



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

**ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA SUBESTACIÓN DE
TRACCIÓN TIPO PARA UN FERROCARRIL
METROPOLITANO**

Autor:

Gomes Monteiro da Silva, Gilderley

Tutor:

**Zorita Lamadrid, Ángel Luis
Dpto. Ingeniería Eléctrica**

Valladolid, Junio de 2017.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

MEMORIA



RESUMEN

El presente trabajo fin de grado trata de las instalaciones propias de un ferrocarril metropolitano, estudiando los elementos que componen este tipo de instalaciones y realizando el diseño de una subestación de tracción tipo.

Se describe el sistema eléctrico típico de un metropolitano, describiendo el circuito eléctrico de tracción, el material móvil, las posibles tensiones de funcionamiento de un sistema de tracción de corriente continua, el sistema de señalización y los elementos que continúen una subestación de estas características presentando los cálculos necesarios para su definición.

Palabras claves: Subestación de tracción, ferrocarril, metropolitano, electrificación y corriente continua.

SUMMARY

This Bachelor Degree Final Work describes the specific facilities of a metropolitan railroad, studying the elements that compose this type of facilities and carrying out the design of a typical traction substation.

The typical electrical system of a metropolitan is outlined, describing the electric circuit of traction, the rolling stock, the possible operating voltages of a direct current drive system, the signaling system and the elements that comprise a substation of these characteristics proposing the necessary calculations for its definition.

Key words: Traction substation, rail, metropolitan, electrification and direct current.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

AGRADECIMIENTOS

Visto que la finalización de este trabajo representa la conclusión de los estudios de grado, no podría dejar de agradecer a toda la gente que me ha ayudado directa y indirectamente en estos años de estudio.

Primeramente agradecer a mi madre, Mônica, por su apoyo incondicional y su ejemplo de persona trabajadora y dedicada. Al Instituto de Co-responsabilidade pela educação (ICE), que me ha otorgado una beca integral para la realización de mis estudio de ingeniería en la Universidad de Valladolid, muchas gracias Dr. Marcos Magalhães por la paciencia y por las ganas de cambiar el mundo y gracias Odenilda por la motivación durante todos estos años.

Agradezco a mis compañeros de estudio, por todas las horas compartidas dentro y fuera de la universidad.

Gracias a Xavier de Rocafiguera por toda la documentación facilitada y a Daniel Montaña por las horas de explicación post-trabajo.

Gracias a mi tutor Ángel Luis Zorita por facilitar la realización de este trabajo desde Barcelona.

Gracias a Clara Urueña por el compañerismo durante estos años y por estar siempre ahí.



ÍNDICE

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	5
1.1. ANTECEDENTES	5
1.2. UN POCO DE HISTORIA.....	6
1.3. OBJETIVOS	7
1.4. DESCRIPCIÓN DE LA MEMORIA.....	7
2. SISTEMA ELÉCTRICO DE UN METROPOLITANO	9
2.1. EL CIRCUITO DE TRACCIÓN	9
2.2. EL MATERIAL MÓVIL.....	12
2.2.1. Ferrocarril metropolitano (METRO).....	12
2.3. TENSIONES DE FUNCIONAMIENTO.....	14
2.4. SUBESTACIONES DE TRACCIÓN	14
2.4.1. Subestación de Tracción de Corriente Continua.....	15
2.4.1.1. Instalación Trifásica de Corriente Alterna:	15
2.4.1.1.1. Aparata de potencia: interruptores, seccionadores,	
transformadores de medida y protección, pararrayos, etc.	16
2.4.1.1.2. Transformadores de potencia para tracción	17
2.4.1.1.3. Sistemas de servicios auxiliares en baja tensión alterna.	20
2.4.1.2. Instalación de Tracción de Corriente Continua:.....	20
2.4.1.2.1. Rectificadores de potencia.....	21
2.4.1.2.2. Salida del Feeder	24
2.4.1.2.3. Sistemas de control integrado, protección y medida.	24
2.4.1.2.4. Bobinas de alisamiento y filtros	26
2.4.1.2.5. Sistemas de telemando y teleseñal.....	28
2.4.1.2.6. Sistema de protección en corriente continua	29
2.4.1.2.6.1. Sistema de ensayo de línea (EDL).....	29
2.4.1.2.6.2. Sistema comparador de línea (DDT).....	30
2.5. SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN DE UN METROPOLITANO	30
2.5.1. Régimen de Lanzadera.....	31



2.5.2.	Bloqueo por Bastón Piloto.....	31
2.5.3.	Bloqueo Telegráfico.....	32
2.5.4.	Bloqueo Telefónico Normal BEM.....	33
2.5.5.	Bloqueo Eléctrico Manual.....	33
2.5.6.	Bloqueo Telefónico Supletorio BTS.....	34
2.5.7.	Bloqueo automático.....	35
2.5.7.1.	De vía única BAU:.....	35
2.5.7.2.	De vía doble (BAD):.....	37
2.5.7.3.	De vía Banalizada (BAB).....	40
3.	DATOS DE PARTIDA.....	42
3.1.	DEMANDA DE CARGA.....	42
3.1.1.	Fuerza Neta de un Vehículo de Tracción.....	42
3.1.2.	Variables Dinámicas.....	44
3.1.3.	Consumo de Potencia.....	45
3.1.4.	Resultados Mediante Simulación.....	45
4.	DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA.....	50
4.1.	ACOMETIDA ELÉCTRICA A LA SUBESTACIÓN.....	55
4.2.	CELDA DE 25 kV.....	55
4.3.	TRANSFORMADORES DE TRACCIÓN Y SERVICIOS AUXILIARES.....	56
4.4.	GRUPOS RECTIFICADORES.....	56
4.5.	FILTROS Y BOBINAS.....	57
4.6.	CELDA DE CORRIENTE CONTINUA.....	57
4.7.	DISPOSITIVOS LIMITADOR DE TENSIÓN.....	58
4.8.	INSTALACIONES AUXILIARES.....	59
4.8.1.	Sistemas de alimentación segura.....	59
4.8.1.1.	SAI.....	59
4.8.1.2.	Sistema de corriente continua 110 Vcc.....	59
4.8.2.	Cuadros de Baja Tensión.....	60
4.8.2.1.	Cuadro General de Baja Tensión.....	60
4.8.2.2.	Subcuadro de Alumbrado y Tomas de corriente.....	61



4.8.2.3.	Cuadro de SAI	62
4.8.2.4.	Subcuadro de 110 Vcc	63
4.8.3.	Alumbrado y tomas de corriente.....	63
4.8.4.	Cableado y canalizaciones	64
4.9.	PUESTA A TIERRA.....	65
5.	CONCLUSIONES	68
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	69

ANEXO 1 – CÁLCULO DE INSTALACIONES DE MEDIA TENSIÓN

ANEXO 2 – CÁLCULO DE INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN

PLANOS



Figura 1. Circuito monofásico de tracción	9
Figura 2. Catenaria Rígida Metro de Barcelona	10
Figura 3. Bogie	13
Figura 4. Celdas de Corriente alterna	16
Figura 5. Paso de cable entre celdas	17
Figura 6. Transformador de aceite	17
Figura 7. Transformador seco	18
Figura 8. Ejemplo de celdas de protección de transformadores	19
Figura 9. Ejemplo de celdas de protección de rectificadores	19
Figura 10. Señal de entrada vs señal rectificada	21
Figura 11. Rectificador trifásico simples	21
Figura 12. Rectificador trifásico en puente	22
Figura 13. Señal de entrada al rectificador de una de las fases	22
Figura 14. Salida de un rectificador de media onda	22
Figura 15. Salida de salida de un rectificador de onda completa	22
Figura 16. Rectificador de 6 Pulsos	22
Figura 17. Rectificador de 12 pulsos serie	23
Figura 18. Conexión transformador-rectificador	23
Figura 19. Rectificador de 12 pulsos extraíble	24
Figura 20. Ejemplo de esquema de supervisión de una subestación	25
Figura 21. Ejemplo de sistema SCADA junto a celdas	26
Figura 22. Bobina de alisamiento y filtros	27
Figura 23. Bobina de alisamiento	27
Figura 24. Filtros de armónicos	28
Figura 25. Arquitectura clásica de un sistema de telemando de energía	29
Figura 26. Esquema de Funcionamiento del Bloqueo telefónico	33
Figura 27. Ejemplo de Panel de Bloqueo Eléctrico Manual	34
Figura 28. Petición de Itinerario en BAU, entre dos estaciones colaterales	36
Figura 29. Concesión de bloqueo e Itinerario entre dos estaciones colaterales	36
Figura 30. Petición de Itinerario en BAD, entre dos estaciones colaterales	38
Figura 31. Concesión de Bloqueo de Salida y apertura de las Señales	39
Figura 32. Desenclavamiento de Itinerario por Paso de Tren	39
Figura 33. Mando Local Entrega BOI	40
Figura 34. Comunicación PCC (CTC) con Maquinista	40
Figura 35. Resistencia al Avance	46



Figura 36. Esfuerzo de Tracción Máxima	46
Figura 37. Velocidad de régimen	47
Figura 38. Esfuerzo de Tracción Máxima y Resistencia al Avance	47
Figura 39. Fuerzo de frenado	48
Figura 40. Puntos Quilométricos en Función del Tiempo	49
Figura 41. Potencia Instantánea Demandada	49
Figura 42. Tipología de Conexión en π	50
Figura 43. Distribución interior subestación	51
Figura 44. Esquema de equipos de Media tensión	52
Figura 45. Celdas de corriente alterna	53
Figura 46. Celdas de corriente continua	54
Figura 47. Dispositivo disipador de tensión	58
Figura 48. Cuadro General de Baja Tensión	61
Figura 49. Subcuadro de alumbrado y tomas de corriente	62
Figura 50. Subcuadro de SAI	62
Figura 51. Subcuadro de 110 Vcc	63
Figura 52. Cableado usado (RZ1-K)	64
Figura 53. Bandeja de rejilla	65
Figura 54. Detalle de puesta a tierra en pilares	66
Figura 55. Detalle de soldadura	67



1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

1.1. Antecedentes

El sistema metropolitano cumple una función importante en la integración y comunicación entre los sectores productivos, sociales y territoriales, permitiendo el desarrollo de diversas actividades de un país.

Este sistema es fundamental para el movimiento de personas en las grandes ciudades. Su desarrollo y correcto funcionamiento son vitales para la actividad económica de las mismas. Tanto es así, que muchas ciudades se han desarrollado a la vez que se diseñaban nuevas líneas de metro comunicando zonas que anteriormente eran consideradas aisladas y desarrollándolas. Por todo esto, la integración metropolitana es considerada un fuerte indicador de crecimiento.

Es fundamental la comunicación entre los barrios de una misma ciudad mediante un sistema de transporte capaz de soportar un gran flujo de personas. En este principio se basaron las grandes metrópolis españolas, como Barcelona y Madrid, facilitando la comunicación entre los habitantes de sus pueblos con el centro de la ciudad mediante una vasta red metropolitana, aún en crecimiento.

Dado el gran número de usuarios de las instalaciones de un metropolitano, éstas requieren enormes exigencias de fiabilidad y seguridad. La primera, fiabilidad, como veremos en futuros apartados de este trabajo, en lo que se refiere a electrificación, se suele conseguir aplicando sistemas redundantes (doble transformador, doble acometida y etc), para garantizar en todo momento la continuidad del suministro eléctrico. Para la segunda, la seguridad, se suelen integrar en las instalaciones del metropolitano, sistemas minuciosos que garanticen el bienestar de sus usuarios, como los sistemas de detección y de extinción de incendios, antiintrusión, el sistema de control de movimiento de trenes, entre otros.

Se trata de una actividad puntera en continuo desarrollo e investigación con objeto de mantener elevados estándares de operación. La relación entre transformación urbana y metro es clara. El carácter duradero del metro le confiere a los lugares inmediatamente adyacentes a las estaciones una privilegiada posición dentro de la ciudad y se convierten en focos de concentración de servicios, equipamientos y empresas de todo tipo. Hoy en día, el éxito del metro es innegable y su expansión imparable.



Se considera actualmente al metro como el medio de transporte masivo de pasajeros, a nivel urbano, más eficiente. Así mismo es notoria la necesidad de un buen planteamiento del sistema metropolitano, incluyendo la electrificación de la línea mediante el debido diseño de subestaciones de tracción, objeto de este estudio.

El presente trabajo permite al alumno obtener conocimientos en el área de tracción eléctrica en un metropolitano. Dentro del plan de estudios del Grado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid se incluye, precisamente la asignatura de Sistemas de Transporte de Tracción Eléctrica, en la que se desarrollan los sistemas de alimentación a la tracción ferroviaria.

Este es el motivo de realizar este TFG, con el propósito de ampliar mis conocimientos en un campo de tan clara aplicación de los estudios cursados.

1.2. Un poco de historia

El nacimiento del metro data de 1863 en Londres, para solventar la necesidad de desplazar grandes contingentes de trabajadores de forma diaria y constante. Se fue forjando la idea de crear un medio de locomoción rápido, de gran capacidad de viajeros y que tuviese unas frecuencias de paso adecuadas.

En 1853, tras 10 años de debates, el parlamento inglés autorizó la propuesta del proyecto ferroviario y en 1860 comenzó su construcción. El 10 de enero de 1863 abrió la primera línea de metro subterránea con locomotoras de vapor en Londres (denominado *Metropolitan Railway*), inaugurado en 1863 con seis kilómetros de longitud. En años sucesivos fue extendiéndose, de forma que en 1884 formaba un anillo de aproximadamente veinte kilómetros. A continuación se le añadieron líneas radiales, en parte a cielo abierto y en parte en túnel, para constituir el *Metropolitan and District Railway*. Las locomotoras empezaron siendo de vapor. Posteriormente se comenzó la excavación de túneles en forma de tubo y se electrificaron las líneas.

El metro se soterró debido a los inconvenientes que producían los viaductos elevados, que devaluaban el área urbana y provocaba problemas de movilidad. Tanta fue la importancia de este medio de locomoción en la expansión urbana que la planificación de las líneas tenían vinculación con determinadas operaciones inmobiliarias.



El desarrollo del metro ha sido irregular en cuanto a sus pautas de distribución en el mundo. Apenas una quinta parte del total de líneas de metro se construyeron antes de 1950. Entre 1950 y 1975 se construyó una cuarta parte más y, a partir de 1975, se crearon las dos terceras partes de sistemas de metro en el mundo.

En el caso de España, el metro se halla presente en Madrid, Barcelona, Valencia, Bilbao, Sevilla, Málaga, Alicante y Palma de Mallorca. Excepto las dos últimas ciudades, el resto genera ámbitos metropolitanos que superan o se acercan al millón de habitantes y que poseen una gran concentración laboral y que, por tanto, pueden justificar la implantación de un sistema metropolitano.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo ha consistido en diseñar una subestación de tracción para un ferrocarril metropolitano, por lo cual será necesario cumplir los siguientes hitos:

- Conocer todos con detalle todos los aspectos que afectan a la instalación y funcionamiento de un metropolitano;
- Conocer todos los elementos que conforman una subestación de estas características;
- Conocer los procedimientos que permiten establecer los parámetros básicos que definen las características de los elementos que conforman una subestación de tracción, incluyendo los diferentes tipos de señalización utilizados;
- Conocer la normativa aplicable a tales instalaciones;
- Ampliar los conocimientos adquiridos en el grado de ingeniería eléctrica mediante el estudio de este sistema

1.4. Descripción de la memoria

En esta memoria se hace una introducción al sistema eléctrico ferroviario, dando énfasis al ferrocarril metropolitano.

En el capítulo 2 se describirá el sistema eléctrico típico de un metropolitano, empezando por describir el circuito eléctrico de tracción, el material móvil y las posibles tensiones de funcionamiento de un sistema de tracción de corriente continua. Veremos una descripción del material móvil, los tipos de subestaciones de tracción de corriente continua y posteriormente un listado y descripción de los



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

distintos tipos de señalización ferroviaria. Se listará la normativa aplicable en lo referente al diseño de una subestación y a las instalaciones auxiliares que la componen.

En el capítulo 3, para definir la subestación de tracción tipo, objeto de este trabajo, veremos conceptos físicos de fuerza y esfuerzo de un vehículo de tracción, así como gráficas y magnitudes típicas de un estudio de demanda de potencia.

Posteriormente en el capítulo 4 se describirá la subestación y sus componentes, tales como los transformadores de potencia, rectificadores, filtros, etc. Describiendo también la instalación de servicios auxiliares de baja tensión necesaria para un correcto funcionamiento de la subestación.

Se presentará como anexos los cálculos eléctricos de las instalaciones de media y baja tensión y se finalizará con un listado de planos de las instalaciones descriptas.

2. SISTEMA ELÉCTRICO DE UN METROPOLITANO

La electrificación ha sido llevada a cabo por diferentes métodos y sistemas, caracterizados principalmente por la forma de distribuir la energía al material rodante desde la subestación eléctrica.

El sistema monofásico de corriente continua es el más utilizado por las administraciones ferroviarias para la electrificación de metropolitano, por lo que se describirá en este trabajo los diferentes elementos que lo componen y sus particularidades.

2.1. El Circuito de Tracción

El circuito de tracción en corriente continua está constituido básicamente por una subestación de tracción, que actúa como una fuente de corriente, la catenaria que actúa como conductor positivo, el pantógrafo que une la catenaria con el material móvil, el material móvil propiamente dicho con todos sus elementos auxiliares que definen su correcto funcionamiento y la vía que actúa como conductor negativo contribuyendo para el retorno de la intensidad a la subestación de tracción.

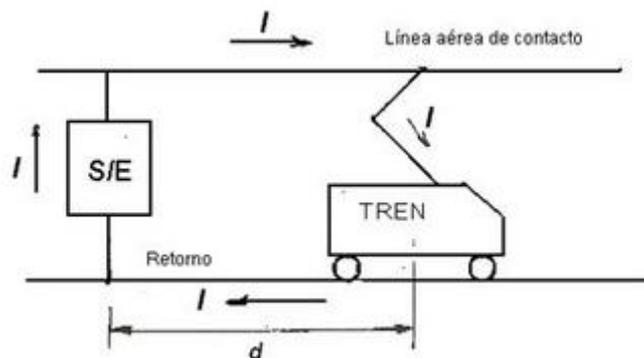


Figura 1. Circuito monofásico de tracción

El circuito monofásico de tracción puede considerarse dividido en dos partes fundamentales:

Circuito aéreo positivo:

Constituido por la línea aérea de contacto y todos aquellos cables que la alimentan o la ayudan a transportar la corriente, entre los cuales se destaca la catenaria.

La catenaria: Es la línea aérea de alimentación que transmite energía eléctrica a las locomotoras u otro material motor. Hay varios tipos de líneas aéreas de contacto para ferrocarriles y otros vehículos de tracción eléctrica, la comúnmente usada en metropolitanos es la catenaria aérea rígida.

La catenaria rígida se distingue de las otras en que el elemento que transmite la corriente eléctrica no es un cable, sino un carril rígido. Lógicamente para mantener este carril rígido paralelo a la vía, ya que su peso es muy grande, no basta tensarlo o suspenderlo de otro cable con más flecha, sino que es necesario aumentar el número de apoyos en los que hay que suspenderlo, para disminuir la distancia entre ellos.

La siguiente figura ilustra un ejemplo de catenaria rígida.



Figura 2. Catenaria Rígida Metro de Barcelona

Las principales características de los elementos que componen un sistema de catenaria rígida son:

Perfil conductor rígido: Está fabricado en aleaciones de aluminio y moldeado por extrusión.

Soportes aislantes y aisladores : Conjunto de fijaciones aislantes de fibra de vidrio, resina o similar que, aunque específicos para cada explotación, sección de túnel, etc.

Terminales y bridas de conexión: Elementos de fijación usados en la unión de cables de alimentación procedentes de las subestaciones a la catenaria rígida.



Circuito negativo o de retorno de corriente continua:

Será el circuito encargado de retornar la corriente consumida por el tren a la subestación eléctrica de tracción. En las electrificaciones ferroviarias este circuito es extremadamente complejo de estudiar, sobre todo por la gran cantidad de elementos que lo configuran. Según la corriente es absorbida por el pantógrafo y consumida por los motores eléctricos de tracción, el camino de retorno seguido hasta la subestación se forma a través de diferentes partes:

1. El propio circuito de retorno del tren, formado por cables que unen la salida de los motores a las llantas de rodadura.
2. Los carriles de la vía, conectado al circuito a través de las llantas de rodadura.
3. El terreno, que conduce la corriente que se deriva de los carriles por la capa de balasto. Es por ello que en los proyectos de electrificación ferroviaria es importante realizar estudios geoeléctricos que caractericen la resistividad que posee el terreno por el que discurre la línea férrea.
4. Un elemento de gran importancia es el cable de retorno, este conductor va tendido paralelo a la línea aérea de contacto, yendo sujeto del lateral de los postes. Por tanto, existe corriente que no retorna a la S/E por los carriles y el terreno, sino que ascendiendo por los postes de la catenaria discurre por el cable. Obsérvese por tanto que un poste de catenaria es parte activa del circuito de tracción.
5. Otros cables y elementos: pozos de toma de tierra de las subestaciones, conexiones transversales entre los carriles de diferentes vías, etc.

Cabe destacar que la conexión realizada entre las subestaciones eléctricas de tracción es diferente dependiendo del sistema de corriente que se esté considerando. Así que en un sistema de corriente continua las subestaciones eléctricas siempre se conectan en paralelo, de forma que un tren que se encuentre situado entre dos de ellas recibirá la corriente de alimentación de una y otra, siendo las corrientes recibidas inversamente proporcionales a las distancias que hay a cada una de las subestaciones.



2.2. El Material Móvil

Se denomina material rodante o móvil a todo aquel vehículo dotado de ruedas capaz de circular sobre una vía férrea. Llamamos comúnmente tren a un conjunto de vehículos (o un único vehículo) destinado al transporte ferroviario que circulan unidos entre sí por una infraestructura ferroviaria.

2.2.1. Ferrocarril metropolitano (METRO)

El ferrocarril metropolitano o metro se caracterizan principalmente por disponer de **tracción eléctrica**, la utilización de estructuras de caja muy ligeras en aluminio o mixtas acero-aluminio, una distribución interior muy espaciosa y con un mínimo de asientos para permitir una gran capacidad de transporte con viajeros de pie.

Como elementos constructivos básicos de un material móvil se destacan:

- La caja

Las cajas del material móvil ferroviario metropolitano, se diferencian de las de los ferrocarriles de medio y largo recorrido, por estar diseñadas de cara a tiempos de trayecto y de permanencia de viajeros en su interior relativamente cortos, con un gran número de usuarios de pie y un menor número sentados, así como a la existencia de elevadas aceleraciones y deceleraciones y grandes flujos de entrada y salida de viajeros de las mismas.

El número de puertas de los metros es significativamente superior que el de los vehículos ferroviarios de media y larga distancia. La distribución de los asientos se diseña pensando en que la mayor parte de viajeros, sobre todo en horas punta.

El diseño de vehículos metropolitanos suele hacerse con base en una ocupación en hora de demanda extrema de 3 a 7 viajeros por m².

- Los bogies

Un bogie es un dispositivo giratorio dotado de dos o más ejes, cada uno con dos ruedas, sobre los que se apoya un vehículo ferroviario. Los ejes son paralelos y solidarios entre sí, y en general están situados en ambos extremos de los vehículos, destinados a circular sobre los carriles. El vehículo se apoya en cada bogie por medio de un eje vertical mediante un pivote, gracias al que puede describir curvas muy cerradas.



Figura 3. Bogie

- Motores de tracción de corriente continua

El motor de corriente continua es una máquina que convierte energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción de un campo magnético.

Un motor de corriente continua se compone principalmente de dos partes:

El estátor da soporte mecánico al aparato y contiene los polos de la máquina, que pueden ser o bien devanado de hilo de cobre sobre un núcleo de hierro, o imanes permanentes;

El rotor es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, alimentado con corriente directa a través de delgas, que están en contacto alternante con escobillas fijas.



En España, los primeros motores utilizados en tracción eléctrica fueron los motores de corriente continua. Su aplicación se vio favorecida en la tracción eléctrica gracias a que el regulación de la velocidad de giro si consigue regulando la tensión de alimentación.

2.3. Tensiones de Funcionamiento

Tradicionalmente, el material móvil era alimentado en corriente continua a una tensión que podía variar entre 600 y 1.500Vdc. Debido a los incrementos de velocidad que paulatinamente ha tenido el material móvil en las líneas ferroviarias, ha sido necesario aumentar estas tensiones con el fin de que las pérdidas, que son proporcionales al cuadrado de la intensidad, no sigan incrementándose y a la vez poder hacer la catenaria más ligera.

En España se utiliza la corriente continua como forma de alimentación en suburbanos, tranvías y líneas ferroviarias convencionales y la corriente alterna en las nuevas líneas de alta velocidad.

En la tabla se observa el nivel de tensión con el que se alimenta el material móvil en España según el área de aplicación.

Tensión nominal de alimentación	Áreas de aplicación
600-750 Vc.c.	Metro y tranvías
1.200-1500 Vc.c.	Suburbanos y Metros
3000 Vc.c.	Líneas convencionales
25.000 Va.c. 50Hz	Líneas de Alta Velocidad ⁽¹⁾

⁽¹⁾ En alta velocidad en España se usan dos sistemas de electrificación, 1x25kV y 2x25kV a una frecuencia de 50Hz.

El presente Trabajo Fin de Grado hará hincapié en un sistema de corriente continua con una tensión nominal de alimentación de 1.500Vdc.

2.4. Subestaciones de Tracción



La subestación de tracción es la instalación en la que se realiza la conexión de los tramos que serán electrificados con la red trifásica de transporte.

Para ello, se realiza la transformación de tensiones desde los niveles de la red trifásica a los niveles de la catenaria, con previa rectificación en el caso que nos ocupa.

La conexión de la subestación de tracción a la red trifásica correspondiente se realiza mediante una línea aérea.

Las subestaciones conforman el medio de abastecimiento de energía de eléctrica de la catenaria. Para ello, se suele partir de dos líneas eléctricas que suministran energía a la subestación y que mediante la transformación y posterior rectificación de esta energía, la hacen apta para ser utilizada de forma directa a través de la catenaria por el material móvil.

Existen dos tipos de subestaciones eléctricas de tracción: subestaciones eléctricas para sistemas de corriente alterna y subestaciones para sistema de corriente continua.

2.4.1. Subestación de Tracción de Corriente Continua

La corriente continua es conveniente para tracción ferroviaria por una serie de ventajas que reúne el motor serie: fuerte par de arranque, multiplicidad de marchas económicas, fácil regulación, etc.

Por otra parte, la corriente alterna también presenta ventajas: facilidad de producción, facilidad de modificación de sus tensiones con buen rendimiento y posibilidad de transportarla a grandes distancias con pérdidas prácticamente despreciables.

Para aprovechar las ventajas de ambos tipos de energía se instalan, convenientemente, subestaciones rectificadoras repartidas a lo largo de la línea ferroviaria. Estas subestaciones convierten en corriente continua la energía obtenida de la red eléctrica y la dirigen a las líneas de contacto del metro siendo captada por el material rodante mediante sus pantógrafos.

En una subestación de tracción de corriente continua se destacan dos instalaciones claramente diferenciadas:

2.4.1.1. Instalación Trifásica de Corriente Alterna:

2.4.1.1.1. Aparamenta de potencia: interruptores, seccionadores, transformadores de medida y protección, pararrayos, etc.

La aparamenta de protección y maniobra en el caso de subestaciones de tracción de un metropolitano, donde comúnmente la tensión de funcionamiento en alterna suele ser de 11, 25 o 30 kV está en el interior de celdas blindadas con SF6. Cada celda está compuesta exteriormente por un conjunto de paneles, chapas y bastidor metálico, todos ellos puestos a tierra.

Las celdas de corriente alterna utilizadas en una subestación de tracción con una tensión nominal entre 11 y 30kV, son análogas a las utilizadas en los centros de transformación. También se usan, celdas de línea (que llegan incorporadas un interruptor automático en su interior, celdas de media (celdas con transformadores de tensión y corriente encargados de reducir esas magnitudes para que puedan ser visualizados de equipos de baja tensión), celdas de remonte y celdas de protección.



Figura 4. Celdas de Corriente alterna

Las subestaciones suelen ser diseñadas con piso elevado para el cableado de las celdas transcurra por la parte inferior.

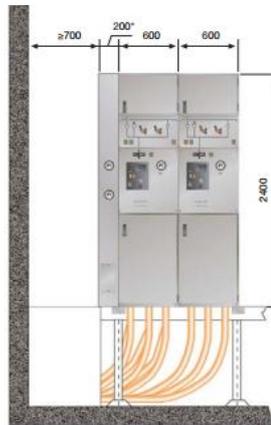


Figura 5. Paso de cable entre celdas

2.4.1.1.2. Transformadores de potencia para tracción

Un transformador es la máquina encargada de reducir o elevar los niveles de tensión o intensidad de un circuito eléctrico manteniendo la potencia. Eso se consigue mediante el bobinado del conductor eléctrico alrededor de núcleo del transformador de manera que, al inyectar intensidad en su primario la misma genera un flujo del campo magnético en su núcleo que, a su vez, genera una tensión inducida en su secundario (Ley de Faraday).

Los transformadores pueden clasificarse en función de cómo va el aislamiento en el conjunto núcleo-bobinado; pudiendo estar sumergido en aceite o a la intemperie (trafo seco).

En el transformador de aceite el circuito magnético y los arrollamientos están sumergidos en un líquido aislante como el aceite. Este puede ser de tipo mineral, de silicona, éster o vegetal.



Figura 6. Transformador de aceite

En los transformadores secos los arrollamientos están a la intemperie y la refrigeración del bobinado se hace por ventilación natural sin el uso de ningún líquido refrigerante como en el caso anterior.



Figura 7. Transformador seco

El grupo transformador-rectificador se compone de una celda de protección para el transformador en MT, de un transformador de tracción y de una celda de protección para rectificador. La celda del rectificador contiene tanto el rectificador de potencia, con el que se consigue la tensión continua de alimentación de la catenaria, como todos sus elementos de protección y control. En las siguientes imágenes se puede observar un ejemplo de instalación con las celdas mencionadas, la primera con las celdas de protección de los transformadores y la segunda con las del rectificador.



Figura 8. Ejemplo de celdas de protección de transformadores



Figura 9. Ejemplo de celdas de protección de rectificadores

Normalmente los transformadores de potencia utilizados en alterna son capaces de soportar las siguientes sobrecargas acumuladas cada 8 horas:

- El 20% durante 2 horas.
- El 50 % durante 15 minutos.
- El 100% durante 10 minutos.



Como la tensión de la red pública puede variar en el tiempo en amplios márgenes, se puede dotar al primario de los transformadores de sistemas de regulación que permiten variar la tensión un 8%.

Normalmente las subestaciones, aparte del transformador dimensionado para cubrir la demanda, suelen disponer de un segundo transformador para incrementar la fiabilidad del sistema.

2.4.1.1.3. Sistemas de servicios auxiliares en baja tensión alterna.

La instalación de baja tensión en corriente alterna de la subestación comprende una parte importante de su funcionamiento. Esta es alimentada por un transformador de baja potencia nominal, denominado **transformador de servicios auxiliares**, que dará suministro a todas las instalaciones existentes de la subestación.

Este transformador se alimentará naturalmente de la red de media tensión que llega a la subestación, debiendo así estar protegido por una celda de protección, como muestra la figura 6.

El adecuado cálculo de las líneas eléctricas de baja tensión puede evitar un sobrecalentamiento de los conductores eléctricos por efecto Joule evitando incendios derivados de la instalación eléctrica.

También es necesario que la instalación cumpla con las máximas caídas tensión estipuladas por el REBT.

La instalación de baja tensión de una subestación de tracción debe prever los suministros a continuación:

- Suministro eléctrico para Instalación de alumbrado interior, exterior y de emergencia;
- Suministro eléctrico para Instalación de tomas de fuerza para operaciones de mantenimiento de la subestación,
- Suministro eléctrico para instalación de protección contra incendios incluyendo los detectores y de extinción automática si es el caso,
- Suministro eléctrico para los ventiladores en caso de ventilación mecánica,
- Suministro eléctrico para instalación de climatización en el caso de que exista un rack de telecomunicaciones en alguna sala de control.

2.4.1.2. Instalación de Tracción de Corriente Continua:

Es la subestación de tracción propiamente dicha ya que es la encargada de suministrar la energía eléctrica al material rodante por medio de la línea aérea de contacto.

Los elementos necesarios son:

2.4.1.2.1. Rectificadores de potencia

Su misión fundamental es proporcionar energía eléctrica en forma de corriente continua a partir de una fuente de corriente alterna (normalmente desde la red).

La corriente continua se obtiene aprovechando determinados trozos o fases del ciclo de la corriente alterna de cada una de las fases de entrada:



Figura 10. Señal de entrada vs señal rectificada

Atendiendo al tipo de rectificación pueden ser de media onda; cuando sólo se utiliza uno de los semiciclos de la corriente, o de onda completa; donde ambos semiciclos son aprovechados.

En los rectificadores de media onda (simples) entre cada fase de entrada (alterna) y la salida (continua) existe sólo un único polo de potencia.

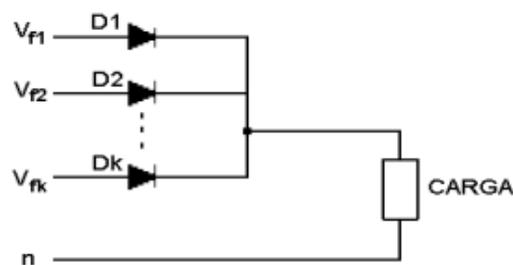


Figura 11. Rectificador trifásico simples

En los rectificadores de onda completa la carga es alimentada por una matriz de conversión en cada extremo.

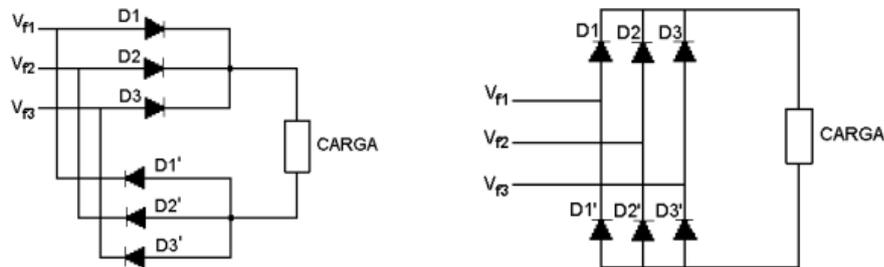


Figura 12. Rectificador trifásico en puente

A continuación se presentan las señales de salida de las dos tipologías mencionadas anteriormente para una señal de entrada tipo.

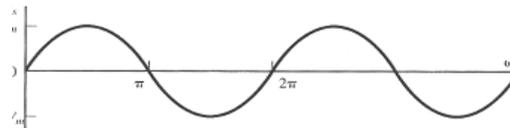


Figura 13. Señal de entrada al rectificador de una de las fases

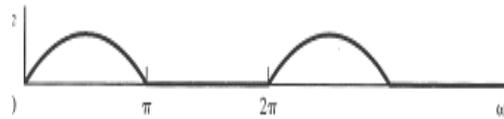


Figura 14. Salida de un rectificador de media onda

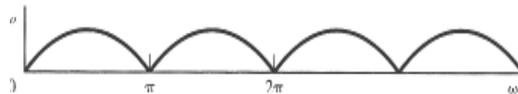


Figura 15. Salida de salida de un rectificador de onda completa

El rectificador de potencia trifásico está compuesto, en general, por diodos de potencia que forman un puente no controlado.

La tipología del rectificador varía en función de su número de pulsos que coincide con el número de diodos de potencia usados en el puente rectificador.

A continuación, se presentan algunas de las tipologías más usuales.

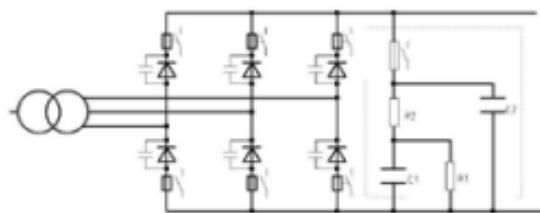


Figura 16. Rectificador de 6 Pulsos

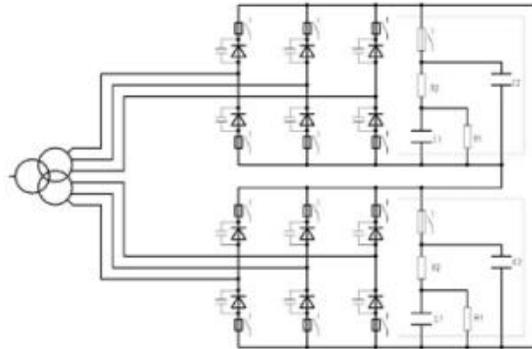


Figura 17. Rectificador de 12 pulsos serie

En subestaciones de tracción se suelen usar rectificadores de 12 pulsos. Este tipo de rectificador se forma a partir de dos rectificadores trifásicos de onda completa no controlados, conectados en serie, y cada uno de ellos acoplado a uno de los secundarios con las configuraciones en estrella y triángulo tal como muestra la figura a continuación.

De esta forma, las tensiones de salida de la configuración en triángulo estarán desfasadas -30° respecto de la configuración en estrella y se obtendrán doce pulsos de rectificación en lugar a seis.

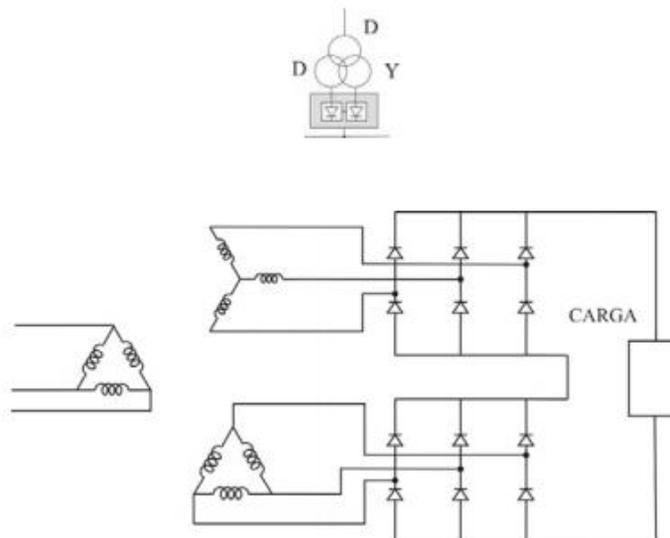


Figura 18. Conexión transformador-rectificador



Figura 19. Rectificador de 12 pulsos extraíble

2.4.1.2.2. Salida del Feeder

Feeder, también denominado de disyuntor extrarrápido, es un interruptor automático de corte en aire especialmente diseñado para corriente continua que es capaz de detectar un cortocircuito y realizar la apertura en ms.

La funcionalidad de la salida del Feeder es realizar la alimentación de la catenaria mediante la protección necesaria para garantizar la seguridad del servicio. Esto se realiza mediante una celda de salida de Feeder equipada con todos los elementos de medida y protección necesarios. Se puede ver esta celda en la figura 7, donde hay dos celdas de Feeder en medio de las dos celdas de rectificador.

La celda de Feeder está equipada con un disyuntor extrarrápido, un relé de protección y de un equipo de ensayo de línea. El disyuntor va montado sobre un carro extraíble (2) que se puede desconectar de la celda (1) para labores de aislamiento de la catenaria y de mantenimiento.

El relé de protección, junto con el disyuntor, completa la protección que se dispone sobre la alimentación a la catenaria, protegiéndola así ante cortocircuitos lejanos.

2.4.1.2.3. Sistemas de control integrado, protección y medida.

El control local y la monitorización de las subestaciones de tracción es una gran ayuda para el funcionamiento de la red de alimentación eléctrica y su mantenimiento.

Con el fin de satisfacer las más exigentes demandas relativas al tiempo de reacción y la rentabilidad, un sistema de control y supervisión usa modernos protocolos de comunicaciones para la obtención de los datos y visualización de la información.

Además toda la información, documentos, eventos, curvas de detección, historial de las subestaciones y diagnósticos suelen estar disponibles para su transmisión mediante un sistema SCADA centralizado de la red.

Este sistema SCADA puede estar en una celda con el conjunto de celdas de la subestación o en un ordenador separado; comúnmente ubicado en una sala de control situada en el interior de la subestación.

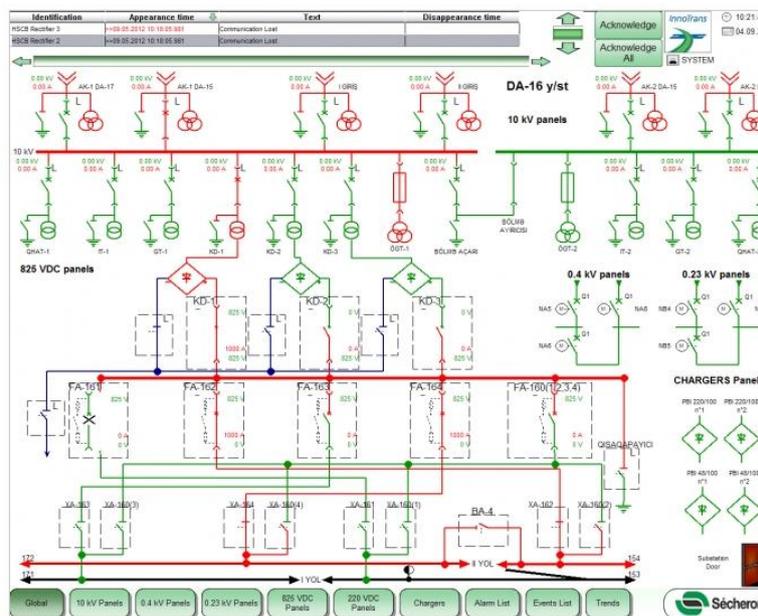


Figura 20. Ejemplo de esquema de supervisión de una subestación



Figura 21. Ejemplo de sistema SCADA junto a celdas

2.4.1.2.4. Bobinas de alisamiento y filtros

La bobina de alisamiento es la encargada de limitar las elevadas fluctuaciones de corriente que se producen con mucha frecuencia como consecuencia de las constantes variaciones de servicio de los vehículos de tracción conectados a la red metropolitana.

Después de la bobina, y entre el + y - del rectificador se instala un equipo de filtro de armónicos. Los filtros de armónicos evitan que las perturbaciones producidas por los armónicos generados en la rectificación afecten de forma perjudicial al suministro eléctrico de la catenaria y por tanto a los vehículos de tracción conectados a la misma. Está constituido por circuitos LC sintonizados para cortocircuitar las frecuencias perturbadoras.

El correcto diseño de ambos consigue un suministro eléctrico en continua de calidad, pues limitará la distorsión armónica en la red así como posibles variaciones bruscas del rizado de la corriente en la catenaria.



Figura 22. Bobina de alisamiento y filtros



Figura 23. Bobina de alisamiento



Figura 24. Filtros de armónicos

2.4.1.2.5. Sistemas de telemando y teleseñal.

Un telemando de energía en un sistema ferroviario está formado por todos los elementos hardware, software y de comunicaciones necesarios para realizar de forma remota (puesto central en la mayoría de los casos) las siguientes funciones:

- El control y la supervisión de las subestaciones eléctricas y centros de transformación con todos sus elementos asociados: interruptores, seccionadores, grupos rectificadores (en el caso de líneas alimentadas en continua) y servicios auxiliares.
- El control y la supervisión de la línea aérea de contacto y de sus seccionadores (zonas neutras).
- El control y la supervisión de las líneas de señales que alimentan a los sistemas de señalización.
- El control y la supervisión de todos los sistemas de comunicaciones, ordenadores, etc., necesarios para poder realizar las funciones descritas en los puntos anteriores.
- El mantenimiento de una base de datos con todos los eventos y alarmas acaecidas en el telemando, garantizando su integridad y consistencia.

- La exportación de los datos anteriores hacia otros departamentos de la entidad que administra el sistema ferroviario, como planificación, mantenimiento, control de tráfico, etc., sin comprometer las funciones propias del telemando de energía.

Para realizar las funciones anteriores el telemando está constituido por tres tipos de elementos: las remotas (RTU, siglas en inglés), el puesto central y el sistema de comunicaciones que los une. La siguiente figura muestra la arquitectura física clásica de un telemando.

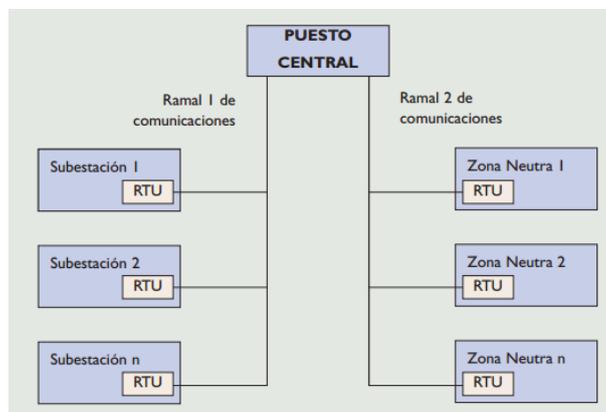


Figura 25. Arquitectura clásica de un sistema de telemando de energía

En cada instalación eléctrica existe una remota que recoge los eventos que ocurren en la instalación y los envía al puesto central. También es la encargada de recibir las órdenes que envía el puesto central y enviarlas a los elementos de control del aparato correspondiente (seccionador, disyuntor, etc.). En una arquitectura clásica, las remotas se conectan al puesto central a través de ramales de comunicaciones.

2.4.1.2.6. Sistema de protección en corriente continua

Los sistemas de protección a implementar en las cabinas de corriente continua serán los descritos a continuación.

2.4.1.2.6.1. Sistema de ensayo de línea (EDL)

Estos dispositivos sirven para verificar el aislamiento y la resistencia de aislamiento de la catenaria, y permitir un reenganche automático rápido (5s).



La resistencia de la catenaria se mide haciendo pasar por ella una corriente de ensayo de 1 A aproximadamente, controlando al mismo tiempo el valor de la tensión residual que cae en la catenaria. Si la resistencia así medida es superior al valor ajustado en el aparato, este permitirá el orden de conexión, por el contrario, si la resistencia medida es inferior al valor ajustado, el aparato no dará el orden de conexión efectuando una serie de ensayos, normalmente cuatro, cada 8 s, al final de los cuales si la resistencia en catenaria no ha aumentado y por tanto no se ha producido la conexión del disyuntor, se producirá el bloqueo del aparato, dando una señal de salida de este bloqueo.

En el caso de que exista algún defecto en el circuito de conexión del disyuntor y la catenaria en orden, este dispositivo será capaz de diferenciarlos dando el orden de bloqueo después del primer ensayo efectuado.

La medida de aislamiento de la catenaria será ejecutada con la tensión real de alimentación 1500 Vcc. Todas las fluctuaciones de tensión en catenaria serán detectadas y compensadas automáticamente para no producir error en la medida de tensión en catenaria, impidiendo por otra parte el orden reconexión con tensiones demasiado bajas.

2.4.1.2.6.2. Sistema comparador de línea (DDT)

En el caso que en el momento de conexionar un feeder ya exista tensión en la línea debido a otra subestación colateral, será necesario que antes de cerrar automáticamente el extra rápido, se analice la tensión en catenaria comparándola con la tensión de salida de los rectificadores de la subestación, y bloqueando la conexión en caso que la diferencia supere un valor límite de seguridad.

2.5. SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN DE UN METROPOLITANO

A la señalización y control del movimiento de trenes en plena vía entre estaciones se le denomina bloqueo. Se llama así porque cuando un tren está circulando por un tramo de vía se le bloquea este tramo para impedir que otros trenes accedan al él; y cuando lo abandona se le desbloquea liberándolo.

El bloqueo se rige por dos principios básicos:



1. Los trenes que circulan por una misma vía y en el mismo sentido deben hacerlo a una distancia que ofrezca la seguridad de que no se van a alcanzar.
2. Estando circulando un tren por una vía no puede expedirse otro en sentido contrario.

Una forma de clasificar los bloqueos es la presentada a continuación.

Bloqueos Antiguos

- Régimen de Lanzadera
- Bloqueo por bastón piloto
- Bloqueo telegráfico
- Bloqueo telefónico normal
- Bloqueo eléctrico manual BEM
 - Toma de vía
 - Petición – concesión de vía

Bloqueos Actuales

- Bloqueo telefónico supletorio BTS
- bloqueo automático
 - De vía única BAU
 - De vía doble BAD
 - De vía doble banalizada BAB

Bloqueos modernos

- Bloqueo automático supletorio BAS o bloqueo de señalización lateral BLS
- Bloqueo de control automático BCA
 - LZB (LAV's Madrid – Sevilla y La Sagra – Toledo)
 - ATP (Metro de Madrid)

2.5.1. Régimen de Lanzadera

El más sencillo es que sólo haya un tren en la vía, y que, una vez que haya salido, no pueda circular otro hasta que ese tren no haya vuelto.

2.5.2. Bloqueo por Bastón Piloto



La evolución del régimen de lanzadera es el bloqueo por bastón piloto. En lugar de tener un tren que va y viene entre dos estaciones, lo que tenemos es un testigo que va y viene, de tal forma que pueden circular varios trenes en una línea y recorrerla entera. En este tipo de bloqueo existe un testigo por cada uno de los trayectos entre estaciones. Es decir, tendríamos un testigo "A-B", un testigo "B-C", otro "C-D", y así con todos los trayectos que tengamos. A este testigo lo llamamos bastón piloto porque, en un inicio, se trataba de un bastón de madera con el nombre del trayecto grabado.

2.5.3. Bloqueo Telegráfico

El mundo sigue evolucionando y se considera que las "nuevas" tecnologías pueden aportar algo de seguridad a este sistema un tanto precario. Digo nuevas porque, como se sabe, el telégrafo es un invento del Siglo XIX. A alguien se le ocurrió que se podría usar ese modernísimo invento que era el telégrafo para poner en comunicación las estaciones y que, de esta forma, los Jefes de Estación pudieran ponerse de acuerdo para hacer circular los trenes. Inmediatamente se tienden a lo largo de las vías los cables necesarios, y se instalan en las estaciones los telégrafos. Hay que decir que éstos no son como los que se usaban para los telegramas, sino que eran aparatos específicamente diseñados para la explotación ferroviaria. Así, nace el Bloqueo Telegráfico. Los Jefes de Estación se intercambian mensajes para ponerse de acuerdo en la expedición de trenes desde una u otra estación, bloqueando la vía hasta que no se recibe el aviso de que el tren que circulaba ha llegado a la estación.

Ejemplo:

De "A" tienen que salir tres trenes 1, 3 y 5 hacia "B" a las 10:00, 10:20 y 10:35. Y de "B" tiene que salir el tren 2 hacia "A" a las 10:10.

El Jefe de "A" le manda a "B" el mensaje de la expedición del tren 1 y el Jefe de "B" lo autoriza. Así, el tren 1 sale de "A" a las 10:00. A las 10:10 el tren 1 llega a "B".

El Jefe de "B" transmite el mensaje de que el tren 1 ha llegado y solicita permiso para expedir el tren 2. El Jefe de "A" se lo autoriza y el tren 2 sale de "B" a las 10:11. A las 10:20 el tren 3 tendría que salir de "A", pero el tren 2 aún no ha llegado. La vía está bloqueada. Finalmente el tren 2 llega a "A" a las 10:21. "A" le dice a "B" que el tren 2 ha llegado y solicita permiso para expedir el tren 3 y "B" se lo autoriza.

El tren 3 sale a las 10:22. A las 10:32, el tren 3 llega a "B". "B" notifica la llegada de "A" y se desbloquea la vía.

A la hora del tren 5 "A" la vuelve a bloquear por el mismo sistema y expide el tren 5 que llega sin novedad a "B" a las 10:45 y "B" desbloquea la vía.

2.5.4. Bloqueo Telefónico Normal BEM

El bloqueo telefónico o BT es un tipo de bloqueo ferroviario; el más sencillo tecnológicamente. Su tendencia es la sustitución por otros más modernos.

Su objetivo, como en todos los bloqueos, es evitar que un tren alcance o colisione con otro. Se basa en mantener un solo tren en el tramo de vía entre dos estaciones. Para ello el agente encargado de la circulación de la estación de la que va a salir el tren deberá pedir permiso a la estación de destino. El jefe de circulación de la siguiente estación, tras comprobar que el cantón está libre de trenes, concederá el permiso para utilizar el tramo. Esto se realiza con unos textos normalizados o telefonemas y, normalmente, como medio de comunicación entre las estaciones se utiliza el teléfono.

Hasta que el tren no llega hasta la estación de destino, completo y sin anomalía, ninguno de los jefes de circulación de las estaciones colaterales puede dar autorización a otro tren a utilizar la vía. A continuación se puede ser un esquema funcional de bloqueo telefónico.

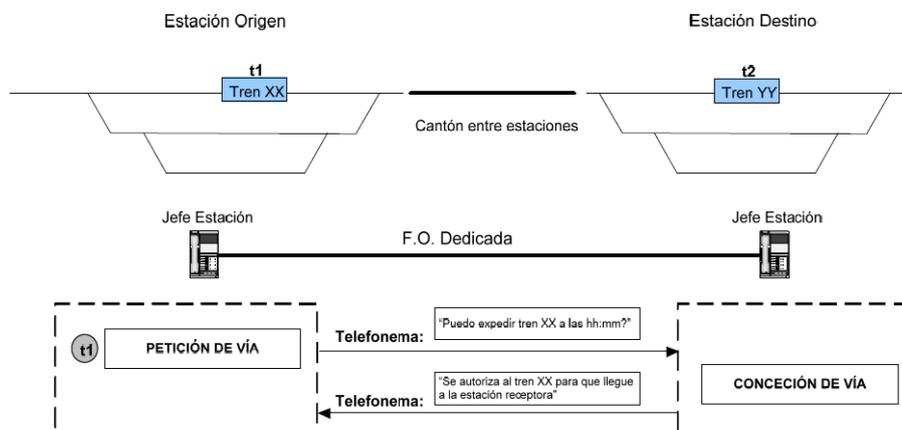


Figura 26. Esquema de Funcionamiento del Bloqueo telefónico

Este tipo de bloqueo se sigue usando de forma habitual en líneas con poco tráfico, como por ejemplo Aranjuez-Cuenca-Valencia, Huesca-Canfranc, Lérida-La Pobra de Segur y Madrid-Cáceres-Valencia de Alcántara.

2.5.5. Bloqueo Eléctrico Manual

En este tipo de bloqueo se eliminan los telefonemas y se sustituyen por señales eléctricas. Es similar al bloqueo telefónico con la diferencia de que el acuerdo (petición/concesión de vía) sobre el uso de una vía se realiza a través de un panel electrónico conectado al panel de la estación colateral en el que actúan los Jefes de Circulación.



Figura 27. Ejemplo de Panel de Bloqueo Eléctrico Manual

Hay dos tipos: "toma de vía" y "petición-concesión de vía".

Ejemplo de BEM de "toma de vía": el jefe de "A" tiene que expedir un tren hacia "B". En lugar de llamar por teléfono a "B" para transmitirle el telefonema, acciona un interruptor que tiene en su estación. En "B", el jefe de estación recibe esa notificación mediante un aparato que, a través de un piloto, le indica que la vía está bloqueada y le impide abrir las señales hacia "A".

Ejemplo de BEM de "petición-concesión de vía": El jefe de "A" acciona el mismo interruptor que antes. Al jefe de "B" se le enciende la misma luz de antes. Pero ahora el jefe de "B" tiene que confirmar que ha recibido la solicitud que le indica que la vía está bloqueada para que circule el tren que tiene que expedir y el sistema le permite abrir las señales hacia "B".

2.5.6. Bloqueo Telefónico Supletorio BTS



El sistema tradicional de bloqueo en la actualidad es el bloqueo automático. No obstante, con objetivo de poder seguir operando el sistema ferroviario cuando el bloqueo automático se queda inútil por avería o por trabajos de mantenimiento o mejora, se mantiene como respaldo un bloqueo telefónico que se denomina BTS.

Su seguridad se basa en los telefonemas de establecimiento, petición y concesión de vía para expedir los trenes. De esto se encargan los Jefes de Circulación.

2.5.7. Bloqueo automático

El bloqueo automático puede entenderse como un bloqueo eléctrico manual con una liberación automática basada en la localización del tren mediante circuitos de vía.

2.5.7.1. De vía única BAU:

El bloqueo Automático en Vía Única protege el movimiento de los trenes en ambos sentidos de la vía, no precisando para su establecimiento de acciones externas al sistema para realizar la función de bloqueo. Cada uno de los Enclavamientos situados en las estaciones que limitan el trayecto analizan y determinan las condiciones de entrada y salida de los trenes.

La seguridad en el BAU se apoya en el sistema de detección a través de los cuenta ejes, y una lógica Booleana, que realizan las funciones de seguridad en la Lógica Vital del Enclavamiento para la concesión de vía.

El sistema de Comunicaciones entre Enclavamientos colaterales se realiza a través de un protocolo de comunicaciones seguro que permite la transmisión y recepción de informaciones seguras entre ambos utilizando un solo canal de comunicaciones de forma segura.

El BAU se establece por medio de la petición de itinerario desde el PCC(CTC) o desde el PML. Al efectuar la petición de ruta o itinerario el Enclavamiento se encarga automáticamente de comunicarse con el Enclavamiento colateral para efectuar la petición de itinerario y consecuentemente de Bloqueo.

Entre dos estaciones que tengan Enclavamiento se pueden encontrar otras estaciones que su señalización dependa de alguno de los dos Enclavamientos mencionados anteriormente. Siempre habrá una frontera que estará limitada por

un CdV o una señal que pertenece a un Enclavamiento y que a partir de la cual entra el control del otro Enclavamiento.

En Vía Única solo se podrá establecer el cruce entre trenes en aquellas estaciones que tengan Enclavamiento y vía secundaria para que puedan estacionarse los dos trenes que efectúan el mencionado cruce. Las otras estaciones de trayecto que estén dentro del itinerario y del bloqueo solo serán de paso. El cruce de trenes siempre se efectuará en la misma estación.

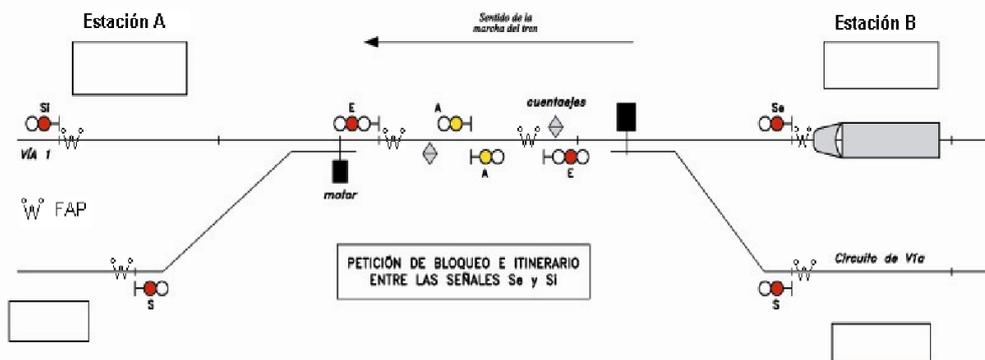


Figura 28. Petición de Itinerario en BAU, entre dos estaciones colaterales

La solicitud del itinerario de salida de vía 1 de la Estación B, hacia la Estación A, provoca la excitación de la “Solicitud de bloqueo de salida” de la Estación B (Enclavamiento B), el cuál solicita itinerario y bloqueo al Enclavamiento de la Estación A, el cual comprueba la situación de sus CdV, señales y motores y le responde afirmativamente, si procede.

Una vez comprobado por los Enclavamientos de la Estación B y Estación A que se dan las condiciones (CdV libres, motores en su posición, señales) para adjudicar el itinerario y el bloqueo en la dirección solicitada, se abre en verde la señal de salida de la estación peticionaria (señal de salida S0 de la Estación B).

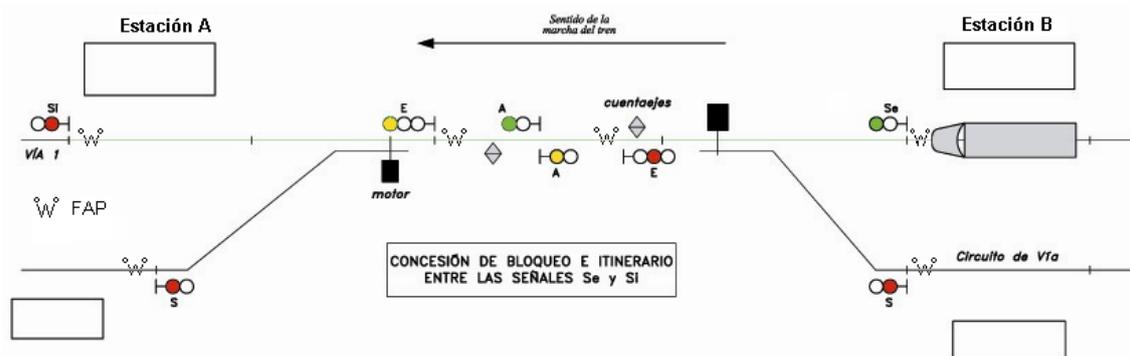


Figura 29. Concesión de bloqueo e Itinerario entre dos estaciones colaterales



2.5.7.2. De vía doble (BAD):

Esta doble vía no está Banalizada; protege el movimiento de los trenes en el sentido de la marcha en cada vía, no precisando para su establecimiento de acciones externas al Sistema salvo en el Puesto de Mando Local (PML) o en el PCC (CTC).

El BAD se establece por medio de la petición de itinerario desde el PCC(CTC) o desde el PML. Al efectuar la petición de ruta o itinerario el Enclavamiento se encarga automáticamente de comunicarse con el Enclavamiento colateral para efectuar la petición de itinerario y consecuentemente de Bloqueo.

La seguridad en el BAD, se apoya en el sistema de detección de trenes a través de los CdV, cuenta ejes o cualquier sistema que detecte la presencia del tren y que están dentro del itinerario y bloqueo solicitado.

La información del estado de los CdV, cuenta ejes, motores de aguja y señales, la recibe el Enclavamiento y por medio de una Lógica Vital (CPU) y en función del cuadro de servicios instalado en la memoria (EPROM), se puede conceder la autorización. Esta misma comparación, verificación y análisis, lo realiza el Enclavamiento colateral, para poder comunicarse entre ellos y autorizar el itinerario y el bloqueo.

El BAD se asegura por medio de señales automáticas que protegen los cantones en el sentido normal de la circulación de las dos vías.

Cuando un tren se encuentra en un cantón del BAD está protegido por delante por el sentido del bloqueo de la circulación y por detrás por la primera señal que ordena parada y la anterior, aviso de parada.

El sistema de Comunicaciones entre Enclavamientos colaterales se realiza a través de un protocolo de comunicaciones seguro, que permite la transmisión y recepción de informaciones seguras entre ambos, utilizando un solo canal de comunicaciones, de forma segura.

Entre dos estaciones que tengan Enclavamiento se pueden encontrar otras estaciones que su señalización dependa de alguno de los dos Enclavamientos mencionados anteriormente. Siempre habrá una frontera que estará limitada por

un CdV o por una señal que pertenece a un Enclavamiento, y que a partir de la cual entra el control del otro Enclavamiento.

Las señales que intervienen en el BAD, están normalmente en indicación de parada (aspecto de la señal en rojo). La señal cambiará de indicación cuando desde el PML o desde el PCC (CTC) se envíe la orden para que se genere el itinerario y bloqueo correspondiente de entrada o salida de la estación que intervenga.

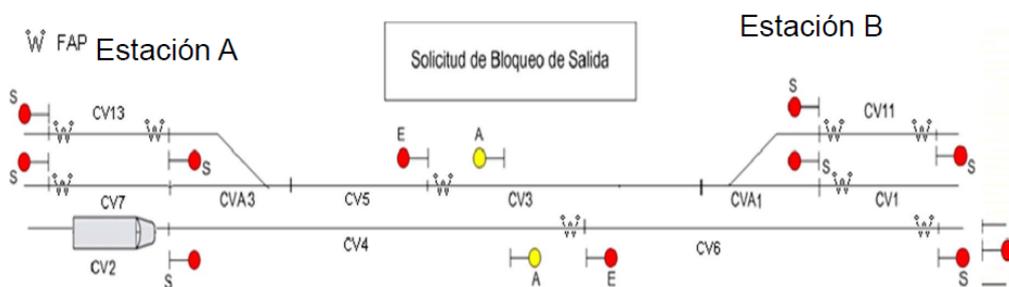


Figura 30. Petición de Itinerario en BAD, entre dos estaciones colaterales

La solicitud del itinerario de salida de vía 2 de la Estación A, hacia la Estación B, provoca la excitación de la “Solicitud de bloqueo de salida” de la Estación A (Enclavamiento A), el cuál solicita itinerario y bloqueo al enclavamiento de la Estación B, el cual comprueba y verifica la situación de sus CdV, señales y motores y le responde afirmativamente que de acuerdo.

Una vez comprobado por los enclavamientos de la Estación A y Estación B que se dan las condiciones (CdV libres, motores en su posición, señales) para adjudicar el itinerario y el bloqueo en la dirección solicitada, se abre en verde la señal de salida de la estación peticionaria (señal de salida S de la Estación A).

Además se abren las señales de avanzada y de entrada a la Estación B, autorizándose al tren a circular desde la señal de salida de la Estación A, hasta la señal de salida de la Estación B, por vía-2.

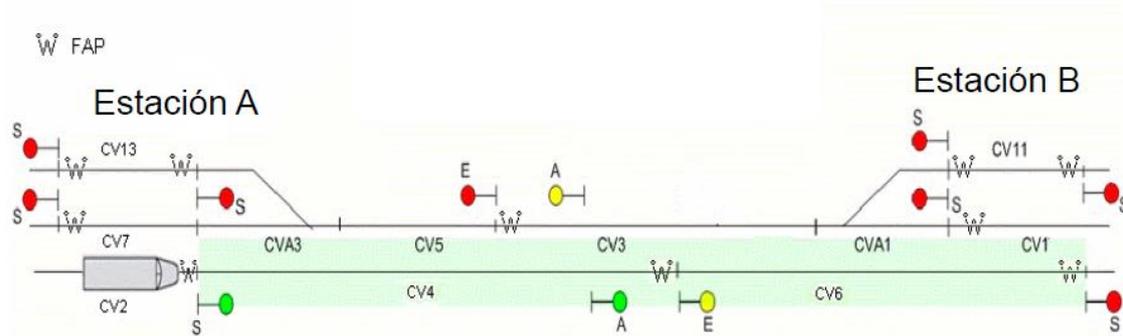


Figura 31. Concesión de Bloqueo de Salida y apertura de las Señales

El itinerario y el bloqueo se disuelven o desenchavan a paso de tren por los CdV y cuenta ejes, siguiendo una secuencia lógica de ocupación y desocupación de los mismos.

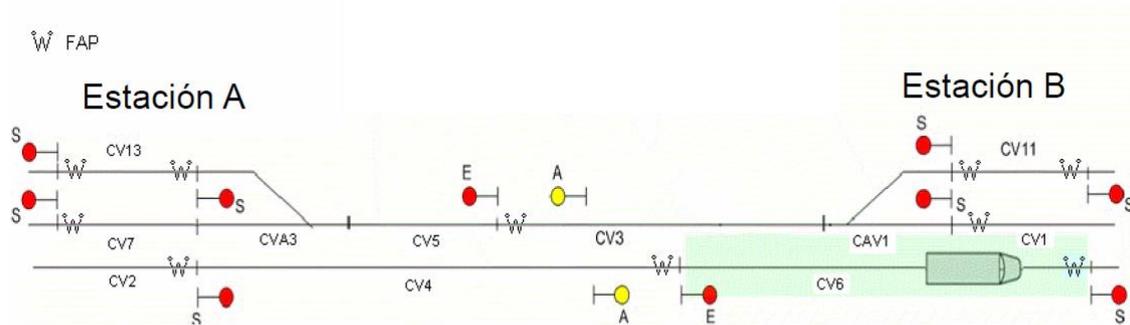


Figura 32. Desenchavamiento de Itinerario por Paso de Tren

Anulación Automática del BAD y del itinerario:

La anulación Automática del Itinerario y del Bloqueo, se efectúa por medio de la ocupación y desocupación, al paso del tren, por los CdV o cuenta ejes que forman parte del itinerario y bloqueo solicitado. Se tiene que seguir una secuencia lógica de ocupación y desocupación de los CdV o cuenta ejes o sea no se puede saltar ningún CdV o cuenta ejes.

Anulación artificial del BAD y del itinerario:

La anulación artificial del BAD y del itinerario, lo puede solicitar únicamente la estación que ha solicitado los mismos, a través del PML o del PCC (CTC). No debe existir ninguna ruta o itinerario de salida o de entrada, por ese lado de la estación, para poder anular el itinerario y el bloqueo.

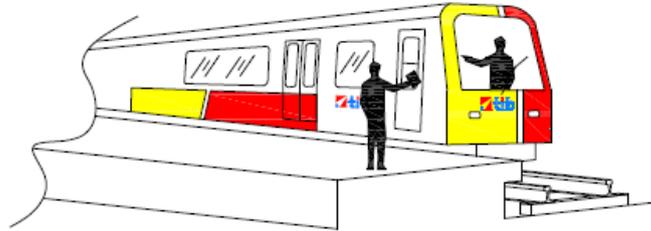


Figura 33. Mando Local Entrega BOI

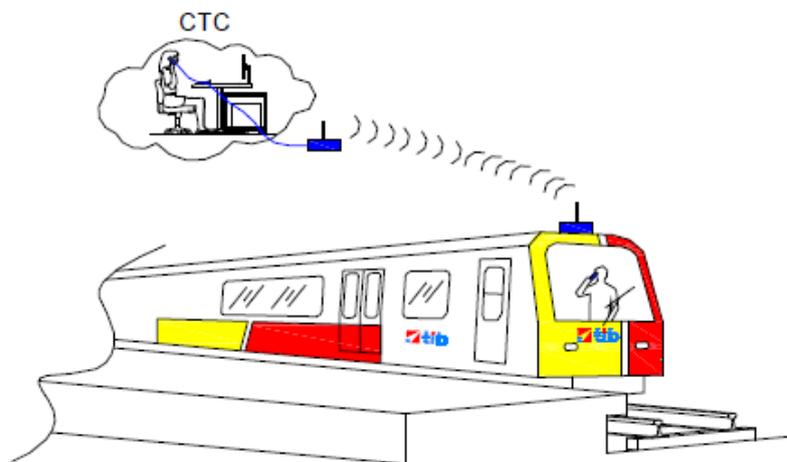


Figura 34. Comunicación PCC (CTC) con Maquinista

2.5.7.3. De vía Banalizada (BAB)

El Bloqueo Automático en Vía Banalizada (BAB), se aplica en la Señalización de Vía Única, y en el caso de Vía Doble, se considera cada vía como Vía Única. La principal característica de la vía banalizada en vía doble, es que se puede circular por cada vía en los dos sentidos (vía-1 y vía- 2), y circular por una vía (vía-1) en sentido normal de la marcha y efectuar un paso a la otra vía (vía-2), a través de un escape, y circular por esta (vía-2) en sentido contrario al de la marcha normal del tren con señales, CdV, motores de aguja, itinerarios y bloqueos.

En el caso de vía única es obvio que por fuerza tiene que estar la vía banalizada para poder circular los trenes en los dos sentidos en el mismo trayecto.

La petición de itinerario y bloqueo se efectúa exactamente igual, que en vía única o en vía doble, aunque la señal de salida sea de vía-1 y la señal de destino sea la señal de salida de vía-2, generándose en este caso una circulación en contra vía



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

en vía-2. Estas condiciones de circulación son normales en la explotación de alta velocidad, ya que si hay un tren (tren-1) que tiene que parar en todas las estaciones y detrás viene un tren (tren-2) que es directo, se le marca un itinerario y bloqueo al tren-2 para que adelante al tren-1, haciendo una contravía por vía contraria a la que circula normalmente el tren-2, y una vez el tren-2 ha adelantado al tren-1, se le vuelve a generar itinerario y bloqueo para que el tren-2 vuelva a su vía de circulación normal.



3. DATOS DE PARTIDA

Supondremos que existe una Línea de metro existente, y que se realiza una ampliación de la misma. Donde se requiere una subestación rectificadora de tracción nueva.

Como datos de partida supondremos que los estudios iniciales y de demanda de potencia ya están realizados y que no son objeto del presente proyecto. De los cuales supondremos que sabemos la demanda de carga exigida por la línea de metro que será alimentada por la subestación dimensionada en este Proyecto.

A modo de ejemplo, se muestra una grafica de simulación con la demanda de potencia de la subestación de Tracción de Sabadell en Barcelona en apartados posteriores.

3.1. Demanda de Carga

Si bien existen modelos basados en consumo de energía, conocidos como modelos de potencia media horaria, para la planeación de sistemas de distribución es fundamental contar con modelos que permitan proyectar o determinar potencias instantáneas que consideren las interacciones entre los diferentes vehículos (trenes) que transitan por una línea férrea de cualquiera de los sistemas eléctricos de transporte masivos (SETM) contemplados.

Los parámetros considerados para la estimación de una demanda instantánea son los descritos a continuación.

3.1.1. Fuerza Neta de un Vehículo de Tracción

Las curvas paramétricas de esfuerzo de tracción y frenado se fundamentan en la teoría de tracción implementada en locomotoras y trenes de alta velocidad. Existen tres factores que limitan el esfuerzo de tracción máximo (F_{max}):

- 1) El número de pasajeros que se encuentran a bordo del vagón,
- 2) La velocidad máxima del vehículo y
- 3) El consumo máximo de potencia.

El esfuerzo máximo de tracción, utilizado por la aceleración y luego transferido al riel, está limitado por el total de la carga (mm) en los ejes, de la siguiente manera:



$$m_m = MT - (n_{eje} - n) \times p_{axle} \quad (1)$$

Donde MT es la masa total del vehículo, n es el número de motores, neje es el número de ejes en el vehículo y paxle es el peso por cada eje [1].

A su vez, la masa total del vehículo está dada por:

$$MT = p_v + (n_p \times p_{pas}) \times M_{DYN} \quad (2)$$

Donde pv corresponde al peso por vagón sin pasajeros, np es el número de pasajeros por vagón, ppas es el peso promedio por pasajero (75 kg) y MDYN representa la masa dinámica del tren que es la energía almacenada en las partes rodantes del vehículo, típicamente de 5-10 %.

El esfuerzo de tracción máximo, se calcula como:

$$F_{max} = \mu \times m_m \times g \quad (3)$$

Donde μ corresponde al coeficiente de fricción entre las ruedas y el riel, normalmente una constante de 15 % en trenes, metros y tranvías, y g es la gravedad. Es importante destacar que los esfuerzos de tracción y de frenado son suministrados por el fabricante del vehículo.

La fuerza necesaria para mover un vehículo de tracción es igual a la MT del vehículo por la aceleración (a). Esto es equivalente a la diferencia entre el esfuerzo de tracción TE(v), la resistencia al movimiento RR(v) y el esfuerzo de frenado Be(v), así:

$$F = m \times a = m \frac{dv}{dt} = TE(v) - RR(v) - B_e(v) \quad (4)$$

El esfuerzo de tracción en un vehículo eléctrico provee la propulsión necesaria para vencer la inercia y acelerar el vehículo. La resistencia al movimiento es la fuerza que se opone al movimiento del vehículo. Por último, el esfuerzo de frenado es usado para desacelerar el vehículo y detenerlo en su totalidad. Por otro lado, la RR(v) se compone de dos fuerzas de acción: La llamada resistencia básica que es la fricción entre las ruedas del vehículo y el riel de conducción, y la resistencia aerodinámica, que representa las fuerzas de accionamiento externo en el vehículo [4, 5]. La RR(v) está dada por:

$$RR(v) = 10^{-3} \times (2,5 + 10^{-3} \times k(v + \Delta v)^2) \times MT \times g \quad (5)$$



Donde, $k \approx 0.33$ y $\Delta v \approx 15$ km/h es la variación con respecto a la velocidad del viento.

La Tabla a continuación presenta las fuerzas de acción (fuerza neta) de un tren, metro o tranvía que hace un recorrido entre dos estaciones de pasajeros para los cuatro regímenes de operación: parada, aceleración, velocidad constante y desaceleración. En parada y velocidad constante la suma de las fuerzas netas totales es cero y corresponde a velocidades iguales y mayores que cero.

Régimen de operación	Fuerza neta	Velocidad
Parada	$TE(v) - RR(v) - B_e(v) = 0$	$v = 0$
Aceleración	$TE(v) - RR(v) - B_e(v) > 0$	$0 \leq v \leq v_{max}$
Velocidad constante	$TE(v) - RR(v) - B_e(v) = 0$	$v > 0$
Desaceleración	$TE(v) - RR(v) - B_e(v) < 0$	$0 \leq v \leq v_{max}$

3.1.2. Variables Dinámicas

Uno de los propósitos de un modelo es contemplar la opción de utilizar el tiempo, el espacio o la velocidad como una variable independiente para los cálculos dinámicos. Como la fuerza neta del vehículo varía con la velocidad, la aceleración y desaceleración de un vehículo de tracción no es constante. Así, el modelo utiliza la velocidad como variable incremental independiente. La aceleración incremental se obtiene a partir de la fuerza neta y de MT del vehículo [5]:

$$a_i = \frac{F_i}{MT} \tag{6}$$

A su vez, el tiempo incremental de recorrido y la distancia recorrida en forma incremental son funciones de la velocidad y la aceleración, y están dadas por [5]:

$$t_{i+1} = t_i + \frac{v_{i+1} - v_i}{a_i} \tag{7}$$

$$s_{i+1} = s_i + v_i (t_{i+1} - t_i) \tag{8}$$



3.1.3. Consumo de Potencia

La potencia consumida por un vehículo tipo tren o metro depende de la velocidad y aceleración que tengan en cada instante de tiempo. La construcción de estas curvas está relacionada con el esfuerzo de tracción, el volumen de pasajeros en las estaciones y las distancias entre estaciones de pasajeros.

Para un SETM, el torque del motor y la velocidad son funciones lineales de la aceleración y de la velocidad angular. Por lo tanto, el consumo de potencia instantánea (P) demandada por la carga (tren), en cada instante de tiempo, se puede obtener así:

$$P = m \times a \times V = (MT \times a + RR(v)) \times V \quad (9)$$

Este consumo de potencia aplica sólo para los primeros tres estados de operación, donde la velocidad es $0 \leq v \leq v_{\max}$. Para el último estado de operación (desaceleración), en el que actúa el esfuerzo de frenado del vehículo, la potencia instantánea es función de un factor multiplicador B que describe la eficiencia del frenado regenerativo, que para este tipo de sistemas se considera en 30% [8, 9 y 10]:

$$P = B_e \times V \times \eta_B \quad (10)$$

3.1.4. Resultados Mediante Simulación

Como ejemplo de resultado por simulación se añaden los resultados de un estudio de tracción usados en un proyecto dimensionado de la Subestación del municipio de Barcelona.

Grafico de resistencia al avance: En este grafico, se representa la resistencia de avance del material móvil para cada velocidad y pendiente.

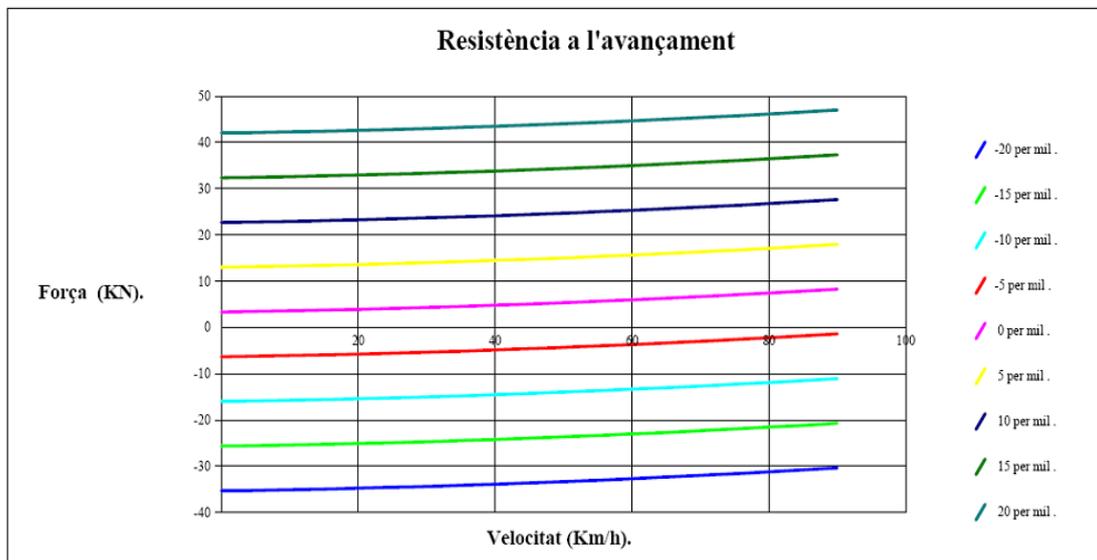


Figura 35. Resistencia al Avance

Grafico de Tracción máxima en función de la velocidad: En este grafico se representa para cada velocidad el esfuerzo de tracción máxima que puede alcanzar un tren.

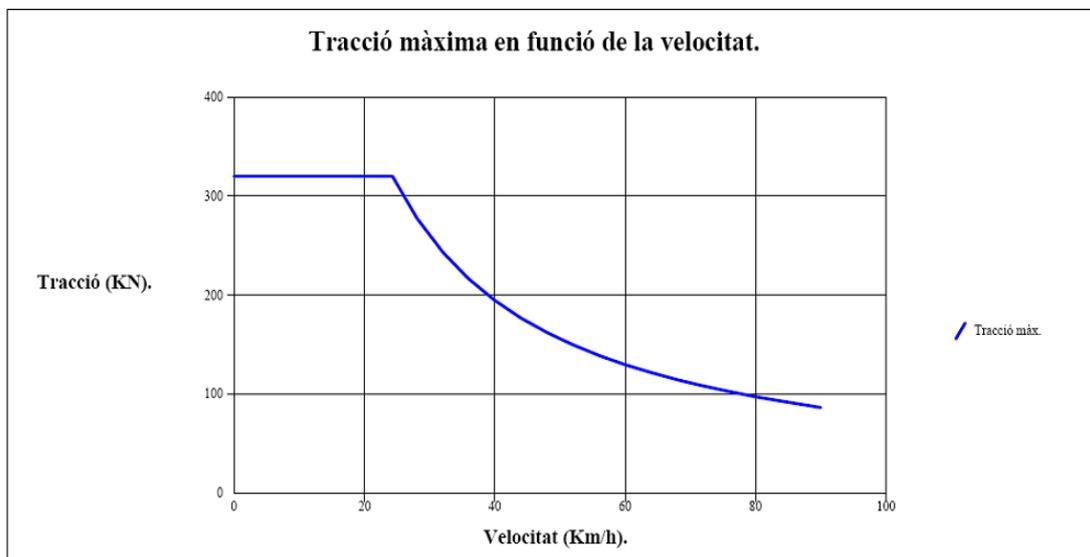


Figura 36. Esfuerzo de Tracción Máxima

Al hacer el cruce entre la tracción máxima y la resistencia de avance, se obtiene la velocidad de régimen, que es la velocidad máxima alcanzable para la resistencia de avance en cuestión.

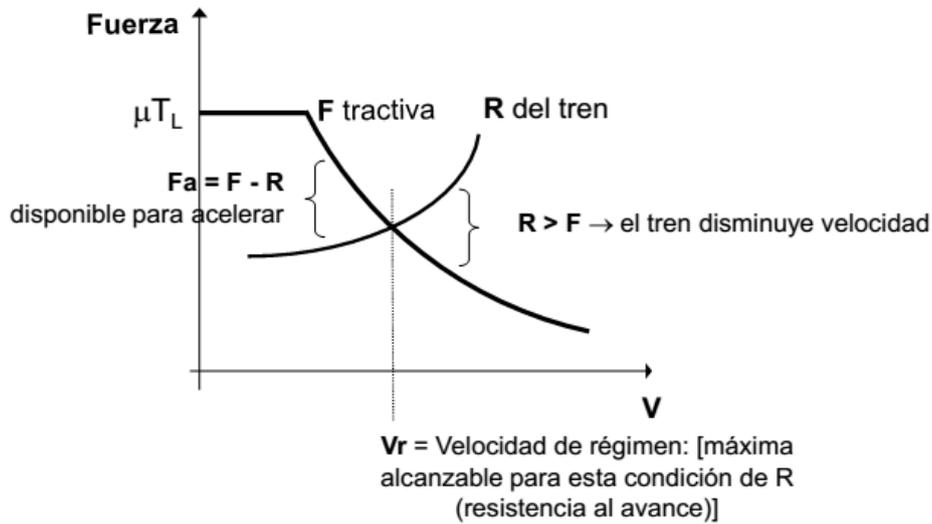


Figura 37. Velocidad de régimen

A continuación se realiza la representación de las dos graficas para la obtención de la velocidad de régimen.

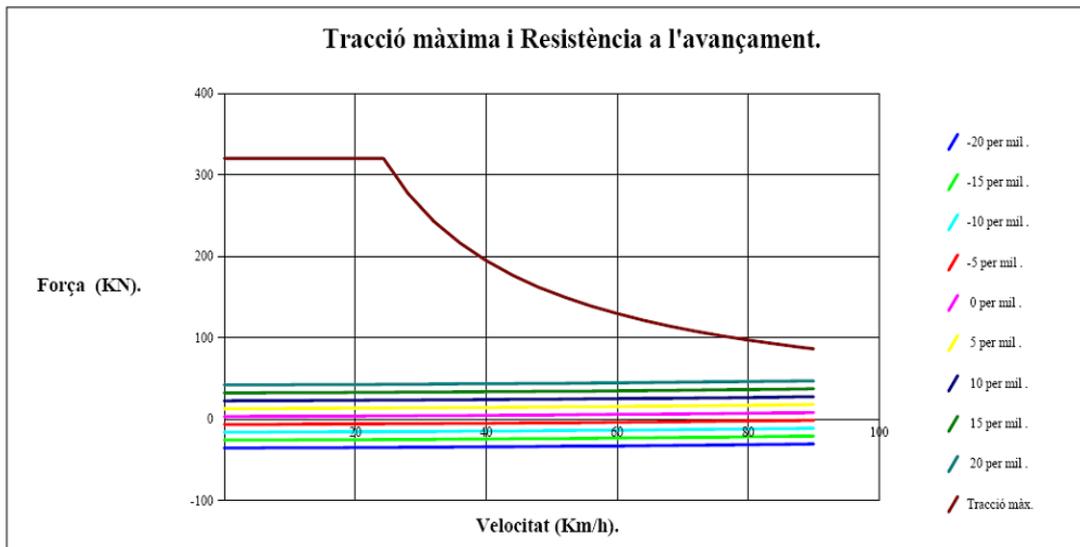


Figura 38. Esfuerzo de Tracción Máxima y Resistencia al Avance

Se comprueba que el material móvil no tiene una limitación de velocidad para el periodo de estudio.

Grafico de esfuerzo de frenada: En este grafico se representa para cada velocidad, la fuerza máxima de freno que puede alcanzar un tren.

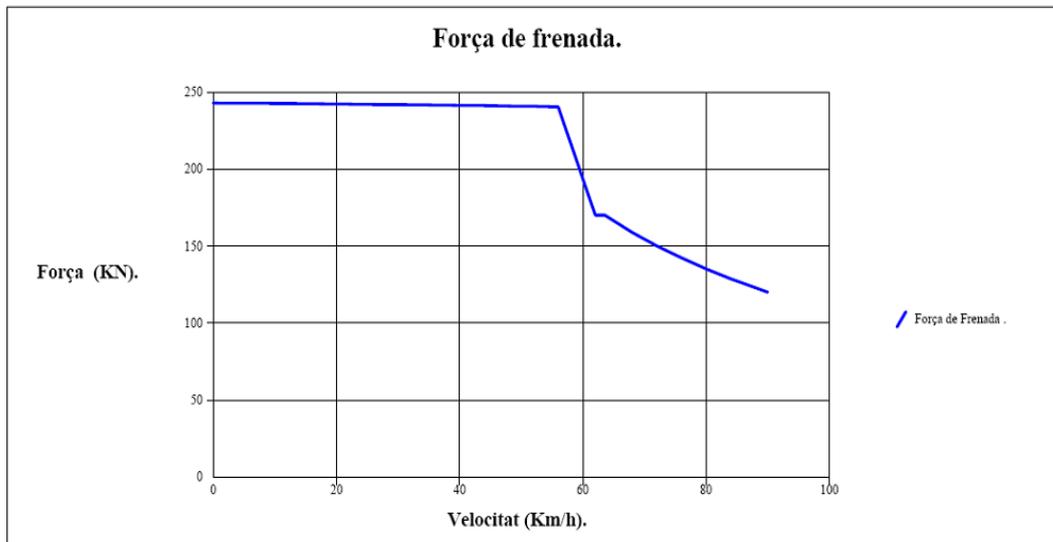


Figura 39. Fuerzo de frenado

Mallas de circulación: Las Mallas de Circulación son gráficos donde se representa la circulación de trenes por la vía en una hora determinada, y con un intervalo determinado. En el caso del ejemplo se ha considerado una malla de circulación durante la hora de mayor circulación que se concentra en la franja horaria entre las 7 y las 9:30, correspondiente a la franja en cabecera de las 7:05 a las 08:05.

En el eje de abscisas está representado el tiempo y en el de ordenadas los puntos kilométricos. Cada línea representada se corresponde con un tren en circulación. Se puede observar como en las estaciones, los trenes se detienen, (la curva pasa a ser totalmente horizontal, haciendo avanzar el tiempo, pero sin desplazarse del punto kilométrico).

Este tipo de gráfico da una representación de la cantidad de trenes que hay en circulación para un momento determinado, y el lugar exacto donde se encuentran. En este estudio de ejemplo se ha considerado un tiempo de parada en las estaciones de 20 segundos.

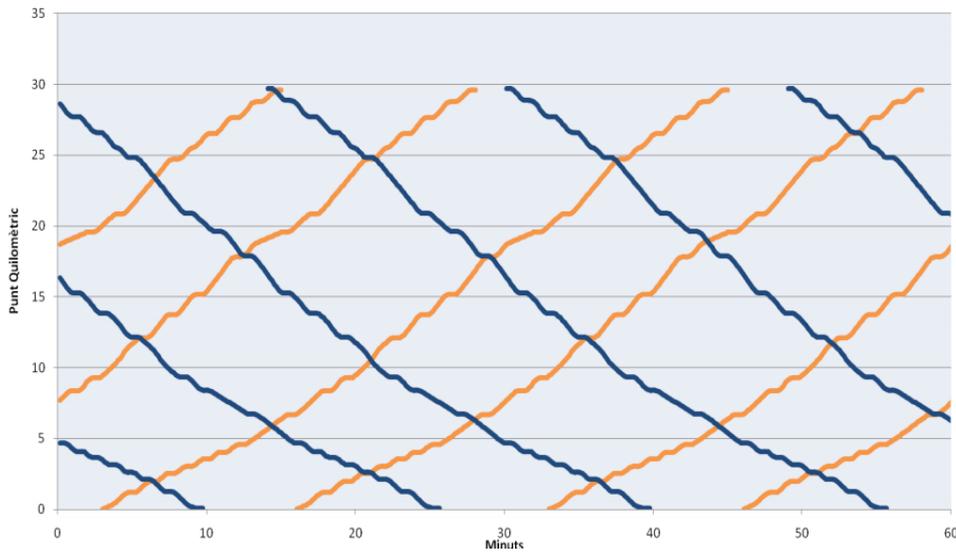


Figura 40. Puntos Quilométricos en Función del Tiempo

A continuación se presenta el comportamiento de la potencia demandada por el material móvil a lo largo del tiempo. Esta potencia, como comentado en apartados anteriores es función de la masa del material móvil, su aceleración, esfuerzo de frenado y velocidad.

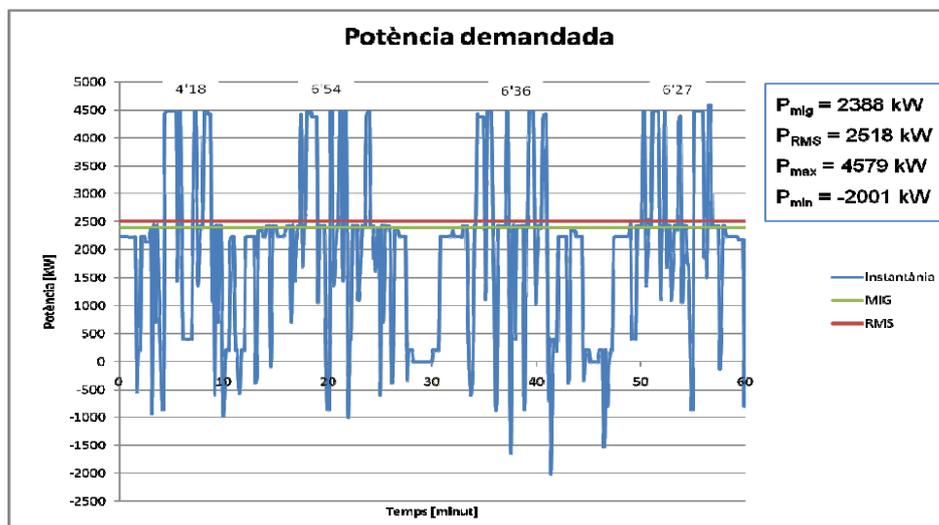


Figura 41. Potencia Instantánea Demandada

Dado que objetivo del presente documento es dimensionar una subestación para una potencia dada. Se tomará como potencia máxima instantánea para el diseño de la subestación de tracción de corriente continua la potencia máxima simultanea del ejemplo anterior, es decir 4.579kW.

4. Descripción y justificación de la solución adoptada

Se diseñará una subestación de Tracción de corriente continua tipo para alimentar una línea de metro.

El trabajo consta de una nave para albergar la paramenta de alta tensión necesaria para garantizar el suministro de corriente continua al material móvil, y de la instalación servicios auxiliares de baja tensión de la nave.

La nave tiene planta rectangular con dimensiones de 30,5 x 13,20m. Las dimensiones del edificio prevén la posibilidad de ampliar la instalación, incorporando nuevos transformadores, y celdas de media tensión.

La conexión de está subestación con otra similar para cubrir la demanda de potencia de un tramo ferroviario ficticio será una conexión en π , cuya demanda de potencia estimada de 4.600kW.

A continuación se ilustra una conexión en π de dos subestaciones de tracción.

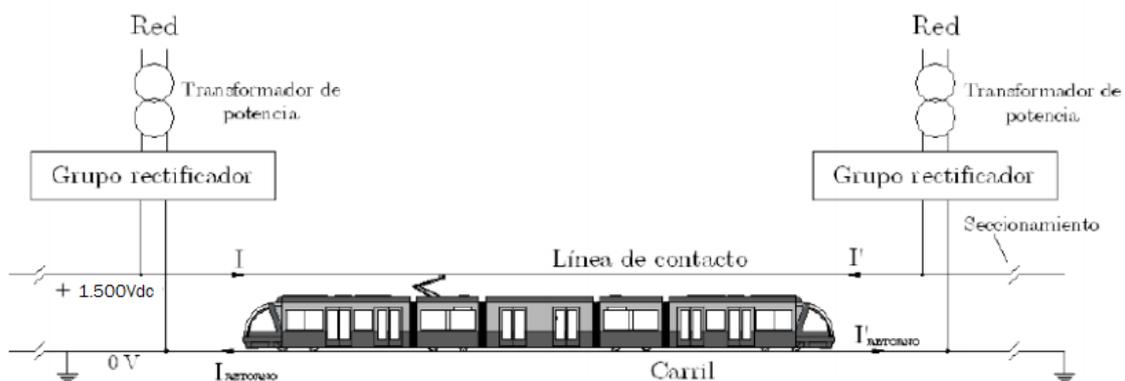


Figura 42. Tipología de Conexión en π

La subestación estará compuesta por espacios diferenciados, que albergarán los diferentes equipos necesarios para su funcionamiento. Esos espacios son ilustrados a continuación con un sistema de colores que incluye un esquema que celdas y equipos ubicados en la subestación.

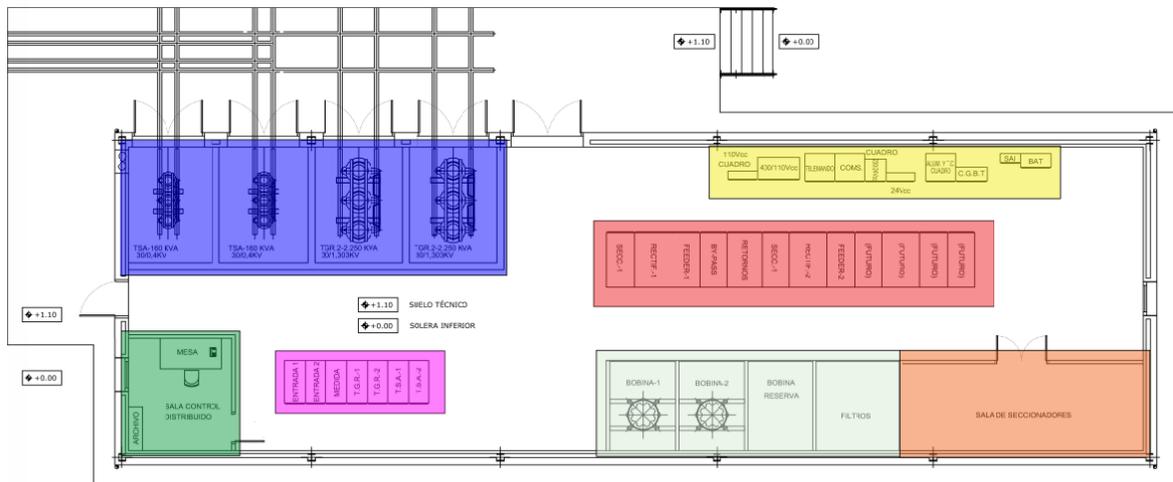


Figura 43. Distribución interior subestación

- CELDAS DE CORRIENTE ALTERNA
- CELDAS DE CORRIENTE CONTINUA
- CUADROS DE BAJA TENSIÓN
- TRANSFORMADORES DE POTENCIA
- SALA DE CONTROL DISTRIBUIDO
- FILTROS Y BOBINAS
- SECCIONADORES

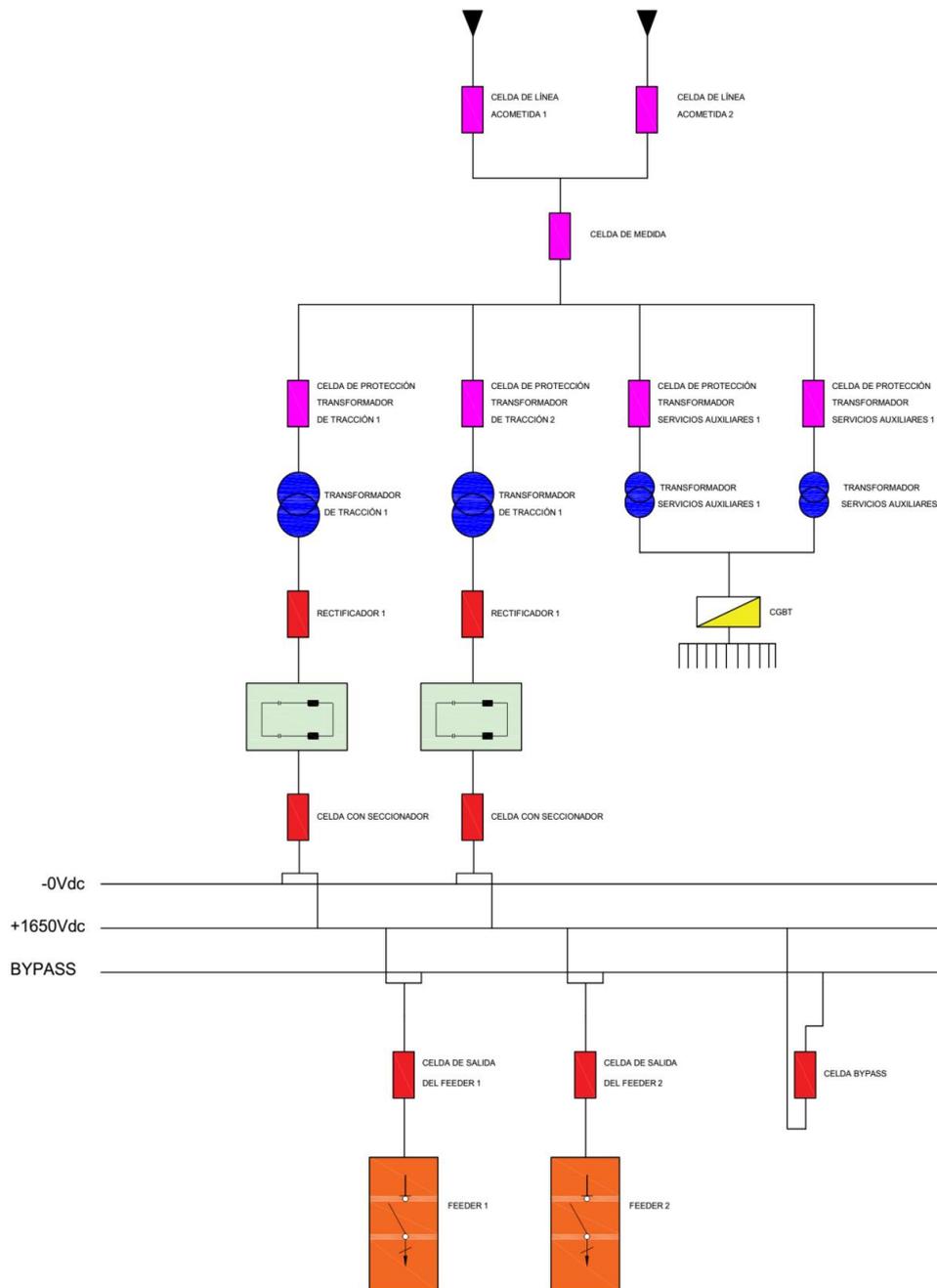


Figura 44. Esquema de equipos de Media tensión

Espacio de Celdas de Corriente Alterna

Este espacio se albergará las celdas de media tensión de corriente alterna, que componen la instalación que antecede a los rectificadores de potencia.

En este espacio estarán ubicadas las 7 celdas siguientes.

- Celda de línea para la acometida 1
- Celda de línea para la acometida 2
- Celda de remonte
- Celda de medida
- Celda de protección del transformador de tracción 1
- Celda de protección del transformador de tracción 2
- Celda de protección del transformador de servicios auxiliares 1
- Celda de protección del transformador de servicios auxiliares 2

A continuación se representa el alzado de las celdas anteriores, en el mismo orden.

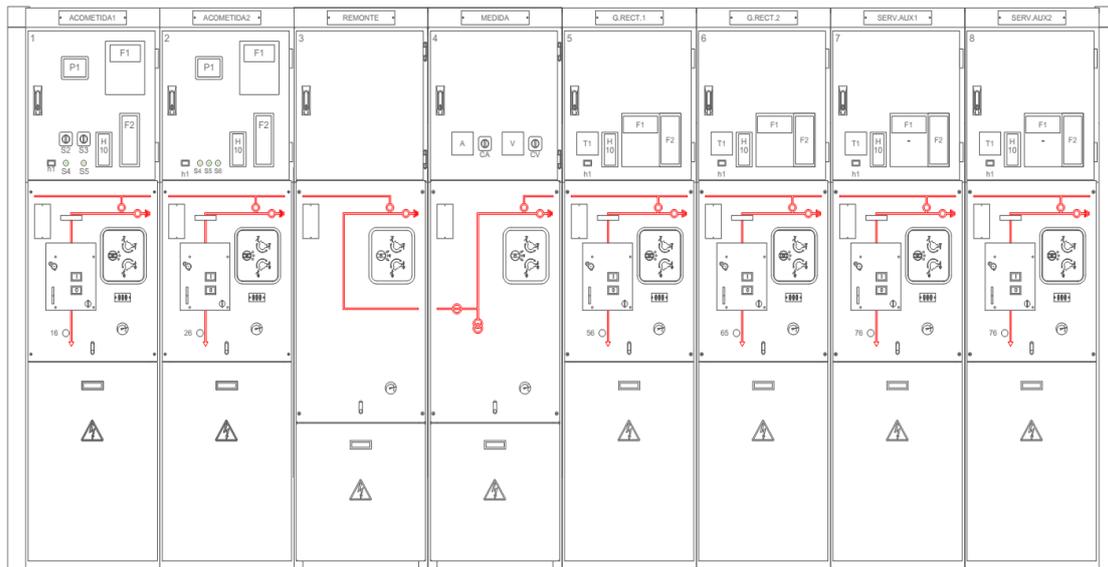


Figura 45. Celdas de corriente alterna

Espacio de Celdas de Corriente Continua

- Celda de Seccionador del grupo 1
- Celda de protección de grupo rectificador 1
- Celda de salida del feeder 1
- Celda de Seccionador del grupo 2
- Celda de protección de grupo rectificador 2
- Celda de salida del feeder 2
- Celda de by-pass
- Celda de retorno

A continuación se representa el alzado de las celdas anteriores.

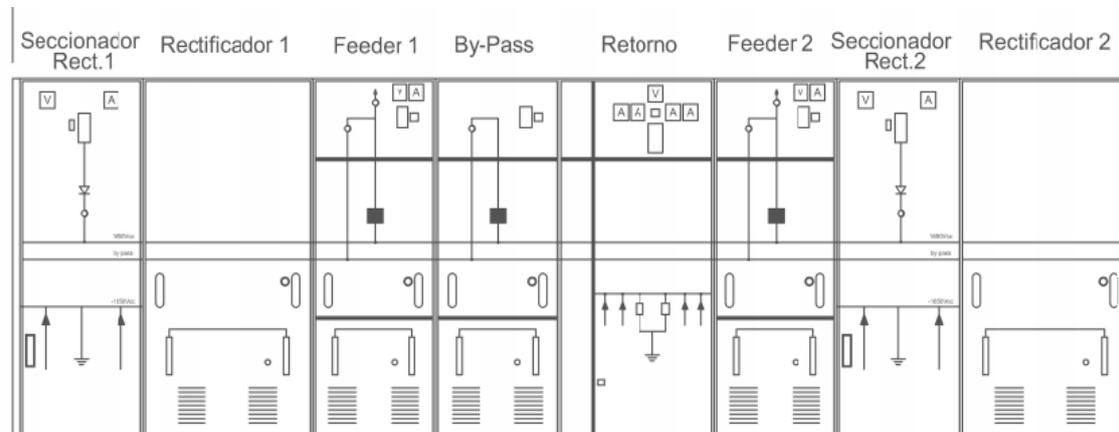


Figura 46. Celdas de corriente continua

Espacio de cuadros de BT

En este espacio estarán los cuadros eléctricos de baja tensión que componen las instalaciones no ferroviarias, estos son:

- Cuadro General de Baja Tensión.
- Cuadro de alumbrado y tomas de corriente.
- Cuadro de SAI.
- SAI y sus baterías.
- Cuadro de 110 Vcc.

Espacio para los transformadores de potencia

- 2 Transformadores de tracción.
- 2 Transformador de Servicios Auxiliares.

Sala de control distribuido:

- PC e impresora.
- Mobiliario.
- Teléfono y material necesario.

Filtros y bobinas

Se reservan tres salas en la nave para albergar las bobinas de alisamiento, en las dos primeras estarán las bobinas operativas, que se conectará a la salida del



rectificador dodecafásico. La tercera sala es para una bobina reserva, caso la instalación necesite ampliarse en el futuro.

Al lado de la tercera sala de bobinas se encuentra la sala de filtros, que se encargarán de filtrar los armónicos generados en la rectificación de la señal.

Seccionadores

Los seccionadores son elementos de maniobra que actúan sin tensión. Actuarán justo después del interruptor extrarápido, desconectando el grupo transformador-rectificador de la catenaria.

Estos estarán albergados en la sala de seccionadores.

4.1. Acometida eléctrica a la subestación

La alimentación eléctrica a la subestación de tracción, se realizará por medio de una doble línea que se derivará desde una línea subterránea de doble circuito de 25 kV que discurrirá por una hipotética parcela, donde estará ubicada la subestación de tracción. Esta acometida será doble para incrementar la fiabilidad de la instalación, de forma que si hay un fallo en la línea de la primera acometida, habría una conmutación automática y la otra línea de acometida daría toda la potencia demandada.

En la subestación, estas dos acometidas estarán protegidas mediante celdas de línea que llevan incorporadas en su interior un interruptor automático, encargado del corte en caso de sobreintensidades.

Los cables de acometida a la subestación se realizarán con cable tipo RHZ1 Al.

4.2. Celdas de 25 kV

Las celdas de 25 kV tendrán aislamiento al aire y corte en SF₆, autoportantes e independientes, formando, una vez enlazadas entre sí, un conjunto único y compacto.

Las celdas tendrán una intensidad nominal de 630 A.

El cuadro de 25 kV se compondrá de las siguientes celdas:

- 2 celdas de acometida con transferencia automática de barras.



- 1 celda de medida.
- 2 celdas de protección de los circuitos de alimentación a los grupos transformadores – rectificadores (se dejará el espacio requerido para la implantación de una celda de protección de la alimentación de un tercer grupo transformador-rectificador).
- 2 celdas de protección de la alimentación al transformador de servicios auxiliares de la propia subestación.

4.3. Transformadores de Tracción y Servicios Auxiliares.

Los transformadores de tracción serán de tipo seco, con tres arrollamientos y con clase de aislamiento F.

Los transformadores de tracción estarán dimensionados para las sobrecargas propias del servicio de tracción, clase VI según UNE EN 60 146-1.

Los transformadores que se instalarán en la subestación se pueden agrupar de la siguiente forma:

- 2 transformadores de grupos rectificadores (25/1,303/1,303 kV y 2250 kVA)
- 2 transformadores de servicios auxiliares (25/0,4 kV y 160 kVA)

Estos transformadores alimentarán el Cuadro General de Baja Tensión de la subestación, por medio del cual se alimentarán los servicios auxiliares propios de la subestación.

4.4. Grupos rectificadores

La subestación de tracción dispondrá de dos grupos rectificadores (se dejará el espacio necesario para la implantación de un tercer rectificador). Cada grupo se compondrá de dos celdas, una conteniendo el rectificador con sus sistemas de protección y la otra conteniendo el seccionador de salida del rectificador.

Cada rectificador estará formado por doble puente Graetz, con sus correspondientes diodos (3 diodos en paralelo por rama, para un total de 36 diodos por cada rectificador).



Los grupos serán de doce pulsos, desenchufables y con refrigeración natural por aire. La tensión de salida de los grupos será de 1.500 Vdc y la potencia nominal de 2.000 kW. Los grupos estarán dimensionados para las sobrecargas propias del servicio de tracción, clase VI según UNE EN 60 146-1.

Los grupos rectificadores estarán conectados a dos secundarios de los transformadores con seis tensiones desfasadas 30°, de forma que cada rectificador se comporte como un sistema dodecafásico. Esta conexión asegura la supresión de los armónicos 5° y 7° de intensidad a la red de 25 kV de la compañía eléctrica.

4.5. Filtros y bobinas

Estas bobinas suelen tener dimensiones importantes, algunas instituciones como ADIF limitan las dimensiones y peso de las bobinas de alisamiento en sus subestaciones.

P_N (*)	3.000 kW	6.000 kW
Diámetro exterior	1.200 mm	1.200 mm
Altura	1.350 mm	2.010 mm
Peso	700 kg	1.100 kg

Dimensiones y pesos máximos establecidos por Adif

(*) P_N : La potencia nominal del rectificador asociado.

Se instalará una bobina de alisamiento en serie con la barra positiva de cada rectificador (se dejará el espacio requerido para la implantación de una tercera bobina).

El equipo de filtrado de armónicos estará formado por bobinas y condensadores, de forma que se filtren los armónicos de 600 y 1.200 Hz, para no perturbar los sistemas de señalización.

4.6. Celdas de corriente continua

El conjunto de celdas de corriente continua estará formado por las siguientes celdas:

- 2 celdas de salida de feeders (se dejará el espacio requerido para implementar una celda de feeder)
- La protección de cada salida de feeder se realizará mediante disyuntors extrarrápidos instalados sobre carros extraíbles y dotados de seccionador de by-pass.
- 1 celda de by-pass.
- 1 celda de retornos.

4.7. Dispositivos Limitador de Tensión.

En los sistemas de tracción de CC, es posible que se den tensiones de contacto potencialmente letales entre el circuito de retorno y la estructura de tierra debido a las corrientes de funcionamiento y las corrientes de cortocircuito. En tales casos, es necesario usar un dispositivo de cortocircuito como limitador de tensión entre el circuito de retorno y la estructura de tierra con el fin de evitar la presencia de tensiones de contacto peligrosas.

Las características Principales de esos limitadores son:

- Protección del personal
- Prevención de tensiones inaceptables en estaciones de pasajeros
- Protección de la instalación
- Eliminación de la tensión de contacto en el área del equipo
- Montorización del potencial del circuito de retorno

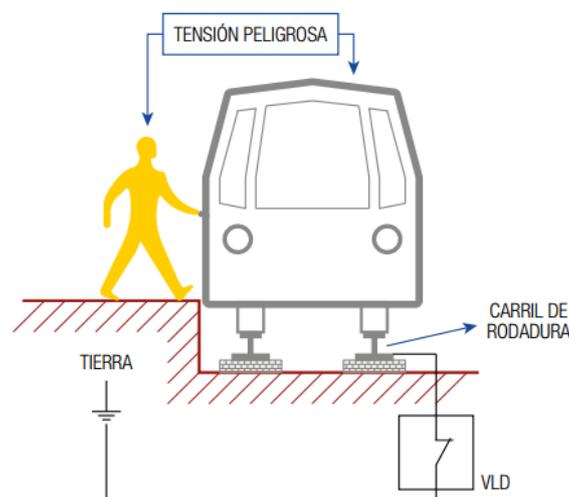


Figura 47. Dispositivo disipador de tensión



4.8. Instalaciones Auxiliares

A continuación se da una breve descripción de los sistemas auxiliares de la subestación. Sus cálculos justificativos están descritos en el **Anexo II - Cálculo de Instalaciones de Baja Tensión**.

4.8.1. Sistemas de alimentación segura

Los sistemas de alimentación segura de la subestación de tracción se corresponderán por dos dispositivos que alimentarán a sistemas que tienen que trabajar en caso de fallo de suministro eléctrico. Estos sistemas son:

- Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI)
- Rectificador - Cargadores y baterías para 110 Vcc

4.8.1.1. SAI

Sistema de alimentación ininterrumpida (SAI), en inglés uninterruptible power supply (UPS), es un dispositivo que gracias a sus baterías u otros elementos almacenadores de energía, puede proporcionar energía eléctrica por un tiempo limitado y durante un apagón eléctrico a todos los dispositivos que tenga conectados. Otras de las funciones que se pueden adicionar a estos equipos es la de mejorar la calidad de la energía eléctrica que llega a las cargas, filtrando subidas y bajadas de tensión y eliminando armónicos de la red en el caso de usar corriente alterna.

El SAI suministrará tensión estabilizada y segura a los sistemas de telemando, telecomunicación, sistema de protección contra incendios, sistema de intrusión y de vigilancia.

El conjunto de baterías del SAI tendrá una capacidad mínima de **1 hora** para mantener en funcionamiento las cargas esenciales y una potencia nominal de **10kW**.

4.8.1.2. Sistema de corriente continua 110 Vcc

El sistema de corriente continua auxiliar a **110 Vcc** estará formado por un rectificador-cargador y baterías.



Este sistema alimentará a:

- **Motores de los interruptores automáticos de las celdas de 25 kV, 1500 V, by-pass, retorno y CGBT**
- **Motores de los seccionadores feeder y rectificador**
- **Relés de protección**
- **PLCS**

4.8.2. Cuadros de Baja Tensión

Los cuadros de baja tensión estarán compuestos por todos los elementos de protección necesarios para la protección de los dispositivos ubicados en el interior de la subestación. Los cuadros estarán ubicados en el interior de la nave, en la zona indicada con el color amarillo en el apartado 4.

En la subestación de tracción se encontrarán los siguientes cuadros de baja tensión:

4.8.2.1. Cuadro General de Baja Tensión

El Cuadro de General de Baja Tensión dispondrá de posiciones de entrada y salida a base de interruptores automáticos. Este cuadro alimentará al resto de cuadros de la subestación así como los ventiladores de renovación de aire.

Será un cuadro con interruptores encargados de cortar el suministro a los demás subcuadros. Sus líneas y protecciones se pueden ver en el plano unifilar correspondiente y en anejo II del presente trabajo.

Este cuadro contará con una protección contra sobretensiones transitorias.

A continuación se presenta una simulación del cuadro mediante el programa ecoreal de schneider.

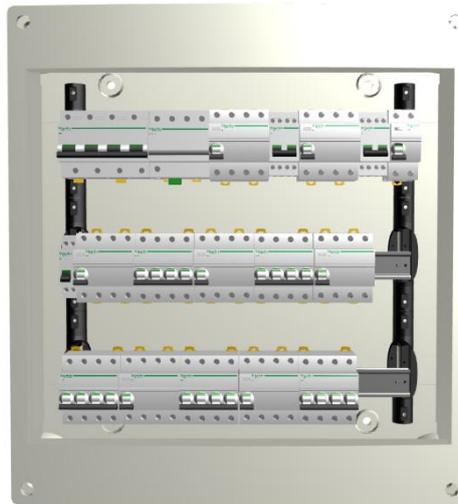


Figura 48. Cuadro General de Baja Tensión

4.8.2.2. Subcuadro de Alumbrado y Tomas de corriente

El Subcuadro de Alumbrado y Tomas de corriente dispondrá de posiciones de entrada y salida a base de interruptores automáticos. Este cuadro alimentará a los sistemas de alimentación y tomas de corriente de la subestación.

La instalación de alumbrado estará constituida por 3 circuitos de alumbrado protegido cada uno por una protección magnetotérmica y otra diferencial. Debido a la poca cantidad de tomas de corriente, necesarias en la subestación se hará un único circuitos que englobará tomas las tomas. Este circuito estará protegido por un interruptor magnetotérmico y un diferencial.

A continuación se presenta una simulación del cuadro mediante el programa ecoreal de schneider.

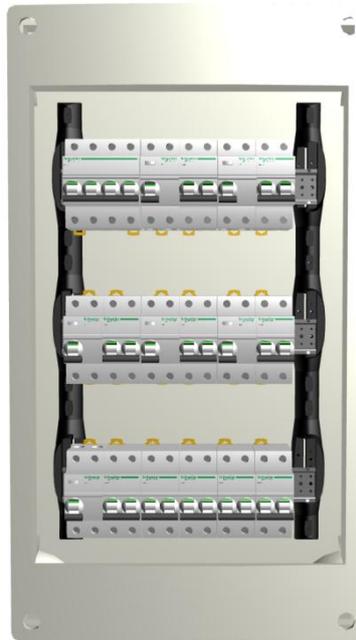


Figura 49. Subcuadro de alumbrado y tomas de corriente

4.8.2.3. Cuadro de SAI

El Cuadro de SAI dispondrá de posiciones de entrada y salida a base de interruptores automáticos. Este cuadro alimentará los sistemas que necesiten funcionar si falla la alimentación eléctrica, en el caso que nos corresponde, estará dimensionado para la potencia del sistema de control distribuido, y la instalación de detección contraincendios de la subestación.

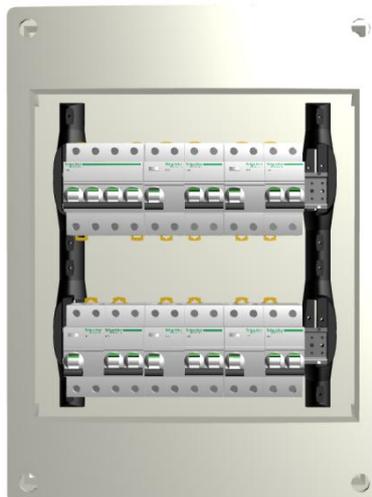


Figura 50. Subcuadro de SAI

4.8.2.4. Subcuadro de 110 Vcc

Este cuadro alimentará a los motores de los interruptores automáticos de media tensión de la subestación, dispondrá de un rectificador de 400 Vca a 110 Vcc.

4.8.3. Alumbrado y tomas de corriente

Las luminarias a instalar en la subestación incluirán los siguientes tipos:

- Luminarias de alumbrado normal tipo LED
- Luminarias de alumbrado emergencia tipo LED, las cuales contendrán baterías que les permitirán el funcionamiento continuado sin alimentación eléctrica durante una hora.
- Luminarias de alumbrado exterior.

Por otro lado, las tomas de corriente serán de dos tipos:

- Tomas de corriente, trifásicas.
- Tomas de corriente, monofásicas.



Figura 51. Subcuadro de 110 Vcc

4.8.4. Cableado y canalizaciones

La distribución en 25 kV a los transformadores se realizará por medio de cables unipolares con conductor y pantalla de cobre, sobre bandejas metálicas dispuestas en el falso suelo o canales de cables del edificio de la Subestación.

La distribución desde los transformadores hasta los grupos rectificadores se realizará por medio de cables unipolares con conductor y pantalla de cobre sobre bandejas metálicas dispuestas en el falso suelo o canales de cables del edificio de la Subestación.

El cableado de interconexión entre grupos rectificadores, bobinas, equipo de filtrado de armónicos y celdas de corriente continua se realizará por medio de cables de aislamiento seco sobre bandejas metálicas dispuestas en el falso suelo del edificio.

El cableado de baja tensión (fuerza, alumbrado y control) se realizará por medio de cables de tipo RZ1-K 0,6/1kV. Los cables, en este caso, se llevarán sobre bandejas o en tubos conducidos.



Figura 52. Cableado usado (RZ1-K)

Donde:

- 1- Conductor de cobre
- 2- Aislamiento de Polietileno reticulado (XLPE)
- 3- Cubierta de poliolefina termoplástica

Todos los cables serán no propagadores de la llama y no propagadores del incendio, así como libres de halógenos.

Las bandejas serán de rejillas y sus accesorios serán fabricados a partir de acero forjado estirado en frío, con 2 mm de espesor mínimo, galvanizadas en caliente por inmersión después de fabricadas. El galvanizado en caliente cumplirá la norma UNE 37501-88.



Figura 53. Bandeja de rejilla

4.9. Puesta a tierra

Poner a tierra es unir eléctricamente a ella una parte del circuito eléctrico o una parte conductora no perteneciente al mismo. Hay dos tipos de puesta a tierra, la puesta a tierra de protección y la de servicio.

La puesta a tierra de protección es la conexión directa a tierra de las partes conductoras de los elementos de una instalación no sometidos normalmente a tensión eléctrica, pero que pudieran ser puestos en tensión por averías o contactos accidentales, a fin de proteger a las personas contra contactos con tensiones peligrosas.

La puesta a tierra de servicios es la conexión que tiene por objetivo unir a tierra temporalmente parte de las instalaciones que están normalmente bajo tensión o permanentemente ciertos puntos de los circuitos eléctricos de servicio, como por ejemplo el neutro de un transformador.

Estas puestas a tierra pueden ser:

- Indirectas; cuando se realizan a través de resistencias o impedancia adicionales.
- Directas; cuando van unidas directamente a tierra sin el uso de impedancia adicionales;

En lo que nos concierne en este TFG, se calculará a puesta a tierra de protección y servicio mediante el Método de UNESA, también recogida en la ITC MIE-RAT 13, que fija unos valores máximos de las tensiones aplicables al cuerpo humano. A ecuaciones siguientes

Tensión de paso máxima:

En el exterior:

$$V_p = \left(\frac{10 \cdot K}{t^n} \right) \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot \rho}{1000} \right)$$

En el interior:

$$V_p = \left(\frac{10 \cdot K}{t^n} \right) \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot \rho_s}{1000} \right)$$

Tensión de contacto máxima:

En el exterior:

$$V_c = \left(\frac{K}{t^n} \right) \cdot \left(1 + \frac{1,5 \cdot \rho}{1000} \right)$$

En el interior:

$$V_c = \left(\frac{K}{t^n} \right) \cdot \left(1 + \frac{1,5 \cdot \rho_s}{1000} \right)$$

Donde:

t = Duración de la falta a tierra.

K = 72 y n = 1 para t < 0.9 s

K = 78.5 y n = 0.18 para 0.9 s < t < 3 s

ρ = Resistividad del terreno.

ρ_s = Resistividad superficial del terreno.

La puesta a tierra de protección (de las masas), será realizada mediante una malla metálica en el interior de la losa conectada a tierra mediante picas de cobre desnudo de 2 metros de profundidad. La armadura de los pilares que componen la nave estará unida a un conductor desnudo mediante soldadura aluminotérmica.

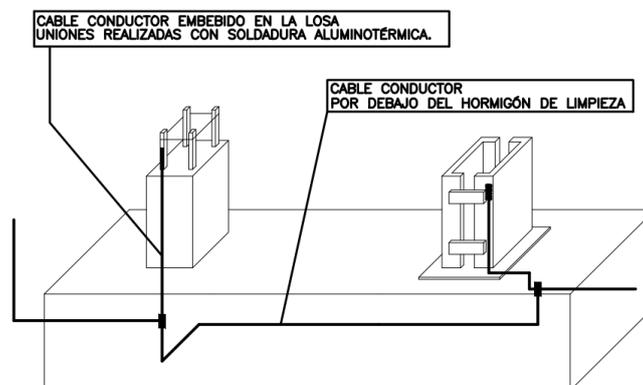


Figura 54. Detalle de puesta a tierra en pilares

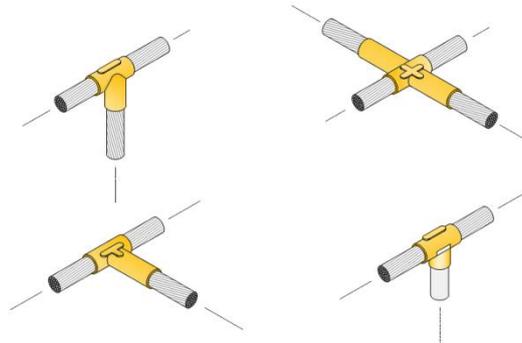


Figura 55. Detalle de soldadura

El dimensionado de la red de tierras está definido en el Anexo I de Cálculo de Instalaciones de Media Tensión.



5. CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo he podido conocer el funcionamiento de un ferrocarril metropolitano y los aspectos que afectan a este tipo de instalación, estudiando los elementos que conforman una subestación de tracción de corriente continua y familiarizarme con la normativa aplicada.

Con este trabajo también he podido profundizar los conocimientos del Grado en Ingeniería Eléctrica, tales como: la teoría de transformadores de potencia, rectificadores de onda completa, filtrado de una señal y dimensionado de los conductos eléctricos, teniendo siempre en cuenta la máxima caída de tensión admisible y el calentamiento por efecto joule del conductor, los diferentes tipos de señalización ferroviaria, entre otros.

Además he podido aprender nuevos conceptos y métodos de cálculo, estudiando los elementos que componen una subestación de estas características y la teoría relacionada con cortocircuitos en lo que a corriente continua se refiere.

También he podido familiarizarme con la normativa aplicada de este tipo de instalaciones, posibilitando una mayor comprensión de los requerimientos de este tipo de sistema.

Resaltar que este trabajo podrá servir de documento de consulta para futuros estudiantes, visto que apenas hay bibliografía al respecto.



6. BIBLIOGRAFÍA

- Libro ingeniería ferroviaria –Francisco Javier González Fernández y Julio Fuentes Losa.
- Libro ferrocarriles metropolitanos, tranvías metros ligeros y metros convencionales – Manuel Melis Maynar y Francisco Javier González Fernández.
- Definición y tipología de los sistemas ferro-viarios, aspectos generales. El caso español.
- Modelo de Cálculo de Demanda de Potencia Eléctrica en Sistemas de Tracción tipo Metro, Tren y Tranvía. Mario A. Ríos, Gabriel García.
- Proyecto Constructivo de la Subestación Eléctrica de Tracción de Mallabia de la Línea BILBAO – San Sebastián – Hendaia de Euskotren
- Projecte Constructiu de Perllongament de la Línia D'FGC a Sabadell. Alimentació Eléctrica, Comunicacions i Instal·lacions no Ferroviàries del Túnel. Tram: Plaça Major – Cotxeres.
- Projecte Constructiu de subcentral Rectificadora de Trinitat Nova de la Línia 3 de l'FMB. Tram: Canvelles – Trinitat Nova.
- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT)
- Norma IEC61600-1 Short –Circuit currents in DC auxiliary installations power plants and substations - Part 1: Calculation of short-circuit currents
- Reglamento sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación – ITC MIE RAT 13
- Apuntes de la Asignatura de Sistemas de Transporte de Tracción Eléctrica de 4º Curso del Grado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid.
- Apuntes del Curso de Señalización Ferroviaria del Máster en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- Catalogo de Celdas de distribución primaria 231 de la empresa MESA.
- Telemandos de energía en los sistemas ferroviarios. José Antonio Rodríguez Mondéjar