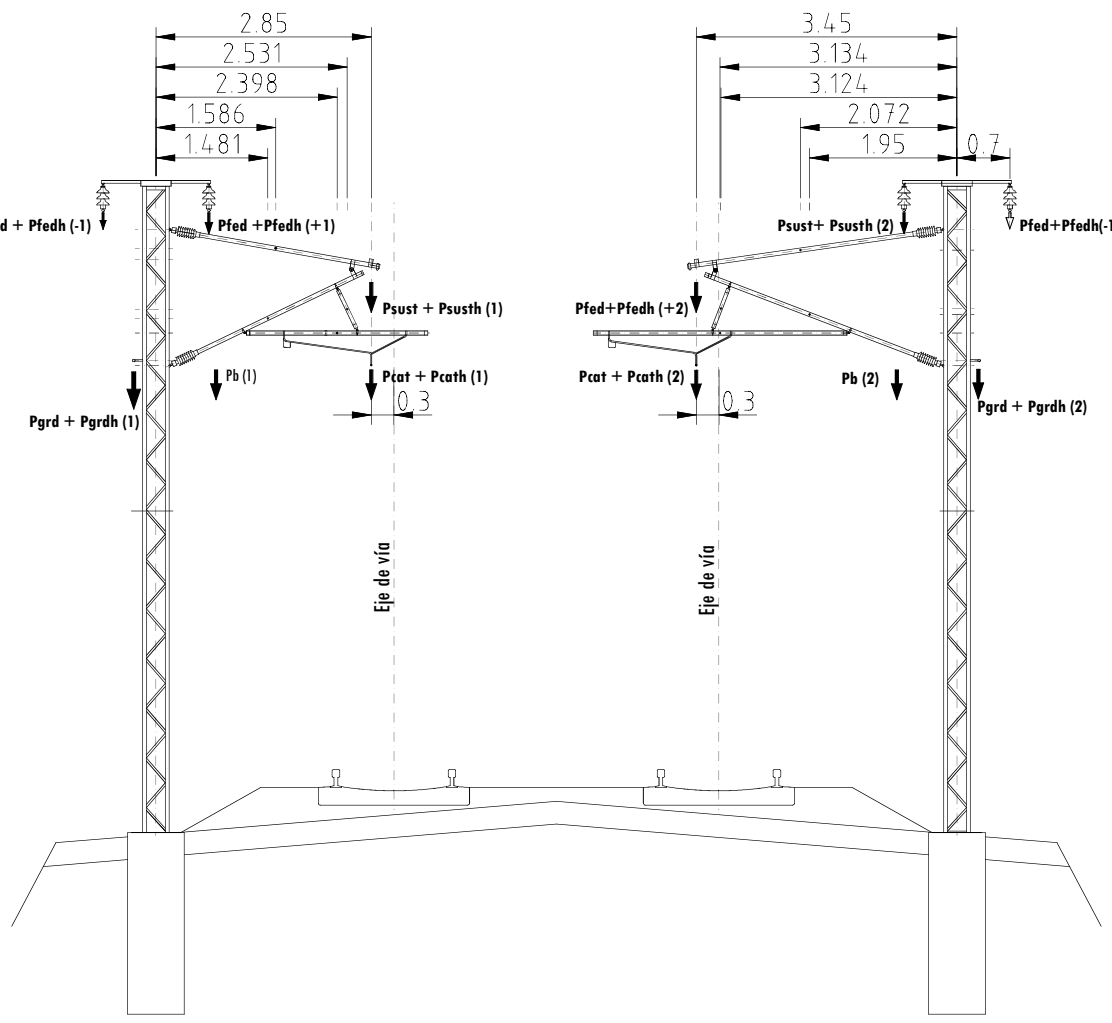
Plano nº:
3

El Ingeniero:

Alfonso Navas Nawrot

Escala: 1 : 20

Fecha: 17.05.2018



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Fuerzas verticales
sobre los conductores



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

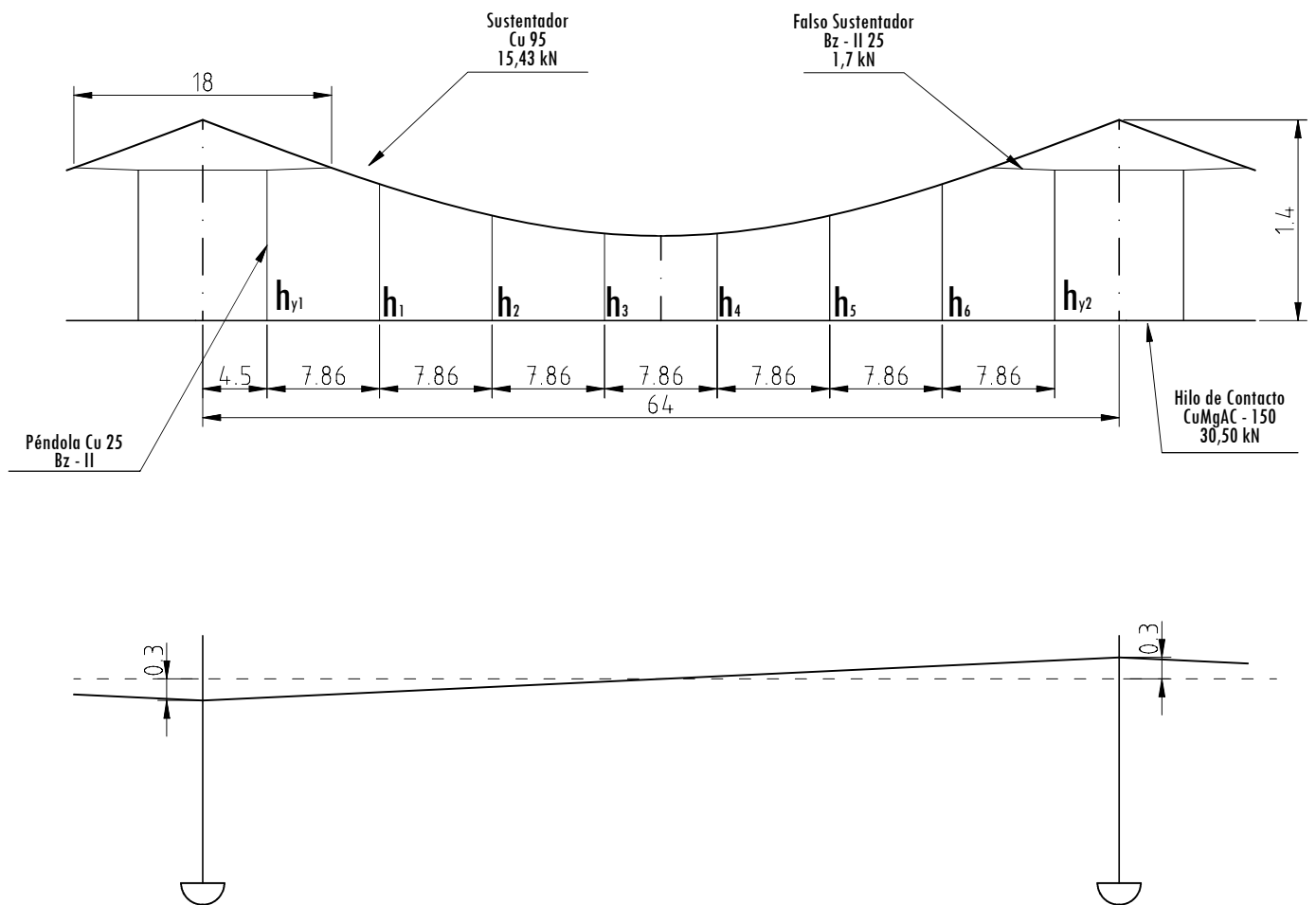
Plano nº:
4

El Ingeniero:

Alfonso Navas Nawrot

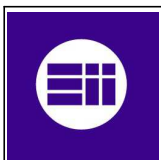
Escala: 1 : 20

Fecha: 17.05.2018



Péndolas	h_{y1}	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_{y2}
Dimensiones (m)	1.05	0.95	0.73	0.61	0.61	0.73	0.95	1.05

Nota: unidades en m



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Pendolado en "Y"
(vano de 64 m)



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

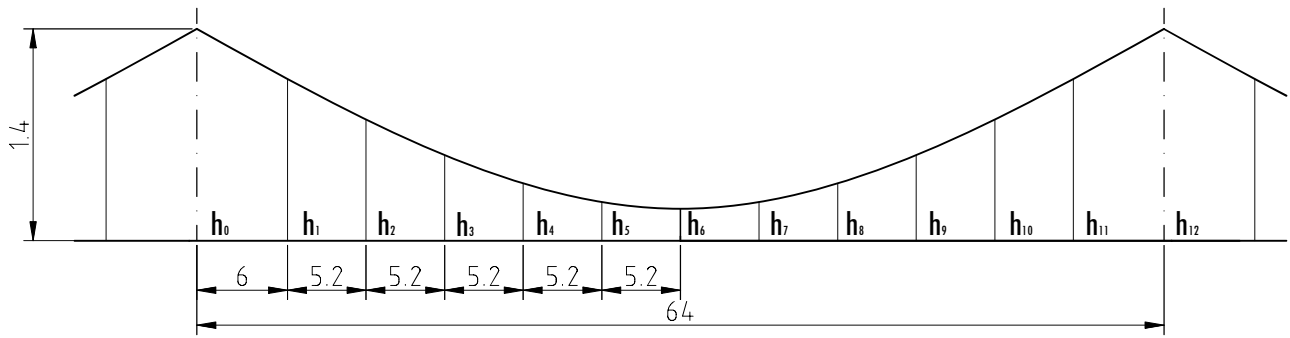
Plano nº:
5

El Ingeniero

Alfonso Navas Nawrot

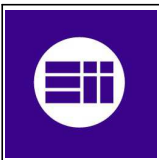
Escala: 1 : 500

Fecha: 17.05.2018



Péndolas	h_0	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h_9	h_{10}	h_{11}	h_{12}
Dimensiones (m)	1,4	1,27	1,10	0,85	0,63	0,39	0,03	0,39	0,63	0,85	1,10	1,27	1,40

Nota: unidades en metros



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Pendolado simple
(vano de 64 m)



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

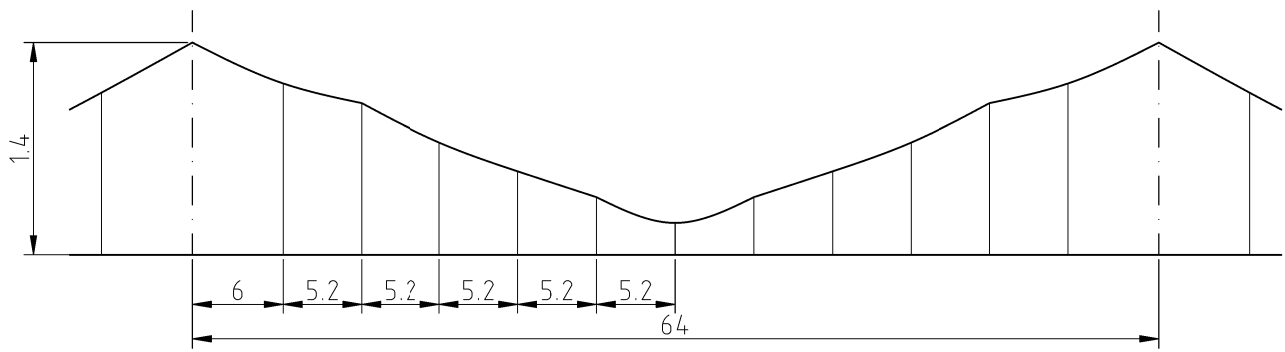
Plano nº:
6

El Ingeniero:

Alfonso Navas Nawrot

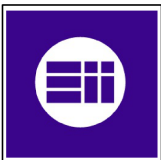
Escala: 1 : 500

Fecha: 18.05.2018



Péndolas	h_0	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h_9	h_{10}	h_{11}	h_{12}
Dimensiones (m)	1,4	1,13	1,00	0,74	0,55	0,38	0,21	0,38	0,55	0,74	1,00	1,13	1,40

Nota: unidades en metros



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Pendolado calculado
(vano de 64 m)



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

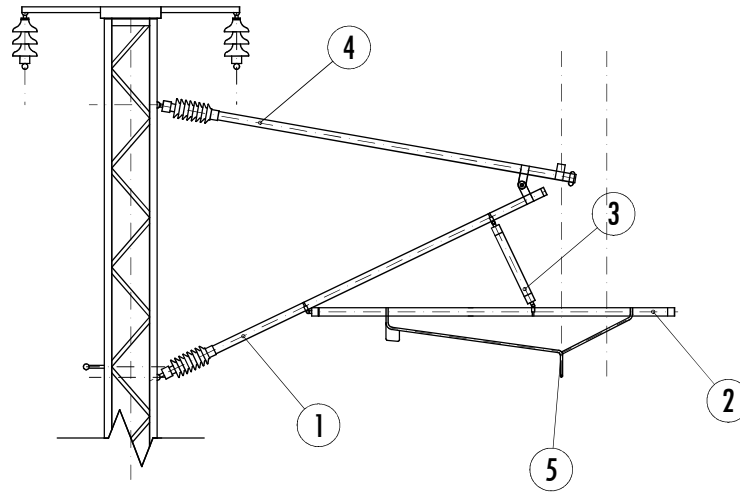
Plano nº:
7

El Ingeniero:

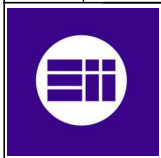
Alfonso Navas Nawrot

Escala: 1 : 500

Fecha: 17.05.2018



5	1	Sistema de atirantado	-	-
4	1	Tubo superior	EN 755	AW-ALSiMgMn 2.400 x ø 55
3	1	Tirante del brazo de registro	EN 755	AW-ALSiMgMn 0.556 x ø 55
2	1	Brazo de registro	EN 755	AW-ALSiMgMn 2.400 x ø 55
1	1	Tubo en ménsula	EN 755	AW-ALSiMgMn 2.430 x ø 55
Marca	Nº Pieza	Designación y observaciones	Norma	Material y medidas (mm)



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Conjunto Ménsula 1
(atirantado exterior)



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

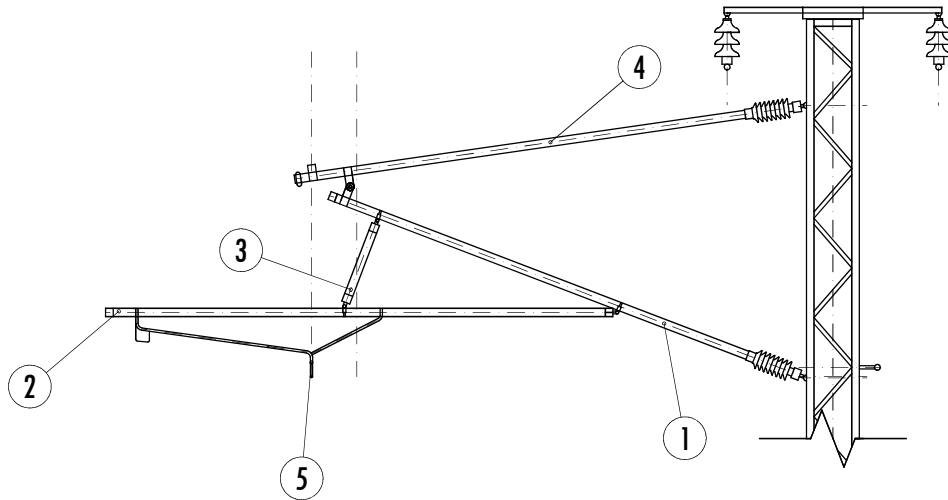
Plano nº:
8

El Ingeniero:

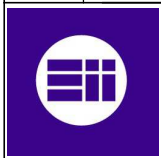
Alfonso Navas Nawrot

Escala: 1 : 50

Fecha: 17.05.2018



5	1	Sistema de atirantado	UNE 50119	-
4	1	Tubo superior	EN 755	AW-ALSiMgMn 3.010 x ø 55
3	1	Tirante del brazo de registro	EN 755	AW-ALSiMgMn 0.556 x ø 55
2	1	Brazo de registro	EN 755	AW-ALSiMgMn 3.356 x ø 55
1	1	Tubo en ménsula	EN 755	AW-ALSiMgMn 2.960 x ø 55
Marca	Nº Pieza	Designación y observaciones	Norma	Material y medidas (mm)



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Conjunto Ménsula 2
(atirantado interior)



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

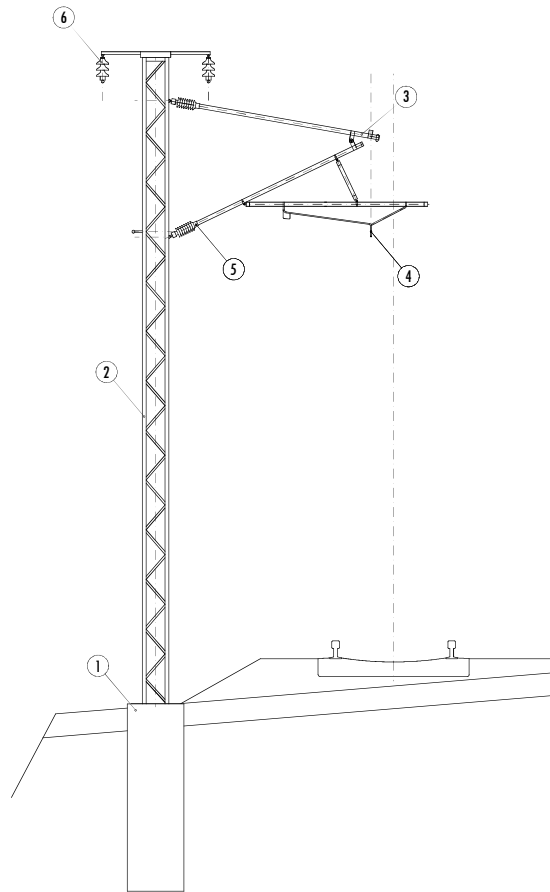
Plano nº:
9

El Ingeniero:

Alfonso Navas Nawrot

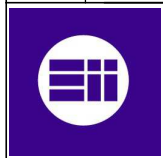
Escala: 1 : 50

Fecha: 18.05.2018



6	2	Aislador de feeder	EN 50151	Cerámico
5	2	Aislador de ménsula	EN 50151	Compuesto
4	1	Sistema de atirantado	UNE 50119	-
3	1	Subconjunto de ménsula	-	AW-ALSiMgMn
2	1	Poste de perfil en doble U	-	Acero
1	1	Macizo - Pilote	-	Hormigón (D 0,75 x 2,4 m)

Marca	Nº Pieza	Designación y observaciones	Norma	Material y medidas
-------	----------	-----------------------------	-------	--------------------



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Conjunto poste 1-2



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

Plano nº:
10

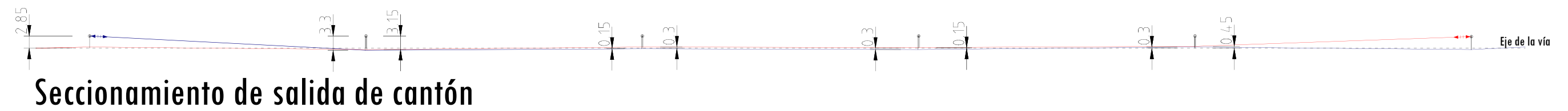
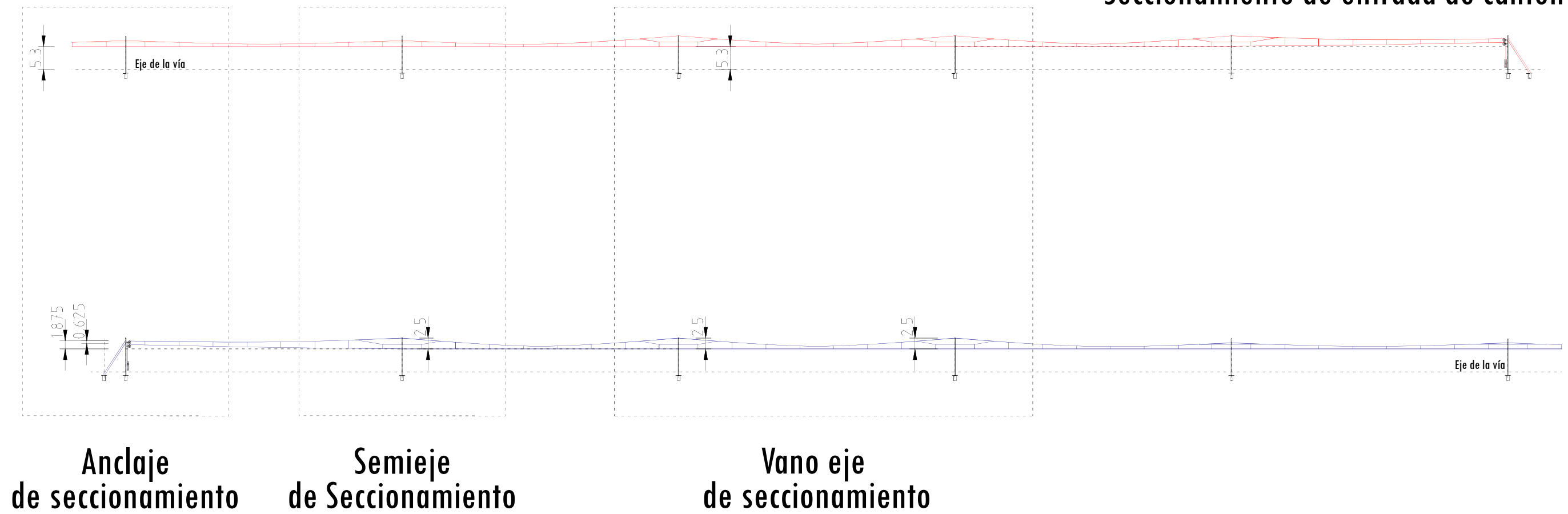
El Ingeniero:

Alfonso Navas Nawrot

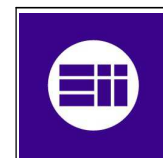
Escala: 1 : 20

Fecha: 17.05.2018

Seccionamiento de entrada de cantón



← Sentido de la marcha



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Seccionamiento
de cantón de regulación



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

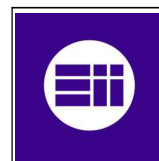
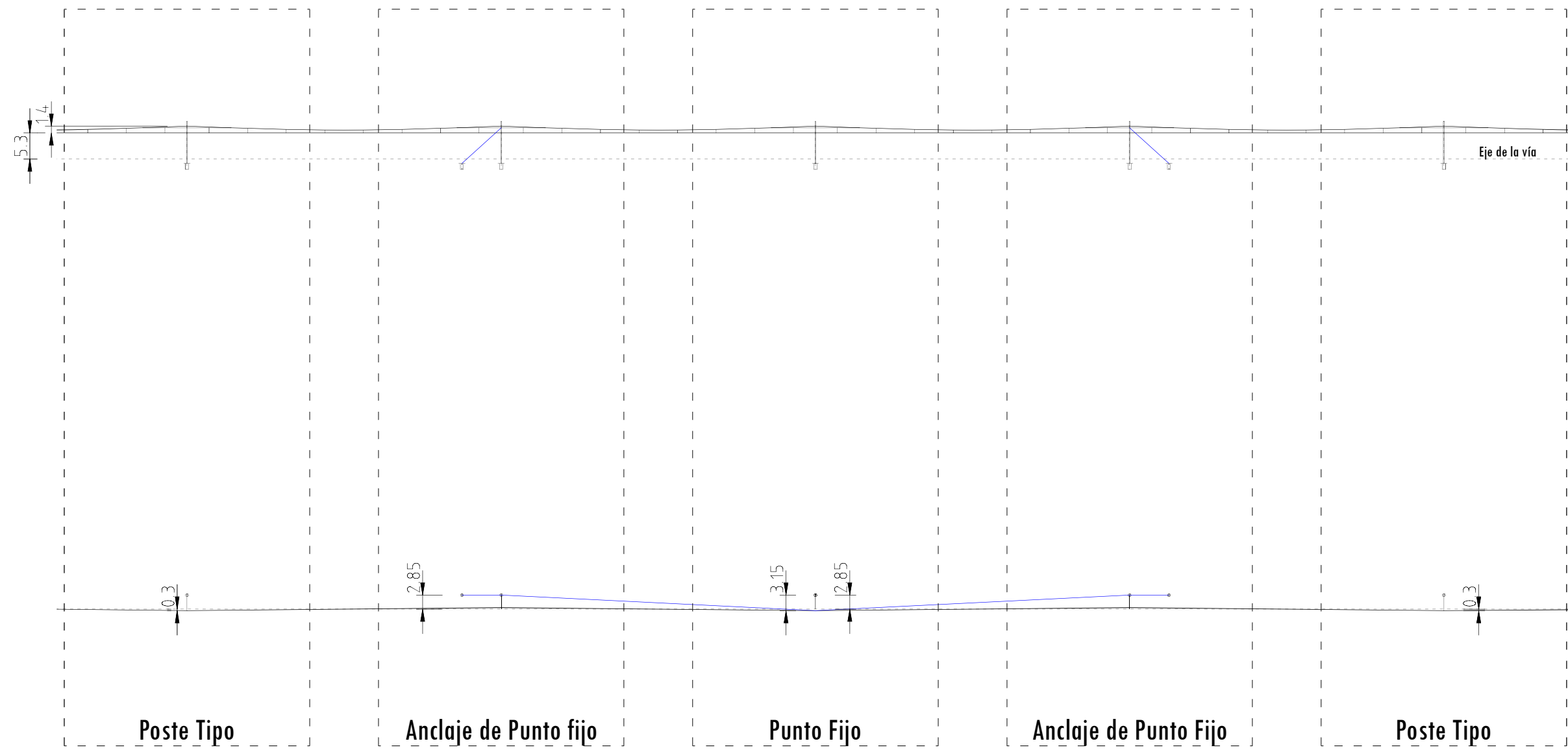
Plano n°:
11

El Ingeniero:

Alfonso Navas Nawrot

Escala: 1 : 1.000

Fecha: 17.05.2018



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Punto fijo de cantón



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

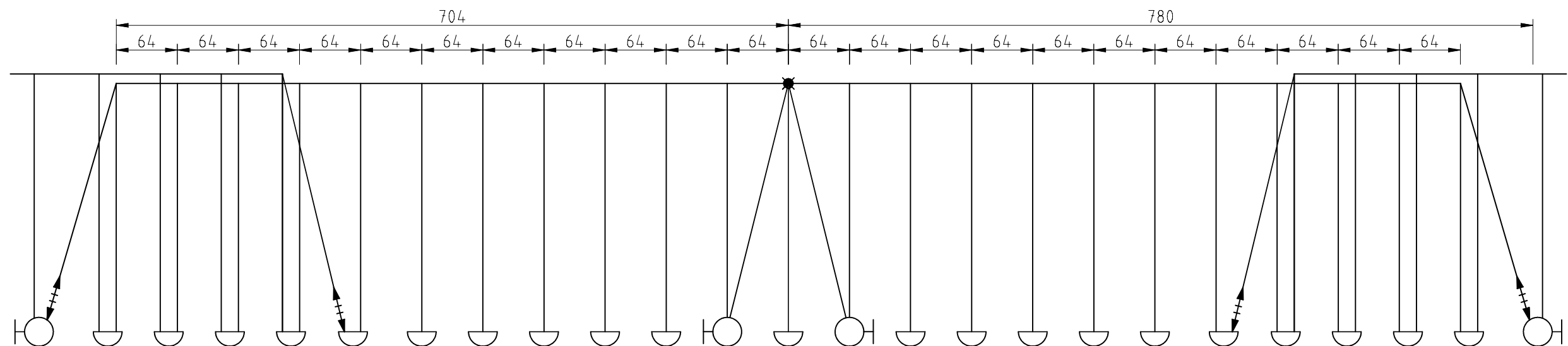
Plano n°:
12







El Ingeniero:

Alfonso Navas Nawrot

Escala: 1 : 1.000

Fecha: 17.05.2018



	Poste de doble U con pletinas
	Dos postes en U con cartelas
	Anclaje línea aérea de contacto con regulación automática de sustentador e hilo de contacto
	Anclaje
	Punto Fijo
	Ménsula de doble poste



ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Trabajo Fin de Grado

Denom. de Plano
Cantón de regulación



Diseño y cálculo de la catenaria de un tramo
de una línea de ferrocarril de alta velocidad

Plano nº:
13

El Ingeniero:

Alfonso Navas Nawrot

Escala: 1 : 5.000

Fecha: 17.05.2018