Proyecto de Fin de Carrera

Ingeniero Industrial

Diseño de las subestaciones eléctricas de tracción y centros de autotransformación asociados de una línea ferroviaria de alta velocidad

MEMORIA

Autor: Jorge Llavina Juan

Director: Felipe Córcoles Lopez

Convocatoria: Mayo 2010

Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Resumen

El Proyecto Final de Carrera "Diseño de las subestaciones eléctricas de tracción y centros de autotransformación asociados de una línea ferroviaria de alta velocidad" se enmarca en la política actual de electrificación de las líneas ferroviarias del Estado proyectando corredores de alta velocidad dentro del mismo.

El hilo conductor de este proyecto ha consistido en aplicar los conocimientos existentes en el diseño de sistemas de electrificación de alta velocidad a una línea ferroviaria convencional sin electrificar desde el punto de vista de las instalaciones eléctricas de tracción. Para ello se ha escogido electrificar un tramo aproximado de 190 km de la línea del corredor Cantábrico-Mediterráneo.

Se ha elaborado una valoración inicial de los diferentes sistemas de electrificación existentes y aplicado el sistema más apropiado, el sistema 2x25 kVca. Ha sido necesario un estudio del sistema de electrificación 2x25 kVca a fin de determinar los parámetros necesarios para el dimensionamiento de los sistemas de tracción.

Para la elección de la tensión de suministro se ha contemplado una tensión diferente para cada una de las subestaciones de tracción diseñadas en el proyecto debido a la existencia de redes tanto de 220 kV como de 400 kV dentro del territorio español y contemplando la posibilidad de que en la futura realización del proyecto constructivo de dicha línea exista una red de 220 kV más próxima a una subestación que una red de 400 kV. Por tanto, se contemplan ambos casos en el diseño de las subestaciones de tracción para tipo de línea ferroviaria.

El proyecto no pretende ser más que ser la parte de un proyecto constructivo en la cuál se definan las instalaciones eléctricas de los centros de tracción del sistema. No se pretende la construcción física de dichos equipamientos sino una descripción de la instalación.

A lo largo del proyecto se detallan las condiciones necesarias para la electrificación así como la configuración de los diferentes centros que componen el sistema de electrificación. Entrando en detalle en los equipos eléctricos necesarios para un correcto funcionamiento de todo el sistema.

Índice

Resumen **1**

Índice **3**

1. Glosario **7**

1.1. Definiciones generales **7**

1.2. Abreviaturas, símbolos y siglas **13**

2. Introducción **14**

2.1. Objetivos del proyecto **14**

2.2. Alcance del proyecto **14**

3. Electrificación de líneas ferroviarias **15**

3.1. Generalidades **15**

3.2. Estructura **15**

3.3. Subestaciones de tracción **16**

3.4. Circuito de tracción **17**

3.5. Sistemas de electrificación **19**

3.5.1. Sistemas de electrificación en corriente continua 19

3.5.2. Sistemas de electrificación en corriente alterna 23

4. Descripción del sistema **33**

4.1. Sistema de electrificación 2x25 kVca **33**

4.2. Descripción de la línea **33**

4.3. Dimensionamiento eléctrico **33**

4.4. Acometida y subestaciones de tracción 34

4.5. Centros de autotransformación 35

4.6. Modos de funcionamiento 37

4.6.1. Situación de funcionamiento normal 37

4.6.2. Situación degradada N-1 38

4.6.3. Situación degradada N-2 38

4.6.4. Situación degradada N-3 39

4.6.5. Fallo en catenaria 39

5. Especificación de las instalaciones eléctricas 40

5.1. Condiciones de intercambio de energía 40

5.1.1. Frecuencia 40

5.1.2. Tensión 40

5.1.3. Desequilibrios 40

5.1.4. Continuidad en el suministro 41

5.2. Potencia a instalar 42

5.3. Intensidad térmica de cortocircuito 42

6. Modelo eléctrico del sistema 2x25 kVca 43

6.1. Modelo de la subestación de tracción 43

6.2. Modelo del centro de autotransformación 44

6.3. Modelo del circuito de tracción 45

6.4. Modelo del sistema 2x25 kVca 45

6.4.1. Subestación de tracción en vacío 45

6.4.2. Subestación de tracción en carga 47

7. Configuración de las instalaciones 50

7.1.1. Descripción general 50

7.1.2. Conexión a la red de transporte 54

7.1.3. Aparamenta de alta tensión de las subestaciones de tracción 55

7.1.4. Aparamenta de media tensión 58

7.1.5. Instalaciones auxiliares 61

7.1.6. Red de tierras 66

8. Impacto medioambiental 69

8.1. Generalidades 69

8.2. Situación preoperacional 70

8.2.1. Medio físico 70

8.2.2. Medio socioeconómico e institucional 70

8.2.3. Valoración y síntesis de la situación preoperacional 70

8.3. Previsión de impactos 71

8.3.1. Sobre el medio físico 71

8.3.2. Sobre la población 71

8.4. Medidas preventivas y correctoras 72

8.4.1. Fase de obras 72

8.4.2. Fase de explotación 73

8.4.3. Fase de desmantelamiento 74

8.5. Conclusiones 74

9. Presupuesto 75

9.1. Presupuesto de ejecución Material 75

9.1.1. Resumen de partidas del presupuesto de ejecución material 83

9.2. Presupuesto de confección del proyecto 84

9.3. Presupuesto de ejecución por contrata 85

9.4. Estudio de seguridad y salud 85

Conclusiones **87**

Agradecimientos **89**

Bibliografía **91**

Referencias bibliográficas **91**

Bibliografia complementària **92**

ANEXOS

VOLUMEN I

ANEXO A: Análisis del sistema 2x25 kV

ANEXO B: Aparamenta de AT

ANEXO C: Aparamenta de MT

ANEXO D: Instalaciones de puesta a tierra

VOLUMEN II

ANEXO E: Instalaciones auxiliares

ANEXO F: Estudio de seguridad y salud

VOLUMEN III

ANEXO G: Pliego de condiciones técnicas

ANEXO H: Planos

1. Glosario

1.1. Definiciones generales

Aislamiento de un cable: *Conjunto de materiales que forman parte de un cable y cuya función específica es soportar la tensión.*

Alta tensión: *Se considera alta tensión (AT) toda tensión nominal superior a 55 kV.*

Aparamenta eléctrica: *Conjunto de aparatos de maniobra, de regulación, de seguridad o de control y los accesorios de canalización utilizados en las instalaciones eléctricas.*

Aparatos de corte: *Elementos destinados a asegurar la continuidad o discontinuidad de los circuitos eléctricos.*

Baja tensión: *Se considera baja tensión (BT) toda tensión nominal inferior a 1 kV.*

Booster: *Tipo de transformador destinado a la alimentación de las catenarias de los ferrocarriles para recoger la corriente de retorno desde las vías hasta el conductor de retorno. Este tipo de transformadores son monofásicos con relación 1:1. Tiene valores de impedancia bajos y a pesar de ello, tiene que tolerar corrientes de corto-circuito frecuentes en las líneas de ferrocarril.*

Cables de retorno: *Cables que se usan como refuerzo de los raíles. Debido a su menor impedancia, recogen la mayor parte de las corrientes de retorno, alejándolas de los raíles. De este modo es posible reducir las perturbaciones que dichas corrientes de retorno de tracción pueden producir en algunos sistemas de señalización que también emplean los raíles.*

Cable de tierra: *Conductor conectado a tierra en alguno o en todos los apoyos, dispuesto generalmente, aunque no necesariamente, por encima de los conductores de fase, con el fin de asegurar una determinada protección frente a las descargas atmosféricas.*

Cable de tierra de fibra óptica (OPGW): *Cable de tierra que contiene fibras ópticas para telecomunicación. El componente conductor puede ser cableado, tubular o una combinación entre ambos.*

Cantón: *Cada uno de los tramos de una extensión de línea de ferrocarril alimentada por una misma subestación separado eléctricamente del otro.*

Carril o raíl: *Cada una de las barras metálicas sobre las que se desplazan las ruedas de los trenes. Los raíles se disponen como una de las partes fundamentales de las vías ferroviarias y actúan como soporte, dispositivo de guiado y elemento conductor de la corriente eléctrica. Además de servir de punto de apoyo del tren, sirven de captadores de las corrientes que salen de los trenes.*

Catenaria: *Conjunto de conductores que es necesario instalar a lo largo de la línea para realizar el transporte de la energía eléctrica.*

Centro de transformación: *Instalación provista de uno o varios transformadores reductores de alta a baja tensión con la aparamenta y obra complementaria precisas.*

Corriente de puesta a tierra: *Es la corriente total que se deriva a tierra a través de la puesta a tierra. Nota: la corriente de puesta a tierra es la parte de la corriente de defecto que provoca la elevación de potencial de una instalación de puesta a tierra.*

Corriente nominal: *Corriente que el aparato puede soportar indefinidamente en condiciones nominales de empleo.*

Electrodo de tierra: *Conductor, o conjunto de conductores, enterrados que sirven para establecer una conexión con tierra. Los conductores no aislados, colocados en contacto con tierra para la conexión al electrodo, se considerarán parte de éste.*

Feeder negativo: *Cable a tensión negativa que se usa para el retorno de la corrientes en los sistemas duales.*

Feeder positivo: *Cable que se añade como conductor de refuerzo sólo en los casos en que es necesario. Su uso permite reducir la impedancia, y aumentar el límite de corriente admisible de la catenaria.*

Feeder de retorno: *Cable destinado a reducir pérdidas de tensión en la línea. Es un cable que se usa para disminuir la resistencia del circuito de retorno en líneas electrificadas donde éste tiene un valor óhmico alto, sobre todo por el uso de barras cortas de carril no soldadas, y la gran distancia existente entre subestaciones de tracción.*

Hilo de contacto: *Línea aérea de contacto o catenaria, que es el conductor en el que el pantógrafo hace contacto.*

Impedancia: *Cociente de la tensión en los bornes de un circuito entre la corriente que fluye por ellos. Esta definición sólo es aplicable a corrientes sinusoidales.*

Instalación de tierra: *Es el conjunto formado por electrodos y líneas de tierra de una instalación eléctrica.*

Interruptor automático: *Aparato de conexión capaz de establecer, de soportar e de interrumpir las corrientes en las condiciones normales del circuito, así como de establecer, de soportar durante un tiempo determinado y de interrumpir corrientes en condiciones anormales especificadas del circuito, tales como las del cortocircuito.*

Línea de fuga específica: *línea de fuga total dividida por la tensión más alta del equipo.*

Línea de tierra: *Es el conductor o conjunto de conductores que unen el electrodo de tierra con una parte de la instalación que se haya de poner a tierra, siempre y cuando los conductores estén fuera del terreno o colocados en él pero aislados del mismo.*

Material móvil: *Se le denomina de esta manera a todos los elementos que circulan por las vías como son los diferentes tipos de trenes, tanto de mercancías como de pasajeros, que circulan diariamente por la línea.*

Media tensión: *Se considera media tensión toda tensión nominal entre 1 kV y 55 kV.*

Nivel de aislamiento: *Para un aparato o material eléctrico determinado, característica definida por un conjunto de tensiones especificadas de su aislamiento.*

Para materiales cuya tensión más elevada para el material sea menor que 300 kV, el nivel de aislamiento está definido por las tensiones soportadas nominales a los impulsos de tipo rayo y las tensiones soportadas nominales a frecuencia industrial de corta duración.

Para materiales cuya tensión más elevada para el material sea igual o mayor que 300 kV, el nivel de aislamiento está definido por las tensiones soportadas nominales a los impulsos de tipo maniobra y rayo.

Pantógrafo: *Mecanismo articulado que transmite la energía eléctrica que a una locomotora proporcionándole la fuerza de tracción. Se sitúa en el techo de la unidad tractora y es regulable en altura de forma automática para poder alcanzar la catenaria independientemente de la altura a la que se encuentre el hilo conductor aéreo.*

Existen pantógrafos de diferentes tensiones eléctricas variando el metal de contacto con la catenaria según la tensión a la que esté sometido, desde los más antiguos que eran de doble brazo hasta los más modernos "monobrazos", adaptados para velocidades muy altas.

Poder de conexión: *La mayor corriente que un aparato es capaz de cerrar a una temperatura dada y en las condiciones prescritas de empleo y funcionamiento sin deteriorarse ni dar origen a manifestaciones externas excesivas.*

Poder de ruptura: *La mayor intensidad de corriente que es capaz de cortar en unas condiciones de empleo dadas.*

Potencia al cierre: *Valor máximo de la potencia que pueden soportar los contactos del relé en el momento del cierre de los mismos.*

Potencia permanente admisible: *es el valor máximo de la potencia que pueden soportar los circuitos del relé.*

Procedimiento de Operación: *Procedimientos de carácter técnico e instrumental necesarios para realizar la adecuada gestión técnica de los sistemas eléctricos insulares y extra peninsulares.*

Redes de transporte de compañía: *Son las redes de transporte y distribución propiedad de una empresa distribuidora de energía eléctrica.*

Reenganche automático: *Secuencia de maniobras por las que, a continuación de una apertura, se cierra automáticamente un aparato mecánico de conexión después de un tiempo predeterminado.*

Resistencia de tierra: *Es la resistencia entre un conductor puesto a tierra y un punto de potencial cero.*

Seccionador: *Aparato mecánico de conexión que, por razones de seguridad, en posición abierto asegura una distancia de seccionamiento que satisface unas condiciones específicas de aislamiento.*

Nota: un seccionador es capaz de abrir y cerrar un circuito cuando es despreciable la corriente a interrumpir o a establecer, o bien cuando no se produce un cambio apreciable de tensión en los bornes de cada uno de los polos del seccionador. Es también capaz de soportar corrientes de paso, en las condiciones normales del circuito, así como durante un tiempo especificado en condiciones anormales, tales como las de cortocircuito.

Sobretensión: *Tensión anormal existente entre dos puntos de una instalación eléctrica, superior al valor máximo que puede existir entre ellos en servicio normal.*

Sustentador: *Es el conductor que se diseña para soportar el peso del hilo de contacto a través de las péndolas.*

Switch: *Es un dispositivo digital de lógica de interconexión de redes de computadores que opera en la capa 2 (nivel de enlace de datos) del modelo OSI. Su función es interconectar dos o más segmentos de red, de manera similar a los puentes, pasando datos de un segmento a otro.*

Tensión: *Diferencia de potencial entre dos puntos. En los sistemas de corriente alterna se expresará por su valor eficaz, salvo indicación en contra.*

Tensión asignada de un cable U_o/U: *Tensión para la que se ha diseñado el cable y sus accesorios. U_o es la tensión nominal eficaz a frecuencia industrial entre cada conductor y la pantalla del cable y U es la tensión nominal eficaz a frecuencia industrial entre dos conductores cualesquiera.*

Tensión de paso: *Es la parte de la tensión a tierra que aparece en caso de un defecto a tierra entre dos puntos del terreno separados a un metro.*

Tensión de suministro: *Es el valor o valores de la tensión que constan en los contratos que se establecen con los usuarios y que sirven de referencia para la comprobación de la regularidad en el suministro. La tensión de suministro puede tener varios valores distintos en los diversos sectores de una misma red, según la situación de éstos y demás circunstancias.*

Tensión nominal: *Valor convencional de la tensión con la que se denomina un sistema o instalación y para el que ha sido previsto su funcionamiento y aislamiento. La tensión nominal se expresa en kilovoltios.*

***Tensión soportada nominal a los impulsos tipo maniobra o tipo rayo**: Es el valor de la cresta de la tensión soportada a los impulsos tipo maniobra o tipo rayo prescrita para un material, el cual caracteriza el aislamiento de este material en lo relativo a los ensayos de tensión soportada.*

***Tensión soportada nominal a frecuencia industrial:** Es el valor eficaz más elevado de una tensión alterna sinusoidal, a frecuencia industrial que el material considerado debe ser capaz de soportar, sin perforación ni contorneamiento, durante los ensayos realizados en las condiciones especificadas.*

***Tensión permanente admisible:** Valor máximo de la tensión que puede soportar la bobina de un relé, o los contactos del mismo, en un tiempo especificado.*

***Tierra:** Es la masa conductora de la tierra en la que el potencial eléctrico en cada punto se toma, convencionalmente, igual a cero, o todo conductor unido a ella por una impedancia despreciable.*

***Traviesa polivalente**: Traviesa que permite la fijación de los dos hilos de carril en dos posiciones distintas, quedando en una de ellas la vía con ancho nacional y en la otra con ancho internacional.*

***Vano de una línea:** Distancia entre dos apoyos consecutivos de una línea eléctrica.*

1.2. Abreviaturas, símbolos y siglas

ADIF	*Administrador de Infraestructuras Ferroviarias*
AV	*Alta velocidad*
AT	*Alta tensión*
BT	*Baja tensión*
ETI	Especi*ficación Técnica de Interoperabilidad*
MT	*Media tensión*
PO	*Procedimiento de operación*
POL	*Puestos de operación local*
REBT	*Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión*
REE	*Red Eléctrica Española*
SCNF	*Société Nationale des Chemins de Fer Français*
SF6	*Hexafluoruro de Azufre*
SICD	*Sistema integrado de control distribuido*
SSAA	*Servicios auxiliares*
UCPA	*Unidad de control de puesto de autotransformación*
UCP	*Unidad de control de posición*
UCS	*Unidad de control de la subestación*
UIC	*International Union of Railways*
Vcc	*Tensión continua*
Vca	*Tensión alterna*

2. Introducción

2.1. Objetivos del proyecto

La elaboración del presente proyecto tiene por objeto el diseño de las subestaciones eléctricas de tracción y centros de autotransformación asociados de una línea ferroviaria de 190 km en ancho ibérico para transporte de pasajeros y mercancías. El sistema de electrificación será el 2x25 kVca con catenaria apta para velocidades de 250 km/h. El sistema consta de dos subestaciones de tracción conectadas a la red de alta tensión, diez centros de autotransformación intermedios y uno final.

2.2. Alcance del proyecto

El alcance del proyecto de cada subestación de tracción y centro de autotransformación comienza en los pórticos de entrada de cada instalación y termina en los pórticos de salida a catenaria y *feeder*. Dentro de este ámbito, se incluye la definición de toda la aparamenta eléctrica, tanto de exterior como de interior, y a todos los niveles de tensión con excepción de los sistemas de baja tensión como mecanismos, seccionadores o calefacción asociados a los equipos. Entre los servicios auxiliares se definirán el alumbrado, la red de tierras y la instalación de protección contra descargas atmosféricas.

No es objeto del proyecto la obra civil asociada (definición del emplazamiento de la obra con sus redes de saneamiento, urbanización, caminos de acceso, edificio técnico, cimentaciones, etc.), el sistema de mando, control y protecciones (incluido la medida y control de la energía), así como los servicios auxiliares de ventilación, climatización, instalaciones de seguridad y protección contra incendios. No obstante, se realizará una breve descripción y se especificará su funcionalidad.

El emplazamiento y el número de centros necesarios así como la potencia necesaria a instalar para la línea con el sistema de electrificación 2x25 kVca se obtienen del estudio de dimensionamiento eléctrico de la línea ferroviaria, que no es objeto del presente proyecto.

En el diseño se tendrá en consideración el reglamento y las normas vigentes así como las especificaciones técnicas establecidas por el suministrador de energía, Red Eléctrica Española (REE), y por el futuro explotador de la línea, ADIF.

3. Electrificación de líneas ferroviarias

3.1. Generalidades

En este capítulo se describe la electrificación: su estructura, los elementos que la componen, su función y los diversos sistemas existentes.

Un sistema de electrificación ferroviaria comprende todos los elementos que hacen posible que la energía eléctrica llegue al material móvil [1], con la potencia necesaria para que éste pueda alcanzar las prestaciones para las que ha sido diseñado, dentro de los criterios de explotación prescritos.

Así pues, un sistema de electrificación puede dividirse en los siguientes grandes bloques:

- Líneas de alta tensión para la alimentación del sistema desde la red de transporte.
- Subestaciones transformadoras y/o acondicionadoras de la tensión.
- Líneas de alimentación de energía al material móvil y circuito de retorno.

La Fig. 3.1 muestra la estructura básica del sistema de electrificación de los ferrocarriles.

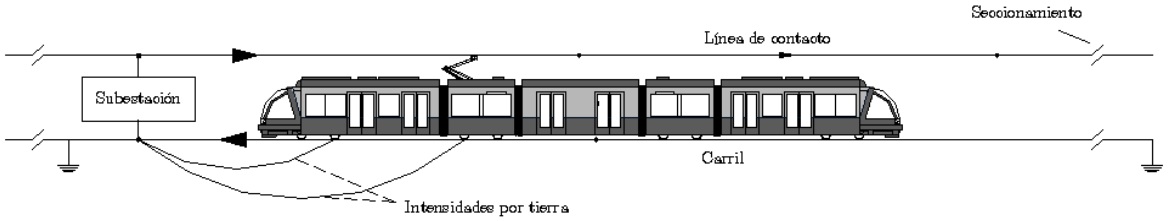

Fig. 3.1 Sistema de electrificación

3.2. Estructura

Desde un punto de vista eléctrico, la línea de ferrocarril se haya dividida en tramos eléctricamente separados los unos de los otros por tramos cortos sin alimentación que reciben el nombre de zonas neutras. Las zonas neutras han de colocarse en zonas lo más llanas posibles, de forma que el tren no pierda excesiva velocidad en el tramo sin tensión.

Cada uno de estos tramos es alimentado desde la red trifásica de alta tensión a través de una subestación de tracción (SET). Generalmente una misma subestación de tracción

suele alimentar a dos de estos tramos, denominados cantones, a partir de cada uno de los transformadores de potencia. Se define un cantón como cada uno de los tramos de la línea separado eléctricamente del otro.

Si un tren circula con varios pantógrafos subidos y éstos se encuentran conectados eléctricamente, la distancia que ha de existir entre los dos más lejanos tiene que ser menor que la longitud de la zona neutra pues de lo contrario se podría conectar las catenarias de diferentes fases produciendo un cortocircuito. Un valor aproximado de la longitud de la zona neutra en alta velocidad es de 400 m, según el valor indicado en las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad (ETI), aunque en la línea Madrid–Barcelona–Francia es de 192 m.

Si bien en la actualidad los sistemas de corriente continua no necesitan de este tipo de estructura, pudiéndose conectar las subestaciones de tracción en paralelo, antiguamente en España se realizaba una alimentación en corriente continua a 1.500 V de manera que cuando se comenzó a introducir la tensión a 3.000 Vcc se dio el caso de líneas férreas en las que coexistieron ambas tensiones teniendo también que proyectar zonas neutras o "zonas de separación de tensiones". Cabría destacar aquí que en la línea de alta velocidad Madrid–Sevilla han existido dos zonas de separación de tensiones en las inmediaciones de las estaciones de Madrid - Puerta de Atocha (aún operativa) y Sevilla - Santa Justa (desaparecida hace unos meses). Estas zonas separan tensiones de 3.000 Vcc (tensión de las estaciones) y 25 kV en corriente alterna (tensión de la línea).

3.3. Subestaciones de tracción

La subestación de tracción es la instalación en la que se realiza la conexión de los tramos de la electrificación a 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 los sistemas de corriente continua.

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

Generalmente las subestaciones de tracción presentan una topología en barra simple (ver Fig. 3.2). Dicha topología proporciona un coste inferior al de otras opciones, a la vez que

proporciona una flexibilidad de operación suficiente a la subestación. No obstante, en aquellos casos en los que se alimente a varias líneas desde una misma subestación, es aconsejable el uso de topologías más complejas (en anillo o en doble barra). En algunos casos, si se desea optimizar el espacio utilizado o por facilidades en el mantenimiento o control, es posible reunir la subestación de tracción y la de transporte o distribución en una misma instalación.

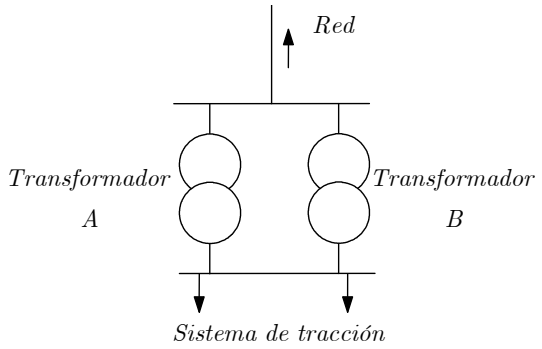

Fig. 3.2 Topología en barra simple

Las subestaciones de tracción se controlan desde el centro de control mediante un sistema de telemando. Esto permite realizar maniobras en varias SET de forma coordinada, para adaptar la topología de la electrificación a las necesidades.

En la subestación de tracción se instalan además instrumentos de medida, así como los elementos de protección necesarios para garantizar la seguridad de la instalación frente a elevadas subidas tensión o de corriente (cortocircuitos).

3.4. Circuito de tracción

Se suele denominar catenaria o circuito de tracción al conjunto de conductores que es necesario instalar a lo largo de la línea para realizar el transporte de la energía eléctrica (ver [2]). No obstante, en el presente proyecto se denominará catenaria únicamente al conjunto de conductores que están a tensión positiva y el circuito de tracción se referirá al conjunto de todos los conductores. Los conductores habituales en un circuito de tracción se muestran en la Fig. 3.3.

Dentro de los conductores que están a tensión positiva (catenaria), se encuentran:

- Hilo de contacto o línea aérea de contacto, que es el conductor en el que el pantógrafo hace contacto. Este conductor debe estar en una superficie paralela a la vía, para facilitar la captación de corriente. Se suelen emplear conductores de cobre.
- Sustentador, que es el conductor que se diseña para soportar el peso del hilo de contacto a través de las péndolas. Se suelen emplear conductores de cobre.
- *Feeder* positivo, que se añade como conductor de refuerzo sólo en los casos en que es necesario. Su uso permite reducir la impedancia, y aumentar el límite de corriente admisible de la catenaria. Se suelen emplear conductores de aluminio con alma de acero.

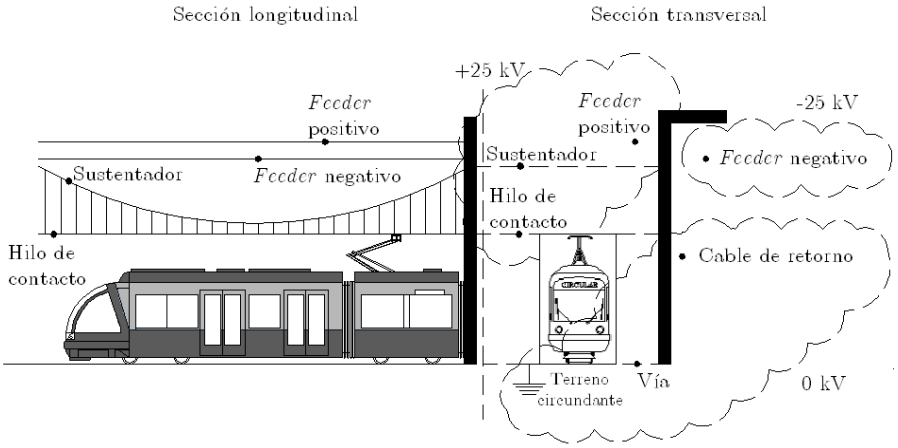

Fig. 3.3 Configuración del sistema de tracción

Como conductores de neutro, se encuentran:

- Carriles, raíles o vías, que además de servir de punto de apoyo del tren, sirven de captadores de las corrientes que salen de los trenes. Dichos conductores son de acero.
- Cables de retorno, que se usan como refuerzo de las vías. Debido a su menor impedancia, recogen la mayor parte de las corrientes de retorno, alejándolas de las vías. De este modo es posible reducir las perturbaciones que las corrientes de retorno pueden producir en algunos sistemas de señalización que también emplean las vías. Se suelen emplear conductores de aluminio con alma de acero.

Como conductor negativo, en sistemas de corriente alterna duales, se tiene el *feeder* negativo, que se usa para configurar el circuito de retorno de las corrientes. Debido a que gran parte del retorno de corriente se realiza por el *feeder* negativo, permite reducir las perturbaciones electromagnéticas. Se suelen emplear conductores de aluminio con alma de acero.

3.5. Sistemas de electrificación

La distinción de los distintos tipos de electrificación se realiza a partir del tipo de corriente suministrada al material móvil:

- Electrificación en corriente continua.
- Electrificación en corriente alterna.

En España, las tensiones de electrificación para líneas de larga distancia son de 3.000 V en corriente continua y 25 kV en corriente alterna.

3.5.1. Sistemas de electrificación en corriente continua

El principio de diseño está basado en la utilización del mejor motor de tracción existente en el momento de su desarrollo (el motor de corriente continua), condicionando al resto del sistema.

Las líneas de alimentación derivan directamente de la red eléctrica nacional, siendo acondicionada y transformada la tensión de alimentación en la subestación de tracción. Estas subestaciones están formadas por grupos rectificadores, y espaciadas aproximadamente entre 10 y 20 km, dependiendo del tráfico y del perfil de la vía.

La línea aérea de contacto es de sección elevada, pues la potencia demandada por la tracción y las bajas tensiones de alimentación obligan a tener elevadas intensidades de suministro.

3.5.1.1. Sistema 1x3.000 Vcc

El sistema 1x3.000 Vcc es el sistema más simple y comúnmente utilizado en líneas convencionales en España [3]. Como su nombre indica está alimentado por una única línea aérea de contacto de 3.000 Vcc. Tiene el inconveniente de las altas intensidades de circulación y de las importantes caídas de tensión que resultan.

Para mejorar estas características se suele recurrir en la actualidad a las siguientes soluciones:

- La utilización del *feeder* positivo.
- En tramos de doble vía, la conexión en paralelo de la catenaria de ambas vías.
- La instalación de nuevas subestaciones intermedias.

En los casos en que la utilización de *feeder* positivo o la conexión en paralelo de las vías no sea suficiente, se debe recurrir a la tercera solución que consiste en la disminución de la distancia entre subestaciones. Esta solución no siempre es aplicable dependiendo de la disponibilidad de conexión a la red eléctrica de la compañía suministradora.

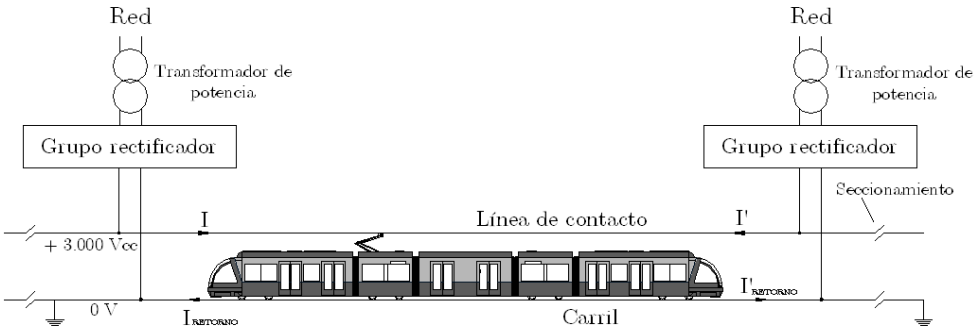

Fig. 3.4 Cantón de un sistema 1x3.000 Vcc

En este sistema, la catenaria está seccionada en tramos o cantones eléctricos, definidos por el seccionamiento de la línea. Cada cantón está alimentado por dos grupos transformadores-rectificadores de tracción, como se muestra en la Fig. 3.4. Estos rectificadores son unilineales ya que están basados en diodos. La alimentación de la línea es bilateral, o sea que el tren recibe su corriente de las dos subestaciones que le rodean.

El retorno de corriente se realiza mayoritariamente a través de los carriles.

3.5.1.2. Sistema 2x3.000 Vcc

Se está estudiando la implementación de este sistema ya que permite aumentar la distancia entre subestaciones respecto al sistema convencional, que para el caso de las líneas convencionales en España es de 1x3.000 Vcc.

Dentro de las características más importantes del sistema de 2x3.000 Vcc, se destaca que el *feeder* negativo es llevado a un potencial diferente que la catenaria y su alimentación se

realiza a través de nuevos grupos transformador-rectificador instalados en las subestaciones existentes. La corriente retorna por el *feeder* negativo y, parcialmente, por el carril.

Por cada tramo de línea, el sistema se completa con, al menos, un convertidor continua/continua. Gracias a éste, una parte de la energía es transportada a una tensión el doble que la tensión de catenaria. Esto hace que, en algunas secciones del circuito, la corriente sea más baja que en la solución clásica de refuerzo mediante *feeder* positivo, las caídas de tensión son minimizadas y el rendimiento mejora.

En consecuencia el material móvil de las líneas electrificadas a 3.000 Vcc podrá trabajar indistintamente en los dos sistemas indicados; 1x3.000 Vcc y 2x3.000 Vcc.

3.5.1.3. Comparativa de los sistemas de 1x3.000 Vcc y de 2x3.000 Vcc

En la Tabla 3-1 se resume la comparación entre los dos sistemas de corriente continua.

Tabla 3-1 Comparativa de los sistemas de corriente continua

	1x3.000 Vcc	**2x3.000 Vcc**
Líneas de alimentación	Tensión ≤ 66 kV No se producen desequilibrios en la red	Tensión ≤ 66 kV No se producen desequilibrios en la red
Subestaciones	Simples con 1 ó 2 grupos rectificadores dodecafásicos	Complejas con 1 ó 2 grupos rectificadores dobles (±3 kV) Salidas *feeder* con doble circuito
Distancia entre subestaciones	10 a 20 km	20 a 30 km
Equipamientos especiales	No necesarios	Extrarrápidos con capacidad de corte ante defectos entre la catenaria y el feeder negativo Equipos convertidores CC/CC
Composición catenaria	Sustentador de línea aérea de contacto y 1 hilo de contacto *Feeder* positivo	Sustentador de línea aérea de contacto y 2 hilos de contacto *Feeder* positivo *Feeder* negativo

	1x3.000 Vcc	2x3.000 Vcc
Protecciones	Riesgo de corrosión en estructuras metálicas enterradas	Riesgo de corrosión en estructuras metálicas enterradas
Robustez y fiabilidad del sistema	Sistema con gran número de instalaciones en funcionamiento	No existen instalaciones que puedan dar información sobre la robustez y fiabilidad de este sistema

El sistema 2x3.000 Vcc se encuentra en fase de experimentación, y su desarrollo ha sido impulsado por la necesidad de una solución alternativa en tramos de alta frecuencia de circulación y fuerte demanda energética, y donde las soluciones convencionales son difícilmente implementables. En este sentido, no se trata de un sistema de electrificación propiamente dicho.

La empresa SNCF, pionera en la explotación de líneas de alta velocidad, está estudiando este sistema en una plataforma de pruebas para una tensión de electrificación de 1x1500 Vcc, con lo que el nivel de tensión entre la catenaria y el *feeder* negativo es de 3.000 Vcc, nivel de tensión habitual en redes de tracción. Mientras que el sistema de 2x3.000 Vcc, el nivel de tensión entre la catenaria y el *feeder* negativo es 6000 Vcc. Esta tensión no es habitual en redes de tracción, por lo tanto no existe material con los requisitos técnicos necesarios para este nivel de tensión.

3.5.1.4. Conclusiones

Así pues, una vez analizados los dos sistemas de electrificación en corriente continua 1x3.000 Vcc y 2x3.000 Vcc, se establece que para la línea de alta velocidad se descarta la utilización del sistema 1x3.000 Vcc debido a:

- Grandes pérdidas en una línea ferroviaria de gran longitud.
- Sistema poco adecuado para las potencias requeridas en alta velocidad.
- Gran número de instalaciones en funcionamiento.

Así como también se descarta el uso del sistema 2x3.000 Vcc por:

- Desconocerse su robustez y su fiabilidad.

- La dificultad del suministro de equipos con los requisitos técnicos necesarios, así como sus posibles inconvenientes.

3.5.2. Sistemas de electrificación en corriente alterna

La normativa europea ferroviaria (ETI) establece como valores usuales de diseño 15 y 25 kVca de tensión de alimentación al material rodante. La electrificación en corriente alterna a 25 kVca es la más utilizada en líneas de ferrocarril de alta velocidad (ver [4]).

No obstante, en Alemania se sigue alimentando las líneas a 15 kVca. La frecuencia industrial usual es de 50 Hz, aunque en algunas líneas de alta velocidad en Japón y Corea del Sur se emplean los 60 Hz.

El sistema de electrificación ferroviaria para el desarrollo de la alta velocidad plantea una serie de problemas, derivados de la elevada potencia requerida y de la captación de la corriente.

En cuanto a la elevada potencia instalada requerida:

- Cuanta más velocidad de circulación, mayor potencia necesaria.
- Potencia total instalada por tren 10-12 MW.
- La velocidad efectiva de circulación es prácticamente la permitida por la potencia instalada.

En cuanto a la elevada corriente requerida:

- La necesidad de optimizar el contacto entre el pantógrafo y la catenaria y, por tanto, la necesidad de una línea aérea de contacto de reducida masa lineal.
- Binomio potencia demandada-límite de corriente de circulación; sólo satisfecho por los sistemas de electrificación ferroviaria con tensiones de alimentación elevadas.

Otro gran inconveniente existente reside en que el sistema de electrificación ferroviario en tensión monofásica 25 kVca se caracteriza por ser fuente de perturbaciones como consecuencia de sus propias características intrínsecas de funcionamiento:

- Carga monofásica variable en el espacio.
- Carga monofásica variable en el tiempo.

- Constitución de la carga, en particular la electrónica de potencia que equipan los vehículos motores.

De esta forma, si bien en tracción ferroviaria la corriente alterna ofrece ventajas sobre la corriente continua (tan evidentes como la facilidad de transformación de tensiones mediante los transformadores y como consecuencia, la facilidad de transportar grandes potencias con bajas intensidades), también como inconveniente está su propiedad de inducir tensiones en conductores paralelos.

Aunque en la utilización normal de la corriente alterna (sistemas trifásicos de generación y transporte) las inducciones de cada fase se ven compensadas por las de las otras, en el sistema de electrificación de corriente alterna no sucede por lo que se produce una contaminación electromagnética que puede ser importante y en ocasiones peligrosa, al menos para las instalaciones próximas (señalización, comunicaciones, etcétera).

Las perturbaciones producidas, según su afección, pueden clasificarse en dos grupos:

- Perturbaciones inducidas sobre la red pública de alimentación.
- Perturbaciones inducidas en el entorno de la electrificación.

Con relación a las perturbaciones inducidas en la red pública, los efectos y orígenes de dichas perturbaciones son los siguientes:

- Desequilibrios de tensión en la red, originados por el carácter de la carga monofásica.
- Corrientes armónicas y como consecuencia tensiones armónicas (distorsión armónica). Se originan por los equipos, principalmente los electrónicos, integrantes del material motor y en los arcos eléctricos producidos en la interacción entre el pantógrafo y la línea aérea de contacto. La distorsión armónica afecta a las características de tensión de la red, deteriorando la calidad del servicio, en especial a los usuarios con aparatos eléctricos y electrónicos sensibles a las deformaciones de la onda de tensión.
- Fluctuaciones de tensión en la red. Tiene su origen en las variaciones del régimen de la carga (aleatoriedad de las circulaciones de los trenes y variabilidad de la potencia demandada por cada uno de ellos). Las fluctuaciones de tensión provocan variaciones en la tensión de alimentación a los usuarios próximos al punto de conexión común, es decir, próximos a la subestación de tracción.

- Huecos de tensión. Son provocados por defectos en el circuito de tracción (cortocircuitos), originando efectos nocivos que pueden llegar a ser inaceptables por los demás usuarios conectados en el entorno del punto de conexión común.

El origen de las perturbaciones en el entorno de la electrificación se centra en el circuito de tracción o en sus componentes. La perturbación más usual es la producida por la línea aérea de contacto a 25 kV, pues crea un campo electrostático e induce en los conductores próximos a él, según estén aislados o conectados a tierra, una tensión o una carga electrostática respectivamente.

Las distintas soluciones técnicas desarrolladas para utilizar el sistema de electrificación ferroviaria en corriente alterna (solución 1x25 y 2x25 kV) se configuran para paliar, en mayor o menor grado, las perturbaciones intrínsecas al propio sistema, excluyendo las que afectan a la explotación ferroviaria (fluctuaciones de tensión de red y huecos de tensión) o a las características y funcionalidades de los equipos integrantes del material motor (distorsión armónica). En resumen, el análisis se concentra en las perturbaciones producidas en el entorno ferroviario.

Por lo que se refiere a la electrificación a 25 kVca y 50 Hz, el sistema 1x25 kVca fue el predominante en sus inicios. Como referencia sirva la empresa SNFC, que electrificó la línea *LGV Sud-Est* (París-Lyon) con este sistema. En España, se tiene el precedente de la línea de alta velocidad Madrid–Sevilla también a 1x25 kVca.

Con el transcurso del tiempo, este sistema ha ido dejando paso al 2x25 kVca, hasta llegar a ser la tendencia predominante en Europa en la actualidad, debido a las ventajas en términos de reducción de las corrientes circulantes en catenaria (disminución de las pérdidas de potencia y de las caídas de tensión) y de reducción de las perturbaciones electromagnéticas generadas al entorno.

3.5.2.1. Sistema 1x25 kVca

El sistema 1x25 kVca simple se caracteriza por disponer de subestaciones de tracción con transformadores monofásicos de relación AT/25 kV, conectados a una red eléctrica de alta tensión, debido a la necesidad de una alta potencia de cortocircuito y una alta fiabilidad en el suministro. Típicamente se conectan a redes de 132 kV, 220 kV ó 400 kV.

La catenaria, al igual que sucede en los demás sistemas de alimentación, está seccionada en tramos o cantones eléctricos. El objetivo es que cada cantón pueda ser alimentado por

uno de los dos transformadores de potencia instalados en cada SET, conectándolos a una fase diferente a la de los cantones contiguos, tal y como se muestra en la Fig. 3.5. De esta manera se intenta que el desequilibrio generado a la red de transporte sea el mínimo posible.

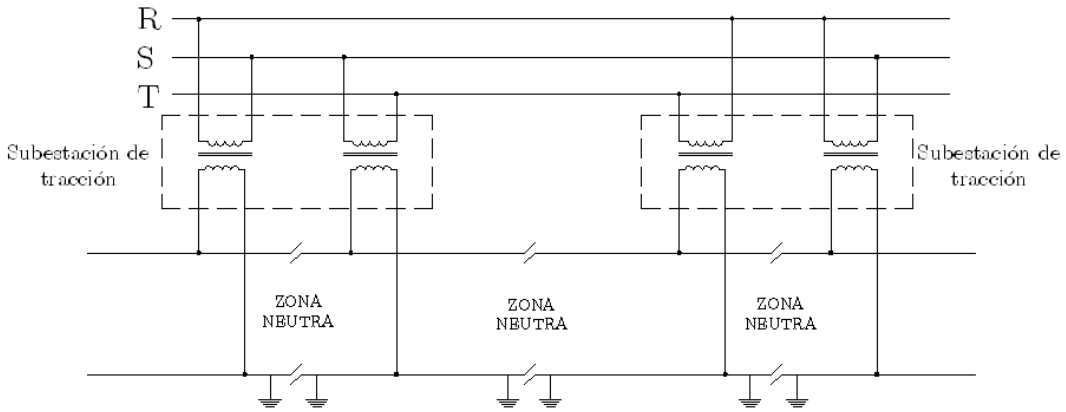

Fig. 3.5 Conexionado subestaciones de un sistema de corriente alterna

Dicho cantonamiento se realiza mediante la existencia, a la altura de cada SET, de una zona neutra de separación de fases (zona neutra de subestación), para evitar que el material móvil pueda cortocircuitar la catenaria con los pantógrafos delantero y posterior. También, en los puntos intermedios entre dos SET, existirán zonas neutras para aislar eléctricamente los tramos alimentados por los diferentes transformadores de cada SET (zona neutra entre subestaciones).

El retorno de corriente se realiza mayoritariamente a través de los carriles. Se calcula que del orden del 70 % de la corriente retorna por el carril, mientras que un 10 % lo hace por capas profundas del terreno y un 20 % por capas más superficiales, pudiendo penetrar nuevamente en los carriles. La distribución de corrientes se muestra en la Fig. 3.6.

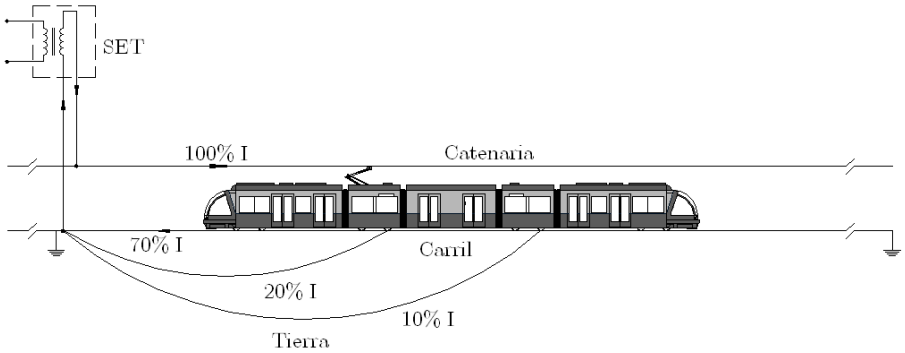

Fig. 3.6 Distribución de corriente en el sistema 1x25 kVca

Con objetivo de disminuir las perturbaciones conducidas de carácter resistivo y las electromagnéticas, se implementa un circuito con cable de retorno (ver Fig. 3.7).

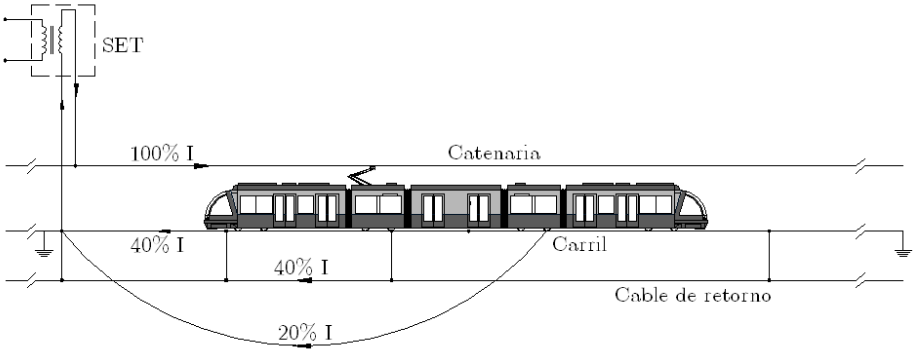

Fig. 3.7 . Sistema 1x25 kVca con cable de retorno

Adicionalmente, también se pueden añadir transformadores de succión (*Booster*) resultando el sistema de la Fig. 3.8, sin embargo la instalación de éstos transformadores tiene el inconveniente de aumentar la impedancia del circuito de tracción, implicando una disminución de la distancia máxima entre SET.

Al seccionar la catenaria cada 3-8 km se obliga a la corriente a circular por el devanado primario de los transformadores *Booster*, que tienen una relación de transformación de tensiones 1:1, situados a lo largo de la línea. El secundario del transformador se conecta al cable de retorno y permite anular la corriente en la posición dónde esté conectada la carga (el material móvil), repartiendo parte de la corriente de los carriles y tierra hacía el cable de retorno.

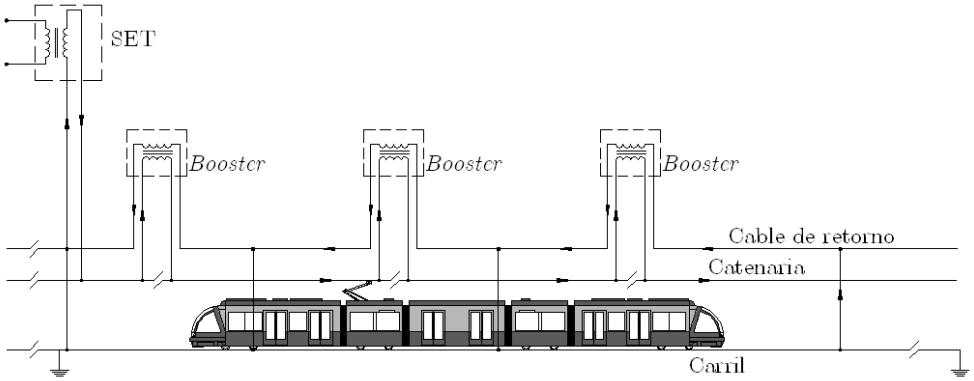

Fig. 3.8 . Sistema 1x25 kVca con cable de retorno y *Booster*

3.5.2.2. Sistema 2x25 kVca

El sistema 2x25 kVca, también denominado sistema bifásico en corriente alterna, supone una sofisticación tecnológica importante respecto al 1x25 kVca, ya que soluciona algunos de sus principales inconvenientes, y se está convirtiendo en la opción más utilizada a nivel internacional.

Se caracteriza por la existencia de dos conductores, uno es la catenaria y el otro es el *feeder* negativo (en este proyecto no hay *feeder* positivo, por lo cual nos referiremos siempre al negativo), destinados a la alimentación del material móvil, y de la vía. La tensión entre cada uno de estos conductores y la vía es de 25 kV, estando ambas tensiones desfasadas 180º. Para la alimentación del sistema se dispone de subestaciones de tracción (SET) con dos transformadores monofásicos iguales en cada una, cuyo primario de cada uno se conecta entre dos fases diferentes de la red eléctrica de alta tensión, 220 kV ó 400 kV. El secundario de los transformadores es de 55 kV y tiene una toma intermedia, resultando dos secundarios de 27,5 kV, estos valores superan a los valores teóricos de 50 kV y 25 kV para compensar las posibles caídas de tensión que se dan a lo largo de la línea. Una toma extrema se conecta a la catenaria y la otra al *feeder* negativo, mientras que la toma media se conecta a la vía. Esta conexión a la vía hace que en las tomas extremas aparezcan las tensiones comentadas anteriormente.

El material móvil (trenes, unidades tractoras, etc.) de las líneas electrificadas a 2x25 kVca está alimentado a una tensión nominal de 25 kV entre la catenaria y la vía. Por lo tanto, este material puede trabajar indistintamente en sistemas de 1x25 kVca ó 2x25 kVca.

El cantonamiento (división de la línea en diferentes tramos-cantones) de de los conductores y la vía responde a los mismos criterios que en el sistema 1x25 kVca.

Para que el sistema 2x25 kVca pueda funcionar, son necesarios una serie de centros de autotransformación distribuidos a lo largo del trazado, típicamente cada 10 ó 15 km. Las tomas de los autotransformadores se conectan a la catenaria y al *feeder* negativo, y la toma media a la vía y a tierra.

La función de estos centros de autotransformación es evitar el retorno de corriente por la vía en los tramos donde no circula el tren. Esto se consigue redistribuyendo las intensidades de retorno que penetran por la toma media de los autotransformadores hacia el *feeder* negativo, el cual se convierte así en el cable de retorno de la intensidad principal.

En la Fig. 3.9 se presenta un cantón del sistema 2x25 kVca que se alimenta a partir de la SET y en el que se han conectado dos centros de autotransformación intermedios y uno final.

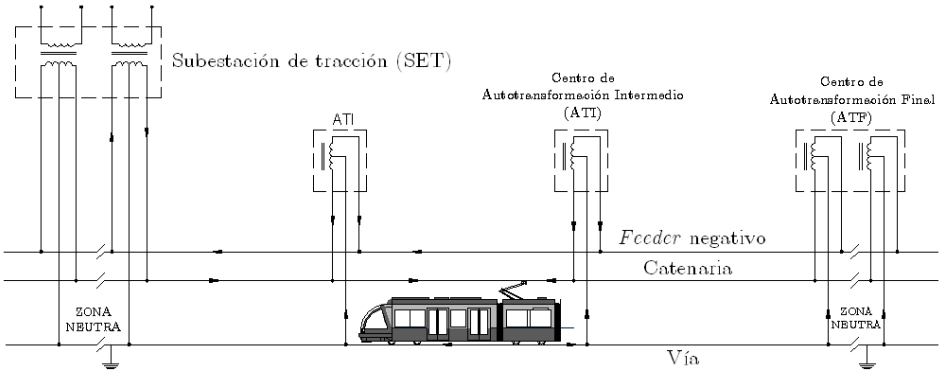

Fig. 3.9 Sistema 2x25 kVca

Los centros de autotransformación serán de tipo "intermedio" cuando estén en un punto intermedio de un cantón, o de tipo "final" cuando se encuentren situados en el final, en la zona neutra entre subestaciones de tracción.

La distribución de las intensidades se muestra en la Fig. 3.10, donde se ha supuesto que tanto los transformadores de potencia de las SET, los autotransformadores como los conductores son ideales.

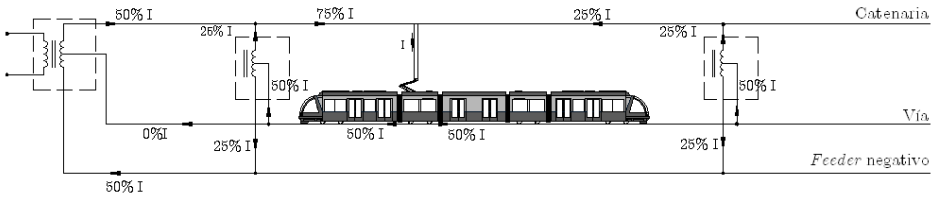

Fig. 3.10 Distribución de intensidades del sistema 2x25 kVca

En la Fig. 3.10 se puede observar cómo la intensidad de retorno por el carril queda limitada al tramo comprendido entre los autotransformadores en los que se encuentra el tren. Los autotransformadores obligan a la intensidad a retornar por el *feeder* negativo en el resto de tramos hasta la SET.

El sistema no es ideal sino que aunque el autotransformador distribuye la intensidad en dos partes prácticamente iguales, existe una pequeña desigualdad que viene originada por la caída de tensión en el arrollamiento, que se procura que sea muy pequeña, del orden del

1%. También debido a la impedancia de fuga de los devanados del autotransformador y al hecho que su potencia es limitada, la intensidad de tracción es suministrada también desde los autotransformadores distantes, lo que supone que circule corriente por los carriles en toda la sección de suministro eléctrico. Una parte de esa corriente pasará a tierra, que es la que causa problemas de inducción en las líneas de telecomunicaciones cercanas, aunque en menor medida que en el sistema 1x25 kVca.

Otra consideración importante es que el sistema funciona a 50 kV, por lo que a igualdad de potencia demandada por el material móvil, la corriente que circula por la catenaria se reduce a prácticamente la mitad que en el sistema de 1x25 kVca, por lo que la caída de tensión también se ve reducida aproximadamente a la mitad y las subestaciones de tracción pueden distanciarse aproximadamente el doble que en el sistema de 1x25 kVca.

3.5.2.3. Comparativa de los sistemas de 1x25 y de 2x25 kVca

En la Tabla 3-2 se resume la comparación entre los dos sistemas de alimentación más utilizados en la alta velocidad.

Tabla 3-2 Comparativa de los sistemas de corriente alterna

	1x25 kVca	**2x25 kVca**
Potencia instalada	2x30 MVA (habitualmente)	2x60 MVA (habitualmente)
Condiciones de conexión	Necesidad de línea eléctrica de tensión elevada (≥132 kV) o con suficientes puntos de conexión	Posibilidad de líneas de transporte relativamente alejadas o con pocos puntos de conexión, pero con potencias de cortocircuito elevadas (tensión ≥220 kV)
Configuraciones constructivas	Simplicidad de subestación Necesidad de conductor de retorno y/o *Booster* para disminuir la corriente de retorno, los cuales aumentan la impedancia implicando una	Complejidad de subestaciones Los autotransformadores aumentan las pérdidas en vacío La menor impedancia permite aumentar la

	1x25 kVca	2x25 kVca
	disminución en la distancia entre subestaciones	distancia entre subestaciones
Desequilibrios en la red	Se reducen con la rotación de fases	Condicionados a la potencia de cortocircuito del punto de conexión Se reducen con la rotación de fases
Potencial carril-tierra	Relativamente elevado	Relativamente elevado Limitado al trayecto comprendido entre los autotransformadores donde está intercalado el tren
Perturbaciones inducidas por campos eléctricos	Se reducen poniendo a tierra los conductores susceptibles de ser afectados	Prácticamente nulas, por la oposición entre fases de tensión de la línea aérea de contacto y feeder negativo
Perturbaciones inducidas por campos magnéticos	Relativamente elevadas, paliadas en parte por el conductor de retorno	Reducidas por la oposición entre fases y limitado al tramo entre los autotransformadores entre los que se encuentra el tren

3.5.2.4. Conclusiones

De la Tabla 3-2 se deduce que para la línea de alta velocidad del presente proyecto, al haberse descartado la utilización de un sistema de corriente continua, el sistema recomendado será el 2x25 kVca, ya que este sistema resuelve la mayor parte de los inconvenientes del sistema de 1x25 kVca.

Prueba de ello es que el sistema 2x25 kV se ha convertido en la tendencia predominante en Europa, por la reducción de las corrientes circulantes en catenaria (disminución de las pérdidas de potencia y de las caídas de tensión) y por la reducción de las perturbaciones electromagnéticas generadas al entorno.

En este sentido, sirva como ejemplo línea *LGV Sud-Est* (París-Lyon), donde se está sustituyendo el sistema de electrificación de 1x25 kVca por el de 2x25 kVca, debido a problemas surgidos fundamentalmente con interferencias en las telecomunicaciones.

4. Descripción del sistema

4.1. Sistema de electrificación 2x25 kVca

Como ya se ha demostrado en el capítulo anterior, el sistema de alimentación eléctrica más apropiado para una línea de alta velocidad es el 2x25 kVca, para el cual se requiere la construcción de subestaciones de tracción y centros de autotransformación asociados a las mismas.

El sistema de alimentación se contempla con zonas neutras y autotransformadores intermedios y finales.

A cada SET le corresponde un área (dos cantones) que incluye los centros de autotransformación asociados, y que se define como el trayecto de catenaria que en modo de funcionamiento normal, no degradado, es alimentado por dicha subestación de tracción.

4.2. Descripción de la línea

La línea ferroviaria a electrificar tiene una longitud aproximada de 190 km entre las provincias de Zaragoza y Teruel, con una única vía para la circulación (en un futuro es posible que se añada otra vía), ancho ibérico sobre traviesa polivalente que permitirá un futuro cambio a ancho internacional (según la *Internationial Union of Railways*), por la que circularán vehículos de hasta 250 km/h y con un intervalo considerado de 15 min.

4.3. Dimensionamiento eléctrico

Como paso previo para la redacción del proyecto es necesario obtener el estudio de dimensionamiento eléctrico para la línea de alta velocidad con el fin de obtener la potencia necesaria de los transformadores de potencia y autotransformadores así como el emplazamiento de los diferentes centros. Dicho estudio se ha de realizar de acuerdo a la especificación técnica de interoperabilidad (ETI) de subestaciones de energía de la directiva europea de interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad.

El estudio de dimensionamiento eléctrico se realiza mediante programas de cálculo avanzados que tienen en consideración la frecuencia de paso de los trenes, la potencia de los mismos y la configuración del sistema (sistema 2x25 kVca, longitud de la línea, catenaria utilizada, etc.).

Debido a la complejidad de los cálculos y su envergadura, dicho estudio queda fuera del alcance del presente proyecto. No obstante, la potencia apropiada para los transformadores de potencia de las subestaciones de tracción de líneas de alta velocidad en sistemas 2x25 kVca, según las especificaciones técnicas de ADIF, es de 30 MVA. Mientras que la potencia apropiada de cada uno de los autotransformadores de los centros de autotransformación (ATI y ATF), según las especificaciones técnicas de ADIF, es de 10 MVA.

Se recuerda que para la línea del presente proyecto (190 km), según las especificaciones técnicas de ADIF, el sistema constará de dos subestaciones de tracción, diez centros de autotransformación intermedios y un centro de autotransformación final.

Mediante consulta externa a la empresa SENER, aplicando la potencia instalada especificada, se ha determinado que la potencia máxima demandada por el sistema se producirá en situación degradada con un único transformador de potencia disponible. En este caso, la máxima potencia demandada será de 24 MVA (21 MW), potencia perfectamente asumible por la otra subestación de tracción. También se ha determinado el emplazamiento aproximado los diferentes centros a lo largo de la línea.

4.4. Acometida y subestaciones de tracción

Se prevén 2 subestaciones de tracción (SET-1 y SET-2); ambas serán del tipo doble - bifásico, es decir, se alimentarán mediante dos fases y existirán dos acometidas por SET. Se alimentarán desde las subestaciones de transporte pertenecientes a la red de transporte española, propiedad de REE, mediante la instalación para cada una de ellas de dos acometidas trifásicas constituidas por conductores aéreos provenientes de sendas subestaciones de transporte anexa a cada una de las SET. No obstante, una de las tres fases de cada acometida, al ser un sistema bifásico, no alimentará a la subestación de tracción al terminar en el polo de entrada del seccionador tripolar del parque de AT de la subestación de tracción.

La SET-1 se alimentará a una tensión de 220 kV mientras que la SET-2 se alimentará a una tensión de 400 kV. Cada subestación de tracción dispondrá de dos transformadores de potencia monofásicos, de relación 220/2x27,5 kV ó 405/2x27,5 kV, según corresponda, con una potencia nominal de 30 MVA cada uno.

Antes de la ejecución de cada subestación de tracción, REE indicará cuales serán las dos fases de su sistema trifásico a las cuales se conectará el primario de los transformadores de potencia con objeto de no superarse los valores de desequilibrios de tensiones admitidos, conforme el procedimiento de operación PO 12.2 de REE [5].

4.5. Centros de autotransformación

A cada área perteneciente a una subestación de tracción se prevén 5 centros de autotransformación intermedios y un centro de autotransformación final situado en la zona neutra de separación de fases inter-subestaciones.

Cada centro de autotransformación intermedio dispondrá de dos autotransformadores monofásicos de potencia de relación 55/27,5 kV con una potencia nominal de 10 MVA. El centro de autotransformación final dispondrá de dos transformadores de las mismas características.

Las instalaciones correspondientes al área de la SET-1 son las siguientes:

- Centro de autotransformación intermedio, ATI 1.1, situado en el PK 0+000.
- Centro de autotransformación intermedio, ATI 1.2, situado en el PK: 15+000.
- Centro de autotransformación intermedio, ATI 1.3, situado en el PK: 30+000.
- Subestación de tracción SET-1, de 220 kV/2x27,5 kV, situada en el PK: 45+000.
- Centro de autotransformación intermedio, ATI 1.4, situado en el PK: 60+000.
- Centro de autotransformación intermedio, ATI 1.5, situado en el PK: 75+000.
- Centro de autotransformación final, ATF, 1.6/2.1, situado en el PK: 95+000.

Las instalaciones correspondientes al área de la SET-2 son las siguientes:

- Centro de autotransformación intermedio, ATI 2.2, situado en el PK: 106+000.
- Centro de autotransformación intermedio, ATI 2.3, situado en el PK: 122+000.

- Subestación de tracción SET-2, de 405 kV/2x27,5 kV, situada en el PK: 137+000.
- Centro de autotransformación intermedio, ATI 2.4, situado en el PK: 147+000.
- Centro de autotransformación intermedio, ATI 2.5, situado en el PK: 162+000.
- Centro de autotransformación intermedio, ATI 2.6, situado en el PK: 183+000.

El esquema de distribución de las instalaciones es el siguiente:

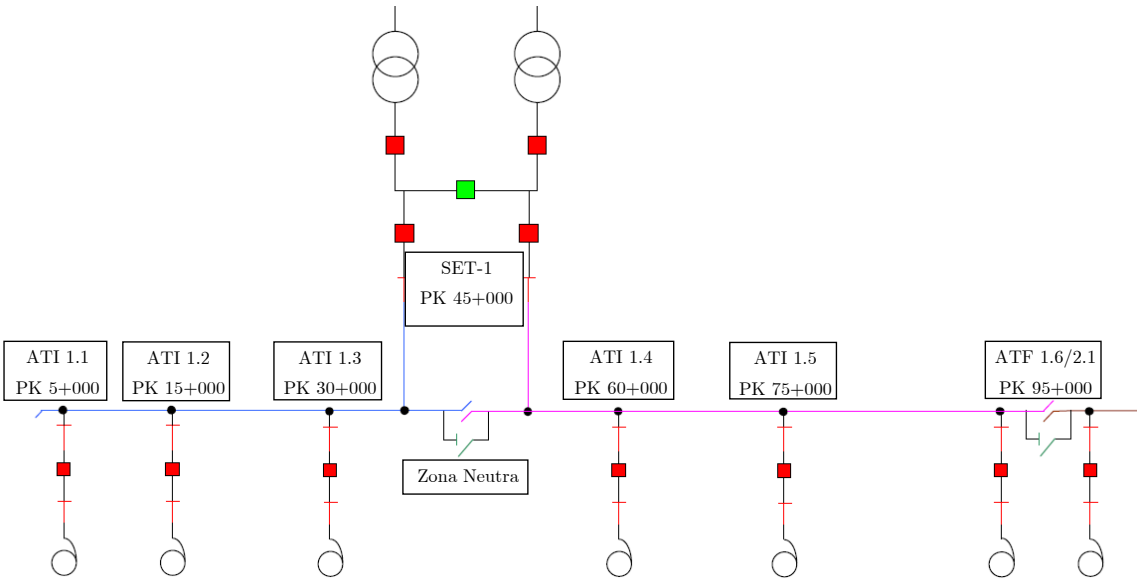

Fig. 4.1 Esquema distribución del aérea de la SET-1

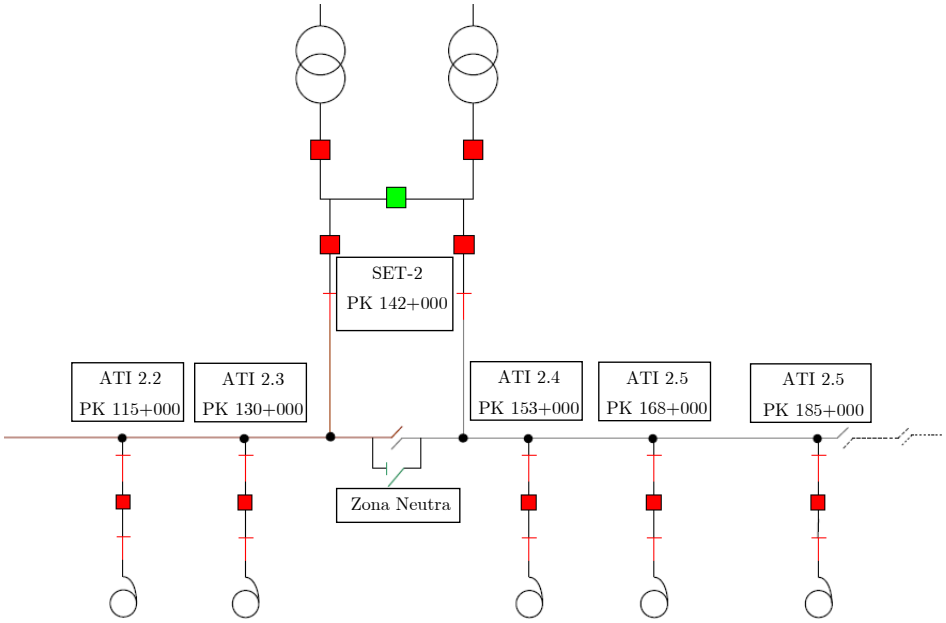

Fig. 4.2 Esquema distribución del aérea de la SET-2

4.6. Modos de funcionamiento

El diseño de la electrificación debe ser tolerante a fallos de forma que, en caso de fallo en un punto de la línea, el suministro de energía eléctrica no se vea comprometido en toda la infraestructura.

Por ello, las dos subestaciones de tracción previstas son redundantes entre ellas, de forma que en situación degradada de pérdida completa de una SET, la otra puede hacer frente a la totalidad de la demanda.

Cada SET dispone de dos transformadores de tracción, redundantes entre ellos, cada uno alimentado por una acometida AT.

Uno de los criterios de seguridad más empleados en sistemas eléctricos es el denominado criterio N-1, que consiste en asegurar el funcionamiento del sistema ante el fallo de cualquier elemento (por ejemplo, un transformador). También se utiliza el criterio N-2, que consiste en asegurar el funcionamiento ante el fallo simultáneo de dos elementos, y el criterio N-3, con fallo de tres elementos.

Estos criterios son independientes de la posibilidad de establecer escenarios de explotación distintos (densidades de tráfico y formas de conducción) según la electrificación esté funcionando en modo normal o degradado, y por lo tanto requisitos eléctricos distintos.

A continuación se exponen los posibles fallos que podrían producirse y la forma en que se podría dar respuesta a ese problema.

4.6.1. Situación de funcionamiento normal

En este modo de funcionamiento todos los elementos están disponibles, los seccionadores de las subestaciones de tracción se encuentran abiertos de manera que los dos transformadores trabajan de forma separada. Por otro lado, los seccionadores de las zonas neutras se encuentran abiertos, de forma que los cantones se encuentran aislados los unos de los otros. La configuración del sistema y el estado de los seccionadores en funcionamiento normal se puede observar en la Fig. 4.3.

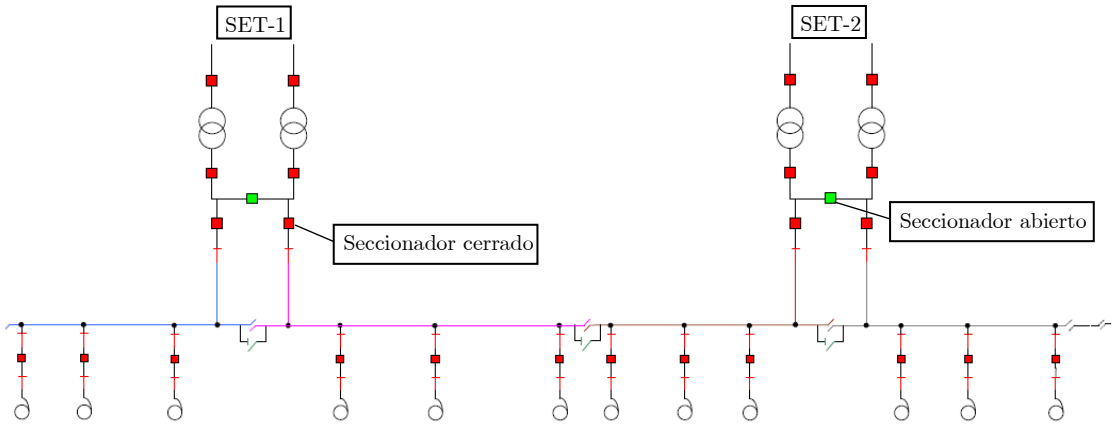

Fig. 4.3 Situación de funcionamiento normal

4.6.2. Situación degradada N-1

En caso de pérdida de una acometida y/o transformador de una subestación de tracción, el transformador restante se encarga de alimentar a los dos cantones. Para ello, se abren los seccionadores que permiten aislar el transformador estropeado, y se cierra el seccionador de las salidas de los dos transformadores.

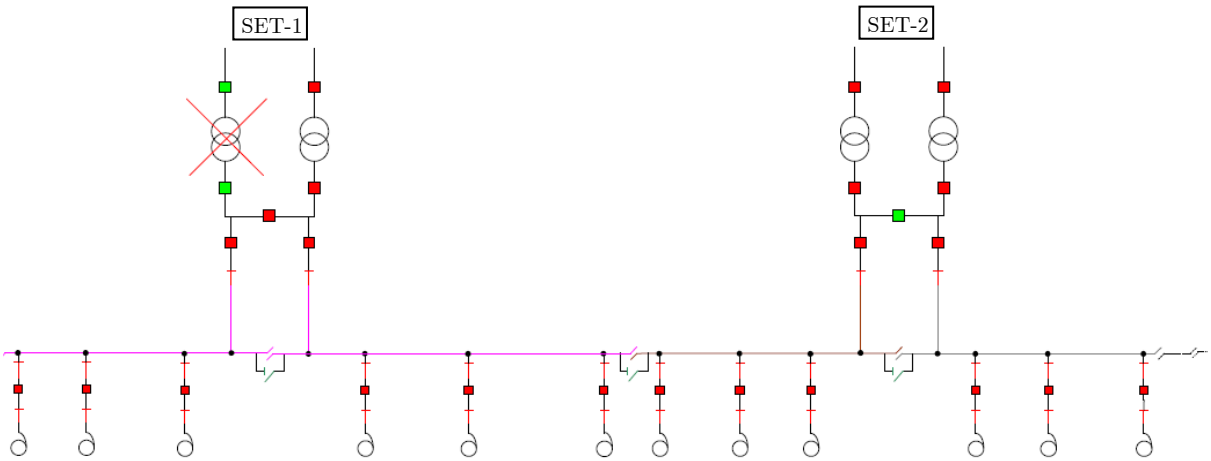

Fig. 4.4 Situación N-1

4.6.3. Situación degradada N-2

En caso de pérdida completa de una subestación de tracción, los cantones afectados se alimentan desde uno de los transformadores de potencia de la SET colateral. Para ello los seccionadores que conectan la SET afectada a la catenaria se encuentran abiertos. Por otro lado los seccionadores de las zonas neutras afectadas, se hallan cerrados.

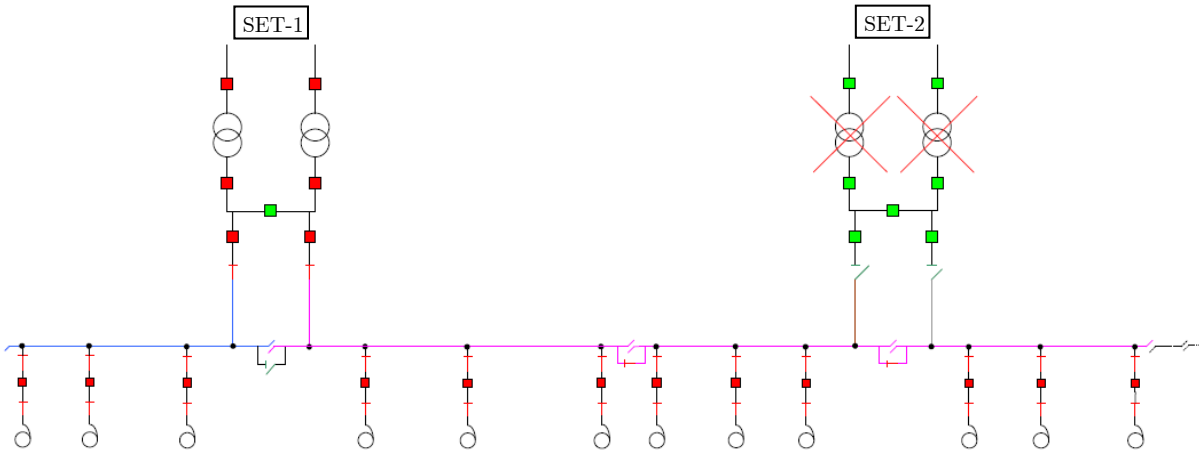

Fig. 4.5 Situación N-2

4.6.4. Situación degradada N-3

En caso de pérdida completa de una subestación de tracción y pérdida simultánea de una acometida y/o transformador de la SET que está en servicio, una única acometida-transformador alimenta la totalidad de la línea; se trata de un caso muy poco probable.

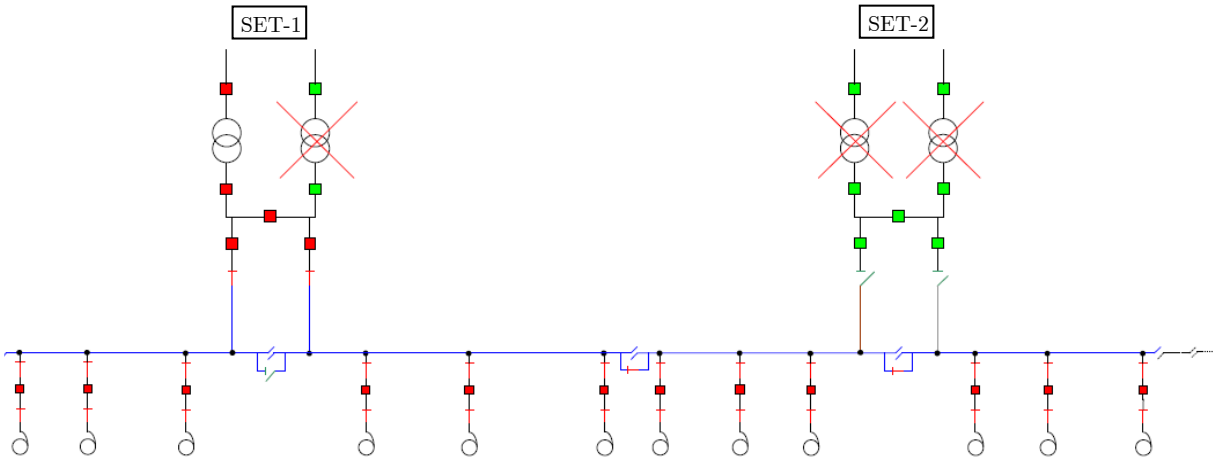

Fig. 4.6 Situación N-3

4.6.5. Fallo en catenaria

En caso de fallo en la zona de la catenaria, puede resultar imposible continuar el suministro. En estas condiciones, es importante aislar el tramo afectado de manera que el problema no afecte al resto de la instalación.

Esta situación es la más grave de las planteadas, ya que implica la interrupción del servicio en el subsector afectado.

5. Especificación de las instalaciones eléctricas

5.1. Condiciones de intercambio de energía

5.1.1. Frecuencia

La frecuencia nominal para la instalación es 50 Hz, admitiendo variaciones, en condiciones normales, de entre 49,85 y 50,15 Hz, según el PO 1.4 [6].

5.1.2. Tensión

La tensión nominal de la instalación de la SET-1 es de 220 kV, admitiendo variaciones normales de tensión entre 245 y 205 kV, sin daño ni desconexión en la instalación. Por otro lado, la tensión nominal de la instalación de la SET-2 es 400 kV, admitiendo variaciones normales de tensión entre 390 y 420 kV.

5.1.3. Desequilibrios

Los desequilibrios de tensiones tienen efectos sobre los usuarios conectados próximos a la carga monofásica:

- Variaciones en sus tensiones de alimentación.
- Sobrecalentamientos en los motores asíncronos trifásicos conectados a la red, por efecto de la componente de la tensión inversa.

El grado de desequilibrio de tensiones viene expresado por:

$$\mu = \frac{V_{\mathrm{i}}}{V_{\mathrm{d}}} = \frac{P}{P_{\mathrm{cc}}}\ [\%] \tag{5.1}$$

Donde,

V_{i}:	amplitud de la tensión inversa
V_{d}:	amplitud de la tensión directa
P:	potencia de la carga monofásica
P_{cc}:	potencia de cortocircuito en el punto de conexión común

De la ecuación 3.1 se deduce que como mayor potencia de cortocircuito de la red o de alimentación o nivel de tensión menor serán los desequilibrios provocados por la alimentación de cargas monofásicas.

Los desequilibrios de tensiones producidos por la instalación no sobrepasarán los siguientes valores totales:

- $\mu \leq 0{,}7$ % (para valoraciones en el rango de minutos).
- $\mu \leq 1$ % (para valoraciones en el rango de segundos).

Los transformadores de potencia son monofásicos así como todos los consumos conectados a la red de 27,5 kV. No obstante, al conectarse las SET a las redes de distribución eléctrica de REE con tensiones de 220 kV y 400 kV, los desequilibrios que se pueden generar a una red de tal magnitud se consideran despreciables.

5.1.4. Continuidad en el suministro

La instalación será capaz de soportar sin daño las siguientes perturbaciones de la red:

- Un número de huecos de tensión de 500 huecos por nudo y por año, entendiendo por hueco de tensión como una disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión nominal, seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo (entre 10 ms y 1 minuto).
- Un número anual de interrupciones breves de tensión entre 40 y 60, entendiendo por interrupción breve de suministro a la caída de la tensión por debajo del 1% de su valor nominal, con una duración del efecto inferior a 3 minutos.

La SET dispondrá de los correspondientes relés de mínima tensión, para dejarla fuera de servicio ante una posible perturbación.

La situación con indisponibilidad simple por mantenimiento es una situación previsible en el funcionamiento del sistema. Se puede asumir la pérdida de calidad/fiabilidad asociada a este tipo de nudos no mallados, ya que la segunda subestación de tracción podrá hacer frente al consumo de toda la línea, a pesar de funcionar en situación degradada, sin afectar a la frecuencia de paso del tráfico ferroviario.

5.2. Potencia a instalar

Según el dimensionamiento eléctrico se tiene:

- La potencia máxima demandada por la instalación será de 24 MVA (21 MW).
- La potencia de los transformadores de potencia de cada SET será de 30 MVA.
    - En funcionamiento normal cada transformador de potencia alimenta un cantón (entre la zona neutra de la subestación y la zona neutra siguiente). En situación degradada, es decir con las subestaciones colaterales fuera de servicio, cada transformador debe ser capaz de alimentar el trayecto comprendido entre 2 subestaciones continuas (dos cantones).
- La potencia de los autotransformadores de los centros de autotransformación (ATI y ATF) será de 10 MVA.

Según las especificaciones técnicas, los transformadores de potencia y los autotransformadores deberán soportar, en ciclos de 8 horas, las siguientes sobrecargas:

- El 31,5% durante 2 horas.
- El 93,7% durante 5 minutos.

5.3. Intensidad térmica de cortocircuito

Con objeto de garantizar la efectividad de la aparamenta de corte de las subestaciones de tracción y la integridad de los equipos de la misma, diseñados para un valor de intensidad de cortocircuito, los valores de diseño de las instalaciones conectadas a la red de transporte de REE serán, según los requerimientos establecidos [7], las intensidades térmicas de cortocircuito trifásicas de corta duración (1s) de valor 40 kA en 220 kV y 50 kA en 400 kV.

6. Modelo eléctrico del sistema 2x25 kVca

Para el dimensionamiento de los centros de transformación y las subestaciones de tracción se deben calcular las tensiones e intensidades en condiciones normales de operación y las existentes en caso de defecto. Para ello, se debe disponer de un modelo adecuado para cada uno de los elementos de que se compone el sistema eléctrico de tracción, así como el equivalente de Thévenin de la red de alimentación de AT.

En el Anexo A se presenta un esquema equivalente para los diferentes elementos de que se compone el sistema de tracción. La resolución del esquema equivalente de todo el sistema de tracción (o de la parte objeto del estudio) proporciona los valores de diseño utilizados en este proyecto.

Los modelos resultantes para cada uno de los elementos de que se compone el sistema eléctrico de tracción, así como el equivalente de Thévenin de la red de alimentación de AT se presentan a continuación.

6.1. Modelo de la subestación de tracción

En la subestación de tracción se realiza la conexión de los tramos de la electrificación con la red de transporte. Para ello, se realiza la transformación de tensiones desde los niveles de la red a los niveles de la catenaria, a partir de transformadores monofásicos de potencia con toma media en el secundario.

Para el cálculo de la intensidad de cortocircuito se estudia por separado cada uno de los cantones que alimenta la SET, es decir, sólo se considera uno de los transformadores de potencia de la SET.

Para obtener un modelo para el transformador monofásico de potencia con toma media en el secundario, se parte del modelo del transformador monofásico de tres devanados que se muestra en la Fig. 6.1, donde se han incluido las tres impedancias de cortocircuito de los devanados ($\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ y $\underline{Z}_3$) y se han despreciado las pérdidas en el hierro.

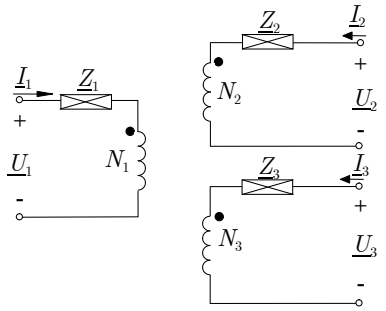

Fig. 6.1 Esquema equivalente del transformador monofásico de tres devanados

Uniendo los terminales secundarios se obtiene el modelo del transformador monofásico con toma media en el secundario, tal y como se muestra en la Fig. 6.2.

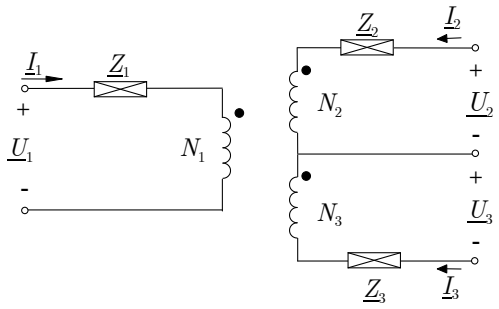

Fig. 6.2 Esquema equivalente del transformador monofásico con toma media en el secundario

6.2. Modelo del centro de autotransformación

El modelo del autotransformador monofásico es como el del transformador monofásico de toma media pero sin utilizar el primario, es decir solo utilizando secundario y terciario, tal y como se muestra en la Fig. 6.3, donde se ha incluido la impedancia de cortocircuito $\underline{Z}_{\text{aut}}$.

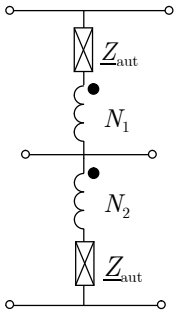

Fig. 6.3 Esquema equivalente de un centro de autotransformación

6.3. Modelo del circuito de tracción

En el presente proyecto al desconocerse la naturaleza de los conductores del sistema así como la disposición exacta de los mismos a lo largo de la línea no se puede obtener la matriz de impedancias equivalentes. No obstante, se trabajará con un modelo de cálculo simplificado en que considera las impedancias de catenaria, *feeder* y retorno pero no se considera la impedancia mutua.

6.4. Modelo del sistema 2x25 kVca

Una vez definidos los diferentes elementos del sistema, se puede modelizar el esquema equivalente del sistema 2x25kVca. En el cálculo de la intensidad de cortocircuito se pretende estudiar el caso más desfavorable en caso de falta. Para ello se consideran dos casos diferenciados.

- **Subestación de tracción en vacío:** En esta situación, la subestación de tracción se alimenta desde la red de transporte pero se mantiene desconectada del sistema de tracción y de los centros de autotransformación asociados.
- **Subestación de tracción en carga:** En esta situación la subestación de tracción se alimenta desde la red de transporte y el sistema de tracción y los centros de autotransformación asociados están conectados a la misma.

Para el cálculo de las intensidades de cortocircuito no se contempla la existencia de una carga, es decir, no se considera la circulación de ningún tren. De esta manera se está contemplando una situación más desfavorable, ya que la circulación de un tren conlleva una reducción de la corriente de cortocircuito.

6.4.1. Subestación de tracción en vacío

La situación en la cual se conecta la subestación de tracción a la red de transporte independientemente del sistema de tracción y los centros de autotransformación se denomina subestación de tracción en vacío.

El esquema equivalente de cada uno de los transformadores de potencia de la SET en vacío, se muestra en la Fig. 6.4.

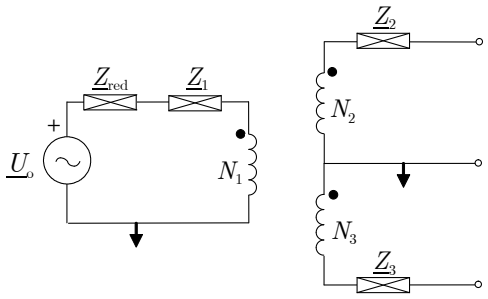

Fig. 6.4 Esquema equivalente del sistema 2x25 kVca con la SET en vacío

Donde $\underline{Z}_{red}$ es la impedancia de cortocircuito de la red de transporte hasta el punto de conexión con la subestación de tracción. La toma media (el neutro) del transformador de potencia se conecta a tierra.

La tensión entre los bornes del secundario del transformador es de 55 kV, resultando dos secundarios de 27,5 kV respecto a la toma media, por tanto, los devanados secundario (N_2) y terciario (N_3) y las impedancias $\underline{Z}_2$ y $\underline{Z}_3$ son iguales.

Una vez obtenido un modelo equivalente del sistema 2x25kVca se procede a determinar, mediante el análisis nodal (capítulo A.2 del Anexo A) del esquema de la Fig. 6.5, el valor de la intensidad de cortocircuito máxima en el secundario del transformador de potencia.

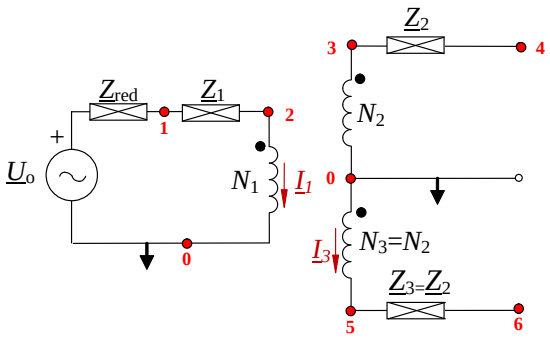

Fig. 6.5 Esquema método nodal de la SET en vacío

También, a partir de los datos de partida, se calculan las intensidades y tensiones características del sistema a fin de poder dimensionar los centros de transformación y las SET.

En el capítulo A.3.2.2 del Anexo A, se presentan los valores resultantes de la SET en vacío.

6.4.2. Subestación de tracción en carga

El esquema equivalente de cada uno de los transformadores de potencia de la SET en carga cuando alimenta todo un cantón hasta la zona neutra entre subestaciones incluyendo tres centros de autotransformación asociados, se muestra en la Fig. 6.6.

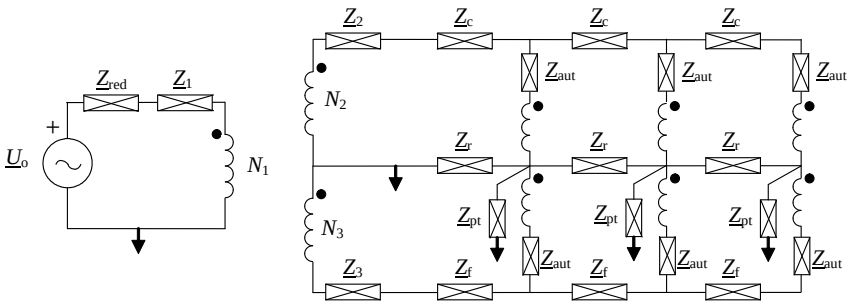

Fig. 6.6 Esquema equivalente del sistema 2x25 kVca con la SET en carga

Las impedancias $\underline{Z}_c$, $\underline{Z}_r$ y $\underline{Z}_f$ corresponden a las impedancias de catenaria, *feeder* y retorno respectivamente, en cada tramo entre centros. Mientras que la impedancia $\underline{Z}_{pt}$ corresponde a la impedancia de puesta a tierra existente en cada centro de autotransformación, la cual se estima resistiva con un valor de 2 Ω.

Para el cálculo de la intensidad de cortocircuito con la subestación energizada y conectada al sistema de tracción y los centros de autotransformación conectados se deben considerar las diferentes situaciones que se pueden dar y determinar la más desfavorable desde el punto de vista de cortocircuito.

Entre las diferentes posibilidades cabe destacar los dos casos siguientes:

- La SET alimenta todo un cantón hasta la zona neutra.

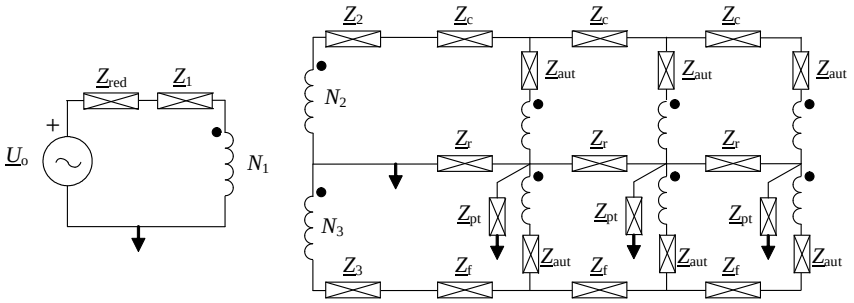

Fig. 6.7 Sistema de electrificación de un cantón (3 centros de autotransformación)

- La SET funciona en modo degradado, es decir, la SET anexa se encuentra fuera de servicio y se debe alimentar el cantón correspondiente.

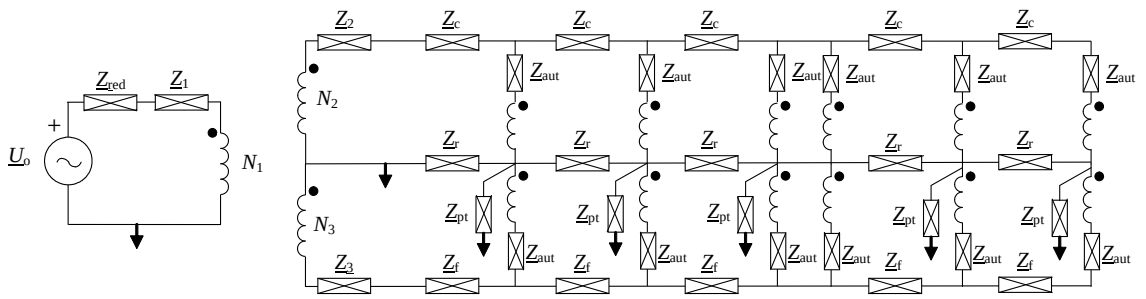

Fig. 6.8 Sistema de electrificación en situación degradada

Como se puede observar la única diferencia fundamental reside en el número de centros de autotransformación e impedancias del sistema de tracción.

En ambos casos, se puede dar la situación de mal funcionamiento de uno de los centros de autotransformación, por tanto, la determinación del caso más desfavorable se limita a determinar la influencia del número de centros de autotransformación asociados y la aportación de estos a la intensidad de cortocircuito.

Para determinar la influencia del número de centros de autotransformación asociados a la SET se ha analizado el sistema con un número diferente de centros asociados (ver Fig. 6.9). Mientras que para determinar la influencia de la caída de un centro de autotransformación intermedio, se ha estudiado la SET con 2 y 3 centros de autotransformación asociados con un mal funcionamiento en el primer y segundo centro respectivamente, lo que conllevará a la desconexión de dicho centro del sistema (ver segundo caso en Fig. 6.10).

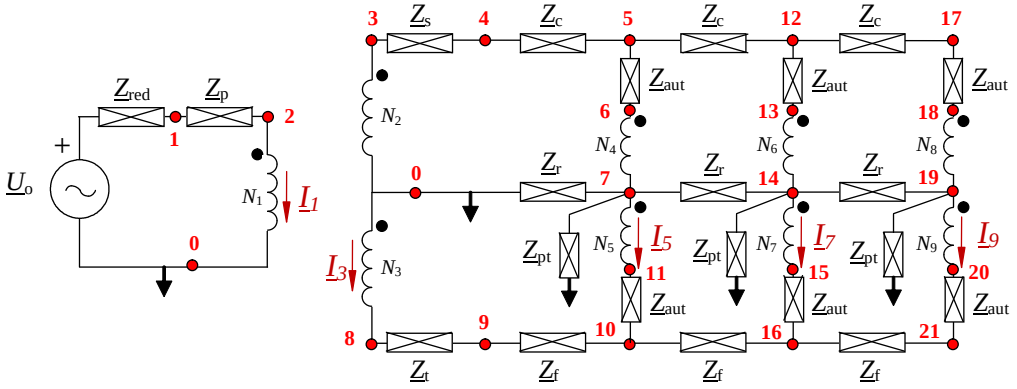

Fig. 6.9 Esquema método nodal SET con tres centros de autotransformación

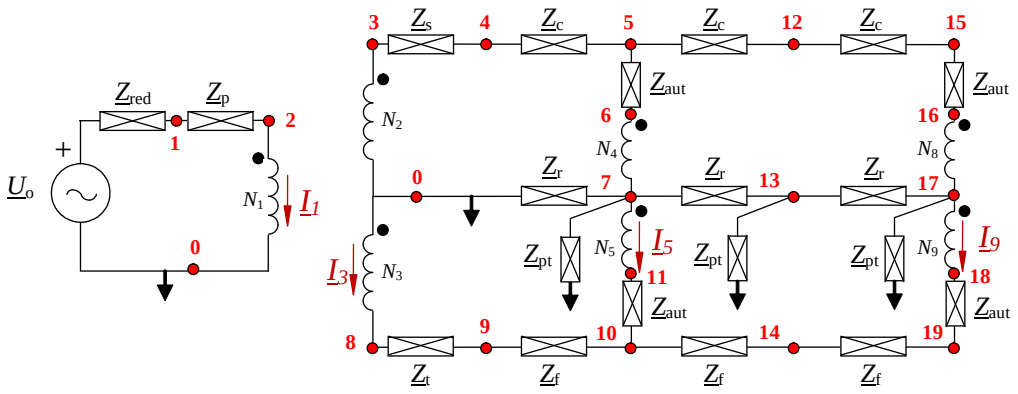

Fig. 6.10 Esquema método nodal SET alimentando un cantón con 2 centros de autotransformación

Del análisis realizado en el Anexo A se puede afirmar que los autotransformadores influyen en la intensidad de cortocircuito aportando corriente a la misma. También se comprueba que si la longitud del tramo que alimenta aumenta, la corriente de cortocircuito se reduce.

Teniendo en cuenta que un aumento del número de centros de autotransformación asociados y un mayor tramo alimentado no conlleva un aumento significativo de la intensidad de cortocircuito se considera que para el diseño de la aparamenta se utilizarán los valores de intensidad de cortocircuito obtenidos en el caso de la SET alimentando todo un cantón con tres centros de autotransformación asociados. Ésta es la situación más habitual en los sistemas 2x25 kVca.

En el capítulo A.3.3.2 del Anexo A, se presentan los valores resultantes de la SET en carga.

7. Configuración de las instalaciones

7.1.1. Descripción general

7.1.1.1. Subestaciones de tracción

La subestación eléctrica de tracción SET-1 será de planta rectangular de dimensiones aproximadas 70 x 55 m, con el lado menor paralelo a la traza o plataforma de vías, a una distancia aproximada de 20 m de la misma.

La subestación eléctrica de tracción SET-2 será de planta rectangular de dimensiones aproximadas 86 x 64 m, con el lado menor paralelo a la traza o plataforma de vías, a una distancia aproximada de 20 m de la misma.

Cada SET dispondrá de dos puertas correderas de 4,50 m de ancho y 2,40 m de alto para entrada de vehículos, y de dos puertas peatonales independientes de las puertas correderas, de una hoja abatible de 1,00 m de ancho y 2,40 m de alto, así como de una puerta peatonal para acceso a la vía. Tanto las puertas correderas como las puertas peatonales contarán con un zócalo inferior y tres líneas de suplemento de espino.

Los elementos que componen las subestaciones son los siguientes:

- Parque de AT.
- Pórtico de conversión
- Edificio de control.
- Pórticos de salida a catenaria y *feeder*.
- Armario de barra “0”.
- Caseta de medida fiscal de la energía

En el exterior de cada SET está previsto realizar dos plataformas de maniobras, una delante de cada puerta de acceso, una de ellas hormigonada, de 20 cm.

Dos acometidas trifásicas, que tendrán su origen en la subestación próxima propiedad de REE y que finalizarán en el pórtico de entrada de la SET conectándose a los seccionadores del parque de AT.

La Fig. 7.1, muestra la planta de una SET. El parque de alta tensión, formado por dos calles idénticas (una para cada transformador de potencia), se ha marcado con dos cuadros rojos. Se instalará la aparamenta de alta tensión (seccionadores, interruptores, transformadores de medida, autoválvulas y transformadores de potencia) y también el material auxiliar complementario necesario para el funcionamiento de la instalación (depósito de recogida de aceite, luminarias para alumbrado, cuadros para tomas de corriente, etc).

El edificio de media tensión se muestra con un cuadro verde y el pórtico de salida a catenaria y *feeder* con un cuadro naranja.

En cada SET, una vez realizada la transformación de alta a media tensión por parte del transformador de potencia, se coloca al final del embarrado de MT un pórtico de conversión de cable aéreo a subterráneo, marcado con cuadro azul, y se tiende el cable hacia el edificio de control, marcado con un cuadro verde.

El edificio de control será de planta rectangular, de unas dimensiones aproximadas de 26 x 9 m, de una sola planta y de una altura aproximada de 6,50 m.

El edificio albergará en su interior las celdas de media tensión, tanto de 55 kV como de 36 kV, así como los equipos de servicios auxiliares en las siguientes salas:

- Sala de media y baja tensión.
- Sala de control y telecomunicaciones.
- Sala para alojar los transformadores de servicios auxiliares (SSAA).
- Sala para el grupo electrógeno.
- Almacén.
- Aseo y vestuario.

El edificio dispondrá de suelo técnico de una altura mínima de 50 cm respecto a la solera. Dispondrá además de falso techo en todas las dependencias salvo en la sala del grupo electrógeno y en las salas para albergar los transformadores de servicios auxiliares. La altura libre, entre el suelo técnico y el falso techo será de unos 3,50 m.

A la salida de las cabinas de 55 kV se tiende el cable soterrado hasta los pórticos de catenaria y *feeder* (cuadro naranja), en el pórtico se eleva el cableado y se conexiona con

los conductores del sistema de tracción que alimentan el tramo correspondiente de vía entre la zona neutra de la SET y la zona neutra de mitad del trayecto entre subestaciones colaterales.

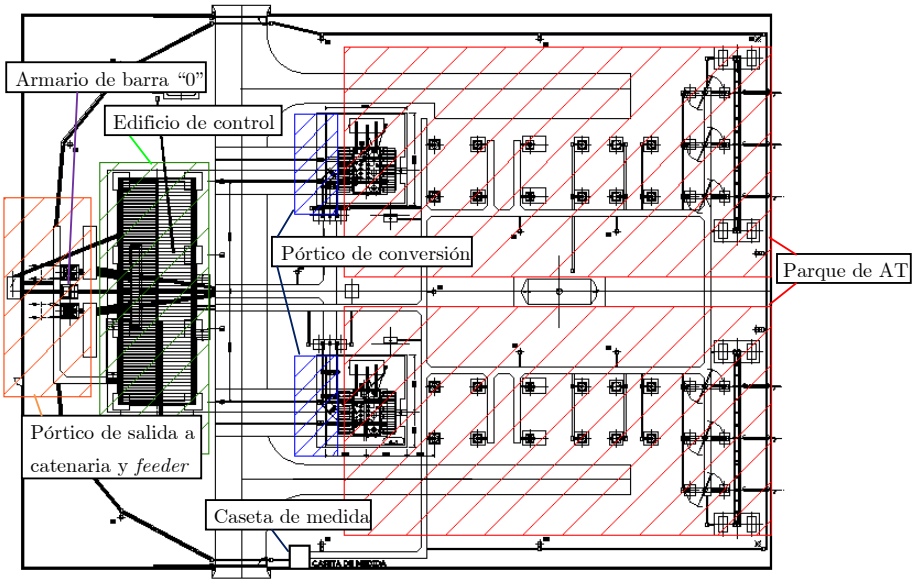

Fig. 7.1 Planta SET

También destacar que situado entre los pórticos de salida de *feeder* se encuentra el armario de barra "0". A él llegan los cables procedentes del punto central los transformadores (de potencia y de servicios auxiliares), la malla de tierras y la conexión al circuito de retorno (cable de retorno y conexión a vías). Está equipado con transformadores de intensidad para conocer la corriente que retorna a la subestación por tierra y por el circuito de retorno.

7.1.1.2. Centros de autotransformación

Los centros de autotransformación intermedios serán de planta rectangular de unas dimensiones aproximadas de 32,30 x 23,40 m, con el lado menor paralelo a la plataforma de vías, a una distancia aproximada de 20 m de la misma. Y el edificio de control será de 14,60 x 8,02 m.

En cambio, el centro de autotransformación final será de planta rectangular de dimensiones aproximadas 42,10 x 27,00 m, con el lado menor paralelo a la traza o plataforma de vías, a una distancia aproximada de 20 m de la misma. Y el edificio de control del centro de autotransformación final será de 14,30 x 9,90 m.

Los centros de autotransformación estarán constituidos por un parque exterior rodeado por un cerramiento metálico de 2,5 m de altura. Dentro de este recinto se encontrarán las siguientes instalaciones:

- Edificio de control.
- Adosados al edificio se encuentran los autotransformadores:
    - 2 para los centros de autotransformación intermedios.
    - 4 para el centro de autotransformación final.
- Pórtico de salida a catenaria y *feeder*:
    - 1 para los centros de autotransformación intermedios.
    - 2 para el centro de autotransformación final.
- Un armario de barra "0".

En cada centro de autotransformación se conecta a partir del pórtico de salida a catenaria y *feeder* toda la instalación al sistema de tracción. El pórtico se conecta a las celdas de media tensión que a su vez están conectadas a los autotransformadores.

Los cables de conexión a catenaria y *feeder* saldrán subterráneos desde el edificio de control conectar con el pórtico de salida de *feeder* formado por un seccionador bipolar, dos autoválvulas, dos aisladores y la estructura metálica.

Las Fig. 7.2 y Fig. 7.3, muestran las plantas del centro ATI y centro ATF respectivamente. Desde el pórtico de salida de la catenaria y *feeder*, marcado con cuadros rojos, se conectará el centro al sistema de tracción. Los cables de conexión a catenaria y *feeder* saldrán subterráneos desde el edificio de control que albergará en su interior las celdas de media tensión, tanto de 55 kV como de 36 kV, así como los equipos de servicios auxiliares en las siguientes salas:

- Sala de media y baja tensión.
- Sala SSAA.
- Sala transformadores auxiliares.
- Sala de control y telecomunicaciones.

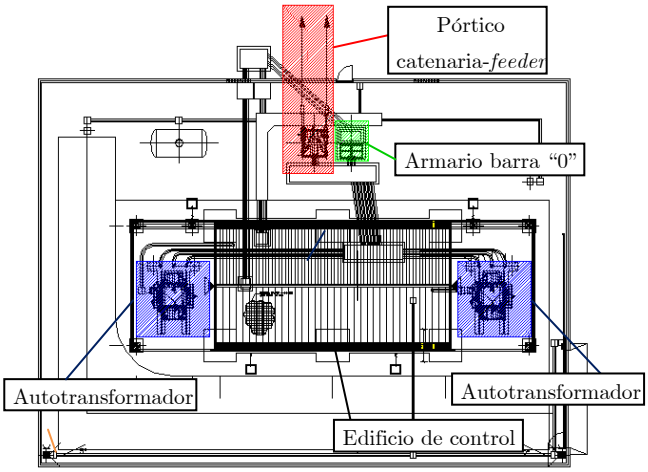

Fig. 7.2 Planta centro de autotransformación intermedio

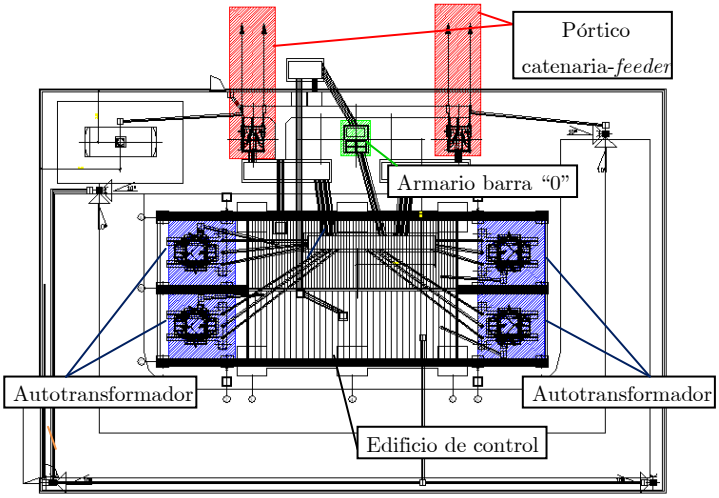

Fig. 7.3 Planta centro de autotransformación final

También se muestran los autotransformadores del centro se muestran con cuadros azules y el armario de barra"0" con un cuadro verde. En este armario se conectará el neutro de los autotransformadores, el circuito de retorno, la red de tierras y los neutros de los transformadores de SSAA.

7.1.2. Conexión a la red de transporte

Las acometidas trifásicas que tendrán su origen en la subestación de transporte próxima (propiedad de REE) y que finalizarán en el pórtico de entrada de la SET, deberán tener las siguientes características:

- El embarrado será de cable aéreo "flexible", compuesto por dos circuitos trifásicos de cable de aluminio-acero.
- Dispondrán de un seccionador tripolar rotativo de entrada en cada una de las dos calles del parque de AT de la subestación de tracción, cuya función principal será separar eléctricamente la subestación de transporte de REE de la subestación de tracción.

A lo largo de toda la línea se instalará cable de guarda tierra-óptico (OPGW).

7.1.3. Aparamenta de alta tensión de las subestaciones de tracción

Los elementos del parque se disponen en línea desde la llegada del conductor de alta tensión al pórtico de entrada hasta la conexión con el transformador de potencia, tal y como se muestra en la Fig. 7.4.

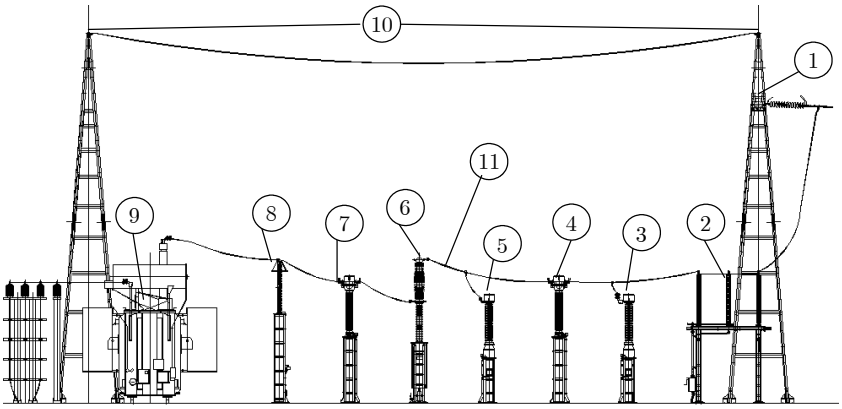

Fig. 7.4 Parque AT

Los diferentes elementos que constituyen el parque de AT, mostrados en la Fig. 7.4, son los siguientes:

1. Pórtico de entrada.
2. Seccionador tripolar giratorio de tres columnas unipolares.
3. Transformador de tensión inductivo para medida principal y comprobante.
4. Transformador de intensidad para medida fiscal principal y comprobante.
5. Transformador de tensión inductivo para protección.

6. Interruptor bipolar automático.
7. Transformador de intensidad para protección.
8. Autoválvula de protección.
9. Transformador de potencia.
10. Pararrayos tipo Franklin conectados entre sí por cable de guarda.
11. Conductor de alta tensión.

A continuación se indican los elementos seleccionados para los parques de AT:

Parque de alta tensión de la SET-1 de 220 kV

- 2 conductores por fase de aluminio-acero tipo LA-455 CONDOR DUPLEX de 454,5 mm² de sección.
- 1 seccionador tripolar giratorio de tres columnas unipolares 220 kV, 2000 A.
- 2 transformadores de tensión inductivos (TT) de 1 devanado primario, 2 devanados secundarios para medida principal y comprobante, 220 kV:√3/110V:√3-110V:√3, 25 VA, clase 0,2.
- 2 transformadores de intensidad de 2 devanados primarios y 2 devanados secundarios para medida fiscal principal y comprobante, de relación 75-150/5- 5 A, 20 VA, clase 0,2S.
- 2 transformadores de tensión inductivos (TI) para protección de 220 kV:√3/110V:√3, 50 VA, clase 3P.
- 1 interruptor bipolar automático de 220 KV, 1250 A y 40 kA.
- 2 transformadores de intensidad de 1 devanado primario y 4 secundarios, de protección. Los devanados S2 y S3 para REE son de 50 VA y clase 5P20. Los devanados S1 y S4 son de 30 VA y 5P20.
- 2 autoválvulas de protección de tensión asignada 192 kV y 20 kA.
- 1 transformador de potencia de 30 MVA, relación de transformación 220 kV±8%/2x27,5 kV y regulación en carga.

Parque de alta tensión de la SET-2 de 400 kV

- 2 conductores por fase de aluminio-acero tipo LA -510 RAIL DUPLEX, de 516,8 mm2 de sección
- 1 seccionador tripolar giratorio de tres columnas unipolares 400 kV, 3150 A.
- 2 transformadores de tensión inductivos (TT) de 1 devanado primario, 2 devanados secundarios para medida principal y comprobante, 396 kV: √3/110V:√3-110V:√3, 25 VA, clase 0,2.
- 2 transformadores de intensidad de 2 devanados primarios y 2 devanados secundarios para medida fiscal principal y comprobante, de relación 75-150/5- 5 A, 20 VA, clase 0,2S.
- 2 transformadores de tensión inductivos (TI) para protección de 396 kV: √3/110V:√3, 50 VA, clase 3P.
- 1 interruptor bipolar automático de 400 kV, 2500 A y 50 kA.
- 2 transformadores de intensidad de 1 devanado primario y 4 secundarios, de protección. Los devanados S2 y S3 para REE son de 50 VA y clase 5P20. Los devanados S1 y S4 son de 30 VA y 5P20.
- 2 autoválvulas de protección de tensión asignada 330 kV y 20 kA.
- 1 transformador de potencia de 30 MVA, relación de transformación 405 kV ±7,4%/2x27,5 kV y regulación en carga.

Las características específicas de los diferentes equipos se muestran en el capítulo B.6 del Anexo B.

En el capítulo D.2 del Anexo D se determina para la protección contra rayos que el parque exterior de la SET deberá estar provisto de tres pararrayos tipo Franklin, dos de ellos situados sobre los pórticos de entrada de alta tensión y un tercero situado sobre una torre metálica entre las dos calles del parque (entre los dos transformadores de potencia), tal y como se muestra en los planos. Existe también un cable de guarda entre las tres estructuras metálicas anteriores.

El ámbito del edificio técnico de la SET y el pórtico de *feeder* quedarán protegidos por un cuarto pararrayos situado sobre dicho edificio técnico.

7.1.4. Aparamenta de media tensión

7.1.4.1. Subestaciones de tracción

7.1.4.1.1 Celdas de media tensión

Las celdas irán ubicadas dentro del edificio de control de la SET en la denominada sala de media y baja tensión.

Se utilizarán celdas bifásicas de 55 kV de tensión máxima de servicio entre fases, con aislamiento en SF6 para el control y la protección de los transformadores de potencia, así como para la protección de los pórticos de catenaria y *feeder*. En cada SET, se colocarán las siguientes cabinas:

- 2 cabinas de salida de los transformadores de 30 MVA.
- 2 cabinas de salida a catenaria y *feeder*.
- 1 cabina de acoplamiento longitudinal y medida.
- 1 cabina de seccionamiento y medida.

Se instalarán también dos mochilas laterales o celdas de remonte para la bajada de cables de 36 kV destinados a la alimentación de las celdas monofásicas de protección de los transformadores de los servicios auxiliares.

Las celdas monofásicas de protección de los transformadores auxiliares serán de 36 kV de tensión máxima de servicio entre fases, con aislamiento en SF6 para el seccionamiento y la protección mediante un ruptofusible. En cada SET se instalarán las siguientes cabinas:

- 2 cabinas de remonte de cables de 36 kV.
- 2 cabinas para protección de los transformadores de SSAA.

Las características específicas de las celdas de MT se presentan en el capítulo C.6 del Anexo C.

7.1.4.1.2 Pórtico de salida de catenaria y *feeder*

De las celdas de catenaria y *feeder* de 55 kV se saldrá, mediante cable hacia el pórtico de salida. Estos conductores discurrirán por el suelo técnico del edificio de control y continuarán enterrados en zanja hasta acometer en la base del pórtico de salida de catenaria y *feeder*.

El pórtico contará con los siguientes equipos:

- 2 seccionadores bipolares de 55 kV de configuración bipolar de intemperie y formados por dos polos independientes montados sobre una estructura común.
- 4 autoválvulas de resistencia variable de óxido de zinc (ZnO) de 52 kV e intensidad de descarga de 20 kA.
- 4 aisladores de 55 kV.

Las características de estos equipos se indican en el capítulo C.6 del anexo C.

7.1.4.1.3 Armario de barra "0"

En el armario de barra cero "0" se prevé la conexión del neutro de los transformadores de potencia, del neutro de los transformadores de servicios auxiliares, del circuito de retorno y la conexión rígida a la red de puesta a tierra en las SET.

El armario se situará próximo al pórtico de salida a catenaria y *feeder*, en la intemperie. Tendrá unas medidas de 1600 x 1200 x 500 mm y un grado de protección IP 65 o superior.

Dentro del armario se prevé la instalación de transformadores de intensidad para medida.

7.1.4.2. Centros de autotransformación

7.1.4.2.1 Autotransformadores

Como ya se ha comentado con anterioridad el número de autotransformadores por centro será el siguiente:

- Centro de autotransformación final: 4 unidades
- Centro de autotransformación intermedio: 2 unidades

Dichos autotransformadores serán de potencia 10 MVA, relación de transformación 55/27,5 kV y regulación en carga.

Las características de los autotransformadores se indican en el capítulo C.6 del anexo C.

7.1.4.2.2 Celdas de media tensión

Las celdas irán ubicadas dentro del edificio de control de los centros de autotransformación en la denominada sala de media y baja tensión y estarán conectadas a los autotransformadores mediante dos cables unipolares. Estos conductores discurrirán por el suelo técnico del edificio de control y continuarán enterrados en zanja hasta acometer en los terminales del autotransformador.

En cada centro de autotransformación, se instalarán celdas bifásicas de 55 kV de tensión máxima de servicio entre fases con aislamiento en SF6 para el control y la protección de la salida bifásica de 55 kV de los autotransformadores y la salida bifásica de 55 kV a catenaria y *feeder*. En concreto:

- Celdas de centros de autotransformación final:
    - 2 cabinas de salida de los autotransformadores de 10 MVA.
    - 1 cabina de salida a catenaria y *feeder*.
- Celdas de centros de autotransformación final:
    - 4 cabinas de salida de los autotransformadores de 10 MVA.
    - 2 cabinas de salida a catenaria y *feeder*.
    - 1 cabina de acoplamiento longitudinal.
    - 1 cabina de remonte longitudinal.

Se instalarán también dos mochilas laterales o celdas de remonte para la bajada de cables de 36 kV destinados a la alimentación de las celdas monofásicas de protección de los transformadores de los servicios auxiliares.

Las celdas monofásicas de protección de los transformadores auxiliares serán de 36 kV de tensión máxima de servicio entre fases, con aislamiento en SF6 para el seccionamiento y protección mediante ruptofusible. En cada centro de autotransformación se instalarán las siguientes cabinas:

- 2 cabinas de remonte de cables de 36 kV.
- 2 cabinas para protección de los transformadores de SSAA.

Las características específicas de las celdas de MT se presentan en el capítulo C.6 del Anexo C.

7.1.4.2.3 Pórtico de salida de catenaria y feeder

De las celdas de salida a catenaria y *feeder* de 55 kV se saldrá mediante dos cables unipolares de hacia el pórtico de salida. Estos conductores discurrirán por el suelo técnico del edificio de control y continuarán enterrados en zanja hasta acometer en la base del pórtico de salida de catenaria y *feeder*.

En cada pórtico se instalará 1 seccionador bipolar de 55 kV, 2 autoválvulas y 2 aisladores idénticos a los instalados en la SET.

El centro de autotransformación intermedio tendrá un único pórtico, mientras que el centro de autotransformación final tendrá dos pórticos de salida de catenaria y *feeder*.

7.1.4.2.4 Armario de barra "0"

En el armario de barra cero "0" se prevé la conexión del neutro de los autotransformadores, del neutro de los transformadores de servicios auxiliares, del circuito de retorno y la conexión rígida a la red de puesta a tierra en las SET.

El armario se situará próximo al pórtico de salida a catenaria y *feeder*, en la intemperie. Tendrá unas medidas de 1600 x 1200 x 500 mm y un grado de protección IP 65 o superior.

Dentro del armario se prevé la instalación de transformadores de intensidad para medida.

7.1.4.2.5 Protección contra descargas atmosféricas

En el capítulo D.2 del Anexo D se determina la necesidad de instalar en el parque exterior de los centros de autotransformación, un pararrayos de sistema en punta tipo Franklin montado a 8,7 m sobre la cubierta del edificio, tal y como se observa en los planos.

7.1.5. Instalaciones auxiliares

Cada centro necesitará de un conjunto de servicios auxiliares que permitan el funcionamiento de los diferentes equipos del sistema, sistemas de control y protección de los equipos o instalaciones requeridas en cualquier edificio como iluminación o climatización.

El elevado número de servicios auxiliares existentes en unas instalaciones de las características de una subestación de tracción o centro de autotransformación implica que

en el presente proyecto únicamente se realizará su descripción y se especificará la funcionalidad de los diferentes servicios auxiliares en el Anexo E.

En el caso de las instalaciones eléctricas auxiliares como la alimentación en baja tensión de los sistemas de cada centro y la instalación de alumbrado de los centros, debido al marcado carácter eléctrico del proyecto, se ha profundizado en su diseño. A continuación se realiza una breve descripción de dichas instalaciones resultantes de los cálculos realizados en el Anexo E.

7.1.5.1. Instalación eléctrica de baja tensión

7.1.5.1.1 Transformadores de servicios auxiliares

Se ha previsto dotar a cada centro con dos transformadores para servicios auxiliares de potencia 250 kVA en las SET y 50 kVA en los centros de autotransformación. La alimentación del primario del transformador se realizará desde las celdas de 36 kV, estando previsto que cada uno por separado tenga suficiente potencia para dar servicio. El secundario del transformador se conectará al cuadro general de baja tensión.

El primario del transformador estará conectado a la salida de la celda de servicios auxiliares a 27,5 kV, y alimentará a los servicios auxiliares de la subestación en baja tensión a 230 V 50 Hz. Estará sometido a las solicitaciones propias del funcionamiento a que se destina. El arrollamiento del primario estará provisto de tomas que permitan variar la relación de transformación. El cambio de tomas se realizará sin tensión mediante puentes desmontables cubiertos por tapas de protección.

Existirá un enclavamiento eléctrico y mecánico entre los interruptores de los transformadores de servicios auxiliares de modo que solo pueda estar conectado a las barras de 230 V uno de los dos transformadores. El otro permanecerá en espera. En caso de avería de uno de ellos entrará en funcionamiento el otro transformador.

7.1.5.1.2 Grupos electrógenos

Para casos de emergencia en los que no funcione ninguno de los transformadores de servicios auxiliares, en las subestaciones de tracción, se instalarán grupos electrógenos trifásicos de 100 kVA con salida a 230 Vca.

Existirá un conmutador automático de tensión de forma que solo podrá entrar en funcionamiento el grupo electrógeno si no está operativo ninguno de los transformadores de servicios auxiliares.

El grupo se instalará dentro del edificio de control en una sala independiente. En la misma sala se instalarán dos depósitos de combustible.

En todos los casos, los grupos alimentarán exclusivamente los servicios esenciales: conjuntos rectificador – baterías, equipos de aire acondicionado y ventilación de las salas y las tomas trifásicas.

7.1.5.1.3 Sistema de 230 Vca

Los servicios auxiliares de corriente alterna se alimentarán a 230 V desde un cuadro general de corriente alterna de tipo normalizado equipado con unas barras alimentadas desde los dos transformadores de servicios auxiliares y, en el caso de las SET, desde un grupo electrógeno trifásico.

Puesto que el grupo electrógeno es trifásico se instalarán tomas trifásicas en el interior del edificio y en el parque exterior de la SET. Existirá un conmutador automático de tensión de forma que solo podrán entrar en funcionamiento dichas tomas cuando entre a funcionar el grupo electrógeno.

En los centros de autotransformación, al no disponer de grupo electrógeno, la alimentación será monofásica. De forma que todos los servicios auxiliares puedan alimentarse indistintamente desde fuentes monofásicas.

El cuadro general de corriente alterna estará situado en la sala de servicios auxiliares del edifico de control.

La relación de servicios auxiliares a 230 Vca es:

- Alimentaciones a motores (seccionadores y puertas).
- Calefacción, climatización y ventilación.
- Saneamiento.
- Alimentación al cuadro de medida.
- Cuadro de alumbrado y fuerza que contiene:

- Circuitos de fuerza exteriores.
- Alimentaciones auxiliares del grupo electrógeno (SET).
- Circuitos de alumbrado y bases interiores.
- Alumbrado exterior.
- Alumbrado de emergencia.
- Las protecciones de estos circuitos.

7.1.5.1.4 Sistema de 125 Vcc para fuerza y control

Se instalarán en el edificio de control, de cada una de las subestaciones y de los centros de autotransformación, dos equipos cargadores-rectificadores para alimentar todos los sistemas de control y protecciones, así como el sistema de fuerza (alimentación de motores de interruptores y seccionadores). Asimismo se instalarán dos juegos de baterías, las cuales entre las dos deberán alimentar los sistemas durante 5 horas.

Existirá un equipo de conmutación automática que impida que los dos equipos rectificadores con sus baterías alimenten simultáneamente a las barras de 125 Vcc.

El cuadro general de corriente continua de 125 V será de tipo normalizado con dos barras independientes.

La relación de servicios auxiliares a 125 Vcc es la siguiente:

- Circuitos de cierre de los interruptores y de disparo de las protecciones.
- Unidades de control de posición del sistema de control distribuido.
- Motor de cambio de tomas de los transformadores de potencia (SET).
- Circuitos de alimentación de los motores interruptores y seccionadores.
- Circuitos de control en los armarios, en las cabinas, en los cuadros de servicios auxiliares y del cuadro de distribución de 230 Vca.
- Circuitos de mando de los grupos electrógenos (SET).
- Alimentación del armario de medida fiscal (SET).
- Alumbrado de socorro.
- Cuadros de telecomunicaciones.

- Sistemas de protección contra explosiones en el transformador de potencia (SET) y de detección de incendios y control de accesos.
- Circuitos de protecciones.
- Circuitos de señalización y alarmas en el cuadro de control convencional.

7.1.5.1.5 Instalación de alumbrado y fuerza

Alumbrado

El alumbrado exterior del parque de AT se realizará mediante farolas con luminarias de vapor de sodio de alta presión de 150 W con caja lateral inyectada, que contiene el equipo eléctrico; cuerpo de aluminio repulsado con aro basculante fijado con tornillos imperdible y reflector de aluminio extra puro, abrillantado y anodinado para que produzcan la mínima contaminación lumínica. También se instalarán luminarias de 150 W idénticas a las anteriores adosadas al edificio técnico.

En el parque se instalarán proyectores orientables equipados con lámparas de vapor de sodio de alta presión. Estarán normalmente apagados y se encenderán automáticamente mediante un interruptor crepuscular.

Para el alumbrado de los parques de los autotransformadores intermedios y finales, se instalarán luminarias de vapor de sodio de alta presión de 150 W iguales a las proyectadas para la SET y colocadas adosadas al edificio de control.

También se instalarán, para trabajos nocturnos, proyectores de 250 W repartidos por el parque exterior y proyectores de 400 W que enfocarán a los autotransformadores.

En el interior de los edificios de los diferentes centros, el alumbrado se realizará con luminarias polivalentes empotradas.

La disposición de las luminarias, tanto interiores como exteriores, así como sus características técnicas se presentan junto con los cálculos luminotécnicos en el Anexo E.

También se instalará alumbrado de socorro en los diferentes centros que constará de luminarias empotradas de 1x36 W que se instalarán en el mismo equipo que las tres luminarias de alumbrado normal. Su encendido será de tipo manual mediante interruptor o conmutador.

Se instalarán también tomas de corriente de 16 A y luminarias de emergencia en cada una de las puertas tanto interiores como exteriores, a base de equipos autónomos fluorescentes.

Tomas de fuerza

Se instalarán tomas de fuerza monofásicas de 2P+T (16 A) y trifásicas 3P+T (32 A) estancas de intemperie ancladas a pilares próximos a los viales, de forma que cubra el parque exterior tanto de las SET como de los centros de autotransformación, considerando cada conjunto con un radio de cobertura de 20 m.

En el edificio de control se instalarán tomas de fuerza monofásicas de 2P+T (16 A) y trifásicas de 3P+T (32 A) estancas para interior, repartidas por el edificio.

Junto a la puerta de acceso a los edificios de control tanto de las SET como de los centros de autotransformación se instalará un cuadro de baja tensión correspondiente a los circuitos de alumbrado y fuerza de dimensiones aproximadas de 2100 x 690 x 240 mm, de chapa, con puerta con cristal y con los equipos eléctricos indicados en los planos unifilares generales.

7.1.6. Red de tierras

Las subestaciones de tracción y los centros de autotransformación irán provistos de una red de tierras principal formada por una malla enterrada unida al cerramiento de la instalación.

Se cumplirá con lo establecido en la instrucción MIE RAT-13, realizándose dicha red de tierras con una malla de conductor de cobre de 120 mm² de sección para las SET y los centros de autotransformación. Esta malla irá enterrada a 0,8 m de profundidad, formando cuadrículas lo más uniformemente posible y efectuando derivaciones de la misma a las estructuras, a todos los soportes de los aparatos y a los edificios. Esta malla cubrirá toda la superficie de las instalaciones, de tal forma que las tensiones de paso y contacto que puedan establecerse sean menores a las consideradas como admisibles en el reglamento mencionado.

Los elementos metálicos dentro de los centros irán conectados a la malla de tierra subterránea, con el objeto de dar mayor seguridad al personal que transite por la

instalación y garantizar un buen funcionamiento de las protecciones. Estos cables de conexión serán de cobre de 150 mm^2 de sección.

Las derivaciones, así como las uniones para formar la cuadrícula, se efectuarán por medio de soldadura a fusión (aluminotérmica) mientras que para las uniones a los soportes metálicos se utilizarán piezas de conexión apropiadas.

En cuanto al sistema de protección de la instalación, deberá implantarse la selectividad amperimétrica, cronológica y lógica, para garantizar la coordinación con las protecciones de cabecera y con las existentes en la propia instalación.

La resistencia de todo el conjunto de tierras no presentará un valor mayor de 2 Ω.

Los sistemas de conexión entre picas y cables deben de permitir su independización para poder verificar la resistencia de cada uno de los elementos por separado. Los sistemas de conexión serán realizados mediante terminales con tortillería independiente del propio terminal, preferiblemente dotados con tortillería de acero inoxidable. No se permitirán sistemas de conexión por aprietahilos.

Las derivaciones y prolongaciones de los conductores y pletinas se realizarán para soportar la máxima intensidad de defecto. Es obligatorio utilizar piezas de solape que a modo de mordaza establezcan una unión firme entre ambas pletinas. Garantizarán las mismas condiciones de seguridad e inalterabilidad que las exigidas a los conductores activos (continuidad eléctrica, esfuerzos electrodinámicos, etc.), de tal forma que no aumenten la resistencia eléctrica del conductor y no se produzcan calentamientos que puedan deteriorar sus características ni aflojar los elementos desmontables.

8. Impacto medioambiental

8.1. Generalidades

Este apartado pretende responder a la prescripción establecida por el Real Decreto Ley 9/2000, de 6 de Octubre.

En este reglamento se establece la obligación de someterse a evaluación del impacto proyectos que repercutan sobre el medio ambiente y los recursos naturales.

Por esto, se ha de tener en cuenta tres situaciones diferentes:

- Situación preoperacional.
- Situación durante la ejecución.
- Situación posterior.

En general, puede decirse que los tres análisis tienen la misma importancia. Cualquiera de ellos puede y ha de condicionar la actuación.

En los siguientes apartados se analiza cada situación y se marcan las normas específicas de este proyecto en lo relacionado a impacto ambiental. Por esto, se sigue metodológicamente (aunque de una forma muy esquemática) la "Guía metodológica para la elaboración de estudios de impacto ambiental. Carreteras y ferrocarriles", publicada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes en 1989.

El contexto sobre el que se ubica el presente proyecto es el que se corresponde a una zona predominante calificada como vía férrea debido a la ya existencia de la plataforma de vías. Puntualmente la ubicación de los centros podrá necesitar el uso de parcelas próximas calificadas por uso agrario. Por consecuencia el impacto sobre los diversos ecosistemas será mínimo.

8.2. Situación preoperacional

8.2.1. Medio físico

El ámbito de actuación del proyecto, se encuentra en una zona actualmente calificada como vía férrea, en la cual las vías ya están instaladas, por tanto, en principio no se ha de esperar ninguna interferencia con ecosistemas biológicos ni geológicos.

Las emisiones contaminantes disminuirán con la ejecución de este proyecto debido a que la electrificación de líneas convencionales ferroviarias de maquinaria diesel tiene un impacto en la reducción de emisiones de carburantes de origen fósil y en su emisión correspondiente de dióxido de carbono así como en la optimización de un servicio de transporte público, provocando un mayor uso de éste y, por tanto, una reducción de los desplazamientos por carretera tanto de uso privado como de transporte de mercancías.

Las emisiones sonoras, no se verán incrementadas con la ejecución del presente proyecto de electrificación, por esta razón no serán analizadas. No obstante conviene destacar que las emisiones sonoras sí serán superiores a las actuales durante fase de explotación.

Las emisiones de campos electromagnéticos (CEM) procedente de instalaciones como cables de alta tensión, subestaciones o centros de autotransformación representan un aumento muy significativo de los valores actuales y se deberán limitar durante fase de explotación.

8.2.2. Medio socioeconómico e institucional

No existe en la zona afectada ninguna construcción catalogada de interés general a la que pertenezca el patrimonio histórico, ni similar.

8.2.3. Valoración y síntesis de la situación preoperacional

El espacio objeto del proyecto no variará su situación debido a la ejecución de las obras proyectadas en el presente proyecto, ya que no producen ningún cambio sustancial en el entorno ambiental.

8.3. Previsión de impactos

8.3.1. Sobre el medio físico

Las principales alteraciones que pueden generarse por la construcción y explotación del proyecto se producirán sobre el paisaje y por las emisiones CME. De todas formas, para completar este análisis se enumeran a continuación los efectos sobre el medio físico:

- Calidad del aire: Los cambios experimentados en él no serán perceptibles respecto a la situación actual.
- Ruido: Se analizará en el siguiente apartado.
- Paisaje: Se minimizará el impacto de la ubicación de los centros.
- Campos electromagnéticos: Se analizará en el siguiente apartado.

De todos modos cabe destacar, que el mayor consumo energético que se necesitará en la fase de explotación provocará una demanda de energía superior. A nivel local este efecto no produce ningún impacto ambiental, pero a nivel global puede provocarlo en forma de mayores emisiones contaminares en las centrales eléctricas, a no ser que la producción de energía se realice mediante energías renovables.

8.3.2. Sobre la población

Son los menos importantes, ya que se ubicarán la mayoría de centros en terrenos agrarios, y no existen viviendas en los alrededores.

8.3.2.1. Fase de Obras

Aumentaran los niveles de emisión de partículas durante la ejecución de las obras, por el movimiento de tierras.

Se producirán incrementos puntuales de los niveles sonoros, debido a los procesos de transporte, carga y descarga de materiales y los movimientos de maquinaria pesada. Se intentará que todo esto afecte lo menos posible a la población, favorecida por la corta duración de las obras y su pequeño radio de influencia.

El efecto de las expropiaciones será mínimo, debido a que la zona de ejecución del proyecto pertenece al mismo organismo (ADIF).

8.3.2.2. Fase de Explotación

Se ha procedido a valorar algunos de los efectos producidos por el Proyecto:

- Estética: El valor estético de la solución final depende más de elementos accesorios, paisajísticos, de jardinería o de mobiliario urbano, mucho más de detalle y acabado. El efecto es negativo.
- Seguridad: Las instalaciones proyectadas son de ejecución nueva y sobredimensionada para ser capaces de soportar sobrecargas en momentos críticos. Por esta razón el efecto es positivo.
- Contaminación lumínica: Las luminarias seleccionadas cumplen con la normativa vigente relativa a contaminación lumínica, y además se ha seleccionada un tipo de luminaria con regulación de lámpara, para que el enfoque de la lámpara nunca sea en perpendicular con el suelo. El efecto es positivo.
- Nivel de ruido: Los equipos exteriores como los transformadores generarán niveles de ruido que deberán estar por debajo de los límites máximos permitidos, así como los equipos ubicados dentro los edificios. El efecto es negativo.
- Emisiones de campos electromagnéticos: Se ha de comprobar que no existe peligro vinculado a la exposición a los CEM y cuáles son las repercusiones sanitarias potenciales de este último. El efecto es negativo.

8.4. Medidas preventivas y correctoras

8.4.1. Fase de obras

Las principales afecciones medioambientales ocasionadas por la ejecución de la obra consisten en la emisión de ruido y la emisión de polvo en la etapa de excavación y transporte de tierras.

Como solución se adopta que la maquinaria ruidosa como martillos picadores neumáticos, maquinaria pesada de excavación, carga y transporte así como cualquier fuente de ruido no funcionará antes de las 8 horas de la mañana y se procurará que los trabajos que las requieran se dilaten el mínimo en el tiempo.

Igualmente, se establecerán reuniones periódicas para tener constancia de las perturbaciones provocadas y tener cuidado, si es posible, corregirlas inmediatamente. En todo caso se deberá de tener en cuenta las sugerencias recibidas.

No se utilizarán sirenas de aviso horario. En su defecto, se pueden instalar señales luminosas con el mismo fin.

8.4.2. Fase de explotación

8.4.2.1. Emisiones electromagnéticas

La norma EN-50121:2 (*Aplicaciones ferroviarias-Compatibilidad electromagnéticas*: *Emisión del sistema ferroviario en su conjunto hacia el mundo exterior*) fija los límites de emisión procedente del sistema ferroviario en su conjunto. Describe también el método de medida que debe utilizarse para comprobar las emisiones.

Conviene, según esta norma, considerar que estas emisiones existen en todo los puntos de los planos verticales situados a 10 m de las líneas centrales de las vías de ferrocarril en zona exterior o a 3 m del cerramiento de las subestaciones.

El Anexo C de dicha norma da un cuadro (informativo) de los valores numéricos de la magnitud que describen las emisiones del sistema a 25 kV y que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8-1 Valores de campos eléctricos y magnéticos máximos a la frecuencia fundamental

Sistema	Frec. (Hz)	Campo E (V/m)	Campo H (μT)	Condiciones	Documentación de referencia
25 kVca	50	1000	16	I_{cc}=1.500 A U=27,5 kV Centros AT	Directivas ITU (T) CIGRE WG 3601

*Nota: Valores calculados para una distancia de 10 m a partir de la línea central de la vía más cercana, 1 m sobre el nivel del carril.

Según la norma, la disminución del CEM inducida por los transformadores instalados es lineal con la distancia. Esta distancia es la que existe entre el emisor y el plano vertical donde se quiere calcular los valores de los campos eléctricos (E) y magnéticos (H).

Con la aplicación de esta norma se obtiene el cuadro siguiente del CEM en función de la distancia con relación al cerramiento de la instalación debido a que los valores son muy inferiores a niveles de la recomendación europea (E_{adm} = 5000 V/m, H_{adm} = 100 μT) otorgados para una exposición permanente.

8.4.2.2. Ruido

El valor del ruido puede ligeramente ser diferente según el método de refrigeración del transformador (Método ONAN (Oil Natural Air Natural) o método ONAF (Oil Natural Air Forced).

En las Especificaciones técnicas de ADIF se establece un nivel de ruido en funcionamiento a potencia y tensión nominal de 86 dB a 1m, valor que cumple la norma CEI 551.

En fase de proyecto civil, se estudian las medidas correctoras destinadas a evitar la emisión sonora fuera de los límites de las instalaciones por encima de los límites reglamentarios (habitualmente 45 dB por la noche), introduciendo pantallas acústicas en aquellas direcciones con núcleos de población donde pueda incumplirse la normativa.

8.4.3. Fase de desmantelamiento

En el momento de cese de la explotación de Air City, o en su defecto de las instalaciones proyectadas, los materiales reutilizables como el cobre de los conductores de baja tensión, el aluminio de los conductores de alta tensión, el acero de los báculos, etcétera….serán reciclados en un centro especializado. En cambio el material no reutilizable será retirado a un vertedero controlado.

8.5. Conclusiones

Analizada la situación preoperacional y evaluados los impactos que se deberán de producir, se llega a la conclusión que en este actuación el principal impacto negativo se produce durante la ejecución de las obras. Por eso se han de extremar las medidas correctoras que se describen al respecto.

Por todo lo anteriormente afirmado, se concluye diciendo que la actuación del presente proyecto no afecta de manera negativa al impacto ambiental de la zona y más concretamente contribuye a una mejora funcional de la zona afectada.

9. Presupuesto

9.1. Presupuesto de ejecución Material

El presupuesto de ejecución material para la ejecución de las obras de instalación y montaje de las instalaciones eléctricas de las subestaciones de tracción y centros de autotransformación asociados del presente proyecto es de:

Código	Resumen	Ud.	Precio	Importe (€)
01	**Subestaciones de tracción y centros de autotransformación**			**15.836.224,03**
01.01	**Equipos de alta y media tensión**			**12.351.748,23**
	La partida incluye ensayos según el pliego de prescripciones, transporte, accesorios necesarios, montaje e incluso pequeño material de montaje.			
01.01.01	Equipos a 220 kV			2.750.059,14
ELE1101	Seccionador tripolar rotativo 220 kV Suministro y montaje de seccionador tripolar rotativo de tres columnas de 220 kV, con doble seccionamiento y doble puesta a tierra.	1	11.356,80	22.713,60
ELE1102	Transformador de tensión 220 kV para medida Suministro y montaje de transformador de tensión inductivo 220 kV, en intemperie, con doble devanado secundario, para medida fiscal y control de medida. Se conectará entre fase y tierra.	4	1.752,40	7.009,60
ELE1103	Transformador de intensidad 220 kV para medida Suministro y montaje de transformador 220 kV de intensidad, en intemperie, con dos devanados primarios de 75 y 150 A y doble secundario, para medida fiscal y control de potencia, con aislamiento en aceite.	4	1.751,86	7.007,44
ELE1104	Interruptor automático bipolar 220 kV Suministro y montaje de interruptor automático bipolar en SF6 de 220 kV, intensidad asignada 1250 A y poder de corte de 40 kA.	2	62.435,70	124.871,40

ELE1105	Transformador de tensión 220 kV para protección Suministro y montaje de transformador de tensión inductivo de 220 kV, en intemperie, con un devanado secundario para protección. Se conectará entre fase y tierra.	4	12.125,44	48.501,76
ELE1106	Transformador de intensidad 220 kV para protección Suministro y montaje de transformador 220 kV de intensidad, en intemperie, con cuatro devanados secundarios para protección, con aislamiento en aceite.	4	1.755,30	7.021,20
ELE1107	Autoválvula de óxido de zinc 220 kV Suministro y montaje de autoválvula de óxido de zinc (ZnO) de 220 kV para protección de transformador de potencia, en intemperie, con envolvente aislante exterior en porcelana marrón.	4	962,70	3.850,80
ELE1108	Transformador de potencia bifásico de 30 MVA a 220/2x27.5 Suministro y montaje de transformador tracción bifásico de 30 MVA de potencia, 220±8%/27,5-27,5 kV, con instalación intemperie, aislamiento en aceite, frecuencia 50 Hz, servicio continuo, refrigeración ONAN y potencia nominal de cada uno de los dos arrollamientos secundarios de 15 MVA.	2	1.264.541,6	2.529.083,34
01.01.02	Equipos a 400 kV			3.399.258,24
ELE1201	Seccionador tripolar rotativo 400 kV Suministro y montaje de seccionador tripolar rotativo de tres columnas de 400 kV, con doble seccionamiento y doble puesta a tierra.	2	68.054,40	136.108,80
ELE1202	Transformador de tensión 400 kV para medida Suministro y montaje de transformador de tensión inductivo 400 kV, en intemperie, con doble devanado secundario, para medida fiscal control de medida. Se conectará entre fase y tierra.	4	23.002,20	92.008,80
ELE1203	Transformador de intensidad 400 kV para medida Suministro y montaje de transformador 400 kV de intensidad, en intemperie, con dos devanados	4	19.203,43	76.813,72

	primarios de 75 y 150 A y doble secundario, para medida fiscal y control de potencia, con aislamiento en aceite.			
ELE1204	Interruptor automático bipolar 400 kV Suministro y montaje de interruptor automático bipolar en SF6 de 400 kV, intensidad asignada 2.500 A y poder de corte de 50 kA.	2	119.241,35	238.482,70
ELE1205	Transformador de tensión 400 kV para protección Suministro y montaje de transformador de tensión inductivo de 400 kV, en intemperie, con un devanado secundario para protección en conexión fase tierra con circuito antirresonante y aislamiento en aceite, incluso pequeño material.	4	28.338,22	113.352,88
ELE1206	Transformador de intensidad 400 kV para protección Suministro y montaje de transformador 400 kV de intensidad, en intemperie, con cuatro devanados secundarios para protección, con aislamiento en aceite.	4	20.981,15	83.924,60
ELE1207	Autoválvula de óxido de zinc 400 kV Suministro y montaje de autoválvula de oxido de zinc (ZnO) de 400 kV para protección de transformador de potencia, en intemperie, con envolvente aislante exterior en porcelana marrón.	4	7.370,85	29.483,40
ELE1208	Transformador de potencia bifásico de 30 MVA a 405/2x27.5 suministro y montaje de transformador tracción bifásico de 30 MVA de potencia, 400 ±7,4%/27,5-27,5 kV, con instalación intemperie, aislamiento en aceite, frecuencia 50 Hz, servicio contínuo, refrigeración ONAN y potencia nominal de cada uno de los dos arrollamientos secundarios de 15 MVA.	2	1.314.541,67	2.629.083,34
01.01.03	Equipos a 55 kV y 36 kV			6.202.430,85
ELE1301	Autoválvula de óxido de zinc (ZnO) 55 kV Suministro y montaje de autoválvula de oxido de zinc (ZnO) de 55 kV para protección de la baja del transformador de potencia, en intemperie, con envolvente aislante exterior en porcelana marrón.	40	1.953,57	78.142,80

ELE1302	Conjunto de celdas monofásicas metálicas encapsuladas de 55 kV, SET Suministro y montaje de conjunto de 8 celdas bifásicas metálicas encapsuladas en aislamiento de SF6 a 55 kV, para control y protección de los transformadores de potencia, catenaria y *feeder*, acoplamiento de barras y remonte longitudinal y celdas de salida monofásica y medida en cada semibarra, todas ellas ubicadas en el edificio de control de la SET.	2	388.770,84	777.541,68
ELE1303	Conjunto de celdas monofásicas metálicas encapsuladas de 36 kV, SET Suministro y montaje de dos conjuntos de celdas monofásicas metálicas de aislamiento SF6 de 36 kV para seccionamiento y protección de cada transformador de servicios auxiliares y otra de remonte para subida de cables de 36 kV. Todo ello en el edificio de control de la SET.	2	23.705,74	47.411,48
ELE1304	Seccionador bipolar 52 kV 2.000 A Suministro y montaje de seccionador bipolar 52 kV 2.000 A de doble apertura lateral, para pórtico de salida a catenaria y *feeder*.	22	7.896,41	173.721,02
ELE1305	Aislador 55 kV Suministro y montaje de aislador 55 kV de envoltura exterior en porcelana marrón, tipo C6-50.	180	1.113,38	200.408,40
ELE1306	Autotransformador de tracción 10 MVA Suministro y montaje de autotransformador monofásico de tracción 10 MVA, 55/27,5 kV, instalación intemperie, frecuencia 50 Hz, servicio continuo, aislamiento de aceite refrigeración ONAN.	24	102.816,91	2.467.605,84
ELE1307	Conjunto de celdas monofásicas metálicas encapsuladas de 55 kV, ATI Suministro y montaje de conjunto de 2 celdas bifásicas metálicas encapsuladas en aislamiento de SF6 55 kV, para control y protección los autotransformadores de potencia y celdas de salida monofásica y medida en cada semibarra, todas ellas ubicadas en el edificio de control del centro ATI.	10	192.691,32	1.926.913,20

ELE1308	Conjunto de celdas monofásicas metálicas encapsuladas de 55 kV, ATF Suministro y montaje de conjunto de 8 celdas bifásicas metálicas encapsuladas en aislamiento de SF6 55 kV, para control y protección de los autotransformadores, catenaria y *feeder*, acoplamiento de barras y remonte longitudinal y celdas de salida monofásica y medida en cada semibarra, todas ellas ubicadas en el edificio de control del centro ATF.	1	486.203,34	486.203,34
ELE1309	Armario barra cero SET Suministro y montaje de armario barra cero para SET. Incluyendo conexionados, embarrado de cobre y transformadores de corriente en la SET.	2	3.140,20	6.280,40
ELE1310	Armario barra cero ATI Suministro y montaje de armario barra cero para ATI. Incluyendo conexionados, embarrado de cobre y transformadores de corriente en centros ATI.	10	3.427,33	34.273,30
ELE1311	Armario barra cero ATF Suministro y montaje de armario barra cero para ATF. Incluyendo conexionados, embarrado de cobre y transformadores de corriente en centros ATF.	1	3.929,39	3.929,39
01.02	**Conductores**			**1.161.850,22**
	Tendido sobre cualquier tipo de canalización, tubo o bandeja, con parte proporcional de cajas de derivación, bornas, terminales, sujeciones, identificadores y pasatubos, totalmente terminado, timbrado y puesto en servicio.			
01.02.01	Cables			955.873,41
ELE2101	Botella terminal 55 kV Suministro y montaje de botella terminal 55 kV para conexión de cable de MT. Para montaje interior, exterior o en cabina, totalmente terminado.	228	339,41	77.385,48
ELE2102	Cable de cobre 120 mm² de 26/45 kV aislamiento XLPE Suministro, tendido y conexionado de cable de cobre unipolar aislado en XLPE de 18/30 kV de 1x120 mm^2.	1.705	24,06	41.022,30

ELE2103	Cable de cobre 150 mm² de 36/66 kV aislamiento XLPE Suministro, tendido y conexionado de cable de cobre unipolar aislado en XLPE de 36/66 kV de 1x150 mm^2.	2.805	27,06	75.903,30
ELE2104	Cable de cobre 185 mm² de 36/66 kV aislamiento XLPE Suministro, tendido y conexionado de cable de cobre unipolar aislado en XLPE de 36/66 kV de 1x185 mm^2.	1.860	35,85	66.681,00
ELE2105	Cable de cobre RV-K 0,6/1 kV de BT Partida alzada de suministro, tendido y conexionado de cable de cobre unipolar aislado tipo RV-K 0,6 /1 kV para conexionado en BT.	1	66.253,40	66.253,40
ELE2106	Cable de cobre RV-OV 0,6/1kV de BT Partida alzada de suministro, tendido y conexionado de cable de cobre unipolar aislado tipo RV-OV 0,6 /1 kV para conexionado en BT.	1	623.561,05	623.561,05
ELE2107	Conductor dúplex RAIL Suministro, tendido y conexionado de cable de aleación aluminio-acero tipo LA-510 RAIL para conexionado en AT.	208	12,22	2.541,76
ELE2108	Conductor dúplex CONDOR Suministro, tendido y conexionado de cable de aleación aluminio-acero tipo LA-455 CONDOR para conexionado en AT.	208	12,14	2.525,12
01.02.02	Bandejas			111.463,61
ELE2201	Bandejas para cables Partida alzada de suministro y montaje de bandejas perforadas galvanizadas según especificaciones técnicas. Incluyendo material auxiliar.	2.627	42,43	111.463,61
01.02.03	Tubos			94.513,20
ELE2301	Tubo de aluminio Al 40/30 Suministro y montaje de tubo de aluminio 40/30; según especificaciones técnicas. Incluyendo material auxiliar.	984	96,05	94.513,20

01.03	**Instalaciones complementarias**			**773.283,28**
01.03.01	Alumbrado y fuerza			195.885,55
	Suministro, montaje y conexionado de elementos de alumbrado y fuerza del centro, incluido instalación eléctrica y mano de obra para conexionado, utilizando tubo, cajas y accesorios. Totalmente montado incluyendo material de montaje y todo el material descrito en plano de referencia, terminado, probado y puesto en servicio.			
ELE3101	Alumbrado y fuerza en la SET	2	25.254,41	50.508,82
ELE3102	Alumbrado y fuerza en centros ATI	10	13.040,66	130.406,60
ELE3103	Alumbrado y fuerza en centro ATF	1	14.970,13	14.970,13
01.03.02	Red de tierras			577.397,73
ELE3201	Cable de cobre 150 mm^2 desnudo de cobre Suministro, montaje y conexionado de cable de cobre de 150 mm^2 desnudo para red de tierras.	3.500	15,31	53.585,00
ELE3202	Cable de cobre 120 mm^2 desnudo de cobre Suministro, montaje y conexionado de cable de cobre de 120 mm^2 para red de tierras.	14.000	13,54	189.560,00
ELE3203	Pletina de cobre en SET Suministro y montaje de pletina de cobre, incluida soldadura aluminotérmica para toma de tierra, picas y piezas para conexión en edificio técnico SET.	3	5.924,46	17.773,38
ELE3204	Pletina de cobre en centro ATF Suministro y montaje de pletina de cobre, incluida soldadura aluminotérmica para toma de tierra, picas y piezas para conexión en edificio técnico ATF.	1	6.757,61	6.757,61
ELE3205	Pletina de cobre en centro ATI Suministro y montaje de pletina de cobre, incluida soldadura aluminotérmica para toma de tierra, picas y piezas para conexión en edificio técnico ATI.	10	4.641,02	46.410,20
ELE3206	Picas de tierra en SET Suministro y montaje de picas de tierra, incluida soldadura aluminotérmica para toma de tierra, picas y piezas para conexión en parque exterior de la SET.	76	540,53	41.080,28
ELE3207	Picas de tierra en ATF Suministro y montaje de picas de tierra, incluida soldadura aluminotérmica para toma de tierra, picas y piezas para conexión en parque exterior del ATF.	19	1.116,74	21.218,06

ELE3208	Picas de tierra en ATI Suministro y montaje de picas de tierra, incluida soldadura aluminotérmica para toma de tierra, picas y piezas para conexión en parque exterior del ATI.	180	1.116,74	201.013,20
01.04	**Servicios auxiliares**			**1.549.342,30**
ELE4101	Transformador monofásico seco 250 kVA Suministro y montaje de transformador monofásico seco 250 kVA para alimentación de servicios auxiliares en SET, 27,5/0,23 kV.	4	14.754,59	59.018,36
ELE4102	Rectificador y baterías en SET Suministro y montaje de conjunto de grupo rectificador SAMI en instalación redundante 230 Vca / 125 Vcc.	2	86.046,85	172.093,70
ELE4103	Cuadro de servicios auxiliares 230 Vca en SET Suministro y montaje de cuadro de servicios auxiliares de 230 Vca de la SET, con unidad de protección y conmutación automática de transformadores de SSAA y grupo electrógeno.	2	38.417,51	76.835,02
ELE4104	Cuadro de servicios auxiliares 125 Vcc en SET Suministro y montaje de cuadro de servicios auxiliares de 125 Vcc en SET.	2	9.925,79	19.851,58
ELE4105	Rectificador y baterías en centros ATI y ATF Suministro y montaje de conjunto de grupo rectificador SAMI en instalación redundante 230 Vca / 125 Vcc en centro de autotransformación	11	61.969,10	681.660,10
ELE4106	Cuadro de servicios auxiliares 230 Vca en centros ATI y ATF Suministro y montaje de cuadro de servicios auxiliares de 230 Vca de centro de autotransformación, con unidad de protección y conmutación automática de transformadores de SSAA.	11	15.117,59	166.293,49
ELE4107	Cuadro de servicios auxiliares 125 Vcc en centros ATI y ATF Suministro y montaje de cuadro de servicios auxiliares de 125 Vcc en centro de autotransformación.	11	8.664,71	95.311,81

ELE4108	Grupo electrógeno trifásico 100 kVA en SET Suministro, montaje e instalación de grupo electrógeno trifásico de 100 kVA, factor de potencia 0,8, frecuencia 50 Hz, tensión 400 V trifásicos, combustible gasóleo y arranque eléctrico por baterías de 12V.	2	14.189,57	28.379,14
ELE4109	Transformador monofásico seco 50 kVA Suministro y montaje de transformador monofásico seco 50 kVA para alimentación de SSAA en centros de autotransformación.	22	11.359,05	249.899,10

El presupuesto de Ejecución Material asciende a la referida cantidad de QUINCE MILLONES, OCHOCIENTOS TREINTA Y SEIS MIL, DOSCIENTOS VEINTICUATRO EUROS CON TRES CÉNTIMOS.

9.1.1. Resumen de partidas del presupuesto de ejecución material

A continuación se presenta un resumen de los diferentes capítulos que componen el presupuesto.

Tabla 9-1 Resumen presupuesto de ejecución material

1.	Subestaciones de tracción y centros de autotransformación	15.836.224,03 €
1.1	Suministro y montaje de equipos de alta y media tensión	12.351.748,2 €
1.1.1.	Equipos a 220 kV	2.750.059,14 €
1.1.2.	Equipos a 400 kV	3.399.258,24 €
1.1.3.	Equipos a 55 kV y 36 kV	6.202.430,85 €
1.2.	Conductores	1.161.850,22 €
1.2.1	Cables	955.873,41 €
1.2.2	Bandejas	111.463,61 €
1.2.3	Tubos	94.513,20 €
1.3.	Instalaciones complementarias	773.283,28 €
1.3.1.	Alumbrado y Fuerza	195.885,55 €

1.3.2.	Red de tierras	577.397,73 €
1.4	Servicios Auxiliares	1.549.342,30 €
2.	Estudio de Seguridad y Salud	79.694,82 €
Presupuesto de ejecución material		**15.915.918,85 €**

A continuación se presenta un resumen del coste de los diferentes centros.

Tabla 9-2 Resumen presupuesto por centros

Nº centros	Centro	Importe (ud.)
1	SET-1	3.826.748,92 €
1	SET-2	4.481.872,48 €
10	Centro de autotransformación intermedio	6.610.328,20 €
1	Centro de autotransformación final	908.958,99 €

9.2. Presupuesto de confección del proyecto

El presupuesto del proyecto hace referencia a los costes y medios imputados en la confección del proyecto, para realizar sus documentos (memoria, planos, anexos y presupuesto).

Tabla 9-3 Presupuesto de confección del proyecto

Código	**Resumen**	**Ud.**	**Precio**	**Importe (€)**
03	**Presupuesto del proyecto**			**21.646,20**
03.01	**Coste de personal**			**21.461,70**
	Se estima que aproximadamente dos tercios del total de horas han supuesto la formación y búsqueda de información y un tercio la redacción y cálculos.			
C3101	Ingeniero Junior	540	37,24	20.109,60
C3102	Ingeniero Sénior	30	45,07	1352,10
03.02	**Desplazamientos**			**82,00**
C3201	Viajes y desplazamientos a reuniones	10	8,20	82,00

03.03	**Material fungible y elementos informáticos**			**102,50**
C3301	Impresiones	150	0,33	49,50
C3302	Portadas y encuadernaciones	5	0,60	3,00
C3303	Uso de elementos informáticos	1	50,00	50,00

9.3. Presupuesto de ejecución por contrata

El presupuesto de ejecución por contrata es de:

Tabla 9-4 Presupuesto de ejecución por contrata

Presupuesto de ejecución material	15.915.918,85 €
Presupuesto de confección del proyecto	21.646,20 €
Total	15.937.565,05 €
16 % de IVA	2.550.010,41 €
Presupuesto de ejecución por contrata	**18.487.575,46 €**

El Presupuesto de ejecución por contrata, base de licitación, asciende a la referida cantidad de DIECIOCHO MILLONES, CUATROCIENTOS OCHENTA Y SIETE MIL, QUINIENTOS SETENA Y CINCO EUROS, CON SETECIENTOS SESENTA Y UN EUROS, CON CUARENTA Y SEIS CÉNTIMOS.

9.4. Estudio de seguridad y salud

En cumplimiento del artículo 4 del Real Decreto 1627/1997 del 24 de octubre se establece la necesidad de realizar el Estudio de Seguridad y Salud al legalizar una instalación al ser el presupuesto de ejecución por contrata incluido en el proyecto superior a 450.759,08 €.

Conclusiones

A lo largo del desarrollo de este proyecto se ha analizado la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad. Dicha electrificación está dividida en sectores aislados entre sí y alimentados por su correspondientes subestaciones de tracción. Para su alimentación se ha demostrado que el sistema 2x25 kVca se ha convertido en la tendencia predominante en Europa, por la reducción de las corrientes circulantes en catenaria (disminución de las pérdidas de potencia y de las caídas de tensión) y por la reducción de las perturbaciones electromagnéticas generadas al entorno.

Las subestaciones de tracción, que transforman la tensión desde los niveles de la red eléctrica a la que están conectados a los niveles de tensión de la catenaria, se encuentran tele-mandadas, por lo que en caso de indisponibilidad de algún transformador o de alguna subestación, es posible reconfigurar la electrificación de forma remota para asegurar el suministro eléctrico.

Para el dimensionamiento de los centros de transformación y las subestaciones de tracción se deben calcular las tensiones e intensidades en condiciones normales de operación y las existentes en caso de defecto. Para ello, se ha presentado un modelo adecuado para cada uno de los elementos de que se compone el sistema eléctrico de tracción, así como el equivalente de Thévenin de la red de alimentación de AT.

Del estudio de las intensidades de cortocircuito en el sistema se ha comprobado la aportación de corriente a la misma por parte de los autotransformadores conectados al sistema. También se ha determinado que si la longitud del tramo que alimenta aumenta, la corriente de cortocircuito se reduce.

Por último, se han detallado las condiciones de funcionamiento de la electrificación, las tensiones en la catenaria, las corrientes, las potencias en transformadores y autotransformadores. Mediante las mismas se ha determinado los equipos necesarios a instalar así como los diferentes elementos de control y protección.

Las diferentes instalaciones que se han proyectado proporcionan en su conjunto la infraestructura necesaria para el suministro de energía a una línea de alta velocidad 2x25 kVca.

Agradecimientos

A mi Director de Proyecto, Felipe Córcoles por su gran colaboración, ayuda y guía con sus valiosas sugerencias y acertados aportes durante el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros Javier Cilla y José Enrique por su permanente disposición y desinteresada ayuda.

A mis compañeros de Ingeniería por sus incondicionales sugerencias.

A mi familia y mis amigos por su continuo y afectuoso apoyo.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

[1] Brun D., Lancien D., RaoulM. *La puissance et la commande du TGV. Un système intégré électrotechnique/électronique.* Revue Générale de l'Électricité N°11/94 (1994).

[2] Hernández-Velilla A. *El desarrollo de una catenaria de alta velocidad.* HELIATIOM 2000.

[3] TECNORAIL CO. *Sistemas de alimentación a la tracción eléctrica.* 2008.

[4] Glover J. Duncan, Kusko A. y Peeran S. M. *Train voltaje analysis for AC railroad electrification. IEEE Transactions on Industry Applications IA-20*, 1984.

[5] Procedimiento de Operación (P.O.) 12.2 *Instalaciones conectadas a la red de transporte: Requisitos mínimos de diseño, equipamiento, funcionamiento y seguridad y puesta en servicio: Apartado 1 "Condiciones de intercambio de la energía".* REE [http://www.ree.es/operacion/procedimientos_operacion.asp].

[6] Procedimiento de Operación (P.O.) 1.4 *"Condiciones entrega energía puntos frontera".* REE. [http://www.ree.es/operacion/procedimientos_operación.asp].

[7] *Instalaciones conectadas a la red de transporte. Requisitos mínimos de diseño y equipamiento con REF.*: TI.E/02/040, fecha: 25.02.03 y edición: 3.

[A1] Paul, C. *Analysis of Multiconductor Transmission Lines.* Wiley & Sons, Nueva York, EEUU, 1994.

[A2] Gómez Expósito A. *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica.* McGraw-Hill, Madrid, España 2002.

[B1] P.O. 10.1 *"Condiciones de instalación de los puntos de medida"*. Operación del sistema eléctrico-Procedimiento de Operación. [http://www.ree.es/operacion/procedimientos-operacion.asp].

Bibliografia complementària

[Boix O., Córcoles F., Sainz L., Suelves F.] *Tecnología eléctrica.* Ediciones CEYSA 2002.

[Córcoles F., Pedra J., Salichs M]. *Transformadores.* Ediciones UPC. 2004

[ET 03.359.503.4] *Especificaciones técnicas-Cabinas bifásicas blindadas de 55 kV aisladas en gas SF6.* ADIF, 2008.

[ET 03.359.504.2] *Especificaciones técnicas-Transformadores de potencia para subestaciones de tracción de líneas de alta velocidad. Sistema 2x25 kV.* ADIF, 2008.

[ET 03.359.505.9] *Especificaciones técnicas-Autotransformadores sumergidos en aceite para centros de autotransformación en líneas de alta velocidad.* ADIF, 2008.

[http://www.abb.es] Productos de alta tensión, media tensión y baja tensión. Instrumentación y analítica.

[http://www.areva-td.com] Seccionadores tripolares.

[http://www.aceisa.com] Centros de transformación.

[http://www.generalcable.es] *Cables de alta, media y baja tensión.* Cables normalizados por las compañías eléctricas.

[http://search.abb.com/library/ABBLibrary.asp?DocumentID=1HSM%209543%2040-00en&LanguageCode=en&DocumentPartID=&Action=Launch] *Guía de especificación de transformadores de medida y protección.*

[IEEE C37.2] *Standard Electrical Power System Device Function Numbers*, 2008.

[ITC-LAT 07] Instrucción Técnica Complementaria 07 del Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión. Real Decreto 223/2008.

[MIE RAT-12] Instrucción técnica complementaria del Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación. [http://www.coitiab.es/reglamentos/electricidad/reglamentos/mie-rat/mie-rat-12.htm].

[MIE RAT-13] Instrucción técnica complementaria del Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación. [http://www.coitiab.es/reglamentos/electricidad/reglamentos/mie-rat/mie-rat-13.htm].

[NTC MA 009] Prescripciones técnicas de material rodante de alta velocidad. UIC Union des Chemins de Fer 2000 (UIC-794).

[R.D. 385/2002] Real decreto 385/2002 de 26 de Abril por el que se modifica el R.D. 2018/1997, de 26 de diciembre por el que se aprueba el Reglamento de Puntos de Medida de los Consumos y Transito de Energía Eléctrica.

[REBT] Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, 2002.

[RLAAT] Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión. B.O.E. 27 diciembre de 1968.

[Schneider Electric España, S.A] *Guía de diseño de instalaciones eléctricas*, España, 2005.

[Schneider Electric España, S.A] *Guía de diseño de MT*, España, 2005.