



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

CÁLCULO DE LÍNEA DE ALIMENTACIÓN FERROVIARIA DEL SUBTRAMO JAÉN-MENGÍBAR EN ALTA VELOCIDAD

Alumno: Miguel Ángel Arquillo Ureña

Tutor: Prof. D. Ignacio Jesús Pérez Guerrero
Dpto: Ingeniería eléctrica

Febrero, 2024



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Don IGNACIO JESÚS PÉREZ GUERRERO, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: CÁLCULO DE LÍNEA DE ALIMENTACIÓN FERROVIARIA DEL SUBTRAMO JAÉN-MENGÍBAR EN ALTA VELOCIDAD, que presenta MIGUEL ÁNGEL ARQUILLO UREÑA, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, FEBRERO de 2024

El alumno:

El tutor:

MIGUEL ÁNGEL ARQUILLO UREÑA

IGNACIO JESÚS PÉREZ GUERRERO

ARQUILLO
UREÑA

MIGUEL ANGEL
- 77690868L

Firmado digitalmente
por ARQUILLO
UREÑA MIGUEL
ANGEL - 77690868L
Fecha: 2024.02.19
17:23:03 +01'00'

Agradecimientos

Mientras escribo, miro hacia atrás y pienso en lo rápido que ha pasado todo. Me alegra ver que la vocación que la electricidad despertaba en mí sigue intacta y creciendo conforme más aprendo.

Quisiera agradecer a todos los que me han acompañado durante esta preciosa etapa. Este título va para todos vosotros.

Gracias a mis amigos y compañeros por estar siempre ahí y hacer todo lo que han hecho por mí.

Gracias a los profesores y a la escuela politécnica por brindar una educación cercana y ayudarme siempre que lo he necesitado.

Mención especial a mi familia, gracias a mi abuela Conchita por enseñarme la virtud del coraje. A mi abuelo Cosme, por hacerme ver que siempre se puede tener una buena cara para los demás. A mi abuelo Antonio, por enseñarme la virtud de la elegancia. A mi abuela María Luisa, por compartirme su carácter incansable. Gracias a mis padres por la educación que me han brindado y por enseñarme que, trabajando duro, los resultados acaban llegando. Gracias a mi hermano Daniel por estar siempre ahí, alegrando mis días.

No puedo dejarme atrás a la persona que me ha enseñado el amor verdadero y con la que espero estar hasta el fin de mis días. Gracias Inmaculada, por corregirme cuando lo necesito y por hacerme mejor persona.

Me gustaría dar las gracias al profesor Dr. Don. Ignacio Pérez Guerrero por darme la oportunidad de indagar en el maravilloso mundo de los sistemas ferroviarios.

Por último, quisiera dar gracias a la vida por darme todo lo que tengo y por rodearme de grandes personas que me apoyan y me hacen seguir creciendo.

Resumen

El presente documento nace con la finalidad de adquirir conocimientos de una rama no estudiada en el grado de ingeniería eléctrica. Con el presente estudio se pretende comprender el funcionamiento y las características de los sistemas ferroviarios. El ferrocarril irá cobrando cada vez más importancia debido a su funcionamiento limpio y eficiente mediante el uso de energía eléctrica.

Para la realización del trabajo fin de grado se lleva a cabo un estudio teórico en el que se comentarán los elementos más importantes de los sistemas ferroviarios. Por último, se realizará el cálculo electromecánico del subtramo Jaén-Mengíbar perteneciente a la línea de media distancia Jaén-Madrid en alta velocidad.

A modo de introducción, se explicará la estructura y el objeto del presente estudio. Después, se dará paso a los acontecimientos más significativos del mundo ferroviario a lo largo de la historia. También se explicarán los sistemas ferroviarios europeo y español. Por último, se tratarán las últimas novedades del sector.

Para continuar, se tratarán todos los elementos que hacen posible transportar la energía eléctrica desde las centrales generadoras hasta el material rodante. También se explicarán en detalle los sistemas de toma de corriente más utilizados, así como los diferentes sistemas de alimentación existentes.

Posteriormente, se realizarán los cálculos electromecánicos. Primero, se calculará la previsión de potencia. Después, se procederá a dimensionar eléctricamente la línea mediante la elección de la catenaria, autotransformadores, transformadores y protecciones de la línea. Por último, se dimensionará mecánicamente mediante el cálculo de esfuerzos y momentos de vuelco de cada conductor sobre los apoyos. Los cálculos finalizarán con la elección del apoyo.

Por último, se especificarán la bibliografía y la normativa, tanto específica como general, utilizada en el presente estudio.

Summary

This document was created with the aim of acquiring knowledge of a branch not studied in the electrical engineering degree. The aim of this study is to understand the operation and characteristics of railway systems. Railways will become more and more important due to their clean and efficient operation through the use of electrical energy.

In order to carry out the final degree project, a theoretical study will be carried out in which the most important elements of railway systems will be discussed. Finally, the high-speed electromechanical calculation of the Jaén-Mengíbar subsection of the Jaén-Madrid medium-distance line will be carried out.

By way of introduction, the structure and purpose of this study will be explained. Then, the most significant events in the railway world throughout history will be explained. The European and Spanish railway systems will also be explained. Finally, the latest developments in the sector will be dealt with.

To continue, all the elements that make it possible to transport electrical energy from the generating stations to the rolling stock will be discussed. The most commonly used power supply systems will also be explained in detail, as well as the different existing power supply systems.

Subsequently, the electromechanical calculations will be carried out. First, the power forecast will be calculated. Then, the line will be electrically dimensioned by choosing the catenary, autotransformers, transformers and line protections. Finally, it will be mechanically dimensioned by calculating the forces and overturning moments of each conductor on the towers. The calculations will end with the choice of the tower.

Finally, the bibliography and regulations, both specific and general, used in this study will be specified.

Índice general

Agradecimientos.....	II
Resumen.....	III
Summary.....	IV
Índice general.....	V
Índice de tablas	VIII
Índice de figuras.....	X
Abreviaturas	XIII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1. Orígenes del transporte ferroviario y de la electrificación	1
1.2. Objeto de estudio	2
1.3. Estructura general.....	2
1.4. Historia internacional del sector ferroviario	3
1.5. Historia nacional del sector ferroviario.....	5
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1. Sistema ferroviario europeo	8
2.2. Sistema ferroviario español	10
2.2.1. Alta velocidad en España	18
2.3. Inteligencia artificial aplicada al sector ferroviario.....	19
2.4. Tecnología del hidrógeno en el sector ferroviario	24
2.5. Smart Grids aplicadas al sector ferroviario	28
CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN A LA TRACCIÓN FERROVIARIA	33
3.1. Generalidades.....	33
3.2. Estaciones generadoras de energía.....	33
3.3. Líneas de transporte de energía	34
3.4. Subestaciones de tracción	35
3.4.1. Subestaciones de tracción en corriente continua.....	38
3.4.1.1. Elementos de una subestación de tracción en corriente continua	40
3.4.1.2. Protecciones de las subestaciones	47
3.4.1.3. Red de tierras	48
3.4.1.4. Telemando de subestaciones	49
3.4.1.5. Subestaciones reversibles	50

3.4.2. Subestaciones de tracción en corriente alterna	51
3.4.2.1. Sistema de alimentación en 1x25 kV	52
3.4.2.3. Comparación entre los sistemas 1x25 kV y 2x25 kV	56
3.4.2.4. Configuración eléctrica de la subestación	58
3.4.2.4.1. Zona de parque exterior de la subestación	60
3.4.2.4.2. Zona de 25 kV	62
3.4.2.4.3. Zona de acometida a catenaria	63
3.4.2.5. Relés de protección	63
3.5. Sistemas de toma de corriente	65
3.5.1. Tercer carril	65
3.5.2. Catenaria rígida	67
3.5.3. Línea aérea de contacto	73
3.5.3.1. Clasificación	74
3.5.3.2. Elementos de la línea aérea de contacto	76
3.5.3.2.1. Hilo de contacto	76
3.5.3.2.2. Sustentador	77
3.5.3.2.3. Feeders	78
3.5.3.2.4. Péndolas	81
3.5.3.2.5. Cables auxiliares	82
3.5.3.2.6. Estructuras portantes	82
3.5.3.2.7. Cimentaciones y macizos	83
3.5.3.2.8. Aisladores	84
CAPÍTULO 4: CÁLCULO ELECTROMECAÁNICO DEL SUBTRAMO JAÉN-MENGÍBAR	86
4.1. Introducción	86
4.2. Previsión de potencia	87
4.3. Dimensionamiento eléctrico	124
4.3.1. Introducción	124
4.3.2. Cálculos eléctricos	128
4.3.2.1. Criterio de capacidad de transporte de la catenaria	129
4.3.2.2. Criterio de intensidad de cortocircuito máxima admisible	133
4.3.2.3. Criterio de caída de tensión máxima	134
4.3.3. Protecciones de la LAC	136
4.4. Dimensionamiento mecánico	137
4.4.1. Introducción	137

4.4.2. Cálculos mecánicos.....	139
4.4.2.1. Cálculo del vano máximo	139
4.4.2.2. Cálculo de tensiones óptimas en sustentador e HC	141
4.4.2.3. Cálculo del momento de vuelco en HC y sustentador	149
4.4.2.4. Cálculo de esfuerzos en conductor de retorno y feeder negativo	150
4.4.2.5. Cálculo del momento de vuelco en conductor de retorno y feeder negativo	152
4.4.2.6. Elección del apoyo	153
CAPÍTULO 5: PLANOS	156
CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA Y NORMATIVA	161
6.1. Bibliografía.....	161
6.2. Normativa	163
6.2.1. General	163
6.2.3. Específica.....	163

Índice de tablas

Tabla 1: Acontecimientos más importantes del siglo XX.	4
Tabla 2: Tensiones utilizadas en España para la alimentación de subestaciones de tracción.	35
Tabla 3: Tensiones normalizadas según EN 50163.	36
Tabla 4: Comparación de los sistemas 1x25 kV y 2x25 kV. Fuente: Técnica Industrial.	58
Tabla 5: Características técnicas del S-130. Fuente: RENFE.	87
Tabla 6: Datos de partida. Fuente: Carmona Suárez.	93
Tabla 7: Previsión de potencia del tramo Jaén - Mengíbar. Fuente: Elaboración propia.	108
Tabla 8: Previsión de potencia del tramo Mengíbar - Jaén. Fuente: Elaboración propia.	123
Tabla 9: Características técnicas del transformador de tracción. Fuente: ADIF.	125
Tabla 10: Características técnicas de los autotransformadores. Fuente: ADIF.	126
Tabla 11: Impedancias kilométricas. Fuente: ADIF.	129
Tabla 12: Densidades máximas de corriente en régimen permanente. Fuente: Norma UIC 798.	131
Tabla 13: Intensidad máxima admisible de cada conductor. Fuente: Elaboración propia.	132
Tabla 14: Intensidad real de cada conductor. Fuente: Elaboración propia.	132
Tabla 15: Condiciones estáticas de la catenaria C-350. Fuente: ADIF.	138
Tabla 16: Condiciones dinámicas de la catenaria C-350. Fuente: ADIF.	138
Tabla 17: Características técnicas de los conductores. Fuente: ADIF.	139
Tabla 18: Vanos en curva. Fuente: Elaboración propia.	140
Tabla 19: Momentos de vuelco para el HC. Fuente: Elaboración propia.	150
Tabla 20: Momentos de vuelco para el sustentador. Fuente: Elaboración propia. .	150

Tabla 21: Cálculo de esfuerzos en el feeder negativo. Fuente: Elaboración propia.	151
Tabla 22: Cálculo de esfuerzos en el conductor de retorno. Fuente: Elaboración propia.	152
Tabla 23: Momentos de vuelco para el feeder negativo. Fuente: Elaboración propia.	152
Tabla 24: Momentos de vuelco para el conductor de retorno. Fuente: Elaboración propia.	153
Tabla 25: Momentos totales sobre el apoyo. Fuente: Elaboración propia.	154
Tabla 26: Características de los apoyos para líneas de AV. Fuente: Norma ETI de infraestructura [2002/732/CE: 2002]	155
Tabla 27: Elección de apoyo normalizado. Fuente: Elaboración propia.	155

Índice de figuras

Figura 1: Primer tren de la España peninsular. Fuente: RENFE.	4
Figura 2: Tren de alta velocidad. Fuente: RENFE.	6
Figura 3: Tren panorámico en Suiza. Fuente: Renato Bagattini.	8
Figura 4: Billones de pasajeros-kilómetros desde el año 2015. Fuente: Eurostat.	9
Figura 5: Estructura del sector ferroviario español. Fuente: MITMA.	11
Figura 6: Compañías ferroviarias que operan actualmente en España. Fuente: Brandemia.	15
Figura 7: Tipología de la electrificación de las líneas de ancho métrico. Fuente: ADIF.	16
Figura 8: Velocidades máximas de las líneas de ancho métrico. Fuente: ADIF.	16
Figura 9: Red ferroviaria española. Fuente: ADIF.	17
Figura 10: Tipos de vía y electrificación. Fuente: ADIF.	18
Figura 11: Ámbitos del ferrocarril afectados por la transformación digital. Fuente: UDIMA.	20
Figura 12: IA aplicada a cámaras inteligentes. Fuente: UDIMA.	22
Figura 13: Tipos de mantenimiento empleados en el sector ferroviario. Fuente: UDIMA.	22
Figura 14: Esquema de una pila de combustible. Fuente: Springer.	25
Figura 15: Tren de hidrógeno Coradia iLint. Fuente: Alstom.	26
Figura 16: Vittal One en pruebas. Fuente: EL PAÍS.	27
Figura 17: Gestión del consumo cambiando la forma de conducción. Fuente: IEEE.	30
Figura 18: Estrategias de control para flujos de potencia. Fuente: IEEE.	31
Figura 19: Distribución de las subestaciones dependiendo de su tipo. Fuente: Carmona Suárez.	37
Figura 20: Subestación de tracción. Fuente: CYMI.	38

Figura 21: Esquema unifilar de potencia de una subestación de CC tipo ADIF.	
Fuente: ADIF.	40
Figura 22: Ejemplo de un esquema de rectificador. Fuente: Carmona Suárez.	43
Figura 23: Filtro de armónicos. Fuente: Carmona Suárez.	45
Figura 24: Pórtico de feeder de la subestación de Grañena. Fuente: Manuel Miró..	47
Figura 25: Esquema de una subestación reversible. Fuente: Vía libre.....	51
Figura 26: Sistema de alimentación 1x25 kV. Fuente: Técnica industrial.....	53
Figura 27: Sistema de alimentación 2x25 kV. Fuente: Técnica industrial.....	54
Figura 28: Distribución de corrientes en el sistema 2x25 kV. Fuente: Técnica Industrial.	55
Figura 29: Esquema unifilar de 220 kV de una SET de 2x25 kV hasta los transformadores de tracción. Fuente: Universidad de Comillas.	59
Figura 30: Esquema unifilar de 55 kV de una SET de 2x25 kV hasta la salida al pórtico de feeder. Fuente: Universidad de Comillas.....	60
Figura 31: Ejemplo de frotador sobre tercer carril. Fuente: ADIF.	66
Figura 32: Tipos de tomas de corriente mediante tercer carril. Fuente: Técnica industrial.	67
Figura 33: Túnel con toma de corriente mediante catenaria rígida. Fuente: Pandrol.	68
Figura 34: Ejemplo de aguja aérea. Fuente: ADIF.	71
Figura 35: Tipos de catenaria según composición. Fuente: Carmona Suárez.	74
Figura 36: Representación gráfica del conjunto sustentador-péndolas-hilo de contacto. Fuente: Seguridad Ferroviaria.....	76
Figura 37: Vías con doble sustentador. Fuente: RENFE.....	78
Figura 38: Representación gráfica de una línea con feeder de acompañamiento. Fuente: Geotren.	79
Figura 39: Ejemplo de vía con feeder negativo. Fuente: Geotren.	80
Figura 40: Composición de una péndola. Fuente: Universidad Pontificia Comillas. .	81
Figura 41: Imagen de aisladores. Fuente: Geotren.	84

Figura 42: Modelo S-130. Fuente: RENFE.	86
Figura 43: Curva de esfuerzo/velocidad del S130. Fuente: MITMA.	88
Figura 44: Perfil de la línea ferroviaria Jaén-Mengíbar. Fuente: Elaboración propia.	88
Figura 45: Representación gráfica de las rampas ficticias del tramo Jaén-Grañena. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura 46: Representación gráfica de las rampas ficticias del tramo Grañena- Mengíbar. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura 47: Coeficientes de las fórmulas de resistencia al avance según la locomotora. Fuente: Alberto García Álvarez.	91
Figura 48: Subestación de Los Olivares (Jaén). Fuente: Google Maps.	125
Figura 49: Catenaria C-350. Fuente: ADIF.	127
Figura 50: Características de los conductores de la catenaria C-350. Fuente: ADIF.	127
Figura 51: Tensión mecánica de los conductores. Fuente: ADIF.	128
Figura 52: Esfuerzos sobre los apoyos. Fuente: Universidade da Coruña.	141
Figura 53: Presiones del viento sobre los conductores. Fuente: UIC 799.	143
Figura 54: Esfuerzos en el feeder negativo, conductor de retorno y feeder de aumento de sección.. Fuente: Universidade da Coruña.	151

Abreviaturas

CA: Corriente alterna

CC: Corriente continua

RFIG: Red Ferroviaria de Interés General

SNFC: Sociedad nacional de ferrocarriles franceses

AV: Alta velocidad

AVE: Alta velocidad española

FEVE: Ferrocarriles españoles de vía estrecha

IA: Inteligencia artificial

PEMFC: Pila de combustible de membrana de intercambio protónico

SOFC: Pila de combustible de óxido sólido

PFC: Pila de combustible de fosfato de polímero

MCFC: Pila de combustible de carbonato fundido

PFR: Regulador de flujo de potencia

PFE: Ecualizador de flujo de potencia

CNMC: Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia

TGV: Tren de alta velocidad

MITMA: Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana

BDD: Base de datos

AT: Alta tensión

MT: Media tensión

LAC: Línea aérea de contacto

ANSI: Instituto nacional estadounidense de estándares

ATI: Autotransformador intermedio

ATF: Autotransformador final

PK: Punto kilométrico

HC: Hilo de contacto

MR: Material rodante

SET: Subestación eléctrica de tracción

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Orígenes del transporte ferroviario y de la electrificación

Ante las imperiosas necesidades de facilitar el comercio y el desarrollo económico y de transportar mercancías surge la necesidad de encontrar un nuevo medio de transporte. En la primera mitad del siglo XIX, utilizando la novedosa tecnología de la máquina de vapor ideada por James Watt, nació el ferrocarril. El ser humano logró controlar el movimiento gracias a una fuerza motriz por primera vez sin tener que depender de agentes atmosféricos como el viento o el agua o de animales.

Durante más de siglo y medio, fue la tracción de vapor la encargada de transportar a personas y mercancías de todo el mundo. Llegó a su fin en los países desarrollados en la mitad de los años 70 del siglo XX. Pese a su sencillez, la tracción de vapor murió debido a las siguientes problemáticas:

- Costes de mantenimiento elevados.
- Alta indisponibilidad debido al tiempo que debía pasar para que la locomotora tuviera la presión suficiente para poder funcionar.
- Capacidades de operación limitadas de la pareja de operarios en rampas y túneles largos debido a la menor concentración de oxígeno.
- Necesidad de importar carbón en algunos países.
- Bajo rendimiento de la locomotora de vapor (en torno a un 11%).

La tracción de vapor no desapareció de un día para otro para darle paso a la tracción eléctrica o diésel, sino que coexistió con las mismas. Además, la tracción eléctrica y la de vapor se complementaron en tramos donde no se podía electrificar.

Gracias a los avances logrados en el electromagnetismo, se empezó a desarrollar la tracción eléctrica. La primera locomotora de tracción eléctrica fue presentada en el año 1879 por Werner Siemens. Tres años más tarde, en el año 1881, la compañía de Werner Siemens creó la primera línea electrificada del mundo en un tramo de casi tres kilómetros entre Lichterfelde y Berlín, creando así, el primer

tranvía eléctrico del mundo. En el año 1895 se creó la primera red ferroviaria electrificada del mundo entre Baltimore y Ohio en Estados Unidos, pero no es hasta los años 20 que se producen importantes electrificaciones en el ferrocarril mundial. Durante los próximos años los países siguen desarrollando su sistema ferroviario electrificado. En el año 1938 se inaugura en Italia el primer tren de alta velocidad, el cual puede alcanzar hasta 204 km/h. En España, la línea Madrid-Sevilla fue la primera en funcionar en alta velocidad el 21 de abril de 1992.

A día de hoy, las líneas de alta velocidad se han expandido a lo largo de los años y seguirán haciéndolo en el futuro.

1.2. Objeto de estudio

Este trabajo fin de grado tiene como objetivo principal diseñar la instalación eléctrica de una línea de alimentación ferroviaria de alta velocidad en el tramo comprendido entre Jaén y Mengíbar, siguiendo las condiciones y requisitos técnicos del sistema del operador del sistema ADIF. No obstante, también serán estudiados con mayor brevedad los sistemas de alimentación a la tracción ferroviaria más usados, material rodante motor, sistemas de captación de la corriente y sistemas de control de la tracción.

1.3. Estructura general

El presente estudio contará con seis capítulos con sus respectivos apartados y subapartados.

El primer capítulo contará con los orígenes del sistema ferroviario y la electrificación que consiguió dejar la tracción de vapor atrás, también se tratarán el objeto de este trabajo y la estructura general del mismo. Además, se hará un breve repaso a la historia internacional y nacional del ferrocarril mostrando los acontecimientos históricos más importantes.

En el segundo capítulo se tratarán el sistema ferroviario europeo y el español, comentando tanto sus datos en la actualidad como los objetivos a lograr en unos años. Se explicará la alta velocidad en España. Además, se comentarán como la inteligencia artificial y la tecnología del hidrógeno podrían aplicarse al sector ferroviario y las ventajas que supondría hacerlo. Por último, se explicará el papel de las *Smart Grids* o redes inteligentes en el ferrocarril.

En el tercer capítulo

En el cuarto capítulo se expondrán los lugares por los que la energía eléctrica fluye hasta llegar al material rodante. Se explicarán con un alto nivel de detalle las subestaciones de tracción, tanto en CC como en CA, vitales para adecuar la energía eléctrica de las líneas convencionales a la energía consumida por el material rodante. Las protecciones también serán expuestas debido a su elevada importancia en la protección del equipamiento y las personas. Se comentarán los sistemas de toma de corriente y las ventajas y desventajas de cada uno. También se mostrará los elementos que componen a cada uno. Se expondrán las tensiones y frecuencias utilizadas a nivel mundial para alimentar al material rodante y los sistemas de electrificación usados.

En el capítulo cinco se detallarán los cálculos realizados y se realizará la elección de MR, catenaria y tipo de apoyos para la línea mediante la normativa correspondiente. También se mostrará el emplazamiento de la SET, autotransformadores y estaciones de viajeros.

En el sexto capítulo se mostrarán los diferentes planos del estudio como el perfil longitudinal de la línea o el trazado de la misma.

El séptimo capítulo queda reservado para la bibliografía y normativa, tanto específica como general.

1.4. Historia internacional del sector ferroviario

El ferrocarril es una parte fundamental de la infraestructura de transporte de un país y juega un papel crucial en su desarrollo económico y social. Es uno de los sistemas de transporte más importantes en la actualidad, teniendo un total de 541,57 millones de pasajeros en España en el año 2022.

El sector ferroviario ha experimentado una evolución significativa desde sus inicios en el siglo XIX. Comenzó con la invención de la locomotora de vapor, que revolucionó el transporte y la industria, permitiendo el movimiento rápido y eficiente de personas y mercancías. Posteriormente, a lo largo del siglo XX, se introdujeron trenes eléctricos y diésel, los cuales ofrecían velocidades más elevadas y una mayor eficiencia energética. Todos estos progresos fueron acompañados de mejoras en la

señalización y gestión de las vías, así como un aumento en la comodidad de los vagones para pasajeros y los servicios proporcionados a bordo.



Figura 1: Primer tren de la España peninsular. Fuente: RENFE.

La tracción eléctrica nació como solución para resolver las problemáticas que planteaban las grandes pendientes y la necesidad de cargas cada vez mayores para los medios de tracción de la época. Además, los técnicos observaron que también se reducían los gastos de explotación. Fue tal el éxito de la tracción eléctrica que en el siglo XX tuvo lugar un crecimiento exponencial del mundo ferroviario. Los hechos más importantes quedan reflejados en la **Tabla 1**.

Año	Suceso
1902-1907	El primer ferrocarril electrificado importante es construido (Washington-Baltimore-Annapolis). Es electrificado en 11.000 V a 25 Hz.
1906	Se consiguen aislamientos eléctricos elevados en el interior de los motores, se empezó a electrificar con tensiones a 3.600 V en corriente continua, pudiendo así, disfrutar de las ventajas del motor serie de continua para tracción eléctrica.
1913	Se diseña en EEUU un sistema de alimentación en 50.000 V entre un <i>feeder</i> y el hilo de contacto y 25.000 V entre el hilo de contacto y el carril.

Tabla 1: Acontecimientos más importantes del siglo XX.

Con este tipo de trenes, la explotación de una línea ferroviaria consigue el máximo rendimiento al hacer los viajes en un tiempo récord. Es así como comenzó la decadencia de otros tipos de tracción como lo son el vapor o el diésel. Además, pueden destacarse otras ventajas como su menor coste de mantenimiento o menores emisiones a la atmósfera.

Fue en los años 90 cuando el desarrollo de trenes de alta velocidad respondió a la demanda de un medio de transporte más rápido, eficiente y económico. El tren de alta velocidad es ahora una alternativa ecológica y sostenible frente a transportes como el avión o el automóvil. Algunos trenes pueden llegar a una velocidad de 300 km/h. Pero esto no es todo, el sector y la digitalización del transporte ferroviario siguen avanzando. Muchos sistemas buscan incorporar energías cada vez más renovables con el fin de reducir el impacto ambiental, empleando energía solar y eólica que disminuyen las emisiones de carbono.

Actualmente, la gran novedad en el panorama ferroviario son los trenes de levitación magnética. Los trenes de levitación magnética emplean campos magnéticos para levitar sobre las vías, lo que disminuye la fricción y posibilita alcanzar velocidades muy elevadas. Si se lleva a cabo en un túnel al vacío, la tecnología de levitación magnética podría superar los 644 km/h.

1.5. Historia nacional del sector ferroviario

Esta sección trata de dar mejor cobertura a la electrificación de aquellos tramos ferroviarios que marcaron de forma notable el comienzo o desarrollo de la electrificación ferroviaria española, marcando un referente histórico.

El primer tramo electrificado fue Gérgal-Santa Fe debido al interés de grandes compañías mineras y algunos empresarios del País Vasco, que empezaron a interesarse por los yacimientos de hierro de Almería. Estos sucesos desencadenaron la propuesta de electrificar el tramo en el año 1909 explotándose en el año 1911. Se basaba en una corriente alterna trifásica a 25 hercios y 6.000 V. La energía eléctrica necesaria se generaba en una central térmica cerca de Santa Fe de Mondújar. El hilo de contacto era cilíndrico de 8 mm de diámetro y 50,25 mm² de sección.

En el año 1925 es electrificada la rampa de Pajares debido a la insuficiente capacidad para el tráfico que se desarrollaba. La sustitución de la tracción a vapor por la eléctrica permitía, manteniendo el peso, un incremento del 50 % de potencia. El tramo comprende desde la estación de Busdongo hasta la estación de Ujo pasando por el túnel de la Perruca, completando 62 km de vía única. Tras varios concursos, la corriente continua fue la elegida debido a un mayor margen de seguridad en el aislamiento de los túneles. También influyó la posible recuperación de energía. Este hecho era de interés debido a las elevadas rampas del terreno. Finalmente, se acordó una tensión de 3.000 V.

Cabe destacar la electrificación del tramo Madrid-Alcázar de San Juan-Córdoba. La electrificación de dicho tramo pertenecía al llamado *Plan Extensivo de Electrificación*, aprobado por Decreto de 25 de enero de 1946 y ratificado por el Ministerio de Obras Públicas el 28 de diciembre de 1950. La alimentación era de 3.000 V en corriente continua mediante subestaciones rectificadoras de vapor de mercurio de 2.000 kW.

No fue hasta 1992 que la tecnología de alta velocidad llegó a España con el AVE (Alta Velocidad Española) (**Figura 2**). Es un modelo basado en el TGV francés, capaz de llegar a los 310 km/h. Los trenes poseen dos unidades motoras situadas en la cabeza y cola del tren, las cuales funcionan simultáneamente.



Figura 2: Tren de alta velocidad. Fuente: RENFE.

Entre ambas cabezas se encuentran ocho vagones, uno de ellos perteneciente a la cafetería y el resto dedicado al transporte de pasajeros. En la figura 2 puede observarse la cabina la cual está compuesta de un escudo protector antichoque capaz soportar un impacto a 180 km/h sin sufrir daño alguno. La cabina está

informatizada e incorpora tecnologías como el radar, detector de balizas y cámaras de vídeo. Obtiene información a través de una línea de fibra óptica instalada en la vía. Los ocho vagones intermedios forman una composición de unos 200 metros de longitud.

Tan solo en 2022, 23,7 millones de pasajeros eligieron el tren de alta velocidad como medio de transporte en España de acuerdo a la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC).

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1. Sistema ferroviario europeo

El uso de trenes como modo de transporte está grabado profundamente en la historia de Europa. El antiguo continente es pionero en este medio de transporte. Desde la primera mitad del siglo XIX, la acelerada creación de nuevos trayectos ha sido la causante de importantes cambios sociales y económicos en Europa. Actualmente, el transporte por ferrocarril sigue jugando un papel clave en el desarrollo del continente. En el año 2020, viajaron 378 billones de pasajeros-kilómetros en trayectos europeos, haciendo al viejo continente el segundo mercado más grande para el tráfico ferroviario de pasajeros del mundo.



Figura 3: Tren panorámico en Suiza. Fuente: Renato Bagattini.

Entre todos los países europeos, Suiza se mueve más en tren que en cualquier otro medio de transporte terrestre. Sin embargo, son Alemania y Francia los que tienen el mayor tráfico de pasajeros con más de 50 billones de pasajeros-kilómetros.

El futuro del sector ferroviario brilla más que nunca. El tráfico de pasajeros se estima que se recupere y supere los niveles prepandemia en el año 2025, superando la cifra de 702 billones de pasajeros-kilómetros (**Figura 4**).

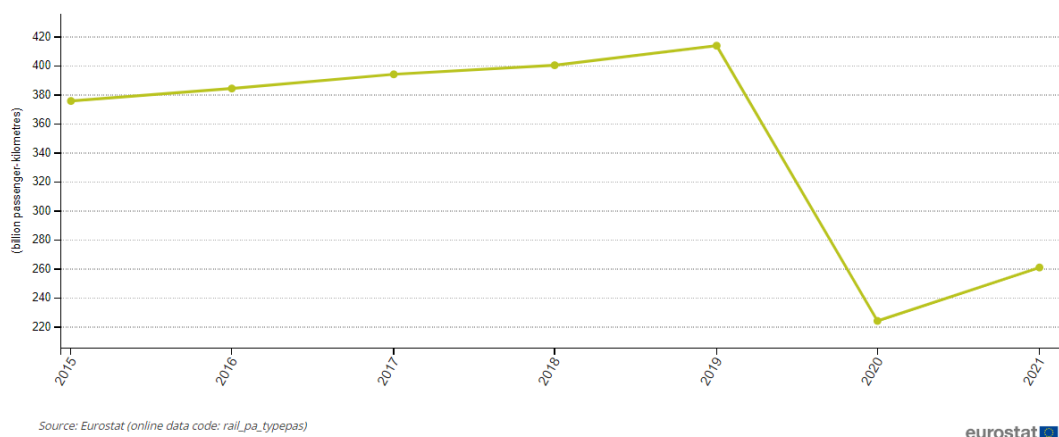


Figura 4: Billones de pasajeros-kilómetros desde el año 2015. Fuente: Eurostat.

Además, Europa tiene entre manos conseguir una movilidad más sostenible siguiendo el Objetivo 2050, el cual pretende conseguir una Europa climáticamente neutra para el año 2050. El sector ferroviario juega un papel clave en conseguir dicho objetivo. En las décadas anteriores, las emisiones de dióxido de carbono procedentes del ferrocarril han disminuido significativamente. Actualmente este sector emite menos del 1 % del total de emisiones de CO₂ de todos los medios de transporte en el continente. El gran inconveniente es la falta de normalización entre países en diferentes aspectos como pueden ser los sistemas de electrificación o los anchos de vía. Es obvio que Europa ha de trabajar duro para crear un sector normalizado que una en tiempo récord a todos los países europeos.

La Comisión Europea ha sido la encargada de dar a conocer que apoyará diez proyectos piloto para establecer nuevos trayectos ferroviarios o mejorar los existentes. Se mejorarán las conexiones ferroviarias transfronterizas en toda la Unión Europea, haciéndolas más rápidas, más frecuentes y asequibles. A continuación, se muestra el listado de propuestas de servicios piloto transfronterizos en orden de fecha de inicio prevista:

- Conexión entre Hungría, Austria y el oeste de Rumanía.
- Conexión Alemania-Dinamarca-Suecia.
- Nuevo servicio de tren nocturno París-Milán-Venecia.
- Conexión entre Múnich y Zúrich.
- Ampliación del servicio existente entre Múnich-Viena y Budapest.

- Mejora del servicio existente entre Ámsterdam-Londres.
- Nuevo servicio nocturno Ámsterdam-Barcelona.
- Nuevos servicios Roma-Múnich y Milán-Múnich con una posible extensión a Berlín.
- Nuevos servicios Lisboa-A Coruña y Lisboa-Madrid.
- Nuevos servicios que conectan Cataluña y el sur de Francia.

Como puede apreciarse el sector ferroviario europeo tiene un potencial enorme pero también mucho trabajo por delante. Europa está en la obligación de independizarse de los combustibles fósiles de países extranjeros e invertir en un medio de transporte más económico, rápido y sostenible como es el ferrocarril.

2.2. Sistema ferroviario español

En los últimos años, el sector ferroviario ha tenido un gran desarrollo. La alta velocidad, expansión de los servicios de cercanías y la orientación dada por la Unión Europea al ferrocarril han dinamizado el sector ferroviario español.

El sector ferroviario español es un sector fuerte tecnológicamente con liderazgo a nivel mundial. El transporte ferroviario factura aproximadamente 2.150 millones de euros al año y la industria 4.350 millones de euros anuales, de los cuales 1.850 son pertenecientes a España y 2.500 millones de euros corresponden a la exportación.

Sin contar con la actividad dedicada a la formación, investigación, etc., representa en torno a 6.500 millones de euros al año. La industria del sector está compuesta por unas 600 empresas, en las que 220 tienen al ferrocarril como actividad principal y en la que el 75 % son PYMEs.

El empleo en el sector representa unos 145.000 puestos laborales, de los cuales unos 45.000 corresponden a compañías ferroviarias y el resto a la industria, a la que habría que añadir las cifras pertenecientes a la construcción civil.

Para conseguir un sistema ferroviario eficaz y fiable es necesario tener una buena organización (**Figura 5**). En España el sector ferroviario sigue la siguiente estructura:

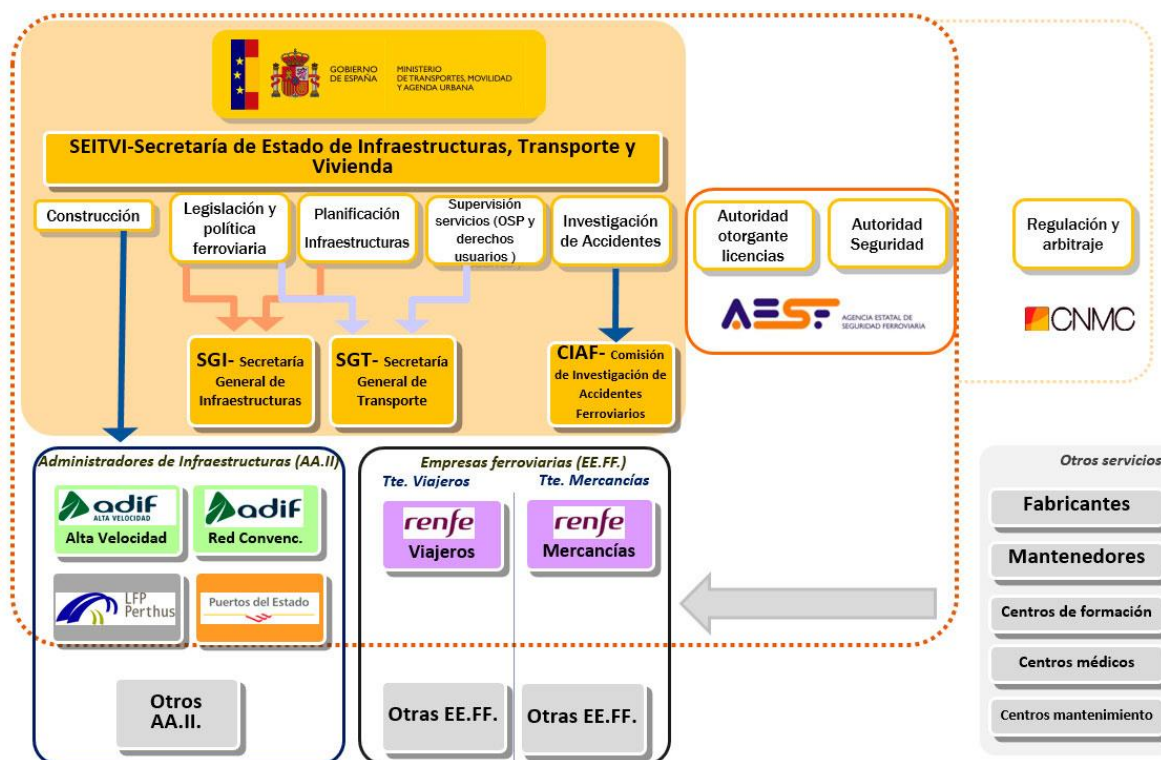


Figura 5: Estructura del sector ferroviario español. Fuente: MITMA.

El ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana ejerce las principales funciones en relación al sistema ferroviario según la siguiente organización:

- **Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda.**
 - Planifica y realiza la infraestructura del transporte, entre ellas el ferrocarril.
 - Ordena de forma general los medios de transporte, entre ellos el ferrocarril.

Para ello, de esta secretaría dependen los siguientes órganos que tienen las siguientes funciones:

- **Secretaría General de Infraestructuras.**
 - Se encarga de realizar estudios de carácter prospectivo, económico-financiero y territorial. Además, llevan a cabo el seguimiento de los planes y programas de infraestructuras de transporte ferroviario.
 - Elaboración y seguimiento de estudios informativos, anteproyectos y proyectos ferroviarios.

- Actuaciones expropiatorias en relación a las infraestructuras ferroviarias.
- Elaboración de disposiciones de carácter general relativos a las infraestructuras ferroviarias.
- **Secretaría General de Transportes.**
 - Se refiere a la gestión y regulación del sistema ferroviario, que implica la creación de proyectos normativos para definir las reglas fundamentales del mercado ferroviario. También incluye la colaboración en la formulación de normativas de la Unión Europea y la creación de directrices para coordinar las responsabilidades que se han delegado a las Comunidades Autónomas.
 - Las propuestas, tramitación y adjudicación, así como el control y seguimiento de las obligaciones de servicio público en el transporte ferroviario, así como el otorgamiento de ayudas a la mejora del transporte ferroviario y la elaboración de estudios y planes de actuaciones administrativas sobre dichas materias.
 - Revisión y control del cumplimiento de las normas reguladoras del sistema ferroviario y de sus actividades auxiliares y complementarias.

Una parte muy importante del sector ferroviario son los llamados administradores de infraestructuras ferroviarias, las cuales tienen por objeto el mantenimiento y explotación de las mismas.

Actualmente, las funciones de administrador general de las infraestructuras ferroviarias son gestionadas por dos entidades públicas empresariales inscritas al Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana: ADIF y ADIF-Alta Velocidad y a la sociedad LFP.

Las funciones principales de los administradores de infraestructuras ferroviarias son:

- La aprobación de proyectos de construcción y administración de infraestructuras ferroviarias. También se encargan del control, vigilancia e inspección de las mismas.
- Elaboración, aprobación y publicación de la declaración sobre la red.

- Tramitación de solicitudes, adjudicación y puesta a disposición de la capacidad de infraestructura concedida a las empresas ferroviarias y restantes candidatos.

Aún no hemos comentado las conocidas como empresas ferroviarias cuya actividad principal es prestar servicios de transporte de viajeros o de mercancías por ferrocarril. Para el acceso a la Red Ferroviaria de Interés General (RFIG), las empresas deben poseer de la correspondiente licencia y certificado de seguridad cuya emisión corresponde a la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria.

La más conocida en España es la empresa pública RENFE Operadora. Posee personalidad jurídica propia, capacidad plena para el cumplimiento de sus fines y patrimonio propio. Se encargan de ofrecer trayectos ferroviarios tanto para viajeros como para mercancías.

Para dar por finalizada la estructura del sector ferroviario en España, comentaremos la seguridad ferroviaria. La seguridad ferroviaria se refiere a la protección y prevención de accidentes, lesiones y daños en el entorno ferroviario. Este concepto abarca una amplia gama de medidas y protocolos diseñados para garantizar la protección de los pasajeros, el personal y los activos en el sistema ferroviario. La responsabilidad de la misma cae sobre los administradores de las infraestructuras ferroviarias y a las empresas ferroviarias que en ella operan.

Sus funciones principales son las siguientes:

- Deben supervisar que las obligaciones de todas las partes involucradas se cumplan.
- Han de dar el visto bueno a la puesta en servicio y a los requisitos de los subsistemas estructurales y los vehículos.
- Conceder certificados de seguridad y permisos a compañías de trenes y administradores de infraestructuras, así como licencias de conducción para el personal ferroviario. También, otorgar aprobaciones para centros de formación y evaluación psicofísica del personal ferroviario.
- Proponer y realizar el marco normativo de seguridad y la supervisión de su cumplimiento.

Una vez comentado la estructura del sector ferroviario español, es conveniente hablar sobre la liberación del sector. Conforme a la normativa vigente, establecida por la ley 38/2015 del sector ferroviario, el transporte ferroviario se considera un servicio de interés general y vital para la comunidad. Este servicio se prestará en régimen de libre competencia.

- La liberalización del transporte de mercancías se hizo efectiva en el año 2005.
- El transporte de viajeros a nivel internaciones se liberalizó el 1 de enero de 2010.
- El transporte de viajeros con fines turísticos es también prestado libremente desde el año 2013.
- Finalmente, el 14 de diciembre, la aprobación por el Parlamento Europeo y del Consejo de la Directiva 2016/2370/UE que modifica la Directiva 2012/34/UE, en lo que concierne a la apertura del mercado de los servicios nacionales de transporte de viajeros por ferrocarril y al dominio de las infraestructuras ferroviarias, supone abrir la competencia a la explotación de los servicios nacionales de transporte ferroviario de viajeros.

De acuerdo con la ley, la apertura a la libre competencia en el transporte de pasajeros será efectiva a partir del 1 de enero de 2019, a tiempo para el horario de servicio del 14 de diciembre de 2020.

La primera marca fue Ouigo de la mano de la francesa SNFC en mayo de 2021. Poco después llegó Avlo, el tren de bajo costo de RENFE. En noviembre de 2022, Iryo aterrizó en España. El año 2022 fue el primer año en el que cuatro marcas de tres operadores compitieron a la vez.

Gracias a la liberalización del sector, el tráfico ferroviario se ha disparado con 23,7 millones de usuarios utilizando la alta velocidad en 2022, lo cual corresponde a un 76% más que durante 2021. Este aumento se debe principalmente a un aumento de la oferta, lo que posibilita que los trayectos donde existe competencia sean los que más pasajeros han ganado en 2022.



Figura 6: Compañías ferroviarias que operan actualmente en España. Fuente: Brandemia.

La liberalización ha hecho posible un mayor número de servicios, billetes más económicos y muchos más viajeros. El número de pasajeros aumentó un 57% en el trayecto Madrid-Barcelona y un 119% en el recorrido Madrid-Valencia. Es evidente que la competencia ha conseguido que los usuarios se decanten por el tren. La liberalización ha conseguido que el tren sea más líder frente al avión.

Es de suma importancia recalcar que España posee en su red ferroviaria tres tipos de ancho de vía diferentes: el español (1.668 mm), el europeo o internacional (1.435 mm) y la vía estrecha (1.000 mm). Antiguamente, solo existían el ancho de vía español y de vía estrecha, lo que dificultaba interconectar España con el resto de Europa, ya que en Francia se utiliza el ancho de vía europeo, obligando a cambiar de tren a los pasajeros que querían viajar al norte de Europa. La razón del uso del ancho de vía español han sido mezcladas con algunas leyendas urbanas. La realidad viene dada en el Informe dado el 2 de noviembre de 1844 por una Comisión de Ingenieros de caminos. El informe decreta que se aumentó el ancho de vía para que las locomotoras de la época pudieran circular con toda la rapidez y seguridad.

La vía estrecha fue utilizada en el norte de España por razones orográficas, los radios de curvatura y algunos parámetros de trazado obligaban a realizar un gran número de desmontes, túneles, viaductos y terraplenes debido a la accidentalidad del terreno que hubiesen impedido al tren circular en la cornisa cantábrica. Usando un ancho de vía de 1.000 mm, estos parámetros son menos exigentes. Feve ha sido

la gestora de la red métrica más vasta de Europa con 1.192 kilómetros. A continuación, se muestran dos figuras sobre las líneas de ancho métrico a octubre de 2022. En la figura 7 se muestra la electrificación de las líneas de ancho métrico mientras que en la figura 8 se muestran las velocidades máximas permitidas.

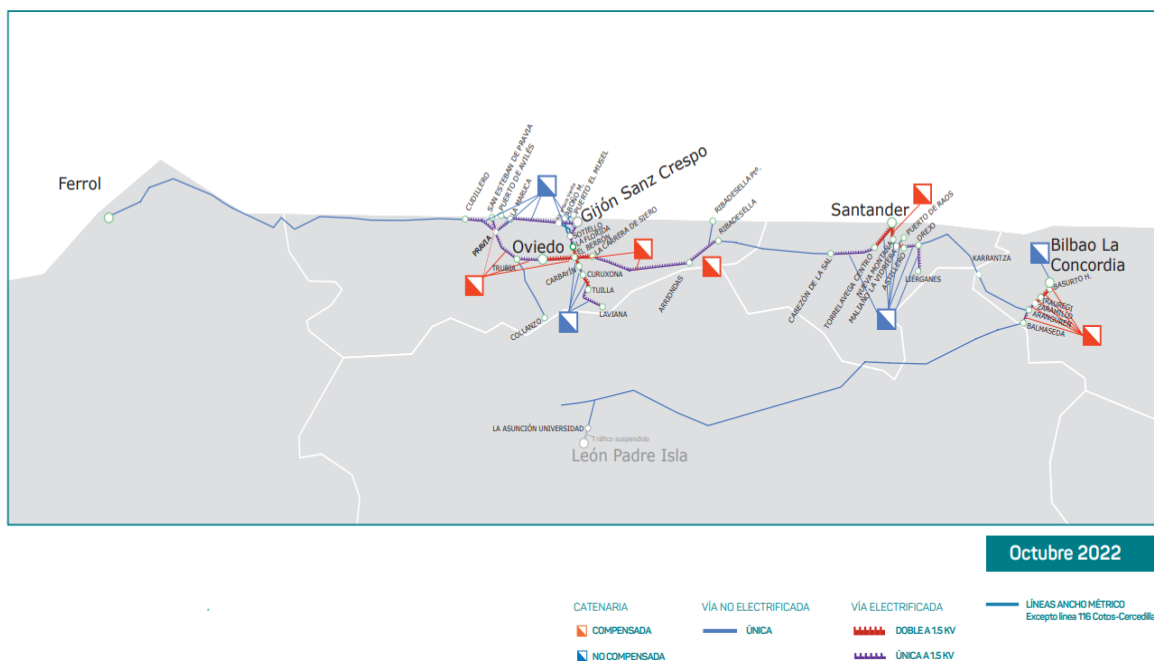


Figura 7: Tipología de la electrificación de las líneas de ancho métrico. Fuente: ADIF.



Figura 8: Velocidades máximas de las líneas de ancho métrico. Fuente: ADIF.

Actualmente en España la red de AV y la red convencional están compuestas de los siguientes anchos de vía:

- Red de AV:
 - Ancho estándar (1.435 mm): 3.027,2 km.
 - Ancho ibérico (1.668 mm): 675 km.
 - Red mixta (combinación de ancho estándar y ancho ibérico): 127,1 km.
- Red Convencional:
 - Ancho estándar (1.435 mm): 141,5 km.
 - Ancho ibérico (1.668 mm): 10.443,3 km.
 - Red Mixta (combinación de ancho estándar y ancho ibérico): 118,8 km.

En las siguientes figuras se muestra la situación de la red ferroviaria a diciembre de 2022. En la figura 9 se muestra podemos observar la red ferroviaria mientras que en la figura 10 se pueden apreciar tanto las vías electrificadas como las que no lo están. También se indica en cada tramo si las vías son dobles o únicas y el nivel de tensión y frecuencia a las que están sometidas las vías electrificadas.

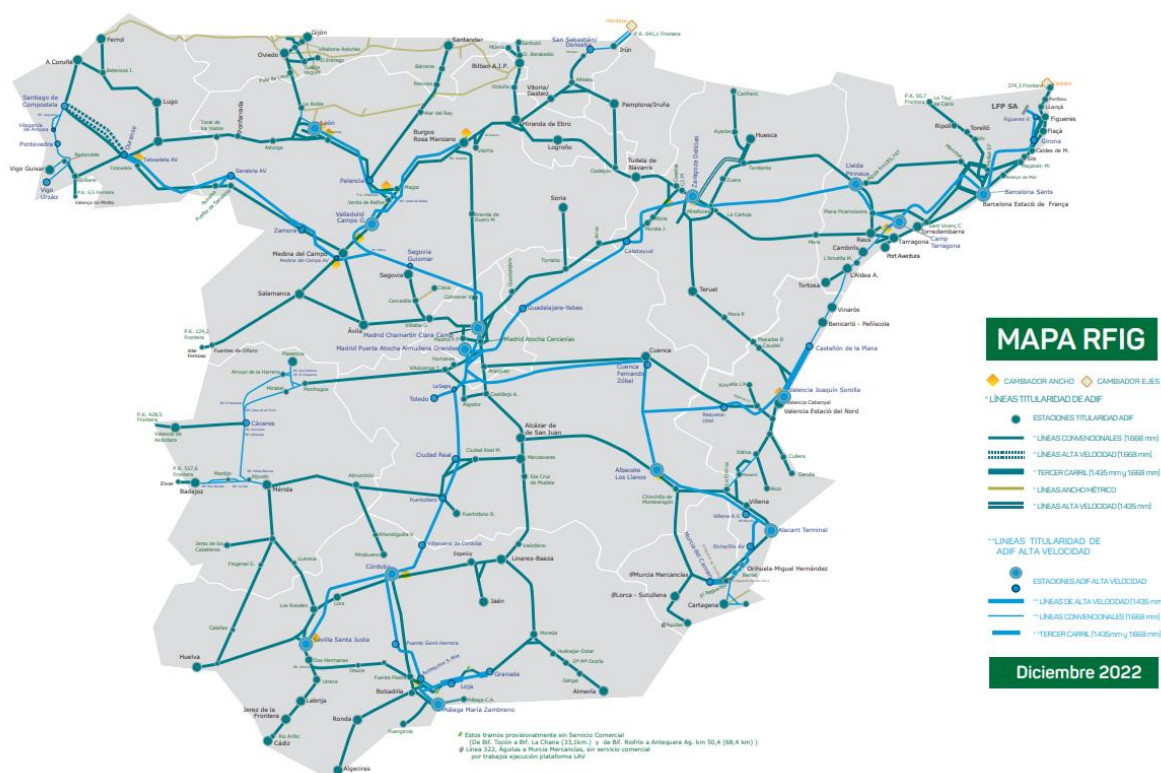


Figura 9: Red ferroviaria española. Fuente: ADIF.

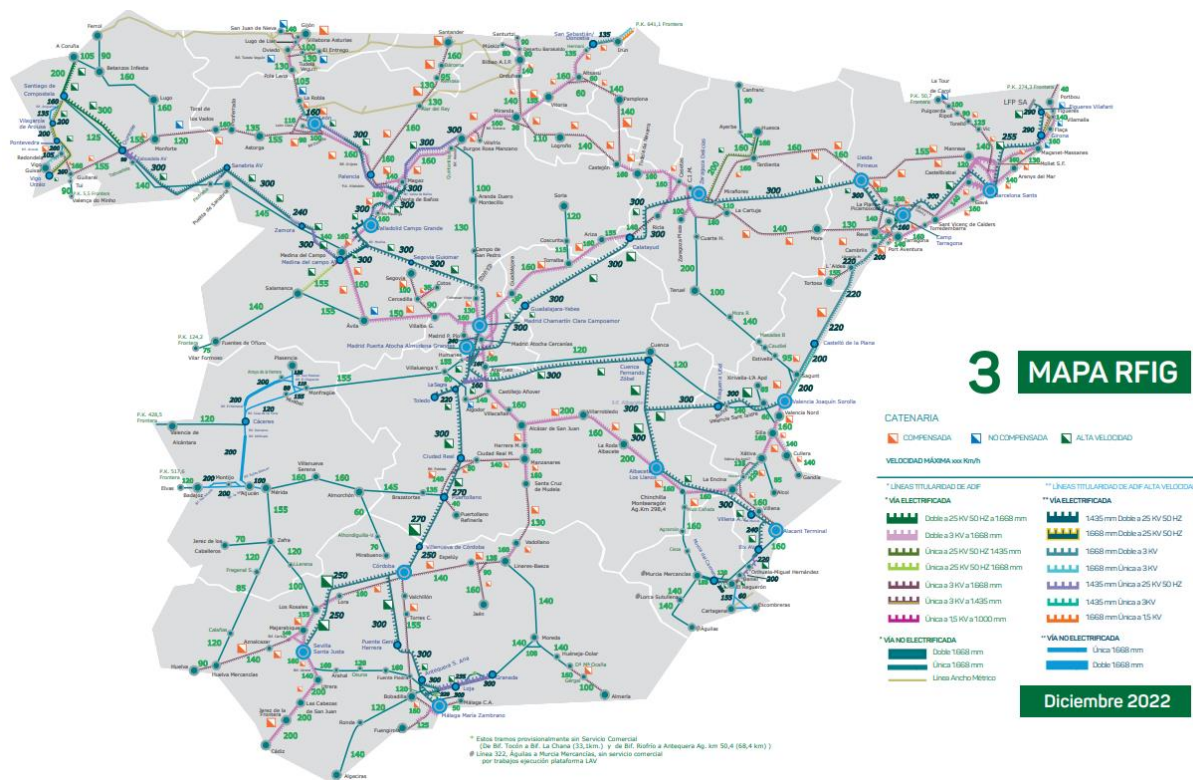


Figura 10: Tipos de vía y electrificación. Fuente: ADIF.

Para satisfacer el consumo ferroviario es necesaria una gran infraestructura. Para ello ADIF cuenta con:

- 9.200 km de líneas aéreas de contacto.
- 2.500 km de líneas de alta tensión.
- 341 subestaciones eléctricas.
- 1.844.000 kW de potencia instalada.

2.2.1. Alta velocidad en España

El 21 de abril del año 1992 tuvo lugar el primer viaje en alta velocidad de la historia española desde Madrid hasta Sevilla. Dicho trayecto une la capital española con Sevilla en poco más de dos horas con paradas en Ciudad Real, Puertollano y Córdoba. Cuenta con una longitud de 471,8 kilómetros. En ese mismo año tuvo lugar la Expo 92, siendo el AVE todo un hito en aquella exposición. El hecho que hizo definitiva la implementación del AVE fue la pobre conexión entre Madrid y Andalucía. El trayecto Madrid-Sevilla lo realizaba un ferrocarril antiguo, lento y congestionado al contar solo con una vía. Por lo tanto, se iniciaron las obras y se construyeron los 471,8 kilómetros de doble vía electrificada en CA a 25 kV con ancho de vía

internacional. Se construyeron un total de 31 viaductos y 17 túneles. Como consecuencia, se redujo el tiempo de viaje de 6 horas a 2 horas y 20 minutos.

Sin embargo, el desarrollo de la red de AV continuó creciendo rápidamente. En el año 2008 se terminó la línea de AV Madrid-Barcelona, consiguiendo recorrer 621 km en solo 2 horas y media.

La evolución de las líneas de AV ha crecido de forma exponencial desde entonces con las nuevas líneas de Madrid-Valencia, líneas hacia el norte de España... consiguiendo así vertebrar la comunicación ferroviaria en toda la península.

España ha conseguido posicionarse como el país con la red de AV más extensa de toda Europa y la segunda del mundo por detrás de China, con una longitud de 3.402 kilómetros.

La inversión en AV ha ayudado a posicionar al sector ferroviario como uno de los principales impulsores del desarrollo económico y social. El aumento de la inversión impulsa la creación de empleos (tanto directa como indirectamente), refuerza la cohesión regional. La AV es la opción preferida para los trayectos de media y larga distancia. Además, ayuda a la congestión producida por el tráfico aéreo y terrestre.

El ferrocarril es el medio de transporte más ecológico y las emisiones de CO₂ son mucho menores que en otros medios de transporte. En los primeros 25 años se estima que se ha ahorrado 12,9 millones de toneladas de CO₂ y 2,6 millones de toneladas de petróleo.

2.3. Inteligencia artificial aplicada al sector ferroviario español

La IA está teniendo un gran impacto en la sociedad actual y está siendo utilizada en una amplia variedad de sectores. El sector del ferrocarril no puede quedarse obsoleto y ha de afrontar esta etapa, la cual equivale a una cuarta revolución tecnológica a la altura de la locomotora de vapor o la tracción eléctrica.

En lo que concierne a España, ADIF está organizando la introducción de nuevas tecnologías en las diferentes áreas de gestión, cambiando la forma de gestionar los distintos procesos internos y dando valor a los clientes del transporte ferroviario.

Las empresas ferroviarias no se caracterizan por gestionar adecuadamente la información adquirida por sus sistemas, por ello, será necesario crear una estrategia para recopilar y analizar los datos obtenidos para capacitar a la IA a tomar decisiones.

Las características de este *Ferrocarril 4.0* son las siguientes (**Figura 11**):

- Monitoreo remoto de numerosas variables y parámetros en toda la infraestructura o en zonas específicas por medio de sensores y sistemas adaptados a cada fin.
- Almacenamiento, supervisión y análisis de la información obtenida en tiempo real, consiguiendo mejores decisiones (con o sin presencia humana).
- Análisis en diferido de los datos para detectar patrones de comportamiento y relaciones entre los diferentes procesos.
- Descentralización de la recepción de datos.
- Integración de los sistemas en uso.



Figura 11: Ámbitos del ferrocarril afectados por la transformación digital. Fuente: UDIMA.

Las compañías ferroviarias forman parte de los principales consumidores de energía eléctrica en los países desarrollados, por lo tanto, sería de gran utilidad disminuir este consumo y mejorar la eficiencia siempre que se ofrezca la misma calidad de servicio. Evidentemente, no será sencillo gestionar la energía eléctrica destinada a la tracción, la IA será de gran ayuda para conseguir el objetivo. Hay que entender que como todo sistema eléctrico se trata de algo complejo, pero a la propia

red eléctrica ferroviaria se le añade un plus de dificultad debido a la variabilidad de las cargas en el espacio y en el tiempo y a perfiles de consumo muy desiguales.

Considerando que está compuesta de un gran número de nodos y sabiendo los datos de consumo eléctrico en cada uno de ellos, el papel de la IA será prever el consumo energético en cada nodo, siguiendo los diferentes parámetros de control seleccionados previamente. Así podremos generar rutinas automáticas de control para los operadores de la red y los trenes, consiguiendo así que el consumo disminuya. Del mismo modo, se podrán crear esquemas de conexión eficientes dependiendo de las predicciones de consumo generadas.

Otro aspecto fundamental en cualquier medio de transporte es la seguridad del mismo. La IA puede aportar mucho a la gestión de la seguridad del sector ferroviario. La IA puede ayudar a controlar los diferentes eventos de la infraestructura que puedan influir a la seguridad del tránsito de los trenes. Esta herramienta debe predecir la ocurrencia de estos sucesos, consiguiendo así, reaccionar a tiempo desde los centros de mantenimiento y control de tráfico. Además, sería de gran utilidad la predicción de fenómenos meteorológicos que pudiesen alterar la seguridad de la infraestructura ferroviaria.

Actualmente, la IA se está aplicando a la detección de posibles amenazas en pasos a nivel mediante cámaras inteligentes de video para reconocer posibles peligros para la seguridad tanto de las personas como del propio tren (**Figura 12**). En la figura puede observarse un caso que podría concluir en una tragedia, la IA detecta un objeto cerca de las vías, si el vehículo está en movimiento entiende que no existe peligro alguno mientras que si se encuentra detenido durante un tiempo determinado activaría las alarmas correspondientes.

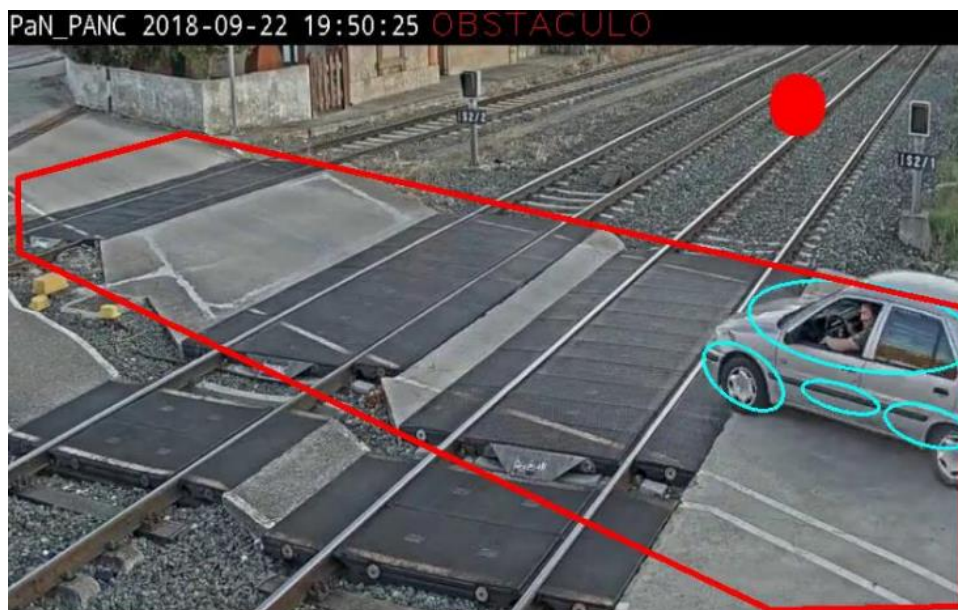


Figura 12: IA aplicada a cámaras inteligentes. Fuente: UDIMA.

El mantenimiento y conservación de la infraestructura es otra área relevante en el sector ferroviario. La disminución del coste de mantenimiento de los activos y la anticipación a fallos en cada uno de ellos, son destacados objetivos para la aplicación de la IA. Ambos objetivos están ligados al empleo de un mantenimiento predictivo o CBM, fundamentado en la condición del activo. En el presente, se utiliza el mantenimiento preventivo o TBM, basado en inspecciones periódicas independientemente de la condición del activo, se trata de cambiar este mantenimiento por el mantenimiento predictivo (**Figura 13**).

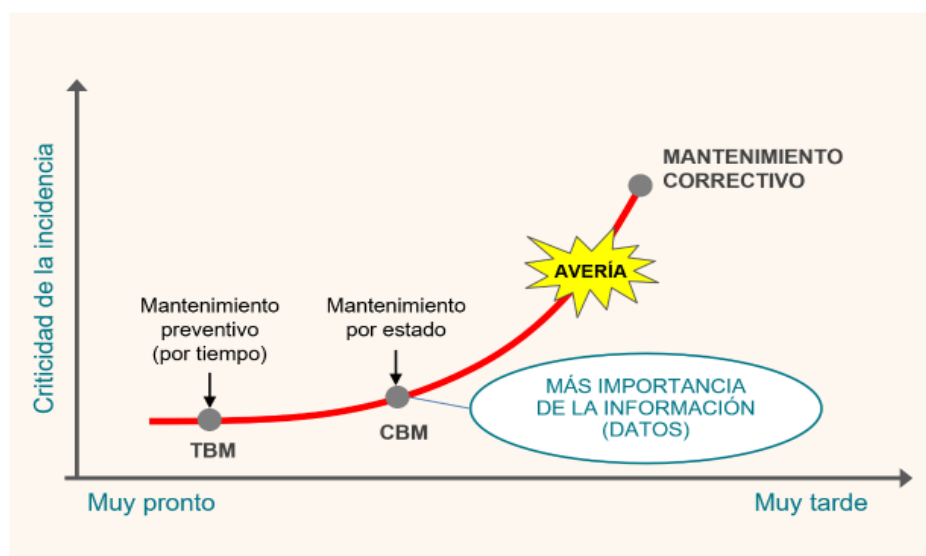


Figura 13: Tipos de mantenimiento empleados en el sector ferroviario. Fuente: UDIMA.

El mantenimiento predictivo generará una información que junto a la IA, posibilitará predecir la ocurrencia de un fallo, consiguiendo así, reaccionar con tiempo suficiente desde los centros correspondientes. La IA otorgará más seguridad, más ahorro económico y mejor optimización de los recursos.

Para ver mejor la importancia de este tema, Adif ha licitado por más de 4,10 millones de euros el desarrollo de una herramienta para optimizar el mantenimiento de la infraestructura. El propósito es conseguir una solución abierta de analítica avanzada que mejore la toma de decisiones para una mejor distribución de los recursos. Gracias a esta herramienta, Adif optimizará tanto las renovaciones de activos como la planificación del mantenimiento preventivo.

Como en cualquier medio de transporte de pasajeros, su comodidad y bienestar es de gran transcendencia. La inteligencia artificial puede ayudarnos de las siguientes formas:

- Dar conocimiento en tiempo real de la oferta de otros medios de transporte.
- Implementación del guiado *indoor* y posicionamiento para que los pasajeros puedan orientarse dentro de la estación sin ningún problema mediante su teléfono móvil.
- Avance en la atención e información al cliente.

Es necesario comentar cómo la IA va a cambiar la gestión de la logística ferroviaria. Una funcionalidad fascinante que se está contemplando, es la conducción autónoma de los vehículos que se mueven por la terminal, elevando el rendimiento y la seguridad al tener la posibilidad de prever comportamientos inesperados. La escasez de conductores hace que cobre fuerza la idea de automatizar los vehículos usados para el transporte interno de las diferentes cargas.

Para terminar este capítulo, se va a exponer la gestión del tráfico ferroviario en conjunto con la inteligencia artificial. La IA será capaz de mejorar la coordinación del tráfico desde los puestos de control, por ejemplo, asistiendo y ayudando a los agentes de tráfico automáticamente mediante indicaciones sobre cómo actuar en caso de existir incidencias que afecten a la explotación. Además, la IA estará en condiciones de dictar qué itinerarios son los más eficientes en caso de incidencia o en un espacio temporal en concreto.

2.4. Tecnología del hidrógeno en el sector ferroviario

El sector del transporte consume el 25% de la energía mundial en países desarrollados, mostrando una fuerte conexión entre el uso de energía y el crecimiento económico. El transporte de pasajeros y mercancías consume entre un 40% y un 60% de la energía usada en actividades relacionadas con el transporte. Como resultado de esto, el sector del transporte es responsable de entre un 15% y un 31% de las emisiones de efecto invernadero generadas por el hombre. El sector ferroviario, mayoritariamente, usa diésel y electricidad para su funcionamiento. Sobre un 70% de locomotoras funcionan con diésel en el mundo, mientras que el resto son trenes eléctricos cuya electricidad es generada de diversas formas, como carbón, solar, viento, gas natural, etc., que lo hace más limpio que el uso exclusivo de diésel. Los trenes de diésel son utilizados, principalmente, en trayectos en los que está prohibido o es muy complejo instalar líneas eléctricas y sean muy largos para trenes que usen baterías. Es en este tipo de casos en los que el tren de hidrógeno puede ser vital ofreciendo una alternativa más limpia.

A día de hoy, la investigación ha hecho posible reducir las emisiones de efecto invernadero mediante el uso de energías más limpias como el hidrógeno. Será la pila de combustible la encargada de generar electricidad mediante una reacción química en la que convertiremos la energía química del hidrógeno y del oxígeno en energía eléctrica. Si el H_2 y el O_2 se suministran a los electrodos, las pilas de combustible pueden producir energía continuamente. Aunque existen varios tipos de pila de combustible, todas tienen tres componentes principales: ánodo, cátodo y electrolito. Un catalizador en el ánodo obliga al hidrógeno a pasar por reacciones de oxidación las cuales producen iones y electrones. Los electrolitos facilitan el movimiento de los iones del ánodo al cátodo, generando así, una corriente continua que pasa por la carga. Cuando los iones, electrones y oxígeno interactúan en el cátodo, un catalizador diferente provoca la formación de agua y calor (**Figura 14**).

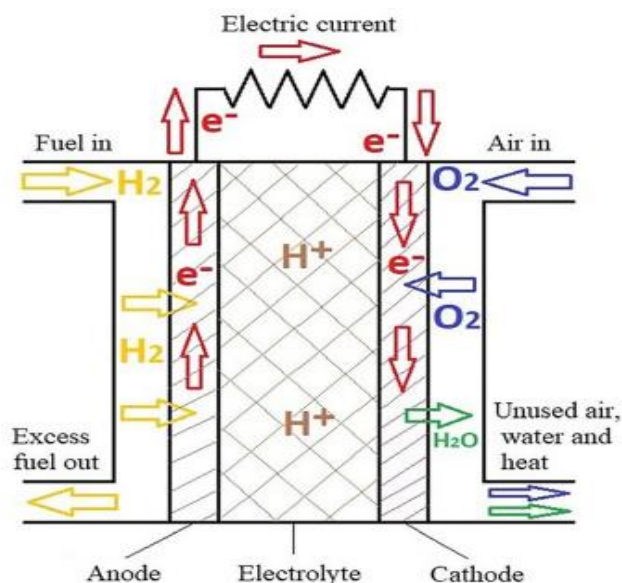


Figura 14: Esquema de una pila de combustible. Fuente: Springer.

Existen varios tipos de pilas de combustible de hidrógeno, las más usadas son:

- **Pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC):** Utiliza un electrolito sólido de membrana delgada que permite el paso de protones y evita el paso de electrones. Estas pilas son rápidas y eficientes, y se utilizan comúnmente en aplicaciones de vehículos de combustible de hidrógeno y en sistemas estacionarios.
- **Pila de combustible de óxido sólido (SOFC):** Emplea un electrolito de óxido sólido, como zirconia estabilizada con itria. Pueden operar a temperaturas más altas que otros tipos de pilas de combustible y son adecuadas para aplicaciones estacionarias de gran escala, como plantas de energía estacionarias y aplicaciones de cogeneración.
- **Pila de combustible de fosfato de polímero (PFC):** Utiliza un electrolito de membrana de fosfato de polímero y es adecuada para aplicaciones de energía portátil y estacionaria de baja potencia, como en aplicaciones militares y de respaldo de energía.
- **Pila de combustible de carbonato fundido (MCFC):** Utiliza electrolitos de carbonato fundido, lo que les permite operar a temperaturas aún más altas que las pilas de óxido sólido. Son adecuadas para aplicaciones estacionarias de gran escala, como plantas de energía.

Dentro de los tipos de pila de combustible antes mencionados, son dos los más prometedores en el sector ferroviario: PEMFC y SOFC.

El PEMFC trabaja a temperaturas moderadas de unos 80 °C. Su mayor rendimiento se da cuando no tenemos una demanda de energía permanente. Se ha propuesto su uso en aplicaciones como tranvías o trenes ligeros.

El SOFC tiene mejores eficiencias que el resto de pilas de combustible pero necesita operar a altas temperaturas (1000 °C). Se podrían utilizar en el transporte de mercancías.

Alrededor del mundo, existen 16 trenes de hidrógeno, 61 en etapas de fabricación y 2 en proyección. Mientras que la investigación y desarrollo de otras alternativas de propulsión siguen sin madurar, el hidrógeno para uso ferroviario está disponible para su uso cuando se requiera. Un conjunto de empresas, en el que se incluyen la prestigiosa Alstom o la compañía ferroviaria de Francia, integraron en el año 2016 la tecnología del hidrógeno mediante pilas de combustible en el modelo Coradia iLint (**Figura 15**).



Figura 15: Tren de hidrógeno Coradia iLint. Fuente: Alstom.

Coradia iLint es el primer tren de pasajeros propulsado por pilas de combustible de hidrógeno. Un total de dos trenes fueron probados en Alemania en septiembre del año 2018 y viajaron unos 180 kilómetros siguiendo una ruta habitual de

pasajeros. Se consiguió un récord de 1175 kilómetros sin repostar. El Coradia iLint puede alcanzar una velocidad de 140 km/h y puede albergar a 300 pasajeros.

Adicionalmente, la compañía ferroviaria de Japón Hitachi Ltd., en colaboración con Toyota, construyeron un tren de hidrógeno para pasajeros con una velocidad máxima de 100 km/h y una autonomía de 140 kilómetros.

En el caso de España, la empresa Talgo junto a Repsol realizarán una simbiosis, en la que a la ferroviaria le corresponderá diseñar y fabricar los trenes de hidrógeno y a la energética, generar el hidrógeno y ocuparse de la logística del mismo. El tren Vittal-One contará con tecnología propia de almacenamiento y generación de energía eléctrica mediante el hidrógeno (**Figura 16**).



Figura 16: Vittal One en pruebas. Fuente: EL PAÍS.

El Vittal-One usará baterías para aumentar la potencia disponible en los arranques, aprovechando las frenadas para la recarga de las mismas. Es importante destacar que este modelo de tren será capaz de operar tanto aislado de la catenaria como conectado a la misma. La velocidad máxima será de 220 km/h en modo eléctrico y de 160 km/h cuando sea propulsado exclusivamente por hidrógeno. La pila de hidrógeno consumirá 0,25 kg/km y dotará al tren de una autonomía de 800 kilómetros.

Su uso se prevé que sea en trayectos de cercanías y media distancia, y su aplicación estaría en los tramos aún sin electrificar o parcialmente electrificados. A día de hoy, España cuenta con 5.617 kilómetros de vías sin electrificar ni tiene

previsiones de hacerlo debido a su alto coste. Por ellas circulan locomotoras diésel y por culpa de esto, solo el 60% de la energía que consume nuestro sector ferroviario es eléctrica.

Las ventajas del H_2 son numerosas y pueden resumirse en: alta eficiencia, funcionamiento libre de emisiones (los únicos desechos son vapor de agua y calor), repostaje rápido y costes de operación y mantenimiento mínimos.

Sin embargo, tienen una respuesta dinámica lenta, lo que requiere la hibridación con un sistema de almacenamiento de energía. Asimismo, necesitan estrategias de gestión y control de la energía para suavizar las fluctuaciones de potencia y permitir la recuperación de la energía de frenado.

Aunque no es oro todo lo que reluce, ya que el 95% del hidrógeno que se genera mundialmente procede del reformado de metano, lo cual no es tan limpio como el hidrógeno procedente de renovables. Actualmente, el hidrógeno verde (hidrógeno obtenido de renovables) no es rentable y no se prevé que lo sea hasta el año 2030. Sumado a esto, tenemos el problema del transporte del hidrógeno y el almacenamiento dentro del tren.

El hidrógeno puede ser un combustible extremadamente inflamable si es almacenado o manejado incorrectamente. Además, la densidad energética del H_2 es muy baja: un metro cúbico de hidrógeno solo contiene un tercio de la energía de un metro cúbico de gas natural a la misma presión y temperatura, y su punto de ebullición es de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, comparado con los $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ del gas natural, haciendo el desarrollo de la infraestructura para transportar el hidrógeno mucho más complejo. Al igual que con el gas natural, el hidrógeno puede ser transportado a través de gasoductos. En los casos donde los gasoductos no sean económicamente viables, el hidrógeno puede ser transportado a los consumidores a través de contenedores.

2.5. Smart Grids aplicadas al sector ferroviario

En la última década, el desarrollo de las redes inteligentes o *smart grids* ha sido una de las principales prioridades en el campo de la ingeniería eléctrica. A modo de resumen, una red inteligente consiste en la integración de la tecnología de la información con los sistemas eléctricos con el fin de mejorar el control de los mismos.

Mientras que el objetivo en los sistemas eléctricos de potencia es proveer energía eléctrica con unas características definidas, la meta de los sistemas ferroviarios es transportar pasajeros y bienes siguiendo un horario. Por esta razón, el funcionamiento de las redes inteligentes para el sector ferroviario, tiene que ser distinto que para los sistemas eléctricos convencionales.

El sistema eléctrico ferroviario tiene las siguientes peculiaridades:

- La mayoría de cargas eléctricas son trenes, las cuales cambian espaciotemporalmente. El consumo de los trenes está condicionado con la forma en la que se conduce cada tren, la cual puede permitir incluso que el tren funcione como un generador por un tiempo limitado cuando el tren frena. Simplemente frenando, el tren puede pasar de consumir 10 MW a ceder 8 MW en unos pocos segundos. El sistema eléctrico ferroviario tiene que ser capaz de lidiar con estos bruscos cambios, los cuáles ocurren muy a menudo durante un trayecto.
- El transporte en ferrocarril por líneas electrificadas es visto como uno de los medios de transporte más ecológicos y eficientes. Su potencial para recuperar energía de la frenada (frenada regenerativa) hace que su eficiencia aumente.
- Las líneas ferroviarias, normalmente, se conectan con diferentes redes eléctricas, unas más robustas y otras más débiles. Un control inteligente que tenga en cuenta las especificaciones de cada red eléctrica es primordial para mejorar la fiabilidad y la gestión de la capacidad de las líneas.

Además, la transmisión de potencia está obsoleta debido a su pobre regulación, usando cambiadores de tomas, etc. Desafortunadamente, las opciones de regulación son limitadas y muy lentas para estar usándolas con mucha frecuencia. Por esto, la red eléctrica ferroviaria está diseñada para suministrar potencia para el peor escenario, lo que conlleva sobredimensionar infraestructuras e instalaciones.

En el proceso de diseño de una línea ferroviaria, se toma una operación determinada tratando casuísticas como el material rodante que va a circular por las vías, frecuencia de los trenes y estrategia de conducción. Conforme el tiempo avanza, la demanda de la línea crece y aparece un cuello de botella. Cuando nos acercamos a los límites de electrificación (líneas sin más capacidad, las caídas de

tensión aumentan...), existen soluciones como añadir más conductores a la catenaria, nuevas subestaciones de tracción...

Los motivos previamente comentados son algunas de las razones por las que el uso de redes inteligentes es necesario, solucionando así, problemas de operación que no pueden ser resueltos con los métodos de control tradicionales. Para conseguir esto, las redes inteligentes han de integrar los objetivos principales del sector: movilizar trenes para transportar bienes y pasajeros y suministrar la electricidad requerida por los trenes.

La estrategia de conducción del tren incide directamente en los perfiles de consumo, es por esto que las redes inteligentes pueden modificar la forma de conducir para ajustar los perfiles de consumo a las necesidades del sistema. Al ser el consumo eléctrico, uno de los mayores gastos para las compañías ferroviarias, se ha puesto mucho esfuerzo en optimizar las estrategias de conducción para minimizar el consumo energético. Es así como nace el concepto de *Smart Train Operation*. Entre los objetivos también se encuentra la adaptación del consumo del tren a la capacidad de la infraestructura en un área específica y estrategias para reducir el coste de la electricidad (**Figura 17**).

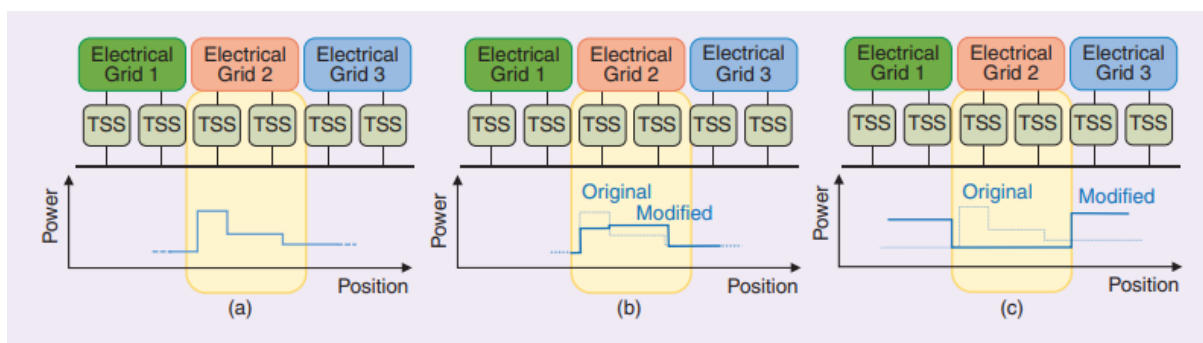


Figura 17: Gestión del consumo cambiando la forma de conducción. Fuente: IEEE.

El caso (a) muestra un estilo tradicional de conducción donde no se aplican las redes inteligentes. El caso (b) expone una situación en la que se modifica el estilo de conducción para evitar que la línea se sobrecargue por una capacidad limitada momentánea. Finalmente, el caso (c) corresponde a la transferencia de parte del consumo energético de la red eléctrica 2 a las redes eléctricas 1 y 3, debido a unos precios de la electricidad más altos en la red eléctrica 2.

Un concepto a tener en cuenta es el llamado *Smart Operation of the Rail Power System* dónde la electrónica de potencia tiene un papel fundamental debido a sus grandes avances: posibilidad de uso en alta tensión, transferencia de potencia de forma más eficiente y asequible... Con esta tecnología podemos realizar un control inteligente de los flujos de potencia. Se muestran a continuación dos conceptos diferentes para controlar los flujos de potencia (**Figura 18**).

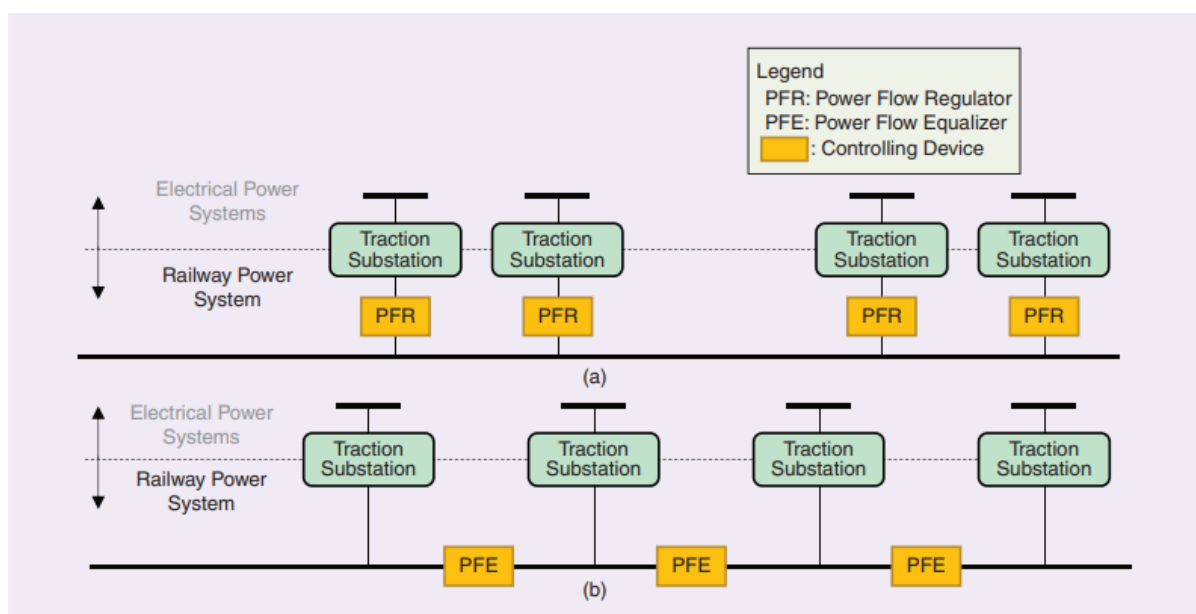


Figura 18: Estrategias de control para flujos de potencia. Fuente: IEEE.

En la solución (a), el flujo de potencia es controlado en cada punto de conexión a la catenaria mediante reguladores de flujo de potencia (PFR). Mientras que en la solución (b), los dispositivos de control son ecualizadores de flujos de potencia (PFE), los cuáles establecen los flujos de potencia entre secciones adyacentes, controlando indirectamente la energía suministrada por cada subestación de tracción. Independientemente de la solución adoptada, controlar los flujos de potencia puede ayudar a lograr los objetivos como minimizar pérdidas, reducir el coste de la electricidad, suavizar los perfiles de tensión, aumentar la fiabilidad de la red y evitar el desgaste excesivo de elementos de la infraestructura como transformadores y convertidores.

Para finalizar con este apartado, es necesario comentar como las redes inteligentes pueden ayudar a mejorar la interacción con otros sistemas de potencia. Una de las mejores características de las *smart grids* es la mejora del control que puede conseguirse, lo cual hace posible adaptar la operación en tiempo real a los

eventos venideros tanto fuera como dentro de la red eléctrica ferroviaria. Se muestran dos ejemplos a continuación:

- En caso de incidente en la red eléctrica en el que la capacidad haya sido reducida temporalmente, los operadores pueden priorizar a los clientes y pedir al ferrocarril que reduzca su consumo proveniente de subestaciones específicas.
- Con las redes inteligentes, los trenes podrían ayudar a equilibrar la generación y la demanda en el sistema eléctrico.

CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN A LA TRACCIÓN FERROVIARIA

3.1. Generalidades

Desde un punto de vista técnico, la alimentación eléctrica comprende todos los sistemas que posibilitan la transmisión de la energía eléctrica, permitiendo que llegue a los trenes con las condiciones deseadas para que éstos puedan alcanzar las prestaciones para los que han sido diseñados.

Antiguamente, las estrategias estaban enfocadas a criterios monopolistas. Actualmente, el diseño se hace bajo normativas europeas o internacionales e incluso, prestaciones de interoperabilidad. Siguiendo este criterio, la energía necesaria para el funcionamiento de los trenes, llega a través de instalaciones que se encargan de distribuir, transformar y acondicionarla para que pueda ser absorbida óptimamente.

3.2. Estaciones generadoras de energía

Actualmente, la electricidad es generada a una frecuencia fija: 50 Hz en Europa y 60 Hz en América. En el sector ferroviario, se desarrollaron diferentes sistemas de alimentación, combinando las ventajas del motor serie de CC con la capacidad de transformar la corriente alterna, dando lugar a tres problemas fundamentales:

- Elevado desgaste del colector.
- Nivel de interferencias elevado de tipo inductivo en los cables cercanos a la vía.
- Desequilibrio de la red trifásica de alta tensión, debido a la variable y vasta carga monofásica del sistema de tracción.

Dependiendo del país, podemos encontrar diferentes soluciones. Alemania e Italia utilizaron la alimentación monofásica a $1/3$ de la frecuencia industrial (50 Hz), denominada $16 \frac{2}{3}$ Hz, que se expandió a los países limítrofes. Mientras que en España, Francia y otros países se optó por utilizar la corriente continua. Posteriormente, Italia abandonó la idea de utilizar la corriente alterna y pasó a hacerlo en corriente continua.

El leyente puede preguntarse el porqué del uso de una frecuencia tan extraña como es $16 \frac{2}{3}$ Hz. Como se ha comentado anteriormente en este estudio, los primeros ferrocarriles eléctricos usaban motores serie de CC debido a que se ajustaba a la perfección a los requisitos dinámicos que la tracción ferroviaria precisaba. Para evitar problemas de aislamiento, la tensión utilizada era de 600-750 V, lo que requería subestaciones de tracción muy cercanas entre sí, lo que aumentaba el coste de la infraestructura significativamente.

Una idea fue alimentar al tren con alta tensión en CA, que podía ser reducida posteriormente a la tensión utilizada por los motores de tracción eficientemente. Sin embargo, era necesario alimentar al motor de CC usando rectificadores o construir un motor de CA capaz de adaptarse a las necesidades ferroviarias. Ambas ideas se intentaron, pero los rectificadores de arco de mercurio de la época, eran muy frágiles para ser transportados. Por lo tanto, era necesario un motor de CA capaz de funcionar como un motor serie de CC. La solución adoptada fue reducir la frecuencia industrial a $16 \frac{2}{3}$ Hz (o $50/3$ Hz), consiguiendo así, un motor con características similares a uno de CC.

Normalmente, cuando la alimentación se realiza a 50 Hz, la producción de energía se lleva a cabo en centrales pertenecientes a las compañías eléctricas, por el contrario, cuando la alimentación se hace a frecuencia reducida, suelen ser las administraciones ferroviarias las que se encargan de producir la energía demandada por los trenes.

3.3. Líneas de transporte de energía

El transporte de energía se realiza mediante líneas de características iguales o similares a las de las compañías eléctricas. Al igual que en las líneas convencionales, el dimensionamiento eléctrico depende de las potencias máximas de los tramos a alimentar en las condiciones más desfavorables y de la tensión de alimentación disponible por las compañías eléctricas. El dimensionamiento mecánico debe regirse a el Reglamento de Alta Tensión.

La tensión de alimentación dependerá de la demanda de potencia del ferrocarril, adaptándose normalmente a las tensiones de las líneas propiedad de la compañía

cercana, excepto en las líneas de alta velocidad, donde la demanda de potencia es tan alta que es necesario alimentar de las líneas de transporte y subtransporte (Tabla 2).

	TENSIONES UTILIZADAS
LÍNEAS CONVENCIONALES	20-25 kV 45 kV 60-66 kV
LÍNEAS ALTA VELOCIDAD	110 kV 132 kV 220 kV 380-400 kV

Tabla 2: Tensiones utilizadas en España para la alimentación de subestaciones de tracción.

Las líneas encargadas de alimentar las subestaciones de tracción son para uso exclusivo del ferrocarril debido a las variaciones de carga tan importantes a las que pueden estar sometidas. La construcción y titularidad de las líneas ha variado con el tiempo. A veces, la administración ferroviaria ha construido y mantenido las líneas, mientras que en otras ocasiones, la administración ferroviaria ha construido la línea cediendo su titularidad y mantenimiento a la compañía eléctrica. En otros casos, la propia compañía eléctrica ha construido la línea siendo, por lo tanto, la propietaria. En España, últimamente las administraciones ferroviarias ceden sus líneas a las compañías eléctricas.

Del mismo modo que las redes eléctricas convencionales, los sistemas ferroviarios se diseñan bajo las premisas de fiabilidad y seguridad, proyectando en paralelo las líneas de alimentación y las subestaciones de tracción, permitiendo que ante un fallo de una de ellas, el sistema pueda seguir funcionando con total normalidad. Por ello, se suelen interconectar las subestaciones entre sí, permitiendo la alimentación desde una misma fuente de energía diferentes subestaciones o cambiar la alimentación según necesidades.

3.4. Subestaciones de tracción

Denominamos subestación de tracción a las instalaciones que transforman la energía que reciben de la línea de transporte, a tensión muy elevada, en unas condiciones de voltaje, corriente y frecuencia apropiadas para su uso en el ferrocarril. Esto puede llevar a la conversión de un sistema trifásico a frecuencia

industrial a una corriente monofásica, a 50 Hz o frecuencia reducida, o a su rectificado para proporcionar corriente continua.

Normalmente, las subestaciones cuentan con una topología en barra simple, lo que permite un coste inferior respecto a otras configuraciones, al mismo tiempo que, proporciona una flexibilidad de operación más que suficiente a la subestación. Sin embargo, en casos en los que se alimente a más de una línea desde una misma subestación, podría ser recomendable, usar topologías más complejas como en anillo o en doble barra.

Habitualmente, las subestaciones se controlan mediante un sistema de telemandos desde el centro de control. Esto permite ejecutar maniobras en varias subestaciones de forma coordinada, adaptando así, la topología de la electrificación a las necesidades del momento.

Cada país ha fomentado más un sistema que otro, habiéndose normalizado las tensiones de alimentación siguientes (**Tabla 3**):

SISTEMA DE ELECTRIFICACIÓN	TENSIÓN NO PERMANENTE MÍNIMA $U_{\min 2}$ (V)	TENSIÓN PERMANENTE MÍNIMA $U_{\min 1}$ (V)	TENSIÓN NOMINAL U_n (V)	TENSIÓN PERMANENTE MÁXIMA $U_{\max 1}$ (V)	USO HABITUAL
CORRIENTE CONTINUA (VALORES MEDIOS)	400	400	600	720	Metropolitano
	500	500	750	900	Metropolitano
	1.000	1.000	1.500	1.800	Metro, tranvía
	2.000	2.000	3.000	3.600	Ferrocarril
CORRIENTE ALTERNA (VALORES EFICACES)	11.000	12.000	15.000	17.250	Ferrocarril
	17.500	19.000	25.000	27.500	Ferrocarril y AV

Tabla 3: Tensiones normalizadas según EN 50163.

En la figura 19 podemos ver que:

- Con el uso de CC, las instalaciones serán numerosas y complejas, con secciones elevadas, sobre todo en tensiones de 1.500 V.
- Usando corriente monofásica a 16 2/3 Hz y 15.000 V, no tendremos el problema mencionado en el punto anterior. Sin embargo, es necesario el uso de centros de conversión de frecuencia que son costosos y complejos.

- La corriente monofásica a frecuencia industrial es el sistema más económico, pero su uso debe ir encaminado a líneas de nueva construcción.

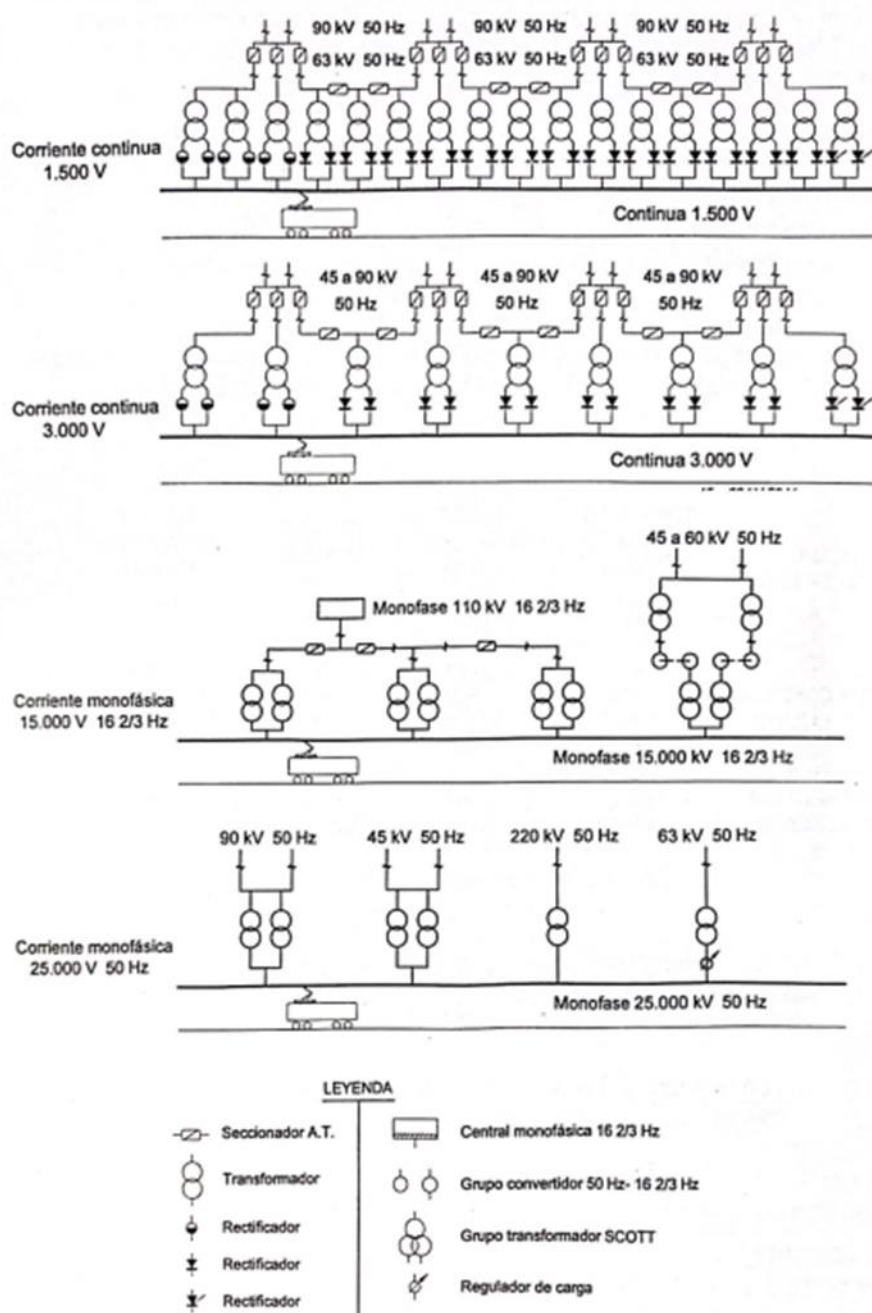


Figura 19: Distribución de las subestaciones dependiendo de su tipo. Fuente: Carmona Suárez.

La distribución de las subestaciones a lo largo de una línea dependerá de varios factores:

- Tensión del sistema de tracción.
- Disponibilidad de las líneas de alimentación.

- Potencia demandada.
- Corrientes de cortocircuito.

3.4.1. Subestaciones de tracción en corriente continua

Como se ha comentado anteriormente, una subestación de tracción es la instalación encargada del acondicionamiento de la energía eléctrica para que pueda ser utilizada por los trenes.



Figura 20: Subestación de tracción. Fuente: CYMI.

Las subestaciones de tracción suelen usarse en tranvías, metros y ferrocarril que no sean de alta velocidad. En el caso del ferrocarril de larga distancia siguen usándose en los países que utilizan este tipo de tracción de forma mayoritaria.

Este tipo de subestaciones funciona normalmente en paralelo entre dos subestaciones colaterales (alimentación en Π), en consecuencia, cada circuito o vía está alimentado por sus dos extremos, llevando a su vez, un sistema de desconexión automática y simultánea de los feederes que alimentan a un mismo tramo.

Los valores de tensión en la acometida de una subestación de tracción de corriente continua suelen ser de 15, 20, 25, 30, 45, 50 o 66 kV, obteniendo a la salida una tensión en CC de 750, 1.500 o 3.000 V, dependiendo del tipo de línea que

alimento. Las tensiones de salida son superiores a las teóricas, ya que hay que tener en cuenta las pérdidas en las líneas, por ejemplo, para una tensión nominal de 3.000V es necesario tener a la salida de la subestación unos 3.300 V.

En comparación con las subestaciones de tracción de CA, las subestaciones de CC son más complejas al necesitar de un puente rectificador que convierta la CA en CC. Además, si la subestación es reversible, esta debe poseer un inversor que permita devolver la energía eléctrica desde la catenaria hasta la red de distribución. Un inconveniente a tener en cuenta es la menor distancia entre subestaciones al utilizar tensiones menores. En redes metropolitanas de 600 V, la distancia entre subestaciones suele ser de entre 2 y 3 km. Para una red de cercanías con una tensión de 3.000 V, la distancia se eleva hasta los 10 km.

Para transformar la CA en CC, los sistemas más utilizados son los siguientes:

- Mediante máquinas rotativas.
- Ignitrones.
- Cubas de vapor de mercurio.
- Rectificadores de diodos de silicio.

A día de hoy, los más utilizados son los rectificadores de diodos de silicio, formando un rectificador de onda completa en puente de Graetz. Los rectificadores pueden acoplarse entre sí, en serie o paralelo, dependiendo del valor de tensión o corriente a obtener.

Las subestaciones de CC de ADIF suelen tener la siguiente composición (**Figura 21**):

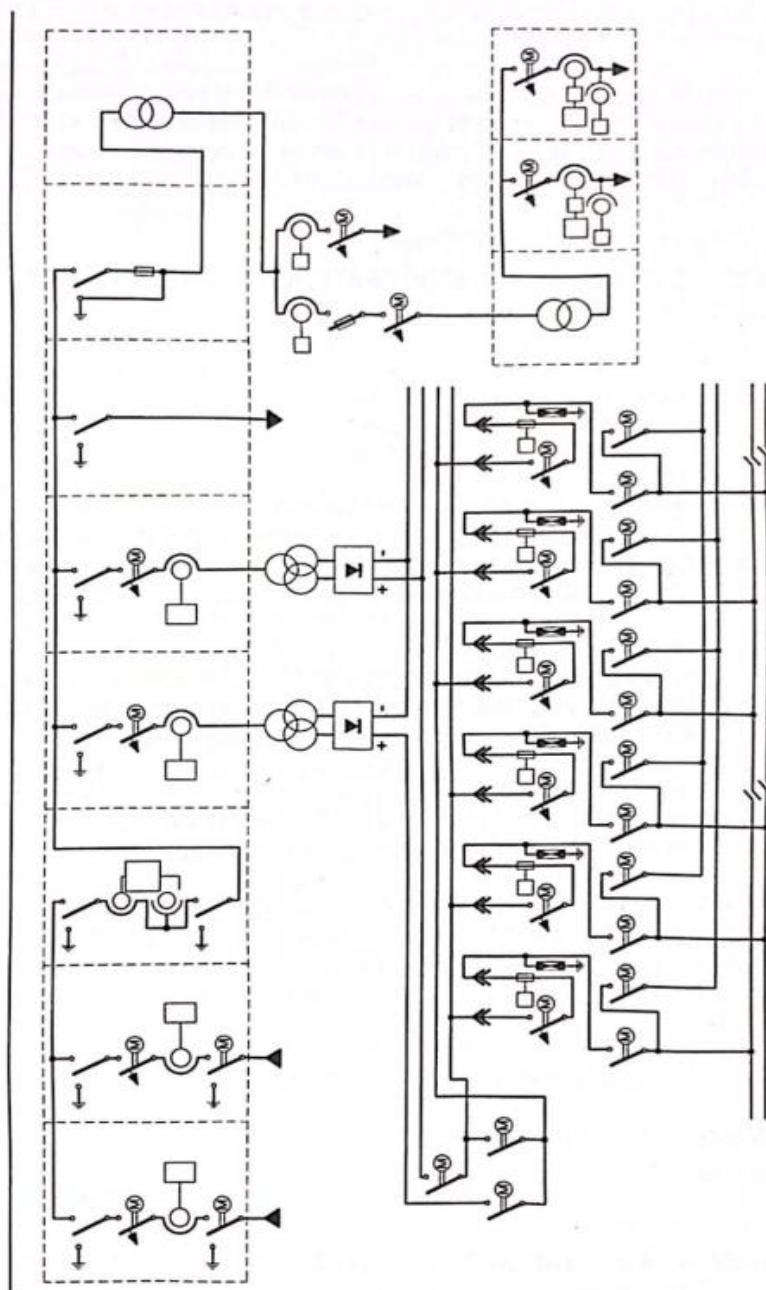


Figura 21: Esquema unifilar de potencia de una subestación de CC tipo ADIF. Fuente: ADIF.

3.4.1.1. Elementos de una subestación de tracción en corriente continua

- **Edificio de alterna:** En la mayor parte de las subestaciones de tracción con alimentación de 20-25 kV en alterna, existe un edificio el cual hospeda la aparamenta necesaria para la protección y medida en media tensión. En este edificio anexo y contenidos en celdas de celosía al aire, se encuentran los seccionadores, interruptores, transformadores de servicios auxiliares, autoválvulas, equipos de medida...

Si la tensión de alimentación es superior a la comentada anteriormente, el edificio de alterna se cambia por un parque de intemperie.

En la actualidad, suelen instalarse cabinas compactas que permiten, bien mediante aire o bien mediante SF₆, agrupar en el interior del edificio de continua todas las protecciones y medidas necesarias, evitando así diseñar y construir otro edificio anexo.

- **Parque de alta tensión o parque de intemperie:** Como se ha comentado en el punto anterior, para tensiones de alimentación superiores a 20-25 kV, existe un parque de intemperie constituido por pórticos y columnas (normalmente de celosía), el cuál cumple la misma función que el edificio de alterna.
- **Transformadores de tracción:** Adecuan las tensiones para el rectificador. Son varios los transformadores usados en las subestaciones de tracción de CC:
 - Transformadores para subestaciones de tracción tranviarias:
 - Cuentan con un solo secundario.
 - Suelen alimentar a líneas de 750 V, pueden encontrarse con una tensión de 1.500 V.
 - Normalmente se utilizan varios acoplados en paralelo.
 - Suelen tener una potencia de 1.000 kVA, 1.500 kVA o 2.200 kVA.
 - Transformadores para subestaciones de tracción ferroviarias:
 - Suelen contar con dos secundarios.
 - Las líneas que alimentan suelen ser de 1.500 V o 3.000 V.
 - Al igual que en el caso anterior, usan con frecuencia varios acoplados en paralelo.
 - La potencia suele ser de 3.300 kVA o 6.600 kVA.

Los transformadores de tracción ferroviaria disponen de un primario en estrella y dos secundarios, uno en estrella y otro en triángulo, consiguiendo así, un desfase de 30° para lograr una óptima rectificación de la corriente. En el caso de transformadores dedicados a la tracción tranviaria, al albergar solo un secundario, lo recomendable es hacerlos operar por parejas de

transformadores en los que el secundario de cada pareja cuente con un desfase de 30°.

Normalmente, los transformadores destinados a la tracción ferroviaria, usan refrigeración natural en aceite, sin embargo, últimamente se está incrementando el uso de transformadores secos, concretamente en aplicaciones tranviarias y ferroviarias hasta 3.300 kVA.

Para proteger al transformador ante cualquier anomalía, se protege al mismo con diferentes equipos. En el primario se instalan tres transformadores de intensidad con dos relés de fase de sobreintensidad y un relé térmico de línea además de un termómetro con termostato con dos estados: estado alarma y estado desconexión.

- **Transformador de servicios auxiliares:** Su principal objetivo es alimentar a los circuitos auxiliares de la subestación como el alumbrado, los cargadores de baterías, tensiones para señalización y control, tensiones para enclavamientos y telemandos... Normalmente cuentan con potencias de 160 o 240 kVA. La tensión eficaz de salida entre fases será de 230 V debido a la obligación de disponer de esta tensión sin necesidad de utilizar el neutro. Lo cual ocurre a raíz de la conexión del neutro a tierra. El neutro puede convertirse en conductor de retorno de la corriente de tracción accidentalmente, interfiriendo en la operación de la subestación. A día de hoy, es más habitual encontrar que la tensión de salida entre fases es de 400 V debido a las mejoras logradas en el circuito de retorno, pudiendo así, alimentar a los distintos equipos en trifásica con neutro.
- **Transformador de señales y enclavamientos:** Se encarga de alimentar a la línea de señales que entrega la energía requerida a los sistemas de señalización, caldeo y detección montados a lo largo del trayecto o trayectos colaterales, además de los enclavamientos eléctricos de las propias subestaciones. Comúnmente se utilizan transformadores de 25, 50 o 75 kVA.
- **Otros transformadores:** Además de los tipos nombrados previamente, existen otros de menor potencia que tienen como objetivo efectuar las

transformaciones convenientes para medir la energía y los sistemas de protección de la subestación.

- **Rectificador de potencia:** Es el encargado de convertir la CA proveniente de las redes de distribución a CC para su uso en los sistemas de tracción mediante diodos de silicio refrigerados por radiadores de calor de aluminio.

Existen dos tipos de rectificadores: de simple onda o de onda completa. El primero solo permite pasar un semiciclo, mientras que el segundo (también llamado puente de Graetz), permite pasar uno de ellos e invierte la posición del otro, consiguiendo así, que ambos semiperiodos estén en la misma posición. Así lograremos una onda compuesta por la envolvente de la CA, con ambos semiperiodos en un mismo lado. La corriente trifásica puede ser rectificada de la misma forma pero utilizando rectificadores trifásicos. En este caso, el rectificador estaría constituido por diodos formando un puente rectificador trifásico de onda completa.

Para conseguir un rectificador de onda completa, se requieren mínimo 6 diodos, uno por cada fase y sentido. Al poseer los diodos una alta tensión inversa, suelen usarse varios diodos en paralelo por cada sentido y fase. Por lo que dependiendo de la configuración utilizada podemos encontrar más o menos diodos (**Figura 22**).

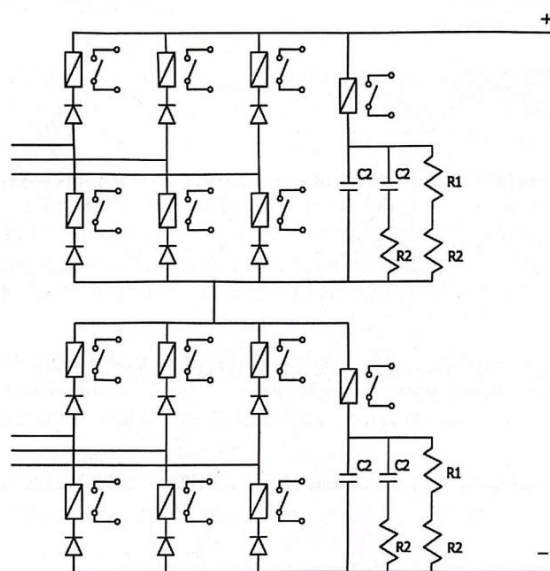


Figura 22: Ejemplo de un esquema de rectificador. Fuente: Carmona Suárez.

Cada diodo está protegido por un protistor, siendo este activado, cuando se perfora o fusione un diodo. Cuando se activa se excita un relé que ejecuta la apertura del disyuntor de protección.

Las sobretensiones originadas por la conmutación en el rectificador son limitadas por unos conjuntos formados por resistencias y condensadores (conjuntos RC) y los condensadores, a su vez, por protistores y resistencias limitadoras.

Para la medición de la tensión rectificada y filtrada son usados traductores de tensión. La intensidad es medida mediante un *shunt* colocado habitualmente en el negativo del rectificador.

- **Filtro de corriente:** Su función es conseguir un rectificado de mayor calidad sin picos que causen armónicos de elevado valor, se coloca después del rectificador, un alisador de corriente. El alisador de corriente se fundamenta en una bobina de aluminio de sección de espira igual o mayor a 800 mm² y entre 20 o 40 espiras. Actualmente, no siempre se instala en las nuevas instalaciones debido a que todos los trenes montaban motores de CC e interesaba que la corriente fuera lo más alisada posible. Actualmente, la flota de trenes está siendo actualizada y se está imponiendo el uso de motores asíncronos trifásicos alimentados en CA mediante la regulación de la frecuencia y la tensión con sistemas electrónicos en los que tiene poco impacto el grado de rizado de la CC.
- **Filtro de armónicos:** Los armónicos generados debido a la rectificación, son reducidos colando un filtro de armónicos, entre positivo y negativo y a la salida del rectificador. El filtro de armónicos permite el paso a través de él y hacia el negativo del rectificador de los armónicos de corriente y tensión, los cuáles van ligados a la corriente rectificada. Los armónicos repercuten sobre la calidad de los sistemas de comunicaciones, especialmente, si están compuestos por cables de cobre. Está formado por circuitos LC sintonizados con el fin de cortocircuitar las frecuencias perturbadoras. El *shunt* resonante RC comprende dos circuitos formados por una reactancia L y una capacidad C en serie, ajustados para las frecuencias de 600 y 1.200 Hz respectivamente (**Figura 23**).

- El filtro de 1.200 Hz está compuesto por L1-C1.
- El filtro de 600 Hz está compuesto por L2-C2.
- R1 es la resistencia de descarga.

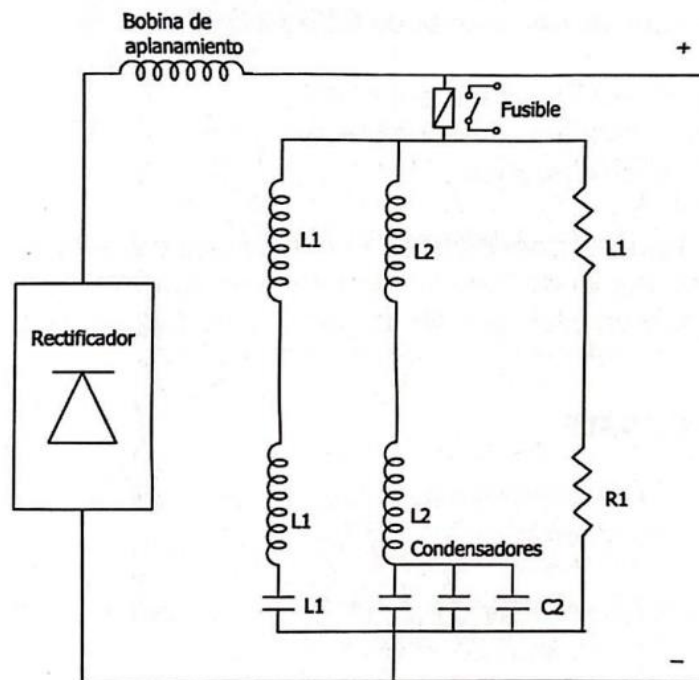


Figura 23: Filtro de armónicos. Fuente: Carmona Suárez.

Actualmente, el mayor uso de fibra óptica y sistemas de modulación codificados hacen que los filtros de armónicos sean cada vez menos utilizados. Aun así, es de vital importancia que el diseño de la instalación se haga de forma que se reduzcan el nivel de armónicos, ya sea aguas debajo de la subestación como aguas arriba de la misma.

- **Disyuntores extrarrápidos:** Tras el rectificador, existen unos interruptores de CC capaces de accionar en carga, con gran capacidad de ruptura y telemandados. Se les llama extrarrápidos debido a su rapidez de respuesta, de unos 50 ms. Son los que a través de una barra común (barra ómnibus), distribuyen la corriente a los diferentes circuitos que se encargan de suministrar energía a la catenaria.

Llevar incorporados circuitos capaces de detectar cortocircuitos lejanos, sobrecargas, e incluso posibles derivaciones, con el objetivo de interrumpir el paso de la corriente cuando exista alguna anomalía.

Existen unas protecciones de línea ligadas con el disyuntor extrarrápido que son las siguientes:

- Por sobrecarga: Cuando el disyuntor se encuentra cerrado, coexisten dos fuerzas de sentido opuesto. Una de ellas es originada por un muelle antagonista, dispositivo mecánico que tiene a abrir el disyuntor, y otra fuerza causada por una bobina de mantenimiento que tiene a cerrar el disyuntor. Si no existe una circulación de corriente en el sistema de alimentación a la bobina, el disyuntor abre el circuito por acción del muelle antagonista. Asimismo, la corriente que fluye por el disyuntor, genera un campo eléctrico que puede ser regulable mediante el control de la proximidad de un devanado sobre dicho campo, que colocado de forma adecuada, hace que se oponga al campo generado por la corriente de mantenimiento. Cuando se pierde el equilibrio entre el muelle antagonista y la bobina de mantenimiento, debido al campo producido por la corriente que fluye por el disyuntor, el mismo abre. En este caso, por sobrecarga respecto al valor al que se haya ajustado anteriormente.
- Por crecimiento rápido de la corriente: Ciertos disyuntores albergan un *shunt* magnético, en paralelo con la bobina de mantenimiento, que propicia la apertura del disyuntor cuando sucede un incremento brusco de la intensidad. El disyuntor debe estar configurado para funcionar correctamente entre los requisitos de tracción y la detección de posibles cortocircuitos.
- Por arrastre entre disyuntores: Cada tramo de catenaria está alimentado por dos disyuntores, cada uno ubicado en una subestación distinta, es de vital importancia que cuando exista alguna anomalía en la línea o en la subestación, desconecten ambos equipos y no solo uno de ellos. Los equipos de arrastre tienen integrada una lógica que es capaz de detectar cual es el elemento ligado en la subestación colateral al disyuntor que ha desconectado en origen, gestionar si hay en la propia subestación algún disyuntor que esté suministrando energía en paralelo al tramo de catenaria, y transmitir, en la tesitura en

que la subestación adyacente esté fuera de servicio, el arrastre hasta la siguiente en funcionamiento.

- **Pórtico de *feeder*:** Se trata de una instalación que se ubica generalmente en el exterior de las subestaciones. Es de gran utilidad en casos de mantenimiento o anomalía, ya sea de la línea o de la subestación, para seguir alimentando al resto de la instalación, haciendo estas operaciones mediante seccionadores de *feeder* y seccionadores de *by-pass*.



Figura 24: Pórtico de feeder de la subestación de Grañena. Fuente: Manuel Miró.

3.4.1.2. Protecciones de las subestaciones

Aparte de las protecciones comentadas en los apartados anteriores, existen más protecciones que es necesario comentar en este estudio:

- **Relés de puesta a masa:** Detecta el paso de intensidad por un cable determinado, avisando a partir del nivel de protección en que se haya ajustado. Son usados en los disyuntores extrarrápidos y en rectificadores para detectar el paso de corriente entre tierra y estructura metálica, también en pórticos de *feeder* y en tierras protegidas. Se usan tanto en CC como en CA.

- **Equipos de diferencia de tensión:** A diferencia de la protección anterior, este tipo de protección se usa solo en sistemas de corriente continua. Las subestaciones de CC se conectan a las líneas en paralelo, por lo tanto, cuando la subestación se conecta a una línea que está previamente en tensión, es necesario que la tensión de la subestación sea igual o muy parecida a la de la línea. Esta protección compara la tensión de la subestación con la tensión de la línea. Si se encuentra dentro de los márgenes establecidos, el disyuntor extrarrápido procederá a cerrarse. Sin embargo, si el valor no se encuentra dentro de los límites establecidos, se suspende el proceso de acoplamiento.
- **Equipo de prueba de línea:** Se utiliza cuando se pretende energizar una línea que se encuentra sin tensión. Antes de cerrar el disyuntor, se pone en marcha una prueba para comprobar que la línea está aislada, o lo que es lo mismo, que no esté en cortocircuito. Dicha prueba consiste en alimentar la línea con una tensión reducida y medir la corriente que fluye. Asimismo, se puede suministrar la tensión nominal a la línea a través de una resistencia de elevado valor, del orden de 1 MΩ, y ver que intensidad fluye. Si el valor de la corriente supera cierto valor, se entiende que la línea está en cortocircuito y no se puede energizar.
- **Equipo de protección de derivación:** Se usa para detectar derivaciones entre la catenaria y cualquier elemento metálico o cualquier elemento que deba estar puesto a tierra.

3.4.1.3. Red de tierras

Según la norma **MIE RAT 13**, todas las tierras han de formar un único circuito, ya estemos ante una subestación de CC o de CA. Las elevadas potencias demandadas por los ferrocarriles y la reducida tensión de las líneas, hace que existan grandes corrientes, por lo tanto, los circuitos y la resistencia de las tierras tienen que ser eficaces para garantizar la protección de la subestación.

Para construir una red de tierras de calidad los soportes, pilares y elementos metálicos del edificio de la subestación han de estar conectados eléctricamente, formando una superficie equipotencial que se unirá al pozo de tierra general de la

subestación, también llamado pozo de retorno. Aparte del negativo del rectificador, se conectarán los siguientes circuitos de tierras al pozo:

- Circuitos de tierra provenientes del edificio o parque de intemperie de CA.
- Circuitos de retorno provenientes de los carriles.
- Circuitos de tierra provenientes del edificio de continua.
- **Tierras de alterna:** Las tierras de alterna son las tierras de la estructura metálica del parque exterior, tierra de protección de autoválvulas, verjas de protección...
- **Retorno de carriles:** Al pozo de retorno se conectarán los cables aislados procedentes de los carriles.
- **Tierras de continua:** Desde el edificio de continua se conectarán las tierras protegidas y sin proteger. Las tierras protegidas son las correspondidas al dintel, tanto superior como inferior, tierra de disyuntores extrarrápidos, tierra del pórtico de *feeder*... Las tierras sin proteger son las correspondientes a la estructura metálica del edificio.

3.4.1.4. *Telemando de subestaciones*

Cualquier subestación de tracción, ya sea en CC o en CA, pueden ser maniobradas de forma remota desde un centro de control llamado Centro de Telemando de Subestaciones. Para hacer llegar la información que queremos leer necesitamos unos equipos periféricos situados en cada subestación. Estos equipos se encargarán de enviar la información correspondiente desde cada subestación al centro de control. Los telemandos realizan las siguientes tareas:

- Control y supervisión de las subestaciones y centros de transformación con todos sus elementos asociados: seccionadores, rectificadores, interruptores...
- Control y supervisión de los sistemas de comunicaciones, ordenadores...
- Mantenimiento de una BDD con los eventos y alarmas sucedidas en el telemando.

El *modus operandi* de este sistema es un protocolo de pregunta-respuesta. El centro de control va preguntando a cada subestación, haya habido o no variaciones

en los valores que nos interesa leer, pero siempre contesta. Si no responde, se le hará saber al operador de que en la subestación interrogada existe algún fallo y debe ser tratado convenientemente.

3.4.1.5. Subestaciones reversibles

Con el objetivo de incrementar la eficiencia en el sector ferroviario, los ingenieros pensaron en aprovechar la reversibilidad existente motor-generador. Gracias a esto, podemos conseguir las siguientes ventajas:

- Velocidad constante en pendientes sin necesidad de utilizar el freno mecánico.
- Al usar menos el freno mecánico, mayor vida y menor desgaste del mismo.
- Reservar el uso del freno mecánico en situaciones más necesarias, al mantener el mismo a menores temperaturas.

La energía eléctrica generada puede usarse de las siguientes formas:

- Como freno reostático, en el cual la energía generada en la frenada se disipa en forma de calor.
- Como freno regenerativo, devolviendo la energía generada a la catenaria. Esta energía puede ser utilizada por los trenes activos en los alrededores. En caso de que haya un excedente de energía:
 - Dicha energía se convertirá en calor bien en el tren, o bien, en la subestación.
 - La energía que llegue a las subestaciones puede ser devuelta a la red eléctrica para que sea consumida por terceros.
 - Puede ser almacenada en diferentes tecnologías de almacenamiento. Las más utilizadas actualmente son: baterías, supercondensadores y volantes de inercia.

Si la alimentación es en CA, la devolución puede ser instantánea. Sin embargo, para sistemas en CC es necesario disponer de inversores en las subestaciones para la conversión de CC en CA (**Figura 25**).

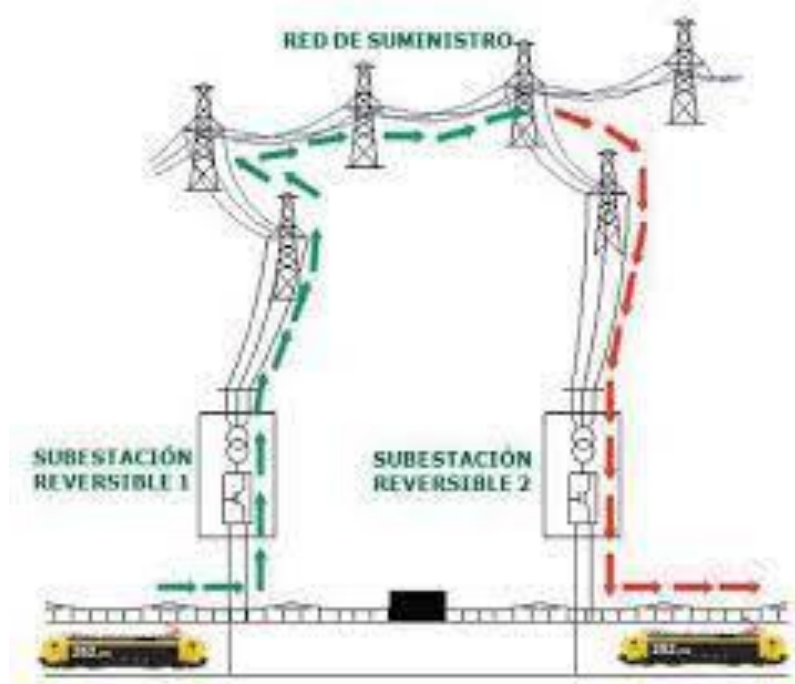


Figura 25: Esquema de una subestación reversible. Fuente: Vía libre.

Para terminar con este subapartado, es importante comentar los límites técnicos reglamentarios de este tipo de práctica:

- Cuando haya disyuntores abiertos en las subestaciones o un cortocircuito en el tramo en el que se encuentra el tren, no se podrá utilizar la recuperación de la energía.
- Si la línea es incapaz de absorber la energía generada.
- La tensión máxima de la energía recuperada no superará los límites de $U_{m\acute{a}x2}$ indicados en la norma **UNE-EN-50163**.

3.4.2. Subestaciones de tracción en corriente alterna

El desarrollo de sistemas de alta velocidad ha revolucionado el transporte ferroviario en muchos países, proporcionando una alternativa eficiente y rápida para viajes de media y larga distancia. Estos trenes ofrecen ventajas significativas en términos de tiempos de viaje más cortos, mayor comodidad para los pasajeros y una opción más sostenible en comparación con otros medios de transporte, al reducir la congestión en carreteras y la emisión de gases de efecto invernadero.

Para conseguir velocidades tan altas, es necesario consumir una elevada cantidad de potencia. Para evitar caídas de tensión y densidades de corriente en los

conductores excesivas, la tensión aplicada a la catenaria debe ser lo suficientemente elevada.

Para conseguir este propósito, se utiliza un sistema que alimente a la catenaria con 25 kV en CA. Obteniendo una tensión lo suficientemente baja para que los motores y electrónica de regulación de velocidad puedan operar con ella y lo suficientemente elevada para que las pérdidas por efecto Joule sean bajas.

Si comparamos la catenaria de una línea de AV y una convencional, la cantidad de metal (cobre o aleaciones del mismo con otros metales) en la AV es un 66% menor que en el sistema convencional. La distancia entre subestaciones será mayor en los sistemas de 25 kV debido a menores caídas de tensión respecto a la electrificación en 3.000 V, por lo tanto, serán necesarias menos subestaciones, reduciendo así el coste final de la línea. La electrificación convencional solo cuenta con dos ventajas: produce menos perturbaciones en la red eléctrica, al alimentarse con una red trifásica, y puede abastecerse con alimentaciones de menor tensión. En AV, las acometidas se abastecen con tensiones, de como mínimo 110 kV para el sistema 1x25 kV, y 220-400 kV para el sistema 2x25 kV, que no son tan frecuentes y deben hacerse cuidadosamente si queremos evitar desequilibrios en la red de transporte.

3.4.2.1. Sistema de alimentación en 1x25 kV

Este sistema alimenta la catenaria con 25 kV mediante transformadores monofásicos de relación AT/25 kV, conectados a una red eléctrica de muy alta tensión, debido a la alta potencia de cortocircuito y fiabilidad en el suministro requerida. Suelen conectarse a redes de 220 o 400 kV. El primario de dicho transformador está alimentado por dos fases de la compañía eléctrica suministradora. En el secundario observamos también dos fases: una de ellas conectada a la catenaria y la otra a los carriles y a tierra (**Figura 26**).

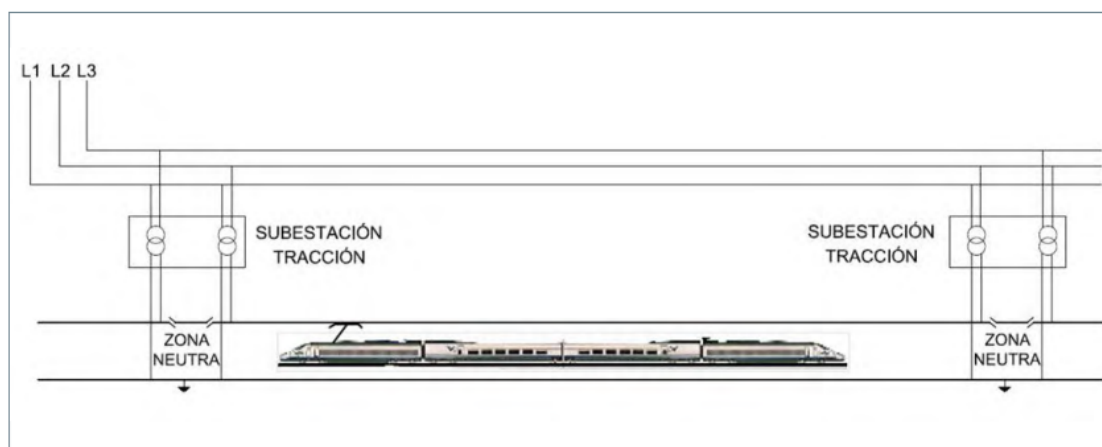


Figura 26: Sistema de alimentación 1x25 kV. Fuente: Técnica industrial.

La corriente seguirá el siguiente camino: saldrá de una fase del transformador, seguirá por la catenaria, pasará por los motores de los trenes y regresará a la otra fase del transformador mediante los carriles y tierra. El retorno de la corriente se realiza fundamentalmente por los carriles. Sobre un 70% de la corriente vuelve por el carril, un 10% lo hace por capas más profundas y el 20% restante por capas más superficiales, causando perturbaciones en los cables de comunicación y señalización que se encuentran cerca de la vía.

Al igual que en el sistema 2x25 kV, la catenaria se secciona en tramos o cantones eléctricos. Estando cada tramo alimentado por un transformador de tracción, conectado a unas fases distintas a la de los tramos contiguos. Con esta práctica se procura que el desequilibrio generado en la red de AT sea lo menor posible.

Para que el acoplamiento entre diferentes subestaciones sea exitoso, es necesario establecer unos tramos sin tensión, llamados zonas neutras, circulando el tren por su propia inercia. Esto se debe a que, al trabajar en CA, las subestaciones consecutivas pueden no contar con el mismo ángulo de fase. En CC, no tendremos este inconveniente.

Existen dos tipos de zonas neutras:

- **Zona neutra de subestación:** Cuenta con una longitud de 200 metros. Evita que los vehículos cortocircuiten la catenaria con los pantógrafos delantero-posterior.

- **Zona neutra inter-subestaciones:** Esta zona neutra se encarga de dividir eléctricamente los tramos alimentados por transformadores de subestaciones distintas.

La distancia media entre subestaciones es de 40 km aproximadamente. Para disminuir las perturbaciones producidas por las corrientes de retorno, puede implementarse un circuito con cable de retorno.

Este sistema de alimentación fue el utilizado en el trayecto Madrid-Sevilla, el cual dio paso a la alta velocidad en nuestro país.

3.4.2.2. Sistema de alimentación dual 2x25 kV

Este sistema supone un gran avance tecnológico en comparación con el anterior y es cada vez más utilizado a nivel mundial. Se alimenta de dos fases de la red de transporte. Sin embargo, el secundario cuenta con tres tomas. Las dos fases se conectan, una a la catenaria y otra al llamado *feeder* negativo. La otra toma se conecta en medio del secundario y a los carriles y tierra. Consiguiendo así, una tensión de 25 kV entre catenaria/*feeder* y tierra y una tensión de 50 kV entre catenaria y *feeder* negativo. Las tensiones se encuentran desfasadas 180° eléctricos (Figura 27).

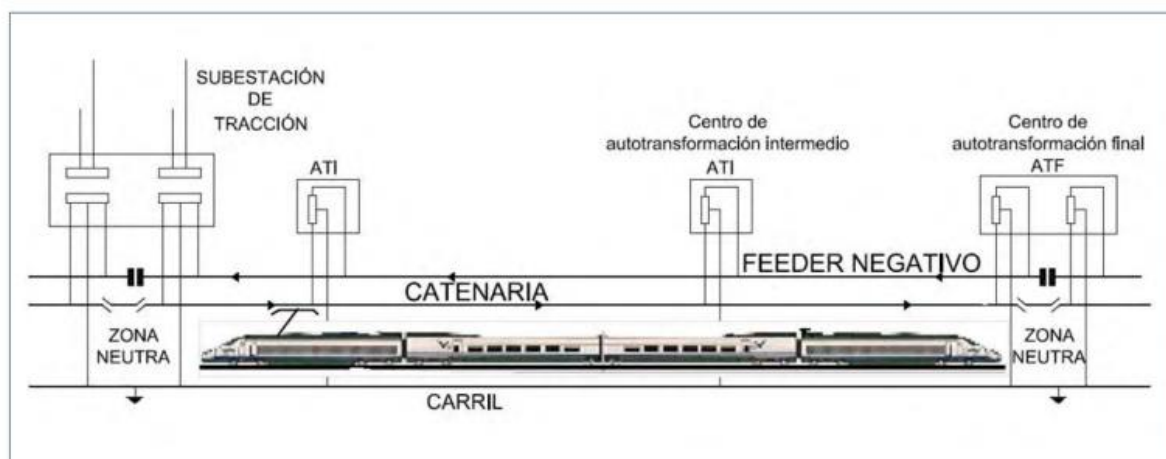


Figura 27: Sistema de alimentación 2x25 kV. Fuente: Técnica industrial.

El cantonamiento del *feeder* negativo y la catenaria es exactamente igual que en el sistema 1x25 kV.

Para mantener la tensión en la línea y conseguir una redistribución de las corrientes de retorno adecuadas, es necesaria la instalación de autotransformadores cada 10 km aproximadamente. Estos centros de transformación no requieren de acometidas de alta tensión de la compañía suministradora, si no que se alimentan mediante el propio sistema de electrificación (*feeder* y catenaria). Consiguiendo así, eludir tendidos de líneas de AT y duplicar las distancias entre subestaciones de tracción, de forma que se disminuyen a la mitad las acometidas necesarias para dichas subestaciones. Un extremo de la bobina del autotransformador se conecta ala catenaria y el otro al *feeder* negativo. La toma media al carril y a tierra (**Figura 28**).

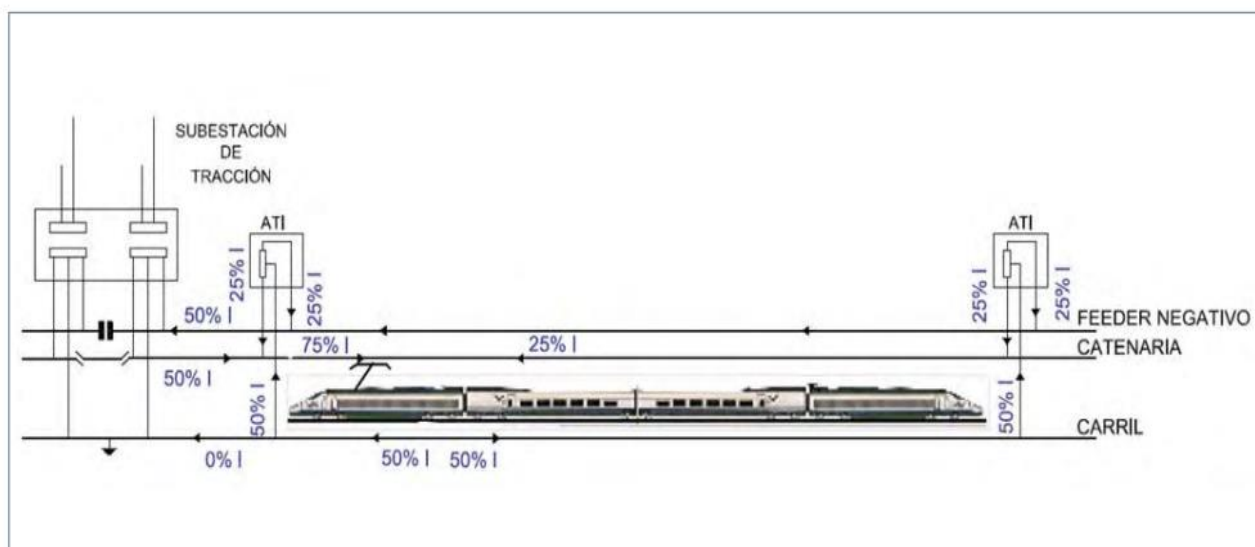


Figura 28: Distribución de corrientes en el sistema 2x25 kV. Fuente: Técnica Industrial.

Por lo tanto, existen dos circuitos:

- **Zona entre autotransformadores:** Es la zona donde consume energía el tren. El tren es alimentado por 25 kV (entre catenaria y carril). La corriente fluye por la catenaria, atraviesa los motores del ferrocarril y vuelve a la toma central de los autotransformadores situados a cada lado. El valor de la intensidad suministrada por cada autotransformador y que regresa al mismo, es función inversa de la distancia a la que se encuentre el tren del autotransformador.
- **Zona desde la subestación hasta el autotransformador inmediato anterior a la posición del tren:** Este circuito, a diferencia del anterior, está formado por la catenaria y el *feeder* negativo, pero no la toma central del

transformador. Por lo tanto, la tensión entre catenaria y *feeder* será de 50 kV. Consiguiendo así, que a igualdad de potencia, la intensidad se reduce casi a la mitad en comparación con el sistema 1x25 kV. A su vez, la caída de tensión también se verá reducida casi a la mitad y las subestaciones pueden distanciarse casi el doble que en un sistema 1x25 kV.

3.4.2.3. Comparación entre los sistemas 1x25 kV y 2x25 kV

A continuación, se va a llevar a cabo una comparación entre ambos sistemas.

Desequilibrios en la red de AT

En lo que respecta a los desequilibrios de la red de alta tensión, el sistema 1x25 kV es más beneficioso debido a que requiere de un mayor número de conexiones y de menor potencia, haciendo que el desequilibrio de fases sea menor.

Subestaciones de tracción

Como se ha comentado en los apartados anteriores, las caídas de tensión serán mayores en el sistema 1x25 kV, por lo que será necesario construir más subestaciones que en el sistema 2x25 kV. Sin embargo, el sistema 2x25 kV requiere de la instalación de autotransformadores para su funcionamiento para redistribuir las corrientes de retorno.

Una subestación 2x25 kV será más costosa que una que opera con el sistema 1x25 kV, debido a la necesidad de utilizar transformadores más potentes y una mejor aparamenta de media tensión.

Caída de tensión en la catenaria

Mientras que en el sistema 1x25 kV la caída de tensión es superior, siendo esta proporcional a la distancia entre el tren y la subestación, en el sistema 2x25 kV depende solamente de la posición del tren, a causa de los autotransformadores existentes.

Pérdidas de potencia

Al reducir la corriente a casi la mitad, la pérdida de potencia será el doble en un sistema 1x25 kV en comparación con el 2x25 kV. Sin embargo, al tener mayor

potencia las subestaciones 2x25 kV y poder alimentar a más trenes al mismo tiempo, las pérdidas de potencia pueden ser similares.

Perturbaciones electromagnéticas

Para el sistema 1x25 kV encontramos la problemática de las perturbaciones debido a la inmensa cantidad de corriente que circula por las capas más externas del terreno (aproximadamente el 20%), lo que causa perturbaciones en los cables de telecomunicaciones, haciendo necesario su apantallamiento. Otra solución sería electrificar en CC a las entradas de las ciudades como se hizo en la línea Madrid-Sevilla.

En el sistema 2x25 kV apenas existen perturbaciones electromagnéticas debido a que circula muy poca corriente entre los carriles entre la subestación y el primer autotransformador que haya antes del tren.

Operación y mantenimiento

Aunque el sistema 1x25 kV cuente con el doble de subestaciones, es cierto que si nos centramos en un tramo de 70 km por ejemplo, encontraremos las siguientes peculiaridades:

- En el sistema 2x25 kV contaremos con una subestación de tracción, pero seis centros de autotransformación. Lo que suma un total de siete instalaciones.
- En el sistema 1x25 kV serán requeridas dos subestaciones de tracción. Lo que suma un total de dos instalaciones.

Por lo tanto, aunque pueda parecer que el sistema 1x25 kV tiene mayor mantenimiento, no es así.

El funcionamiento del sistema 1x25 kV es mucho más sencillo que el sistema 2x25 kV.

A modo de resumen, se expone la siguiente tabla (**Tabla 4**).

Características principales	Sistema 1X25	Sistema 2X25
Complejidad de la instalación	Baja	Alta
Distancia entre subestaciones	30-40 km	60-80 km
Potencia instalada	2x30 MVA (habitualmente)	2x60 MVA (habitualmente)
Autotransformadores	No	Cada 10-15 km
Impedancia en la LAC	Alta	Baja
Caída de tensión en la LAC	Alta	Baja
Perturbaciones electromagnéticas en otras instalaciones	Alta	Baja
Complejidad del mantenimiento	Baja	Alta

Tabla 4: Comparación de los sistemas 1x25 kV y 2x25 kV. Fuente: Técnica Industrial.

3.4.2.4. Configuración eléctrica de la subestación

Independientemente del sistema 1x25 kV o 2x25 kV, una subestación de tracción de CA, se diferencia en las siguientes zonas:

- Zona de parque exterior de la subestación.
- Zona de 25 kV.
- Zona de acometida a catenaria.

Una subestación de tracción cuenta con los siguientes elementos (**Figuras 29 y 30**):

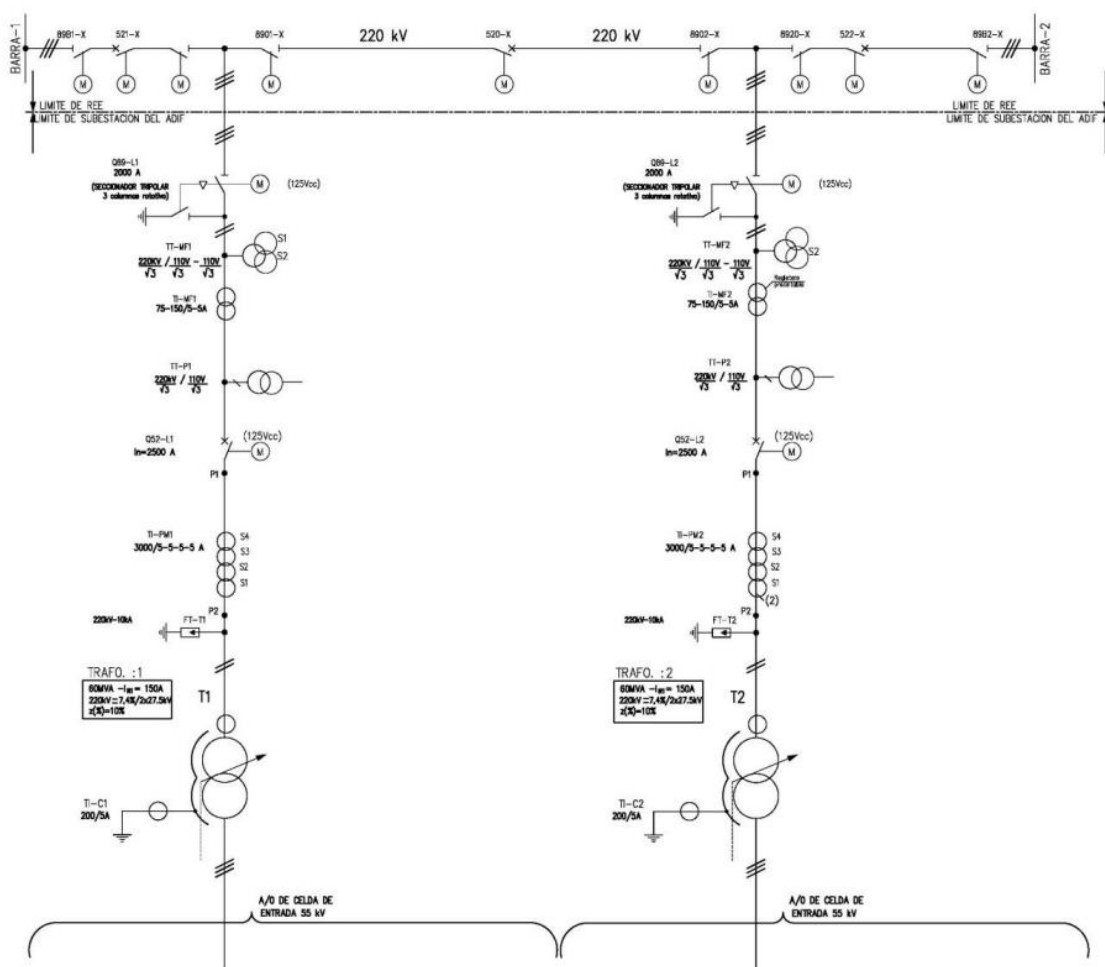


Figura 29: Esquema unifilar de 220 kV de una SET de 2x25 kV hasta los transformadores de tracción. Fuente: Universidad de Comillas.

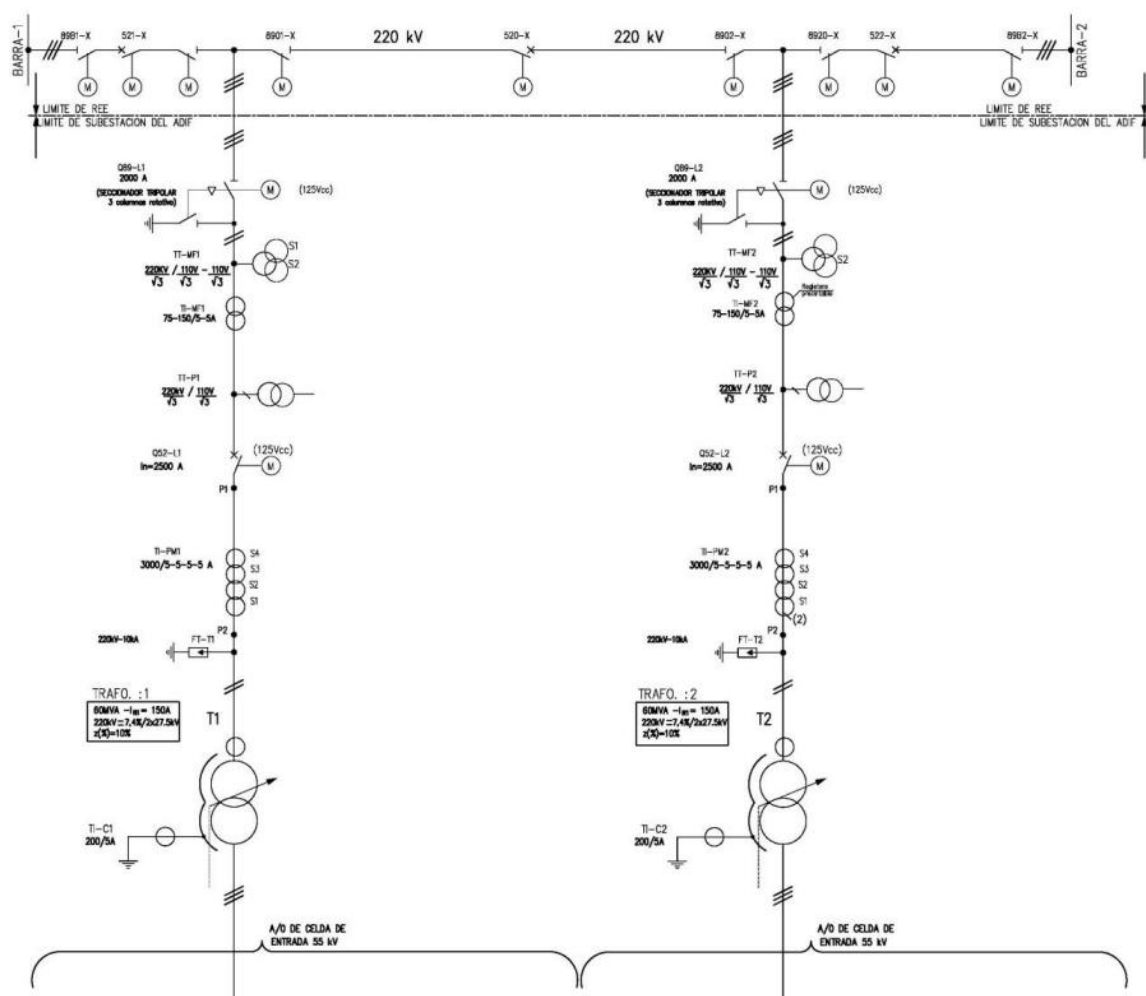


Figura 30: Esquema unifilar de 55 kV de una SET de 2x25 kV hasta la salida al pórtil de feeder. Fuente: Universidad de Comillas.

3.4.2.4.1. Zona de parque exterior de la subestación

Este espacio abarca desde la acometida de línea de AT (usualmente a 132, 220 o 400 kV) hasta el transformador o transformadores de potencia. El equipamiento utilizado en esta zona es igual para el resto de subestaciones, eso sí, respetando las distancias de aislamiento y equipamiento utilizado según el nivel de tensión. Los equipos que conforman este espacio son:

- **Aislador de apoyo y seccionador de entrada de línea:** Las tres fases procedentes de la compañía eléctrica acometerán a un pórtil. La acometida al pórtil se hará con las tres fases usando los aisladores de anclaje correspondientes. Aunque las tres fases lleguen al pórtil, serán dos las que sigan hacia el seccionador de entrada.

El seccionador de entrada es tripolar (aunque solo se usen dos polos) y de intemperie. El seccionador posee cuchillas de puesta a tierra en el lado de salida hacia el transformador, consiguiendo así, un enclavamiento mecánico entre las cuchillas de puesta a tierra y las principales.

- **Transformadores de medida de tensión:** Para llevar a cabo la medida fiscal principal, se instalan dos transformadores de tensión monofásicos en cada entrada de las dos líneas que entran a la subestación. Se tratan de transformadores de tensión inductivos, que cuentan con solo un secundario, para conexión fase tierra con circuito inductivo antirresonante.
- **Transformadores de medida de corriente:** Al igual que los transformadores de tensión, se instalarán dos transformadores de medida de intensidad en cada una de las dos entradas de la línea. Estos transformadores disponen de un solo secundario, en baño de aceite y para conexión fase-tierra.
- **Transformadores de tensión de medida y protección:** En cada entrada de las dos fases se implementan dos transformadores de tensión. Dispondrán de tres secundarios, siendo dos de ellos para medida y uno para protección. Dichos transformadores serán inductivos para conexión fase-tierra con circuito inductivo antirresonante.
- **Interruptor automático de protección de línea y del transformador de potencia:** Este interruptor será el encargado de proteger tanto la línea de alimentación como el propio transformador de tracción. El interruptor a utilizar será bipolar, formado por dos columnas de accionamiento por polo (para el cierre y la apertura), y se encontrará dentro de una cámara de SF₆.
- **Transformadores de intensidad de protección:** En cada una de las protecciones del transformador, se dispondrán dos transformadores monofásicos de corriente. Poseerán cinco secundarios: dos para protección, dos para medida y otro para las protecciones del lado de la compañía eléctrica.
- **Autoválvulas del transformador (AT):** Se instalarán dos pararrayos autovalvulares de óxido de zinc (ZnO), colocados en cada entrada de las dos

acometidas a la subestación de tracción y cerca de los transformadores de tracción para protegerlos frente a sobretensiones.

- **Transformador de tracción:** Para el sistema 2x25 kV, cada subestación suele equipar dos transformadores de 60 MVA. La tensión del primario dependerá de la acometida (220 o 400 kV) y el secundario será de 2x27,5 kV, para compensar las caídas de tensión.
- **Embarrados de parque exterior.**

3.4.2.4.2. Zona de 25 kV

Se trata de la zona correspondiente entre la salida del transformador y el pórtico de acometida a catenaria. El equipamiento que corresponde a esta zona, suele estar localizado en un edificio de control. En este edificio se encuentran el control de la subestación, las cabinas de media tensión, los transformadores de servicios auxiliares, además de los sistemas de comunicaciones y control de la subestación.

- **Aisladores de apoyo:** Equipamiento donde se colocan el embarrado en la salida de bornas del transformador.
- **Autoválvulas en el lado de 25 kV:** Poseen el mismo funcionamiento que las autoválvulas de AT, pero en este caso, en el lado de MT.
- **Cabinas de MT en SF₆:** Se encargan de la distribución de la energía eléctrica a catenaria desde el secundario del transformador de potencia.
- **Embarrados bipolares.**
- **Seccionador.**
- **Interruptor automático.**
- **Transformadores de servicios auxiliares:** Para cada subestación se instalarán dos transformadores monofásicos de 250 kVA cada uno. El primario de cada transformador se conectará a la salida de la celda de servicios auxiliares, transformando los 27,5 kV a 230 V. En caso de avería de uno de ellos, se pondrá en funcionamiento el otro transformador.

3.4.2.4.3. Zona de acometida a catenaria

Se trata de la zona desde la salida de las celdas de protección y seccionamiento hasta la acometida a catenaria.

Esta zona se compone del pórtico de salida a catenaria y *feeder*. Se trata de una estructura metálica, que se ubica cerca de las vías, que recibe los conductores que salen de las celdas de seccionamiento y protección y los conecta a las instalaciones de catenaria mediante los apropiados seccionadores.

Para cada vía, se colocarán en el pórtico: un seccionador bipolar, dos autoválvulas y dos aisladores.

3.4.2.5. Relés de protección

- **Relé de sobreintensidad (Código ANSI 51):** Abren el interruptor correspondiente al fluir una intensidad superior al valor prefijado por el elemento a proteger. Pueden funcionar de manera instantánea, con retardo de actuación fijo o con temporización de tiempo inverso.
- **Relé de sobretensión (Código ANSI 59):** Operan igual que el relé de sobreintensidad, pero en este caso, la magnitud medida es la tensión.
- **Relé de protección direccional (Código ANSI 67):** Abren el interruptor oportuno cuando la corriente que fluye en un sentido determinado por el elemento eléctrico a proteger sobrepasa un valor predefinido de arranque.
- **Relé de protección diferencial (Código ANSI 87):** Actúan ante una falla interna en el equipamiento a proteger. Para lograr esto, se colocan dos relés de protección diferencial, uno en cada extremo del equipamiento en cuestión. Ambos relés están unidos mediante fibra óptica, ondas de radio etc. Si la corriente medida a la entrada es diferente a la salida es debido a una falla interna, actuando entonces ambos relés, abriendo los interruptores.
- **Relé de protección de distancia (Código ANSI 21):** Protegen las líneas de gran longitud midiendo la impedancia al principio de la línea, usando la relación tensión/corriente. Si se produce un cortocircuito a tierra: la tensión decrecerá, la corriente aumentará y, por lo tanto, la impedancia se reducirá.

Para un correcto funcionamiento, el relé se ajustará de forma que $Z_{línea} < Z_{relé}$, si se cumple esta condición, el relé abrirá los interruptores correspondientes.

- **Relé de sobreintensidad y cortocircuito. Función 50/51:** Son capaces de captar sobreintensidades instantáneas, sobreintensidades temporizadas, cortocircuitos y fallos de corriente a tierra, mediante funciones de tiempos de línea inversa.
- **Relé de vigilancia de bobina de disparo de interruptor (Código ANSI 3):** Garantizan la operación de las bobinas de disparo del interruptor de potencia.
- **Relé de vigilancia mínima y máxima tensión. Función 27-59:** Un relé digital se conecta al circuito secundario del núcleo de protección del transformador de tensión. Supervisa las tensiones mínimas y máximas dependiendo de un tiempo ajustable independiente con equipamiento temporizado e instantáneo. Protege a los equipos de sobretensiones, subtensiones, sobrefrecuencias y subfrecuencias.
- **Relé de fallo interruptor. Función 50S-62:** Se trata de un relé de apertura rápida de reserva utilizado en redes de distribución. Actúa en caso de que un interruptor cercano a un fallo eléctrico no pueda abrir.
- **Relé temporizado de discordancia de polos (Código ANSI 2):** Supervisa la concordancia de polos del interruptor de potencia.
- **Protección diferencial para transformadores. Función 87T:** Utilizando un equipo digital se puede ajustar vía *software* transformadores de dos devanados. El equipo posee una herramienta de imagen térmica que ofrece la posibilidad de vigilar las posibles pérdidas óhmicas de la instalación. Este relé puede además, proteger la cuba (51C) que supervisa alguna corriente que pueda circular entre la cuba y tierra.
- **Relé de Buchholz. Función 63:** Este relé se encarga de supervisar equipamiento aislado por un líquido que poseen un recipiente de expansión, como pueden ser los transformadores. Siguiendo un principio mecánico, cuando hay una sobrepresión interna en la cuba del transformador, actúa un

flotador que acciona una alarma. Un segundo flotador con un tiempo de reacción superior excita un contacto de disparo.

- **Relés de protección en zona de 2x27,5 kV:** Con el objetivo de proteger las celdas del sistema de alimentación a catenaria 2x25 kV:
 - Celdas de acometida (entrada del transformador): Cada subestación contará con dos de estas celdas, en cada una de ellas se instalará: un relé de protección de sobrecorriente y cortocircuito (función 50/51) y un relé de máxima y mínima tensión (función 59/27).
 - Celda de salida de línea (alimentación a un sector de catenaria): En cada celda se instalarán: un relé de protección de sobrecorriente y cortocircuito (función 50/51) y un relé de protección a distancia (función 21/79/50S-62), además de una protección de reserva de cortocircuito y sobrecorriente (función 50/51).

3.5. Sistemas de toma de corriente

Son varias las formas de obtener la energía necesaria para que los trenes puedan funcionar correctamente. En este estudio serán explicadas las más usadas a lo largo del tiempo.

3.5.1. Tercer carril

Su funcionamiento se basa en un carril adicional, el cual es paralelo a las vías del tren. Por este carril es por donde fluye la energía que alimentará los motores del ferrocarril. La conexión entre el tren y el carril se realiza mediante un frotador, el cual se encuentra bajo el bastidor del vehículo mediante un brazo anclado al mismo (**Figura 31**). El carril puede ser de aluminio o acero, pudiendo ser su morfología variada.



Figura 31: Ejemplo de frotador sobre tercer carril. Fuente: ADIF.

El acero es el responsable de conformar la estructura mecánica y soportar el desgaste producido por el rozamiento del frotador con el carril. Suele estar a una tensión entre 600-750 V, por lo que, deberá ir aislado respecto a tierra, mediante aisladores. Su mayor uso se da en metropolitanos, aunque puede combinarse junto a sistemas de línea aérea de contacto. Este sistema de toma de corriente empezó a utilizarse cuando la tecnología de las líneas aéreas no estaba muy desarrollada.

Cuenta con las siguientes ventajas:

- Equipo de sustentación menor.
- Menor cantidad de conductores auxiliares.
- Los costes de explotación eran menores.
- Una mejor interacción entre el frotador y el tercer carril al no disponer de alimentaciones entre sustentador e hilo de contacto.

La energía eléctrica puede obtenerse de tres formas (**Figura 32**):

- **Toma superior:** Es el tipo más simple y su perfil puede ser de secciones en T o de laminación normal. El contacto captador-carril es el más básico, debido a que la captación puede realizarse por gravedad del frotador. Pese a sus grandes ventajas, es el más peligroso desde el punto de vista de la seguridad de las personas, al no estar protegido eléctricamente.

- **Toma lateral:** Es el menos utilizado de los tres tipos. El frotador se despliega horizontalmente y se calibra con el carril mediante la presión de muelles antagonistas. Requiere de una regulación muy precisa y tiene la problemática de ser poco segura frente a contactos directos de las personas.
- **Toma inferior:** Tiene la toma de corriente más difícil de las tres, aunque es la más sencilla de proteger frente a los contactos directos.

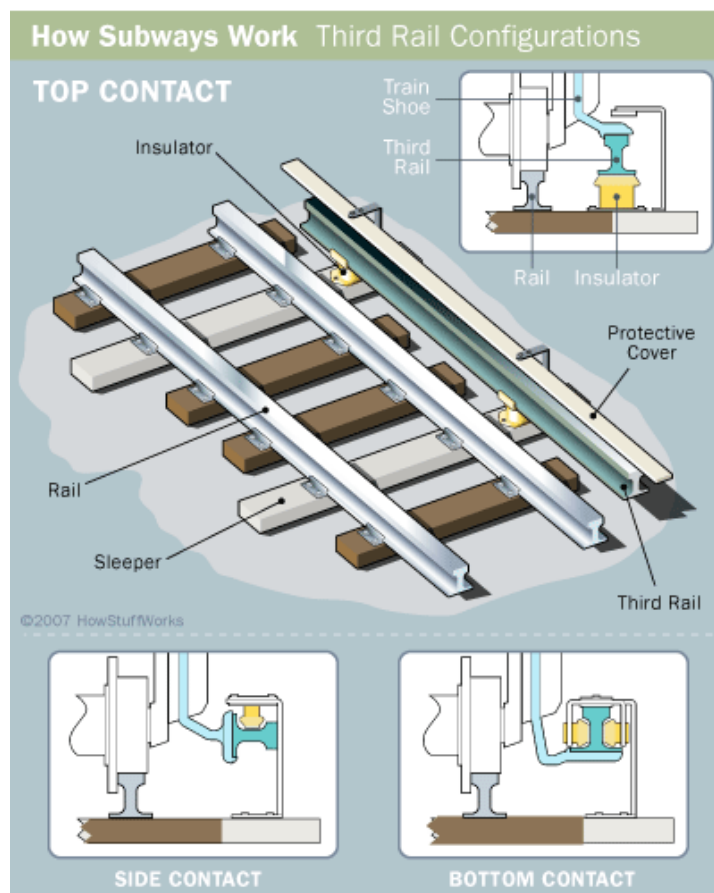


Figura 32: Tipos de tomas de corriente mediante tercer carril. Fuente: Técnica industrial.

3.5.2. Catenaria rígida

Este tipo de toma corriente surgió en los años 80 ante la necesidad de instalar sistemas de alimentación en lugares de gálibo reducido con captación de corriente mediante pantógrafo y como variante a la catenaria.

A día de hoy, al poder construir túneles de tamaño más aquilatados por el uso de tuneladoras y la opción de disponer de secciones elevadas sin necesitar de tensiones mecánicas altas, ha desencadenado en el uso de la catenaria rígida normalmente en los metropolitanos.

En el caso de metropolitanos, el uso de este sistema es ideal debido a que no suelen superar los 100 km/h y que la tensión de alimentación es de 1.500 V o inferior, lo que necesita de una gran sección que este sistema nos puede brindar, ahorrando así, cables auxiliares para lograr la sección útil total necesaria.

Una catenaria rígida está formada por una viga de aluminio de diferentes longitudes. Normalmente de sección en forma de pentágono invertido, estando el vértice inferior diseñado en forma de pinza para poder albergar la cabeza del hilo de contacto. La viga es fijada a la estructura superior mediante soportes aislados. (Figura 33).

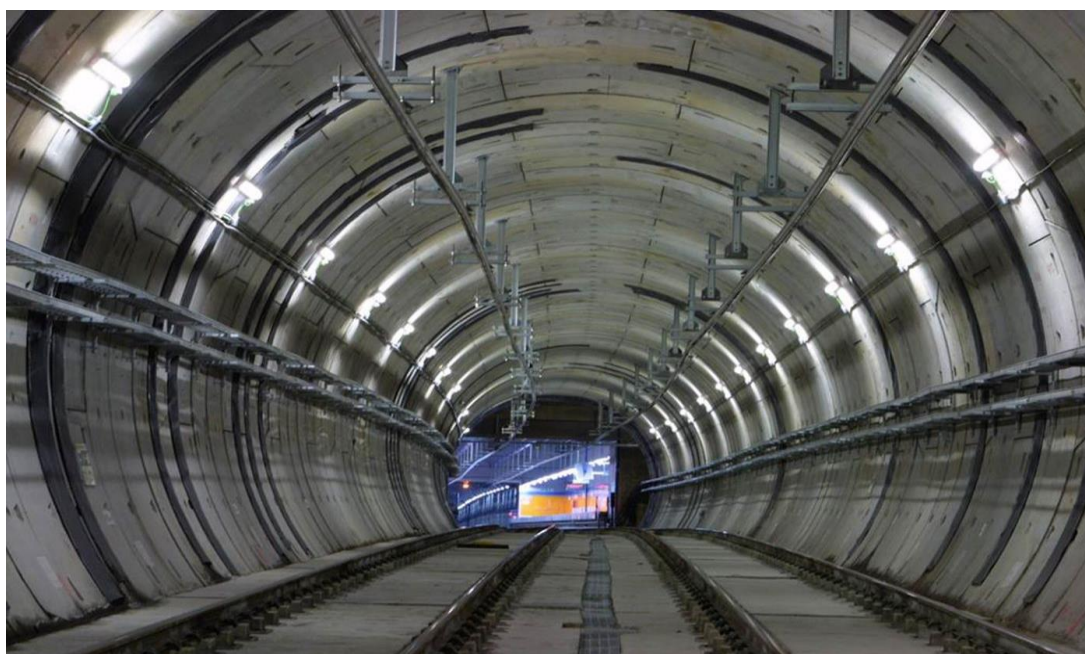


Figura 33: Túnel con toma de corriente mediante catenaria rígida. Fuente: Pandrol.

La agrupación perfil-hilo de contacto equivale a la catenaria convencional al completo, incluso a los *feeders* adicionales. La velocidad máxima que pueda alcanzar el material rodante está estrechamente relacionada con la calidad de la captación de la corriente. Para garantizar dicha calidad, es necesario mantener una presión prácticamente constante entre pantógrafo y catenaria rígida. Al haber perturbaciones geométricas y constructivas entre el pantógrafo, la vía y el sistema de alimentación, existirán deficiencias en el contacto.

La catenaria rígida está compuesta de los siguientes elementos:

- **Cantón:** Tramo continuo de barras unidas rígidamente entre sí, teniendo cada tramo de longitud máxima 41 barras embridadas, o lo que es lo mismo, unos 492 metros, no debiendo superar los 500 metros.

Pese a las menores variaciones de temperatura en el interior del túnel que en el exterior del mismo, la longitud del cantón es inferior que en la superficie. Esto es debido a la mayor restricción de los movimientos por dilatación, al montar el perfil sobre soportes fijos, los cuales permiten su deslizamiento a través del apoyo interior que suele ser fabricado en un material de bajo coeficiente de rozamiento, como puede ser el teflón.

Para unir dos cantones, se realiza un solape de sus barras extremas para que el conjunto tenga la posibilidad de dilatarse sin restricciones.

- **Brida de toma de corriente:** Necesarias para conectar eléctricamente con los *feeders* de alimentación y para la interconexión entre barras. Suele estar compuesta de dos medias piezas de aluminio que se unen mediante tornillos, con un separador metálico para evadir la deformación del perfil conductor.
- **Brida de puesta a tierra:** Son necesarias para realizar trabajos de mantenimiento, habilitando al operario interrumpir la alimentación de las fuentes de energía y poner a tierra cortocircuitando la instalación por ambos extremos de la zona de trabajo.
- **Aisladores de sección:** Se instalan en zonas donde se requiere realizar una separación eléctrica, puede ser el caso de secciones entre *feeders* diferentes o para realizar paquetes eléctricos.
- **Punto fijo:** Puede encontrarse en el punto medio del cantón, un punto de desplazamiento nulo, llamado punto fijo. Este punto está compuesto por un soporte que amarra el perfil. Para anclarlo al techo del túnel, se utilizan cables aislantes o cables de acero con aisladores. Cuando aumente la temperatura, el punto fijo será el encargado de que los desplazamientos del perfil sean desde este punto hacia los extremos del cantón.
- **Juntas de dilatación:** Se encargan de absorber las dilataciones o contracciones, producidas por las variaciones de temperatura, que afectan al

perfil sin que cambie la flecha prediseñada. Normalmente, para esta problemática se utilizan los seccionamientos.

- **Seccionamientos:** Se consiguen mediante el montaje de dos catenarias con perfiles paralelos separados una distancia y con una zona común de frotamiento del pantógrafo. Dicha distancia dependerá de los valores de tensión utilizados. Los seccionamientos, al igual que en la catenaria flexible, pueden categorizarse en: de lámina de aire o de cantón.

Los problemas producidos por los cambios de temperatura pueden ser resueltos de las siguientes formas:

- a) Mediante un solape serán separados cada tramo tendido de su contiguo. Dicho solape permitirá dilataciones dando continuidad ante el avance del pantógrafo.
 - b) Los seccionamientos pueden servir de separación mecánica o mecánica y eléctrica. En ambos casos, se dimensionarán de la misma forma. Si no es necesaria la separación eléctrica, se puentearán.
- **Soportes:** Para una óptima interacción entre pantógrafo y perfil, el perfil ha de mantener una altura uniforme con él y un descentramiento que depende de las características del pantógrafo. Permiten la unión del perfil a la bóveda, muro colindante o hastial, además de aislar eléctricamente.

Existen varios tipos de soportes:

- Soporte independiente.
 - Soporte tipo ménsula.
 - Soporte tipo barra.
- **Descentramientos:** Los soportes serán ubicados centrados con el eje del plano de rodamiento, posibilitando así un desplazamiento hacia ambos lados de la catenaria para que el desgaste del pantógrafo sea uniforme en toda su superficie. El valor máximo de los descentramientos está fijado en 200 mm a cada lado, sin embargo, los soportes permiten valores de hasta 250 mm con

el objetivo de corregir posibles errores de montaje. En las curvas se aplicará la misma metodología.

- **Agujas aéreas:** Montaje realizado entre dos líneas aéreas de contacto para habilitar el paso del ferrocarril de una vía a otra diferente, permitiendo la continuidad eléctrica, entre aquellas vías electrificadas en las que haya cruzamientos, desvíos o escapes (**Figura 34**).

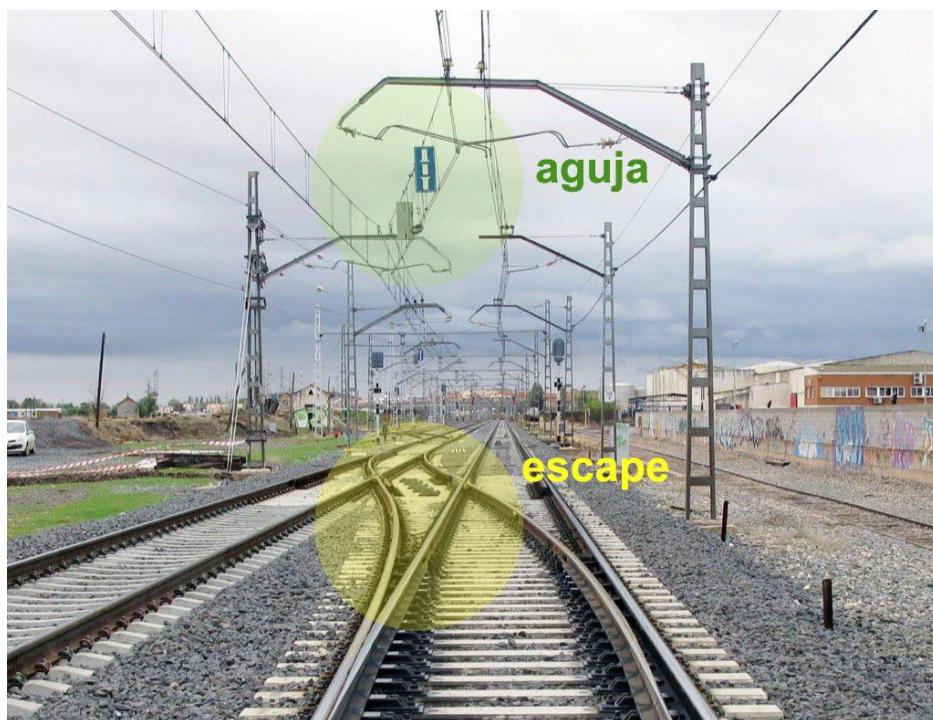


Figura 34: Ejemplo de aguja aérea. Fuente: ADIF.

Las agujas aéreas son más simples en catenaria rígida que en catenaria flexible. Para instalar la aguja aérea de la vía desviada se requiere de un perfil elevado en su parte final, al igual que un seccionamiento. El punto de aguja más óptimo es el punto de aguja 50, o lo que es lo mismo, entre los ejes de la vía desviada y la vía general hay 50 cm. Esta configuración permite que haya un descentramiento de 20 cm hacia cada lado, quedando un espacio entre ambos perfiles de 10 cm.

- **Aislamiento:** Para fijar el perfil de aluminio se utilizan aisladores. El aislador usado dependerá de la tensión de alimentación. A día de hoy, los aisladores de composite son los más instalados, aunque también los hay de cerámica.

- **Transición de catenaria rígida a catenaria flexible:** Cuando en un mismo tramo coexisten zonas de catenaria rígida y de catenaria flexible será necesario realizar una transición adecuada de un sistema a otro. Los casos más usuales son en la salida y entrada de los túneles y en los pasos inferiores. Al diseñar la transición hay que tener en cuenta las siguientes características:

- Los trabajos deben ser de fácil realización.
- Que el paso del pantógrafo de la catenaria rígida a la flexible sea lo más uniforme posible.
- Procurar que el mantenimiento en estas transiciones sea lo menor posible.

Para conseguir una transición adecuada se utilizan los siguientes métodos:

- **Mediante grapa de transición:** Este método permite juntar dos hilos de contacto procedentes de la catenaria flexible con el hilo de contacto de la catenaria rígida, pudiendo así, juntar tres hilos de contacto en un canal central. El sustentador queda anclado a la bóveda con una alimentación final a los hilos de contacto. Aunque es una solución bastante sencilla, ha dejado de usarse debido a que produce un desgaste prematuro en los hilos de contacto.
- **Mediante seccionamientos:** Existen tres soluciones: seccionamiento con catenaria convencional y perfil conductor, seccionamiento con perfiles conductores entre ambos sistemas y seccionamiento con dos perfiles y catenaria convencional.

La primera se basa en realizar un seccionamiento clásico de catenaria rígida en la zona final del túnel. En la catenaria que sale del túnel, el hilo de contacto se anclará rígidamente con la ayuda de un soporte de anclaje, después, se montará un nuevo perfil de catenaria rígida y tras él un tramo de perfil con momento de inercia variable. El hilo de contacto saldrá de este último perfil, el cual formará la catenaria flexible (siempre un hilo). Se llevará a cabo el seccionamiento con este hilo lo

antes posible. Dicho seccionamiento estará compuesto por un hilo de contacto y por los hilos de contacto (uno o dos) que correspondan a la catenaria flexible que empieza, consiguiendo así, que la transición se haga por una parte entre un seccionamiento formado por dos perfiles de catenaria rígida, y por otro lado dos catenarias flexibles.

La segunda solución busca lograr que la transición se produzca en el seccionamiento, intentando homogeneizar la elasticidad entre ambos sistemas dentro de la zona común. La catenaria convencional se irá ajustando para buscar la altura del hilo de contacto de la rígida respetando la disminución entre sustentador e hilo de contacto y las pendientes máximas. Se introducirá el hilo de contacto de la catenaria flexible en el perfil, primero a través del tramo de inercia variable y después, en un tramo de perfil normal de longitud suficiente para hacer la zona común y terminar con un perfil en rampa.

La tercera propuesta trata de evitar los cabeceos del pantógrafo por las variaciones en la catenaria flexible a lo largo del tiempo. Para solucionar este problema, se puede instalar un pequeño tramo de perfil en paralelo con el final de la catenaria rígida, de longitud algo superior a la zona común, descentrados a ambos lados del eje de la vía y que tender la catenaria convencional sin descentramiento entre ambos perfiles.

3.5.3. *Línea aérea de contacto*

A día de hoy, es el sistema más utilizado incluso para líneas de AV. Se define como el sistema cuya función principal es transportar la energía eléctrica hasta el pantógrafo de los ferrocarriles. En dicho sistema, se incluye todo el cableado aéreo, cimentaciones, estructuras...

Para calcular la sección de los conductores será necesario disponer de datos como tensión de alimentación, frecuencia de los trenes, características de los trenes... La sección se elegirá de una gama de secciones normalizadas y su configuración dependerá del número de cables.

3.5.3.1. Clasificación

Según los conductores que forman la catenaria, la línea aérea de contacto (LAC) puede ser clasificada de las siguientes formas:

- **En función de su composición:**

- **Tranviaria:** Se utiliza un solo hilo de contacto que es soportado directamente en los postes de suspensión. Si el hilo de contacto se suspende a través de un cable intermedio en forma de V invertida, se le llama “tranviaria con suspensión en delta”.
- **Sencilla:** Es la más usada universalmente y se compone de péndolas, uno o dos hilos de contacto y un sustentador. El sustentador contribuye a aumentar la sección eléctrica y actúa como cable auxiliar soportando el peso del hilo de contacto mediante las péndolas, consiguiendo que la flecha varíe lo menor posible a lo largo del trazado.
- **Catenaria compuesta:** Con esta configuración, se busca incrementar la sección total conductora y homogeneizar la elasticidad de la misma. Está forma por uno o varios sustentadores, cables auxiliares intermedios e hilos de contacto. Se instalarán péndolas que transmitan el peso de los conductores instalados por debajo.

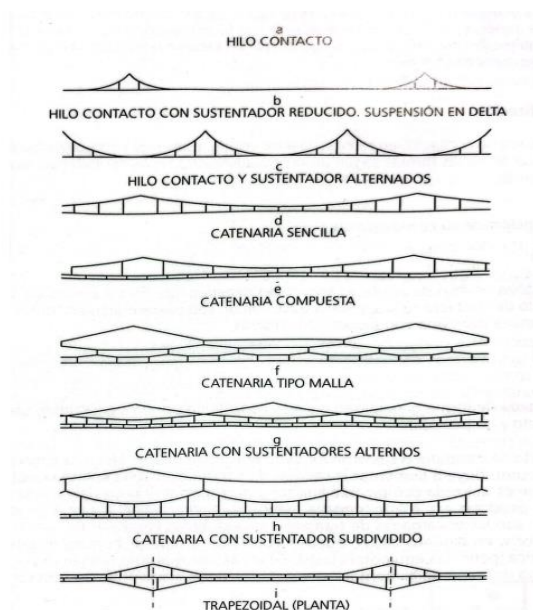


Figura 35: Tipos de catenaria según composición. Fuente: Carmona Suárez.

- **Según la disposición del hilo de contacto respecto al sustentador:**

- Recta y poligonal: El hilo de contacto y el sustentador se encuentran en la misma vertical.
- Trapezoidal: Los hilos de contacto se acercan y alejan respecto al eje vertical del sustentador a lo largo del trayecto. Se utiliza en zonas de fuertes vientos para lograr mayor resistencia al movimiento transversal, a la misma vez, realizan el zig-zag necesario para un desgaste uniforme del pantógrafo.
- Inclínada: El sustentador se fija en los postes de suspensión, los hilos de contacto quedan desplazados respecto a la verticalidad según la tensión radial de los mismos, el desplazamiento máximo es ajustado mediante el pendolado.

- **Dependiendo de si cuenta con regulación automática de la tensión mecánica o no:**

- Sin compensación: La tensión mecánica de los conductores no es ajustada automáticamente, lo que requiere de grandes labores de mantenimiento en los meses de mayor variación de temperatura. Para que no sea tan costoso, se usan elementos tensores manuales a lo largo de la línea o seccionamientos de lámina de aire a ciertas distancias. Actualmente, esta opción no suele utilizarse.
- Con compensación solo del sustentador, permaneciendo el hilo de contacto fijo.
- Con compensación del hilo o hilos de contacto, permaneciendo el sustentador fijo.
- Compensación unida. Sustentador e hilo de contacto se conectan en una pieza vertical denominada balancín, a partir del cual, se saca un solo cable de acero al sistema de compensación.
- Compensación independiente. Cada cable se regulará automáticamente independientemente. Esta solución es usada en

líneas que requieran de una elevada fiabilidad, como pueden ser líneas principales o de AV.

- **Según el sistema de alimentación:**

- Catenarias de CA: Las alimentaciones más comunes son 25 kV a 50 Hz o 15 kV a 16 2/3 Hz. Gracias a utilizar tensiones elevadas, las secciones pueden ser menores. Las líneas de AV usan este tipo de catenaria.
- Catenarias de CC: Operan con 750 V, 1.500 V y 3.000 V. Requieren de secciones mayores que en las catenarias de CA debido a las bajas tensiones con las que funcionan.

3.5.3.2. Elementos de la línea aérea de contacto

Toda línea aérea de contacto de tipo sencillo está compuesta por los siguientes elementos.

3.5.3.2.1. Hilo de contacto

Se trata del conductor que entra en contacto con el pantógrafo para la transmisión de energía eléctrica de la catenaria al material rodante (**Figura 36**).

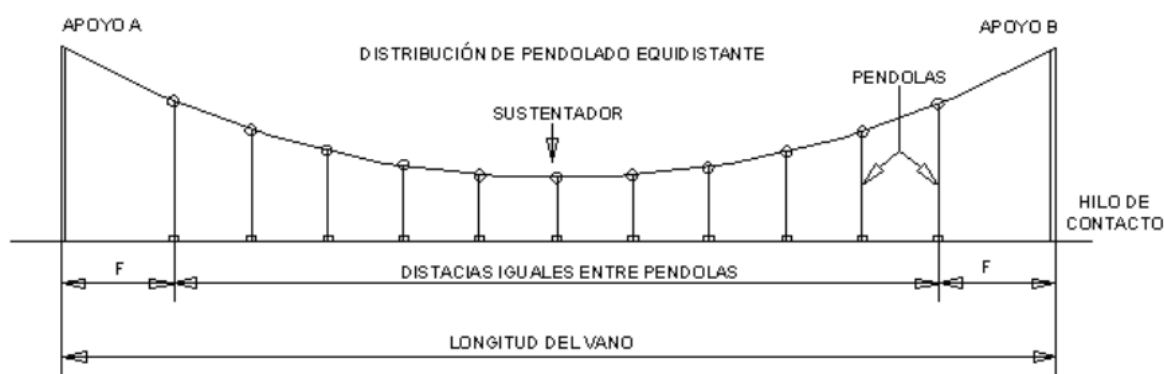


Figura 36: Representación gráfica del conjunto sustentador-péndolas-hilo de contacto. Fuente: Seguridad Ferroviaria.

El conductor cuenta con unas ranuras laterales llamadas cabezas. Estas cabezas se encargan de sustentar el conductor mediante unos elementos verticales instalados cada cierta distancia llamados péndolas. Habitualmente se ha fabricado en cobre electrolítico duro (Cu ETP), pero al aumentar los requisitos

mecánicos (debido al incremento de la velocidad de los vehículos), se han empezado a usar aleaciones con otros metales.

Las características que definen al hilo de contacto se encuentran en la norma **EN 50149**:

- **Distancia entre ranuras:** Están definidas por el tipo de grifas usadas por las diferentes administraciones ferroviarias. Se diferencian por la distancia entre mordazas.
- **Sección:** Se refiere al área del hilo de contacto en milímetros cuadrados. Las secciones normalizadas son 80, 100, 107, 120 y 150 mm².
- **Tipo de perfil:** En líneas donde haya un denso tráfico de trenes, añadido a la mayor capacidad de aceleración y potencia de los trenes actuales, requiere de una sección elevada de conductores, también para que el contacto entre hilo de contacto y pantógrafo permita un flujo de corriente elevado.
- **Características eléctricas:** Las variables que la definen son la resistividad y la resistencia kilométrica, las cuales dependen de la aleación y su porcentaje.
- **Características mecánicas:** Hay que tener en cuenta la tensión mínima, carga de rotura, alargamiento y comportamiento al plegado y a la torsión.

En el caso de los trenes de AV, se usarán de forma frecuente hilos de contacto con aleaciones debido a las altas tensiones mecánicas que requieren por la elevada velocidad a la que circulan los trenes.

Para vías generales o principales de corriente continua se suelen usar dos hilos de contacto, mientras que en vías secundarias o vías electrificadas con corriente alterna se emplea solo un hilo de contacto, al ser la corriente menor.

3.5.3.2.2. *Sustentador*

Es de vital importancia en la catenaria, tiene dos propósitos principales: incrementar la sección conductora y soportar el peso del hilo o hilos de contacto, de forma que estos puedan permanecer paralelos a la vía. Excepto las líneas tranviarias, el resto de líneas aéreas de contacto poseen de sustentador, en algunas más de uno (**Figura 37**).



Figura 37: Vías con doble sustentador. Fuente: RENFE.

El sustentador está compuesto por alambres que se agrupan de forma helicoidal, capaces de soportar los esfuerzos de tracción. Suelen estar fabricados de cobre, aunque en CA suele usarse el bronce.

En casos donde es necesario mejorar la elasticidad en el punto de apoyo, se usan unos cables intermedios entre el hilo de contacto y el sustentador llamados falsos sustentadores. Su función es formar una estructura determinada de la catenaria, llamada péndola en Y.

Para vías secundarias que consuman poca potencia, en vez de usar bronce o cobre para el sustentador, es normal usar acero, ya que es más económico, aunque posee una mayor resistencia eléctrica.

3.5.3.2.3. Feeders

Son los cables encargados de distribuir la energía eléctrica. La distribución puede ser desde un lugar a otro (de la subestación a la LAC) o bien, incrementando la sección conductora en un tramo de mayor consumo. Mientras que en CC suele utilizarse el cobre, en líneas de CA es más utilizado el aluminio.

Existen 5 tipos de *feeders*:

- **Feeder de acompañamiento:** Para paliar los problemas como insuficiencia de potencia o calentamiento de conductores provocados por caídas de tensión elevadas y consumos de corriente desmesurados, será necesario aumentar las secciones de los hilos de contacto y sustentador. Esta solución no resulta beneficiosa debido a que conlleva un aumento de tensiones mecánicas y de los esfuerzos a soportar por los postes. Por lo tanto, la solución más óptima es instalar un *feeder* de acompañamiento que aumente la sección donde sea necesario (**Figura 38**).

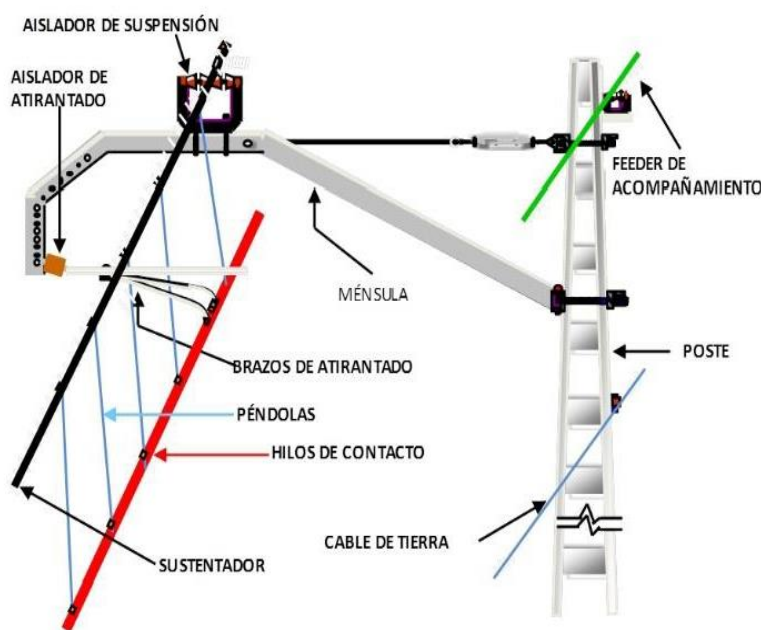


Figura 38: Representación gráfica de una línea con *feeder* de acompañamiento. Fuente: Geotren.

- **Feeder de alimentación:** Se trata del conductor que alimenta la catenaria desde la subestación de tracción. Este conductor empieza en el pórtico de *feeder* y termina en el seccionador de punta de *feeder* instalado en el apoyo donde se hace la conexión a la catenaria.
- **Feeder negativo:** Es el conductor que en los sistemas de CA, en especial en los de 2x25 kV, acompaña a la catenaria con una diferencia de potencial de 25 kV desfasada 180° respecto a la tensión de la catenaria (**Figura 39**).

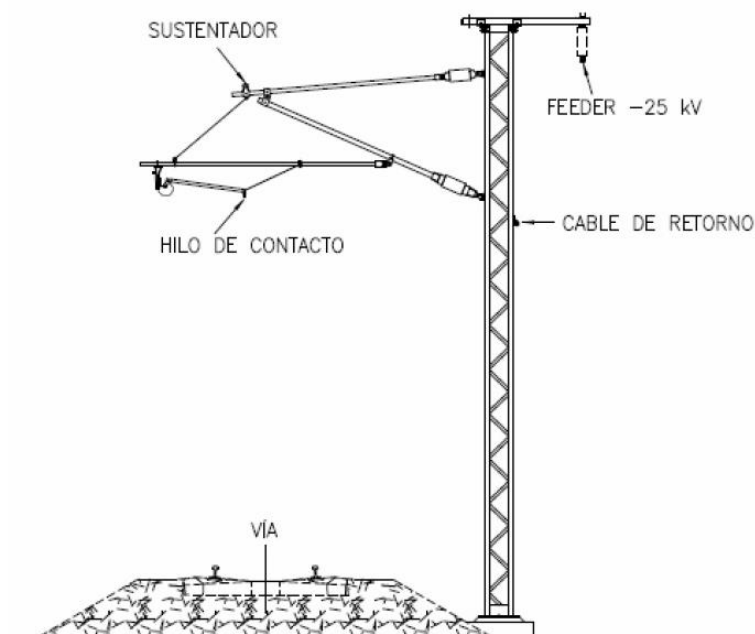


Figura 39: Ejemplo de vía con feeder negativo. Fuente: Geotren.

Entre catenaria o *feeder* negativo existen 25 kV, mientras que entre catenaria y *feeder* negativo hay 50 kV. Son el *feeder* negativo y la catenaria los encargados de alimentar los respectivos puntos de autotransformación intermedios.

- **Feeder de retorno:** Pese a que la corriente retorne a través de las vías, si las vías no se montan con largas barras soldadas es necesario instalar conexiones eléctricas entre carriles para asegurar el flujo de corriente. El paso de la intensidad es necesario para alimentar la señalización del tipo de 50 Hz con juntas inductivas.

Si juntamos lo anterior con un ascendente aumento de potencia consumida, será necesario aumentar la sección de retorno mediante un conducto adicional denominado *feeder* de retorno. Se utilizará en los siguientes casos:

- En estaciones con una vasta densidad de vías y subestación, donde la intensidad fluye a través de conexiones transversales y longitudinales entre desvíos y vías.
- En tramos donde sea necesario vencer un elevado desnivel.

- En zonas con consumos elevados, evitando así, que la corriente se transfiera a tierra.

En los sistemas de CA, el retorno de la intensidad hacia la subestación se realiza a través de los carriles y por el cable de tierra, al cual se le llama *feeder* de retorno.

- **Cable de tierra:** Al ser la LAC un sistema eléctrico puede estar sometida a perturbaciones producidas por agentes externos o fallas por falta de aislamiento. Para solucionar este problema, se instala un cable a lo largo de la línea que une todas las estructuras y apoyos, de forma que tengan el mismo potencial y además referido a potencial de tierra o potencial cero.

En los sistemas de CA aparte de empeñar la función antes mencionada, también se une cada 450 metros al carril más externo, formando así parte del circuito de retorno.

3.5.3.2.4. Péndolas

Se trata del conjunto de elementos verticales que tienen como función unir el sustentador con el hilo de contacto cada cierta distancia, manteniendo una distancia homogénea con el plano de rodamiento, consiguiendo así, que la toma de corriente sea la mejor posible (**Figura 40**).

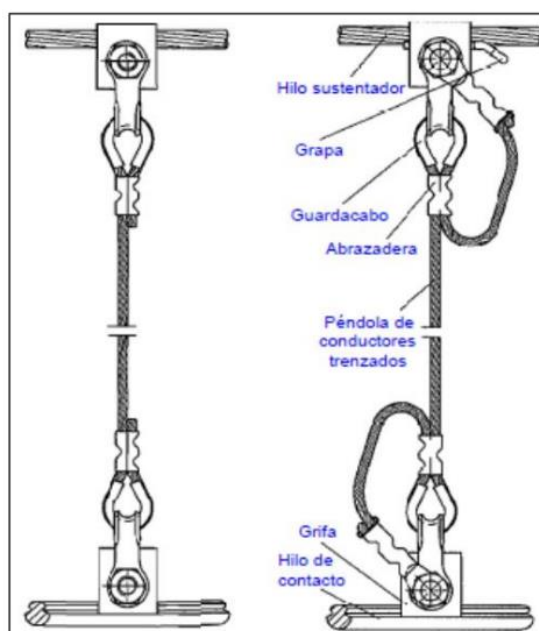


Figura 40: Composición de una péndola. Fuente: Universidad Pontificia Comillas.

Se dividen en péndolas equipotenciales y no equipotenciales:

- **Péndolas no equipotenciales:** Tienen solamente una función mecánica, aseguran que el hilo de contacto esté en una posición adecuada y soportan el peso del mismo. Si queremos evitar puntos duros en los puntos de amarre de la péndola, es vital dejar un poco de holgura, para que el pantógrafo a su paso, pueda levantar el hilo de contacto. Hay dos tipos:

- Péndolas cortas: Están equipadas con la grifa del hilo de contacto y el cable o hilo de unión con el sustentador. Se usan en catenarias de altura reducida o en la zona central del vano, normalmente cuando la distancia es menor a 400 mm.
- Péndolas largas: A diferencia de las anteriores, son usadas para longitudes mayores y suelen articularse en dos cuerpos.

- **Péndolas equipotenciales:** En tramos donde los consumos sean elevados, las péndolas serán encargadas de contribuir a la sección conductora aumentándola, intercambiando la varilla por cable de sección suficiente para el flujo de la corriente máxima, consiguiendo así, la conexión entre el sustentador y el hilo de contacto.

Su posición dentro del vano dependerá de las condiciones dinámicas de la catenaria, clasificándose en: distribución homogénea, distribución concentrada y distribución arbitraria.

3.5.3.2.5. *Cables auxiliares*

Son los cables usados en el montaje de la LAC como extremos de los cables de cobre o incluso, como soporte para otros elementos o líneas complementarias. También pueden verse como sustentador para vías secundarias de algunas estaciones.

3.5.3.2.6. *Estructuras portantes*

Empeñan el papel de soportar las fuerzas verticales y transversales producidas por los elementos que componen la LAC. Al igual que en las redes de alta tensión, se utilizan apoyos (o también llamados perfiles) para la suspensión de un punto de la catenaria, pudiendo situarla en la posición correcta tanto horizontal como vertical. Si

no pueden utilizarse los apoyos, pueden usarse otras soluciones como los pórticos, los cuales son capaces de sustentar varias catenarias.

Se pueden clasificar en:

- Apoyos.
- Ménsulas.
 - Celosía.
 - Tubulares.
 - Especiales, con capacidad de soportar varias catenarias.
- Pórticos.
 - Rígidos.
 - Funiculares.
- Herrajes auxiliares.
 - Crucetas.
 - Mensulillas.
 - Otros soportes.

3.5.3.2.7. *Cimentaciones y macizos*

Para que el poste quede bien fijado al terreno, se instalan con cimentaciones de hormigón llamadas macizos de fundación. Estos macizos pueden tener forma cilíndrica, de paralelepípedo o trapezoidal dependiendo de las peculiaridades de la plataforma de la vía. Las características de los macizos dependen de las cargas a soportar y de las cualidades del terreno. Habitualmente, los apoyos van empotrados en la cimentación, sin embargo, se usan cada vez más, espárragos recibidos en la cimentación a modo de esperas, atornillando después los apoyos a éstos mediante una placa o perfiles soldados alrededor de la base. Aparte de este tipo de macizos, existe uno muy usado llamado macizo de anclaje, el cual se utiliza como contrapeso en los puntos fijos de la línea y anclajes de catenaria.

3.5.3.2.8. Aisladores

Al igual que en las redes convencionales, en las catenarias, también se utilizan aisladores con el objetivo de aislar los conductores de los herrajes y postes. Para que cumplan con su función adecuadamente, es necesario que cuenten con una rigidez dieléctrica elevada. Los más usados son la porcelana, el vidrio, la fibra de vidrio, las resinas epoxi y otros materiales plásticos o compuestos.

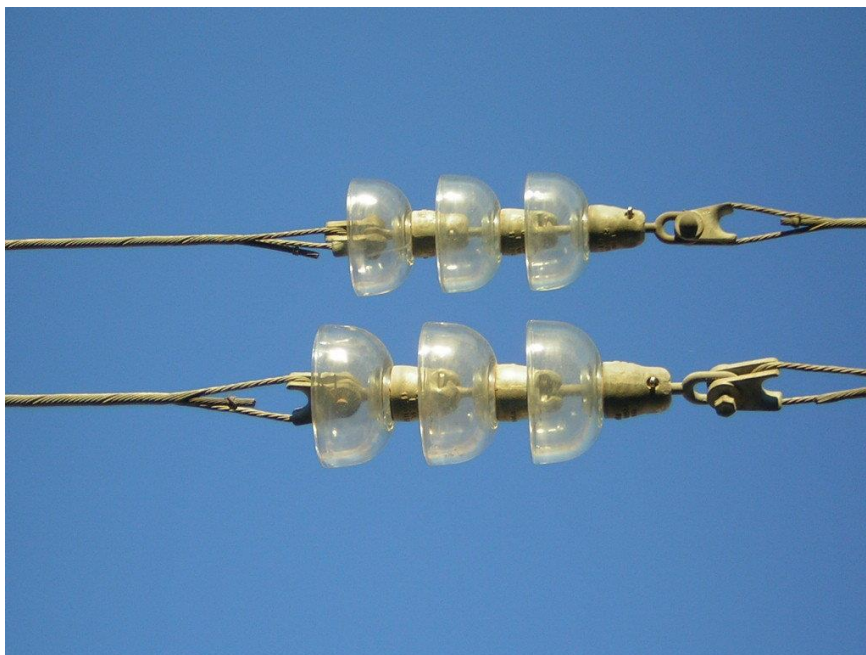


Figura 41: Imagen de aisladores. Fuente: Geotren.

Además, es necesario considerar sus características mecánicas a la tracción, flexión y torsión debido a las importantes cargas mecánicas que han de soportar.

Dependiendo de su aplicación:

- **Suspensión o apoyo:** Se usan para la suspensión del cable sustentador o de los cables de alimentación de los *feeders* a catenaria. También pueden utilizarse como elementos complementarios desde los seccionadores o autoválvulas a catenaria.
- **Atirantado:** Se instalan transversalmente a la catenaria, posicionándola, a ambos lados del eje de la vía realizando el zig-zag.
- **Anclaje:** Usado en serie con los conductores en los extremos, tanto en el inicio como en el final con el objetivo de aislarlos de los anclajes.

Dependiendo de su fabricación:

- **Rígidos simples:** Poseen un herraje en la parte inferior para su sujeción al herraje deseado. La cerámica se moldea de forma que contiene las acanaladuras requeridas para apoyar los conductores directamente sobre ellos. Son los más sencillos.
- **Tipo cadena:** Se construyen normalmente con herrajes a ambos lados pudiendo, según se requiera, formar otros de una longitud mayor en función de la diferencia de potencial de la línea.
- **Con terminales metálicos especiales:** Habitualmente poseen terminales en ambos lados. Se trata del caso de los aisladores de anclaje y atirantado.
- **Pasantes:** Permiten que el conductor atraviese el propio aislador. Se suele usar para atravesar muros o en la fabricación de máquinas eléctricas.
- **Especiales:** Aisladores diseñados para operar en condiciones muy específicas como en zonas desérticas.

CAPÍTULO 4: CÁLCULO ELECTROMECÁNICO DEL SUBTRAMO JAÉN-MENGÍBAR

4.1. Introducción

El objeto de este estudio es realizar el cálculo electromecánico en alta velocidad del subtramo Jaén-Mengíbar, perteneciente a la actual línea de media distancia Jaén-Madrid. El inicio de la línea será la estación de ferrocarril de Jaén y el final de la misma, la estación de Mengíbar-Artichuela. Habrá una estación entre Jaén y Mengíbar, la estación de ferrocarril de Grañena, en el doceavo kilómetro. La longitud total de la línea es de 29,3 kilómetros y tendrá vía única en ancho de vía internacional (1.435 mm).

La locomotora a utilizar será la S-130, compuesta de 11 coches Talgo de la serie 7 construidas por Bombardier en su parte eléctrica y por Talgo en su parte mecánica. Son capaces de circular por líneas de ancho internacional a 250 km/h y 200 km/h por las convencionales, perfecto para nuestro caso, puesto que el tramo Mengíbar-Madrid mantendría el ancho ibérico (**Figura 42**). Además, pueden operar tanto a 25 kV en CA como a 3 kV en CC.



Figura 42: Modelo S-130. Fuente: RENFE.

Para realizar los cálculos que nos conciernen, es necesario conocer las características técnicas del material rodante. Los trenes de la serie 130 cuentan con las siguientes características (**Tabla 5**):

Características técnicas S-130	
Tracción	Eléctrica
Tensión	25 kV-50 Hz CA / 3 kV CC
Potencia	4800 kW CA / 4000 kW CC
Motores	8 asíncronos
Velocidad máxima	250 km/h (ancho UIC) y 220 km/h (ancho ibérico)
Esfuerzo tractor máximo	220 kN
Esfuerzo tractor (régimen continuo)	160 kN
Masa del tren	312 toneladas
Masa del tren a plena carga	343 toneladas
Peso por eje motor	18 toneladas
Longitud del tren	184,158 m
Número de ejes motores	8
Freno eléctrico	2.400 kW a 25 kV y 2.000 kW a 3 kV
Freno neumático	En ejes motores: 2 discos por eje. En ejes portadores: 2 discos en rueda y 2 en eje
Aceleración lateral máxima en curva	1,2 m/s ²
Anchura cabeza tractora	2,96 m
Longitud cabeza tractora	20,749 m
Altura cabeza tractora	4,03 m
Altura de coches	3,365 m
Anchura de coches	2,942 m
Longitud de coches intermedios	13,14 m
Longitud de coches extremos	12,14 m

Tabla 5: Características técnicas del S-130. Fuente: RENFE.

4.2. Previsión de potencia

El método de cálculo se establece de forma que las cargas máximas resultantes han de ser válidas para la explotación normal y para todo tipo de trenes. La carga máxima que podrá remolcar una locomotora dependerá de la rampa característica de cada trayecto, dependiendo de:

- Potencia de la locomotora.
- Esfuerzo máximo por adherencia.
- Límite de los ganchos de tracción.
- Resistencia al avance del tren.

La carga máxima se calculará en función de la rampa característica más restrictiva. Tras obtener la cargas y velocidades máximas de cada tramo, se calculará la máxima potencia requerida por el ferrocarril durante el trayecto.

La información para el cálculo y determinación de las cargas máximas que pueden ser remolcadas por cada locomotora, viene dada por la curva de tracción de cada locomotora. Esta curva muestra el esfuerzo tractor en llantas (ordenadas) en función de la velocidad (abscisas) (**Figura 43**).

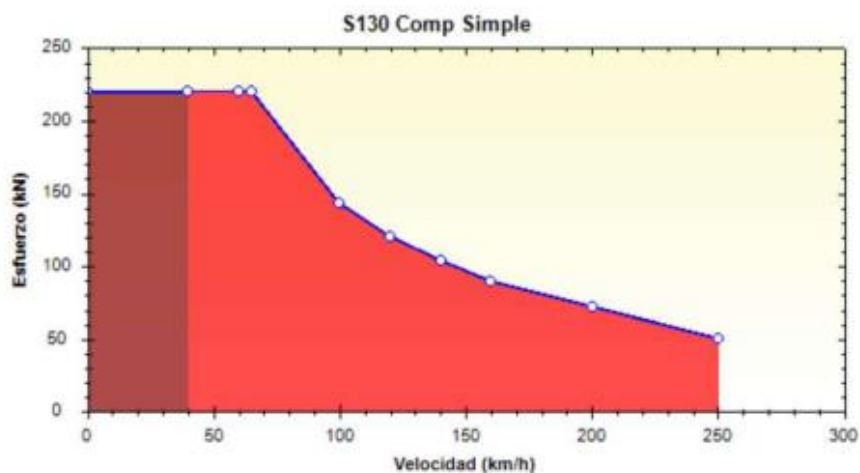


Figura 43: Curva de esfuerzo/velocidad del S130. Fuente: MITMA.

Para llevar a cabo el procedimiento es necesario disponer del perfil de la línea (**Figura 44**):



Figura 44: Perfil de la línea ferroviaria Jaén-Mengíbar. Fuente: Elaboración propia.

Con el objetivo de simplificar los cálculos se sustituirán las rampas de la línea por rampas características. Una rampa característica se define como la rampa

ficticia cuyo valor es representativo por sí solo de las características del perfil longitudinal y del trazado de la sección a tener en cuenta. Se tomará como rampa característica aquella rampa máxima o una rampa ideal calculada de forma que la pérdida de energía cinética entre esta y la máxima sea admisible.

Las rampas características elegidas para el trayecto vienen divididas en dos tramos: Jaén-Grañena y Grañena-Mengíbar (**Figuras 45 y 46**).

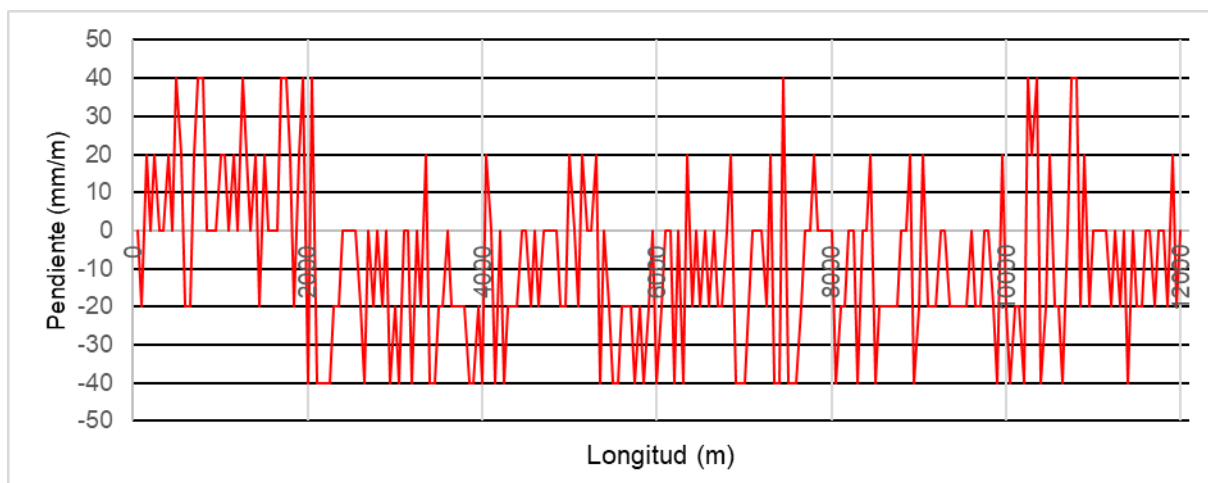


Figura 45: Representación gráfica de las rampas ficticias del tramo Jaén-Grañena. Fuente: Elaboración propia.

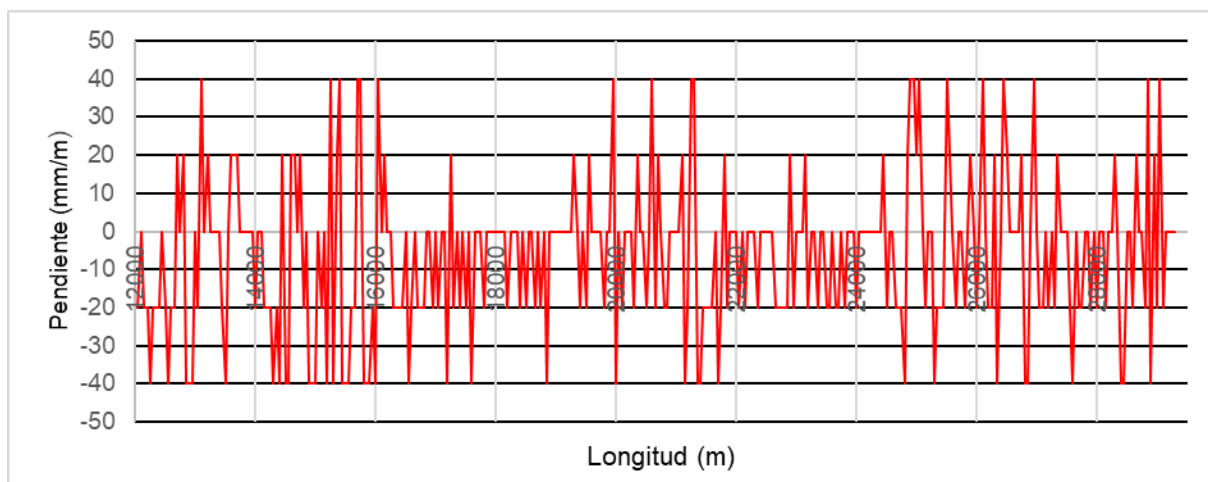


Figura 46: Representación gráfica de las rampas ficticias del tramo Grañena-Mengíbar. Fuente: Elaboración propia.

Existen varias resistencias a tener en cuenta a la hora de realizar los cálculos. La primera de ellas es la resistencia al avance por efecto de la gravedad (R_{ag}), que sigue la siguiente expresión (**Ecuación (1)**):

$$R_{ag} = m \cdot i \quad (1)$$

Donde:

- m: masa del tren en toneladas.
- i: pendiente en mm/m o milésimas.

Además de tener en cuenta los efectos gravitatorios, también es necesario tener en cuenta la resistencia al avance en curvas en función del radio de las mismas. Para ello, será necesario calcular el valor de la rampa equivalente en curva, que en el caso de ancho internacional (**Ecuación (2)**):

$$r = \frac{600}{R} \quad (2)$$

Donde:

- R: radio de la curva.

La resistencia al avance en curvas viene definido por la siguiente expresión (**Ecuación (3)**):

$$R_{ac} = m \cdot r \quad (3)$$

Donde:

- m: masa del tren en toneladas.
- r: rampa equivalente en curva.

Sin embargo, existe la posibilidad de simplificar aún más los cálculos mediante el uso de un perfil ficticio, equiparando una curva a una determinada rampa. Este perfil ficticio se define como el resultado de sumar la pendiente que realmente existe y la equivalencia debida a la curva. Para ancho de vía internacional (**Ecuación (4)**):

$$i' = i + \frac{600}{R} \quad (4)$$

Donde:

- i : pendiente en mm/m o milésimas.
- R : radio de la curva.

Para obtener la resistencia conjunta al avance de la curva y rampa se utiliza la siguiente fórmula (**Ecuación (5)**):

$$R_{gc} = m \cdot i' \quad (5)$$

La última resistencia a tener en cuenta es la resistencia al avance, la cual depende de la velocidad de la locomotora, viene regida por la siguiente ecuación (**Ecuación (6)**):

$$R_{ar} = A + B \cdot V + C \cdot V^2 \quad (6)$$

Donde:

- A , B y C : se tratan de coeficientes absolutos que dependen de las características físicas del material rodante.
- V : velocidad del tren en km/h.

Los coeficientes de la locomotora elegida vienen recogidos en la siguiente figura (**Figura 47**):

TIPO DE TREN	MASA (t)	COEFICIENTES		
		A (daN)	B (daN/km/h)	C [daN/(km/h) ²]
TRD	99	157	0,26	0,035
TRD 598 (3 coches)	173	204	0,57	0,03
TGV Sud Est	418	235	3,09	0,0535
TGV Réseau	416	270	3,30	0,0510
TGV Atlantique	490	380	3,90	0,0565
TGV Duplex	424	270	3,20	0,0535
ICE 3 Regional (4 coches)	231	170	1,51	0,0341
AVE (s 100)	416	292	3,84	0,0498
Talgo 350 (s 102)	357	282	2,22	0,0529
ICE 3 Renfe (s 103)	485	357	3,29	0,0541
Electrotren s 104	222	165	2,17	0,0352
Electrotren s 120	271	225	0,71	0,0450
Electrotren s 130	312	371	2,99	0,0450

Figura 47: Coeficientes de las fórmulas de resistencia al avance según la locomotora. Fuente: Alberto García Álvarez.

Aunque la potencia del tren y el esfuerzo en llanta permitan adquirir una mayor velocidad, existen limitaciones en la infraestructura como son las curvas que limitan

la velocidad en ciertos tramos del trayecto. Para calcular la velocidad máxima en los tramos con curva se usará la siguiente expresión (**Ecuación (7)**):

$$V_{m\acute{a}x} = 3,6 \cdot \sqrt{R \cdot \left(\gamma_{sc} + g \cdot \frac{h}{d} \right)} \quad (7)$$

Donde:

- R: radio de la curva en metros.
- γ_{sc} : aceleración transversal sin compensar en m/s².
- g: aceleración de la gravedad en m/s².
- h: peralte en mm.
- d: ancho de vía en mm.

Una vez se resuelvan las ecuaciones anteriores, se podrá obtener la resistencia total, la cual viene definida por la siguiente fórmula (**Ecuación (8)**):

$$R_{total} = R_{gc} + R_{ar} \quad (8)$$

Por último, se verá tramo por tramo cual es la potencia máxima a realizar durante el trayecto, con dicha potencia se podrán empezar los cálculos eléctricos y mecánicos. La ecuación que relaciona potencia, velocidad y resistencia viene definida por la siguiente expresión (**Ecuación (9)**):

$$P = R_{total} \cdot V_{m\acute{a}x} \quad (9)$$

Donde:

- R_{total} : resistencia total en N.
- $V_{m\acute{a}x}$: velocidad máxima en m/s.

Partimos de los siguientes datos iniciales (**Tabla 6**):

DATOS INICIALES	
Masa del tren a plena carga (t)	343
Coeficiente A (daN)	371
Coeficiente B (daN/km/h)	2,99
Coeficiente C [daN/(km/h)] ²	0,045
Aceleración transversal sin compensar (m/s ²)	0,4
Aceleración de la gravedad (m/s ²)	9,8
Peralte (mm)	180
Ancho de vía (mm)	1435

Tabla 6: Datos de partida. Fuente: Carmona Suárez.

Debe tenerse en consideración que, aunque físicamente la velocidad pueda ser mayor de 250 km/h, se limitará a dicho valor puesto que es la velocidad máxima de la locomotora. La demanda de potencia se calculará en ambos sentidos, ya que el tren irá de Jaén a Mengíbar, pero también, de Mengíbar a Jaén.

Los cálculos vienen representados en las siguientes tablas (**Tablas 7 y 8**):

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
0	488		0		0		0,00	0,00	0,00	0,00	371,00	3710,00
50	488	0	0		0		0,00	0,00	25,00	25,00	473,88	4738,75
100	487	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	50,00	50,00	633,00	-62270,00
150	488	20	0		6860		20,00	6860,00	75,00	75,00	848,38	77083,75
200	488	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
250	489	20	0		6860		20,00	6860,00	90,00	90,00	1004,60	78646,00
300	489	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
350	489	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
400	490	20	0		6860		20,00	6860,00	90,00	90,00	1004,60	78646,00
450	490	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
500	492	40	0		13720		40,00	13720,00	90,00	90,00	1004,60	147246,00
550	493	20	0		6860		20,00	6860,00	90,00	90,00	1004,60	78646,00
600	492	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	90,00	90,00	1004,60	-58554,00
650	491	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	90,00	90,00	1004,60	-58554,00
700	492	20	0		6860		20,00	6860,00	90,00	90,00	1004,60	78646,00
750	494	40	0		13720		40,00	13720,00	90,00	90,00	1004,60	147246,00
800	496	40	0		13720		40,00	13720,00	90,00	90,00	1004,60	147246,00
850	496	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
900	496	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
950	496	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
1000	497	20	420	1,43	6860	490	21,43	7350,00	94,17	94,17	1051,65	84016,55
1050	498	20	420	1,43	6860	490	21,43	7350,00	94,17	94,17	1051,65	84016,55
1100	498	0	420	1,43	0	490	1,43	490,00	94,17	94,17	1051,65	15416,55
1150	499	20	420	1,43	6860	490	21,43	7350,00	94,17	94,17	1051,65	84016,55
1200	499	0	420	1,43	0	490	1,43	490,00	94,17	94,17	1051,65	15416,55
1250	501	40	420	1,43	13720	490	41,43	14210,00	94,17	94,17	1051,65	152616,55
1300	502	20	420	1,43	6860	490	21,43	7350,00	94,17	94,17	1051,65	84016,55
1350	502	0	420	1,43	0	490	1,43	490,00	94,17	94,17	1051,65	15416,55
1400	503	20	420	1,43	6860	490	21,43	7350,00	94,17	94,17	1051,65	84016,55
1450	502	-20	420	1,43	-6860	490	-18,57	-6370,00	94,17	94,17	1051,65	-53183,45
1500	503	20	420	1,43	6860	490	21,43	7350,00	94,17	94,17	1051,65	84016,55
1550	503	0	420	1,43	0	490	1,43	490,00	94,17	94,17	1051,65	15416,55
1600	503	0	420	1,43	0	490	1,43	490,00	94,17	94,17	1051,65	15416,55
1650	503	0	420	1,43	0	490	1,43	490,00	94,17	94,17	1051,65	15416,55
1700	505	40	420	1,43	13720	490	41,43	14210,00	94,17	94,17	1051,65	152616,55
1750	507	40	420	1,43	13720	490	41,43	14210,00	94,17	94,17	1051,65	152616,55
1800	508	20	0		6860		20,00	6860,00	95,00	95,00	1061,18	79211,75
1850	507	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	98,00	98,00	1096,20	-57638,00
1900	508	20	0		6860		20,00	6860,00	98,00	98,00	1096,20	79562,00
1950	510	40	0		13720		40,00	13720,00	102,00	102,00	1144,16	148641,60
2000	508	-40	520	1,15	-13720	395,77	-38,85	-13324,23	104,79	104,79	1178,41	-121458,24

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
2050	510	40	520	1,15	13720	395,77	41,15	14115,77	104,79	104,79	1178,41	152941,76
2100	508	-40	520	1,15	-13720	395,77	-38,85	-13324,23	104,79	104,79	1178,41	-121458,24
2150	505	-40	520	1,15	-13720	395,77	-38,85	-13324,23	104,79	104,79	1178,41	-121458,24
2200	503	-40	520	1,15	-13720	395,77	-38,85	-13324,23	104,79	104,79	1178,41	-121458,24
2250	501	-40	520	1,15	-13720	395,77	-38,85	-13324,23	104,79	104,79	1178,41	-121458,24
2300	500	-20	520	1,15	-6860	395,77	-18,85	-6464,23	104,79	104,79	1178,41	-52858,24
2350	499	-20	520	1,15	-6860	395,77	-18,85	-6464,23	104,79	104,79	1178,41	-52858,24
2400	499	0	520	1,15	0	395,77	1,15	395,77	104,79	104,79	1178,41	15741,76
2450	499	0	520	1,15	0	395,77	1,15	395,77	104,79	104,79	1178,41	15741,76
2500	499	0	520	1,15	0	395,77	1,15	395,77	104,79	104,79	1178,41	15741,76
2550	499	0	0		0		0,00	0,00	106,00	106,00	1193,56	11935,60
2600	498	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	110,00	110,00	1244,40	-56156,00
2650	496	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	115,00	115,00	1309,98	-124100,25
2700	496	0	0		0		0,00	0,00	120,00	120,00	1377,80	13778,00
2750	495	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	125,00	125,00	1447,88	-54121,25
2800	495	0	0		0		0,00	0,00	130,00	130,00	1520,20	15202,00
2850	494	-20	817	0,73	-6860	251,90	-19,27	-6608,10	131,34	131,34	1540,02	-50680,80
2900	494	0	817	0,73	0	251,90	0,73	251,90	131,34	131,34	1540,02	17919,20
2950	492	-40	817	0,73	-13720	251,90	-39,27	-13468,10	131,34	131,34	1540,02	-119280,80
3000	491	-20	817	0,73	-6860	251,90	-19,27	-6608,10	131,34	131,34	1540,02	-50680,80
3050	489	-40	817	0,73	-13720	251,90	-39,27	-13468,10	131,34	131,34	1540,02	-119280,80
3100	489	0	817	0,73	0	251,90	0,73	251,90	131,34	131,34	1540,02	17919,20
3150	489	0	817	0,73	0	251,90	0,73	251,90	131,34	131,34	1540,02	17919,20
3200	487	-40	817	0,73	-13720	251,90	-39,27	-13468,10	131,34	131,34	1540,02	-119280,80
3250	487	0	817	0,73	0	251,90	0,73	251,90	131,34	131,34	1540,02	17919,20
3300	486	-20	817	0,73	-6860	251,90	-19,27	-6608,10	131,34	131,34	1540,02	-50680,80
3350	487	20	817	0,73	6860	251,90	20,73	7111,90	131,34	131,34	1540,02	86519,20
3400	484	-40	817	0,73	-13720	251,90	-39,27	-13468,10	131,34	131,34	1540,02	-119280,80
3450	482	-40	817	0,73	-13720	251,90	-39,27	-13468,10	131,34	131,34	1540,02	-119280,80
3500	481	-20	817	0,73	-6860	251,90	-19,27	-6608,10	131,34	131,34	1540,02	-50680,80
3550	480	-20	817	0,73	-6860	251,90	-19,27	-6608,10	131,34	131,34	1540,02	-50680,80
3600	480	0	817	0,73	0	251,90	0,73	251,90	131,34	131,34	1540,02	17919,20
3650	479	-20	817	0,73	-6860	251,90	-19,27	-6608,10	131,34	131,34	1540,02	-50680,80
3700	478	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	135,00	135,00	1594,78	-52652,25
3750	477	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	135,00	135,00	1594,78	-52652,25
3800	476	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	140,00	140,00	1671,60	-51884,00
3850	474	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	140,00	140,00	1671,60	-120484,00
3900	471	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	145,00	145,00	1750,68	-119693,25
3950	470	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	145,00	145,00	1750,68	-51093,25
4000	467	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	150,00	150,00	1832,00	-118880,00

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
4050	468	20	0		6860		20,00	6860,00	150,00	150,00	1832,00	86920,00
4100	468	0	0		0		0,00	0,00	155,00	155,00	1915,58	19155,75
4150	466	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	155,00	155,00	1915,58	-118044,25
4200	466	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
4250	464	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	160,00	160,00	2001,40	-117186,00
4300	463	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
4350	462	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
4400	461	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
4450	461	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
4500	461	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
4550	460	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
4600	460	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
4650	459	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
4700	459	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
4750	459	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
4800	459	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
4850	459	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
4900	458	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
4950	457	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
5000	458	20	0		6860		20,00	6860,00	160,00	160,00	2001,40	88614,00
5050	458	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
5100	457	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
5150	458	20	0		6860		20,00	6860,00	160,00	160,00	2001,40	88614,00
5200	458	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
5250	458	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
5300	459	20	0		6860		20,00	6860,00	160,00	160,00	2001,40	88614,00
5350	455	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	160,00	160,00	2001,40	-117186,00
5400	455	0	0		0		0,00	0,00	165,00	165,00	2089,48	20894,75
5450	454	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	170,00	170,00	2179,80	-46802,00
5500	452	-40	1489		-13720	138,21	-40,00	-13720,00	177,32	177,32	2316,00	-114039,96
5550	450	-40	1489		-13720	138,21	-40,00	-13720,00	177,32	177,32	2316,00	-114039,96
5600	449	-20	1489		-6860	138,21	-20,00	-6860,00	177,32	177,32	2316,00	-45439,96
5650	448	-20	1489		-6860	138,21	-20,00	-6860,00	177,32	177,32	2316,00	-45439,96
5700	447	-20	1489		-6860	138,21	-20,00	-6860,00	177,32	177,32	2316,00	-45439,96
5750	445	-40	1489		-13720	138,21	-40,00	-13720,00	177,32	177,32	2316,00	-114039,96
5800	444	-20	1489		-6860	138,21	-20,00	-6860,00	177,32	177,32	2316,00	-45439,96
5850	442	-40	1489		-13720	138,21	-40,00	-13720,00	177,32	177,32	2316,00	-114039,96
5900	441	-20	1489		-6860	138,21	-20,00	-6860,00	177,32	177,32	2316,00	-45439,96
5950	441	0	1489		0	138,21	0,00	0,00	177,32	177,32	2316,00	23160,04
6000	438	-40	1489		-13720	138,21	-40,00	-13720,00	177,32	177,32	2316,00	-114039,96

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
6050	437	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	180,00	180,00	2367,20	-44928,00
6100	437	0	0		0		0,00	0,00	182,30	182,30	2411,58	24115,75
6150	437	0	0		0		0,00	0,00	184,00	184,00	2444,68	24446,80
6200	435	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	186,10	186,10	2485,93	-112340,67
6250	435	0	0		0		0,00	0,00	188,20	188,20	2527,58	25275,84
6300	432	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	190,30	190,30	2569,63	-111503,69
6350	433	20	0		6860		20,00	6860,00	192,40	192,40	2612,08	94720,75
6400	432	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	194,50	194,50	2654,92	-42050,84
6450	432	0	0		0		0,00	0,00	196,60	196,60	2698,15	26981,54
6500	431	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	198,70	198,70	2741,79	-41182,11
6550	431	0	0		0		0,00	0,00	200,80	200,80	2785,82	27858,21
6600	430	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	202,90	202,90	2830,25	-40297,51
6650	430	0	0		0		0,00	0,00	205,00	205,00	2875,08	28750,75
6700	429	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	207,10	207,10	2920,30	-39397,03
6750	428	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	209,20	209,20	2965,92	-38940,83
6800	428	0	0		0		0,00	0,00	211,30	211,30	3011,93	30119,33
6850	429	20	0		6860		20,00	6860,00	213,40	213,40	3058,35	99183,46
6900	427	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	215,50	215,50	3105,16	-106148,44
6950	424	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	217,60	217,60	3152,36	-105676,37
7000	422	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	219,70	219,70	3199,97	-105200,33
7050	421	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	221,80	221,80	3247,97	-36120,32
7100	421	0	0		0		0,00	0,00	223,90	223,90	3296,37	32963,65
7150	421	0	0		0		0,00	0,00	226,00	226,00	3345,16	33451,60
7200	421	0	0		0		0,00	0,00	231,00	231,00	3462,94	34629,35
7250	420	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	232,60	232,60	3501,10	-33589,02
7300	421	20	0		6860		20,00	6860,00	232,60	232,60	3501,10	103610,98
7350	419	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	232,60	232,60	3501,10	-102189,02
7400	417	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	232,60	232,60	3501,10	-102189,02
7450	422	40	0		13720		40,00	13720,00	232,60	232,60	3501,10	172210,98
7500	415	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	232,60	232,60	3501,10	-102189,02
7550	412	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	232,60	232,60	3501,10	-102189,02
7600	409	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	232,60	232,60	3501,10	-102189,02
7650	408	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	232,60	232,60	3501,10	-33589,02
7700	408	0	0		0		0,00	0,00	232,60	232,60	3501,10	35010,98
7750	408	0	0		0		0,00	0,00	232,60	232,60	3501,10	35010,98
7800	409	20	0		6860		20,00	6860,00	232,60	232,60	3501,10	103610,98
7850	409	0	0		0		0,00	0,00	232,60	232,60	3501,10	35010,98
7900	409	0	0		0		0,00	0,00	232,60	232,60	3501,10	35010,98
7950	409	0	0		0		0,00	0,00	232,60	232,60	3501,10	35010,98
8000	409	0	0		0		0,00	0,00	232,60	232,60	3501,10	35010,98

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
8050	407	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	232,60	232,60	3501,10	-102189,02
8100	406	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	230,00	230,00	3439,20	-34208,00
8150	405	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	227,00	227,00	3368,54	-34914,65
8200	405	0	0		0		0,00	0,00	225,00	225,00	3321,88	33218,75
8250	405	0	0		0		0,00	0,00	221,30	221,30	3236,50	32365,03
8300	402	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	220,00	220,00	3206,80	-105132,00
8350	402	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
8400	402	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
8450	403	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
8500	400	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	220,00	220,00	3206,80	-105132,00
8550	399	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
8600	398	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
8650	397	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
8700	396	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
8750	395	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
8800	395	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
8850	395	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
8900	396	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
8950	392	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	220,00	220,00	3206,80	-105132,00
9000	391	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
9050	392	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
9100	391	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
9150	390	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
9200	389	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
9250	389	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
9300	389	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
9350	388	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
9400	387	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
9450	386	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
9500	385	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
9550	384	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	215,00	215,00	3093,98	-37660,25
9600	384	0	0		0		0,00	0,00	210,00	210,00	2983,40	29834,00
9650	383	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	205,00	205,00	2875,08	-39849,25
9700	382	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	200,00	200,00	2769,00	-40910,00
9750	382	0	0		0		0,00	0,00	195,00	195,00	2665,18	26651,75
9800	382	0	0		0		0,00	0,00	190,00	190,00	2563,60	25636,00
9850	381	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	185,00	185,00	2464,28	-43957,25
9900	379	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	180,00	180,00	2367,20	-113528,00
9950	380	20	0		6860		20,00	6860,00	175,00	175,00	2272,38	91323,75
10000	379	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	170,00	170,00	2179,80	-46802,00

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{eg} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
10050	377	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	165,00	165,00	2089,48	-116305,25
10100	376	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
10150	375	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	155,00	155,00	1915,58	-49444,25
10200	372	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	150,00	150,00	1832,00	-118880,00
10250	374	40	0		13720		40,00	13720,00	145,00	145,00	1750,68	154706,75
10300	375	20	0		6860		20,00	6860,00	140,00	140,00	1671,60	85316,00
10350	377	40	0		13720		40,00	13720,00	135,00	135,00	1594,78	153147,75
10400	375	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	130,00	130,00	1520,20	-121998,00
10450	374	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	125,00	125,00	1447,88	-54121,25
10500	375	20	0		6860		20,00	6860,00	120,00	120,00	1377,80	82378,00
10550	374	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	115,00	115,00	1309,98	-55500,25
10600	373	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	110,00	110,00	1244,40	-56156,00
10650	371	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	105,00	105,00	1181,08	-125389,25
10700	371	0	0		0		0,00	0,00	100,00	100,00	1120,00	11200,00
10750	374	40	0		13720		40,00	13720,00	95,00	95,00	1061,18	147811,75
10800	376	40	0		13720		40,00	13720,00	90,00	90,00	1004,60	147246,00
10850	375	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	90	90	1004,60	-58554,00
10900	376	20	0		6860		20,00	6860,00	85,00	85,00	950,28	78102,75
10950	375	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	80,00	80,00	898,20	-59618,00
11000	375	0	0		0		0,00	0,00	75,00	75,00	848,38	8483,75
11050	375	0	0		0		0,00	0,00	70,00	70,00	800,80	8008,00
11100	375	0	0		0		0,00	0,00	70	70	800,80	8008,00
11150	375	0	0		0		0,00	0,00	65,00	65,00	755,48	7554,75
11200	374	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	65	65	755,48	-61045,25
11250	374	0	0		0		0,00	0,00	60	60	712,40	7124,00
11300	373	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	60,00	60,00	712,40	-61476,00
11350	373	0	0		0		0,00	0,00	55,00	55,00	671,58	6715,75
11400	371	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	50,00	50,00	633,00	-130870,00
11450	371	0	0		0		0,00	0,00	45,00	45,00	596,68	5966,75
11500	370	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	40,00	40,00	562,60	-62974,00
11550	369	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	40	40	562,60	-62974,00
11600	369	0	0		0		0,00	0,00	35	35	530,78	5307,75
11650	369	0	0		0		0,00	0,00	35,00	35,00	530,78	5307,75
11700	368	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	30,00	30,00	501,20	-63588,00
11750	368	0	0		0		0,00	0,00	25,00	25,00	473,88	4738,75
11800	368	0	0		0		0,00	0,00	20,00	20,00	448,80	4488,00
11850	367	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	15,00	15,00	425,98	-64340,25
11900	368	20	0		6860		20,00	6860,00	10,00	10,00	405,40	72654,00

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
11950	367	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	5,00	5,00	387,08	-64729,25
ESTACIÓN DE GRAÑENA												
12000	367	0	0		0		0,00	0,00	0,00	0,00	371,00	3710,00
12050	366	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	25,00	25,00	473,88	-63861,25
12100	366	0	0		0		0,00	0,00	50	50	633,00	6330,00
12150	365	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	75,00	75,00	848,38	-60116,25
12200	364	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	100,00	100,00	1120,00	-57400,00
12250	362	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	100,00	100,00	1120,00	-126000,00
12300	361	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	100,00	100,00	1120,00	-57400,00
12350	360	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	100,00	100,00	1120,00	-57400,00
12400	359	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	100,00	100,00	1120,00	-57400,00
12450	359	0	0		0		0,00	0,00	100,00	100,00	1120,00	11200,00
12500	358	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	100,00	100,00	1120,00	-57400,00
12550	356	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	110,00	110,00	1244,40	-124756,00
12600	355	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	120,00	120,00	1377,80	-54822,00
12650	354	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	120,00	120,00	1377,80	-54822,00
12700	355	20	0		6860		20,00	6860,00	130,00	130,00	1520,20	83802,00
12750	355	0	0		0		0,00	0,00	130,00	130,00	1520,20	15202,00
12800	356	20	0		6860		20,00	6860,00	135,00	135,00	1594,78	84547,75
12850	354	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	135,00	135,00	1594,78	-121252,25
12900	352	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	139,00	139,00	1656,06	-120639,45
12950	350	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	143,00	143,00	1718,78	-120012,25
13000	350	0	0		0		0,00	0,00	147,00	147,00	1782,94	17829,35
13050	349	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	151,00	151,00	1848,54	-50114,65
13100	351	40	0		13720		40,00	13720,00	155,00	155,00	1915,58	156355,75
13150	351	0	0		0		0,00	0,00	159,00	159,00	1984,06	19840,55
13200	352	20	0		6860		20,00	6860,00	163,00	163,00	2053,98	89139,75
13250	352	0	0		0		0,00	0,00	167,00	167,00	2125,34	21253,35
13300	352	0	0		0		0,00	0,00	171,00	171,00	2198,14	21981,35
13350	352	0	0		0		0,00	0,00	175,00	175,00	2272,38	22723,75
13400	352	0	0		0		0,00	0,00	179,00	179,00	2348,06	23480,55
13450	351	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	183,00	183,00	2425,18	-44348,25
13500	349	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	187,00	187,00	2503,74	-112162,65
13550	349	0	0		0		0,00	0,00	191,00	191,00	2583,74	25837,35
13600	350	20	0		6860		20,00	6860,00	195,00	195,00	2665,18	95251,75
13650	351	20	0		6860		20,00	6860,00	199,00	199,00	2748,06	96080,55
13700	352	20	0		6860		20,00	6860,00	203,00	203,00	2832,38	96923,75
13750	352	0	0		0		0,00	0,00	207,00	207,00	2918,14	29181,35
13800	352	0	0		0		0,00	0,00	211,00	211,00	3005,34	30053,35
13850	352	0	0		0		0,00	0,00	215,00	215,00	3093,98	30939,75
13900	352	0	0		0		0,00	0,00	219,00	219,00	3184,06	31840,55
13950	352	0	0		0		0,00	0,00	223,00	223,00	3275,58	32755,75

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
14000	351	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	227,00	227,00	3368,54	-34914,65
14050	351	0	0		0		0,00	0,00	231,00	231,00	3462,94	34629,35
14100	351	0	0		0		0,00	0,00	235,00	235,00	3558,78	35587,75
14150	350	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	239,00	239,00	3656,06	-32039,45
14200	349	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	243,00	243,00	3754,78	-31052,25
14250	348	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	247,00	247,00	3854,94	-30050,65
14300	346	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	251,00	250,00	3931,00	-97890,00
14350	345	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	255,00	250,00	3931,00	-29290,00
14400	343	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	259,00	250,00	3931,00	-97890,00
14450	344	20	0		6860		20,00	6860,00	263,00	250,00	3931,00	107910,00
14500	340	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	267,00	250,00	3931,00	-97890,00
14550	338	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
14600	341	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
14650	342	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
14700	342	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
14750	343	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
14800	342	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
14850	342	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
14900	340	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
14950	336	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
15000	333	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
15050	333	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
15100	332	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
15150	332	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
15200	330	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
15250	332	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
15300	329	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
15350	330	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
15400	334	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
15450	332	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
15500	329	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
15550	325	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
15600	324	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
15650	323	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
15700	325	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
15750	327	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
15800	324	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
15850	322	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
15900	320	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
15950	319	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
16000	314	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{brazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
16050	318	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
16100	318	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
16150	319	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
16200	319	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
16250	319	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
16300	318	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
16350	317	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
16400	316	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
16450	315	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
16500	315	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
16550	313	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
16600	312	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
16650	312	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
16700	311	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
16750	310	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
16800	309	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
16850	309	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
16900	309	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
16950	308	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
17000	308	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
17050	307	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
17100	307	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
17150	307	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
17200	304	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
17250	305	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
17300	304	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
17350	304	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
17400	303	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
17450	303	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
17500	302	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
17550	302	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
17600	300	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
17650	300	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
17700	300	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
17750	300	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
17800	299	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
17850	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
17900	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
17950	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18000	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{sc} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
18050	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18100	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18150	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18200	298	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
18250	298	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18300	298	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18350	298	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18400	297	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
18450	297	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18500	296	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
18550	296	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18600	296	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18650	295	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
18700	295	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18750	294	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
18800	294	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18850	292	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
18900	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
18950	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
19000	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
19050	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
19100	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
19150	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
19200	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
19250	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
19300	293	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
19350	293	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
19400	292	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
19450	292	0	0		0		0,00	0,00	265,00	250,00	3931,00	39310,00
19500	291	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	259,00	250,00	3931,00	-29290,00
19550	292	20	0		6860		20,00	6860,00	253,00	250,00	3931,00	107910,00
19600	292	0	0		0		0,00	0,00	247,00	247,00	3854,94	38549,35
19650	292	0	0		0		0,00	0,00	241,00	241,00	3705,24	37052,35
19700	292	0	0		0		0,00	0,00	235,00	235,00	3558,78	35587,75
19750	292	0	0		0		0,00	0,00	229,00	229,00	3415,56	34155,55
19800	291	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	223,00	223,00	3275,58	-35844,25
19850	291	0	0		0		0,00	0,00	217,00	217,00	3138,84	31388,35
19900	291	0	0		0		0,00	0,00	211,00	211,00	3005,34	30053,35
19950	293	40	0		13720		40,00	13720,00	205,00	205,00	2875,08	165950,75
20000	291	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	199,00	199,00	2748,06	-109719,45

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
20050	291	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
20100	290	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	199,00	199,00	2748,06	-41119,45
20150	290	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
20200	290	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
20250	290	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
20300	289	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	199,00	199,00	2748,06	-41119,45
20350	290	20	0		6860		20,00	6860,00	199,00	199,00	2748,06	96080,55
20400	290	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
20450	290	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
20500	289	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	199,00	199,00	2748,06	-41119,45
20550	289	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
20600	291	40	0		13720		40,00	13720,00	199,00	199,00	2748,06	164680,55
20650	290	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	199,00	199,00	2748,06	-41119,45
20700	291	20	0		6860		20,00	6860,00	199,00	199,00	2748,06	96080,55
20750	291	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
20800	290	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	199,00	199,00	2748,06	-41119,45
20850	289	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	199,00	199,00	2748,06	-41119,45
20900	289	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
20950	289	0	2175	0,28	0	94,62	0,28	94,62	214,30	214,30	3078,43	31730,49
21000	289	0	2175	0,28	0	94,62	0,28	94,62	214,30	214,30	3078,43	31730,49
21050	289	0	2175	0,28	0	94,62	0,28	94,62	214,30	214,30	3078,43	31730,49
21100	290	20	2175	0,28	6860	94,62	20,28	6954,62	214,30	214,30	3078,43	100330,49
21150	288	-40	2175	0,28	-13720	94,62	-39,72	-13625,38	214,30	214,30	3078,43	-105469,51
21200	287	-20	2175	0,28	-6860	94,62	-19,72	-6765,38	214,30	214,30	3078,43	-36869,51
21250	289	40	2175	0,28	13720	94,62	40,28	13814,62	214,30	214,30	3078,43	168930,49
21300	291	40	2175	0,28	13720	94,62	40,28	13814,62	214,30	214,30	3078,43	168930,49
21350	289	-40	2175	0,28	-13720	94,62	-39,72	-13625,38	214,30	214,30	3078,43	-105469,51
21400	287	-40	2175	0,28	-13720	94,62	-39,72	-13625,38	214,30	214,30	3078,43	-105469,51
21450	286	-20	2175	0,28	-6860	94,62	-19,72	-6765,38	214,30	214,30	3078,43	-36869,51
21500	285	-20	2175	0,28	-6860	94,62	-19,72	-6765,38	214,30	214,30	3078,43	-36869,51
21550	284	-20	2175	0,28	-6860	94,62	-19,72	-6765,38	214,30	214,30	3078,43	-36869,51
21600	283	-20	2175	0,28	-6860	94,62	-19,72	-6765,38	214,30	214,30	3078,43	-36869,51
21650	283	0	2175	0,28	0	94,62	0,28	94,62	214,30	214,30	3078,43	31730,49
21700	281	-40	2175	0,28	-13720	94,62	-39,72	-13625,38	214,30	214,30	3078,43	-105469,51
21750	280	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	215,00	215,00	3093,98	-37660,25
21800	281	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
21850	280	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	225,00	225,00	3321,88	-35381,25
21900	280	0	0		0		0,00	0,00	230,00	230,00	3439,20	34392,00
21950	280	0	0		0		0,00	0,00	235,00	235,00	3558,78	35587,75
22000	280	0	0		0		0,00	0,00	240,00	240,00	3680,60	36806,00

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{gc} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
22050	279	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	245,00	245,00	3804,68	-30553,25
22100	279	0	0		0		0,00	0,00	250,00	250,00	3931,00	39310,00
22150	278	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	255,00	250,00	3931,00	-29290,00
22200	278	0	0		0		0,00	0,00	260,00	250,00	3931,00	39310,00
22250	278	0	0		0		0,00	0,00	265,00	250,00	3931,00	39310,00
22300	278	0	0		0		0,00	0,00	270,00	250,00	3931,00	39310,00
22350	277	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	275,00	250,00	3931,00	-29290,00
22400	277	0	0		0		0,00	0,00	280,00	250,00	3931,00	39310,00
22450	277	0	0		0		0,00	0,00	285,00	250,00	3931,00	39310,00
22500	277	0	0		0		0,00	0,00	290,00	250,00	3931,00	39310,00
22550	277	0	0		0		0,00	0,00	295,00	250,00	3931,00	39310,00
22600	277	0	0		0		0,00	0,00	300,00	250,00	3931,00	39310,00
22650	276	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	305,00	250,00	3931,00	-29290,00
22700	275	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	305,00	250,00	3931,00	-29290,00
22750	274	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	305,00	250,00	3931,00	-29290,00
22800	273	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	305,00	250,00	3931,00	-29290,00
22850	272	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	305,00	250,00	3931,00	-29290,00
22900	273	20	0		6860		20,00	6860,00	305,00	250,00	3931,00	107910,00
22950	272	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	305,00	250,00	3931,00	-29290,00
23000	272	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
23050	272	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
23100	272	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
23150	273	20	0		6860		20,00	6860,00	305,00	250,00	3931,00	107910,00
23200	272	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	305,00	250,00	3931,00	-29290,00
23250	272	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
23300	272	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
23350	271	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	305,00	250,00	3931,00	-29290,00
23400	271	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
23450	271	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
23500	270	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	305,00	250,00	3931,00	-29290,00
23550	269	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	310,00	250,00	3931,00	-29290,00
23600	269	0	0		0		0,00	0,00	315,00	250,00	3931,00	39310,00
23650	268	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	305,00	250,00	3931,00	-29290,00
23700	267	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	320,00	250,00	3931,00	-28878,56
23750	267	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
23800	266	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
23850	266	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
23900	266	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
23950	266	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
24000	265	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
24050	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
24100	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
24150	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
24200	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
24250	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
24300	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
24350	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
24400	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
24450	266	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
24500	265	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
24550	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
24600	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
24650	264	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
24700	263	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
24750	262	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
24800	254	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
24850	259	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
24900	262	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
24950	265	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
25000	266	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
25050	269	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
25100	268	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
25150	264	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
25200	264	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
25250	264	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
25300	262	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
25350	261	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
25400	260	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
25450	259	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
25500	261	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
25550	262	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
25600	262	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
25650	261	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
25700	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
25750	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
25800	260	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
25850	260	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
25900	261	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
25950	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
26000	260	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{gc} (daN)	R _{sc} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
26050	260	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
26100	262	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
26150	262	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
26200	261	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
26250	260	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
26300	261	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
26350	258	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
26400	258	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
26450	260	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
26500	261	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
26550	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
26600	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
26650	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
26700	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
26750	262	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
26800	260	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
26850	258	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
26900	258	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
26950	261	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
27000	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
27050	260	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
27100	259	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
27150	259	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
27200	258	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
27250	258	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
27300	257	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
27350	258	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
27400	258	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
27450	258	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
27500	258	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
27550	257	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
27600	255	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
27650	255	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
27700	254	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
27750	253	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
27800	253	0	0		0		0	0	320,00	250,00	3931,00	39310,00
27850	253	0	0		0		0	0	315	250,00	3931,00	39310,00
27900	252	-20	0		-6860		-20	-6860	310,00	250,00	3931,00	-29290,00
27950	252	0	0		0		0	0	300,00	250,00	3931,00	39310,00
28000	251	-20	0		-6860		-20	-6860	290,00	250,00	3931,00	-29290,00

PREVISIÓN DE POTENCIA JAÉN-MENGÍBAR												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
28050	251	0	0		0		0	0	280,00	250,00	3931,00	39310,00
28100	251	0	0		0		0	0	270,00	250,00	3931,00	39310,00
28150	250	-20	0		-6860		-20	-6860	260,00	250,00	3931,00	-29290,00
28200	250	0	0		0		0	0	250,00	250,00	3931,00	39310,00
28250	250	0	0		0		0	0	240,00	240,00	3680,60	36806,00
28300	251	20	0		6860		20	6860	230,00	230,00	3439,20	102992,00
28350	251	0	0		0		0	0	220,00	220,00	3206,80	32068,00
28400	249	-40	0		-13720		-40	-13720	210,00	210,00	2983,40	-107366,00
28450	247	-40	0		-13720		-40	-13720	200,00	200,00	2769,00	-109510,00
28500	247	0	0		0		0	0	190,00	190,00	2563,60	25636,00
28550	247	0	0		0		0	0	180,00	180,00	2367,20	23672,00
28600	246	-20	0		-6860		-20	-6860	170,00	170,00	2179,80	-46802,00
28650	247	20	0		6860		20	6860	160,00	160,00	2001,40	88614,00
28700	247	0	0		0		0	0	150,00	150,00	1832,00	18320,00
28750	247	0	0		0		0	0	140,00	140,00	1671,60	16716,00
28800	246	-20	0		-6860		-20	-6860	130,00	130,00	1520,20	-53398,00
28850	248	40	0		13720		40	13720	120,00	120,00	1377,80	150978,00
28900	246	-40	0		-13720		-40	-13720	110,00	110,00	1244,40	-124756,00
28950	247	20	0		6860		20	6860	95,00	95,00	1061,18	79211,75
29000	246	-20	0		-6860		-20	-6860	80,00	80,00	898,20	-59618,00
29050	248	40	0		13720		40	13720	70,00	70,00	800,80	145208,00
29100	247	-20	0		-6860		-20	-6860	60,00	60,00	712,40	-61476,00
29150	247	0	0		0		0	0	45,00	45,00	596,68	5966,75
29200	247	0	0		0		0	0	30,00	30,00	501,20	5012,00
29250	247	0	0		0		0	0	15,00	15,00	425,98	4259,75
29300	247	0	0		0		0	0	0,00	0,00	371,00	3710,00

Tabla 7: Previsión de potencia del tramo Jaén - Mengíbar. Fuente: Elaboración propia.

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
0	247		0		0			0,00	0,00	0,00	371,00	3710,00
50	247	0	0		0		0,00	0,00	5,00	5,00	387,08	3870,75
100	247	0	0		0		0,00	0,00	15,00	15,00	425,98	4259,75
150	247	0	0		0		0,00	0,00	30,00	30,00	501,20	5012,00
200	247	0	0		0		0,00	0,00	45,00	45,00	596,68	5966,75
250	248	20	0		6860		20,00	6860,00	60,00	60,00	712,40	75724,00
300	246	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	70,00	70,00	800,80	-129192,00
350	247	20	0		6860		20,00	6860,00	80,00	80,00	898,20	77582,00
400	246	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	95,00	95,00	1061,18	-57988,25
450	248	40	0		13720		40,00	13720,00	110,00	110,00	1244,40	149644,00
500	246	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	120,00	120,00	1377,80	-123422,00
550	247	20	0		6860		20,00	6860,00	130,00	130,00	1520,20	83802,00
600	247	0	0		0		0,00	0,00	140,00	140,00	1671,60	16716,00
650	247	0	0		0		0,00	0,00	150,00	150,00	1832,00	18320,00
700	246	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
750	247	20	0		6860		20,00	6860,00	170,00	170,00	2179,80	90398,00
800	247	0	0		0		0,00	0,00	180,00	180,00	2367,20	23672,00
850	247	0	0		0		0,00	0,00	190,00	190,00	2563,60	25636,00
900	249	40	0		13720		40,00	13720,00	200,00	200,00	2769,00	164890,00
950	251	40	0		13720		40,00	13720,00	210,00	210,00	2983,40	167034,00
1000	251	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
1050	250	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	230,00	230,00	3439,20	-34208,00
1100	250	0	0		0		0,00	0,00	240,00	240,00	3680,60	36806,00
1150	250	0	0		0		0,00	0,00	250,00	250,00	3931,00	39310,00
1200	251	20	0		6860		20,00	6860,00	260,00	250,00	3931,00	107910,00
1250	251	0	0		0		0,00	0,00	270,00	250,00	3931,00	39310,00
1300	251	0	0		0		0,00	0,00	280,00	250,00	3931,00	39310,00
1350	252	20	0		6860		20,00	6860,00	290,00	250,00	3931,00	107910,00
1400	252	0	0		0		0,00	0,00	300,00	250,00	3931,00	39310,00
1450	253	20	0		6860		20,00	6860,00	310,00	250,00	3931,00	107910,00
1500	253	0	0		0		0,00	0,00	315,00	250,00	3931,00	39310,00
1550	253	0	0		0		0,00	0,00	320,00	250,00	3931,00	39310,00
1600	254	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
1650	255	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
1700	255	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
1750	257	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
1800	258	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
1850	258	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
1900	258	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
1950	258	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
2000	257	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
2050	258	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
2100	258	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
2150	259	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
2200	259	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
2250	260	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
2300	261	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
2350	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
2400	258	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
2450	258	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
2500	260	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
2550	262	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
2600	261	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
2650	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
2700	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
2750	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
2800	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
2850	260	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
2900	258	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
2950	262	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
3000	261	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
3050	260	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
3100	261	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
3150	262	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
3200	262	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
3250	260	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
3300	260	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
3350	261	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
3400	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
3450	260	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
3500	260	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
3550	261	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
3600	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
3650	261	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
3700	262	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
3750	262	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
3800	261	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
3850	259	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
3900	260	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
3950	261	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
4000	258	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
4050	264	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
4100	264	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
4150	264	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
4200	268	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
4250	269	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
4300	266	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
4350	265	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
4400	262	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
4450	259	-40	5002	0,12	-13720	41,14	-39,88	-13678,86	324,99	250,00	3931,00	-97478,56
4500	254	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
4550	262	40	5002	0,12	13720	41,14	40,12	13761,14	324,99	250,00	3931,00	176921,44
4600	263	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
4650	264	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
4700	265	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
4750	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
4800	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
4850	266	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
4900	265	-20	5002	0,12	-6860	41,14	-19,88	-6818,86	324,99	250,00	3931,00	-28878,56
4950	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
5000	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
5050	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
5100	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
5150	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
5200	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
5250	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
5300	265	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
5350	266	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
5400	266	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
5450	266	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
5500	266	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
5550	267	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	324,99	250,00	3931,00	108321,44
5600	267	0	5002	0,12	0	41,14	0,12	41,14	324,99	250,00	3931,00	39721,44
5650	268	20	5002	0,12	6860	41,14	20,12	6901,14	320,00	250,00	3931,00	108321,44
5700	269	20	0		6860		20,00	6860,00	305,00	250,00	3931,00	107910,00
5750	269	0	0		0		0,00	0,00	315,00	250,00	3931,00	39310,00
5800	270	20	0		6860		20,00	6860,00	310,00	250,00	3931,00	107910,00
5850	271	20	0		6860		20,00	6860,00	305,00	250,00	3931,00	107910,00
5900	271	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
5950	271	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
6000	272	20	0		6860		20,00	6860,00	305,00	250,00	3931,00	107910,00

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
6050	272	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
6100	272	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
6150	273	20	0		6860		20,00	6860,00	305,00	250,00	3931,00	107910,00
6200	272	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	305,00	250,00	3931,00	-29290,00
6250	272	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
6300	272	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
6350	272	0	0		0		0,00	0,00	305,00	250,00	3931,00	39310,00
6400	273	20	0		6860		20,00	6860,00	305,00	250,00	3931,00	107910,00
6450	272	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	305,00	250,00	3931,00	-29290,00
6500	273	20	0		6860		20,00	6860,00	305,00	250,00	3931,00	107910,00
6550	274	20	0		6860		20,00	6860,00	305,00	250,00	3931,00	107910,00
6600	275	20	0		6860		20,00	6860,00	305,00	250,00	3931,00	107910,00
6650	276	20	0		6860		20,00	6860,00	305,00	250,00	3931,00	107910,00
6700	277	20	0		6860		20,00	6860,00	305,00	250,00	3931,00	107910,00
6750	277	0	0		0		0,00	0,00	300,00	250,00	3931,00	39310,00
6800	277	0	0		0		0,00	0,00	295,00	250,00	3931,00	39310,00
6850	277	0	0		0		0,00	0,00	290,00	250,00	3931,00	39310,00
6900	277	0	0		0		0,00	0,00	285,00	250,00	3931,00	39310,00
6950	277	0	0		0		0,00	0,00	280,00	250,00	3931,00	39310,00
7000	278	20	0		6860		20,00	6860,00	275,00	250,00	3931,00	107910,00
7050	278	0	0		0		0,00	0,00	270,00	250,00	3931,00	39310,00
7100	278	0	0		0		0,00	0,00	265,00	250,00	3931,00	39310,00
7150	278	0	0		0		0,00	0,00	260,00	250,00	3931,00	39310,00
7200	279	20	0		6860		20,00	6860,00	255,00	250,00	3931,00	107910,00
7250	279	0	0		0		0,00	0,00	250,00	250,00	3931,00	39310,00
7300	280	20	0		6860		20,00	6860,00	245,00	245,00	3804,68	106646,75
7350	280	0	0		0		0,00	0,00	240,00	240,00	3680,60	36806,00
7400	280	0	0		0		0,00	0,00	235,00	235,00	3558,78	35587,75
7450	280	0	0		0		0,00	0,00	230,00	230,00	3439,20	34392,00
7500	281	20	0		6860		20,00	6860,00	225,00	225,00	3321,88	101818,75
7550	280	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
7600	281	20	0		6860		20,00	6860,00	215,00	215,00	3093,98	99539,75
7650	283	40	2175	0,28	13720	94,62	40,28	13814,62	214,30	214,30	3078,43	168930,49
7700	283	0	2175	0,28	0	94,62	0,28	94,62	214,30	214,30	3078,43	31730,49
7750	284	20	2175	0,28	6860	94,62	20,28	6954,62	214,30	214,30	3078,43	100330,49
7800	285	20	2175	0,28	6860	94,62	20,28	6954,62	214,30	214,30	3078,43	100330,49
7850	286	20	2175	0,28	6860	94,62	20,28	6954,62	214,30	214,30	3078,43	100330,49
7900	287	20	2175	0,28	6860	94,62	20,28	6954,62	214,30	214,30	3078,43	100330,49
7950	289	40	2175	0,28	13720	94,62	40,28	13814,62	214,30	214,30	3078,43	168930,49
8000	291	40	2175	0,28	13720	94,62	40,28	13814,62	214,30	214,30	3078,43	168930,49

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entiero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
8050	289	-40	2175	0,28	-13720	94,62	-39,72	-13625,38	214,30	214,30	3078,43	-105469,51
8100	287	-40	2175	0,28	-13720	94,62	-39,72	-13625,38	214,30	214,30	3078,43	-105469,51
8150	288	20	2175	0,28	6860	94,62	20,28	6954,62	214,30	214,30	3078,43	100330,49
8200	290	40	2175	0,28	13720	94,62	40,28	13814,62	214,30	214,30	3078,43	168930,49
8250	289	-20	2175	0,28	-6860	94,62	-19,72	-6765,38	214,30	214,30	3078,43	-36869,51
8300	289	0	2175	0,28	0	94,62	0,28	94,62	214,30	214,30	3078,43	31730,49
8350	289	0	2175	0,28	0	94,62	0,28	94,62	214,30	214,30	3078,43	31730,49
8400	289	0	2175	0,28	0	94,62	0,28	94,62	214,30	214,30	3078,43	31730,49
8450	289	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
8500	290	20	0		6860		20,00	6860,00	199,00	199,00	2748,06	96080,55
8550	291	20	0		6860		20,00	6860,00	199,00	199,00	2748,06	96080,55
8600	291	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
8650	290	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	199,00	199,00	2748,06	-41119,45
8700	291	20	0		6860		20,00	6860,00	199,00	199,00	2748,06	96080,55
8750	289	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	199,00	199,00	2748,06	-109719,45
8800	289	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
8850	290	20	0		6860		20,00	6860,00	199,00	199,00	2748,06	96080,55
8900	290	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
8950	290	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
9000	289	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	199,00	199,00	2748,06	-41119,45
9050	290	20	0		6860		20,00	6860,00	199,00	199,00	2748,06	96080,55
9100	290	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
9150	290	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
9200	290	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
9250	291	20	0		6860		20,00	6860,00	199,00	199,00	2748,06	96080,55
9300	291	0	0		0		0,00	0,00	199,00	199,00	2748,06	27480,55
9350	293	40	0		13720		40,00	13720,00	199,00	199,00	2748,06	164680,55
9400	291	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	205,00	205,00	2875,08	-108449,25
9450	291	0	0		0		0,00	0,00	211,00	211,00	3005,34	30053,35
9500	291	0	0		0		0,00	0,00	217,00	217,00	3138,84	31388,35
9550	292	20	0		6860		20,00	6860,00	223,00	223,00	3275,58	101355,75
9600	292	0	0		0		0,00	0,00	229,00	229,00	3415,56	34155,55
9650	292	0	0		0		0,00	0,00	235,00	235,00	3558,78	35587,75
9700	292	0	0		0		0,00	0,00	241,00	241,00	3705,24	37052,35
9750	292	0	0		0		0,00	0,00	247,00	247,00	3854,94	38549,35
9800	291	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	253,00	250,00	3931,00	-29290,00
9850	292	20	0		6860		20,00	6860,00	259,00	250,00	3931,00	107910,00
9900	292	0	0		0		0,00	0,00	265,00	250,00	3931,00	39310,00
9950	293	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
10000	293	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
10050	292	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
10100	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10150	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10200	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10250	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10300	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10350	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10400	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10450	292	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10500	294	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
10550	294	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10600	295	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
10650	295	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10700	296	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
10750	296	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10800	296	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10850	297	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
10900	297	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
10950	298	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
11000	298	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11050	298	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11100	298	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11150	299	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
11200	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11250	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11300	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11350	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11400	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11450	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11500	299	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11550	300	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
11600	300	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11650	300	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11700	300	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11750	302	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
11800	302	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11850	303	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
11900	303	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
11950	304	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
12000	304	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
12050	304	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
12100	305	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
12150	304	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
12200	307	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
12250	307	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
12300	307	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
12350	308	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
12400	308	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
12450	309	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
12500	309	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
12550	309	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
12600	310	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
12650	311	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
12700	312	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
12750	312	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
12800	313	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
12850	315	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
12900	315	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
12950	316	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
13000	317	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
13050	318	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
13100	319	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
13150	319	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
13200	319	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
13250	318	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
13300	318	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
13350	314	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
13400	319	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
13450	320	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
13500	322	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
13550	324	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
13600	327	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
13650	325	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
13700	323	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
13750	324	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
13800	325	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
13850	329	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
13900	332	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
13950	334	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
14000	330	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
14050	329	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
14100	332	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
14150	330	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	271,00	250,00	3931,00	-97890,00
14200	332	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
14250	332	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
14300	333	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
14350	333	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
14400	336	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
14450	340	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
14500	342	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
14550	342	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
14600	343	20	0		6860		20,00	6860,00	271,00	250,00	3931,00	107910,00
14650	342	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
14700	342	0	0		0		0,00	0,00	271,00	250,00	3931,00	39310,00
14750	341	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
14800	338	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	271,00	250,00	3931,00	-29290,00
14850	340	40	0		13720		40,00	13720,00	271,00	250,00	3931,00	176510,00
14900	344	40	0		13720		40,00	13720,00	267,00	250,00	3931,00	176510,00
14950	343	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	263,00	250,00	3931,00	-29290,00
15000	345	40	0		13720		40,00	13720,00	259,00	250,00	3931,00	176510,00
15050	346	20	0		6860		20,00	6860,00	255,00	250,00	3931,00	107910,00
15100	348	40	0		13720		40,00	13720,00	251,00	250,00	3931,00	176510,00
15150	349	20	0		6860		20,00	6860,00	247,00	247,00	3854,94	107149,35
15200	350	20	0		6860		20,00	6860,00	243,00	243,00	3754,78	106147,75
15250	351	20	0		6860		20,00	6860,00	239,00	239,00	3656,06	105160,55
15300	351	0	0		0		0,00	0,00	235,00	235,00	3558,78	35587,75
15350	351	0	0		0		0,00	0,00	231,00	231,00	3462,94	34629,35
15400	352	20	0		6860		20,00	6860,00	227,00	227,00	3368,54	102285,35
15450	352	0	0		0		0,00	0,00	223,00	223,00	3275,58	32755,75
15500	352	0	0		0		0,00	0,00	219,00	219,00	3184,06	31840,55
15550	352	0	0		0		0,00	0,00	215,00	215,00	3093,98	30939,75
15600	352	0	0		0		0,00	0,00	211,00	211,00	3005,34	30053,35
15650	352	0	0		0		0,00	0,00	207,00	207,00	2918,14	29181,35
15700	351	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	203,00	203,00	2832,38	-40276,25
15750	350	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	199,00	199,00	2748,06	-41119,45
15800	349	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	195,00	195,00	2665,18	-41948,25
15850	349	0	0		0		0,00	0,00	191,00	191,00	2583,74	25837,35
15900	351	40	0		13720		40,00	13720,00	187,00	187,00	2503,74	162237,35
15950	352	20	0		6860		20,00	6860,00	183,00	183,00	2425,18	92851,75
16000	352	0	0		0		0,00	0,00	179,00	179,00	2348,06	23480,55

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
16050	352	0	0		0		0,00	0,00	175,00	175,00	2272,38	22723,75
16100	352	0	0		0		0,00	0,00	171,00	171,00	2198,14	21981,35
16150	352	0	0		0		0,00	0,00	167,00	167,00	2125,34	21253,35
16200	351	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	163,00	163,00	2053,98	-48060,25
16250	351	0	0		0		0,00	0,00	159,00	159,00	1984,06	19840,55
16300	349	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	155,00	155,00	1915,58	-118044,25
16350	350	20	0		6860		20,00	6860,00	151,00	151,00	1848,54	87085,35
16400	350	0	0		0		0,00	0,00	147,00	147,00	1782,94	17829,35
16450	352	40	0		13720		40,00	13720,00	143,00	143,00	1718,78	154387,75
16500	354	40	0		13720		40,00	13720,00	139,00	139,00	1656,06	153760,55
16550	356	40	0		13720		40,00	13720,00	135,00	135,00	1594,78	153147,75
16600	355	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	135,00	135,00	1594,78	-52652,25
16650	355	0	0		0		0,00	0,00	130,00	130,00	1520,20	15202,00
16700	354	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	130,00	130,00	1520,20	-53398,00
16750	355	20	0		6860		20,00	6860,00	120,00	120,00	1377,80	82378,00
16800	356	20	0		6860		20,00	6860,00	120,00	120,00	1377,80	82378,00
16850	358	40	0		13720		40,00	13720,00	110,00	110,00	1244,40	149644,00
16900	359	20	0		6860		20,00	6860,00	100,00	100,00	1120,00	79800,00
16950	359	0	0		0		0,00	0,00	100,00	100,00	1120,00	11200,00
17000	360	20	0		6860		20,00	6860,00	100,00	100,00	1120,00	79800,00
17050	361	20	0		6860		20,00	6860,00	100,00	100,00	1120,00	79800,00
17100	362	20	0		6860		20,00	6860,00	100,00	100,00	1120,00	79800,00
17150	364	40	0		13720		40,00	13720,00	100,00	100,00	1120,00	148400,00
17200	365	20	0		6860		20,00	6860,00	75,00	75,00	848,38	77083,75
17250	366	20	0		6860		20,00	6860,00	50,00	50,00	633,00	74930,00
ESTACIÓN DE GRAÑENA												
17300	367	0	0		0		0,00	0,00	25,00	25,00	473,88	4738,75
17350	367	0	0		0		0,00	0,00	0,00	0,00	371,00	3710,00
17400	368	20	0		6860		20,00	6860,00	5,00	5,00	387,08	72470,75
17450	367	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	10,00	10,00	405,40	-64546,00
17500	368	20	0		6860		20,00	6860,00	15,00	15,00	425,98	72859,75
17550	368	0	0		0		0,00	0,00	20,00	20,00	448,80	4488,00
17600	368	0	0		0		0,00	0,00	25,00	25,00	473,88	4738,75
17650	369	20	0		6860		20,00	6860,00	30,00	30,00	501,20	73612,00
17700	369	0	0		0		0,00	0,00	35,00	35,00	530,78	5307,75
17750	369	0	0		0		0,00	0,00	35,00	35,00	530,78	5307,75
17800	370	20	0		6860		20,00	6860,00	40,00	40,00	562,60	74226,00
17850	371	20	0		6860		20,00	6860,00	40,00	40,00	562,60	74226,00
17900	371	0	0		0		0,00	0,00	45,00	45,00	596,68	5966,75
17950	373	40	0		13720		40,00	13720,00	50,00	50,00	633,00	143530,00
18000	373	0	0		0		0,00	0,00	55,00	55,00	671,58	6715,75

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entiero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
18050	374	20	0		6860		20,00	6860,00	60,00	60,00	712,40	75724,00
18100	374	0	0		0		0,00	0,00	60,00	60,00	712,40	7124,00
18150	375	20	0		6860		20,00	6860,00	65,00	65,00	755,48	76154,75
18200	375	0	0		0		0,00	0,00	65,00	65,00	755,48	7554,75
18250	375	0	0		0		0,00	0,00	70,00	70,00	800,80	8008,00
18300	375	0	0		0		0,00	0,00	70,00	70,00	800,80	8008,00
18350	375	0	0		0		0,00	0,00	75,00	75,00	848,38	8483,75
18400	376	20	0		6860		20,00	6860,00	80,00	80,00	898,20	77582,00
18450	375	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	85,00	85,00	950,28	-59097,25
18500	376	20	0		6860		20,00	6860,00	90,00	90,00	1004,60	78646,00
18550	374	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	90,00	90,00	1004,60	-127154,00
18600	371	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	95,00	95,00	1061,18	-126588,25
18650	371	0	0		0		0,00	0,00	100,00	100,00	1120,00	11200,00
18700	373	40	0		13720		40,00	13720,00	105,00	105,00	1181,08	149010,75
18750	374	20	0		6860		20,00	6860,00	110,00	110,00	1244,40	81044,00
18800	375	20	0		6860		20,00	6860,00	115,00	115,00	1309,98	81699,75
18850	374	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	120,00	120,00	1377,80	-54822,00
18900	375	20	0		6860		20,00	6860,00	125,00	125,00	1447,88	83078,75
18950	377	40	0		13720		40,00	13720,00	130,00	130,00	1520,20	152402,00
19000	375	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	135,00	135,00	1594,78	-121252,25
19050	374	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	140,00	140,00	1671,60	-51884,00
19100	372	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	145,00	145,00	1750,68	-119693,25
19150	375	40	0		13720		40,00	13720,00	150,00	150,00	1832,00	155520,00
19200	376	20	0		6860		20,00	6860,00	155,00	155,00	1915,58	87755,75
19250	377	20	0		6860		20,00	6860,00	160,00	160,00	2001,40	88614,00
19300	379	40	0		13720		40,00	13720,00	165,00	165,00	2089,48	158094,75
19350	380	20	0		6860		20,00	6860,00	170,00	170,00	2179,80	90398,00
19400	379	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	175,00	175,00	2272,38	-45876,25
19450	381	40	0		13720		40,00	13720,00	180,00	180,00	2367,20	160872,00
19500	382	20	0		6860		20,00	6860,00	185,00	185,00	2464,28	93242,75
19550	382	0	0		0		0,00	0,00	190,00	190,00	2563,60	25636,00
19600	382	0	0		0		0,00	0,00	195,00	195,00	2665,18	26651,75
19650	383	20	0		6860		20,00	6860,00	200,00	200,00	2769,00	96290,00
19700	384	20	0		6860		20,00	6860,00	205,00	205,00	2875,08	97350,75
19750	384	0	0		0		0,00	0,00	210,00	210,00	2983,40	29834,00
19800	385	20	0		6860		20,00	6860,00	215,00	215,00	3093,98	99539,75
19850	386	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
19900	387	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
19950	388	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
20000	389	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
20050	389	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
20100	389	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
20150	390	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
20200	391	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
20250	392	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
20300	391	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
20350	392	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
20400	396	40	0		13720		40,00	13720,00	220,00	220,00	3206,80	169268,00
20450	395	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
20500	395	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
20550	395	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
20600	396	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
20650	397	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
20700	398	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
20750	399	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
20800	400	20	0		6860		20,00	6860,00	220,00	220,00	3206,80	100668,00
20850	403	40	0		13720		40,00	13720,00	220,00	220,00	3206,80	169268,00
20900	402	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	220,00	220,00	3206,80	-36532,00
20950	402	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
21000	402	0	0		0		0,00	0,00	220,00	220,00	3206,80	32068,00
21050	405	40	0		13720		40,00	13720,00	220,00	220,00	3206,80	169268,00
21100	405	0	0		0		0,00	0,00	221,30	221,30	3236,50	32365,03
21150	405	0	0		0		0,00	0,00	225,00	225,00	3321,88	33218,75
21200	406	20	0		6860		20,00	6860,00	227,00	227,00	3368,54	102285,35
21250	407	20	0		6860		20,00	6860,00	230,00	230,00	3439,20	102992,00
21300	409	40	0		13720		40,00	13720,00	232,60	232,60	3501,10	172210,98
21350	409	0	0		0		0,00	0,00	232,60	232,60	3501,10	35010,98
21400	409	0	0		0		0,00	0,00	232,60	232,60	3501,10	35010,98
21450	409	0	0		0		0,00	0,00	232,60	232,60	3501,10	35010,98
21500	409	0	0		0		0,00	0,00	232,60	232,60	3501,10	35010,98
21550	408	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	232,60	232,60	3501,10	-33589,02
21600	408	0	0		0		0,00	0,00	232,60	232,60	3501,10	35010,98
21650	408	0	0		0		0,00	0,00	232,60	232,60	3501,10	35010,98
21700	409	20	0		6860		20,00	6860,00	232,60	232,60	3501,10	103610,98
21750	412	40	0		13720		40,00	13720,00	232,60	232,60	3501,10	172210,98
21800	415	40	0		13720		40,00	13720,00	232,60	232,60	3501,10	172210,98
21850	422	40	0		13720		40,00	13720,00	232,60	232,60	3501,10	172210,98
21900	417	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	232,60	232,60	3501,10	-102189,02
21950	419	40	0		13720		40,00	13720,00	232,60	232,60	3501,10	172210,98
22000	421	40	0		13720		40,00	13720,00	232,60	232,60	3501,10	172210,98

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
22050	420	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	232,60	232,60	3501,10	-33589,02
22100	421	20	0		6860		20,00	6860,00	232,60	232,60	3501,10	103610,98
22150	421	0	0		0		0,00	0,00	231,00	231,00	3462,94	34629,35
22200	421	0	0		0		0,00	0,00	226,00	226,00	3345,16	33451,60
22250	421	0	0		0		0,00	0,00	223,90	223,90	3296,37	32963,65
22300	422	20	0		6860		20,00	6860,00	221,80	221,80	3247,97	101079,68
22350	424	40	0		13720		40,00	13720,00	219,70	219,70	3199,97	169199,67
22400	427	40	0		13720		40,00	13720,00	217,60	217,60	3152,36	168723,63
22450	429	40	0		13720		40,00	13720,00	215,50	215,50	3105,16	168251,56
22500	428	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	213,40	213,40	3058,35	-38016,54
22550	428	0	0		0		0,00	0,00	211,30	211,30	3011,93	30119,33
22600	429	20	0		6860		20,00	6860,00	209,20	209,20	2965,92	98259,17
22650	430	20	0		6860		20,00	6860,00	207,10	207,10	2920,30	97802,97
22700	430	0	0		0		0,00	0,00	205,00	205,00	2875,08	28750,75
22750	431	20	0		6860		20,00	6860,00	202,90	202,90	2830,25	96902,49
22800	431	0	0		0		0,00	0,00	200,80	200,80	2785,82	27858,21
22850	432	20	0		6860		20,00	6860,00	198,70	198,70	2741,79	96017,89
22900	432	0	0		0		0,00	0,00	196,60	196,60	2698,15	26981,54
22950	433	20	0		6860		20,00	6860,00	194,50	194,50	2654,92	95149,16
23000	432	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	192,40	192,40	2612,08	-42479,25
23050	435	40	0		13720		40,00	13720,00	190,30	190,30	2569,63	162896,31
23100	435	0	0		0		0,00	0,00	188,20	188,20	2527,58	25275,84
23150	437	40	0		13720		40,00	13720,00	186,10	186,10	2485,93	162059,33
23200	437	0	0		0		0,00	0,00	184,00	184,00	2444,68	24446,80
23250	437	0	0		0		0,00	0,00	182,30	182,30	2411,58	24115,75
23300	438	20	0		6860		20,00	6860,00	180,00	180,00	2367,20	92272,00
23350	441	40	1489		13720	138,21	40,40	13858,21	177,32	177,32	2316,00	161742,18
23400	441	0	1489		0	138,21	0,40	138,21	177,32	177,32	2316,00	24542,18
23450	442	20	1489		6860	138,21	20,40	6998,21	177,32	177,32	2316,00	93142,18
23500	444	40	1489		13720	138,21	40,40	13858,21	177,32	177,32	2316,00	161742,18
23550	445	20	1489		6860	138,21	20,40	6998,21	177,32	177,32	2316,00	93142,18
23600	447	40	1489		13720	138,21	40,40	13858,21	177,32	177,32	2316,00	161742,18
23650	448	20	1489		6860	138,21	20,40	6998,21	177,32	177,32	2316,00	93142,18
23700	449	20	1489		6860	138,21	20,40	6998,21	177,32	177,32	2316,00	93142,18
23750	450	20	1489		6860	138,21	20,40	6998,21	177,32	177,32	2316,00	93142,18
23800	452	40	1489		13720	138,21	40,40	13858,21	177,32	177,32	2316,00	161742,18
23850	454	40	1489		13720	138,21	40,40	13858,21	177,32	177,32	2316,00	161742,18
23900	455	20	0		6860		20,00	6860,00	170,00	170,00	2179,80	90398,00
23950	455	0	0		0		0,00	0,00	165,00	165,00	2089,48	20894,75
24000	459	40	0		13720		40,00	13720,00	160,00	160,00	2001,40	157214,00

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
24050	458	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
24100	458	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
24150	458	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
24200	457	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
24250	458	20	0		6860		20,00	6860,00	160,00	160,00	2001,40	88614,00
24300	458	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
24350	457	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	160,00	160,00	2001,40	-48586,00
24400	458	20	0		6860		20,00	6860,00	160,00	160,00	2001,40	88614,00
24450	459	20	0		6860		20,00	6860,00	160,00	160,00	2001,40	88614,00
24500	459	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
24550	459	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
24600	459	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
24650	459	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
24700	460	20	0		6860		20,00	6860,00	160,00	160,00	2001,40	88614,00
24750	460	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
24800	461	20	0		6860		20,00	6860,00	160,00	160,00	2001,40	88614,00
24850	461	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
24900	461	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
24950	462	20	0		6860		20,00	6860,00	160,00	160,00	2001,40	88614,00
25000	463	20	0		6860		20,00	6860,00	160,00	160,00	2001,40	88614,00
25050	464	20	0		6860		20,00	6860,00	160,00	160,00	2001,40	88614,00
25100	466	40	0		13720		40,00	13720,00	160,00	160,00	2001,40	157214,00
25150	466	0	0		0		0,00	0,00	160,00	160,00	2001,40	20014,00
25200	468	40	0		13720		40,00	13720,00	155,00	155,00	1915,58	156355,75
25250	468	0	0		0		0,00	0,00	155,00	155,00	1915,58	19155,75
25300	467	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	150,00	150,00	1832,00	-50280,00
25350	470	40	0		13720		40,00	13720,00	150,00	150,00	1832,00	155520,00
25400	471	20	0		6860		20,00	6860,00	145,00	145,00	1750,68	86106,75
25450	474	40	0		13720		40,00	13720,00	145,00	145,00	1750,68	154706,75
25500	476	40	0		13720		40,00	13720,00	140,00	140,00	1671,60	153916,00
25550	477	20	0		6860		20,00	6860,00	140,00	140,00	1671,60	85316,00
25600	478	20	0		6860		20,00	6860,00	135,00	135,00	1594,78	84547,75
25650	479	20	0		6860		20,00	6860,00	135,00	135,00	1594,78	84547,75
25700	480	20	817	0,73	6860	251,90	20,73	7111,90	131,34	131,34	1540,02	86519,20
25750	480	0	817	0,73	0	251,90	0,73	251,90	131,34	131,34	1540,02	17919,20
25800	481	20	817	0,73	6860	251,90	20,73	7111,90	131,34	131,34	1540,02	86519,20
25850	482	20	817	0,73	6860	251,90	20,73	7111,90	131,34	131,34	1540,02	86519,20
25900	484	40	817	0,73	13720	251,90	40,73	13971,90	131,34	131,34	1540,02	155119,20
25950	487	40	817	0,73	13720	251,90	40,73	13971,90	131,34	131,34	1540,02	155119,20
26000	486	-20	817	0,73	-6860	251,90	-19,27	-6608,10	131,34	131,34	1540,02	-50680,80

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
26050	487	20	817	0,73	6860	251,90	20,73	7111,90	131,34	131,34	1540,02	86519,20
26100	487	0	817	0,73	0	251,90	0,73	251,90	131,34	131,34	1540,02	17919,20
26150	489	40	817	0,73	13720	251,90	40,73	13971,90	131,34	131,34	1540,02	155119,20
26200	489	0	817	0,73	0	251,90	0,73	251,90	131,34	131,34	1540,02	17919,20
26250	489	0	817	0,73	0	251,90	0,73	251,90	131,34	131,34	1540,02	17919,20
26300	491	40	817	0,73	13720	251,90	40,73	13971,90	131,34	131,34	1540,02	155119,20
26350	492	20	817	0,73	6860	251,90	20,73	7111,90	131,34	131,34	1540,02	86519,20
26400	494	40	817	0,73	13720	251,90	40,73	13971,90	131,34	131,34	1540,02	155119,20
26450	494	0	817	0,73	0	251,90	0,73	251,90	131,34	131,34	1540,02	17919,20
26500	495	20	817	0,73	6860	251,90	20,73	7111,90	131,34	131,34	1540,02	86519,20
26550	495	0	0		0		0,00	0,00	130,00	130,00	1520,20	15202,00
26600	496	20	0		6860		20,00	6860,00	125,00	125,00	1447,88	83078,75
26650	496	0	0		0		0,00	0,00	120,00	120,00	1377,80	13778,00
26700	498	40	0		13720		40,00	13720,00	115,00	115,00	1309,98	150299,75
26750	499	20	0		6860		20,00	6860,00	110,00	110,00	1244,40	81044,00
26800	499	0	0		0		0,00	0,00	106,00	106,00	1193,56	11935,60
26850	499	0	520	1,15	0	395,77	1,15	395,77	104,79	104,79	1178,41	15741,76
26900	499	0	520	1,15	0	395,77	1,15	395,77	104,79	104,79	1178,41	15741,76
26950	499	0	520	1,15	0	395,77	1,15	395,77	104,79	104,79	1178,41	15741,76
27000	500	20	520	1,15	6860	395,77	21,15	7255,77	104,79	104,79	1178,41	84341,76
27050	501	20	520	1,15	6860	395,77	21,15	7255,77	104,79	104,79	1178,41	84341,76
27100	503	40	520	1,15	13720	395,77	41,15	14115,77	104,79	104,79	1178,41	152941,76
27150	505	40	520	1,15	13720	395,77	41,15	14115,77	104,79	104,79	1178,41	152941,76
27200	508	40	520	1,15	13720	395,77	41,15	14115,77	104,79	104,79	1178,41	152941,76
27250	510	40	520	1,15	13720	395,77	41,15	14115,77	104,79	104,79	1178,41	152941,76
27300	508	-40	520	1,15	-13720	395,77	-38,85	-13324,23	104,79	104,79	1178,41	-121458,24
27350	510	40	520	1,15	13720	395,77	41,15	14115,77	104,79	104,79	1178,41	152941,76
27400	508	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	102,00	102,00	1144,16	-125758,40
27450	507	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	98,00	98,00	1096,20	-57638,00
27500	508	20	0		6860		20,00	6860,00	98,00	98,00	1096,20	79562,00
27550	507	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	95,00	95,00	1061,18	-57988,25
27600	505	-40	420	1,43	-13720	490	-38,57	-13230,00	94,17	94,17	1051,65	-121783,45
27650	503	-40	420	1,43	-13720	490	-38,57	-13230,00	94,17	94,17	1051,65	-121783,45
27700	503	0	420	1,43	0	490	1,43	490,00	94,17	94,17	1051,65	15416,55
27750	503	0	420	1,43	0	490	1,43	490,00	94,17	94,17	1051,65	15416,55
27800	503	0	420	1,43	0	490	1,43	490,00	94,17	94,17	1051,65	15416,55
27850	502	-20	420	1,43	-6860	490	-18,57	-6370,00	94,17	94,17	1051,65	-53183,45
27900	503	20	420	1,43	6860	490	21,43	7350,00	94,17	94,17	1051,65	84016,55
27950	502	-20	420	1,43	-6860	490	-18,57	-6370,00	94,17	94,17	1051,65	-53183,45
28000	502	0	420	1,43	0	490	1,43	490,00	94,17	94,17	1051,65	15416,55

PREVISIÓN DE POTENCIA MENGÍBAR-JAÉN												
Longitud (m)	ALT _{entiero} (m)	i (mm/m)	R (m)	r (mm/m)	R _{ag} (daN)	R _{ac} (daN)	i' (mm/m)	R _{gc} (daN)	V _{trazado} (km/h)	V _{máxima} (km/h)	R _{avance} (daN)	R _{total} (N)
28050	501	-20	420	1,43	-6860	490	-18,57	-6370,00	94,17	94,17	1051,65	-53183,45
28100	499	-40	420	1,43	-13720	490	-38,57	-13230,00	94,17	94,17	1051,65	-121783,45
28150	499	0	420	1,43	0	490	1,43	490,00	94,17	94,17	1051,65	15416,55
28200	498	-20	420	1,43	-6860	490	-18,57	-6370,00	94,17	94,17	1051,65	-53183,45
28250	498	0	420	1,43	0	490	1,43	490,00	94,17	94,17	1051,65	15416,55
28300	497	-20	420	1,43	-6860	490	-18,57	-6370,00	94,17	94,17	1051,65	-53183,45
28350	496	-20	420	1,43	-6860	490	-18,57	-6370,00	94,17	94,17	1051,65	-53183,45
28400	496	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
28450	496	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
28500	496	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
28550	494	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	90,00	90,00	1004,60	-127154,00
28600	492	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	90,00	90,00	1004,60	-127154,00
28650	491	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	90,00	90,00	1004,60	-58554,00
28700	492	20	0		6860		20,00	6860,00	90,00	90,00	1004,60	78646,00
28750	493	20	0		6860		20,00	6860,00	90,00	90,00	1004,60	78646,00
28800	492	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	90,00	90,00	1004,60	-58554,00
28850	490	-40	0		-13720		-40,00	-13720,00	90,00	90,00	1004,60	-127154,00
28900	490	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
28950	489	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	90,00	90,00	1004,60	-58554,00
29000	489	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
29050	489	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
29100	488	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	90,00	90,00	1004,60	-58554,00
29150	488	0	0		0		0,00	0,00	90,00	90,00	1004,60	10046,00
29200	487	-20	0		-6860		-20,00	-6860,00	75,00	75,00	848,38	-60116,25
29250	488	20	0		6860		20,00	6860,00	25,00	25,00	473,88	73338,75
29300	488	0	0		0		0,00	0,00	0,00	0,00	371,00	3710,00

Tabla 8: Previsión de potencia del tramo Mengíbar - Jaén. Fuente: Elaboración propia.

Tras realizar los cálculos, se obtiene una potencia activa máxima de 12,29 MW originada debido a una pendiente de 40 mm/m y a un radio de curva de 5002 metros. El tren circula a una velocidad de 250 km/h. Siguiendo la norma **UNE-EN 50388-1:2023**, el factor de potencia será igual a 0.95, por lo tanto, la potencia requerida final será:

$$S = 12,93 \text{ MVA}$$

4.3. Dimensionamiento eléctrico

4.3.1. Introducción

En este apartado se realizarán los cálculos eléctricos pertenecientes al subtramo Jaén-Mengíbar de la línea de media distancia Jaén-Madrid. Como se ha comentado repetidas veces en este estudio, el sector ferroviario está destinado a ser uno de los medios de transporte del futuro, por lo que ceñirse a la potencia calculada en el apartado anterior, solo nos llevaría a una elevada inversión en una infraestructura que en poco tiempo quedaría obsoleta. Es por esto, que los cálculos partirán de una potencia superior.

El sistema de alimentación será el sistema 2x25 kV, por sus numerosas ventajas sobre la configuración 1x25 kV:

- **Menor número de subestaciones de tracción:** Al ser las caídas de tensión menores que en el sistema 1x25 kV, las subestaciones de tracción estarán más separadas entre ellas, por lo que será necesario construir menos subestaciones.
- **Menores pérdidas de potencia:** Al ser la tensión el doble que en el sistema 1x25 kV, las pérdidas de potencia se reducirán a la mitad.
- **Perturbaciones electromagnéticas:** Las perturbaciones electromagnéticas serán menores que en el sistema 1x25 kV debido a la escasa corriente que circula por los carriles entre la subestación y el primer autotransformador que haya antes del tren.

Entre los sistemas de toma de corriente antes comentados, se elegirá la línea aérea de contacto.

La línea se alimentará desde la subestación de Los Olivares (Jaén) mediante el doble circuito en 220 kV que llega a la misma.

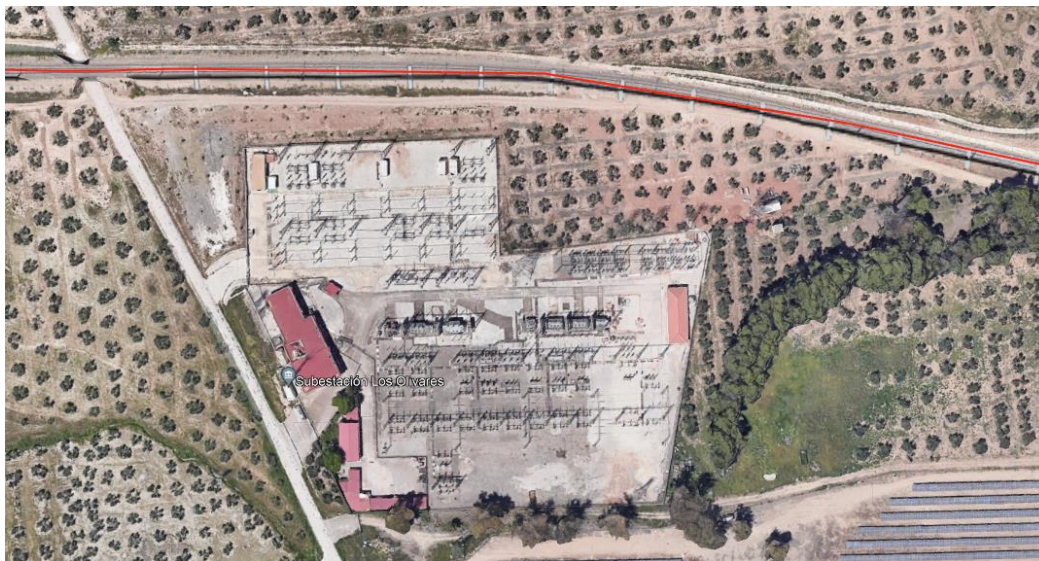


Figura 48: Subestación de Los Olivares (Jaén). Fuente: Google Maps.

Siguiendo la norma **ET 03.359.504.2_2M1** de ADIF, los transformadores de tracción contarán con las siguientes características (**Tabla 9**):

CARACTERÍSTICAS	
Potencia nominal (MVA)	30
Aislamiento dieléctrico	Aceite mineral
Refrigeración	ONAN
Relación de tensiones (kV)	220 / 2x27,5
Tensión de cortocircuito	10% base
Potencia de cortocircuito trifásico (MVA)	2797

Tabla 9: Características técnicas del transformador de tracción. Fuente: ADIF.

En las bornas del secundario habrá 55 kV o, 27,5 kV entre toma central y extremo, con la finalidad de poder distanciar lo máximo posible la distancia entre subestaciones. Dicha diferencia de potencial se encuentra dentro de los límites estipulados por la norma **UNE-EN 50163**, por lo que no habría ningún inconveniente.

Como marca el sistema 2x25 kV, la subestación de tracción contará con dos transformadores. Se conectará el punto central del secundario al carril y a tierra. La salida de 25 kV alimentará al hilo de contacto y la salida de -25 kV al *feeder* negativo. Se aislarán eléctricamente las subestaciones entre sí mediante una zona neutra de separación entre fases eléctricas (zona neutra de inter-subestaciones).

Además, habrá zonas neutras de subestación que cuentan con una longitud de 200 metros. Evitan que los vehículos cortocircuiten la catenaria con los pantógrafos delantero-posterior.

Con el objetivo de asegurar una adecuada distribución de la corriente y regular la tensión de la línea, se instalarán autotransformadores cada 10 kilómetros. Los autotransformadores y la subestación se encontrarán en los siguientes puntos kilométricos:

- ATI1: PK 0+000 (Jaén)
- Subestación Los Olivares (Jaén): PK 05+000
- ATI2: PK 10+000
- ATI3: PK 20+000 (Las Infantas)

Al no llegar la línea ferroviaria al punto medio entre la subestación de Los Olivares y la siguiente, no se instalará ningún autotransformador final.

Cada autotransformador, siguiendo la norma **ET 03.359.505.9** de ADIF, tendrá las siguientes características (**Tabla 10**):

CARACTERÍSTICAS	
Potencia nominal (MVA)	10
Aislamiento dieléctrico	Aceite mineral
Refrigeración	ONAN
Relación de tensiones (kV)	55 / 2x27,5
Tensión de cortocircuito	1% base

Tabla 10: Características técnicas de los autotransformadores. Fuente: ADIF.

Al estar en un sistema 2x25 kV, se instalará la catenaria C-350. Está formada por un sistema simple poligonal atirantado en todos los perfiles con péndola en Y y péndolas equipotenciales. Además cuenta con compensación mecánica independiente para sustentador e hilo de contacto. Está compuesta de ménsulas tubulares trianguladas con el cuerpo compuesto de dos tubos, cuerpo y tirante (**Figura 49**).

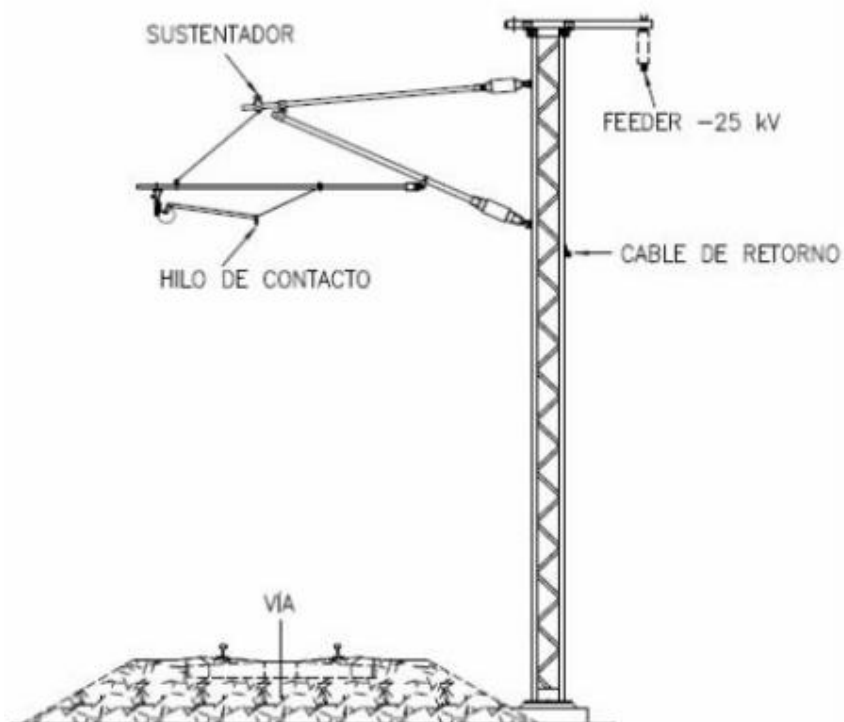


Figura 49: Catenaria C-350. Fuente: ADIF.

Está compuesta de hilo sustentador, hilo de contacto, falso sustentador o péndola en “Y”, péndolas equipotenciales y *feeder* negativo. La estructura portante está formada por cimentaciones, ménsulas, postes y pórticos. Los elementos de conexión que se encuentran serán seccionadores y conductores. Cuenta con circuito de retorno y protecciones. Los conductores utilizados son los siguientes (**Figura 50**):

Sustentador	Cu de 95 mm ² 19/2,52 mm
Hilos de contacto	Cu-Mg 0,5 de 150 mm ²
Péndolas	Cu extraflexible de 25 mm ² de sección
Cable de retorno	Sección 116,2 mm ² de aluminio-acero (LA 110)
Péndolas en Y	Bronce Bz II 35 mm ²
Feeder -25	LA-280
Cable de conexión	Cu95 269x0,7 mm

Figura 50: Características de los conductores de la catenaria C-350. Fuente: ADIF.

La tensión mecánica de los conductores serán las siguientes (**Figura 51**):

Sustentador	1.575 kg
Hilo de contacto	3.150 kg
Péndola en Y	3,5 kN

Figura 51: Tensión mecánica de los conductores. Fuente: ADIF.

Una vez recabados los datos de partida, es momento de empezar con el dimensionamiento eléctrico.

4.3.2. Cálculos eléctricos

El dimensionamiento eléctrico de la línea se regirá por lo establecido en la norma **UIC 798**. Para cumplir dicha norma, han de cumplirse los siguientes requisitos:

- Criterio de capacidad de transporte de la catenaria.
- Criterio de intensidad de cortocircuito máxima admisible.
- Criterio de caída de tensión máxima.

Aunque la catenaria se define como el conjunto de conductores encargados de transportar la energía, en este estudio, la catenaria solo serán los conductores que estén a tensión positiva, mientras que el circuito de tracción se referirá al conjunto de todos los conductores. Por lo tanto:

- Conductores a tensión positiva (catenaria):
 - Hilo de contacto.
 - Sustentador.
- Conductores a tensión negativa:
 - *Feeder* negativo.
- Conductores de retorno:
 - Carril.
 - Cable de retorno.

➤ Terreno circundante.

Al coexistir varios conductores a una cierta distancia, existen acoplamientos magnéticos y capacitivos entre ellos. El modelado de la línea teniendo en cuenta dichos matices, complicarían excesivamente los cálculos, haciendo necesarias las matrices de admitancias e impedancias. Con el objeto de simplificar los cálculos, se utilizará un modelo simplificado proporcionado por ADIF, el cual tiene en cuenta las impedancias de catenaria, *feeder* y retorno pero no la impedancia mutua (**Tabla 11**).

Z_{HC}	0,115+j0,0157 Ω /km
$Z_{sustentador}$	0,182+j0,0187 Ω /km
Z_{feeder}	0,119+j0,0117 Ω /km
$Z_{cond,ret}$	0,307+j0,0167 Ω /km
Z_{carril}	0,025+j0,157 Ω /km

Tabla 11: Impedancias kilométricas. Fuente: ADIF

4.3.2.1. Criterio de capacidad de transporte de la catenaria

El primer paso consistirá en calcular las intensidades que recorren cada parte del circuito de tracción, transformadores y autotransformadores. Las intensidades que circulan por cada autotransformador y cada transformador vienen definidas por la siguiente ecuación (**Ecuación (10)**):

$$I_n = \frac{S}{2 \cdot U_n} \quad (10)$$

Donde:

- I_n : intensidad nominal máxima que puede dar el transformador/autotransformador en A.
- S_n : potencia aparente nominal del transformador/autotransformador en VA.
- U_n : tensión en bornas del transformador/autotransformador en V.

Aplicando la ecuación para cada transformador:

$$I_n = \frac{30 \cdot 10^6}{2 \cdot 27,5 \cdot 10^3} = 545,45 \text{ A}$$

Si la aplicamos a cada autotransformador:

$$I_n = \frac{10 \cdot 10^6}{2 \cdot 27,5 \cdot 10^3} = 181,82 \text{ A}$$

La corriente que demanda nuestro material rodante puede calcularse con la siguiente expresión (**Ecuación (11)**):

$$I = \frac{P}{U_n \cdot \cos \varphi} \quad (11)$$

Donde:

- P: potencia activa del material rodante en W.
- U_n : tensión nominal en V.
- φ : factor de potencia del material rodante.

Para nuestro material rodante:

$$I = \frac{4,8 \cdot 10^6}{27,5 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 181,73 \text{ A}$$

Una vez calculadas las intensidades que fluyen por nuestro circuito de tracción, se procederá a verificar si la catenaria C-350 es válida. Como se ha comentado anteriormente, dimensionar la línea basándonos en la potencia demandada por el material rodante, solo nos llevará a un dimensionamiento que quedará obsoleto más pronto que tarde. Por lo tanto, la línea será capaz de transportar la potencia máxima del transformador, en nuestro caso, 30 MVA.

Para obtener los valores de intensidad máximos para cada sección usaremos la tabla “Densidad máxima de corriente” extraída de la norma **UIC 798 (Tabla 12)**

Sección nominal	Densidad de corriente		
	A / mm2		
mm2	Cobre	Aluminio (Ag)	Aleación Ag
10	8,75	-	-
15	7,6	6	5,6
25	6,35	5	4,65
35	5,75	4,55	4,25
50	5,1	4	3,7
70	4,5	3,55	3,3
95	4,05	3,2	3
125	3,7	2,9	2,7
160	3,4	2,7	2,5
200	3,2	2,5	2,3
250	2,9	2,3	2,15
300	2,75	2,15	2
400	2,5	1,95	1,8
500	2,3	1,8	1,7
600	2,1	1,65	1,55

Tabla 12: Densidades máximas de corriente en régimen permanente. Fuente: Norma UIC 798.

Como puede apreciarse en la tabla 13, no constan todas las secciones normalizadas, por lo que habrá que interpolar (**Ecuación (12)**).

$$\partial = \partial_0 + \frac{S - S_0}{S_1 - S_0} \cdot (\partial_1 - \partial_0) \quad (12)$$

Donde:

- S: valor de nuestra sección.
- S₀: valor de la sección anterior.
- S₁: valor de la sección posterior.
- ∂₀: valor de la densidad de corriente anterior.
- ∂₁: valor de la densidad de corriente posterior.
- ∂: valor deseado de la densidad de corriente.

Para obtener la intensidad máxima admisible se usará la siguiente expresión (**Ecuación (13)**):

$$I_{m\acute{a}x} = \partial_{m\acute{a}x} \cdot S \quad (13)$$

Donde:

- $\partial_{m\acute{a}x}$: densidad de corriente máxima en A/mm².
- S: sección en mm².

Mediante las ecuaciones 12 y 13 y usando los datos de la tabla 12, se obtendrán las intensidades máximas admisibles por cada conductor, después, se compararán con las intensidades del circuito de tracción. El objetivo es comprobar que las secciones de los conductores de la catenaria C-350 son capaces de soportar las intensidades del circuito de tracción. Los resultados son los siguientes (**Tabla 13**):

	$\partial_{m\acute{a}x}$ (A/mm ²)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
HC (Cu-150 mm ²)	3,49	522,86
Sustentador (Cu-95 mm ²)	4,05	384,75
<i>Feeder</i> negativo (Al-281,1 mm ²)	2,21	620,31
Conductor de retorno (Al-116,2 mm ²)	2,99	347,21

Tabla 13: Intensidad máxima admisible de cada conductor. Fuente: Elaboración propia.

Los cálculos podrían parecer terminados, pero no es así, ya que las intensidades se distribuirán tal y como se explica en la figura 36. En la catenaria, la corriente se dividirá según la impedancia de cada conductor para los conjuntos HC-sustentador y conductor de retorno-carril. El *feeder* transportará el 50% de la corriente consumida por el MR.

Por lo tanto, la intensidad real de los conductores será la siguiente (**Tabla 14**):

	I_{real} (A)
HC (Cu-150 mm ²)	345,45
Sustentador (Cu-95 mm ²)	200
<i>Feeder</i> negativo (Al-281,1 mm ²)	272,73
Conductor de retorno (Al-116,2 mm ²)	131,45
Carril	141,27

Tabla 14: Intensidad real de cada conductor. Fuente: Elaboración propia.

Podemos afirmar que las condiciones exigidas se cumplen (**Ecuación (14), (15) y (16)**):

$$I_{cat}(I_{máx,HC} + I_{máx,sustentador}) \geq I_n \geq I \quad (14)$$

$$I_{feeder} \geq I_n \geq I \quad (15)$$

$$I_{retorno}(I_{máx,cond.ret.} + I_{máx,carril}) \geq I_n \geq I \quad (16)$$

4.3.2.2. Criterio de intensidad de cortocircuito máxima admisible

Lo primero será calcular la potencia de cortocircuito en el secundario de la subestación de tracción mediante la siguiente expresión (**Ecuación (17)**):

$$S_{cc} = \frac{S_n}{\frac{U_{cc}}{100} + \frac{S_n}{S_{cc,AT}}} \quad (17)$$

Donde:

- U_{cc} : tensión de cortocircuito primario-secundario en porcentaje.
- S_n : potencia nominal del transformador en MVA.
- $S_{cc,AT}$: potencia de cortocircuito trifásico en MVA.

Sustituyendo los datos de la tabla 9, obtenemos:

$$S_{cc} = \frac{30}{\frac{10}{100} + \frac{30}{2797}} = 270,94 \text{ MVA}$$

Lo siguiente será calcular la máxima corriente de cortocircuito de la instalación (**Ecuación (18)**):

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{U_n \cdot \sqrt{3}} \quad (18)$$

Donde:

- S_{cc} : potencia de cortocircuito del secundario del transformador en VA.
- U_n : tensión en bornas del secundario en V.

Sustituyendo:

$$I_{cc, \text{trifásico}} = \frac{270,94 \cdot 10^6}{55 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 2844,13 \text{ A}$$

Al ser un sistema bifásico, el cortocircuito bifásico se calculará siguiendo la siguiente expresión (**Ecuación (19)**):

$$I_{cc,bifásico} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot I_{cc,trifásico} \quad (19)$$

Insertando los datos:

$$I_{cc,bifásico} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot 2844,13 \text{ A}$$

Según el fabricante, la catenaria C-350 cuenta con una intensidad de cortocircuito de 9,34 kA para $t=1$ seg. Por lo tanto, se cumple la condición (**Ecuación (20)**):

$$I_{cc,máx,adm,catenaria} > I_{cc,máx,circuito} \quad (20)$$

4.3.2.3. Criterio de caída de tensión máxima

La norma **UIC 798** permite como máximo una caída de tensión porcentual del 7% o 1.975 V a 27,5 kV. Para calcular la caída de tensión porcentual usaremos las siguientes ecuaciones (**Ecuaciones (21) y (22)**):

$$\Delta V = I_n \cdot Z_{km} \cdot L \quad (21)$$

$$\Delta V(\%) = \frac{\Delta V}{V} \cdot 100 \quad (22)$$

Donde:

- I_n : intensidad nominal que fluye por la línea en A.
- Z_{km} : módulo de la impedancia kilométrica del tramo de línea en Ω/km .
- L : longitud del tramo en km.
- V : tensión del tramo en V.

Serán necesarias las impedancias expuestas en la tabla 11, las intensidades reales calculadas y la longitud de cada tramo. El cálculo se realizará por tramos. Se debe tener en cuenta que la impedancia de la catenaria no es proporcionada por

ADIF si no la del hilo de contacto y el sustentador. Como están en paralelo, la impedancia equivalente se calculará mediante la siguiente expresión (**Ecuación (23)**):

$$Z_{cat} = \frac{Z_{HC} \cdot Z_{sustentador}}{Z_{HC} + Z_{sustentador}} \quad (23)$$

Obteniendo:

$$\begin{aligned} Z_{cat} &= \frac{(0,115 + j0,0157) \cdot (0,182 + j0,0187)}{(0,115 + j0,0157) + (0,182 + j0,0187)} = 0,0705 + j0,0087 \frac{\Omega}{km} \\ &= 0,071 \angle 7,036 \frac{\Omega}{km} \end{aligned}$$

Para el circuito de retorno sucederá lo mismo:

$$\begin{aligned} Z_{retorno} &= \frac{(0,307 + j0,0167) \cdot (0,025 + j0,157)}{(0,307 + j0,0167) + (0,025 + j0,157)} = 0,072 + j0,1087 \frac{\Omega}{km} \\ &= 0,13 \angle 56,45 \frac{\Omega}{km} \end{aligned}$$

Tramo 1: ATI1-Subestación Los Olivares

Para la catenaria:

$$\Delta V = 545,45 \cdot 0,071 \cdot 5 = 193,63 \text{ V} \leq 1975 \text{ V}$$

Para el feeder:

$$\Delta V = 272,73 \cdot 0,12 \cdot 5 = 327,27 \text{ V} \leq 1975 \text{ V}$$

Para el circuito de retorno:

$$\Delta V = 272,73 \cdot 0,13 \cdot 5 = 177,27 \text{ V} \leq 1975 \text{ V}$$

Tramo 2: Subestación Los Olivares-ATI2

Al estar a la misma distancia la subestación del ATI1 y del ATI2, la caída de tensión será la misma.

Tramo 3: ATI2-ATI3

Para la catenaria:

$$\Delta V = 545,45 \cdot 0,071 \cdot 10 = 387,26 \text{ V} \leq 1975 \text{ V}$$

Para el *feeder*:

$$\Delta V = 272,73 \cdot 0,12 \cdot 10 = 654,54 \text{ V} \leq 1975 \text{ V}$$

Para el circuito de retorno:

$$\Delta V = 272,73 \cdot 0,13 \cdot 10 = 354,54 \text{ V} \leq 1975 \text{ V}$$

Las caídas de tensión totales de cada grupo son:

$$\Delta V_{cat} = 193,63 + 193,63 + 387,26 = 774,52 \text{ V} \leq 1975 \text{ V}$$

$$\Delta V_{feeder} = 327,27 + 327,27 + 654,54 = 1.309,08 \text{ V} \leq 1975 \text{ V}$$

$$\Delta V_{circ,retorno} = 177,27 + 177,27 + 354,54 = 709,08 \text{ V} \leq 1975 \text{ V}$$

Todos los tramos cumplen los requisitos prefijados por la norma **UIC 798**.

4.3.3. Protecciones de la LAC

Al igual que las líneas eléctricas convencionales, las líneas ferroviarias cuentan con protecciones para proteger a las personas y a las instalaciones en caso de falla. En este tipo de infraestructura, las protecciones se encuentran en la zona de acometida a catenaria y, siendo más precisos, en la zona del pórtico de *feeder*.

Para proteger la vía se equipará cada pórtico con los siguientes elementos de protección:

- Dos aisladores, teniendo cada uno de ellos, una tensión nominal de 52 kV, tensión soportada bajo lluvia de 105 kV y soportada en caso de rayo de 250 kV.
- Un seccionador bipolar con una tensión nominal de 52 kV y corriente asignada de 2.000 A.
- Dos autoválvulas, una para el *feeder* negativo y otra para sustentador e HC. Contarán con resistencia variable en óxido de zinc, con una tensión nominal de 45 kV, tensión máxima de operación de 36 kV y una corriente de descarga de 20 kA.

El conductor de retorno también sirve como elemento de protección, puesto que su función es, incrementar la seguridad del retorno de la corriente, repartiendo las corrientes de retorno entre este y el carril de retorno, consiguiendo así, que estas no sean muy elevadas por el carril para evitar corrientes residuales a través del terreno.

Se instalarán colectores de tierra para evitar que los elementos metálicos cercanos y que no pertenece a partes activas de la línea adquieran una peligrosa tensión.

Con el objetivo de proteger frente a contacto directo o indirecto a las personas cercanas a la línea o a los operarios, se instalará una pica de tierra en cada uno de los postes.

4.4. Dimensionamiento mecánico

4.4.1. Introducción

Una vez realizado el dimensionamiento eléctrico, es hora de llevar a cabo el dimensionamiento mecánico.

La catenaria C-350 permite velocidades de hasta 350 km/h. Está equipada de postes metálicos con ménsulas giratorias que cargan los conductores de la catenaria. Con el objetivo de que llegue la mayor energía eléctrica posible al MR, tanto el HC como el sustentador estarán compensados mecánicamente. El HC estará sometido a 3150 kgf y el sustentador a 1575 kgf.

Como es sabido las variaciones de temperatura pueden modificar la longitud de los conductores, para evitar tensiones inadecuadas de los conductores, se instalarán contrapesos cada 1.280 metros como máximo al HC y al sustentador. Los equipos de compensación operan entre temperaturas del conductor de -30 °C y 80 °C, lo que vienen siendo un rango de temperaturas ambiente entre -30 °C y 45 °C.

La catenaria C-350 cuenta con las siguientes características dependiendo de si las condiciones son estáticas o dinámicas (**Tablas 15 y 16**):

Condiciones estáticas	
Altura HC (m)	5,3
Elevación estática (mm)	70
Desgaste HC (%)	20
Distancia seguridad eléctrica (mm)	250

Tabla 15: Condiciones estáticas de la catenaria C-350. Fuente: ADIF.

Condiciones dinámicas	
Altura HC (m)	5,3
Elevación dinámica (mm)	<120
Desgaste HC (%)	20

Tabla 16: Condiciones dinámicas de la catenaria C-350. Fuente: ADIF.

Se supondrá una velocidad del viento de 120 km/h, siendo el vano máximo en este caso de 64 metros. El cálculo de apoyos se realizará siguiendo las indicaciones de la norma **UIC 798**:

- Velocidad máxima del viento: 120 km/h o 33 m/s.
- Temperaturas ambientales entre -30 °C y 45 °C.
- Desviación de la catenaria con el viento: < 200 mm.
- Elevación del HC con presión de 150 N de pantógrafo: < 70 mm.

Las cimentaciones serán cilíndricas de 75 cm y 100 cm de diámetro y profundidad variable dependiendo de si estamos ante un terraplén o un desmonte y del tipo de apoyo. Se usa hormigón de resistencia 250 daN/cm².

Los apoyos que soportan la catenaria son metálicos compuestos por dos UPN unidos por diagonales. La altura de los apoyos es de 8,55 metros. Las ménsulas son de aleación de aluminio de 70 mm de diámetro y espesor variable dependiendo de los esfuerzos a soportar.

Los conductores a utilizar tienen las siguientes características (**Tabla 17**):

	Sustentador	HC	Péndolas	Cond. Retorno	<i>Feeder negativo</i>
Sección (mm ²)	95	150	16	116,2	281,1
Diámetro (mm)	12,95	14,5	5,1	14	21,8
Material	Cu electrolítico	Cu-Mg 0,6	BZ-II	Al-Acero	Al-Acero
Carga de rotura (kN)	38,82	75,7	9,33	440	842
Tensión de trabajo (kN)	15,75	31,5	X	X	X
Coeficiente de seguridad	2,46	2,4	X	X	X
Peso por metro (kg/m)	0,89	1,335	0,143	0,432	0,976
Corriente permanente a 80 °C (A)	400	427	100	303	575

Tabla 17: Características técnicas de los conductores. Fuente: ADIF.

4.4.2. Cálculos mecánicos

Al realizar los cálculos eléctricos, se ha determinado que tipo de conductor utilizar, y en consecuencia, sus características técnicas. A partir de estos datos, se empezará a dimensionar mecánicamente la línea ferroviaria. El cálculo mecánico estará compuesto de las siguientes partes:

- Cálculo del vano máximo.
- Cálculo de tensiones óptimas en sustentador e HC.
- Cálculo del momento de vuelco en sustentador e HC.
- Cálculo de esfuerzos en conductor de retorno y *feeder* negativo.
- Cálculo del momento de vuelco en conductor de retorno y *feeder* negativo.
- Cálculo de los apoyos.
- Cálculo de las cimentaciones.

4.4.2.1. Cálculo del vano máximo

Como se ha comentado anteriormente, se propone un vano máximo de 64 metros. Sin embargo, al estar la catenaria descentrada alternativamente 20 centímetros a ambos lados del eje de la vía, será necesario buscar una solución que evite que el HC se quede fuera de la zona de frotamiento del pantógrafo. También ha de tenerse en consideración los posibles efectos del viento lateral sobre la catenaria.

Existen dos posibles casos: vano situado en recta y con descentramiento y vano situado en curva y con descentramiento. Los cálculos se realizarán con el segundo caso, al ser este el más desfavorable. La expresión a utilizar es (**Ecuación (24)**):

$$a \leq \sqrt{8} \cdot R \cdot (d_{\text{máx}} + b) \cdot \frac{T}{V \cdot R + T} \quad (24)$$

Donde:

- a: longitud del vano en m.
- T: tensión resultante del conductor en kgf.
- $d_{\text{máx}}$: descentramiento máximo en cm.
- R: radio de la curva en m.
- V: presión del viento en kgf.

Los datos de partida son los siguientes:

- Desplazamiento máximo del HC debido al viento: 0,4 m.
- Altura máxima de la catenaria a instalar: 5,3 m.
- Fuerza de viento por metro de conductor: 1,96 kgf.
- Descentramiento máximo: 0,12 m.
- Descentramiento en apoyos respecto a la vía: 0,2 m.
- Tensión del cable conductor: 3150 kgf.

Para los diferentes radios de curva de la línea ferroviaria, se obtienen los siguientes vanos (**Tabla 18**):

Radio (m)	a (m)	a _{final} (m)
420	29,73	30
520	31,54	32
817	34,56	36
1489	41,67	42
2175	50,12	52
5002	55,79	56

Tabla 18: Vanos en curva. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, en recta se instalarán vanos de 64 metros y en curva los indicados en la tabla 18.

4.4.2.2. Cálculo de tensiones óptimas en sustentador e HC

En la catenaria existen dos tipos de esfuerzos: verticales y horizontales. Los verticales se producen debido al peso de los diferentes elementos que actúan sobre los apoyos. Los esfuerzos horizontales se dan debido a las tensiones mecánicas de los conductores, descentramientos y curvas. También han de tener en consideración los efectos atmosféricos provocados por el viento y el hielo. Para un mejor entendimiento de los esfuerzos a calcular (**Figura 52**):

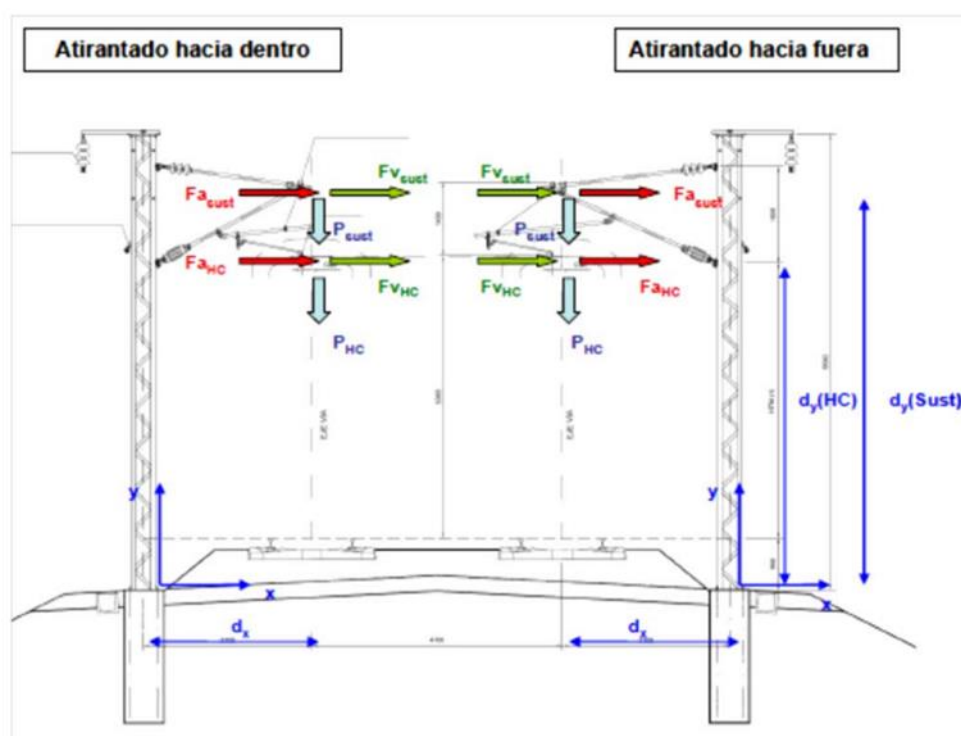


Figura 52: Esfuerzos sobre los apoyos. Fuente: Universidade da Coruña.

Sabiendo las tensiones a las que están sometidos el HC y el sustentador, se procede a calcular el momento que hacen sobre la base de los apoyos. Se tendrán en cuenta los esfuerzos provocados por el peso de los conductores, por el efecto del viento y el generado en el atirantado. Para el cálculo se usarán las siguientes expresiones (**Ecuaciones (25), (26), (27), (28),(29) y (30)**):

$$F_{V,HC} = \frac{F_{1V,HC}}{2} + \frac{F_{2V,HC}}{2} \quad (25)$$

$$P_{HC} = \frac{P_{1,HC}}{2} + \frac{P_{2,HC}}{2} \quad (26)$$

$$F_{V,sust} = \frac{F_{1V,sust}}{2} + \frac{F_{2V,sust}}{2} \quad (27)$$

$$P_{sust} = \frac{P_{1,sust}}{2} + \frac{P_{2,sust}}{2} \quad (28)$$

$$F_V = R_V \cdot a \quad (29)$$

$$P = m \cdot a \quad (30)$$

Donde:

- $F_{V,HC}$: resultante de la fuerza del viento sobre el HC en kgf.
- P_{HC} : resultante del peso del HC en kgf.
- $F_{V,sust}$: resultante de la fuerza del viento sobre el sustentador en kgf.
- P_{sust} : resultante del peso del sustentador en kgf.
- R_V : presión del viento por metro lineal de conductor en kgf/m.
- a : vano en m.
- m : peso lineal del conductor en kgf/m.

Los subíndices uno y dos indican cada uno de los vanos que existen al lado de cada apoyo.

Para una velocidad del viento de 120 km/h, las presiones en kgf sobre cada conductor por metro lineal serán (**Figura 53**):

Tipo de cable	Presiones en kgf por metro lineal de cable
Tierra (LA-110) (14 mm Ø)	0,84
Cable de péndolas de 16 mm ² (5 mm Ø)	0,30
Hilo de contacto de Cu de 107 mm ² (12,24 mm Ø)	0,73
Hilo de contacto de Cu de 120 mm ² (12,92 mm Ø)	0,77
Hilo de contacto de Cu de 150mm ² (14,5 mm Ø)	1,06
Sustentador de Cu de 100 mm ² (11,28 mm Ø)	0,90
LA-380	1,27
LA-280	1,09
Feeder de Cu de 184 mm ² (17,54 mm Ø)	0,87
Feeder de Cu de 225 mm ² (19,46 mm Ø)	0,97
Feeder de aluminio de 253 mm ² (20,68 mm Ø)	1,03

Figura 53: Presiones del viento sobre los conductores. Fuente: UIC 799.

Hilo de contacto

- Para los tramos en recta con 64m:

$$F_{V,HC} = 1,06 \cdot 64 = 67,61 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 1,335 \cdot 64 = 85,44 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=30 m:

$$F_{V,HC} = 1,06 \cdot 30 = 31,8 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 1,335 \cdot 30 = 40,05 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=32 m:

$$F_{V,HC} = 1,06 \cdot 32 = 33,92 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 1,335 \cdot 32 = 42,72 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=36 m:

$$F_{V,HC} = 1,06 \cdot 36 = 38,16 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 1,335 \cdot 36 = 48,06 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=42 m:

$$F_{V,HC} = 1,06 \cdot 42 = 44,52 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 1,335 \cdot 42 = 56,07 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=52$ m:

$$F_{V,HC} = 1,06 \cdot 52 = 55,12 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 1,335 \cdot 52 = 69,42 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=56$ m:

$$F_{V,HC} = 1,06 \cdot 56 = 59,36 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 1,335 \cdot 56 = 74,76 \text{ kgf}$$

Sustentador

- Para los tramos en recta con 64m:

$$F_{V,sust} = 0,9 \cdot 64 = 57,6 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 0,89 \cdot 64 = 56,96 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=30$ m:

$$F_{V,HC} = 0,9 \cdot 30 = 27 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 0,89 \cdot 30 = 26,7 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=32$ m:

$$F_{V,HC} = 0,9 \cdot 32 = 28,8 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 0,89 \cdot 32 = 28,48 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=36$ m:

$$F_{V,HC} = 0,9 \cdot 36 = 32,4 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 0,89 \cdot 36 = 32,04 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=42$ m:

$$F_{V,HC} = 0,9 \cdot 42 = 37,8 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 0,89 \cdot 42 = 37,38 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=52$ m:

$$F_{V,HC} = 0,9 \cdot 52 = 46,8 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 0,89 \cdot 52 = 46,28 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=56$ m:

$$F_{V,HC} = 0,9 \cdot 56 = 50,4 \text{ kgf}$$

$$P_{HC} = 0,89 \cdot 56 = 49,84 \text{ kgf}$$

El siguiente paso será calcular el esfuerzo de atirantado siguiendo la norma **N.A.E. 108**. Mediante la siguiente definición (**Ecuación (31)**):

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot T \cdot d}{a} \quad (31)$$

Donde:

- a : vano en m.
- d : descentramiento en m.
- T : tensión del conductor en kgf.
- $F_{atirantado}$: fuerza de atirantado en kgf.

Hilo de contacto

Como se ha comentado anteriormente el hilo de contacto estará sometido a una tensión de 3150 kgf. El descentramiento será de ± 20 cm.

- Para los tramos en recta con 64m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 3150 \cdot 0,2}{64} = 39,38 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=30$ m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 3150 \cdot 0,2}{30} = 84 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=32$ m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 3150 \cdot 0,2}{32} = 78,75 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=36$ m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 3150 \cdot 0,2}{36} = 70 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=42$ m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 3150 \cdot 0,2}{42} = 60 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=52$ m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 3150 \cdot 0,2}{52} = 48,46 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=56$ m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 3150 \cdot 0,2}{56} = 45 \text{ kgf}$$

Sustentador

En el caso del sustentador, la tensión será de 1575 kgf. Por lo tanto:

- Para los tramos en recta con 64m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 1575 \cdot 0,2}{64} = 19,69 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=30$ m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 1575 \cdot 0,2}{30} = 42 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=32$ m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 1575 \cdot 0,2}{32} = 39,38 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=36$ m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 1575 \cdot 0,2}{36} = 35 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=42$ m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 1575 \cdot 0,2}{42} = 30 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=52 m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 1575 \cdot 0,2}{52} = 24,23 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=56 m:

$$F_{atirantado} = \frac{4 \cdot 1575 \cdot 0,2}{56} = 22,5 \text{ kgf}$$

En los tramos con radio de curva aparece un esfuerzo adicional que viene definido por la siguiente expresión (**Ecuación (32)**):

$$R_y = T \cdot \frac{a}{R + d} \quad (32)$$

Donde:

- T: tensión del conductor en kgf.
- a: vano en m.
- d: descentramiento en m.
- R: radio de curva en m.

Hilo de contacto

- Para los tramos con a=30 m:

$$R_y = 3150 \cdot \frac{30}{420 + 0,2} = 224,9 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=32 m:

$$R_y = 3150 \cdot \frac{32}{520 + 0,2} = 193,77 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=36 m:

$$R_y = 3150 \cdot \frac{36}{817 + 0,2} = 138,78 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=42 m:

$$R_y = 3150 \cdot \frac{42}{1489 + 0,2} = 88,84 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=52 m:

$$R_y = 3150 \cdot \frac{52}{2175 + 0,2} = 75,3 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=56 m:

$$R_y = 3150 \cdot \frac{56}{5002 + 0,2} = 35,26 \text{ kgf}$$

Sustentador

- Para los tramos con a=30 m:

$$R_y = 1575 \cdot \frac{30}{420 + 0,2} = 112,45 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=32 m:

$$R_y = 1575 \cdot \frac{32}{520 + 0,2} = 96,89 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=36 m:

$$R_y = 1575 \cdot \frac{36}{817 + 0,2} = 69,38 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=42 m:

$$R_y = 1575 \cdot \frac{42}{1489 + 0,2} = 44,42 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con a=52 m:

$$R_y = 1575 \cdot \frac{52}{2175 + 0,2} = 37,65 \text{ kgf}$$

- Para los tramos con $a=56$ m:

$$R_y = 1575 \cdot \frac{56}{5002 + 0,2} = 17,63 \text{ kgf}$$

4.4.2.3. Cálculo del momento de vuelco en HC y sustentador

A la hora de calcular el momento de vuelco se considerará el momento que haga al apoyo caer sobre la vía, al ser el más desfavorable. El momento será positivo si el apoyo cae sobre la vía y negativo si cae hacia fuera.

Para los cálculos nos basaremos en las siguientes ecuaciones (**Ecuaciones (33), (34), (35), (36) y (37)**):

$$M_V = F_V \cdot d_y \quad (33)$$

$$M_P = P \cdot d_x \quad (34)$$

$$M_{atiran} = F_{atiran} \cdot d_y \quad (35)$$

$$M_{curva} = R_y \cdot d_y \quad (36)$$

$$M_{total} = M_{atiran} + M_P + M_V \quad (37)$$

Donde:

- d_x : distancia vertical desde el inicio del apoyo hasta el HC en m.
- d_y : distancia vertical desde el inicio del apoyo hasta el sustentador en m.

Hilo de contacto

Sabiendo que:

- $d_y=6,15$ m.
- $d_x=3,20$ m.

Aplicando las ecuaciones se obtienen los siguientes resultados (**Tabla 19**):

Hilode contacto										
a (m)	R (m)	F _v (kgf)	P (kgf)	F _{adrian} (kgf)	R _v (kgf)	M _{v,HC} (kgf*m)	M _{p,HC} (kgf*m)	M _{adrian,HC} (kgf*m)	M _{curva} (kgf*m)	M _{total,HC} (kgf*m)
64	X	67,61	85,44	39,38	X	415,8015	273,408	242,187	0	931,3965
30	420	31,8	40,05	84	224,9	195,57	128,16	516,6	1383,135	2223,465
32	520	33,92	42,72	78,75	193,77	208,608	136,704	484,3125	1191,6855	2021,31
36	817	38,16	48,06	70	138,78	234,684	153,792	430,5	853,497	1672,473
42	1489	44,52	56,07	60	88,84	273,798	179,424	369	546,366	1368,588
52	2175	55,12	69,42	48,46	75,3	338,988	222,144	298,029	463,095	1322,256
56	5002	59,36	74,76	45	35,26	365,064	239,232	276,75	216,849	1097,895

Tabla 19: Momentos de vuelco para el HC. Fuente: Elaboración propia.

Sustentador

El sustentador puede estar por encima del HC varias alturas normalizadas, en nuestro caso, la diferencia de altura entre ambos será de 1,4 metros.

Sabiendo que:

- $d_y = 7,55$ m.
- $d_x = 3,20$ m.
- $d_{atirant.} = 7,55 - 1,4 = 6,15$ m.

Aplicando las ecuaciones se obtienen los siguientes resultados (**Tabla 20**):

Sustentador										
a (m)	R (m)	F _v (kgf)	P (kgf)	F _{adrian} (kgf)	R _v (kgf)	M _{v,sust} (kgf*m)	M _{p,sust} (kgf*m)	M _{adrian,sust} (kgf*m)	M _{curva} (kgf*m)	M _{total,sust} (kgf*m)
64	X	57,6	56,96	19,69	X	434,88	182,272	121,0935	0	738,2455
30	420	27	26,7	42	112,45	203,85	85,44	258,3	848,9975	1396,5875
32	520	28,8	28,48	39,38	96,89	217,44	91,136	242,187	731,5195	1282,2825
36	817	32,4	32,04	35	69,38	244,62	102,528	215,25	523,819	1086,217
42	1489	37,8	37,38	30	44,42	285,39	119,616	184,5	335,371	924,877
52	2175	46,8	46,28	24,23	37,65	353,34	148,096	149,0145	284,2575	934,708
56	5002	50,4	49,84	22,5	17,63	380,52	159,488	138,375	133,1065	811,4895

Tabla 20: Momentos de vuelco para el sustentador. Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.4. Cálculo de esfuerzos en conductor de retorno y feeder negativo

Se han separado los cálculos de la catenaria de los cálculos del *feeder* negativo y el conductor de retorno, ya que estos son conductores no compensados y sin

esfuerzos de atirantado, por lo tanto, sobre ellos solo actúa su propio peso y el efecto del viento (**Figura 54**).

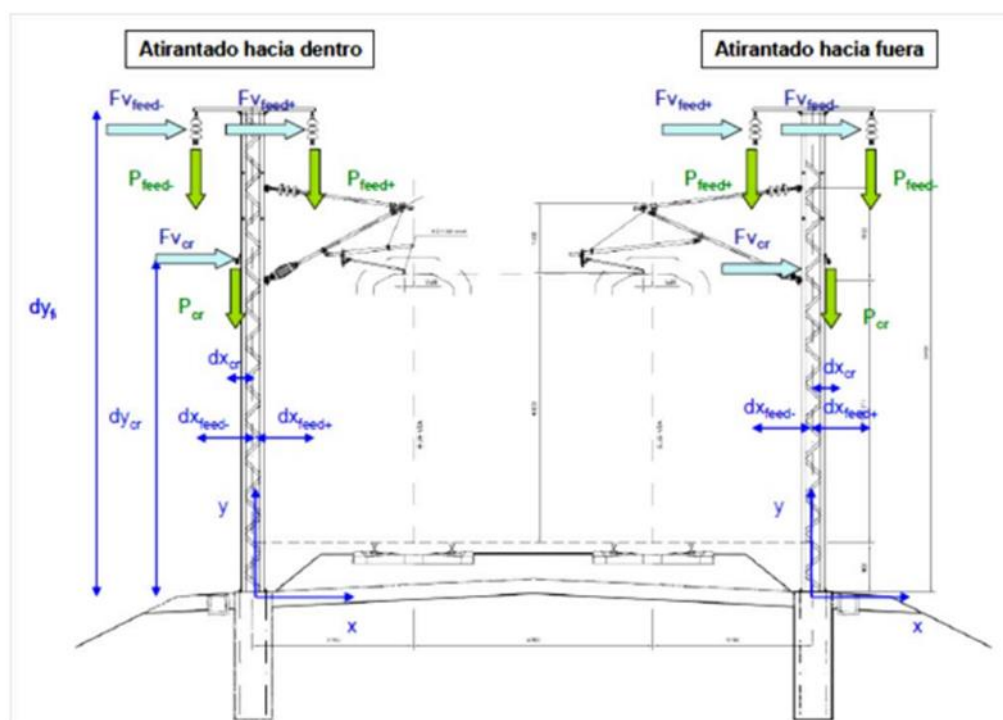


Figura 54: Esfuerzos en el feeder negativo, conductor de retorno y feeder de aumento de sección.. Fuente: Universidade da Coruña.

Los cálculos se realizarán igual que en el apartado 5.4.2.2. pero sin tener cuenta el esfuerzo de atirantado. Los cálculos del *feeder* negativo vienen reflejados en la siguiente tabla (**Tabla 21**):

Feeder negativo				
a (m)	R (m)	F _v (kgf)	P (kgf)	R _y (kgf)
64	X	81,28	81,60	X
30	420	38,1	38,25	192,77
32	520	40,64	40,80	166,09
36	817	45,72	45,90	118,94
42	1489	53,34	53,55	76,15
52	2175	66,04	66,30	64,55
56	5002	71,12	71,40	30,23

Tabla 21: Cálculo de esfuerzos en el feeder negativo. Fuente: Elaboración propia.

Para el cable de retorno se obtienen los siguientes resultados (**Tabla 22**):

<i>Conductor de retorno</i>				
a (m)	R (m)	F_v (kgf)	P (kgf)	R_v (kgf)
64	X	53,76	27,52	X
30	420	25,2	12,90	78,53
32	520	26,88	13,76	67,67
36	817	30,24	15,48	48,46
42	1489	35,28	18,06	31,02
52	2175	43,68	22,36	26,30
56	5002	47,04	24,08	12,31

Tabla 22: Cálculo de esfuerzos en el conductor de retorno. Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.5. Cálculo del momento de vuelvo en conductor de retorno y feeder negativo

Se seguirá el mismo proceso de cálculo que en el apartado 4.4.2.3.

Feeder negativo

Sabiendo que:

- $d_x=1,3$ m.
- $d_y=9,15$ m.

Se obtienen los siguientes resultados (**Tabla 23**):

<i>Feeder negativo</i>								
a (m)	R (m)	F_v (kgf)	P (kgf)	R_v (kgf)	M_v (kgf*m)	M_p (kgf*m)	M_{curva} (kgf*m)	M_{total} (kgf*m)
64	X	81,28	81,60	X	743,71	-106,08	X	637,63
30	420	38,1	38,25	192,77	348,62	-49,73	1763,80	2062,69
32	520	40,64	40,80	166,09	371,86	-53,04	1519,72	1838,54
36	817	45,72	45,90	118,94	418,34	-59,67	1088,33	1446,99
42	1489	53,34	53,55	76,15	488,06	-69,62	696,76	1115,2
52	2175	66,04	66,30	64,55	604,27	-86,19	590,59	1108,67
56	5002	71,12	71,40	30,23	650,75	-92,82	276,57	834,50

Tabla 23: Momentos de vuelvo para el feeder negativo. Fuente: Elaboración propia.

Conductor de retorno

Sabiendo que:

- $d_x=6,35$ m.
- $d_y=0,24$ m.

Obtenemos los siguientes resultados (**Tabla 24**)

Conductor de retorno								
a (m)	R (m)	F _v (kgf)	P (kgf)	R _v (kgf)	M _v (kgf*m)	M _p (kgf*m)	M _{curva} (kgf*m)	M _{total} (kgf*m)
64	X	53,76	27,52	X	341,38	-6,60	X	334,77
30	420	25,2	12,90	78,53	160,02	-3,10	498,69	655,62
32	520	26,88	13,76	67,67	170,69	-3,30	429,68	597,07
36	817	30,24	15,48	48,46	192,02	-3,72	307,71	496,02
42	1489	35,28	18,06	31,02	224,03	-4,33	197,00	416,69
52	2175	43,68	22,36	26,30	277,37	-5,37	166,98	438,98
56	5002	47,04	24,08	12,31	298,70	-5,78	78,20	371,12

Tabla 24: Momentos de vuelco para el conductor de retorno. Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculados todos los esfuerzos y momentos que se ejercen sobre los apoyos, será necesario elegir el poste a instalar.

4.4.2.6. Elección del apoyo

Los apoyos a utilizar serán metálicos compuestos de dos perfiles UPN unidos por diagonales. Están fijados al terreno por medio de una placa que se fija con tuercas a los cáncamos que componen la armadura de la cimentación.

La altura de los apoyos puede ser de 8,55 metros cuando el circuito de tracción no cuenta con *feeder* de refuerzo y de 9,45 metros cuando sí lleva *feeder* de refuerzo y es un anclaje de compensación. Al no contar nuestra línea con *feeder* de refuerzo, los apoyos a instalar medirán 8,55 metros.

Los perfiles UPN están diseñados mediante las siguientes normas:

- **UNE 36522:1972** - Productos de Acero. Perfil U Normal (UPN). Medidas y tolerancias. [UNE 36522:1972].

- **UNE-EN 10279:2001** - Perfiles en U de Acero laminado en caliente. Tolerancias dimensionales, de la forma y de la masa. [UNE-EN 10279:2001].

Con el objetivo de elegir el tipo de apoyo a instalar mediante las tablas de las normas antes mencionadas, será necesario calcular el momento total que cada conductor ejerce sobre el apoyo (**Ecuación (38)**).

$$M_{total} = M_{sust} + M_{HC} + M_{cond.ret.} + M_{feeder} \quad (38)$$

Aplicando la ecuación (44), obtenemos los siguientes resultados (**Tabla 25**):

Momento total						
a (m)	R (m)	M _{total, HC} (kgf*m)	M _{total,sust} (kgf*m)	M _{total,feeder} (kgf*m)	M _{total,cond.ret.} (kgf*m)	M _{total} (kgf*m)
64	X	931,40	738,25	637,63	334,77	2642,05
30	420	2223,47	1396,59	2062,69	655,62	6338,36
32	520	2021,31	1282,28	1838,54	597,07	5739,20
36	817	1672,47	1086,22	1446,99	496,02	4701,70
42	1489	1368,59	924,88	1115,20	416,69	3825,36
52	2175	1322,26	934,71	1108,67	438,98	3804,62
56	5002	1097,90	811,49	834,50	371,12	3115,01

Tabla 25: Momentos totales sobre el apoyo. Fuente: Elaboración propia.

Las características mecánicas de los perfiles UPN vienen estandarizados a través de la norma **ETI de infraestructura [2002/732/CE: 2002]** suponiendo una velocidad del viento de 120 km/h. Los datos son los siguientes (**Tabla 26**):

	X-1AV	X-2AV	X-3AV	X-4AV	X-5AV	X-6AV	X-7AV
Altura del poste (m)	8,55	8,55	8,55	8,55	8,55	8,55	8,55
UPN	100	120	140	160	180	200	220
Separación UPN (cm)	40	40	40	40	45	45	45
Ancho UPN (cm)	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
Ancho presilla (cm)	4	4	4	4	4	4	4
Espesor presilla (cm)	1	1,2	1,2	1,2	1,4	1,4	2
Radio de giro de la UPN (cm)	1,47	1,59	1,75	1,89	2,02	2,14	2,3
Carga de trabajo (kgf/cm ²)	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
Momento de inercia (cm ⁴)	29,3	43,2	62,7	85,3	114	148	197
cG (cm)	1,55	1,6	1,75	1,84	1,92	2,01	2,14
Área UPN (cm ²)	13,5	17	20,4	24	28	32,2	37,4
Módulo resistente (cm ³)	41,2	60,7	86,4	11	150	191	245
Número de presillas	26	26	26	26	26	26	26
Presión del viento (kgf/m ²)	100	100	100	100	100	100	100
Longitud de presillas (cm)	53,15	53,15	53,15	53,15	57,01	57,01	57,01
Esbeltez de la UPN	47,62	44,03	40,00	37,04	34,65	32,71	30,43
Omega UPN	1,11	1,09	1,07	1,06	1,05	1,05	1,04
Iy (cm ⁴)	9249,47	11597,44	13714,35	16000,31	23946,04	27333,70	31400,81
Wy (cm ³)	462,47	579,87	685,72	800,02	1064,27	1214,83	1395,59
Wx (cm ³)	82,40	121,40	172,80	22,00	300,00	382,00	490,00
Superficie viento transversal (m ²)	1,28	1,54	1,80	2,05	2,31	2,57	2,82
Superficie viento longitudinal (m ²)	2,82	2,99	3,16	3,33	3,58	3,75	3,92
Cortante transversal viento (kgf)	128,25	153,90	179,55	205,20	230,85	256,50	282,15
Momento transversal viento (kgf·m)	548,27	657,92	767,58	877,23	986,88	1096,54	1206,19
Momento longitudinal viento (kgf·m)	1203,63	1276,74	1349,84	1422,94	1530,37	1603,47	1676,57
Momento admisible total (kgf·m)	5833,00	7447,90	8972,00	10566,24	14190,24	16197,75	18786,81
Momento adm.-viento (kgf·m)	5284,73	6789,97	8204,43	9689,01	13203,36	15101,21	17580,62

Tabla 26: Características de los apoyos para líneas de AV. Fuente: Norma ETI de infraestructura [2002/732/CE: 2002]

Comparando los cálculos con los datos de los apoyos (**Tabla 27**):

Momento total				
a (m)	R (m)	M _{total} (kgf·m)	Apoyo	Momento admisible total (kgf·m)
64	X	2642,05	X-2AV	7447,9
30	420	6338,36		
32	520	5739,20		
36	817	4701,70		
42	1489	3825,36		
52	2175	3804,62		
56	5002	3115,01		

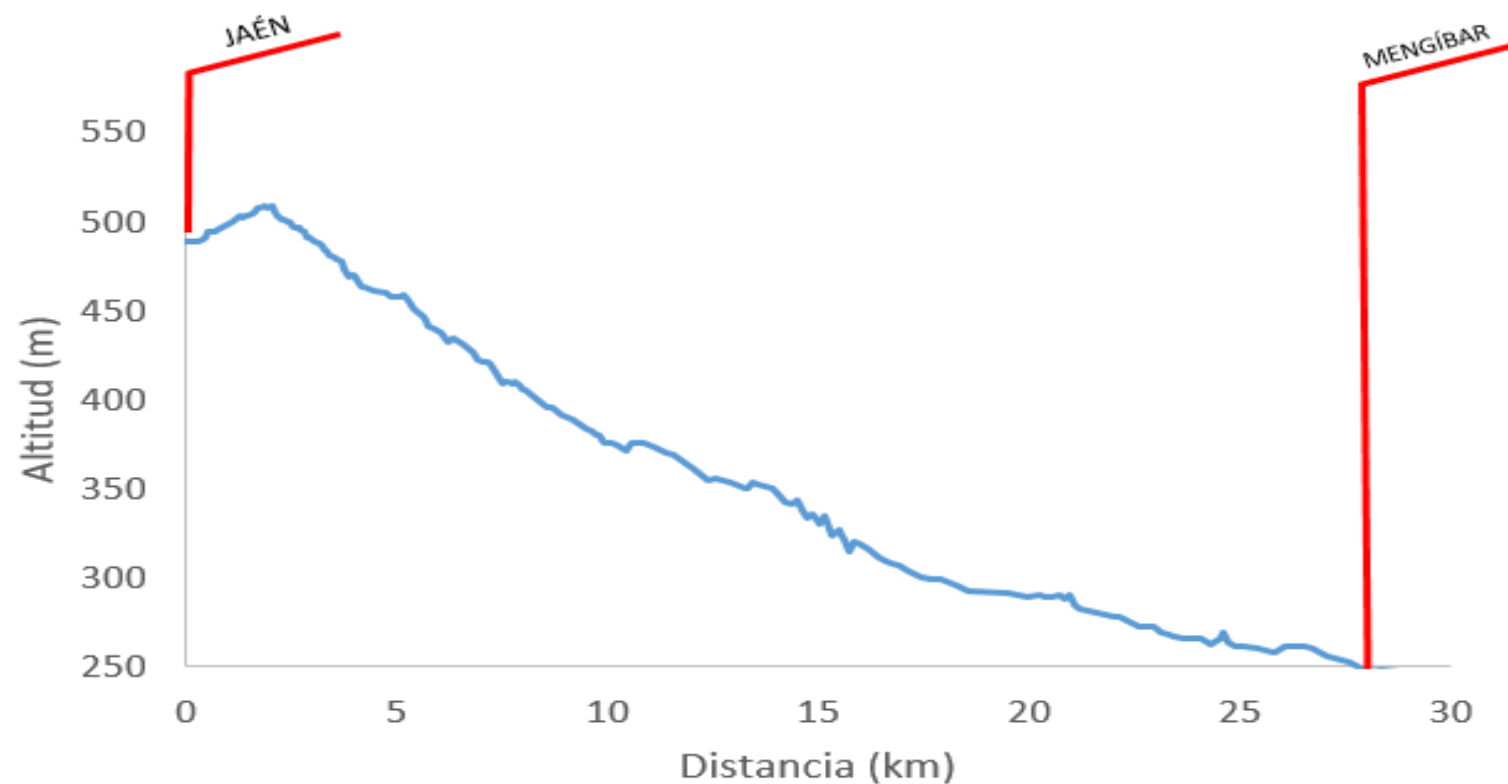
Tabla 27: Elección de apoyo normalizado. Fuente: Elaboración propia.

El momento total más desfavorable pertenece al tramo con radio de curva de 420 metros y vano de 30 metros con un valor de 6338,36 kgf·m. El apoyo elegido es el apoyo X-2AV con un momento admisible total de 7447,9 kgf·m.

CAPÍTULO 5: PLANOS

Los planos del presente estudio se distribuirán de la siguiente forma:

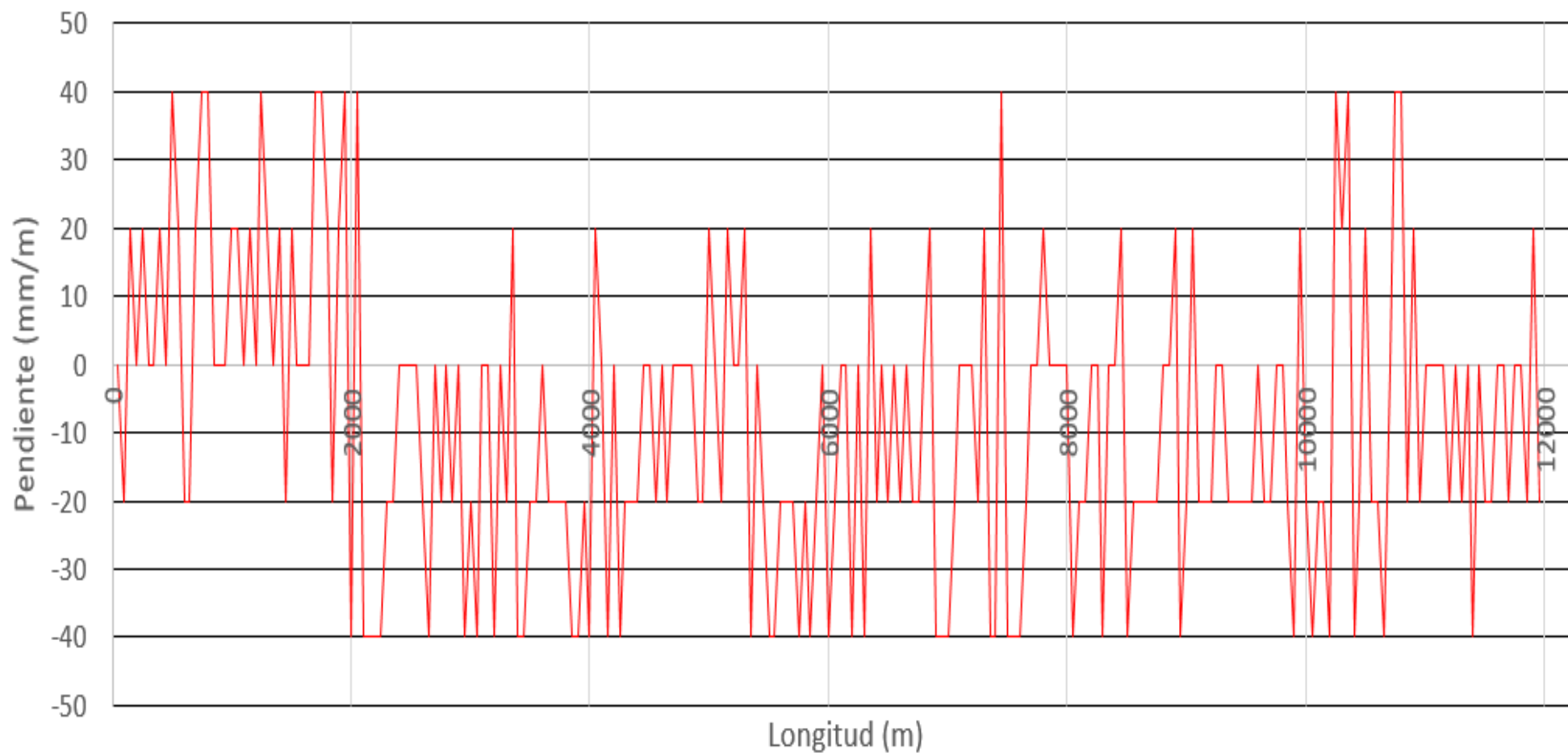
- **Plano 1:** Perfil longitudinal del tramo de línea.
- **Plano 2:** Trazado del tramo de línea.
- **Plano 3:** Representación gráfica de las rampas ficticias del tramo Jaén-Grañena.
- **Plano 4:** Representación gráfica de las rampas ficticias del tramo Grañena-Mengíbar.
- **Plano 5:** Emplazamiento de las estaciones, subestaciones de tracción y autotransformadores intermedios.



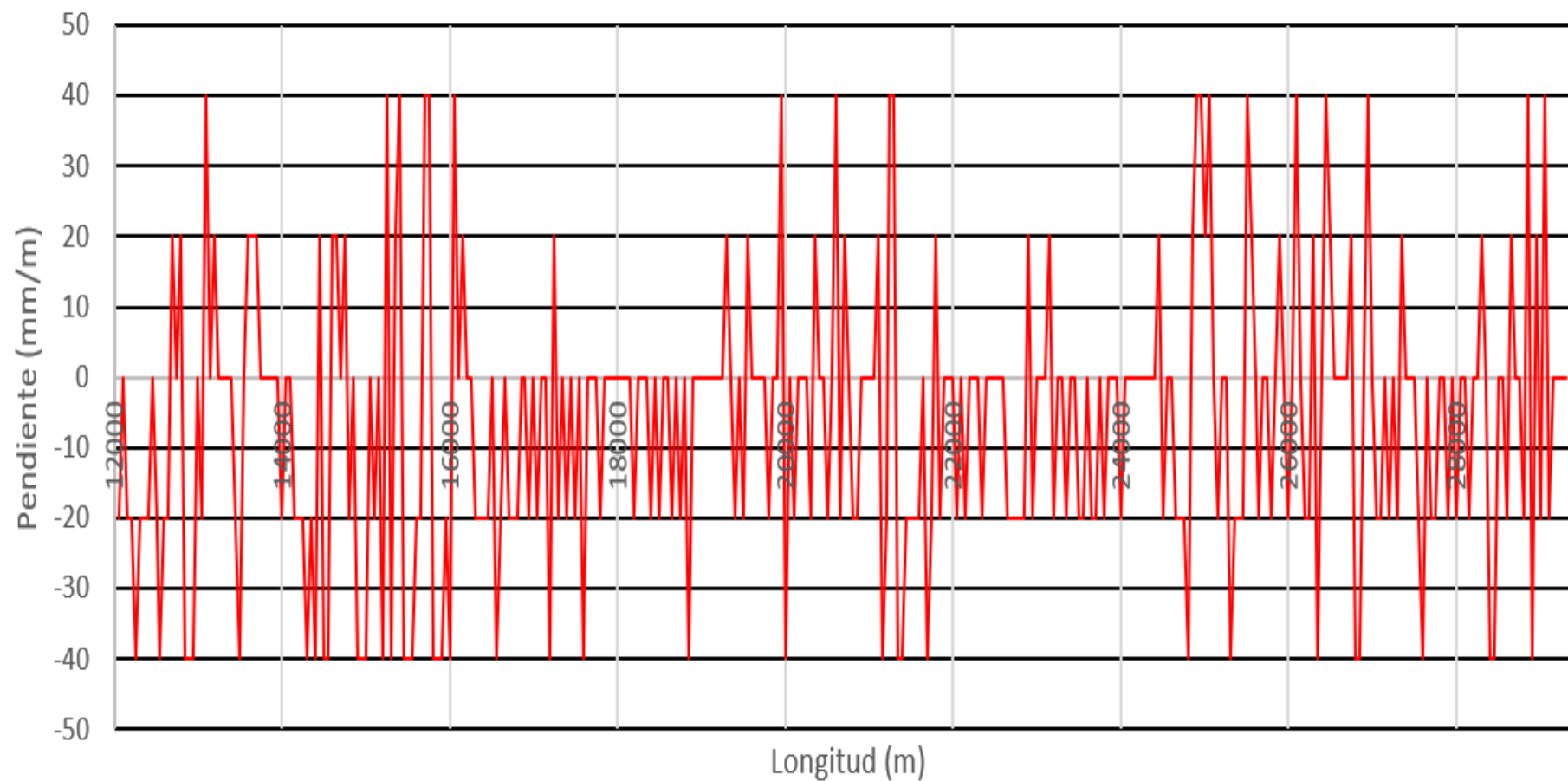
PROYECTO: CÁLCULO DE LÍNEA DE ALIMENTACIÓN FERROVIARIA DEL SUBTRAMO JAÉN-MENGÍBAR EN ALTA VELOCIDAD				
 DEPARTAMENTO DE Ingeniería Eléctrica Universidad de Jaén	REALIZADO: Miguel Ángel Arquillo Ureña		Fecha: 02/2024	Firma:
	REVISADO:		Fecha:	Firma:
TÍTULO/SUBTÍTULO: Perfil longitudinal del tramo de línea		Tipo de documento:	Escala: S/E	Nº identif: 1



PROYECTO: CÁLULO DE LÍNEA DE ALIMENTACIÓN FERROVIARIA DEL SUBTRAMO JAÉN-MENGÍBAR EN ALTA VELOCIDAD				
 DEPARTAMENTO DE Ingeniería Eléctrica Universidad de Jaén	REALIZADO: Miguel Ángel Arquillo Ureña		Fecha: 02/2024	Firma:
	REVISADO:		Fecha:	Firma:
TÍTULO/SUBTÍTULO: Trazo del tramo de línea		Tipo de documento:	Escala: S/E	Nº identif: 2



PROYECTO: CÁLULO DE LÍNEA DE ALIMENTACIÓN FERROVIARIA DEL SUBTRAMO JAÉN-MENGÍBAR EN ALTA VELOCIDAD				
 DEPARTAMENTO DE Ingeniería Eléctrica Universidad de Jaén	REALIZADO: Miguel Ángel Arquillo Ureña		Fecha: 02/2024	Firma:
	REVISADO:		Fecha:	Firma:
TÍTULO/SUBTÍTULO: Representación gráfica de las rampas ficticias del tramo Jaén-Grañena		Tipo de documento:	Escala: S/E	Nº identif.: 3



PROYECTO: CÁLULO DE LÍNEA DE ALIMENTACIÓN FERROVIARIA DEL SUBTRAMO JAÉN-MENGÍBAR EN ALTA VELOCIDAD				
 DEPARTAMENTO DE Ingeniería Eléctrica Universidad de Jaén	REALIZADO: Miguel Ángel Arquillo Ureña	Fecha: 02/2024	Firma:	
	REVISADO:	Fecha:	Firma:	
TÍTULO/SUBTÍTULO: Representación gráfica de las rampas ficticias del tramo Grañena-Mengíbar		Tipo de documento:	Escala: S/E	Nº identif.: 4

CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA Y NORMATIVA

6.1. Bibliografía

Adif licita por más de 4,10 M€ el desarrollo de una herramienta para optimizar el mantenimiento de infraestructura - Adif. (s. f.). <https://www.adif.es/-/adif-licita-por-m%C3%A1s-de-4-10-m%E2%82%AC-el-desarrollo-de-una-herramienta-para-optimizar-el-mantenimiento-de-infraestructura>

Avaf. (2021, 1 octubre). *ELECTRIFICACIÓN FERROVIARIA (I): LOS INICIOS*. avaf.es. <https://www.avaf.es/electrificacion-ferroviaria-i-los-inicios/>

Benito, R. F. (2004). *La tracción eléctrica en la alta velocidad ferroviaria (A.V.F.)*.

Conectar Europa en tren: 10 proyectos piloto de la UE para impulsar el ferrocarril transfronterizo | Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030. (s. f.). <https://esmovilidad.mitma.es/node/1203>

Ferrovioario | Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (s. f.). <https://www.mitma.gob.es/ferrovioario>

Martínez Acevedo, J. C., & Ríos Reyes, M. (2023, July). Inteligencia Artificial: Visión y aplicación a la red ferroviaria española. In *Jornadas sobre Inteligencia Artificial-CUASI 2023*. Escuela de Ciencias Técnicas e Ingeniería.

Nategh, S., Boglietti, A., Liu, Y., Barber, D., Brammer, R., Lindberg, D., & Aglen, O. (2020). A review on different aspects of traction motor design for railway applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(3), 2148-2157.

Nqodi, A., Mosetlhe, T. C., & Yusuff, A. A. (2023). Advances in Hydrogen-Powered Trains: A Brief Report. *Energies*, 16(18), 6715.

Palmer, C. (2022). Hydrogen-Powered Trains Start to Roll. *Engineering*, 11, 9-11.

Red convencional - Adif. (s. f.). <https://www.adif.es/sobre-adif/red-ferroviaria/red-convencional>

Red de ancho métrico - Adif. (s. f.). <https://www.adif.es/sobre-adif/red-ferroviaria/red-de-ancho-m%C3%A9trico>

Suárez, M. C., & Ortuño, J. M. (2013). *Sistemas de alimentación a la tracción ferroviaria*. FormaRail.

Sun, Y., Anwar, M., Hassan, N. M. S., Spiryagin, M., & Cole, C. (2021). A review of hydrogen technologies and engineering solutions for railway vehicle design and operations. *Railway Engineering Science*, 29, 212-232.

S-130. (s. f.). <https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/grupo-renfe/flota-de-trenes/s-130>

Tobar, S. (2023, 1 agosto). Los efectos de la liberalización ferroviaria: Ouigo e Iryo disparan la oferta, el AVE baja precios y el tren gana al avión. *El Español*. https://www.elespanol.com/invertia/observatorios/movilidad/20230801/efectos-liberalizacion-ferroviaria-ouigo-iryo-disparan-oferta-ave-baja-precios-tren-gana-avion/783171995_0.html#:~:text=El%2014%20de%20diciembre%20de,de%20bajo%20coste%20de%20Renfe.

Torrent Burgués, M., Perat Benavides, J. I., Blanqué Molina, B., & Soriano Almodovar, S. (2015). Caracterización de motores de inducción para tracción ferroviaria a partir del circuito equivalente, incluyendo todas las pérdidas del motor. *Dyna*, 90(1), 87-95.

Topic: Rail passenger transport in Europe. (2024, 10 enero). Statista. <https://www.statista.com/topics/8282/rail-passenger-transport-in-europe/#topicOverview>

6.2. Normativa

6.2.1. General

- **UNE-EN 50119:2021:** Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Líneas aéreas de contacto para tracción eléctrica.
- **UNE-EN 50163:2005/A3:2023:** Aplicaciones ferroviarias. Tensiones de alimentación de las redes de tracción.
- **UNE-EN 50122-1:2023:** Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Seguridad eléctrica, puesta a tierra y circuito de retorno. Parte 1: Medidas de protección contra los choques eléctricos.
- **UNE-EN 50388:2013:** Aplicaciones ferroviarias. Alimentación eléctrica y material rodante. Criterios técnicos para la coordinación entre sistemas de alimentación (subestación) y el material rodante para alcanzar la interoperabilidad.
- **UNE-EN 60071:** Coordinación de aislamiento.
- **UNE-EN 50182:2002:** Conductores para líneas eléctricas aéreas. Cond. de alambres redondos cableados en capas concéntricas.
- **UNE-EN 50149:2012:** Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Hilo de contacto acanalado de cobre y aleación de cobre
- **UNE 36522:2018:** Productos de acero. Perfiles en U normal (UPN) laminados en caliente. Dimensiones y masas.
- **UNE-EN 10279:2001:** Perfiles en U de acero laminado en caliente. Tolerancias dimensionales, de la forma y de la masa.
- **Norma ETI de infraestructura [2002/732/CE: 2002].**
- **UIC 798:** Criterios de dimensionamiento para catenaria de Alta Velocidad.
- **UIC 799:** Características de catenaria de corriente alterna.

6.2.3. Específica

- **N.A.E. 108:** Montaje de sustentador e hilos de contacto de la línea aérea de contacto (catenaria).
- **ET 03.359.504.2_2M1:** Transformadores de potencia para subestaciones de tracción. Sistema 2 x 25 kV.
- **Norma Técnica NT – GGC – 6 (Renfe).**