



Máster Universitario en
Sistemas Ferroviarios

Análisis del Efecto de las Zonas Neutras en el Sistema Ferroviario

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CURSO: 2019-2020

Master Universitario en Sistemas Ferroviarios
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA ICAI

Autor:

Carlos Jiménez Morlanes

Directores:

Alberto García Álvarez

Ignacio González Franco

Ficha técnica

Autor: Jiménez Morlanes, Carlos

Director del TFM: García Álvarez, Alberto

Director del TFM: González Franco, Ignacio

Programa: Máster en Sistemas Ferroviarios

Título: Efecto de las Zonas Neutras en el Sistema Ferroviario

Resumen:


El sistema de electrificación en Corriente Alterna utilizado en el sistema ferroviario, cuando los transformadores de las Subestaciones Eléctricas de Tracción se alimentan de una red trifásica, necesita de la existencia de Zonas Neutras para separar eléctricamente las distintas secciones de catenaria y evitar producir un cortocircuito en la Red de Distribución.

Este hecho acarrea una serie de consecuencias no deseadas en la explotación y que se pretenden estudiar en el presente trabajo. Dado que no existe energía de la que el tren se alimente, el tiempo de viaje, así como el consumo energético pueden verse en cierta medida afectados.

Además se debe tener en cuenta el tratamiento que los sistemas embarcados de señalización realizan de la información que la vía les transmite al aproximarse a la Zona Neutra, lo que lleva a que la longitud en la que el tren se encuentra sin alimentación se ve incrementada.

A fin de evitar estos efectos no deseados, algunas administraciones ferroviarias han realizado investigaciones y ensayos, llegando a implementar en sus sistemas alternativas que los mitiguen o eliminen.

Habiendo realizado el análisis de las alternativas existentes se ha identificado un área de posible mejora, por lo que se realiza una propuesta de mejora que podría implantarse utilizando los actuales sistemas en producción.

Autor del TFM	
Carlos Jiménez Morlanes	
<i>(Firma)</i>	
Directores del TFM	
Alberto García Álvarez	Ignacio González Franco
	

Contenido

FICHA TÉCNICA	3
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. DESCRIPCIÓN	9
1.2. ESTADO DEL ARTE	9
1.2.1. Sistema de electrificación en CA 1x25	9
1.2.2. Sistema de electrificación en CA 2x25	10
1.2.3. Consecuencias derivadas de la existencia de las Zonas Neutras	11
1.2.4. Alternativas existentes para disminuir los efectos no deseados de las ZN.....	12
2. OBJETIVOS	13
3. PLANIFICACIÓN DE TAREAS	14
4. DEFINICIÓN Y TIPOLOGÍA DE UNA ZONA NEUTRA	15
4.1. DEFINICIÓN DE ZONA NEUTRA	15
4.2. TIPOLOGÍA DE ZONAS NEUTRAS	15
4.2.1. Zona neutra por cambio de tensión	15
4.2.2. Zona neutra de cambio de fase	16
4.2.3. Zona neutra por sectorización en estaciones	16
4.2.4. Zona neutra por trabajos	17
4.3. CONSIDERACIONES	17
5. INFORMACIÓN RELEVANTE SOBRE ZONAS NEUTRAS	18
5.1. LONGITUD FÍSICA DE LA ZONA NEUTRA	18
5.2. SEÑALIZACIÓN LATERAL	18
5.3. OPERACIÓN EN CONDUCCIÓN MANUAL.....	19
5.4. TRATAMIENTO DE LA ZONA NEUTRA POR PARTE DEL SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN ERTMS	20
5.5. TRATAMIENTO DE LA ZONA NEUTRA POR PARTE DEL MATERIAL RODANTE	21
5.6. ZONA NEUTRA VIRTUAL	22
6. EFECTOS NO DESEADOS DE UNA ZONA NEUTRA	24
6.1. PÉRDIDA DE VELOCIDAD EN LA ZN.....	24
6.1.1. Análisis de los resultados.....	29
6.1.2. Análisis de un caso real	29
6.1.3. Conclusiones.....	30
6.2. INCREMENTO DEL CONSUMO ENERGÉTICO	31
6.2.1. Conclusiones.....	32
6.3. PÉRDIDA DE CONFORT DE LOS VIAJEROS	32
6.4. CONSECUENCIAS PARA EL MANTENEDOR DEL MATERIAL RODANTE	33
7. SOLUCIONES A LOS EFECTOS NO DESEADOS DE LAS ZONAS NEUTRAS	34
7.1. SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN PROPIO	34
7.2. REDUCIR EL NÚMERO DE ZONAS NEUTRAS.....	34
7.2.1. Optimizar diseño de las Zonas Neutras a instalar	34
7.2.2. Reducir la redundancia frente a las Subestaciones Eléctricas.....	34
7.3. CASO JAPONÉS.....	35
7.4. CASO COREANO.....	36
7.5. PROYECTO IFZONE	36
7.6. UTILIZACIÓN DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS CON ELECTRÓNICA DE POTENCIA.....	38
7.7. SISTEMA DE PROTECCIÓN DE LA ZONA NEUTRA	38
8. APORTACIONES	39

8.1.	ELECCIÓN CORRECTA DE LA UBICACIÓN DE LAS ZONAS NEUTRAS	39
8.1.1.	<i>Conclusión</i>	40
8.2.	PROPUESTA DE MEJORA PARA LA RFIG	41
9.	BIBLIOGRAFÍA	42
	ANEXO I, TIEMPO PERDIDO EN ZONA NEUTRA	43

Índice de Figuras

Figura 1 - Sistema 1x25	10
Figura 2 - Sistema 2x25	11
Figura 3 - Cuadro de Velocidades Máximas, Línea 082.....	16
Figura 4 - Aislador de sección, junto con sus respectivas señales para los Maquinistas	17
Figura 5 - Zona Neutra Virtual.....	23
Figura 6 - Sección de intercambio Shinkansen.....	35
Figura 7 - Corea, localización del tren	36
Figura 8 - Corea, Orden de apertura de interruptores.....	36
Figura 9 - SCZN, situación de reposo.....	37
Figura 10 - SCZN, Cierre de conmutador 1.....	37
Figura 11 - SCZN, Conmutación interruptores	37
Figura 12 - SCZN, Normalización de la ZN	38
Figura 13 - CVM Línea 082	39
Figura 14 - ICL, Zona Neutra km 3.4	40
Figura 15 - Simulación Orense a Santiago.....	40

Índice de Tablas

Tabla 1 – Cartelones (señales) de Zona Neutra. Fuente: Catálogo Oficial de Señales de Circulación Ferroviaria [11]	19
Tabla 2 - Retardos basados en tiempo	21
Tabla 3 - Retardos basados en la distancia	22
Tabla 4 - Tiempo perdido en ZN por Serie B con rampa de 10 mm/m	27
Tabla 5 - Tiempo perdido en ZN por Serie B con rampa de 25 mm/m	28
Tabla 6 - Tiempo de viaje con Zonas Neutras	30
Tabla 7 - Tiempo de viaje sin Zonas Neutras.....	30
Tabla 8 - Simulación con Zonas Neutras	31
Tabla 9 - Simulación sin Zonas Neutras.....	31

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción

La aparición de la electrónica de potencia ha supuesto una transformación en la forma de gestionar la energía consumida por los trenes. La gestión clásica de la alimentación a los motores eléctricos de tracción, mediante tecnología reostática, presentaba dificultades de regulación, además de incomodidad a los viajeros (sin dejar de lado la afección a los órganos de tracción y choque del material) debido a los “saltos” existentes entre los distintos puntos de tracción.

Esta obsoleta tecnología conlleva la utilización de una electrificación en Corriente Continua, la cual presenta consecuencias no deseadas cuando se trata de transmitir grandes potencias a distancias elevadas, tal y como sucede en el Ferrocarril, por el hecho de manejar tensiones bajas (hasta 3000V CC de forma nominal en la RFIG administrada por ADIF). Ver Apartado 3.3.2.6 de la Declaración sobre la Red de ADIF [1].

La evolución continua de la tecnología, en la que el control de los motores de tracción se ha ido orientando hacia la utilización de convertidores estáticos de potencia, mediante el uso de semiconductores, ha supuesto la superación de múltiples de los inconvenientes que la regulación reostática conllevaba, permitiendo además cambiar la tecnología de suministro de energía a los trenes.

De esta forma la electrificación de la Línea Aérea de Contacto (LAC) utilizando Corriente Alterna (CA) se convierte en la opción elegida, y en constante extensión para suministrar la energía necesaria a consumir por los trenes.

Por un lado, va a permitir transmitir potencias elevadas a distancias superiores, minimizando las pérdidas existentes en los conductores, debido a la tensión de trabajo más elevada. Por otro lado, la sección necesaria en los conductores puede ser menor, con lo cual los costes de implantación del sistema serán inferiores. Además, la distancia entre Subestaciones Eléctricas de Tracción (SE) puede ser mayor, por lo que el coste antes mencionado seguirá disminuyendo.

Desafortunadamente, la solución elegida por ADIF para la electrificación en Corriente Alterna de la RFIG obliga a utilizar Zonas Neutras (ZN) para la separación de las fases a las cuales los Transformadores de las SE contiguas se encuentran conectados, a fin de evitar un cortocircuito en la Red Eléctrica Española.

En el presente trabajo, se pretenden estudiar las consecuencias que se derivan de la existencia de las Zonas Neutras, así como las opciones de minimizar sus efectos.

1.2. Estado del arte

A continuación se va a exponer la situación actual de los sistemas de electrificación en CA utilizados en la RFIG administrada por ADIF, las consecuencias derivadas por la existencia de las Zonas Neutras y las alternativas existentes para disminuirlos.

1.2.1. Sistema de electrificación en CA 1x25

El sistema 1x25 se implantó por primera vez en España en la Línea de Alta Velocidad (LAV) Madrid – Sevilla, inaugurada en 1992 al igual que, posteriormente, en los primeros kilómetros de la LAV Madrid – Barcelona – Figueras [2]. La tensión de alimentación de la LAC es de 25 kV CA con frecuencia industrial de 50 Hz.

Dicha tensión es suministrada en las SE por transformadores con una entrada en tensión monofásica de hasta 220 kV y una salida de 25 kV.

En el caso de la LAV Madrid – Sevilla, las SE se componen de dos transformadores y se encuentran conectados a la red de distribución a las mismas fases de la red de distribución que pertenece a Red Eléctrica Española (REE).

Independientemente de este hecho, existe una ZN frente a la SE que, en operación normal, se encuentra siempre cerrada (con sus seccionadores cerrados y, por tanto, alimentada a tensión), maniobrándose sólo en caso de avería. No obstante, entre SE colaterales, la ZN necesaria para separar las fases a las que se encuentran conectados sus respectivos transformadores, se encuentra, normalmente, abierta.

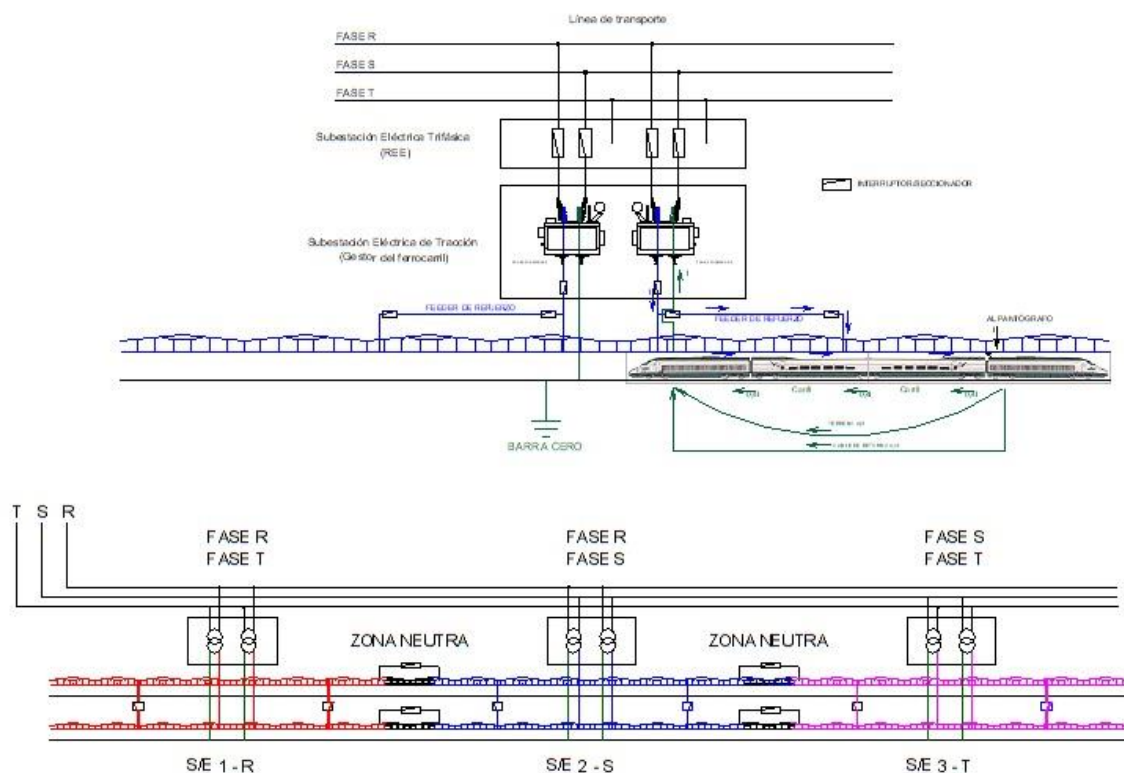


Figura 1 - Sistema 1x25

1.2.2. Sistema de electrificación en CA 2x25

En este sistema, la salida del secundario de los transformadores de las SE tienen una diferencia de tensión de 50 kV además de una toma intermedia, que se conecta al carril. Cada una de las dos salidas del secundario se conectan, por una parte a LAC (*Feeder Positivo*) y, por la otra, a un cable que discurre paralelo al primero y que se denomina *Feeder Negativo*.

Entre una SE y la ZN de separación de fases a su SE colateral, se encuentran dispuestos a una distancia de hasta 15 km unos dispositivos llamados Autotransformadores. Estos dispositivos tienen la misión de minimizar la corriente de retorno por el carril, pasando esta a discurrir por el Feeder Negativo.

Debido a las características del sistema, es posible proporcionar mayores potencias y llevarlas a mayor distancia debido a la mayor tensión de trabajo (50 kV) respecto del sistema 1x25.

El sistema 2x25 mantiene la tipología de 2 transformadores por cada SE, que pueden igualmente encontrarse conectados a la misma pareja de fases de la REE o a distintas. En el caso particular de la LAV Madrid – Barcelona – Figueras, se encuentran conectados a distintas fases pero en la LAV Madrid – Levante, los transformadores se conectan a las mismas.

En todos los casos existen 2 tipos de Zonas Neutras, según su localización:

- Frente a la Subestación Eléctrica
- Entre Subestaciones Eléctricas colaterales

Teniendo en cuenta la decisión sobre si conectar los transformadores de una misma SE a las mismas fases o a distintas, encontraremos líneas cuyas Zonas Neutras frente a la SE, en operación normal, podrán encontrarse cerradas (caso LAV Madrid – Levante) o necesariamente abiertas (caso LAV Madrid – Barcelona – Figueras).

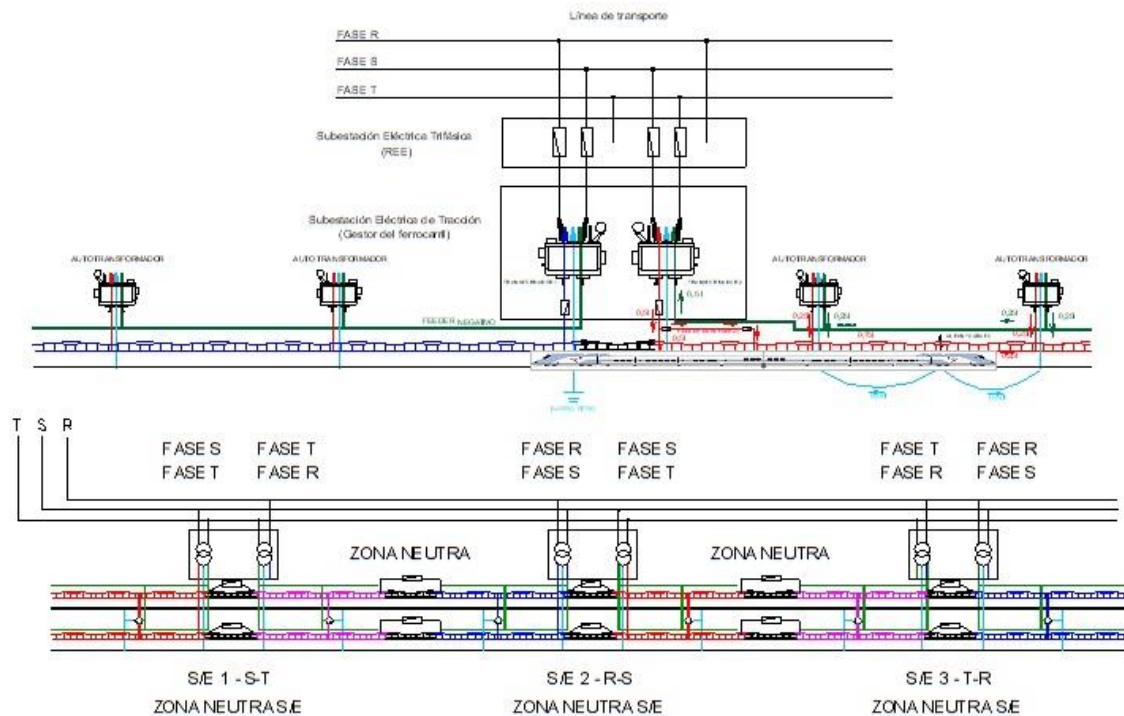


Figura 2 - Sistema 2x25

1.2.3. Consecuencias derivadas de la existencia de las Zonas Neutras

Dado que en el interior de la ZN no existe alimentación eléctrica, una serie de consecuencias se van a deriva de este hecho. Algunos efectos van a ser triviales y otros merecen una mayor reflexión.

- El efecto inmediato va a ser la pérdida de esfuerzo de tracción que, en el caso de que el tren se encuentre en una rampa, conllevará una pérdida de velocidad. Además, se pierde también la opción de utilizar freno regenerativo (con devolución a la catenaria) en el caso de que el Maquinista requiera de esfuerzo de frenado. Este último hecho puede ocasionar

que si el tren se encuentra en una pendiente y se desea reducir la velocidad, es necesario el uso del frenado mecánico, con el consiguiente desgaste de los órganos de frenado.

- Dado el seccionamiento eléctrico ocasionado por las ZN, no es posible aprovechar la energía del frenado de recuperación de un tren que esté devolviendo energía a la catenaria por otro tren que se encuentre en un cantón de catenaria distinto del mismo.
- Averías en la catenaria si el tren entra en la ZN con el disyuntor cerrado, máxime si la demanda de potencia es elevada. [3] y [4]. Este hecho puede llegar a producir un corte en la catenaria, con los consecuentes retrasos que en la operación conlleva para el tren en cuestión y para otros que circulen tras él.
- Averías en el material rodante, incluyendo daños en el pantógrafo (ocasionados por el arco eléctrico generado en el momento que el pantógrafo frota con la catenaria con tensión y la catenaria de la ZN) así como daños en los equipos de tracción (disyuntor y convertidores de tracción). Por aportar un orden de magnitud, el en año 2008 se ocasionaron un total de 18 incidencias de este tipo.
- Detenciones indebidas de un tren en la ZN. Conlleva consecuencias operativas y pérdida de tiempo para el propio tren y otros que circulen tras él.
- Pérdida en el confort en la sala de viajeros. Viene provocado por la ausencia de energía en los equipos de aire acondicionado y de iluminación del interior del tren.
- Interrupción de los servicios auxiliares del tren tales como refrigeración de los motores de tracción, compresor, cargador de batería, etc.

1.2.4. Alternativas existentes para disminuir los efectos no deseados de las ZN

Según el efecto que se desee minimizar, existen estudiadas e implementadas diversas soluciones.

Sistema de protección de la Zona Neutra

Según lo reflejado en [3] y [4], se expone un sistema de protección que detecte si una circulación se aproxima a la ZN consumiendo potencia para evitar daños en el material y prevenir de la rotura de la catenaria. El sistema se compone de un detector de intensidad en las proximidades de la ZN y, al detectar un paso de intensidad provocaría la actuación de las protecciones existentes en la SE.

Sistema de conmutación

Inicialmente investigado en Japón [5] y posteriormente estudiado e implementado en Corea [6] y en España (de forma experimental mediante el proyecto IFZONE) se implementan sistemas que energizan la zona neutra dependiendo de la localización del tren. Con este tipo de sistemas, la zona neutra se energiza con la tensión de la subestación por la que entra el tren para, posteriormente, realizar el cambio a ser energizada por la tensión de la subestación por la que el tren sale.

Esta conmutación debe realizarse a una gran velocidad de modo que los sistemas de protección del tren no detecten una tensión demasiado baja y actúen provocando la apertura del disyuntor.

2. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es la elaboración de un análisis de los efectos que tienen las Zonas Neutras, necesarias en la electrificación en corriente alterna, sobre el resto de los subsistemas y componentes del Sistema Ferroviario.

Además, se estudiará la forma de abordar la Zona Neutra al paso de un tren tanto si circula con *Conducción manual*¹, cuya responsabilidad recae sobre el Maquinista, como si se circula con *Conducción asistida*, lo que implica que la conducción se realiza con algún sistema de protección del tren con señalización en cabina activo (por ejemplo: ERTMS o LZB).

Como quiera que durante el paso del tren sobre la Zona Neutra no es posible que los trenes efectúen esfuerzo de tracción, se va a estudiar y realizar simulaciones para medir la pérdida de tiempo que se pudiera ocasionar así como el consumo adicional que pueda darse para recuperar la velocidad perdida. En base a los resultados obtenidos se realizará un análisis que valore la afectación que en estos aspectos provocan las ZN.

De las conclusiones que se den lugar debido al análisis de los resultados obtenidos, se identificarán las áreas de mejora con potencial y se propondrán medidas que se puedan implementar a fin de minimizar los efectos no deseados encontrados.

¹ Los conceptos “Conducción Manual” y “Conducción Asistida” se encuentran definidos en el Reglamento de Circulación Ferroviaria (RCF) [14].

3. Planificación de tareas

A continuación se expone la planificación del trabajo así como las tareas e hitos a conseguir en cada momento:

- Marzo - Abril: Búsqueda y lectura de documentación
- Marzo: definición de la estructura de la memoria (TFM)
- Abril: definición de modelos y estudio del consumo energético y de tiempos de viaje.
- Mayo: Análisis de la documentación
- Mayo - Junio: Redacción de la memoria
- Junio: Preparación de la defensa del TFM
- Julio: Entrega y defensa del TFM

4. Definición y tipología de una Zona Neutra

4.1. Definición de Zona Neutra

Atendiendo a la definición aportada en la norma [7]: *“es la sección de una línea de contacto provista de un punto de seccionamiento en cada extremo para evitar que de dos secciones eléctricas sucesivas que difieran en tensión o fase se conecten entre sí por el paso de aparatos de toma de corriente.”*

4.2. Tipología de Zonas Neutras

Existen distintos tipos de zona neutras dependiendo del lugar en el que se instalan y de la separación eléctrica que se quiera proveer. De esta forma encontraremos zonas neutras para separar fases, tensiones, sectores eléctricos en estaciones o las que se utilizan para proteger los trabajos de mantenimiento.

4.2.1. Zona neutra por cambio de tensión

Es la Zona Neutra situada en los lugares en que tiene lugar el cambio de sistema de alimentación entre CC a CA y viceversa.

Esta situación tiene lugar en la RFIG principalmente en los cambiadores de ancho, en cuyas instalaciones además de cambiar el ancho de la rodadura de los trenes, se cambia el sistema de alimentación.

No obstante, existen Zonas Neutras de cambio de tensión que no se corresponden con una instalación de cambio de ancho. Un ejemplo de este caso particular se encuentra en la línea 082 (de Bif. Coto Da Torre a Bifurcación a Grandeira km 85) en el kilómetro 3.4. [8] según se refleja en la figura Figura 3 - Cuadro de Velocidades Máximas, Línea 082”:

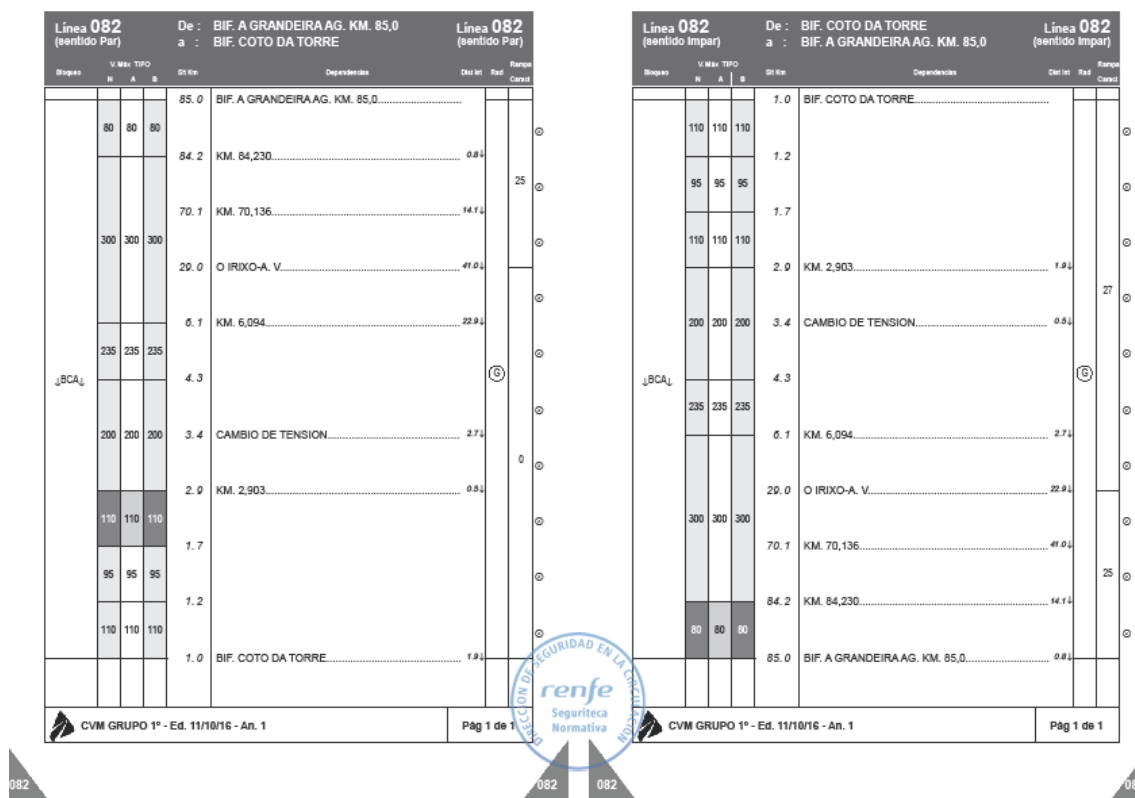


Figura 3 - Cuadro de Velocidades Máximas, Línea 082

4.2.2. Zona neutra de cambio de fase

Tal como se ha explicado en los apartados 1.2.1 y 1.2.2, sistemas de electrificación en CA, es necesario instalar Zonas Neutras de separación de fases en aquellos casos en que las secciones de catenaria contiguas se encuentren alimentadas por transformadores conectados a distintas fases de la red de distribución.

La necesidad de instalar estas zonas neutras reside en evitar provocar el cortocircuito que tendría lugar en la REE y que puede comprometer la disponibilidad de todo el sistema.

4.2.3. Zona neutra por sectorización en estaciones

Son aquellas que se instalan en las inmediaciones de las estaciones y sirven para aislar eléctricamente sectores de catenaria. Esta sectorización es necesaria para permitir que, en caso de avería en una zona, no tener que desconectar la alimentación a toda la estación y, de esta forma, permitir el paso de las circulaciones por otra vía.

En este caso, la zona neutra la constituye un aislador de sección, como el que se representa en la figura Figura 4 - Aislador de sección”.



Figura 4 - Aislador de sección, junto con sus respectiva señales para los Maquinistas

4.2.4. Zona neutra por trabajos

En la explotación y mantenimiento de la RFIG administrada por ADIF, se tiene en cuenta la posibilidad de realizar trabajos en la Línea Aérea de Contacto. De esta forma, la definición de zona neutra incluida en el Libro “Línea aérea de Contacto unificado” [9] es la siguiente: *“Parte de una línea de contacto provista en cada extremo de un punto de seccionamiento, bien para impedir la interconexión de secciones eléctricas sucesivas diferentes en tensión o en fase, bien para asegurar que no se puentea la zona de trabajo.”*

Este caso no será objeto del estudio por ser una modalidad distinta de la explotación comercial del sistema ferroviario.

4.3. Consideraciones

El presente trabajo se va a centrar en el estudio y análisis de las Zonas Neutras por cambio de fase. No obstante, cuando sea necesario realizar mención alguna a una tipología distinta, se citará expresamente.

5. Información relevante sobre Zonas Neutras

5.1. Longitud física de la Zona Neutra

Se define como la longitud real que existe entre los extremos de la Zona Neutra, delimitados por los puntos de seccionamiento. Según lo determinado en la Especificación Técnica de Interoperabilidad para el Subsistema de Energía [10], en su apartado 4.1.15.2.a), la longitud total de la zona neutra ha de ser como mínimo de 402 m.

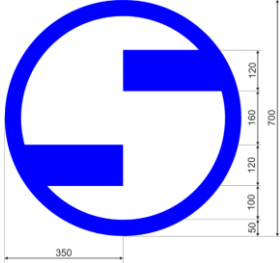
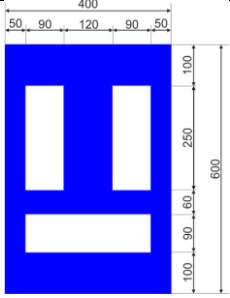
Dicha longitud mínima viene determinada por la longitud máxima entre pantógrafos de un tren que circule por la infraestructura. El apartado 8.2 de la Norma EN50367:2012 [7] define la distancia de separación máxima y mínima entre dos pantógrafos en funcionamiento. Esta información se amplía en el Anexo A1 de la citada Norma.

5.2. Señalización lateral

La circulación ferroviaria se regula mediante señales, las cuales tienen por objeto transmitir órdenes o informaciones desde la vía, las estaciones o los trenes, a los Maquinistas que circulan por la infraestructura.

Las órdenes e informaciones de las señales deben ser rigurosamente cumplidas por el personal a que afecte, de forma que no ponga en riesgo la operación ferroviaria, la seguridad de las personas así como la integridad de los diversos componentes del sistema.

Dado que no es deseable que un tren entre en una Zona Neutra con el disyuntor cerrado, estas se encuentran debidamente señalizadas con una serie de cartelones (o señales), cuyo aspecto se expone a continuación:

	<p>Indica la proximidad de una Zona Neutra. Se instala 500 antes del inicio de la Zona Neutra a proteger.</p>
	<p>Indica el principio de una zona neutra de la línea de contacto. Ordena al Maquinista abrir el disyuntor hasta la señal de fin de Zona Neutra.</p>

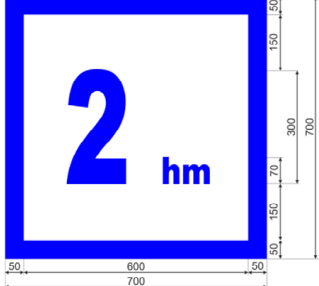
	<p>Indica el final de la zona neutra de la línea de contacto, permite cerrar el disyuntor una vez rebasada completamente la misma.</p>
	<p>Distancia desde el final de la zona neutra. Marca el punto en el cual el Maquinista que circule con un tren de longitud igual a 200 m podrá cerrar el disyuntor y continuar la marcha normal.</p>

Tabla 1 – Cartelones (señales) de Zona Neutra. Fuente: Catálogo Oficial de Señales de Circulación Ferroviaria [11]

5.3. Operación en Conducción Manual

La operación en conducción manual es aquella que se realiza bajo la total responsabilidad del Maquinista. De esta forma, la correcta identificación y cumplimiento de las órdenes de las señales expuestas en el anterior punto por parte del personal de conducción es la que asegura un paso del tren por la Zona Neutra sin incidencias.

Para llevar a cabo el paso por la Zona Neutra con este modo de conducción, el Maquinista debe realizar, antes de llegar a la señal de inicio de zona neutra, una serie de operaciones sobre el tren a fin de prepararlo para realizarlo con el disyuntor abierto:

- Identificar correctamente las señales de proximidad de zona neutra.
- Si se encuentra traccionando, deberá llevar el esfuerzo de tracción hasta cero para que la apertura del disyuntor no se realice en carga.
- Abrir el disyuntor.

Estas operaciones se deben de realizar con la antelación suficiente a la entrada en la zona sin alimentación. Para ello se tendrá en cuenta la velocidad de aproximación a la misma así como la declividad para no realizarlas con demasiada antelación (se recorrería más distancia con el disyuntor abierto) ni demasiado tarde (lo que podría acarrear consecuencias fatales en el material rodante o la infraestructura).

Una vez se haya “*librado por cola*”² la señal de fin de zona neutra, el maquinista realizará las operaciones inversas para reestablecer los equipos del tren al estado anterior a la llegada la zona sin alimentación:

- Cerrar el disyuntor

² En argot ferroviario, se utiliza esta expresión para considerar que el tren, incluido su último coche o vagón, ha franqueado un punto determinado (ZN, zonas de agujas o con reducciones de velocidad, etc.)

- Apertura del regulador de tracción para conseguir el esfuerzo de tracción deseado.

5.4. Tratamiento de la Zona Neutra por parte del sistema de señalización ERTMS

Para el estudio objeto del presente trabajo, se va a considerar el sistema de protección del tren con señalización en cabina más extendido en la RFIG como es el ERTMS (European Rail Traffic Management System).

Este sistema es el que la Unión Europea ha decidido adoptar para instalar en las nuevas infraestructuras que se construyan en los países que la compongan. En España se encuentra instalado y en servicio en un total de 1850 km, lo que hace que sea el país con mayor implantación de esta tecnología en el mundo.

Pertenece al subsistema estructural³ de Control, Mando y Señalización y es uno de los sistemas que favorece más ampliamente la consecución interoperabilidad dentro del espacio ferroviario único.

La definición del sistema viene contemplada en el Anexo A – “Mandatory specifications” de la Especificación Técnica de Interoperabilidad (ETI) del subsistema al que pertenece.

Para el caso que ocupa el estudio, la Zona Neutra es tratada por el sistema como una “Track condition” (o condición de vía). Estas son utilizadas para informar al Maquinista de la existencia de algún punto relevante por delante del tren y que deba conocer (al igual que zonas en las que no se encuentra permitida la parada, túneles, viaductos, zonas de cambio de tensión, etc.).

Esta información es enviada por el equipo de vía al equipo embarcado del tren por un grupo de balizas situado a distancia mayor o igual a la distancia de frenado de servicio al inicio de la zona neutra, teniendo en cuenta la velocidad máxima a la que un tren pueda circular por ese tramo (típicamente unos 8 km aproximadamente) y se compone de:

- Condición de vía de “No parar: otras razones” que se mantiene hasta el final de la zona neutra efectiva.
- Condición de vía de “Zona neutra: abrir disyuntor” que se ejecutará a una distancia de aproximadamente 70 m antes de la zona neutra efectiva y se mantiene hasta el final de la ZN efectiva.

Los datos referidos anteriormente con comunes para todos los trenes que circulen por el tramo afectado, es decir, todos ellos reciben del equipo instalado en la vía la misma información y será el equipo de ERTMS embarcado el que se ocupe de tratar dicha información.

³ Ver Anexo II “Subsistemas” del RD 1434/2010, de 5 de noviembre, sobre interoperabilidad del sistema ferroviario de la Red Ferroviaria de interés general [16]

5.5. Tratamiento de la Zona Neutra por parte del Material Rodante

Como se ha relatado anteriormente, el objetivo final es que los trenes deben de franquear la zona neutra con el disyuntor abierto. Teniendo en cuenta la diversidad de material rodante existente es de esperar que cada uno se comporte de una forma distinta, o maneje distintos tiempos de ejecución de las órdenes que son demandadas por el Maquinista o el equipo ERTMS embarcado.

Como paso previo a la ejecución de la orden de abrir disyuntor, los trenes provistos de automatismos sincronizados con el sistema ERTMS, realizan las siguientes operaciones al recibir la misma:

- Realiza un corte de tracción.
- Realiza la apertura del disyuntor.

Cuando el tren ha franqueado la Zona Neutra y expira la condición de vía “Zona neutra: abrir disyuntor”, el automatismo retoma el estado anterior realizando las operaciones inversas:

- Realiza el cierre del disyuntor.
- Establece la tracción hasta el valor seleccionado anterior a la llegada a la Zona Neutra.

Una vez se conoce que todos los equipos embarcados reciben de la infraestructura la misma información, es necesario mencionar el diferente tratamiento que de la misma realizan cada uno de los distintos fabricantes.

Así pues, a la orden que el equipo embarcado recibe del equipo de vía de “abrir disyuntor”, y que debe estar ejecutada a 70 metros del inicio de la Zona Neutra, cada fabricante aplica los márgenes necesarios para asegurar que su material ha ejecutado en ese punto la orden antes mencionada.

De esta forma, hay fabricantes que aplican unos márgenes basados en el tiempo y otros que los aplican basándose en la distancia hasta llegar al referido punto. Para ello tienen en cuenta la posición y la longitud de la Zona Neutra y el retardo correspondiente para que el tren ejecute la orden. A modo de ilustración, para algunas series de material⁴ se han identificado los retardos siguientes:

Nombre de la serie	Retardo (adelanto en la apertura)
Serie A	3 segundos
Serie B	15 segundos
Serie C	10 segundos
Serie D	11 segundos

Tabla 2 - Retardos basados en tiempo

⁴ NOTA: Los datos se han obtenido mediante colaboración con el área de ingeniería de una Empresa Ferroviaria, por lo que los nombres reales no serán mostrados.

En otras ocasiones, el retardo del material en la ejecución de la orden se realiza por distancia:

Nombre de la serie	Retardo (adelanto en la apertura)
Serie E	Corte de tracción: 225 m antes del punto indicado por la Track Condition Apertura del disyuntor: 125 m antes del punto indicado por la Track Condition Expiración Track Condition: 300 m después del fin de la Zona Neutra
Serie F	Corte de tracción: 500 m antes del punto indicado por la Track Condition Apertura del disyuntor: 125 m antes del punto indicado por la Track Condition

Tabla 3 - Retardos basados en la distancia

5.6. Zona Neutra Virtual

Para el caso de circular con un sistema de protección con señalización en cabina como el ERTMS y con los datos expuestos anteriormente, se hace necesario establecer un nuevo concepto que denominaremos “Zona Neutra Virtual”.

Se va a definir como el tramo que recorre un tren sin efectuar tracción debido a la existencia de una Zona Neutra. Esta distancia se compone de las siguiente partes:

- 1 El margen que cada material rodante, junto con el sistema de señalización, aplica para abordar la zona neutra con la garantía de tener el disyuntor abierto. Es el tramo de vía inmediatamente anterior a la ZN (d_{antZN}).
- 2 La distancia física de la Zona Neutra.
- 3 La longitud del tren. Se suma a las dos anteriores y es necesaria para asegurar que el tren ha franqueado completamente la zona sin alimentación. Esta longitud puede ser variable dependiendo de si el tren circula en composición sencilla o en composición doble.

Definida la distancia que compone la Zona Neutra Virtual, se debe estudiar la afectación completa de la existencia de la misma. De este modo, en el caso de que se circule en rasante horizontal o en rampa, van a tener lugar dos procesos diferenciados:

- Proceso de deceleración: abarca la distancia que define la Zona Neutra Virtual
- Proceso de aceleración: Una vez se ha superada la Zona Neutra Virtual, el tren debe recuperar la velocidad que haya podido perder hasta recuperar la que llevaba al inicio del proceso anterior.

En la Figura 5 - Zona Neutra Virtual”, se representan de una forma gráfica los conceptos explicados en este apartado.

Se puede apreciar que el proceso de deceleración se desencadena a una considerable distancia antes de llegar a la Zona Neutra física, en este punto, coincidente con el inicio del proceso, se realiza el corte de la tracción y posterior apertura del disyuntor.

Posteriormente, una vez que el tren se encuentre totalmente fuera de la Zona Neutra, comienza el proceso de aceleración en el que el tren puede recuperar la velocidad que haya podido perder hasta recuperar la que llevaba al inicio de todo el proceso.

Se debe realizar mención especial al caso en el que la Zona Neutra se encuentre en un emplazamiento con una rampa elevada. En este caso la deceleración sufrida será grande y la distancia necesaria para recuperar la velocidad inicial (v_i) será necesariamente grande.

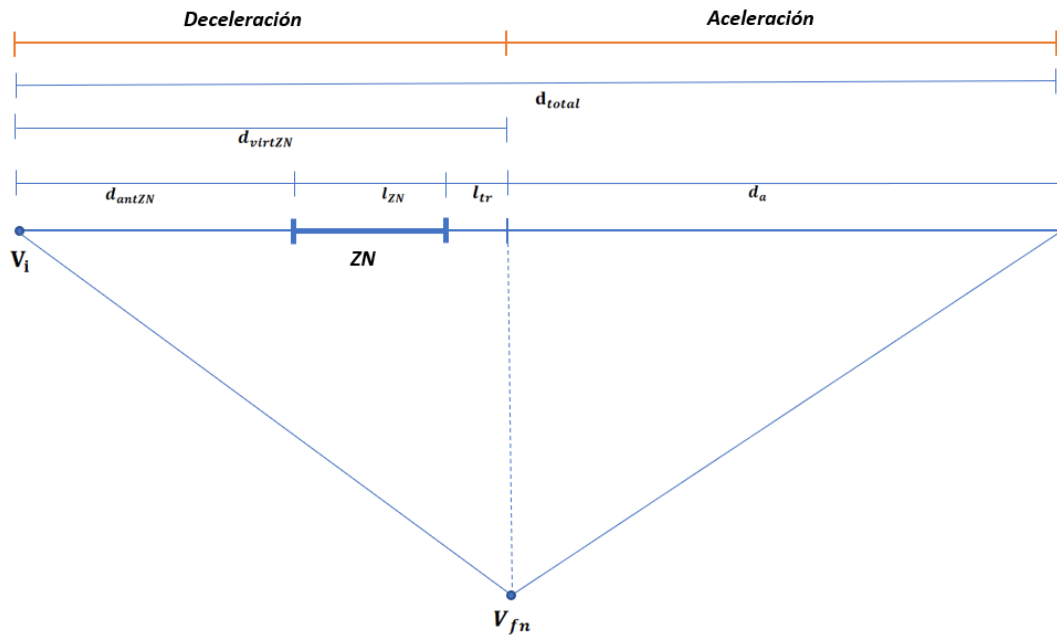


Figura 5 - Zona Neutra Virtual

6. Efectos no deseados de una Zona Neutra

Tal y como se enumeró en el apartado introductorio, se producen diversos efectos no deseados al paso del tren por la Zona Neutra. En los siguientes apartados se van a exponer los que se han considerado más relevantes.

6.1. Pérdida de velocidad en la ZN

Para valorar la influencia en este factor, se han realizado diversas simulaciones para determinar el tiempo que cada serie de material en concreto pierde al paso por la Zona Neutra.

Se han tomado como datos de partida los siguientes datos:

- Las características técnicas de las distintas series de material⁵
- Lo expuesto en el apartado 5 “Información relevante sobre Zonas Neutras”.

Con estos datos y teniendo en cuenta la velocidad inicial y la rampa o pendiente en la que se encuentra la Zona Neutra, se calculan los siguientes datos derivados:

- V_i : Velocidad inicial
- t_a : Tiempo de adelanto en apertura
- t_r : Tiempo de retraso en cierre
- l_{ZN} : Longitud Zona Neutra
- l_{tr} : Longitud del tren
- A : Coeficiente A
- B : Coeficiente B
- C : Coeficiente C
- P : Potencia tren
- m_{ut} : Masa útil en servicio
- m_r : Masas rotativas
- **gradiente**: Rampa o Pendiente
- d_{antZN} : Distancia anterior a la ZN
- R_{av} : Resistencia al avance
- V_{fn} : Velocidad final neutra
- f_g : Fuerza gravedad
- f_{trac} : Fuerza tractora
- f_{total} : Fuerza total
- a : Aceleración

⁵ NOTA: Los datos se han obtenido mediante colaboración con el área de ingeniería de una Empresa Ferroviaria, por lo que los nombres reales no serán mostrados.

- d : Deceleración
- t_{dec} : Tiempo deceleración
- t_{ac} : Tiempo aceleración
- d_{virtZN} : Distancia virtual de la ZN
- d_{ac} : Distancia aceleración
- t_{total} : Tiempo total
- d_{total} : Distancia total
- $t_{max\ veloc}$: Tiempo maxima velocidad
- t_{perd} : Tiempo perdido

Para realizar los cálculos se han utilizado las siguientes fórmulas:

- $d_{antZN} = V_i * t_a$

- $R_{av} = \frac{A + BV_i + CV_i^2}{100}$

- $V_{fn} = \sqrt{2a(d_{antZN} + l_{ZN} + l_t) + V_i^2}$

- $f_g = \frac{m_{ut} * \text{gradiente}}{100}$

- $f_{trac} = \frac{P}{V_{fn}}$

- $f_{total} = R_{av} + f_{trac} + f_g$

- $a = \frac{f_{total}}{m_{ut} + m_r}$

- $t_d = \frac{V_{fn} - V_i}{d}$

- $d_{virtZN} = d_{antZN} + l_{ZN} + l_{tr}$

- $t_a = \frac{V_{fn} - V_i}{a}$

- $d_{ac} = \frac{v_{inicial}^2 - v_{final}^2}{2a}$

- $t_{total} = t_a + t_d$

- $d_{total} = d_a + d_{virtZN}$

- $t_{max\ veloc} = \frac{d_{total}}{V_i}$

- $t_{perd} = t_{total} - t_{max\ veloc}$

Se han simulado dos escenarios distintos para una serie de material en concreto, tomando como referencia las características técnicas de la Serie B y dos rampas características comunes en la RFIG, 10 mm/m y 25 mm/m.

Para cada uno de los casos, se simula el acercamiento del tren a distintas velocidades y se calculan los distintos datos en base a esto, los resultados obtenidos en la simulación son los que se reflejan en la Tabla 4 y Tabla 5.

V _i	PROCESO DECELERACION									PROCESO ACELERACION						TOTALES				
	d _{antZN}	R _{av}	f _{trac}	f _g	f _{total}	a	V _{fn}	t _d	d _{virtZN}	R _{av}	f _{trac}	f _g	f _{total}	a	t _a	d _a	t _{total}	d _{total}	t _{max veloc}	t _{perd}
300	1250	-59,097	0	-34,74	-93,84	-0,26	278,61	23,02	1850	-52,05	103,37	-34,74	16,57	0,046	130,35	10475,40	153,37	12325,40	147,90	5,47
280	1166,67	-52,50	0	-34,74	-87,24	-0,24	259,64	23,57	1766,666667	-46,20	110,92	-34,74	29,98	0,082	68,59	5140,76	92,16	6907,43	88,81	3,35
250	1041,67	-43,37	0	-34,74	-78,11	-0,21	230,99	24,57	1641,666667	-38,05	124,68	-34,74	51,88	0,143	37,00	2471,48	61,57	4113,15	59,23	2,34
220	916,67	-35,15	0	-34,74	-69,89	-0,19	202,09	25,87	1516,666667	-30,68	142,51	-34,74	77,08	0,212	23,46	1375,14	49,33	2891,81	47,32	2,01
180	750,00	-25,62	0	-34,74	-60,36	-0,17	163,06	28,33	1350	-22,07	176,62	-34,74	119,80	0,330	14,27	680,17	42,61	2030,17	40,60	2,00
150	625,00	-19,54	0	-34,74	-54,28	-0,15	133,26	31,14	1225	-16,54	216,11	-34,74	164,83	0,453	10,25	403,41	41,39	1628,41	39,08	2,31
120	500,00	-14,37	0	-34,74	-49,12	-0,14	102,70	35,56	1100	-11,81	280,42	-34,74	233,87	0,643	7,47	231,02	43,03	1331,02	39,93	3,10
100	416,67	-11,44	0	-34,74	-46,18	-0,13	81,56	40,32	1016,666667	-9,10	353,11	-34,74	309,27	0,851	6,02	151,82	46,34	1168,49	42,07	4,27
80	333,33	-8,91	0	-34,74	-43,66	-0,12	59,12	48,30	933,3333333	-6,71	487,17	-34,74	445,72	1,226	4,73	91,42	53,04	1024,75	46,11	6,92
60	250,00	-6,79	0	-34,74	-41,54	-0,11	32,90	65,87	850	-4,57	875,29	-34,74	835,97	2,300	3,27	42,23	69,15	892,23	53,53	15,61
40	166,67	-5,08	0	-34,74	-39,83	-0,11	#iNUM!	#iNUM!	766,6666667	#iNUM!	#iNUM!	-34,74	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!

Tabla 4 - Tiempo perdido en ZN por Serie B con rampa de 10 mm/m

V_i	PROCESO DECELERACION									PROCESO ACELERACION							TOTALES			
	d_{antZN}	R_{av}	f_{trac}	f_g	f_{total}	a	V_{fn}	t_d	d_{virtZN}	R_{av}	f_{trac}	f_g	f_{total}	a	t_a	d_a	t_{total}	d_{total}	$t_{max\ veloc}$	t_{perd}
300	1250	-59,097	0	-86,86	-145,96	-0,40	265,98	23,53	1850	-48,12	108,28	-86,86	-26,70	-0,073	-128,65	-10112,85	-105,11	-8262,85	-99,15	-5,96
280	1166,67	-52,50	0	-86,86	-139,36	-0,38	246,67	24,15	1766,666667	-42,41	116,76	-86,86	-12,51	-0,034	-268,99	-19676,22	-244,84	-17909,56	-230,27	-14,57
250	1041,67	-43,37	0	-86,86	-130,23	-0,36	217,39	25,29	1641,666667	-34,48	132,48	-86,86	11,15	0,031	295,44	19178,39	320,73	20820,06	299,81	20,92
220	916,67	-35,15	0	-86,86	-122,01	-0,34	187,63	26,79	1516,666667	-27,31	153,49	-86,86	39,32	0,108	83,12	4705,98	109,91	6222,65	101,83	8,08
180	750,00	-25,62	0	-86,86	-112,48	-0,31	146,88	29,74	1350	-18,96	196,08	-86,86	90,26	0,248	37,05	1682,24	66,79	3032,24	60,64	6,14
150	625,00	-19,54	0	-86,86	-106,40	-0,29	114,92	33,29	1225	-13,59	250,60	-86,86	150,15	0,413	23,59	868,01	56,88	2093,01	50,23	6,65
120	500,00	-14,37	0	-86,86	-101,23	-0,28	80,38	39,53	1100	-8,96	358,31	-86,86	262,49	0,722	15,24	424,22	54,77	1524,22	45,73	9,04
100	416,67	-11,44	0	-86,86	-98,30	-0,27	53,62	47,65	1016,666667	-6,20	537,16	-86,86	444,10	1,222	10,55	225,03	58,20	1241,70	44,70	13,50
80	333,33	-8,91	0	-86,86	-95,77	-0,26	5,17	78,90	933,3333333	-3,07	5569,63	-86,86	5479,69	15,073	1,38	16,31	80,28	949,65	42,73	37,55
60	250,00	-6,79	0	-86,86	-93,65	-0,26	#iNUM!	#iNUM!	850	#iNUM!	#iNUM!	-86,86	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!
40	166,67	-5,08	0	-86,86	-91,94	-0,25	#iNUM!	#iNUM!	766,6666667	#iNUM!	#iNUM!	-86,86	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!	#iNUM!

Tabla 5 - Tiempo perdido en ZN por Serie B con rampa de 25 mm/m

6.1.1. Análisis de los resultados

De acuerdo a lo expuesto en la Tabla 2, la Serie B que se ha tomado como ejemplo aplica unos márgenes para realizar la apertura del disyuntor al acercarse a la Zona Neutra basados en el tiempo, con un valor de 15 segundos.

De esta forma, si nos fijamos en las tablas de resultados, se puede comprobar como, a medida que la velocidad inicial (v_i) aumenta, la longitud que comprende la Zona Neutra Virtual ($d_{virt\ ZN}$) se ve incrementada. Esto provoca a su vez que la pérdida de velocidad sea mayor, con lo que al final de la Zona Neutra Virtual la velocidad es menor.

Si nos fijamos en el proceso de aceleración, el valor ‘a’ se calcula en función de la fuerza total aplicada (que a su vez depende de la fuerza de tracción aplicada y de la resistencia al avance). El hecho de que la resistencia al avance aumente con la velocidad y, al mismo tiempo, el esfuerzo de tracción disminuya, hacen que el valor de la aceleración disminuya según el tren se aproxime a la Zona Neutra a una velocidad cercana a su máxima.

Si nos fijamos en la Tabla 4, despreciando la primera fila ($v_i = 300$ km/h) por el muy bajo valor de la aceleración, lo que conlleva una distancia para recuperar la velocidad inicial demasiado elevada (favorecida por el mínimo esfuerzo de tracción a velocidad submáxima) se puede comprobar como, para una Longitud Real de la Zona Neutra de 400 m, la influencia de la misma se eleva muy por encima de ese valor, yéndose a una distancia de 6900 m para el caso en el que $v_i=280$ km/h.

Un hecho relevante, que se repite en ambas, tablas son los casos en los que el tren se aproxima a una Zona Neutra a muy baja velocidad, por debajo de 40-60 km/h. Con estos valores de velocidad, casi independientemente de la rampa encontrada, **el tren se acabaría deteniendo en la Zona Neutra** (identificado en las tablas como error de cálculo: “#¡NUM!”).

6.1.2. Análisis de un caso real

Para poner en contexto los datos obtenidos para una Zona Neutra aislada, se va a realizar una simulación de marchas⁶ para un tren en una infraestructura real, utilizando como datos los siguientes:

- Infraestructura: Línea 050 LIMITE ADIF – LFPSA a MADRID PUERTA ATOCHA [12] y sus correspondientes Zonas Neutras [13]
- Material rodante: tren Serie F

Los resultados de la simulación son los que siguen:

⁶ Para la realización de esta simulación, se ha hecho uso el Simulador de Marchas utilizado por la Gerencia de Área de Estudios, de la Dirección General de Desarrollo y Estrategia de RENFE Operadora.

P.Contol	Puntos kilométricos	Tiempo parada (hh/mm/ss)	Parcial (hh/mm/ss)	Llegada (hh/mm/ss)	Salida (hh/mm/ss)
Ourense	0,00				00:00:00
Santiago de Compostela	88,10		00:29:41	00:29:41	

Tabla 6 - Tiempo de viaje con Zonas Neutras

P.Contol	Puntos kilométricos	Tiempo parada (hh/mm/ss)	Parcial (hh/mm/ss)	Llegada (hh/mm/ss)	Salida (hh/mm/ss)
Ourense	0,00				00:00:00
Santiago de Compostela	88,10		00:29:05	00:29:05	

Tabla 7 - Tiempo de viaje sin Zonas Neutras

Analizando los tiempos de viaje, existe una diferencia de tan solo 36 segundos entre realizar el trayecto con Zonas Neutras o sin ellas. No obstante, no se podrá pasar por alto que la infraestructura objeto del análisis tan sólo tiene una longitud de 88 kilómetros.

6.1.3. Conclusiones

Si bien la distancia de influencia de una Zona Neutra es muy variable, sobre todo a velocidades cercanas a la máxima que puede desarrollar el tren, el dato que mejor puede resumir la influencia de la misma es el Tiempo Perdido en la Zona Neutra.

Si centramos el foco en la última columna de la Tabla 4 y Tabla 5 adjuntas, se aprecia como las mayores pérdidas de tiempo ocurren en los datos extremos⁷, esto es, a velocidad submáxima, donde existe un déficit de esfuerzo de tracción o a velocidad muy reducida, donde el tren perdería casi toda la velocidad de aproximación.

Analizados los datos obtenidos, podemos concluir que la existencia de Zonas Neutras de separación de fases no tiene influencia relevante sobre el tiempo de viaje.

⁷ NOTA: en los casos que la rampa es elevada y/o la velocidad del tren es cercana a la máxima, se aprecia que el esfuerzo de tracción es mínimo y, en el caso de tener una rampa de longitud infinita, nunca llegaría a alcanzar la velocidad de entrada en la Zona Neutra (valores negativos en d_{total} y t_{perd}).

6.2. Incremento del consumo energético

Otro de los efectos que van a suceder, inherente a la pérdida de la velocidad y su posterior recuperación, es el necesario incremento del consumo energético.

Desde el punto de vista de la conducción, podemos pensar que en caso de no existir zonas neutras podrían darse dos situaciones:

1. Al no tener pérdida de velocidad, se podría reducir el tiempo de viaje (hipótesis descartada por las conclusiones del punto anterior.
2. Igualando el tiempo de viaje al tiempo que se consumiría para el caso anterior, podría aprovecharse el margen de tiempo existente para realizar una conducción económica y, de esa forma, reducir el consumo energético del tren.

Como quiera que estas dos suposiciones pueden parecer triviales, el primer paso será realizar una simulación del consumo energético que tendría un tren, y en una línea concreta e igual, para dos casos distintos:

- a) Línea con Zonas Neutras
- b) Línea sin Zonas Neutras

En base a los resultados calculados, se podrá realizar una valoración de los mismos y obtener unas conclusiones.

Se va a realizar la simulación⁸ de consumo energético para un caso real tomando como referencia la siguiente infraestructura y material rodante:

- Infraestructura: Línea 050 LIMITE ADIF – LFPSA a MADRID PUERTA ATOCHA [12] y sus correspondientes Zonas Neutras [13]
- Material rodante: tren Serie C

Los resultados para el caso analizado son los que siguen:

Energía Importada (kWh)	12.415,90
Energía Exportada (kWh)	1.386,10
Energía Neta (kWh)	11.029,80

Tabla 8 - Simulación con Zonas Neutras

Energía Importada (kWh)	12.517,90
Energía Exportada (kWh)	1.444,30
Energía Neta (kWh)	11.073,60

Tabla 9 - Simulación sin Zonas Neutras

Como puede comprobarse, la diferencia entre la energía neta para el caso en el que existen Zonas Neutras y el caso en que no, es del orden de 43,8 kWh. Este orden de magnitud, comparable a la

⁸ Para la realización de esta simulación, se ha hecho uso el Simulador de Marchas utilizado por la Gerencia de Área de Estudios, de la Dirección General de Desarrollo y Estrategia de RENFE Operadora.

capacidad que una batería de un coche eléctrico es capaz de almacenar, es completamente despreciable para el caso del ferrocarril, en el que se manejan potencias y consumos de magnitudes muy superiores.

6.2.1. Conclusiones

De los resultados de la simulación podemos concluir que la existencia de Zonas Neutras de separación de fases no tiene afectación relevante sobre el consumo energético

6.3. Pérdida de confort de los viajeros

Los servicios auxiliares de un tren son todos aquellos sistemas necesarios para habilitar el material y poder prestar servicio y que son distintos de los que aportan de potencia de tracción. Normalmente se alimentan de un convertidor de servicios auxiliares.

Entre los consumidores que pertenecen a este grupo podemos encontrar:

- Equipos de cafetería
- Climatización y ventilación
- Información para el viajero
- Cargador de batería
- Iluminación
- Compresor de aire del tren
- Ventiladores de motores de tracción

Cuando un tren se encuentra con el disyuntor abierto, normalmente estos servicios auxiliares pierden alimentación y, por lo tanto, su funcionamiento se ve interrumpido.

La ocurrencia de estos efectos depende en gran medida del material rodante utilizado ya que los vehículos actuales incorporan sistemas que minimizan o, incluso eliminan por completo, estos efectos.

Así pues, la Serie C dispone de acumuladores que se encuentran en continua recarga y, cuando se aproxima a una Zona Neutra, mantiene los servicios de confort para los viajeros al 100% de su capacidad.

Otra solución adoptada, en este caso en los vehículos de la Serie B, es el establecimiento de una pequeña magnitud de frenado eléctrico en los motores de tracción para alimentar a los servicios de confort de los viajeros con la energía generada por este medio.

En cambio, hay otras series de vehículos, como la Serie A, que en el momento del paso por una Zona Neutra, no tiene forma de alimentar a los consumidores auxiliares y estos pierden sus prestaciones; en este caso solo prevalece una iluminación de ambiente y ventilación mínimos.

6.4. Consecuencias para el mantenedor del material rodante

Un punto de vista que es necesario no olvidar es el del mantenedor. Al final todos los vehículos acaban realizando sus revisiones periódicas en un Centro de Mantenimiento de Material Rodante y su experiencia en este campo puede ayudar a comprender la influencia de las Zonas Neutras sobre el material.

Con respecto a las Zonas Neutras por cambio de fase, no se detectan mayores incidencias en el material más allá de que el material no ejecute la orden de cierre del disyuntor (se registraron un total de 14 incidencias de este tipo en el año 2008).

En cambio, en las zonas neutras de cambio de tensión, las incidencias ocasionadas si tienen relevancia, no tanto por la frecuencia de ocurrencia sino por las consecuencias derivadas de la misma.

En las dos incidencias de este tipo que se han documentado⁹ se han dado una serie de condicionantes que han provocado el desenlace final.

- 1 Se han ocasionado en Cambiadores de Ancho, donde también se realiza un cambio de tensión. Se trata de una maniobra singular [14] en la que la atención del personal de conducción se centra en diversos elementos de señalización tanto de la vía como de la cabina de conducción.
- 2 Se mantiene el pantógrafo de CA levantado cuando el tren se encuentra bajo catenaria de CC.
- 3 Existe una avería previa en el sistema de detección de tensión del tren que, por su existencia, no evita que el disyuntor de CA efectúe su cierre.
- 4 Se realiza la solicitud de cierre del disyuntor (cierra el de CA al mantenerse levantado el pantógrafo de CA)

Esta desafortunada secuencia de hechos provoca la entrada de corriente continua en el transformador principal de tensión ocasionando el incendio del mismo así como del vehículo completo.

⁹ NOTA: Datos obtenidos mediante colaboración con el área de mantenimiento de una Empresa Ferroviaria.

7. Soluciones a los efectos no deseados de las Zonas Neutras

7.1. Sistema de generación y distribución propio

Sería el modelo más deseable desde el punto de vista del presente trabajo ya que todos los efectos no deseados y expuestos anteriormente, debido a la concepción natural del sistema, no tendrían lugar.

Es la solución instalada en gran parte de la red de electrificación (aproximadamente 7400 km) de la empresa ferroviaria Deutsche Bahn, en Alemania, implementada a través de su filial DB Energie GmbH, la cual se encarga de la generación y distribución de la energía eléctrica hasta las Subestaciones de tracción.

En este caso, dicha empresa realiza la generación de la energía en sus propias centrales eléctricas y la distribuye a una tensión de 110 kV, mediante una red también propia, hasta las Subestaciones de tracción. Como dato curioso, cabe mencionar que por razones históricas la frecuencia a la que se genera esta electricidad es de 16 y 2/3 Hz.

En este último paso, las subestaciones de tracción tan sólo se encargan de disminuir la tensión hasta 15 kV, que es la tensión de alimentación utilizada por los trenes que circulan por dicha infraestructura.

7.2. Reducir el número de Zonas Neutras

Adoptar esta alternativa solucionaría de forma parcial los efectos que las Zonas Neutras exportan a otros componentes del sistema.

7.2.1. Optimizar diseño de las Zonas Neutras a instalar

Consistiría en optimizar el diseño de la electrificación de la línea según la demanda y densidad real de tráfico, no en base a unas previsiones, por lo general demasiado optimistas.

En este paso sería interesante reducir el número de Subestaciones en los trayectos donde los trenes no tienen que realizar grandes demandas de potencia (por circular a una velocidad elevada y sólo necesitar realizar el mantenimiento de la velocidad) y, en los lugares con mayor concentración de tráfico, reducir la distancia entre las mismas para no incurrir en falta de potencia instalada.

7.2.2. Reducir la redundancia frente a las Subestaciones Eléctricas

Otra forma de reducir el número de Zonas Neutras sería reduciendo la redundancia existente en las instaladas frente a las Subestaciones Eléctricas.

Se trataría de conectar los dos transformadores de una Subestación a las mismas fases de la red de distribución y prescindir de la Zona Neutra frente a la SE. Si se instar a tomar esta decisión, habría que realizar un estudio de las consecuencias de no disponer de esa Zona Neutra en caso de avería.

7.3. Caso Japonés

En el caso de las líneas de alta velocidad en Japón, las zonas neutras de cambio de fase tienen instalado un sistema [5] que permite energizar la misma, en función de la localización del tren.

La instalación se compone de dos interruptores (Switch A y Switch B), coordinados entre sí, que son capaces de conectar la zona neutra con las secciones de catenaria contiguas y que se encuentran alimentadas por las Subestaciones Eléctricas adyacentes.

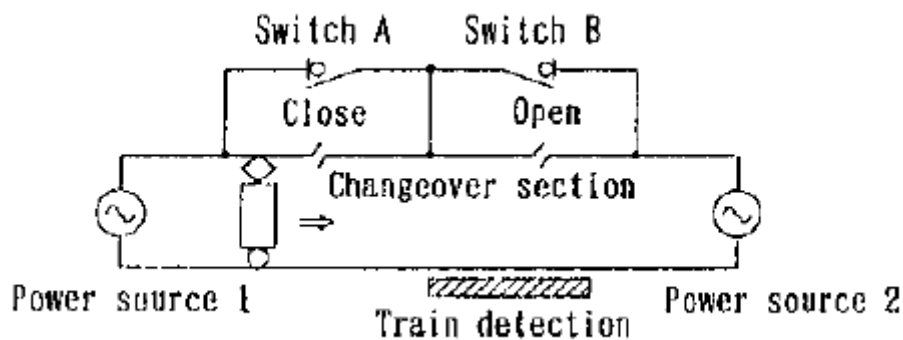


Figura 6 - Sección de intercambio Shinkansen

Por otro lado, dado que la circulación se realiza siempre en el mismo sentido por la misma vía, la situación de reposo del sistema es con el interruptor A cerrado. En este estado de reposo la zona neutra se encuentra alimentada por la tensión que proviene de la SE 1.

En el momento en que un tren se aproxima a la Zona Neutra, puede efectuar el paso hacia la misma con potencia en cualquier momento.

Cuando el tren se encuentra completamente dentro de la Zona Neutra, se realiza la detección del mismo mediante un Circuito de Vía (CV). En este punto se realiza la apertura del interruptor A e, inmediatamente después, se cierra el interruptor B. De esta forma la Zona Neutra se encuentra alimentada por la tensión que proviene de la SE2.

Mencionar que esta conmutación en cascada de los interruptores 1 y 2 debe de realizarse con una adecuada gestión para que los sistemas de protección del tren no detecten una caída de tensión en la LAC y actúen sus protecciones, que realizarían la apertura del disyuntor.

Una vez que el tren se encuentra completamente fuera de la Zona Neutra, el CV de detección queda libre y el sistema se devuelve a la situación de espera.

7.4. Caso Coreano

Tomando como base la experiencia de la administración ferroviaria japonesa, la idea es copiada en Corea [15] donde se realiza un proceso análogo al descrito en el punto anterior, por lo que no es necesario explicarlo de nuevo.

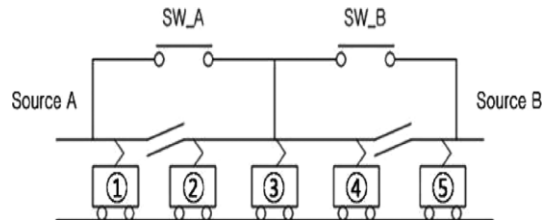


Figura 7 - Corea, localización del tren

En este caso la instalación se compone de los mismos componentes que utiliza el Shinkansen y según la localización del tren, el sistema establece un orden de apertura/cierre de los dos interruptores de que dispone, de acuerdo a la Figura 8 - Corea, Orden de apertura de interruptores”

switch	ACS system step				
	1	2	3	4	5
SW_A	ON	ON	OFF	OFF	OFF
SW_B	OFF	OFF	OFF	ON	ON

Figura 8 - Corea, Orden de apertura de interruptores

7.5. Proyecto IFZONE

Como parte de un proyecto de investigación iniciado en 2009 por ADIF [3], en el que se pretendía investigar técnicas avanzadas para la mejora de la circulación de los trenes las Zonas Neutras, nació el proyecto SCZN (Sistema de Conmutación de Zona Neutra).

Este sistema toma como base las ideas del proyecto de investigación realizado por la administración japonesa en su tren Shinkansen pero con algunas diferencias en el equipamiento de vía.

Por un lado, la detección del tren no se realiza mediante circuitos de vía, sino que son unos pedales electromagnéticos los que se encargan de esto. La necesidad surge de que las vías de alta velocidad de ADIF son bidireccionales, en comparación con las operadas en las líneas de alta velocidad en Japón, que son unidireccionales.

De esta forma, el estado de reposo de la instalación es con los dos interruptores abiertos.

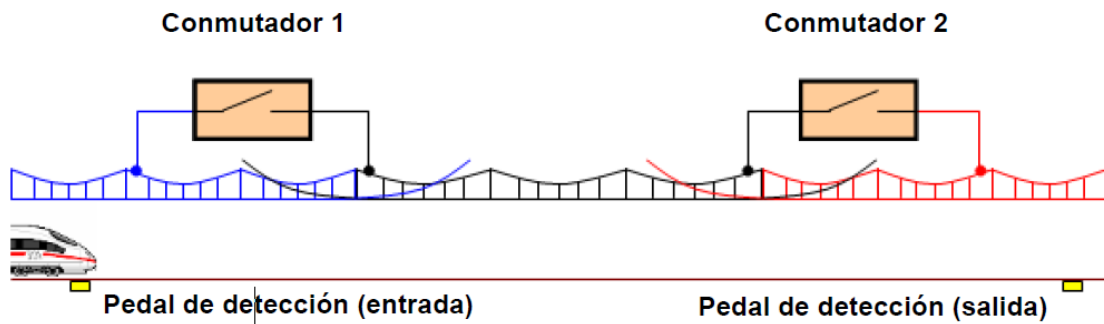


Figura 9 - SCZN, situación de reposo

Cuando un tren que viene circulando desde el lado 1, actúa sobre el pedal de entrada se realiza el cierre del conmutador 1 y la Zona Neutra queda alimentada a la tensión 1.

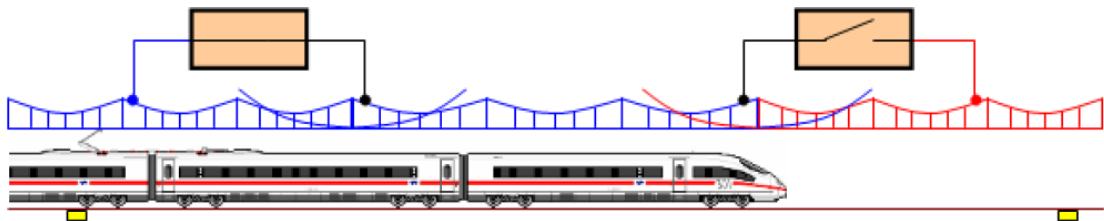


Figura 10 - SCZN, Cierre de conmutador 1

Una vez que el tren recorre la zona neutra actuará sobre el pedal de salida, de forma que en este momento se realiza la conmutación de interruptores. Primero se abre el interruptor 1 y seguidamente se cierra el interruptor 2. La Zona Neutra queda alimentada a la tensión 2.

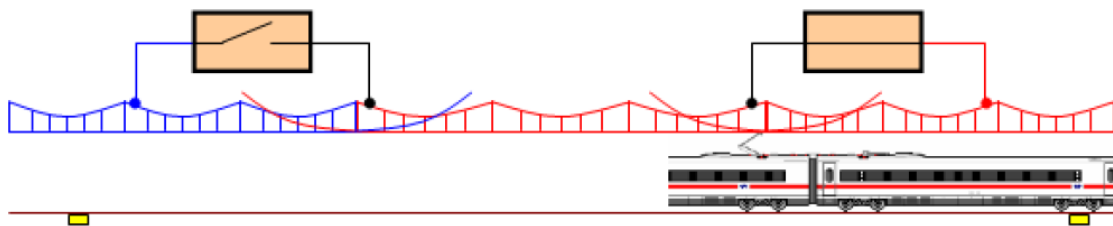


Figura 11 - SCZN, Conmutación interruptores

Cuando el tren se encuentra completamente fuera de la Zona Neutra, es detectado por el pedal de salida y la instalación se devuelve al estado de espera, esto es, con ambos interruptores abiertos.

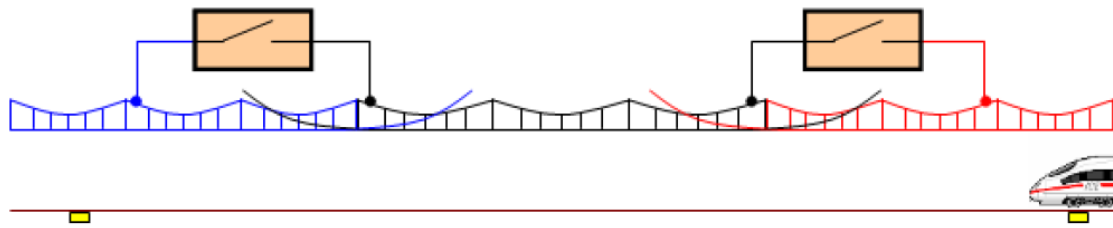


Figura 12 - SCZN, Normalización de la ZN

7.6. Utilización de Subestaciones Eléctricas con electrónica de Potencia

Otra solución menos explorada es la utilización de Subestaciones Eléctricas de Tracción de CA equipados con sistemas de electrónica de potencia alimentados directamente con la corriente alterna trifásica de la Red de Distribución.

Esta topología si que se encuentra ampliamente instalada en las Subestaciones de Tracción que alimentan la red convencional, con Corriente Continua a 3 kV.

Permitiría eliminar de una sola vez todos los inconvenientes analizados en el presente trabajo. Por su concepción la existencia de Zonas Neutras no sería necesaria y tan sólo habría que mantener las necesarias para operaciones de mantenimiento.

7.7. Sistema de protección de la Zona Neutra

Como parte del proyecto de investigación mencionado en el apartado 7.5, se ha investigado sobre otra mejora consistente en instalar un sistema en las proximidades de la Zona Neutra que detecte cuando un tren se aproxima a la misma demandando potencia.

Este sistema tiene por objeto medir la intensidad que recorre un tramo de catenaria próximo al inicio de la Zona Neutra que, en caso de efectuar una detección positiva, haría disparar las protecciones de la Subestación Eléctrica durante el tiempo suficiente para que las protecciones del tren en cuestión (y, como consecuencia indirecta del resto de trenes en la misma sección) efectúen la apertura del disyuntor.

Este sistema evitaría el posible corte de la catenaria ocasionado por el arco generado al entrar el tren en la zona neutra con un alto consumo de intensidad.

8. Aportaciones

Como se ha podido comprobar a lo largo del presente estudio, la incidencia de las zonas neutras en la operación ferroviaria puede ser muy variada, llegando a afectar a varios componentes del Sistema.

8.1. Elección correcta de la ubicación de las Zonas Neutras

Algunos de los efectos que pueden ocasionar las zonas neutras es la detención indebida del tren al paso por la misma. Si bien este hecho puede producirse de forma ocasional y fruto del azar, hay ocasiones en que una Zona Neutra situada en un lugar erróneo, puede facilitar que este hecho ocurra.

Se pone como ejemplo una Zona Neutra situada en la Línea 082 entre Orense y Santiago:

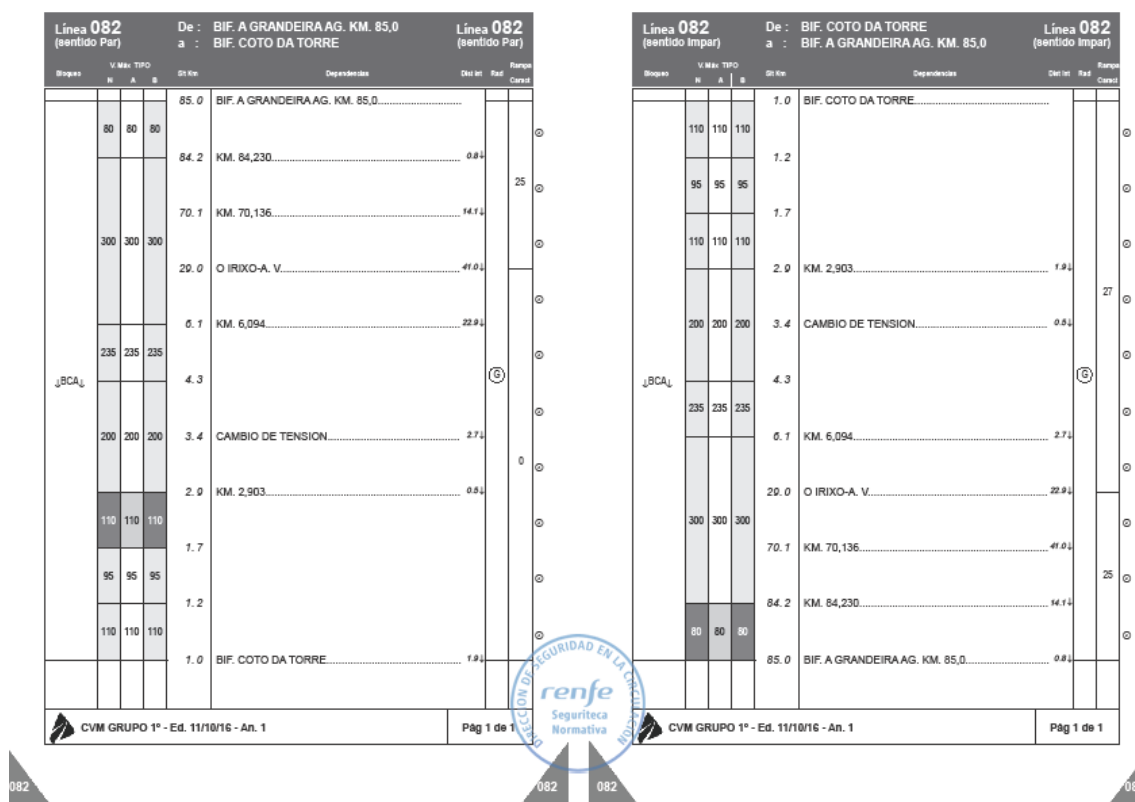


Figura 13 - CVM Línea 082

En el kilómetro 3.4 tiene lugar un cambio de tensión eléctrica que, necesariamente, conlleva la instalación de una Zona Neutra en sus inmediaciones (ver Figura 14 - ICL, Zona Neutra km 3.4”)

I. C. L. Informaciones Circulación Líneas

SISTEMAS DE ENERGÍA – SISTEMAS DE ALIMENTACION ELÉCTRICA. ZONAS NEUTRAS

LÍNEA 082 BF. GRANDEI 85,0-BIF.COTO D TORRE

TRAMO	KM.INI.	KM.FIN
BIF. A GRANDEIRA AG. KM. 85,0 - O IRIXO-A. V.	79,178	78,518
	58,595	57,959
	39,346	38,678
O IRIXO-A. V. - BIF. COTO DA TORRE	9,585	8,909
O IRIXO-A. V. - BIF. COTO DA TORRE (Cambio tensión vías 1 y 2 hacia Orense - 2,5 a 2.2 KV)	3,372	3,362

Figura 14 - ICL, Zona Neutra km 3.4

Se da la casualidad de que no solo sucede lo anteriormente expuesto, sino que, además, se suma la existencia de una rampa con un valor próximo a 30 mm/m. Todo esto no hace más que facilitar que exista una alta probabilidad de que, ante cualquier inconveniente, el tren quede detenido en la Zona Neutra.

Se ha utilizado el Simulador de Marchas para mostrar gráficamente la situación que se plantea.

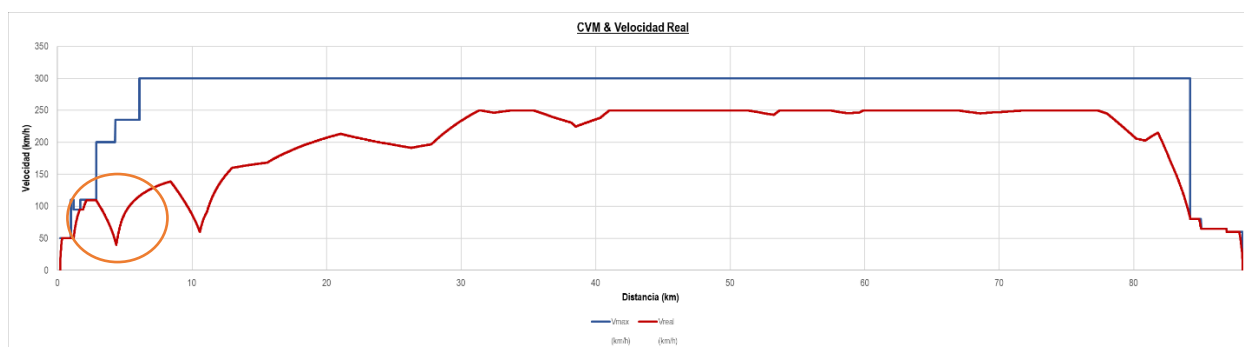


Figura 15 - Simulación Orense a Santiago

Como puede apreciarse en el interior del círculo naranja, si el tren se aproxima a la Zona Neutra a la velocidad máxima que permite el Cuadro de Velocidades Máximas, la velocidad del tren al finalizar la misma ha bajado por debajo de 40 km/h.

Esto quiere decir que, si por lo que fuese hubiera alguna incidencia que no permitiese alcanzar esta velocidad máxima anterior a la Zona Neutra, el tren acabaría perdiendo más velocidad aún llegando incluso a la parada.

8.1.1. Conclusión

Se debe elegir la ubicación de una Zona Neutra que, a pesar de que su afectación al tiempo de viaje o consumo energético no sea relevante, puede ocasionar una interrupción temporal de la operación ferroviaria.

Del mismo modo, se aconseja no ubicarlas en las proximidades de puntos en los que habitualmente se realicen paradas, programadas o no, a fin de evitar estos mismos inconvenientes.

8.2. Propuesta de mejora para la RFIG

Durante la operación normal del subsistema de energía, algunas de las Zonas Neutras se podrían encontrar normalmente cerradas.

Por ejemplo, en la Línea de Alta Velocidad Madrid Levante, los transformadores de una misma Subestación Eléctrica de Tracción se encuentran conectados a la misma fase, lo que permitiría que la Zona Neutra frente a la SE pudiera no existir.

No obstante, las Zonas Neutras referidas se encuentran instaladas y, además, son utilizadas a nivel operativo.

Además de este hecho, tal y como se citó anteriormente, la mayor parte de la red de Alta Velocidad de la RFIG se encuentra equipada con el sistema de señalización ERTMS.

Este sistema de señalización realiza un tratamiento idéntico de todas las Zonas Neutras, tanto si sus seccionadores se encuentran abiertos como si están cerrados. De forma que todos los trenes reciben la información de la existencia de la Zona Neutra y realizan el proceso de apertura del disyuntor antes de aproximarse a cada una de ellas, con los consiguientes inconvenientes que se han relacionado en el presente trabajo.

Según lo expuesto, existe un nicho de mejora potencial del Sistema.

La mejora que se propone consiste en:

En un primer paso, la creación de un protocolo de comunicación mediante el cual los subsistemas de Energía y Control, Mando y Señalización mantengan un intercambio de información que permita al sistema ERTMS conocer el estado en el que se encuentra cada una de las Zonas Neutras del trayecto.

En un segundo paso, una vez que el sistema de señalización conoce el estado de la Zona Neutra, se debe discernir sobre si enviar al equipo embarcado la existencia de la misma u ocultarla.

De esta forma, tan sólo en las Zonas Neutras donde sus seccionadores se encontrasen abiertos se realizaría el proceso de apertura del disyuntor.

9. Bibliografía

- [1] ADIF, “Declaración sobre la Red,” 2020.
- [2] GIF, “Descripcion Linea Madrid-Lerida,” 2003.
- [3] J. Conrado Martínez, “Nuevos planteamientos para la reduccion de Zonas Neutras en líneas de Alta Velocidad y su minimización en la operación ferroviaria,” no. Figura 1.
- [4] A. Bastian, C. Courtois, and A. Machet, “Phase separation sections - Passing with minimum constraints (France),” *eb - Elektrische Bahnen*, vol. 109, no. 4–5, pp. 197–203, 2011.
- [5] K. AJIKI, Y. MOCHINAGA, T. UZUKA, T. SAITOH, and Y. YOSHIKI, “Investigation of Shinkansen static changeover switch capable of suppression of exciting inrush current into transformer on train.” p. 1, 2001.
- [6] H. S. Shin, S. M. Cho, and J. C. Kim, “Protection scheme using SFCL for electric railways with automatic power changeover switch system,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, pp. 10–13, 2012, doi: 10.1109/TASC.2011.2174812.
- [7] AENOR, “Norma UNE-EN 50367 Aplicaciones ferroviarias. Sistemas de captación de corriente. Criterios Técnicos para la interacción entre el pantógrafo y la línea aérea.” AENOR, 2012.
- [8] ADIF, “Cuadro de Velocidades Máximas (CVM) Línea 082,” vol. 082, 2016.
- [9] ADIF, M. A. Gil Calvo, A. Jiménez Cano, and F. Estévez Cárdenas, *Línea Aérea de Contacto unificado para Catenarias CA-160 y CA-220*. ADIF, 2008.
- [10] Comisión europea, “Reglamento (UE) N ° 432/2012 sobre las especificaciones técnicas de interoperabilidad del subsistema de energía del sistema ferroviario de la Unión,” *Diario Oficial de la Unión Europea*, vol. 2014, no. 6. pp. 1–40, 2012.
- [11] M. de Fomento, “Catálogo Oficial de Señales de Circulación Ferroviaria en la RFIG,” 2015.
- [12] ADIF, “Cuadro de Velocidades Máximas 2º Grupo,” 2016.
- [13] ADIF, “ICL - Zonas neutras sin alimentación,” 2020.
- [14] M. de Fomento, “Reglamento de circulación ferroviaria (RCF),” 2018.
- [15] H. S. Shin, S. M. Cho, J. S. Huh, J. C. Kim, and D. J. Kweon, “Application on of SFCL in automatic power changeover switch system of electric railways,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, 2012, doi: 10.1109/TASC.2011.2177617.
- [16] M. de Fomento, “RD 1434/2010, de 5 de noviembre, sobre interoperabilidad del sistema ferroviario de la RFIG,” 2010.

ANEXO I, Tiempo perdido en Zona Neutra

