



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Proyecto Final de Carrera

Ingeniería en Organización Industrial
Graduado Superior en Gestión de la Edificación

Estudio de Automatización CBTC en Línea 2 de Metro de Barcelona

Antonio Francisco Carayol Romero

Director: Núria Talavera Pedrol
Departamento: Organización de Empresas
Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB)
Universidad Politécnica de Catalunya (UPC)

Mayo 2012

Índice

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETO	3
3	GLOSARIO	5
4	SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN FERROVIARIA	7
4.1	DEFINICIÓN	8
4.2	ANTECEDENTES Y CONCEPTOS BÁSICOS	10
4.3	SUBSISTEMA DE VÍA	14
4.3.1	Circuitos de vía.....	14
4.3.2	Balizas ATO.....	43
4.3.3	Accionamientos de aguja	46
4.3.4	Señales.....	51
4.4	SUBSISTEMA DE ENCLAVAMIENTO.....	56
4.4.1	Evolución y tipos de enclavamiento	56
4.4.2	Seguridad	60
4.4.3	Automatic Train Protection (ATP)	62
4.4.4	Enclavamiento electrónico WESTRACE	72
4.4.5	Automatic Train Operation (ATO)	82
4.4.6	Equipo de vía ATO.....	84
4.5	SUBSISTEMA DE TREN	87
4.5.1	Modos de conducción	93
4.5.2	ATP embarcado.....	94
4.5.3	ATO embarcado	96
4.6	SUBSISTEMA DE CONTROL DEL TRÁFICO.....	99
5	SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN CONVENCIONAL EN LÍNEA 2	102
5.1	HISTORIA	103
5.2	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	105
5.2.1	Elementos de señalización en vía general.....	105
5.2.2	Elementos de señalización en taller y cochera	109
5.3	PRESTACIONES DEL SISTEMA	111
5.3.1	Intervalo de explotación	111
5.3.2	Modos degradados	112
6	SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN AUTOMÁTICA PROPUESTO PARA LÍNEA 2	117
6.1	PRINCIPIOS GENERALES.....	118
6.2	ARQUITECTURA DEL SISTEMA.....	121
6.3	SUBSISTEMA DE VÍA	122
6.3.1	Circuitos de vía.....	122
6.3.2	Balizas	124
6.3.3	Accionamientos de aguja	126
6.3.4	Señales.....	126
6.4	SUBSISTEMA DE ENCLAVAMIENTO.....	127
6.4.1	Subsistema de lógica	128
6.4.2	Subsistema de conexión entre red local y WCN	130
6.4.3	Subsistema de supervisión y mantenimiento	131
6.5	SUBSISTEMA AUTOMATIC TRAIN CONTROL (ATC).....	131
6.5.1	Funcionalidades garantizadas	133
6.5.2	Zone Controller	137
6.5.3	Carbonne Controller.....	141
6.5.4	Modos de conducción	146
6.6	SUBSISTEMA DE COMUNICACIÓN DE DATOS (DCS)	151

6.6.1	Subsistema de Comunicación de Radio (RCS)	151
6.6.2	Red CBTC de Tierra (WCN)	156
6.7	SUBSISTEMA AUTOMATIC TRAIN SUPERVISION (ATS)	157
7	INGENIERÍA DE SEÑALIZACIÓN EN LÍNEA 2	162
8	IMPACTO EN EL NEGOCIO	172
8.1	FLEXIBILIDAD	174
8.2	ERGONOMÍA DE EXPLOTACIÓN	176
8.3	SEGURIDAD Y SALUD	176
8.4	CAPACIDAD	178
8.5	COSTES	179
8.6	OPORTUNIDAD DE NEGOCIO	180
8.7	MATRIZ DAFO	182
9	CONCLUSIONES	183
10	BIBLIOGRAFÍA	186

1 INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo urbanístico entorno a los centros de las grandes ciudades y el incremento de la cantidad de vehículos públicos y privados que circulan por ellas plantea la necesidad de disponer de una red de transportes pública aún más mejorada y que facilite las necesidades de transporte de los ciudadanos, evitando atascos y aglomeraciones de vehículos a motor.

La mejor solución para evitar estos problemas es una red de ferrocarril metropolitana (Metro) que extienda sus líneas bajo tierra y que no obstaculice el transporte terrestre, que inevitablemente se reduce considerablemente.

Desde 1863, en que fue inaugurado el primer Metro del mundo en Londres, la construcción e inauguración de nuevos Metros se han sucedido de manera imparable, y actualmente, la mayoría de grandes ciudades cuentan con redes de ferrocarril suburbano como infraestructura de movilidad principal.

El principal activo que ha de garantizar y promover el explotador de una línea de Metro es la seguridad de los pasajeros. Para ello, ha de haber un sistema que controle la posición de los trenes, realice el seguimiento de éstos por la línea, gobierne el movimiento de los cambios de aguja, muestre los aspectos de las señales semafóricas, gestione las rutas de circulación, etc. El sistema de señalización ferroviaria es el encargado de garantizar dichas tareas, permitiendo que los trenes circulen de forma segura y que las prestaciones operativas respondan a la necesidad de transporte requerida.

Hasta hace poco tiempo toda la información entre el tren y los equipos de señalización, continua y bidireccional, se realizaba a través de la vía, con las consiguientes limitaciones técnicas (debido principalmente al escaso ancho de banda de las frecuencias utilizadas, entre 1700 – 6000 Hz las portadoras y entre 13 – 80 Hz las moduladoras). A este tipo de señalización se le llama convencional.

Desde hace unos años, un nuevo sistema de señalización se está imponiendo en las nuevas líneas de Metro a nivel mundial, se trata del sistema CBTC (Communication Train Based Controlled). Este sistema revoluciona y moderniza el anterior, pues la información ya no se transmite por la vía a los captadores del tren, sino que se realiza a través de una red de radio WiFi (banda ISM 2,4 GHz), ampliando las capacidades técnicas del sistema, aportando mayor seguridad y permitiendo la conducción automática sin necesidad de conductor embarcado. A este tipo de señalización se le conoce como automática.

El hecho de modificar el sistema de señalización hacia un CBTC comporta una serie de cambios no sólo en la gestión de las interfaces con los sistemas complementarios (Información al Cliente, Puertas de Andén, Energía, Material Rodante, Comunicaciones, etc.), sino especialmente en el modo de explotación de la línea, que constituye el servicio básico que se le da al pasajero y el objetivo primordial por el que TMB, como explotador, está designado por la Autoritat del Transport Metropolità (ATM) de Barcelona.

2 OBJETO

El objetivo es analizar la viabilidad técnica de sustituir el actual sistema de señalización ferroviaria de Línea 2 de Metro de Barcelona por un sistema de señalización automática CBTC, indicando el grado de transformación del negocio y los beneficios potenciales de la nueva tecnología.

La Línea 2 está funcionando actualmente con una tecnología de señalización ferroviaria de tipo convencional, propiedad de la empresa DIMETRONIC. Este tipo de tecnología requiere de una conducción manual de los trenes, limita la flexibilidad de la operación y no permite la introducción de nuevos avances tecnológicos. La evolución del sistema de señalización hacia uno de tipo automático CBTC implica modificar o eliminar algunos sistemas en funcionamiento e introducir los nuevos equipos suministrados por SIEMENS.

En primer lugar se describe qué es y para qué se utiliza un sistema de señalización ferroviaria, describiendo técnicamente cada uno de los subsistemas que lo componen y estableciendo una mínima base teórica para entender el alcance de la evolución propuesta. Existen diferentes sistemas y equipos de señalización en el mercado ferroviario, imposibles de abarcar en el presente estudio. Es por ello que la mayoría de equipos descritos pertenecen al sistema de señalización de Línea 2, objeto del análisis.

A continuación se describe el sistema de señalización ATP/ATO de Línea 2, enumerando los elementos que lo componen y las prestaciones operativas que el sistema es capaz de controlar.

La introducción de un sistema de señalización automática CBTC en Línea 2 supone un salto cualitativo y una apuesta de futuro importante. En el apartado dedicado al CBTC se describen las funcionalidades del sistema y los equipos que lo componen, prestando especial atención a aspectos como la seguridad en las circulaciones y los modos de funcionamiento.

Una vez conocidos ambos sistemas, se realiza la ingeniería para poder evolucionar de un sistema a otro en Línea 2. En base a los requerimientos del sistema CBTC, se procede a eliminar equipos superfluos, reconfigurar algunos de los existentes e instalar nuevos suministros específicos. Destaca la instalación de la red de radio para proveer de una comunicación continua y bidireccional entre los trenes y el enclavamiento.

Por último, se valoran los principales aspectos del área de negocio susceptibles de ser mejorados con la incorporación de la nueva tecnología CBTC. El impacto en el modelo operativo de Línea 2 es evidente, pues se pasa de un sistema de señalización GoA 2 que requiere de conductor embarcado a un sistema CBTC GoA 4, de conducción totalmente automática. Aspectos como la seguridad, la flexibilidad y la ampliación de la red de negocio, destacan como principales beneficios aportados por la nueva tecnología.

3 GLOSARIO

En el presente apartado se adjunta la lista de las principales siglas, abreviaturas y acrónimos empleados a lo largo de la tesis.

RC: Reglamento de Circulación.
RCMB: Reglamento de Circulación del Metro de Barcelona.
TMB: Transportes Metropolitanos de Barcelona.
FMB: Ferrocarril Metropolitano de Barcelona.
DPTOP: Departamento de Política Territorial i Obras Públicas de la Generalitat.
UITP: Unión Internacional del Transporte Público.
DECT: Digital Enhanced Cordless Telecommunications.
MR: Material Rodante.
FE: Freno de Emergencia.
TBS: Transmission Based System.
EIC: Equipo Interfaz con el Conductor.
PCC: Puesto de Control Central.
PCE: Puesto de Control de Emergencia.
CTC: Centro de Tráfico Centralizado.
CC: Centro de Control de Metro.
TR: Track Relay.
CVSJ: Circuito de Vía Sin Juntas.
CV: Circuito de Vía.
CVV: Circuito de Vía Virtual.
TX: Transmisor de CV.
RX: Receptor de CV.
ASK: Amplitude Shift Keying.
FSK: Frequency Shift Keying.
LED: Light Emitting Diode.
WESTRACE: Westinghouse Train Radio and Advance Control Equipment.
EVCE: Equipo de Vía Con Enclavamiento.
EVSE: Equipo de Vía Sin Enclavamiento.
TCOM: Track Code Output Module.
CGM: Code Generator Module.
TU: Tuning Unit.
TCU: Track Connect Unit.
TFU: Track Feed Unit.
UAL: Unidad de Alimentación de Lazo.
LFU: Loop Feed Unit.
LCU: Loop Control Unit.
SIS: Sistema Instrumentado de Seguridad.
SIL: Safety Integrity Level.
ATP: Automatic Train Protection.
ATO: Automatic Train Operation.
ATC: Automatic Train Control.
ATS: Automatic Train Supervision.
CBTC: Communication Based Train Control.
SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition.
LTV: Limitación Temporal de Velocidad.
IL: Interlocking.
ZC: Zone Controller.
WCC: Wayside Cell Controller.
CC: Carbonne Controller.
CRE: Carbonne Radio Equipment.
OBCU: On Board Control Unit.
WRE: Wayside Radio Equipment.
WRA: Wayside Radio Antenna.
WCN: Wayside Communication Network.
WRD: Wayside Radio Distribution.

4 SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN FERROVIARIA

4.1 Definición

Abarcar en una sola definición todos los matices del concepto de señalización ferroviaria no es fácil. En cambio, sí resulta más fácil comprender la necesidad de que la circulación de trenes por una vía férrea debe estar controlada con una seguridad extrema. El porqué es sencillo, se transportan personas y el riesgo de un fallo a este nivel puede suponer la muerte de pasajeros. Es por ello que desde que se creó el ferrocarril, implícitamente también se creó el concepto de señalización ferroviaria.

En general, la señalización en una explotación ferroviaria es todo el conjunto de sistemas de control y protección de los ferrocarriles, cuyo objetivo principal es que los trenes puedan circular de forma segura, es decir, sin que se produzcan choques por alcances traseros de un tren a otro o entre dos trenes que circulan por vías distintas en una intersección de vías.

Además, el sistema de señalización ha de proporcionar una operatividad a la línea, regulando el tráfico y proporcionando el intervalo óptimo para cumplir la oferta requerida. De hecho, uno de los factores clave de un sistema de señalización es el intervalo mínimo que es capaz de proporcionar¹.

En el diseño de un sistema de señalización se tienen en cuenta dos premisas principales:

- Garantizar la seguridad en la explotación. Es imprescindible que incluso ante el fallo propio del sistema, éste responda de manera segura evitando accidentes (Fail safe). Para ello, es necesario supervisar la situación del tren en las distintas secciones de vía, realizar un seguimiento de la ruta que sigue y controlar la velocidad a la que circula cada tren.
- Proporcionar una explotación rápida y flexible. Dependiendo de los requerimientos del explotador, será necesario que el sistema de señalización permita la circulación de los trenes con un intervalo mayor o menor entre ellos, que se pueda circular por una vía en ambos sentidos (vía banalizada) o que se puedan establecer modos degradados de circulación en horario comercial.

Un sistema de señalización ferroviaria está compuesto por los siguientes subsistemas:

- Subsistema de vía: constituye el interface I/O para que el enclavamiento y resto de equipos en sala técnica puedan interactuar con el tren. Se conocen también como objetos de vía y los más comunes son los circuitos de vía, accionamientos de aguja, señales de circulación y equipos ATO (Automatic Train Operation).
- Subsistema de enclavamiento: equipos de procesamiento de datos encargados del control y organización de un tramo determinado en una instalación ferroviaria. En los enclavamientos se implementa la lógica de señalización de los sistemas ATP (Automatic Train Protection). El ATP, utilizado por primera vez en Reino Unido en 1904, garantiza la conducción segura del tren en todo momento, considerando diferentes variables, entre ellas la velocidad máxima permitida por tramo, el límite de velocidad del material rodante y las indicaciones de señalización. Los enclavamientos pueden ser mecánicos, eléctricos, electrónicos o una combinación de éstos. En la sala técnica de enclavamiento también se instalan los equipos ATO de cabina, sistema que permite funcionalidades como la conducción automática de trenes o la parada de precisión.

¹ El pliego de licitación del Proyecto del Sistema de Señalización Ferroviaria de L9 y L10 de Metro de Barcelona contenía un requerimiento de intervalo mínimo entre trenes (sin contar tiempo de estacionamiento) de 90 segundos. La UTE SIEMENS-DIMETRONIC fue finalmente el ganador del concurso, garantizando este intervalo con su sistema CBTC (Communication Based Train Control) siempre que las condiciones de la vía y el tren lo permitiesen.

- Subsistema embarcado: los computadores embarcados de ATP aseguran que el tren nunca supere la velocidad segura de circulación, gracias a los inputs que recibe del propio tren (tacogeneradores, lazo de seguridad de puertas, etc.) y del enclavamiento a través de los objetos de vía, como transmisores de CV para ATP y lazos de ATO. Para ello, en la parte inferior del tren se instalan antenas que captan la señal que se emite a través de la vía y de los lazos.
- Subsistema de control del tráfico: en el Puesto de Control Central (PCC) se centralizan todas las actividades de control y supervisión de los distintos sistemas que conforman la explotación ferroviaria. Está formado por varios puestos de operador, divididos por líneas, cada uno ellos dedicado a un subsistema. El telemando de tráfico está conectado directamente al subsistema de enclavamiento y se encarga del control seguro de la circulación y regulación de la línea. Pero además, en el PCC hay otros telemandos, cada uno responsable de la supervisión y control de un subsistema, algunos ejemplos son el telemando de material móvil o el telemando de energía.

Estos subsistemas han de estar comunicados entre ellos, ya sea mediante cableado de cobre, fibra óptica o radiofrecuencia, pues la interacción es constante y vital para el correcto funcionamiento del sistema de señalización.

En el presente punto se explican las principales funcionalidades y características técnicas de cada uno de los subsistemas. El objetivo es establecer una base de conocimiento que permita al lector la comprensión a nivel técnico que supondría la sustitución del actual sistema de señalización ATP/ATO GoA² 2 de DIMETRONIC de L2, a un sistema CBTC GoA 4 de SIEMENS.

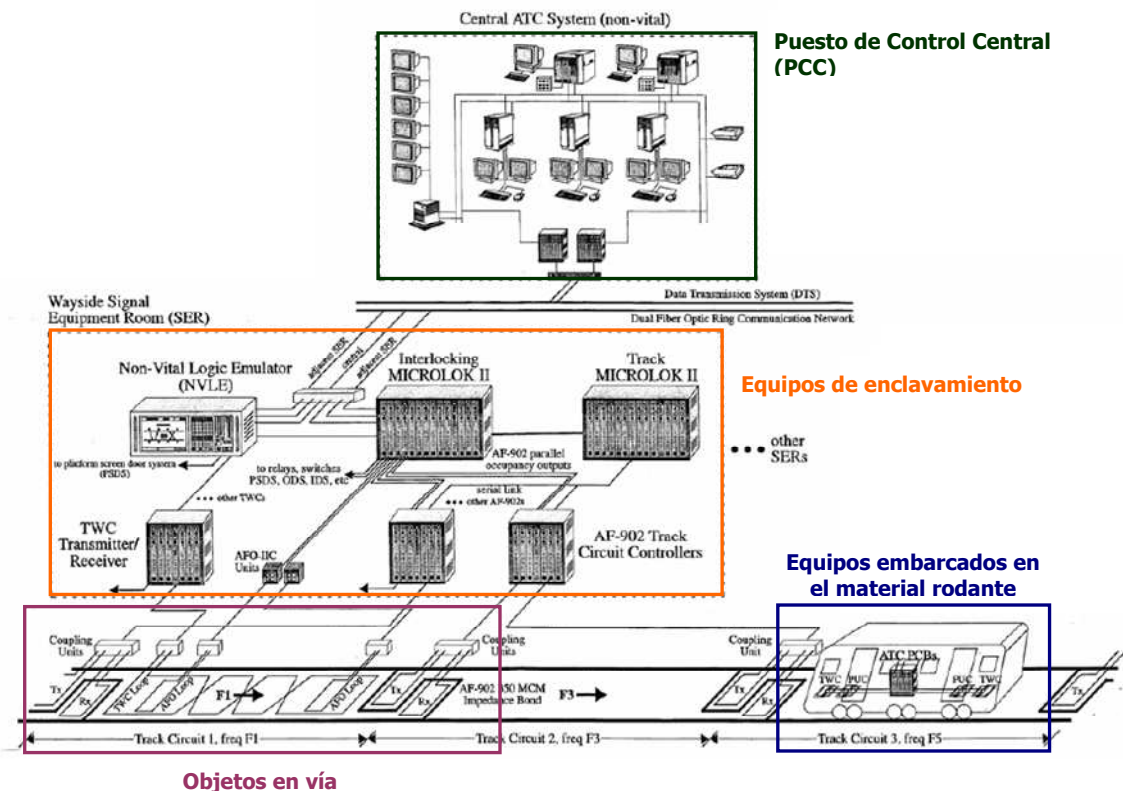


Fig. 1 Arquitectura tipo de un sistema de señalización ferroviaria de la empresa ANSALDO.

Imagen: archivo Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

² La norma IEC 62290-1 define los siguientes grados de automatización (Grade of Automation o GoA) de un sistema de señalización: GoA 1 requiere conductor para todas las funciones, GoA 2 o conducción semi automática (Semi-automated Train Operation o STO), GoA 3 sin necesidad de conducción de tren pero con asistente en cabina (Driverless Train Operation o DTO) y GoA 4, totalmente automático (Unattended Train Operation o UTO). A mayor nivel de automatización, son necesarios mayores niveles de seguridad, funcionalidad y rendimiento.

4.2 Antecedentes y conceptos básicos

En sus orígenes, los sistemas de señalización ferroviaria eran totalmente manuales, disponiendo desde un primer momento de policías ferroviarios o guardagujas que, conociendo dónde estaban los trenes, autorizaban la salida y regulaban la circulación.

Pero la creciente demanda del ferrocarril como medio de transporte y el consiguiente aumento del número de trenes en circulación obligaron irremediablemente a modernizar las instalaciones, dando lugar a elementos como las señales, accionamientos y finalmente los enclavamientos. De hecho, los enclavamientos fueron la evolución lógica de dos factores:

- Dificultad de disponer de personal en todos los cambios para actuar sobre accionamientos y señales. Para racionalizar la explotación, se tomó la decisión de concentrar las palancas de maniobra de los desvíos en una cabina de concentración de palancas y disponer todas las señales juntas en un solo punto de la estación. Esta concentración de elementos fue el embrión de los futuros enclavamientos.
- Necesidad de relacionar físicamente las posiciones de desvío con las señales que los protegen o autorizan rutas sobre el mismo. El objetivo era implementar un sistema que técnicamente fuese capaz de evitar situaciones peligrosas y amenazas contra la seguridad que se produjeran en la circulación de trenes. Hasta la llegada del enclavamiento, solamente los procedimientos de las empresas operadoras eran la garantía de seguridad en la línea.

Así, el funcionamiento de los sistemas de señalización primitivos constaba de los siguientes elementos (algunos de ellos todavía en uso):

- Policías ferroviarios o guardagujas: personal permanente en los cambios de agujas que garantizaban la posición de las mismas para evitar descarrilamientos. El cambio de posición de las agujas se realizaba mediante una marmita, encargada del movimiento de las agujas mediante un procedimiento mecánico de contrapesos.



Fig. 2 Antiguo cambio de agujas con accionamiento manual mediante marmita.

Imagen: www.villanuevadelasminas.es/fotoantiguas/trenes.

- Señales visuales manuales: en un primer período las indicaciones se daban utilizando los brazos, extendidos cuando la línea estaba ocupada y pegados al cuerpo si la línea se encontraba libre de otros trenes.

Con la utilización de banderas de colores, el jefe de estación, además, era capaz de regular el intervalo de los trenes para aumentar la capacidad de la línea. La mayoría de las explotaciones elegían un intervalo de unos 10 minutos, indicando a los trenes que podían circular a máxima velocidad cuando estaban 10 minutos por detrás del primer tren.

El jefe de estación utilizaba una bandera roja, amarilla o verde para indicar al conductor del tren el modo de proceder. Se mostraba una bandera roja en los 5 minutos posteriores desde la salida del primer tren. Si un tren llegaba pasados esos 5 minutos se mostraba una bandera amarilla al conductor para indicarle precaución. La señal de color verde, que indicaba que el tren podía circular a velocidad máxima (siempre limitada por el propio tren) sólo se mostraba cuando habían pasado los 10 minutos.

Aunque hoy en día este método no se utiliza en modo nominal de operación, se debe conservar para casos excepcionales en que el sistema de señalización ferroviaria no está operativo y se debe circular en modo degradado.

En España, el artículo 3 del Real Decreto 810/2007, de 22 de junio, por el que se aprueba el Reglamento sobre Seguridad en la Circulación de la Red Ferroviaria de Interés General señala que «el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias y las empresas ferroviarias aplicarán las reglas y normas nacionales de seguridad disponiendo de unos sistemas de gestión de la seguridad adecuados a lo dispuesto en este reglamento que habrán de incluir las medidas necesarias para el control de los riesgos de la circulación ferroviaria».

Así pues, para mitigar los riesgos derivados de una circulación ferroviaria no controlada por el sistema de señalización, por ejemplo en caso de avería del mismo, la ley obliga implícitamente a que el Reglamento de Circulación de un operador ferroviario incluya la señalización exclusivamente por medios manuales (brazos, banderín, silbato y campana de estación), similar a las primera explotaciones donde se carecía de sistemas de control automatizado.

En una explotación ferroviaria como Metro de Barcelona, el Reglamento de Circulación considera este tipo de señalización visual por medios exclusivamente manuales en su apartado 2.2.2 Señales manuales y portátiles. En los artículos S32, S33, S34 y S35 de dicho apartado, se describe en qué casos y de qué manera los agentes de circulación y jefes de estación deben utilizar las banderas y linternas. Ambos elementos disponen del mismo código de colores: verde, amarillo y rojo, aunque los banderines poseen diferente significado si están o no plegados.


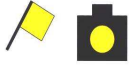
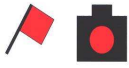
ASPECTE	INDICACIÓ
	↳ VIA LLIURE.
	↳ PRECAUCIÓ.
	↳ ALTO.

Fig. 3 Señales manuales portátiles especificadas para Metro de Barcelona.

Imagen: Reglamento de Circulación de Metro de Barcelona. Anexos. Ed. Diciembre 2009.

- Señales acústicas: antiguamente 1 toque de campana o del silbato del jefe de estación anunciaba la salida del tren situado en vía 1, 2 toques la salida del tren en vía 2, etc. Actualmente este método está en desuso y se ha sustituido por el claxon que activa el conductor del tren, 1 toque corte en caso de salida hacia delante y 2 toques cortos en caso de salida marcha atrás.

Los artículos S36, S37, S38 y S39 del apartado 2.2.3 Señales acústicas del Reglamento de Circulación de Metro de Barcelona describen los siguientes avisos sonoros:

- Claxon de puertas: sonido discontinuo que indica que las puertas de tren se van a cerrar (automático por parte del material rodante bajo orden del sistema de señalización ferroviaria).
 - Claxon de tren: 1 o 2 sonidos cortos que indican que el tren reemprende la marcha y en qué sentido (automático por parte del material rodante bajo orden del sistema de señalización ferroviaria).
 - Claxon en estaciones terminales: autorización de salida de tren en las estaciones terminales de la línea (automático por parte del material rodante bajo orden del sistema de señalización ferroviaria).
 - Corneta de jefes de estación: para suplir el claxon de tren o de estaciones terminales en caso de avería.
 - Pito de bolsillo: sustituye el claxon de puertas en caso de avería.
- Comunicaciones de voz: con la invención del teléfono, los jefes de estación podían comunicarse entre ellos y con los guardagujas, mejorándose la seguridad en el seguimiento de los trenes y estado de objetos de vía. Estos teléfonos, como el que se muestra en la figura 4, conseguían la corriente necesaria para la transmisión de la voz mediante una dinamo que se cargaba manualmente por la acción del operario girando una manivela.



Fig. 4 Antiguo teléfono ferroviario ERICSSON de RENFE.

Imagen: www.todocolección.net.

A medida que se avanzó en la técnica de las telecomunicaciones, los sistemas de soporte a la señalización ferroviaria se modernizaron y se instalaron redes de radiofrecuencia en los túneles para otorgar una línea de comunicación bidireccional entre los conductores de tren y el Puesto de Control Central.

El sistema integral de comunicaciones que provee los servicios de voz en Metro de Barcelona consta de las siguientes redes:

- Red de Radio: frecuencia de trabajo 144 – 174 Mhz, cable radiante tendido en bóveda y estación y equipos de conmutación en salas de comunicaciones. Los conductores de tren tienen comunicación directa con el Centro de Control de Metro (CCM), donde pueden comunicar incidencias y recibir consignas. También los jefes de estación y el personal técnico disponen de un canal de comunicación mediante un radioteléfono portátil o walkie-talkie, modelo TELTRONIC PR-216-F2, que les permite estar conectados en todo momento mediante canales abiertos.
- Red DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications): frecuencia de trabajo 1880 – 1900 Mhz, antenas en estación y dependencias técnicas y equipos de conmutación en salas de comunicaciones, con enlaces a las centralitas telefónicas. Es una red de telefonía móvil interna para TMB, la tecnología DECT está reservada para usos corporativos y, una vez instalada, representa un ahorro en costes con respecto a la telefonía móvil comercial.
- Red de telefonía fija: con terminales telefónicos situados en dependencias técnicas, cabinas de jefe de estación y edificios corporativos.
- Red de telefonía móvil: con las cuatro operadoras españolas (MOVISTAR, ORANGE, VODAFONE y YOIGO) que disponen de cobertura en la práctica totalidad de la red de TMB.

4.3 Subsistema de vía

Los equipos instalados en la vía, llamados objetos de vía, son los encargados de interactuar con el enclavamiento en dos direcciones:

- Recibiendo y ejecutando órdenes, output de la lógica programada en el enclavamiento, por ejemplo mostrando un aspecto verde en una señal o accionando un motor de aguja para moverla.
- Enviando el estado de un objeto al enclavamiento, input para la ejecución de la lógica programada, por ejemplo la información de un circuito de vía ocupado o un motor de aguja que no está comprobando la posición de los espadines.

Existen diferentes objetos de vía que pueden instalarse como elementos de un sistema de señalización, algunos de ellos imprescindibles y otros para dotar al sistema con funcionalidades complementarias, con o sin intervención del enclavamiento.

En la red de Metro de Barcelona se utilizan sistemas de señalización diferentes con objetos de vía distintos, pero existen tres que son comunes en todos los sistemas: circuitos de vía (CV), accionamientos de aguja y señales de circulación.

La Línea 2, objeto del análisis técnico de esta tesis, dispone además de sistema ATO (Automatic Train Operation) suministrado por DIMETRONIC, que tiene sus propios objetos de vía: lazo y Unidad de Alimentación de Lazo (UAL). En el punto dedicado al subsistema de enclavamiento se explican las características técnicas y funcionalidad de dicho sistema, cuyo principal objetivo es controlar la potencia y frenado del tren de manera automática, sin la intervención del conductor.

En el presente apartado se describirán los objetos de vía instalados en Línea 2: circuitos de vía, equipos ATO en campo, accionamientos de aguja y señales de circulación.

4.3.1 Circuitos de vía

Un circuito de vía (CV) es un tramo de vía seccionado eléctricamente, interface único de comunicaciones entre enclavamiento y tren en los sistemas de señalización convencional, cuyas funciones principales son las siguientes:

- 1) Detección de presencia (señalización): dividir la línea en secciones y enviar información de estado libre u ocupado al enclavamiento.

El estado del CV constituye una entrada vital para la lógica del enclavamiento, que autorizará mediante la apertura de señales y/o el envío de códigos de velocidad el paso de un tren a dichas secciones. La señal que da paso a una sección sólo se abrirá (aspecto verde o amarillo) cuando esté desocupada (libre de tren) y las demás condiciones de señalización también se cumplan (por ejemplo que las agujas estén enclavadas y comprobando en la posición correcta).

Mediante la ocupación del CV también es posible ubicar la posición del tren en la línea y poder realizar el seguimiento del mismo. El enclavamiento y el telemando de tráfico disponen de un interface de comunicaciones que permite el intercambio de señales y la interacción entre el sistema de señalización y el personal de operación.

- 2) Envío de códigos de velocidad al tren: en los sistemas de señalización equipados con sistema ATP (Automatic Train Protection), el enclavamiento procesa la lógica de señalización incluyendo la protección y el control de la velocidad de los trenes. En función de las instrucciones programadas, se activa una salida que envía hacia el CV una señal con la siguiente información:
- Velocidad máxima (VMAX): indica el límite que no ha de ser sobrepasado por el tren en dicho CV y viene definida por las características de la vía (pendiente, peralte, curva, etc.). Si el conductor sobrepasa la VMAX el enclavamiento envía un código de stop al tren y éste se frena.
 - Velocidad objetivo (VOBJ): indica la velocidad recomendable que el tren debería llevar al final del CV y suele coincidir con la VMAX del siguiente CV. La VOBJ facilita la conducción del tren para evitar cambios de aceleración bruscos que puedan afectar al pasaje, cambios que en última instancia dependen de la pericia del conductor.

La función de señalización mediante detección de presencia en los CV se basa en el concepto block system. La información de ocupación/desocupación de uno o varios CV es una entrada vital para el enclavamiento, que establece las rutas seguras que ha de seguir un tren en función de varios inputs, entre ellos la situación de los demás trenes en circulación.

Un CV actúa como un circuito eléctrico en el que un Transmisor (TX) inyecta una señal de corriente alterna en un extremo y un Receptor (RX) detecta la presencia de la señal en el otro extremo del mismo. El RX comprueba que la señal coincida con la que tiene programada, equivalente a la enviada por el TX. Si las pruebas son satisfactorias, el RX mantiene un relé excitado (CV libre), información de estado que es enviada al enclavamiento.

En la figura 5 se muestra un esquema muy simple del funcionamiento de un CV, donde la señal del TX la envía una batería de bajo voltaje colocada en el extremo derecho, el opuesto al sentido de circulación. Un relé colocado en la entrada de la sección detecta el voltaje y permite el paso de corriente, conectando una fuente de suministro de tensión a la luz verde de la señal. En este caso el CV estaría libre de tren y por tanto el acceso estaría autorizado.



Fig. 5 Esquema simplificado de un CV libre.

Imagen: Principios básicos de señalización ferroviaria. José Manuel Mera y Carlos Mera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Marzo 2003.

En la figura 6 se ilustra el caso del mismo CV, esta vez cuando el tren accede al mismo y el estado pasa de libre a ocupado. Los ejes del tren tienen una impedancia muy baja, de manera que cuando el tren penetra en el CV prácticamente toda la corriente circula por dichos ejes y se provoca un cortocircuito entre los carriles (shuntado). Al no llegarle tensión al relé, éste se desexcita, pierde el contacto y la fuente de tensión suplementaria alimenta la luz roja de la señal, restringiendo el acceso al CV.

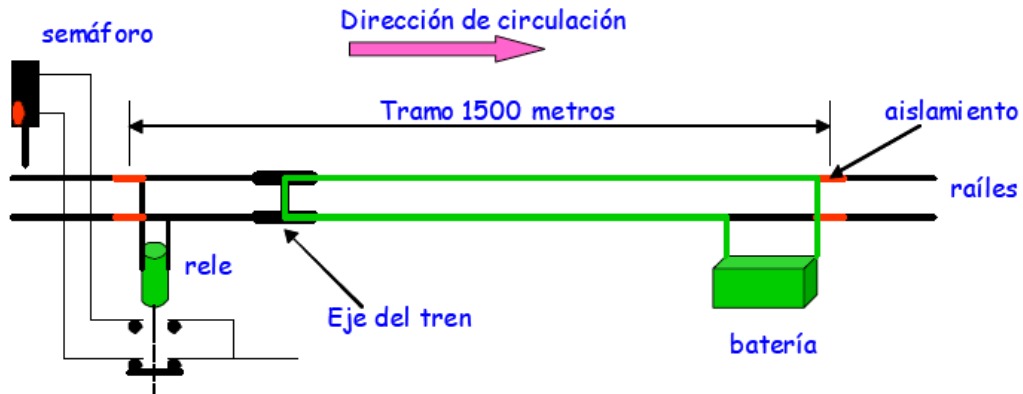


Fig. 6 Esquema simplificado de un CV ocupado por un tren.

Imagen: Principios básicos de señalización ferroviaria. José Manuel Mera y Carlos Mera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Marzo 2003.

Un aspecto a tener en cuenta en el diseño de los CV es la seguridad. En los ejemplos anteriores, cualquier causa que interrumpa el paso de corriente al relé provocará un encendido del aspecto rojo de la señal, restringiendo el paso. Si se hubiera diseñado al revés, de manera que se indicará vía libre con señal en verde cuando no circulará corriente por el relé, se podrían producir fallos que pondrían en peligro la seguridad de las circulaciones. Este tipo de sistemas se conocen como "seguro en caso de fallo" o Fail safe, el CV se considerará siempre ocupado a menos que el sistema pruebe que está libre.

En los sistemas de señalización con enclavamiento el funcionamiento es algo más complicado que en los casos descritos. La señal TX del CV está generada por una tarjeta transmisora situada en la sala de enclavamiento, no por una batería, y las comprobaciones del RX las realiza una tarjeta receptora que activa o no una salida hacia el relé de vía o Track Relay (TR) según el resultado de dichas comprobaciones. Luego será el enclavamiento, en función de su lógica programada, el que controle el aspecto de las señales y los códigos de velocidad que se envían a los CV.

El CV también es importante para detectar fallos e incidencias en zona de vías, son las llamadas falsas ocupaciones. Dos de las más características son:

- Rotura de carril: un corte físico provocaría la ausencia de señal de entrada al RX, que eliminaría la señal de salida hacia el TR. En este caso, se detectaría una ocupación cuando ningún tren del carrusel está en dicho CV, restringiéndose el paso a la zona y evitando un descarrilo de tren.
- Inundación: una cierta cantidad de agua puede provocar el cortocircuito entre ambos carriles, interpretando el RX que hay una ocupación del CV cuando en realidad no existe. La detección de esta falsa ocupación permitiría, tras inspeccionar la zona, establecer una Limitación Temporal de Velocidad (LTV) o bien restringir el acceso totalmente.

Con el objetivo de sintonizar las señales de trabajo para cada CV, que dispone de frecuencias individualizadas y diferenciadas respecto a los adyacentes, se instala en la vía un dispositivo de adaptación entre los TX y RX con los carriles.

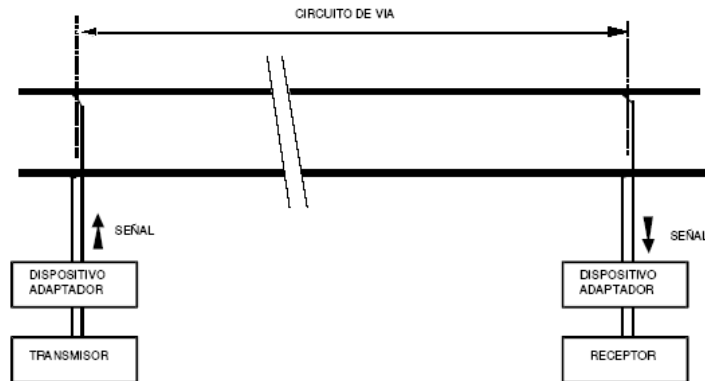


Fig. 7 Esquema simplificado de un Circuito de Vía.

Imagen: Manual de Descripción del Sistema. Sección 1: Introducción. DIMETRONIC S.A. Ed. 4. Mayo 1999.

De manera general, un equipo completo de CV dispone en la sala de enclavamiento de los siguientes elementos:

- Transmisor (TX): su objetivo es generar una señal portadora modulada que alimenta a los carriles en el extremo del CV para proporcionar una señal de vía libre al RX.
- Receptor (RX): lleva a cabo una serie de comprobaciones en la señal de entrada que se ha tomado de los carriles y proporciona una salida para excitar un relé de vía (TR) o desexcitarlo si recibe un nivel de señal inferior al establecido.
- Fuente de alimentación.
- Relé de Vía (TR).
- Otros elementos dependiendo de la tecnología y de la configuración de vía.

En vía se instalan los siguientes equipos:

- Elementos físicos de separación entre CV:
 - Juntas aislantes con corte en el carril.
 - Juntas aislantes eléctricas con lazos de cortocircuito en paralelo: una conexión terminal del lado RX del CV y otra perteneciente al CV adyacente permiten no tener que cortar físicamente el carril.
 - Juntas aislantes eléctricas con lazos de cortocircuito en S o en Z: optimización de los lazos en paralelo, también sin corte físico del carril.
- Dispositivos adaptador: ubicados en la zona de terminación de los CV, proporciona el interface físico para conectar los TX y RX a los carriles y actúa como un filtro paso banda selectivo eliminando los armónicos no deseados de la señal de salida del TX. Se les conoce como unidades o cajas de sintonía.
- Cajas de conexión.
- Otros elementos dependiendo de la tecnología y de la configuración de vía.

Las funcionalidades de los CV son similares en todas las tecnologías, aunque encontramos diferencias técnicas dependiendo del suministrador y, sobre todo, de la antigüedad de los equipos. Como sería demasiado extenso describir toda la amplia gama de fabricantes y tecnologías de CV existentes en el mercado, nos hemos centrado en dos tipos de CV utilizados en las Líneas 4 y 2 de Metro de Barcelona.

Aunque en este punto no se pretende describir las funcionalidades del enclavamiento, es inevitable no hacer referencia al envío de los códigos ATP al tren a través de los CV. En los sistemas de señalización convencionales, los CV constituyen el único enlace entre los equipos de señalización embarcados y los de Tierra, y por tanto, el interface por el que se envían los códigos de velocidad al tren.

4.3.1.1 Tecnología ERICSSON-DIMETRONIC L4 FMB

El modelo de circuito de vía instalado en Línea 4 de Metro de Barcelona es una combinación de las tecnologías ERICSSON y DIMETRONIC y aunque no dispone de generación de señal ATP, permite la entrada de una señal externa para implementar dicha funcionalidad. De esta manera, la Línea 4 fue la primera línea de FMB en disponer de ATP en el año 1984.

La detección de ocupación se realiza mediante la excitación o desexcitación del relé de vía o Track Relay (TR). Dicho relé permanece excitado debido al campo magnético creado por el flujo de corriente en una bobina, indicando que no existe ocupación en dicho CV. Para que la corriente fluya por dicha bobina, una señal eléctrica de 50 Hz es enviada (transformador sumador) hacia el extremo de alimentación del CV (ver 220V ALIMENTACIÓ en figura 8). Esta señal recorre los carriles hasta llegar al extremo de recogida del CV y se devuelve a la sala de enclavamiento, donde finalmente llega al TR para excitarlo (ver entradas T1 y T2 RECOLLIDA en figura 8). Tal como ya se ha explicado, en el momento que un tren cortocircuite los carriles, la ausencia de tensión en recogida hará que el TR se desexcite e indique una ocupación al enclavamiento.

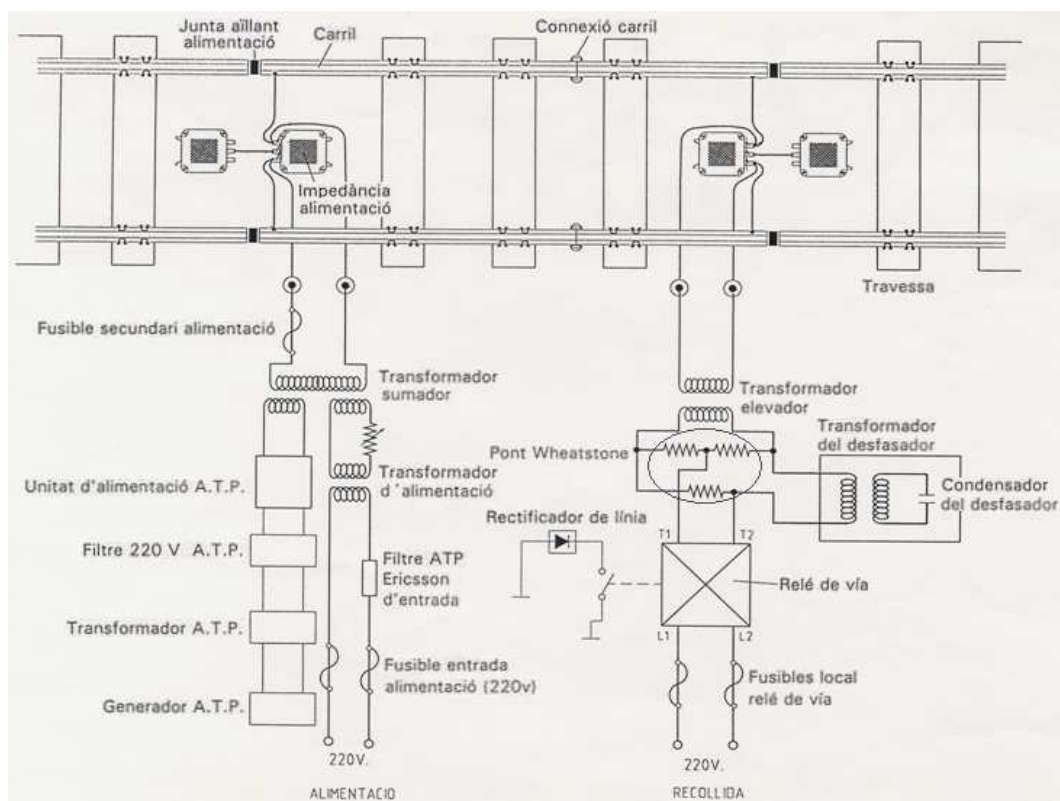


Fig. 8 Esquema general de conexionado de un CV ERICSSON.

Imagen: archivo Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

El enclavamiento será el encargado de activar el Transmisor de ATP para que se pueda enviar la señal que contiene la información de los códigos de velocidad hacia el extremo de alimentación del CV. Para ello, se deben cumplir dos condiciones:

- El enclavamiento ha establecido un itinerario por ese CV.
- El enclavamiento recibe la señal del TR indicando una ocupación en dicho CV o en el inmediatamente anterior según el sentido de la marcha.

En el momento en que ambas condiciones se producen, la señal de ATP con los códigos de velocidad VMAX/VOBJ se transmitirá por los carriles del CV. Las señales de ATP no son códigos de velocidad en sí mismas, sino señales moduladas en amplitud que el equipo ATP del tren, convenientemente programado, interpreta como valores de velocidad.

La señal de ATP es una onda portadora modulada en amplitud (ASK) generada en el Transmisor de ATP, que consigue las moduladoras del Generador de Códigos. Se utilizan dos portadoras, A de 1365 Hz y B de 1953 Hz, que combinadas con cada una de las tres moduladoras, W de 20,34 Hz, X de 25,43 Hz e Y de 35,15 Hz, producen las seis señales que representan cada uno de los códigos de velocidad que el captador del tren interpretará.

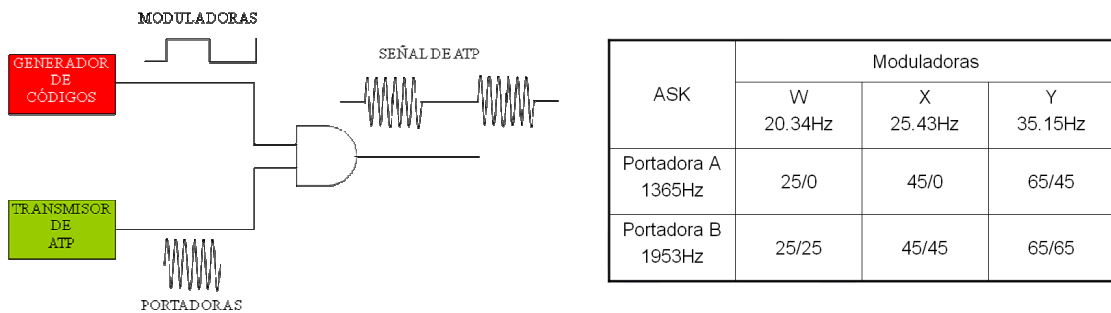


Fig. 9 Generación de señal ATP con interpretación de códigos VMAX/VOBJ.

Imagen: elaboración propia.

Una ausencia de señal será interpretada por el equipo ATP embarcado como un código 0/0 que provocará el Frenado de Emergencia (FE) del tren.

La señal ATP se modula para conseguir los siguientes objetivos:

- Facilitar la propagación de la señal de información entre fuente (TX) y destinatario (captador del tren) sobre el medio (carril). La señal portadora sirve para transportar y la moduladora aporta la información³.
- Tener un control sobre la señal. El control se realiza sobre ciertos elementos característicos de una oscilación continua, que son modificados según la forma de onda de la señal que se desea transmitir. En el caso que nos ocupa, se utiliza una Modulación digital por Desplazamiento de Amplitud o ASK (Amplitude Shift Keying), en la que los datos digitales se representan como variaciones de amplitud de la onda portadora.

³ La señal de ATP pertenece al rango de las ULF (Ultra Low Frequency), con un ancho de banda de 300 a 3000 Hz. Este es el intervalo equivalente a la frecuencia sonora normal para la mayor parte de la voz humana. Junto a las bandas ELF (3 a 30 Hz), SLF (30 a 300 Hz) y VLF (3 a 30k Hz) comparten el espectro de la AF (audiofrecuencia) que se encuentra entre 20 y 20000 Hz aproximadamente. Este tipo de onda son de presión, como el sonido, por que se desplazan a la velocidad del sonido sobre un medio material (en nuestro caso el carril de la vía férrea). Las ondas de radiofrecuencia, a partir de 30k Hz, al ser ondas electromagnéticas, se desplazan a la velocidad de la luz sin necesidad de un medio material. Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Radiofrecuencia>.

La amplitud de la señal portadora varía conforme a la corriente de bit (modulando la señal), manteniendo la frecuencia y la fase constantes. El nivel de amplitud se utiliza para representar los valores binarios 0 y 1, donde la señal portadora funciona como un interruptor ON/OFF (apaga/enciende de la portadora). En la señal modulada, el valor lógico 0 es representado por la ausencia de una portadora.

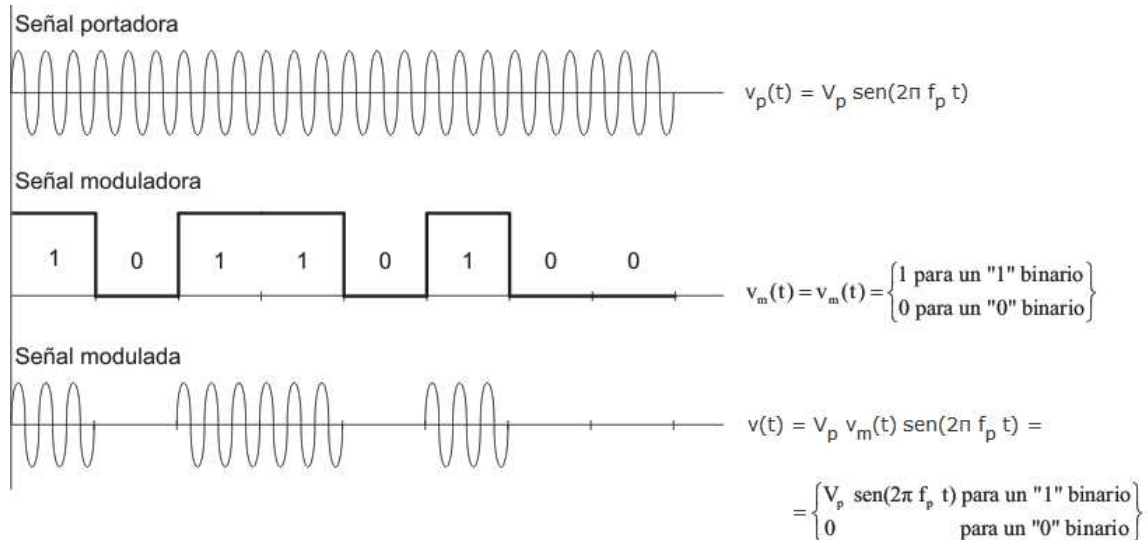


Fig. 10 Ecuaciones y representación gráfica de la modulación ASK.

Imagen: <http://www.textoscientificos.com/redes/modulacion/ask>.

- Proteger la señal de ruidos e interferencias. A pesar de que la modulación ASK posee una baja calidad de transmisión, ésta resulta eficiente para los estándares exigidos por la tecnología ATP ERICSSON de L4, siendo también de uso frecuente en la radiodifusión de audio y video. En cualquier caso, la modulación ASK es muy sensible al ruido que acumula a lo largo del canal.
- Distribuir canales a cada información distinta, resultando en este caso un total de seis canales, que se asignan cada uno a un código de velocidad según se muestra en la figura 9.

Los captadores de códigos ATP del tren son dos antenas receptoras situadas en la parte delantera y trasera inferior de su chasis, a pocos centímetros del carril. Dichas antenas efectúan una lectura continua de los campos electromagnéticos de pequeña intensidad emitidos por el carril, que actúa como antena emisora de la señal que le envía el TX.

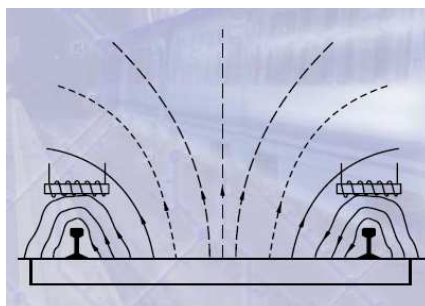


Fig. 11 Diagrama de captación de la antena de tren.

Imagen: Señalización ferroviaria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. Marzo 2006.

El captador interpreta cada una de las señales y las descodifica para dar los valores concretos de VMAX y VOBJ que el conductor deberá respetar si no quiere que el tren aplique FE.

En este tipo de tecnología, los CV están separados eléctricamente mediante juntas aislantes, que consisten en un corte físico del carril, normalmente diagonal en ángulo de 45°. De esta manera, se impide que una señal se traspase al CV adyacente dando lugar a una excitación o desexcitación errónea del TR. Aún así, para evitar que una derivación en la junta aislante pudiera provocar este error, los CV se desfasan 180° entre sí.

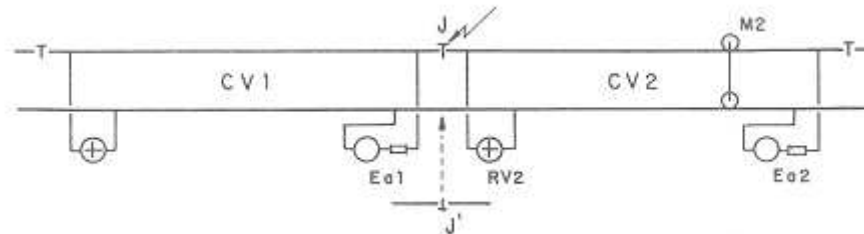


Fig. 12 Esquema de dos CV no polarizados.

Imagen: archivo Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

En la figura 12 podemos ver que un tren situado en CV₂ provoca que Rv₂ no reciba la señal de 50 Hz, ya que el eje M2 cierra el circuito con Ea₂. Si se produjese una derivación en la junta aislante J, la señal de 50 Hz generada por Ea₁ podría llegar a Rv₂ dando lugar a una desexcitación del TR₂ e informando erróneamente al enclavamiento de que no hay ocupación de vía en CV₂ cuando en realidad sí la hay. Esto podría llevar a un choque de trenes al autorizar el enclavamiento una ruta creyendo que está libre, cuando no lo está.

Para evitar este problema, se desfasan 180° las corrientes de 50 Hz generadas por los TX de CV adyacentes, así, como se indica en la figura 13, una posible derivación de la junta aislante (A-B-D)⁴ permitiría la llegada de la señal marcada con flecha roja al RX del CV₂ pero, al estar desfasada 180°, provocaría la desexcitación del relé Rv₂, manteniendo entonces la indicación de ocupación del CV₂ y no provocando una situación de peligro.

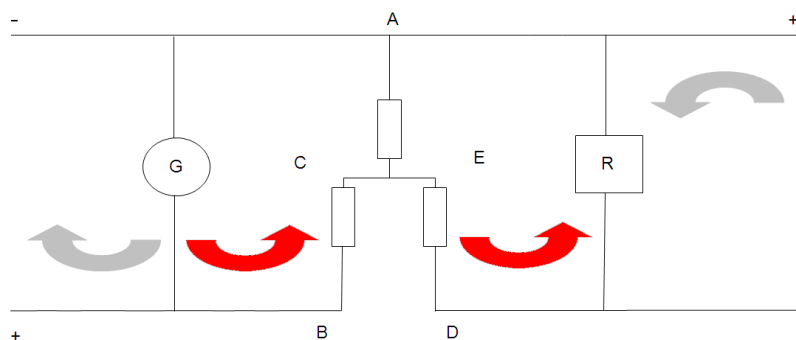


Fig. 13 Frontera entre dos CV con TX en fase 180°.

Imagen: elaboración propia.

Por lo que respecta a la señal de ATP, en caso de que se produzca un fallo de aislamiento en una junta aislante, ésta nunca podrá llegar al captador del tren indicando unos códigos de velocidad erróneos. La instalación de las llamadas juntas inductivas en paralelo a las juntas aislantes actúa como filtros de la señal de ATP, evitando este problema.

⁴ En el esquema de la figura 13 las impedancias entre los puntos A-B-D representan las bobinas de las juntas inductivas que impiden el paso de la corriente alterna generada por los TX de CV, tanto la señal de 50 Hz de detección de ocupación como la de ATP de envío de códigos de velocidad al tren.

El motor eléctrico de los trenes que circulan en Metro de Barcelona funciona con tensión continua, con un valor de 1500 Vdc en L9 y L10 y 1200 Vdc en el resto de líneas. La alimentación llega al motor a través del pantógrafo que está en contacto permanente con la catenaria, polo positivo del circuito. La corriente entra al motor y sale por la conexión rueda-carril, polo negativo del circuito. Mediante los carriles de retorno la corriente de tracción debe llegar a la subcentral para cerrar el circuito de alimentación.

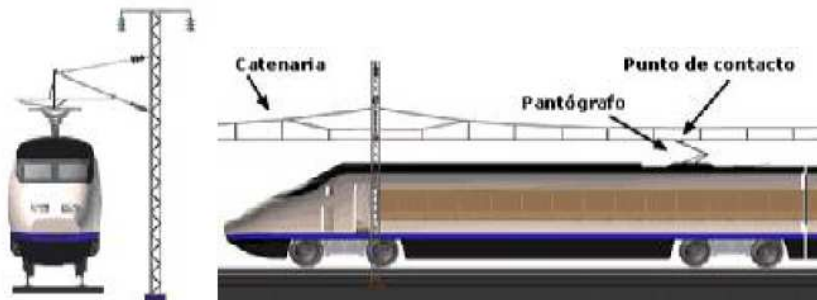


Fig. 14 Captación de corriente de tracción por contacto pantógrafo-catenaria.

Imagen: Curso de ferrocarriles. Capítulo 6: La Catenaria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. 2005.

La utilización de juntas aislantes para separar los CV comporta cortar físicamente el carril, lo cual provoca que la corriente de tracción no pueda circular y cerrar el circuito en la subcentral de tracción. La necesidad de dar continuidad a las corrientes de tracción, que circulan por ambos carriles, se soluciona mediante la instalación de juntas inductivas.

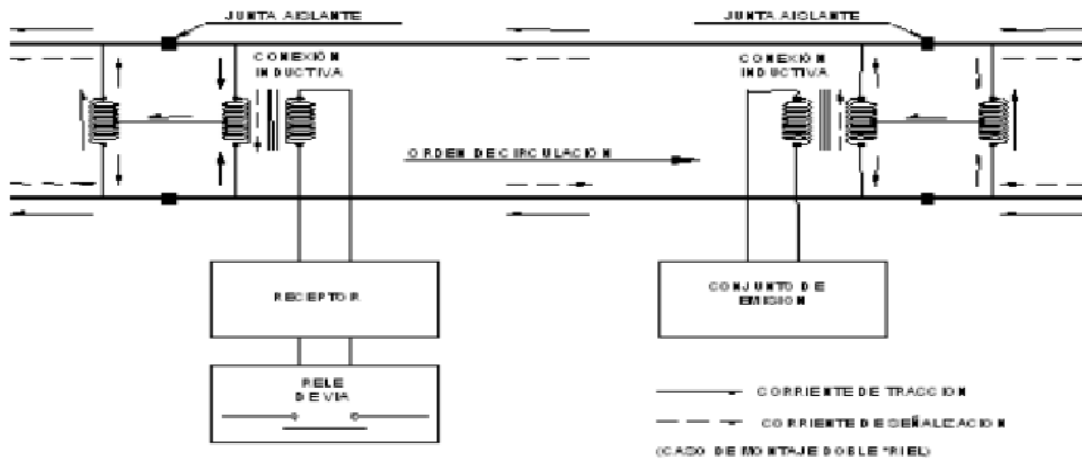


Fig. 15 Juntas aislantes y juntas inductivas en la frontera de CV.

Imagen: archivo Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

Las juntas inductivas están formadas por 2 semibobinas equilibradas eléctricamente. El devanado de cada semibobina está formado por 2 o 3 espiras, que producen un flujo magnético al ser recorridos por la corriente eléctrica.

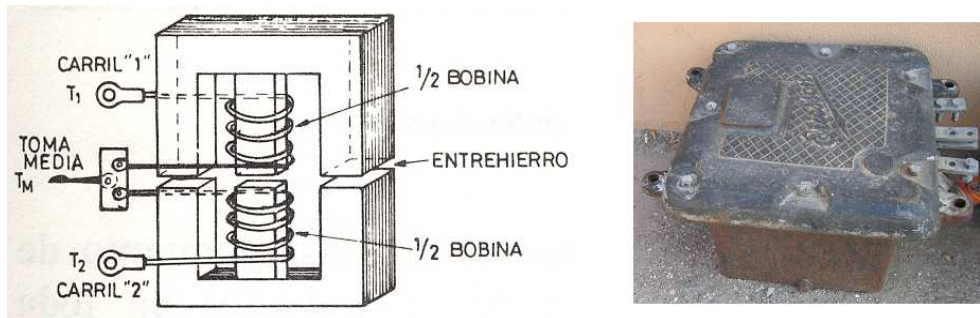


Fig. 16 Gráfico e imagen de la junta inductiva ERICSSON de L4 FMB.

Imagen: archivo Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

La bobina almacena energía eléctrica en forma de campo magnético cuando aumenta la intensidad de corriente, devolviéndola cuando ésta disminuye.

En corriente continua una bobina ideal se comportaría como un cortocircuito, ya que al ser la intensidad constante, no habría autoinducción de ninguna fuerza electromotriz. Pero si hablamos de una bobina real, para la corriente continua (1200 Vdc) ésta se comporta como una resistencia cuyo valor R_L será el de su devanado. En este caso, el devanado amplio en su diámetro de 2 o 3 espiras equivale a una R_L del orden de $0,001 \Omega$ para las corrientes de tracción (en juntas inductivas de 1000 A), una resistencia muy baja que permite la circulación de la corriente de tracción.

Es necesario señalar que con el reparto equilibrado de la corriente de tracción por ambos carriles, las tensiones entre 1 y 2 (ver figura 17) son prácticamente nulas, ya que los flujos producidos por cada semidevanado son opuestos y originan un flujo resultante nulo.

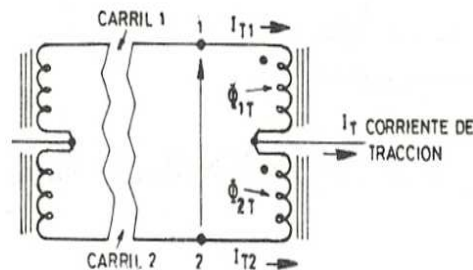


Fig. 17 Reparto equilibrado de corrientes de tracción en junta inductiva.

Imagen: archivo Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

El comportamiento de la bobina en corriente alterna es diferente. Al variar el sentido de la corriente, también el flujo magnético inducido en la bobina variará con el tiempo y, según la Ley de Faraday, en cada espira se generará una fuerza electromotriz de autoinducción que, según la Ley de Lenz, tenderá a oponerse a la causa que la produce, es decir, a la variación de corriente eléctrica que genera dicho flujo magnético (fuerza contraelectromotriz).

La bobina presentará oposición al paso de la corriente eléctrica (reactancia inductiva electromagnética) mediante autoinducción en sus extremos de una tensión opuesta a la tensión aplicada, al menos durante unos instantes. Ello provoca que no pueda circular corriente libremente. Cuanto mayor sea la velocidad de variación de la tensión aplicada mayor valor tendrá la tensión inducida en la bobina y, consecuentemente, menor corriente podrá circular por ella. Así, a mayor frecuencia de la tensión aplicada mayor será la reactancia de la bobina y, a la inversa, a menor frecuencia de la tensión aplicada menor será la reactancia de la bobina.

Así, para las corrientes alternas que circulan por el CV, una bobina ideal ofrecería una resistencia al paso de la corriente, la llamada reactancia inductiva (X_L), cuyo valor viene dado por la expresión:

$$X_L = j\omega L$$

siendo las fórmulas para la pulsación (ω) y la inductancia⁵ (L):

$$\omega = 2\pi f \quad L = \frac{\Phi N}{I}$$

Dado que es difícil medir el flujo magnético (Φ), se suele utilizar otra definición para la L , en función del voltaje (V_L) inducido en el conductor por la variación del flujo:

$$V_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Aunque la junta inductiva no se comporta como una bobina ideal, sí resulta un filtro eficaz para las corrientes de detección ($f=50$ Hz) y de ATP ($f_A=1365$ Hz y $f_B=1953$ Hz), evitando que se propaguen hacia los CV contiguos.

En el caso de la señal de detección, a la resistencia que presentan las bobinas se le añade además un circuito LC o circuito resonante⁶ sintonizado a 50 Hz. De esta manera se aumenta la impedancia Z_{1-2} y se potencia la frecuencia de funcionamiento de detección en el CV, que es la que interesa dentro del espectro, despreciando las demás corrientes parásitas.

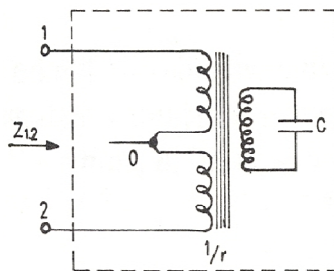


Fig. 18 Junta inductiva resonante.

Imagen: archivo Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

⁵ Inductancia: medida de la oposición a un cambio de corriente de un inductor o bobina que almacena energía en presencia de un campo magnético y que se define como la relación entre flujo magnético (Φ) y la intensidad de corriente eléctrica (I) que circula por la bobina y el nº de vueltas del devanado. La inductancia depende de las características físicas del conductor y de la longitud del mismo. Si se enrolla un conductor, y se aumenta el nº de espiras, la inductancia aumenta. Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Inductancia>.

⁶ Un circuito resonante o LC está formado por una bobina y un condensador en paralelo, donde existe una frecuencia, llamada de resonancia, para la que la reactancia inductiva es igual a la capacitiva ($X_C = X_L$). La impedancia es mínima, reduciéndose a la óhmica, y se dice que el circuito está en fase. Este fenómeno se debe a que durante la primera mitad de un ciclo de entrada el inductor absorbe toda la energía liberada por el condensador, y durante la segunda mitad del ciclo el condensador vuelve a capturar la energía del inductor. Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_LC.

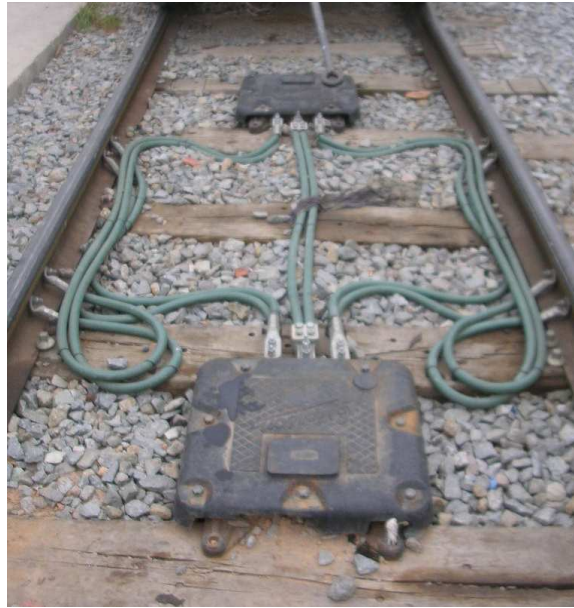


Fig. 19 Juntas inductivas y cableado en la frontera entre CV.

Imagen: maqueta CV ERICSSON instalado en vía de prueba. Oficina técnica de Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

4.3.1.2 Tecnología DIMETRONIC L2 FMB

El CV instalado en L2 de Metro de Barcelona es el modelo CVSJ⁷ FS2550 de tecnología DIMETRONIC, más moderno y con más prestaciones que el utilizado en Línea 4. Una característica importante del FS2550 es la capacidad de generar internamente ondas portadoras moduladas para codificar ATP, sin necesidad de fuentes externas. A pesar de ello, en el sistema de señalización de Línea 2, es una fuente externa la que genera las frecuencias moduladoras que llegan al TX. Existen dos tipos de CVSJ FS2550:

- Tipo 5k: utiliza 8 frecuencias portadoras entre 4080 Hz y 6000 Hz. Los TX pueden modularse interna o externamente, en el caso de L2 la entrada de las moduladoras proviene de la tarjeta TCOM en enclavamientos electrónicos WESTRACE⁸ o del módulo generador de códigos FST2500 en enclavamientos de cableado libre. Está instalado en vía principal, incluyendo andenes y estacionamientos.
- Tipo 2k: utiliza 4 frecuencias portadoras entre 1700 Hz y 2600 Hz. Los TX se modulan internamente con 4 frecuencias de modulación disponibles, lo que da un total de 16 canales. En L2 sólo se instala en zona de agujas, utilizando una única frecuencia moduladora interna de 15,6 Hz para la detección de ocupación. La transmisión de códigos ATP se realiza mediante la instalación de lazos paralelos a la vía con el sistema FS-5k (TCOM o FST2500).

El Relé de Vía (TR) permanece excitado, indicando CV libre, por la acción del campo magnético creado por el flujo de corriente en una bobina, igual que en la tecnología ERICSSON-DIMETRONIC descrita anteriormente. Se trata también del mismo tipo de relé, biestable o con función de enclavamiento.

⁷ CVSJ: Circuito de Vía Sin Juntas. La separación eléctrica entre CV contiguos se realiza mediante lazos de cortocircuito, sin necesidad de efectuar un corte físico en el carril.

⁸ WESTRACE: Westinghouse Train Radio and Advanced Control Equipment. Enclavamiento electrónico fabricado por DIMETRONIC.

No existen dos señales diferentes, una para la detección de ocupación, que mantiene excitado o desexcita el TR, y otra para el envío de códigos de velocidad a la vía; una única señal portadora identifica a cada CV y una moduladora, externa en el caso del 5k y de ambos tipos en el caso del 2k, se encarga de imprimir la información del estado libre u ocupado del mismo.

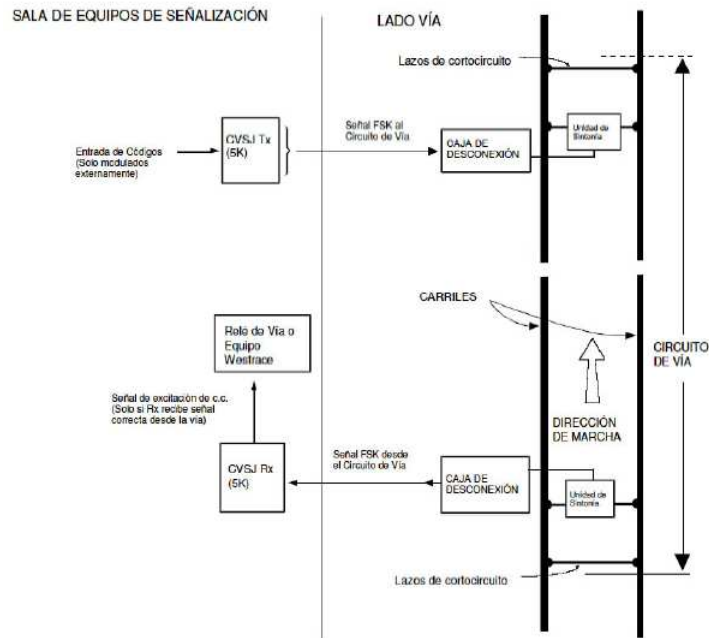


Fig. 20 Elementos del CVSJ FS2550 tipo 5k en sala de enclavamiento y vía.

Imagen: Curso circuitos de vía sin juntas FS-2k y FS-5k para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A. Marzo de 2007.

Cada TX genera una señal portadora modulada que alimenta a los carriles en el extremo del CV para proporcionar una señal de vía libre al RX. En el FS-5k hay 8 versiones diferentes de TX, con 8 frecuencias portadoras asociadas en pasos de 240 Hz, tal como se muestra en la tabla 1. La frecuencia portadora es única para cada TX, que admite todas las moduladoras disponibles desde la fuente externa. El canal L se utiliza únicamente para el ATP en zona de agujas y cruzamientos, no hay RX para el canal L.

PORTADORA	FRECUENCIA (Hz)	IDENTIFICACIÓN
P1	4080	V
P2	4320	K
P3	4560	W
P4	4800	L
P5	5040	X
P6	5280	M
P7	5520	Y
P8	6000	Z

Tabla 1 Frecuencias portadoras CVSJ FS2550 tipo 5k.

Imagen: elaboración propia.

A partir de una entrada de tensión de 220 Vac o 110 Vac, dos rectificadores internos suministran alimentación a los circuitos del equipo transmisor. Una señal FSK es generada mediante dos osciladores de cristal de alta frecuencia, alternando sus salidas con la frecuencia de modulación que proviene de la TCOM o FST2500.



Fig. 21 Transmisor CVSJ FS2550 de DIMETRONIC.

Imagen: Sistema de circuitos de vía FS2550. Descripción del equipo. DIMETRONIC S.A. Ed. 4. Mayo 1999.

Los objetivos de modular la señal por desplazamiento de frecuencia o FSK (Frequency Shift Keying) son análogos a los descritos para la modulación ASK utilizados en la tecnología ERICSSON-DIMETRONIC de L4: facilitar la propagación de la señal, tener un control sobre la misma, protegerla de ruidos e interferencias y distribuir canales a cada información distinta.

En FSK la señal moduladora también es digital, como en ASK, pero en este caso el elemento modificado en la portadora es la frecuencia en lugar de la amplitud. Los dos valores binarios se representan con dos frecuencias diferentes (f_1 y f_2) próximas a la frecuencia de la señal portadora f_p . Generalmente f_1 y f_2 corresponden a desplazamientos de igual magnitud pero en sentidos opuestos de la frecuencia de la señal portadora ($f_1=f_p+\Delta f$ si el bit a transmitir es el 1 y $f_2=f_p-\Delta f$ si el bit a transmitir es el 0).

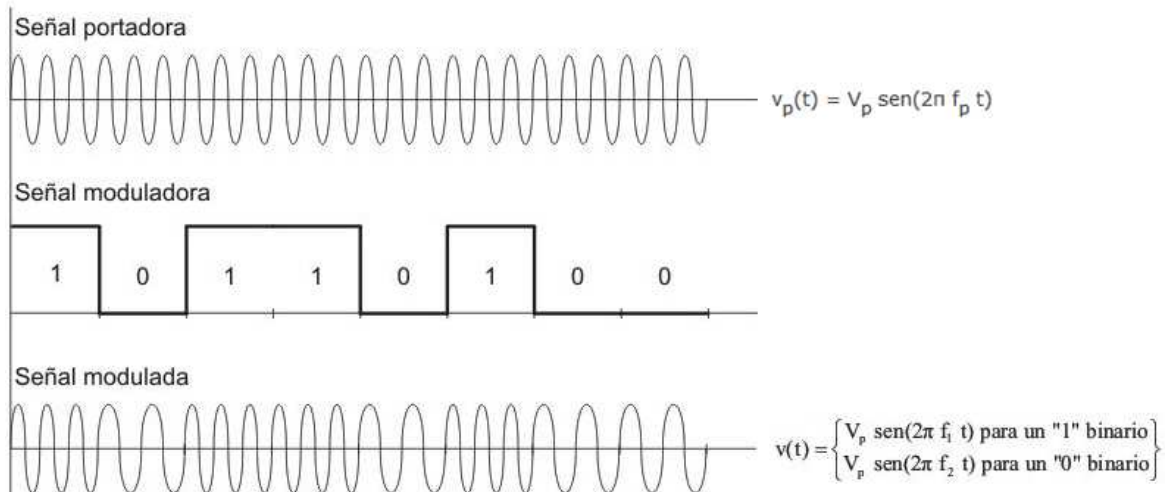


Fig. 22 Ecuaciones y representación gráfica de la modulación FSK.

Imagen: <http://www.textoscientificos.com/redes/modulacion/fsk>.

La principal ventaja de FSK frente a ASK es que a la modulación FSK no le afecta el ruido aditivo del canal, dado que la señal modulada codifica la información con los cambios de frecuencia, es decir, el receptor sólo tiene que contar el número de cruces por cero de la señal que recibe. Por tanto, suprime el ruido simplemente recortando la amplitud de la señal FSK, sin que ello afecte a la información.

La señal FSK se toma, de una doble "máquina de estado" implementada en una EPROM, la cual es esencialmente un dispositivo de dos canales, conectado en cruz. La salida de las dos máquinas de estado depende la una de la otra, estando configuradas así por motivos de seguridad intrínseca. La máquina de estado proporciona una salida si recibe una entrada aceptable. Las entradas requeridas son:

- La correcta señal FSK.
- Una dirección de entrada correcta dentro de un nivel específico de los dos canales de entrada. Las direcciones dentro de este nivel se producen desde una muestra de la señal de salida. Hay arrollamientos en el transformador de salida que proporcionan diversas muestras de la señal de salida, siendo ésta rectificada en sincronía y luego convertida a formato digital.
- No se detecta extracorrientes. Un sensor de corriente en el semi-puente MOSFET muestrea la corriente de salida y proporciona una señal de extracorriente si se detecta un fallo o sobrecarga.

Si la máquina de estado recibe entradas válidas, se producen salidas de onda cuadrada en contrafase. Estas salidas son un producto del nivel de dirección interpretada y de la señal del reloj patrón.

Si la máquina de estado falla al detectar direcciones de entrada válidas, entonces la salida del TX se queda permanentemente apagada. Si se detecta una condición de extracorriente, la salida se anula temporalmente.

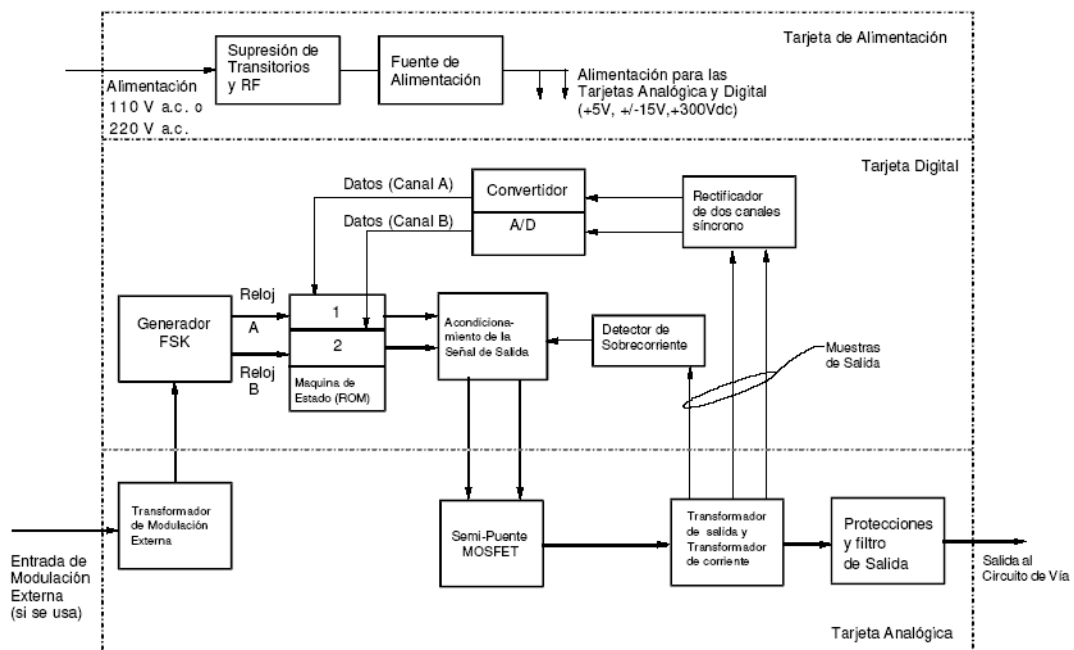


Fig. 23 Diagrama de bloques del TX FS2550.

Imagen: Sistema de circuitos de vía FS2550. Descripción del equipo. DIMETRONIC S.A. Ed. 4. Mayo 1999.

En Línea 2 existen enclavamientos de tipo electrónico WESTRACE y enclavamientos de cableado libre, que coexisten controlando zonas geográficas adyacentes. En los primeros, la fuente de modulación externa es el módulo de salidas de códigos de vía o Track Code Output Module (TCOM). Se alimenta a 24 Vdc a través de los rectificadores del enclavamiento WESTRACE, que admite 19 TCOM como máximo. La entrada al TX se hace a través de un transformador acoplado de la tarjeta analógica al generador FSK de la tarjeta digital. La fuente de modulación interna no se instala, dado que no se utiliza.

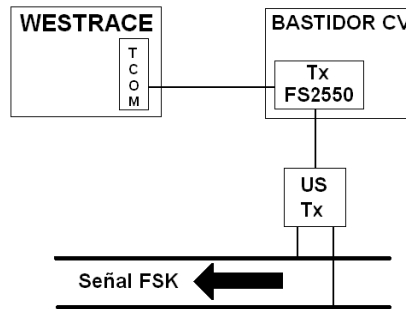


Fig. 24 Conexión de fuente de modulación externa TCOM en TX FS2550.

Imagen: elaboración propia.

La TCOM genera una señal portadora de 2000 Hz que se modula en ASK con 14 frecuencias moduladoras, en pasos de 4 Hz. El TX se encarga de eliminar la portadora y utilizar la moduladora para modular, valga la redundancia, en FSK la señal que se va a enviar a vía. La frecuencia de 80 Hz se utiliza por defecto para la detección de ocupación y será interpretada por el tren como un código 0/0, aplicando el correspondiente frenado de emergencia.

MODULADORA	FRECUENCIA (Hz)	CÓDIGO ATP (km/h)
M1	28	70/70
M2	32	70/50
M3	36	50/50
M4	40	50/45
M5	44	50/0
M6	48	45/45
M7	52	45/35
M8	56	45/0
M9	60	35/35
M10	64	35/25
M11	68	35/0
M12	72	25/25
M13	76	25/0
M14	80	0/0

Tabla 2 Frecuencias moduladoras proporcionadas por la TCOM.

Imagen: elaboración propia.

En los enclavamientos de cableado libre, la fuente de modulación externa es el Módulo Generador de Códigos o Code Generator Module (CGM). El CGM FST2500 es un módulo que se alimenta a 8-30 Vdc desde el rectificador que tiene en su propio bastidor. Cada módulo es el encargado de generar una frecuencia determinada, las mismas que genera la TCOM. En la figura 25 se muestran los CGM de 40 Hz, 36 Hz, 32 Hz y 28 Hz en el enclavamiento de Paseo de Gracia de Línea 2 de Metro de Barcelona.



Fig. 25 Fuente de alimentación y Generadores de ATP FST2500 en Paseo de Gracia L2.

Imagen: elaboración propia.

Por último, la señal de salida del semi-puente MOSFET se hace a través de un transformador acoplado a la carga por medio de circuitos de protección y filtro de la salida. El nivel de la señal en la salida hacia la vía puede ajustarse seleccionando la toma apropiada del transformador, insertando o quitando puentes en el conector de salida en la base de montaje del TX.

El objetivo del RX es el de llevar a cabo una serie de comprobaciones en la señal de entrada que se ha tomado de los carriles. Cada RX del tipo 5k está diseñado para aceptar un canal como los definidos en la tabla 2. Si se encuentra que la señal es correcta en todo, entonces el RX proporciona una salida que se usa para excitar el TR o actuar directamente sobre el WESTRACE. Si un tren penetra en el CV, la señal desde el TX se shunta por los ejes del tren y el RX no es capaz de detectar la señal del TX. El RX no proporciona salida, lo que significa que el TR se desexcita y que no se enviará al WESTRACE señal de vía libre.

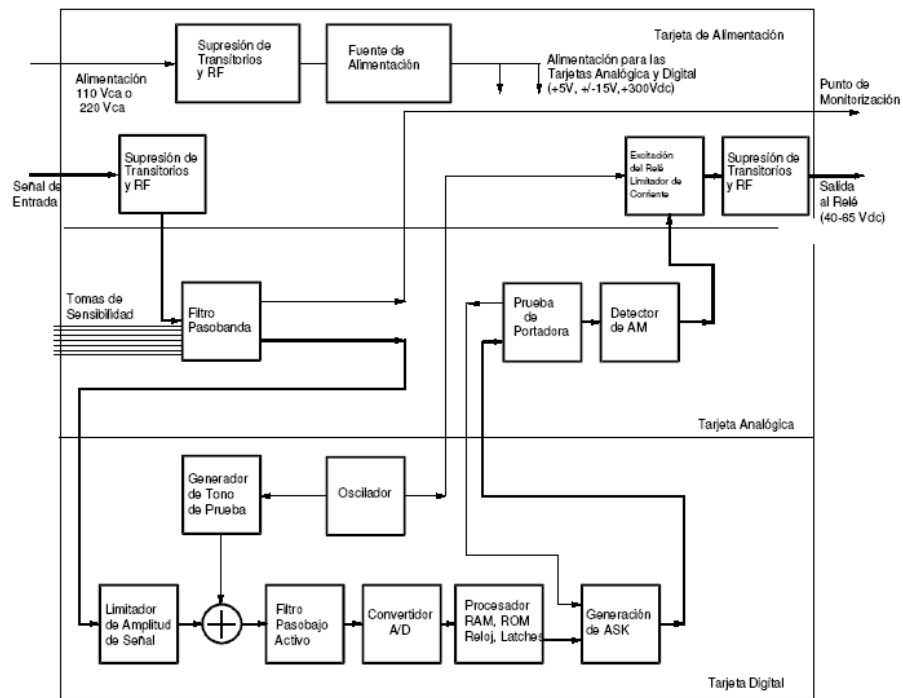


Fig. 26 Diagrama de bloques del RX FS2550.

Imagen: Sistema de circuitos de vía FS2550. Descripción del equipo. DIMETRONIC S.A. Ed. 4. Mayo 1999.

La alimentación del RX se consigue a partir de dos rectificadores internos con entrada de 110 Vac. La señal de entrada desde la vía pasa por un filtro paso banda que deja pasar la portadora y las bandas laterales de modulación fundamental, de 80 Hz para la detección con CV libre, atenuando las señales fuera de banda. El nivel de la señal se ajusta al establecer la sensibilidad del RX seleccionando las tomas apropiadas del transformador, insertando o quitando puentes en el conector de salida en la base de montaje de RX. La señal resultante se presenta en los terminales del punto de monitorización y se pasa al circuito de limitación de amplitud de señal en la tarjeta digital.

El proceso de limitación de amplitud de la señal continúa añadiéndose a dicha señal un tono de prueba que pasa por un filtro activo paso bajo. Este deja pasar la portadora de RX y las frecuencias del tono de prueba mientras proporciona la atenuación adecuada a los posibles armónicos de señal.

Con la conversión de analógico a digital, la señal compuesta se analiza para probar el nivel del tono de prueba y la amplitud e integridad de la portadora y bandas laterales de la señal en la sección del procesador. Si el tono de prueba está fuera de límites, el procesador se engancha, no dando salida de modo permanente. Sin embargo, si el tono de prueba está dentro de límites, el procesador proporciona una señal de salida. Esta señal puede ser o bien una portadora continua o una portadora modulada de defasaje de amplitud (ASK) dependiendo de la validez de la señal de entrada, tal como se ilustra en la figura 27.

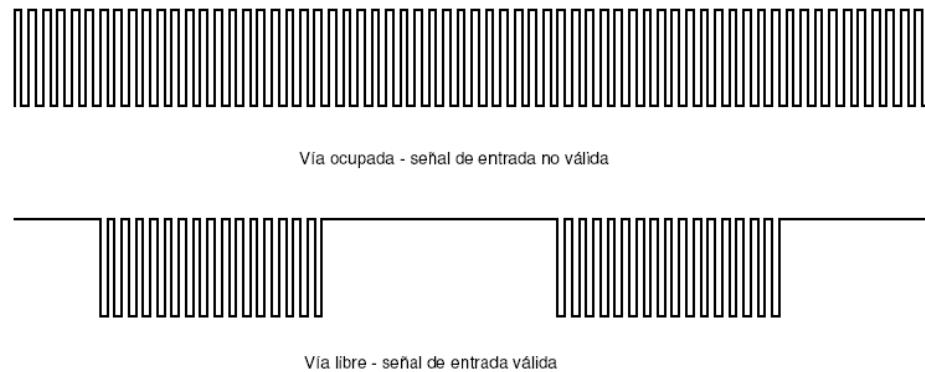


Fig. 27 Señales de salida del procesador en tarjeta digital de RX.

Imagen: elaboración propia.

En tanto en cuanto una de las señales que se muestran en la figura 27 está presente, se mantienen tanto la generación de ASK como las secciones de prueba de portadora. Si el componente de portadora es inadecuado, se inhibe la generación de ASK.

La señal ASK del procesador pasa a un detector de modulación de amplitud (AM). Si se detecta AM, una señal válida pasa al circuito de excitación del TR. La salida de RX es una tensión de 40-65 Vdc., generada por la rectificación de la señal del oscilador. Cuando la excitación del relé se produce, esta tensión pasa a través de un circuito de filtro al TR o al WESTRACE. La excitación del relé también incluye circuito de limitación de corriente para protegerlo del exceso de carga de salida.

Tomemos como ejemplo un CV cuya portadora asignada es K (4320 Hz) y su moduladora cuando se activa el envío de códigos ATP es M12 (72 Hz). En situación normal, el TX genera la señal K y la modula en FSK con la M14 (80 Hz) que le llega desde la fuente externa. La señal portadora modulada se envía hacia la unidad de sintonía o Tuning Unit (TU) ubicada en el lado de transmisión de vía general, recorriendo los carriles hasta llegar a la TU de recogida. Desde ésta se devuelve al RX, donde se realizan las comprobaciones anteriormente descritas para proporcionar la salida que ha de mantener excitado el TR.

Cuando un tren penetra en el CV y cortocircuita los carriles, el RX detecta una ausencia de tensión que provoca una señal portadora continua en la salida del procesador, implicando la desexcitación del TR e indicando la ocupación del CV al enclavamiento.

El enclavamiento es el encargado de activar el cambio en la entrada del TX de la señal moduladora M14 (80 Hz) a la M12 (72 Hz) desde la TCOM o CGM FST2500, permitiendo el envío de los códigos de velocidad máxima. Para ello, se deberán cumplir dos condiciones:

- El enclavamiento ha establecido un itinerario por ese CV.
- El enclavamiento recibe la señal del TR indicando una ocupación en dicho CV o en el inmediatamente anterior según el sentido de la marcha.

En el momento en que se dan ambas condiciones, el TX activa el envío de la señal portadora K pero esta vez modulada a M12, lo cual permitirá al tren la circulación mediante la lectura de la señal por la antena de tren. El equipo ATP embarcado, convenientemente programado, interpretará la señal K/M12 como una VMAX de 25 km/h y una VOBJ igualmente de 25 km/h. También podría darse el caso de que por condiciones de señalización, por ejemplo la circulación de otro tren por delante, la moduladora fuera M13 (76 Hz) y por tanto el código fuera 25/0.

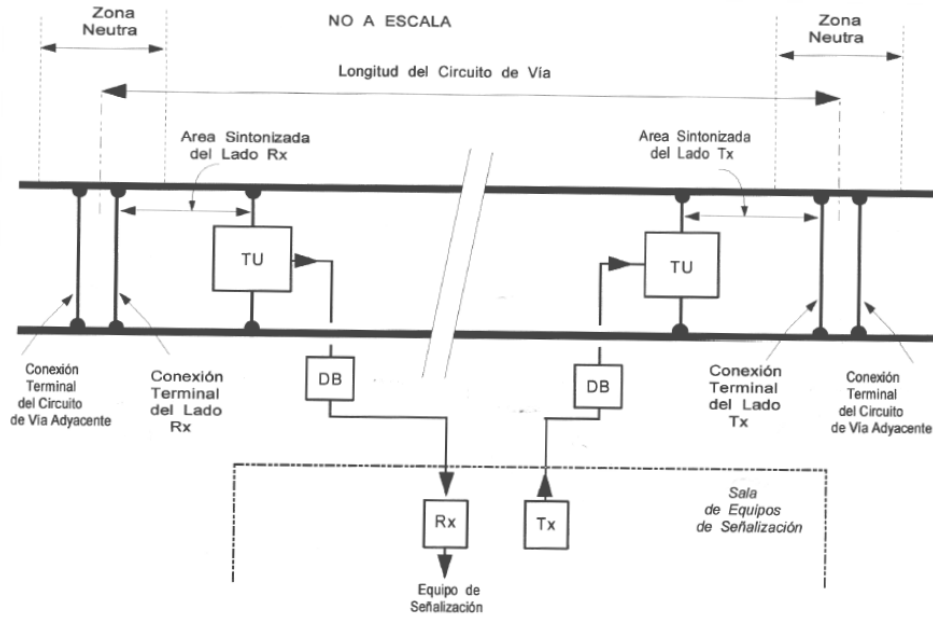


Fig. 28 Esquema general de conexionado del CVSJ FS-5k.

Imagen: Sistema de circuitos de vía FS2550. Descripción del equipo. DIMETRONIC S.A. Ed. 4 Mayo 1999.

El FS-2k es el modelo utilizado para señalar las zonas de agujas y cruzamientos. El funcionamiento es similar al descrito para el FS-5k, el TX genera una señal portadora modulada que alimenta a los carriles en el extremo del CV para proporcionar una señal de vía libre al RX. El RX lleva a cabo una serie de comprobaciones en la señal de entrada que se ha tomado de los carriles y envía la señal necesaria para excitar el TR, que de no recibirla, se mantiene desexcitado indicando vía ocupada.

La característica principal del FS-2k es que sólo permite la modulación interna, teniendo 4 frecuencias portadoras en pasos de 240 Hz, y 4 moduladoras en pasos de 2,4 Hz, lo que da un total de 16 canales disponibles. En cualquier caso, en el sistema de señalización de L2 sólo se utilizan combinaciones de las portadoras 1 (1700 Hz) y 3 (2300 Hz) con la moduladora Q (15,6 Hz).

PORTADORA		MODULADORA	
FRECUENCIA (Hz)	IDENTIFICACIÓN	FRECUENCIA (Hz)	IDENTIFICACIÓN
1700	1	13,2	P
2000	2	15,6	Q
2300	3	18,0	R
2600	4	20,4	S

Tabla 3 Frecuencias portadoras y moduladoras CVSJ FS2550 tipo 2k.

Imagen: elaboración propia.

La detección de ocupación en la zona de vía desviada se divide en dos partes, incluyendo la superior en el CV de trayecto de vía 2⁹ y la inferior en el CV de trayecto de vía 1, tal como se muestra en la figura 29.

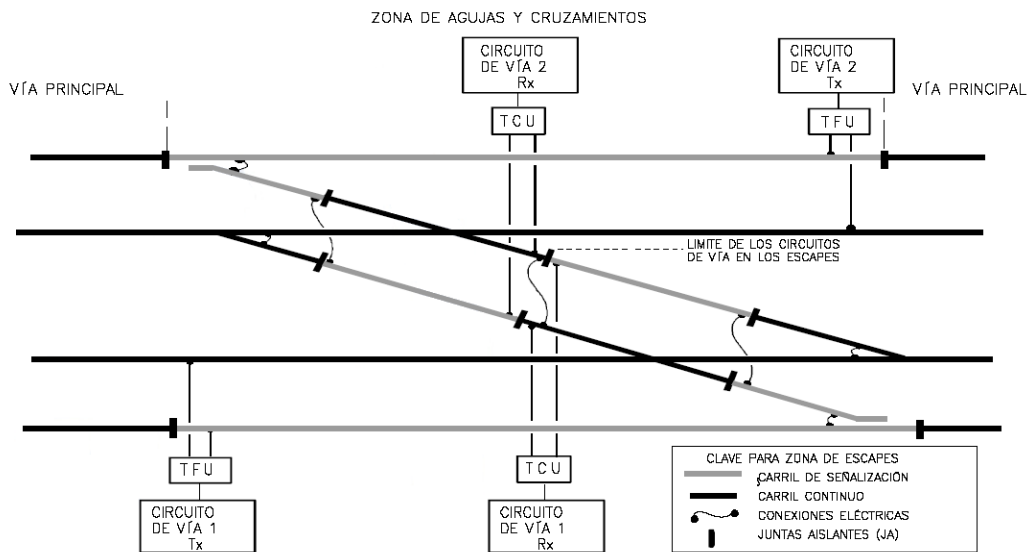


Fig. 29 Esquema general de conexionado del CVSJ FS-2k.

Imagen: Curso circuitos de vía sin juntas FS-2k y FS-5k para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A. Marzo 2007.

La transmisión de los códigos ATP se realiza a través de lazos específicos instalados en paralelo a la vía, tanto en el tramo recto como en el desviado. La alimentación de dichos lazos proporciona un FS-5k asociados al circuito de agujas únicamente para el envío de la señal de ATP. El tramo recto tendrá asignada su correspondiente portadora y moduladora para los códigos de velocidad en recta y el tramo desviado tendrá siempre asignada la portadora L (4800 Hz) y, en el caso de Metro de Barcelona, la moduladora M12 (72 Hz) debido a la limitación de 30 km/h en la circulación por agujas y desvíos.

Siguiendo con un ejemplo análogo al caso del FS-5k, imaginemos un CV de agujas FS-2k en V1 que se encuentra desocupado de tren, véase figura 29. El TX genera una señal compuesta por la portadora 1 (1700 Hz) modulada internamente en FSK con la Q (15,6 Hz). La señal portadora modulada se envía hacia la unidad de alimentación de vía o Track Feed Unit (TFU) ubicada en el lado de transmisión del CV, recorriendo los carriles en recto y el tramo en desviada, impidiéndose el paso de la señal por las juntas aislantes en un carril. Cuando ésta llega a la unidad de conexión de vía o Track Connect Unit (TCU) se devuelve al RX, donde se realizan las comprobaciones necesarias para proporcionar la salida que ha de mantener excitado el TR.

En el momento que un tren penetra en el CV y shunta los carriles, el RX detecta una ausencia de tensión que provoca una señal portadora continua en la salida del procesador, implicando la desexcitación del TR e indicando la ocupación del CV al enclavamiento.

Entonces el enclavamiento activará el envío de la señal de ATP, no desde el TX FS-2k sino desde el TX FS-5k asociado al CV únicamente para dicha función. El envío de unos u otros códigos de velocidad dependen del itinerario que se haya establecido, si es en recta o en desviada.

⁹ En la nomenclatura de vías de la red de Metro de Barcelona nos referimos a vía 1 (V1) cuando el sentido de la marcha del tren va de izquierda a derecha o de mar a montaña y a vía 2 (V2) al contrario.

En cualquier caso, para que se active el envío de la señal ATP es imprescindible que se cumplan las dos condiciones ya conocidas:

- El enclavamiento ha establecido un itinerario por ese CV, moviendo y enclavando la aguja mediante el motor del accionamiento si el itinerario es a la desviada.
- El enclavamiento recibe la señal del TR indicando una ocupación en dicho CV o en el inmediatamente anterior según el sentido de la marcha.

En el momento en que se cumplan ambas condiciones, el TX activa el envío de la señal portadora modulada en FSK. La moduladora proviene de la fuente externa, TCOM o CGM FST2500, y será una u otra dependiendo si el itinerario es a la recta o a la desviada. Esta señal se transmitirá a través de los lazos en vía y será leída por la antena de tren, interpretándose como el código de velocidad correspondiente. Tomando como ejemplo la configuración de la figura 30, si se establece:

- Itinerario a la recta por V1: se enviará la portadora X (5040 Hz) modulada con M8 (56 Hz), permitiendo la circulación del tren en vía recta a una velocidad máxima de 45 km/h y velocidad objetivo de 25 km/h.
- Itinerario a la desviada con entrada desde V2: se enviará la portadora L (4800 Hz) modulada con M10 (64 Hz), permitiendo la circulación del tren por el desvío a una velocidad máxima de 35 km/h.

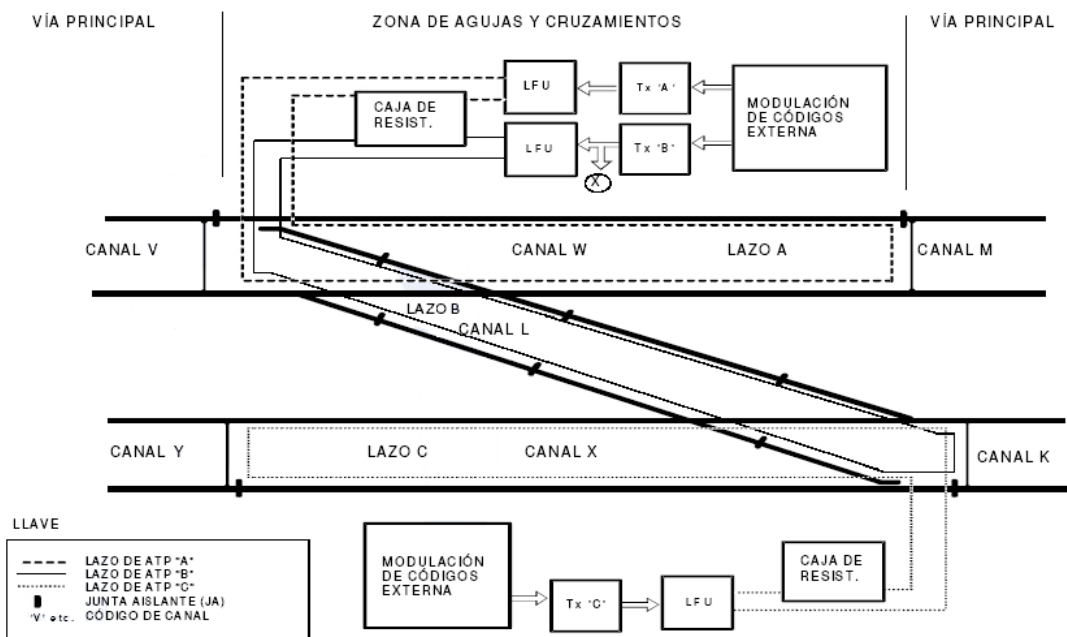


Fig. 30 Esquema de lazos ATP en zona de agujas.

Imagen: Curso circuitos de vía sin juntas FS-2k y FS-5k para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A. Marzo 2007.

Hemos visto que tanto el FS-5k como el FS-2k están constantemente intercambiando señales con el tramo de vía seccionado, bidireccionalmente para la detección de ocupación y unidireccionalmente para el envío de códigos de velocidad. Los cables eléctricos desde TX y RX, situados en sala de enclavamiento, se tienden por el hastial de túnel hasta los extremos de alimentación y recogida en los carriles del CV. Pero la conexión en dichos extremos no es directa, es necesaria la instalación de unos dispositivos adaptadores.

El dispositivo adaptador que se utiliza en los CV FS-5k de L2 es la unidad de sintonía o Tuning Unit (TU), que cumple tres funciones principales:

- Forma parte de la zona de terminación, espacio que queda entre la TU y el primer lazo de cortocircuito.
- Proporciona los medios para conectar y relacionar los TX y RX a los carriles.
- Combinada con los carriles en la zona de terminación, actúa como un filtro paso banda selectivo eliminando los armónicos no deseados de la señal de salida del TX.

El transformador de la TU separa el TX (o RX) de la vía y adapta la alta impedancia del TX (o RX) y del cable a la baja impedancia del CV. Este transformador tiene una reactancia de bajas pérdidas de dispersión comparada con el resto del circuito y tiene un pequeño efecto ($<10\%$) en la sintonización del circuito a la frecuencia requerida. Los dos arrollamientos están separados por una pantalla. El condensador resuena con la inductancia de los carriles, los cables de conexión y los lazos de cortocircuito en la zona de terminación, formando un circuito sintonizado paralelo a la frecuencia del CV, como el de la figura 31. El circuito B-A-F-D-C aparece a la salida del TX o a la entrada del RX como un circuito sintonizado serie, pero considerado como parte del CV completo, actuando A-F-D-C como un circuito sintonizado paralelo.

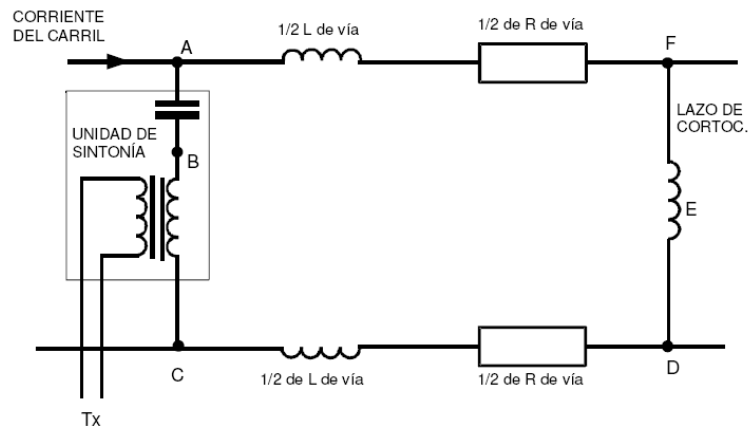


Fig. 31 Circuito equivalente TU FS-5k en la zona de terminación.

Imagen: Manual de Descripción del Sistema. Sección 1: Introducción. DIMETRONIC S.A. Ed. 4. Mayo 1999.

La separación eléctrica entre CV FS-5k queda garantizada mediante el circuito equivalente en la zona de terminación, sin necesidad de efectuar un corte físico en el carril. Fijémonos en el CV₁ de la figura 32, el TX₁ transmite la portadora V (4080 Hz) a los carriles mediante el interface que le proporciona la TU_{1A}, que combinada con los carriles y el lazo de cortocircuito, forman un circuito sintonizado a 4080 Hz. Pero si parte de la corriente se propagara hacia la zona de terminación 2B, el circuito equivalente formado por la TU_{2B}, los carriles y el lazo de cortocircuito, se encargará de filtrar la señal y evitar que se transmita hacia el RX₂, ya que está sintonizado a la frecuencia de 4560 Hz, correspondiente a la portadora W. Este proceso asegura que la excitación del TR₂ con CV₂ ocupado nunca se producirá con una corriente errática proveniente del CV₁.

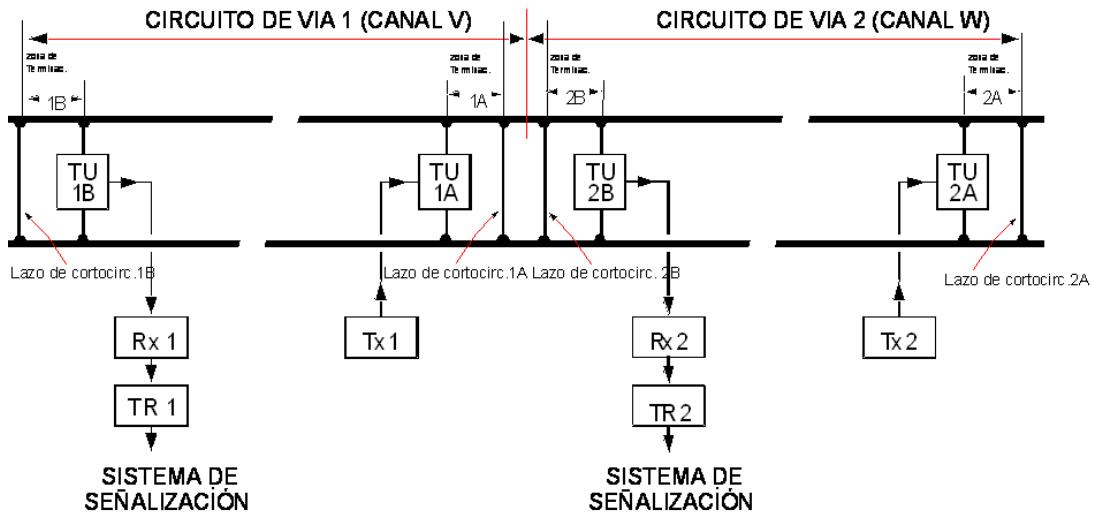


Fig. 32 Zona de sintonía en frontera de CV FS-5k.

Imagen: elaboración propia.

Para que la TU sea efectiva filtrando las portadoras que no corresponden al CV, es necesario que una misma portadora no coincida en dos CV contiguos. Para ello, se realiza una distribución alterna de canales dejando un espacio de 3 CV antes de repetir portadora, tal como se muestra en la figura 33. En vía 1 se utilizan los canales V, W y M y en vía 2 los Y, X y K, reservando el canal L para zona de agujas y cruzamientos.

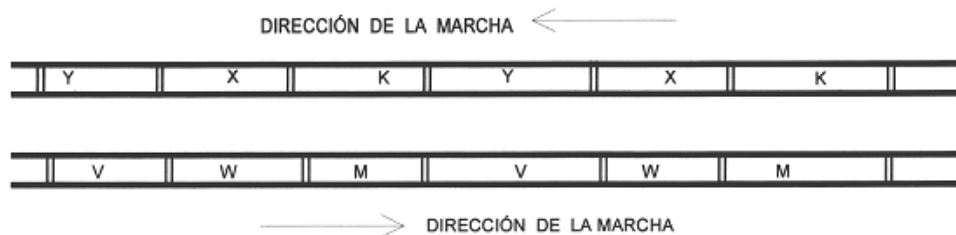


Fig. 33 Distribución de canales asignados a los circuitos de vía.

Imagen: elaboración propia.

El doble lazo de cortocircuito en la zona de terminación, además de absorber el paso de corriente entre los CV contiguos, satisface la necesidad de dar continuidad a las corrientes de tracción (1200 Vdc) que circulan por el carril. Esto es necesario para poder cerrar el circuito de tracción en la subcentral, ya que el carril es el polo negativo de dicho circuito que alimenta el motor eléctrico del tren.

En la zona de terminación, la localización exacta del tren desaparece debido a que el cortocircuito provocado por el eje del tren (tren-shunt) no es efectivo, estableciéndose una zona neutra entre las dos TU adyacentes.

En la figura 34 podemos ver la gráfica asociada al esquema de la figura 32, donde imaginamos la circulación de un tren sentido de izquierda a derecha. Una vez el primer eje sobrepasa la TU_{1A} la capacidad del eje de absorber la señal y shuntar los carriles disminuye hasta que en D_d no es capaz de evitar que la señal de la TU_{1A} (TX_1) llegue a la TU_{1B} (RX_1). Este hecho podría suponer un riesgo a nivel de seguridad, ya que el TR_1 debe mantenerse desexcitado indicando la ocupación del CV_1 y para ello el RX_1 no debe recibir un nivel mínimo de señal. El problema se solventa por la acción del resto de ejes del tren, que se encargan de shuntar la señal y evitar que llegue al RX_1 un nivel mínimo que pueda excitar el TR_1 .

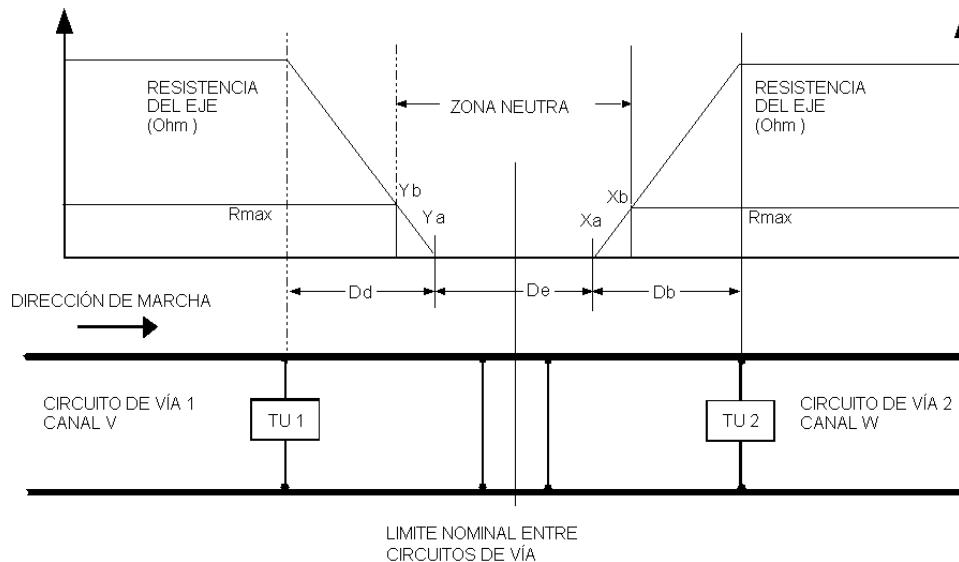


Fig. 34 Gráfica de la resistencia del tren-shunt respecto a la distancia.

Imagen: Curso circuitos de vía sin juntas FS-2k y FS-5k para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A. Marzo 2007.

El tren que circula en Línea 2 es el modelo S9000 fabricado por la empresa francesa ALSTOM. La longitud total de la unidad es de 86 metros y está compuesta por cuatro coches, cada uno de ellos con 4 ejes distribuidos en dos grupos de 2 ejes en los extremos, el primero de los cuales queda a 2,5 metros del final del coche. Por lo tanto, el hecho de que un eje entre en la zona neutra no supone ningún riesgo, puesto que el resto se encarga de shuntar los carriles.

La única casuística de indeterminación en la localización del tren se produce en el primer momento de las transiciones. Siguiendo con el ejemplo de la figura 34, cuando el tren abandona el CV_1 y entra en el CV_2 el último eje se sitúa un instante dentro de la zona neutra. El CV_1 entonces se libera aunque haya una mínima parte del tren, siempre menos de 2,5 m., que aún esté ocupándolo. En cualquier caso, no supone un riesgo para la seguridad porque el sistema ATP se encarga de enviar un código de velocidad 0/0 al CV_1 , el inmediatamente posterior del que está ocupado. Además, el itinerario no se destruirá hasta que no se haya completado la circulación del tren por todos los CV incluidos en él.

El mismo caso, pero a la inversa, ocurre cuando el primer eje del tren entra en el CV_2 . Durante un instante el RX_2 (TU_{2B}) sigue recibiendo nivel de señal del TX_2 (TU_{2A}) indicando que el CV_2 está liberado cuando en realidad la cabeza del tren ya ha penetrado en éste, siempre menos de 2,5 m. El tiempo que esto sucede es tan mínimo que no tiene apenas impacto en el error de localización del tren. Si imaginamos un tren a una velocidad de 45 km/h (12,5 m/s), el primer eje tardara en shuntar y provocar la ausencia de señal en el RX_2 (TU_{2B}) un tiempo de 0,2 segundos, provocando un error de localización despreciable. Por lo que respecta a la seguridad, ésta queda garantizada al estar el itinerario autorizado por el enclavamiento, asegurando que ningún vehículo está ocupando el CV_2 cuando el tren penetra en él.

La configuración de equipos en las zonas de agujas y cruzamientos es diferente. En dichas zonas se utiliza el FS-2k, que permite la instalación de diferentes dispositivos adaptadores en vía, incluyendo una TU especial para 2k. La TU FS-2k se utiliza cuando la separación eléctrica entre CV no requiere de juntas aislantes y puede ser de dos tipos: normal y central-extremo.

En configuraciones de aguja con doble lazo de cortocircuito, se utilizan dos TU FS-2k tipo normal, asociadas a dos RX diferentes y un único TX para la transmisión de la portadora, como muestra el esquema de la figura 35.

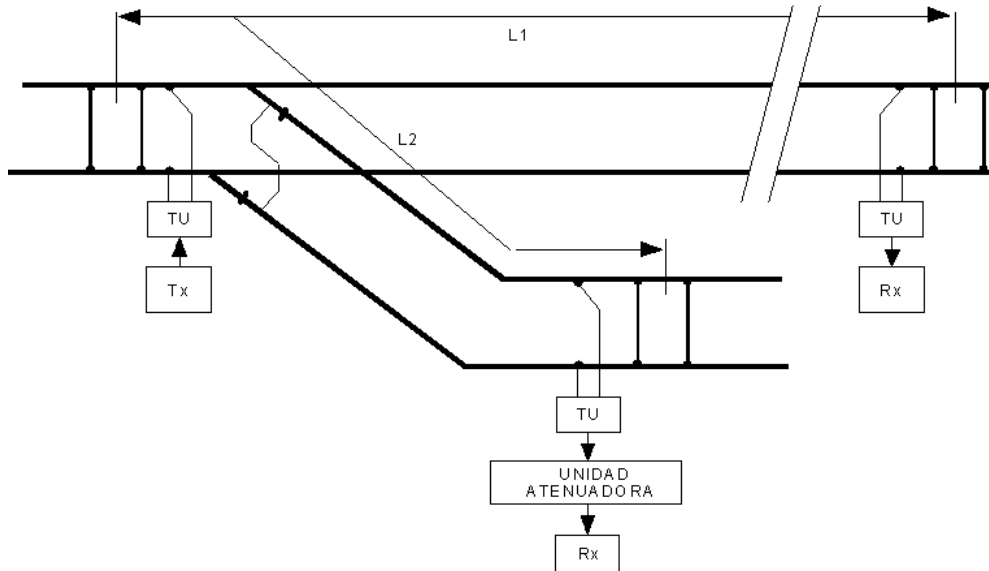


Fig. 35 Configuración de 2 RX para 1 TX con TU FS-2k tipo normal.

Imagen: Curso circuitos de vía sin juntas FS-2k y FS-5k para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A. Marzo 2007.

La TU FS-2k normal se encarga de adaptar la salida del TX a los carriles o la señal de los carriles al RX. En la figura 36 se muestra el diagrama eléctrico de la TU, donde el condensador C1 y la inductancia L, en paralelo con C2 y el transformador T, se sintonizan con la inductancia de los carriles en la zona de terminación, funcionando como un filtro paso banda para eliminar los armónicos no deseados de la señal del TX. C1 y L también forman un circuito sintonizado en serie que proporciona un paso de baja impedancia para las corrientes del canal.

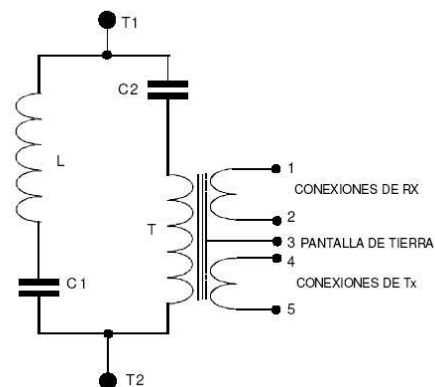


Fig. 36 Imagen y diagrama eléctrico de la TU FS-2k tipo normal.

Imagen: Manual de Descripción del Sistema. Sección 1: Introducción. DIMETRONIC S.A. Ed. 4. Mayo 1999.

La TU FS-2k tipo central-extremo emula una zona de terminación completa, al realizar la misma función que se haría con las dos TU y las dos longitudes de carril que normalmente se utilizarían en dicha zona. Se utiliza en los siguientes casos:

- Para conectar el TX en CV con alimentación central.
- Donde termina un CV FS-2k y empieza un CV de otro tipo.
- Cuando no se instalan los lazos de cortocircuito o la longitud de carril no es suficiente para poder sintonizar el circuito a la frecuencia requerida.

Hay cuatro versiones de TU central-extremo que se corresponden con los 4 canales disponibles. Los componentes son de diferente valor y tienen una pequeña diferencia en la configuración bien sea para los canales 1 y 2 o 3 y 4. La figura 37 muestra dos diagramas eléctricos, equivalentes a una zona de terminación completa, con 2 o 3 ramas del circuito en paralelo dependiendo el canal. Estos circuitos actúan también como un filtro paso banda para eliminar los armónicos no deseados de la señal del TX.

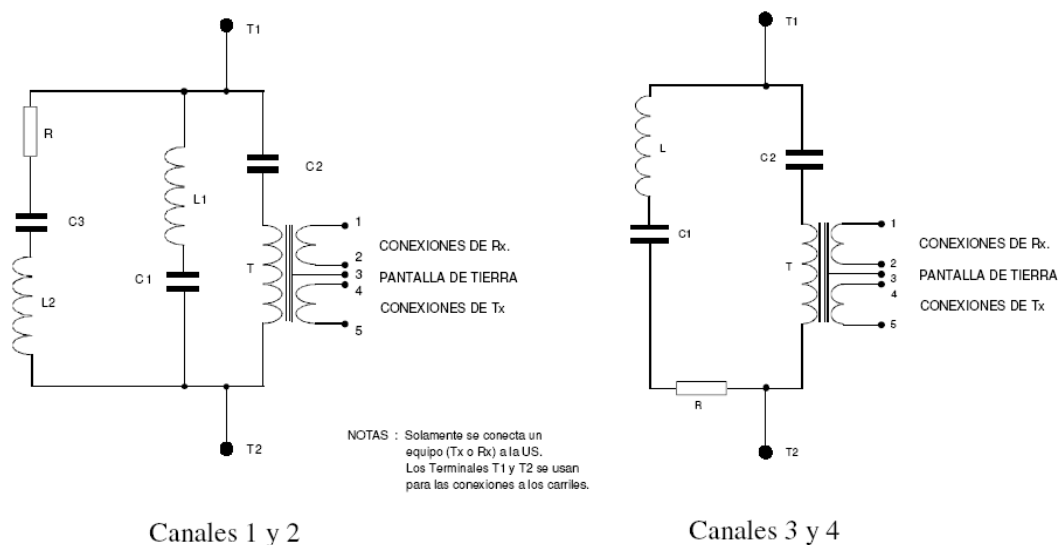


Fig. 37 Diagramas eléctrico de la TU FS-2k tipo central-extremo.

Imagen: Manual de Descripción del Sistema. Sección 1: Introducción. DIMETRONIC S.A. Ed. 4. Mayo 1999.

Cuando el desvío está delimitado por juntas aislantes, o sea mediante un corte del carril que delimita el CV de trayecto del CV de agujas¹⁰, se utilizan otro tipo de dispositivos adaptadores FS-2k. El enlace del TX con los carriles se hace mediante la unidad de alimentación de vía o Track Feed Unit (TFU) y el del RX con la unidad de conexión de vía o Track Connect Unit (TCU).

La TFU proporciona el interface entre los carriles y el TX en zona de agujas, adaptando la impedancia de conexión a la vía y filtrando los armónicos no deseados de la señal de salida del TX. La unidad no tiene frecuencia específica y funciona en todas las frecuencias del CV entre 1700 Khz y 2600 Hz. En la figura 38 se muestra el diagrama eléctrico de la TFU, donde un transformador se encarga de reducir el voltaje de la señal del TX a un nivel bajo, adecuado para alimentar los carriles. El propósito de la resistencia es limitar la corriente de salida cuando se ocupa el CV. La inductancia y el condensador forman un filtro paso banda para el paso del nivel de frecuencia entre 1700 Hz y 2600 Hz, que suprime los armónicos de la salida del TX evitando así interferencias con las señales de ATP.

¹⁰ Cuando se utilizan juntas aislantes, un carril queda interrumpido físicamente pero en el otro no se efectúa ningún corte, pues es necesario que sea continuo para el retorno de la corriente de tracción (1200 Vdc).

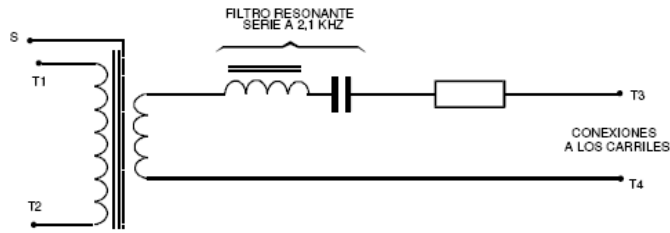


Fig. 38 Diagrama eléctrico de la TFU FS-2k.

Imagen: Manual de Descripción del Sistema. Sección 1: Introducción. DIMETRONIC S.A. Ed. 4. Mayo 1999.

La TCU proporciona el interface entre los carriles y el RX en zona de agujas. La conexión de la TCU con los carriles se ha de realizar a 0,5 m. de la junta aislante, el otro carril es continuo para el retorno de tracción. Igual que la TFU, la unidad es válida para todas las frecuencias del CV entre 1700 Hz y 2600 Hz. En la figura 39 se muestra el diagrama eléctrico de la TCU, donde el valor de la resistencia ha de ser bajo para no disipar demasiada potencia de la señal del CV. El condensador en serie bloquea la corriente continua de tracción y su valor es suficientemente grande para evitar un incremento significativo en la salida de la unidad en caso de cortocircuito.

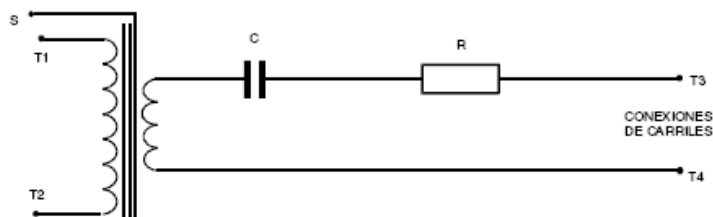


Fig. 39 Diagrama eléctrico de la TCU FS-2k.

Imagen: Manual de Descripción del Sistema. Sección 1: Introducción. DIMETRONIC S.A. Ed. 4. Mayo 1999.

Por lo que respecta a la señal ATP proporcionada por el TX FS-5k en la zona de agujas, se utiliza la unidad de alimentación de lazo o Loop Feed Unit (LFU) como interface entre el lazo y el TX. Se instala junto a la caja de resistencias, aunque están físicamente separadas debido a que el calor de las resistencias podría tener un efecto adverso sobre los componentes de la LFU. La unidad tiene tres funciones principales:

- Proporcionar un medio de conectar el TX FS-5k a un lazo de ATP en zona de agujas.
- Compensar parcialmente la inductancia del lazo de ATP.
- Proporcionar un medio de ajustar la corriente del lazo de ATP.

La LFU no tiene una frecuencia específica y funciona en todas las frecuencias entre 4000 Hz y 7000 Hz. La figura 40 muestra el diagrama eléctrico de la LFU, que se compone de un transformador y condensadores para adaptar la salida del TX al lazo. Existen puentes de ajuste en el secundario para permitir que la corriente del lazo se establezca al menos en 1 A, tanto para lazos cortos como largos. Este ajuste evita niveles exageradamente altos de la corriente del lazo, lo cual limita el acoplamiento de las corrientes de ATP entre los carriles que pueden producir diafonías. Los cuatro condensadores tienen el mismo valor, por lo cual si se cambia los puentes desde E-F a E-G se reduce a la mitad la capacidad.

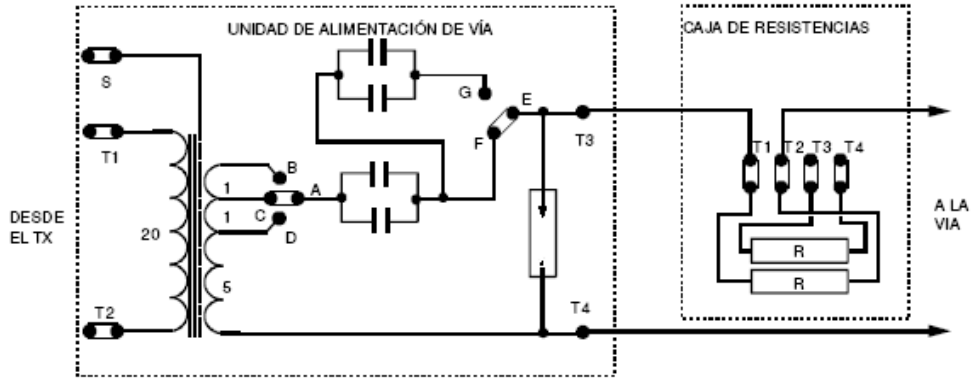


Fig. 40 Diagrama eléctrico de la LFU.

Imagen: Manual de Descripción del Sistema. Sección 1: Introducción. DIMETRONIC S.A. Ed. 4. Mayo 1999.

La caja de resistencias se instala siempre junto a la unidad LFU para la alimentación desde un TX a un lazo de ATP. Debido a que la LFU introduce capacidades en serie con el lazo de ATP, se producen resonancias serie; el propósito de las resistencias es limitar la corriente si se produce dicha resonancia. La caja de resistencias contiene dos resistencias de manera que puede utilizarse con uno o dos lazos. En los casos de alimentar a dos lazos, únicamente uno puede ser alimentado al mismo tiempo, por lo que nunca puede disiparse potencia en ambas resistencias a la vez.

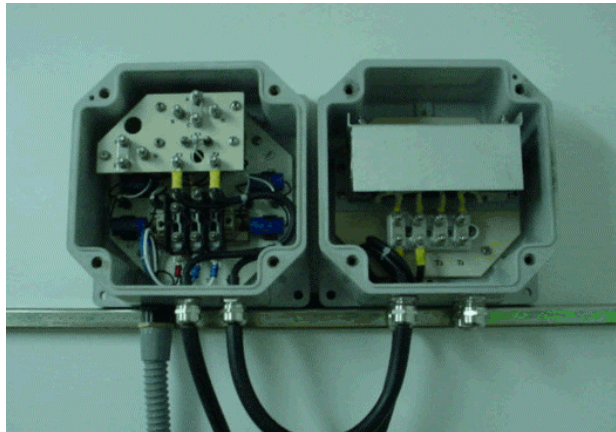


Fig. 41 Conexión de LFU y caja de resistencias.

Imagen: elaboración propia.

4.3.2 Balizas ATO

El sistema ATO (Automatic Train Operation) tiene como misión fundamental controlar el tren desde que sale de una estación hasta el punto de parada de la siguiente, conduciéndolo de forma precisa de acuerdo a los modos de marcha establecidos. Este sistema puede estar integrado en el propio enclavamiento, formando parte de la lógica no vital del mismo o bien desarrollarse en equipos externos comunicados con el enclavamiento, caso del sistema ATO de DIMETRONIC instalado en Línea 2 de Metro de Barcelona.

La baliza ATO está formada por la unidad de alimentación de lazo o Loop Control Unit (LCU) y el lazo de ATO que se extiende en paralelo a los carriles, según las medidas indicadas en la figura 42.

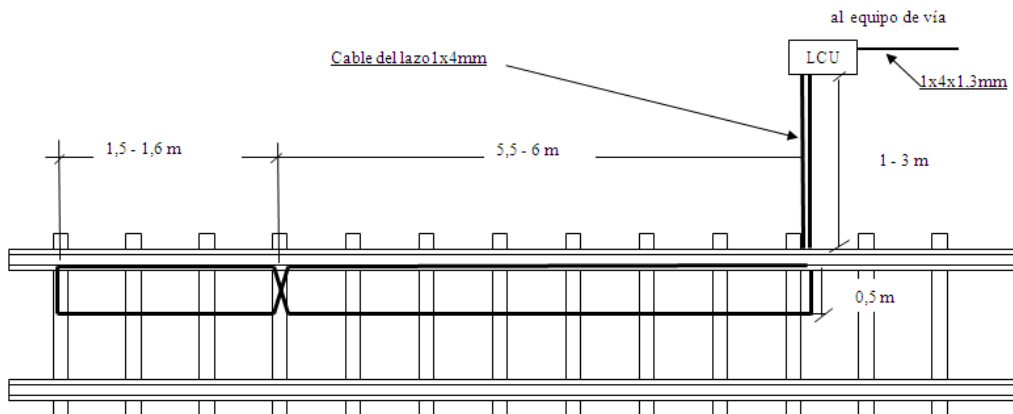


Fig. 42 Instalación de LCU y lazo ATO en vía.

Imagen: elaboración propia.

Se instalan dos LCU's por cada estación y vía y sus funciones principales son:

- Adaptar las impedancias entre el equipo de vía, situado en sala de enclavamiento, y el lazo de ATO.
- Servir de elemento de ajuste, mediante unos puentes de atenuación, para conseguir que circule por el lazo el nivel de corriente requerida.

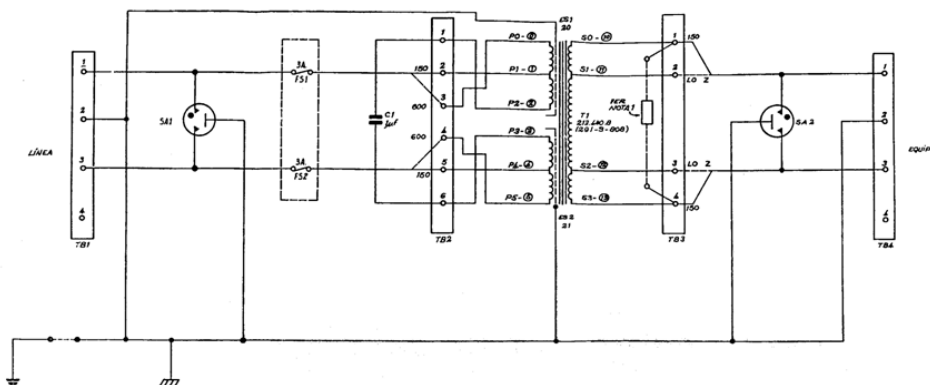


Fig. 43 Diagrama eléctrico de la LCU.

Imagen: Curso ATO para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A. Abril 2007.

El lazo de ATO funciona como antena transmisora hacia el tren, utilizando una señal portadora de 36000 Hz modulada en FSK a 900 Hz. La antena de tren capta la señal de códigos emitida por el lazo debido a que contiene circuitos resonantes LC, ajustados a la banda de frecuencias de la portadora emitida. Se instalan tantos lazos de ATO como LCU existan, esto es, dos por cada vía y estación denominándose lazo de entrada y lazo de salida.

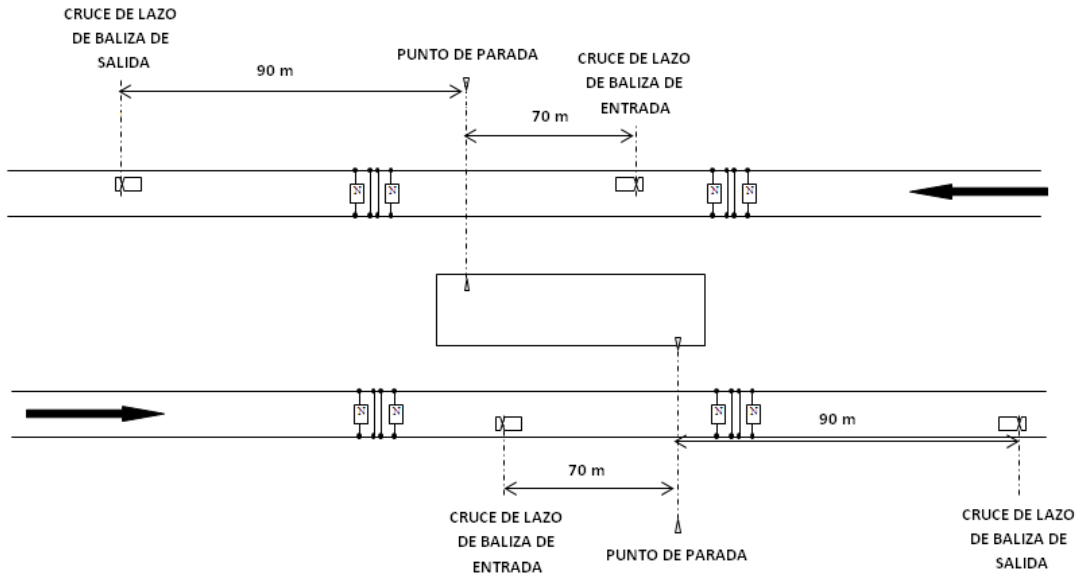


Fig. 44 Instalación de lazos de ATO en estaciones.

Imagen: elaboración propia.

La asimetría del lazo de ATO obliga a cruzar o trasponer los cables paralelos en un punto situado entre 5,5 y 6 m. del tramo largo o dicho de otra manera, entre 1,5 y 1,6 m. del tramo corto. Además, dicho punto debe situarse a 70 m. del punto de parada en la baliza de entrada y a 90 m. pasado el punto de parada en la baliza de salida, tal como se indica en la figura 44. Es muy importante fijar correctamente este cruzamiento, ya que la atenuación de la señal en este punto sirve al equipo embarcado de tren para calcular con precisión la distancia hasta el punto de parada en el caso de la baliza de entrada y para fijar el inicio del tramo de interestación en el caso de la baliza de salida. La longitud de los lazos, de entre 7 y 7,6 m., es la adecuada para la transmisión de al menos 3 mensajes de 7 bytes a 1200 baudios¹¹ al paso de tren.

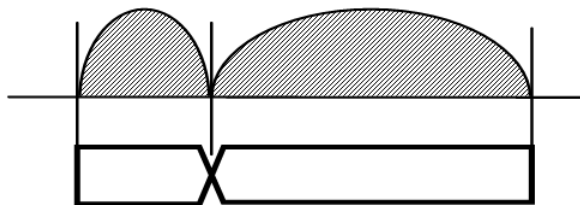


Fig. 45 Atenuación de la señal en el cruce del lazo ATO.

Imagen: elaboración propia.

¹¹ Baudio: unidad de medida utilizada en comunicaciones. Hace referencia al número de intervalos elementales por segundo que supone una señal. Sólo a velocidades bajas, los baudios son iguales a los bits por segundo; por ejemplo, 300 baudios equivalen a 300bps. Sin embargo, puede hacerse que un baudio represente más de un bit por segundo; por ejemplo, el modem V.22bis genera 1200bps a 600 baudios. Fuente: www.mastermagazine.info.

Las principales funciones del lazo de entrada son:

- Transmitir la información de ATO procedente del Puesto de Control Central (PCC) al tren, para su localización y control de la marcha.
- Servir de referencia kilométrica al tren, pudiendo el equipo embarcado corregir errores de distancia o de cálculo de diámetro de rueda. De esta manera se garantiza una alta precisión en las paradas de estaciones, con un margen de error de ± 1 m. aproximadamente.

Las funciones del lazo de salida son:

- Actualizar la información de ATO procedente del PCC.
- Corregir los errores que se pudieran producir en el cálculo de distancia desde el lazo de entrada hasta el punto de parada, básicamente motivados por bloqueos de rueda en el proceso de parada.
- Permitir la localización del tren fundamentalmente en maniobras de cambio de vía.

Finalmente, podemos concluir resumiendo las funciones básicas del sistema ATO de vía en L2:

- Corrección de los errores acumulados en la interestación en cuanto a medida de distancia por el equipo de ATO instalado en el tren. Mediante la lectura de las balizas el tren puede reajustar su posición en la línea con precisión.
- Corrección del diámetro de la rueda, gracias a la medida continua de distancia entre balizas.
- Localización del tren, mediante el envío de datos fijos (número de línea, estación y vía) el equipo ATO de tren será capaz de localizarse en cuanto detecte la primera baliza.
- Control centralizado, mediante el envío de datos variables desde el telemando de tráfico en PCC el operador podrá intervenir en la circulación de los trenes (cambio de marcha, permiso o no de vuelta automática, etc.).

4.3.3 Accionamientos de aguja

Un desvío o cambio de agujas es un aparato de vía que permite a una vía ramificarse en dos o tres vías, siendo los ejes de las vías tangentes entre sí. Una de las vías sigue una línea recta (vía directa) mientras que el resto cambian de dirección en el desvío (vías desviadas).

El cambio permite la conexión de dos carriles divergentes asegurando la continuidad de las respectivas vías y está formado por dos conjuntos aguja-contraaguja. El par de agujas móviles se mueve solidariamente mediante un tirante, en oposición a la contraaguja, formada por el par de carril fijo.

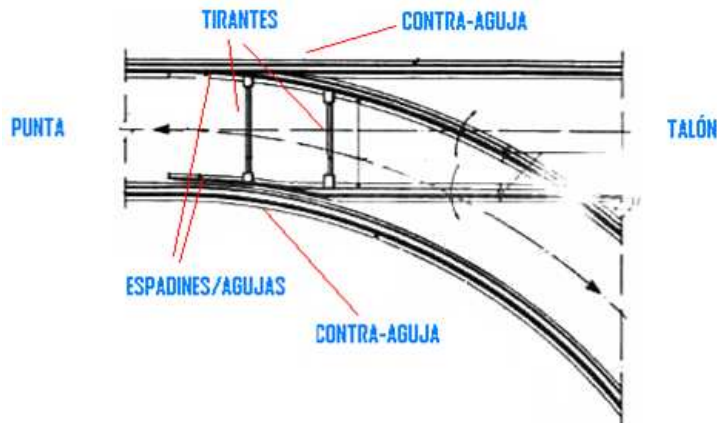


Fig. 46 Elementos de un cambio de agujas de dos vías.

Imagen: archivo Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

Los elementos que componen un cambio son los siguientes:

- Agujas o espadines: son las piezas interiores del cambio, móviles y con capacidad de giro respecto a uno de los extremos. Existen tres tipos principales: elásticos, de rótula y de brida.
- Contraagujas: son las dos piezas fijas exteriores del cambio.
- Tirantes: son las piezas que unen las agujas, con el fin de solidarizar sus movimientos.
- Cerrojos de agujas: mantienen inmóviles la unión de aguja y contraaguja, evitando que se separen al paso de los trenes.
- Resbaladeras: placas engrasadas sobre las cuales resbalan las agujas durante su movimiento, llamadas también cojinetes o placas de resbalamiento.

El accionamiento es el mecanismo necesario para poder mover el cambio de agujas. Dependiendo de su ubicación puede ser derecho o izquierdo, en relación a un observador situado entre las agujas del cambio y mirando hacia el cruzamiento.

Como ya se ha explicado en el punto 4.2, los primeros accionamientos eran totalmente manuales y dependían del esfuerzo humano del guardagujas, que movía los espadines mediante una marmita. En este caso, no había acción automática por parte de ningún motor y ningún enclavamiento controlaba la posición de las agujas.

Una marmita es una palanca de accionamiento que por su extremo inferior se une, por medio de una articulación, al tirante de transmisión de las agujas. Posee otra palanca dotada en uno de sus extremos de un collar que abraza la palanca principal, y que le sirve de eje de giro. Esta palanca tiene un contrapeso de fundición para facilitar la maniobra y para mantener a esa palanca, y por consiguiente al cambio, en la posición deseada.



Fig. 47 Accionamiento manual con marmita en un cambio de agujas.

Imagen: <http://www.trenak.com>.

A medida que los nuevos sistemas de señalización se fueron implantando, estos accionamientos manuales fueron sustituidos progresivamente por accionamientos automáticos que movían las agujas mediante un motor eléctrico.

En las instalaciones actuales, desde el enclavamiento se tiende el cableado eléctrico hasta el motor instalado en el cambio de agujas, con el objetivo de intercambiar dos señales:

- Mando: tensión necesaria para poner en marcha el motor y activar el accionamiento cuando la lógica del enclavamiento requiera un cambio de posición de agujas. En Línea 2 de FMB se utiliza una tensión de 220 Vac monofásica para alimentar motores modelo MD-2000 de DIMETRONIC, que se activa mediante una salida de seguridad enviada desde la tarjeta VROM del enclavamiento, también de tecnología DIMETRONIC.
- Comprobación: tensión que indica al enclavamiento la posición segura de las agujas. En el MD-2000 una señal continua de ± 50 Vdc es enviada desde el enclavamiento hasta el motor, que mediante un circuito interno de control y comprobación (combinador) activa/desactiva el retorno de la señal hacia el módulo de seguridad del enclavamiento, la tarjeta VPIM de tecnología DIMETRONIC.

Así, mediante estas dos señales, el enclavamiento puede actuar sobre el accionamiento y recibir información del estado de las agujas (posición recta o desviada), permitiendo establecer con seguridad los itinerarios a seguir por los trenes que están en circulación.

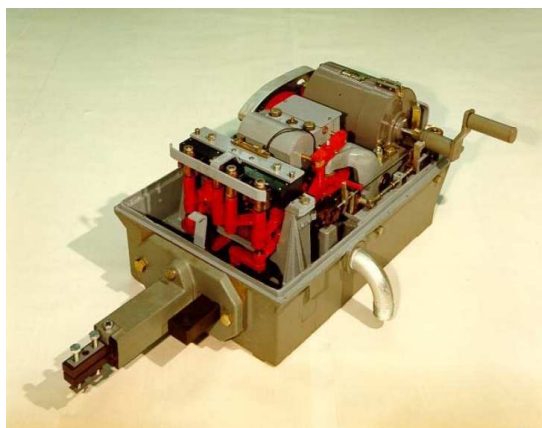


Fig. 48 Motor eléctrico de agujas modelo MD-2000 de DIMETRONIC.

Imagen: Descripción general MD-2000. DIMETRONIC S.A. Ed. 1. Junio 1998.

Para que el motor pueda actuar sobre las agujas es necesaria la instalación de un interface mecánico que lo conecte con los tirantes del cambio. Este interface es la barra de tracción, que es una barra dentada encargada de transmitir el movimiento desde el motor eléctrico a las agujas cuando el motor gira en uno u otro sentido, a través de un sistema de engranajes y tornillo sin fin.

Cuando el normal movimiento de la barra de tracción se ve impedido, bien por un obstáculo interpuesto entre el espadín y el contra-carril u otra causa, un mecanismo de seguridad del motor permite que la barra de tracción y el disco conductor del embrague permanezcan estacionarios, absorbiendo el movimiento una corona dentada y un anillo de fricción, para evitar quemar el embrague del motor.

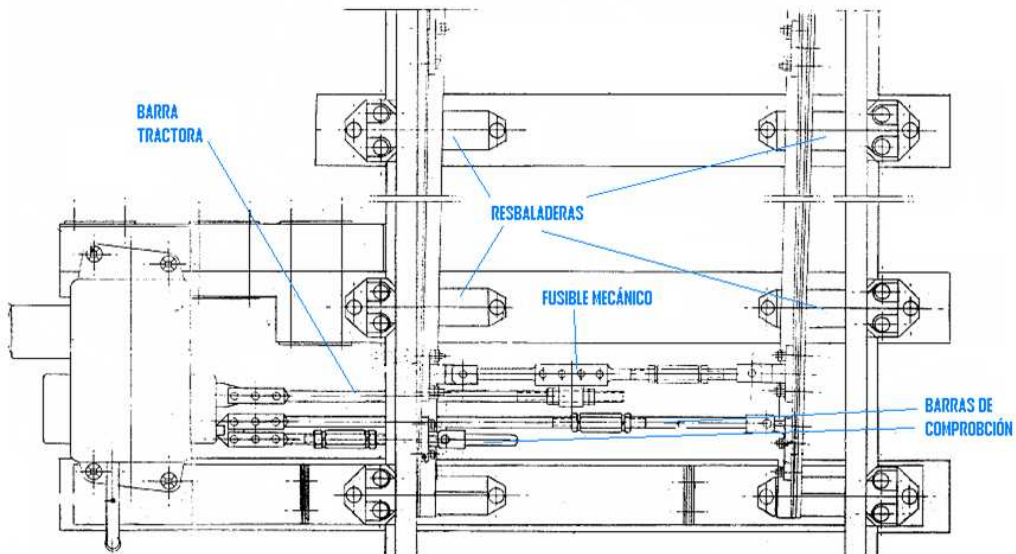


Fig. 49 Accionamiento ERICSSON modelo AE6904.

Imagen: archivo Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

Dependiendo de la fuerza de retención y maniobra que ejerce el motor al movimiento de las agujas provocado por una causa ajena (por ejemplo un tren no controlado), los motores se clasifican como talonables o no talonables. Cuando es talonable, el mecanismo del motor, al mismo tiempo que encerroja las agujas del cambio en cada una de las dos posiciones, recta o desviada, permite que éstas puedan ser talonadas sin dañar ninguno de los órganos.

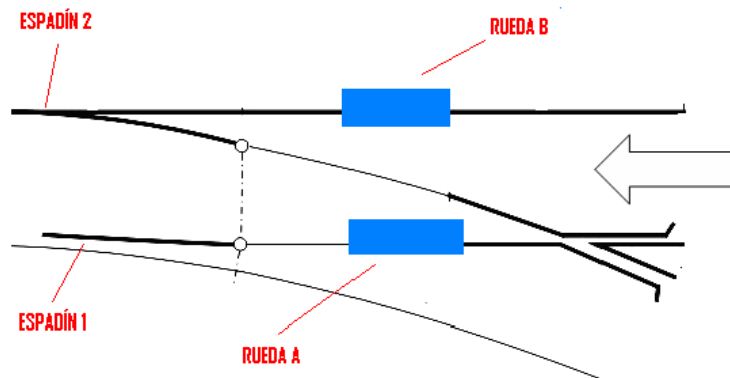


Fig. 50 Esquema del talonamiento de una aguja.

Imagen: archivo Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

El esquema de la figura 50 describe el talonamiento de una aguja. En un motor talonable, la rueda A empuja al espadín 1 antes de que la rueda B actúe sobre el espadín 2, entonces el fusible mecánico del motor se abre debido a la fuerza que ejercen las ruedas del tren. Éste fusible mecánico está preparado para que a una cierta presión se abra permitiendo el movimiento libre de los espadines. El espadín 1 se verá desplazado hacia la contra-aguja y el espadín 2 se abrirá unos 5 cm. para permitir el paso de la pestaña de la rueda.

	PAR MOTOR	ESFUERZO DE RETENCIÓN
ACCIONAMIENTOS DE AGUJA TALONABLES	250 Kgf (2451,60 N)	350 Kgf (3432,32 N)
	400 Kgf (3922,66 N)	600 Kgf (5883,99 N)
ACCIONAMIENTOS DE AGUJA NO TALONABLES	250 Kgf (2451,60 N)	> 1500 Kgf (14709,97 N)
	400 Kgf (3922,66 N)	
CARRERA DE LA BARRA DE TRACCIÓN	220 mm	
CARRERA DE LAS BARRAS DE COMPROBACIÓN	A especificar para funcionamiento en posición NORMAL o RECTA	
TIEMPO DE OPERACIÓN	2,5 a 3 segundos	
PESO DE LA MÁQUINA	200 Kg	

Tabla 4 Datos de funcionamiento del motor de aguja MD-2000 de DIMETRONIC.

Fuente: elaboración propia.

En los motores no talonables, el esfuerzo de retención es mucho mayor (superior a 1500 Kg. o 14700 Newtons) de manera que en el mismo caso anterior, la fuerza del tren sobre los espadines haría que éstos se doblaran, el mecanismo interno del motor se rompiera y el tren, dependiendo de la velocidad que llevara, pudiera descarrilar. Normalmente se suelen utilizar motores no talonables en vía general, ya que es preferible que el tren descarrile y parta el cambio a que siga adelante pudiendo chocar con otro convoy.

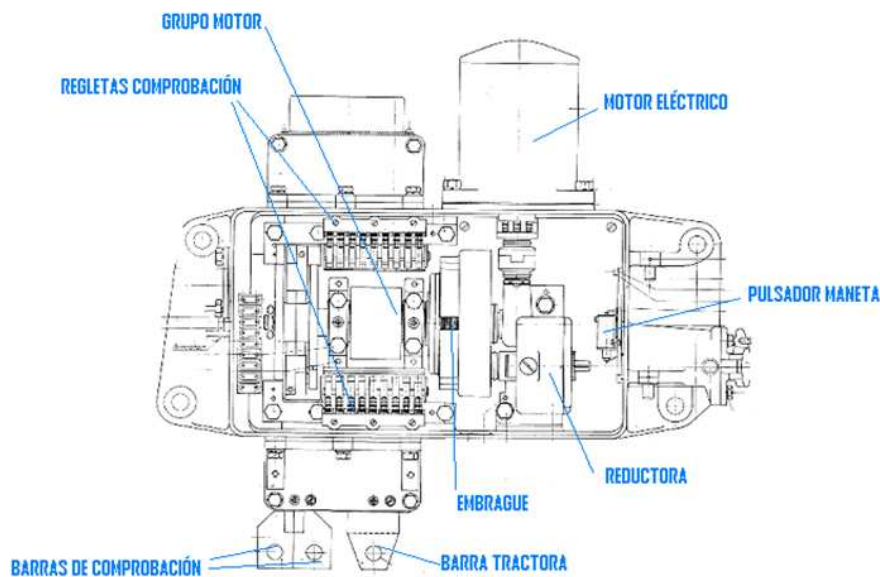


Fig. 51 Motor ERICSSON modelo no talonable.

Imagen: archivo Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

Para que el circuito combinador del motor pueda actuar y activar la señal de retorno de ± 50 Vdc al módulo de seguridad del enclavamiento, es necesaria la instalación de las barras de comprobación. Dichas barras metálicas, una por espadín, conectan éstos con el circuito combinador, de manera que una vez llegan al final de su recorrido activan/desactivan la señal de comprobación para que el enclavamiento sea consciente de la posición segura de los espadines.



Fig. 52 Instalación en campo de un accionamiento eléctrico de agujas.

Imagen: fuente propia.

4.3.4 Señales

Una señal es un dispositivo (manual, mecánico, eléctrico, etc.) cuya función es indicar al conductor del tren el estado de disponibilidad de la vía que tienen por delante. Se suelen situar en el lado derecho de la vía según el sentido de la circulación, en el hastial o sobre un mástil, pero siempre a una distancia suficiente del carril para respetar el gálibo dinámico de tren y a una altura apropiada para que sea visible por el conductor. En Línea 2 las señales de circulación están instaladas a una altura de 220 cm., adecuada para la correcta visibilidad desde cabina de conducción del tren ALSTOM S9000.

Nos vamos a centrar en este punto en la descripción de las señales luminosas laterales, que son las más utilizadas en las explotaciones modernas de ferrocarril y, en concreto, las utilizadas en la red de FMB.

Una señal luminosa puede mostrar varias indicaciones, que se conocen como aspectos. Los aspectos de la señal se pueden mostrar por medio de distintos colores (semafóricas) o por medio de formas luminosas donde el color de las luces es irrelevante (flechas de posición de aguja).

Aunque pueden existir otras variantes, las principales señales luminosas se clasifican según su función en:

- Señalización de ruta: cada sección de vía o cantón se protege por una señal semafórica lateral a la entrada del mismo, con el fin de avisar al conductor de la existencia de otro tren por delante o peligro en la vía. Si el cantón está libre, la señal mostrará aspecto permisivo (verde sin restricción o amarillo con permiso restringido) y el conductor tendrá permiso para circular. En caso contrario, la señal mostrará aspecto no permisivo (rojo indicando parada o doble rojo indicando parada irrevocable sin autorización).



Fig. 53 Señales semafóricas protegiendo secciones de vía o cantones.

Imagen: Principios Básicos de Señalización Ferroviaria. José Manuel Mera y Carlos Vera.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales – Universidad Politécnica de Madrid. Marzo 2003.

- Señalización de paso con precaución: señal formada por un sólo aspecto de color amarillo que luce de manera intermitente. Indica al conductor del tren la existencia de algún motivo por el cual ha de moderar la velocidad de manera especial (obras en vía, vía de torno, lavado, etc.) o bien porque se aproxima el final de la línea.
- Señalización de velocidad: señales que proporcionan al conductor información sobre la velocidad máxima a la que puede circular en la siguiente sección. Son señales alfanuméricas luminosas que pueden llegar a tener demasiadas variantes al tener que graduar las distintas velocidades de circulación.

- Señalización de posición de aguja: se utilizan para indicar al conductor la posición de la aguja que tiene inmediatamente delante. Los aspectos suelen ser flechas indicando la posición de las agujas y una banda horizontal en caso de que la aguja no esté comprobando o esté averiada, en cuyo caso el paso está prohibido (equivalente a un aspecto rojo). Son muy utilizadas en explotaciones tranviarias y de Metro con sistemas automáticos sin conductor.

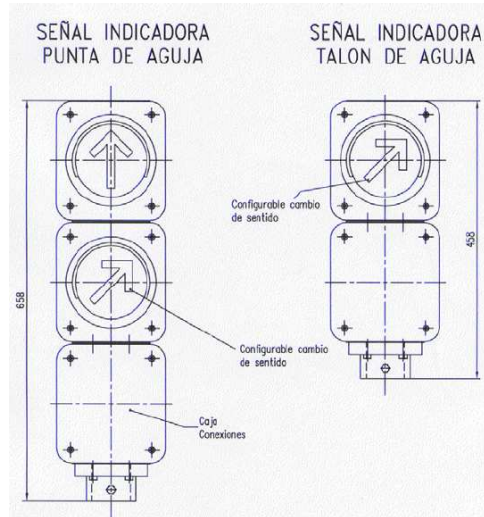


Fig. 54 Señal indicadora de aguja de ELECTRANS.

Imagen: plano 04 706/B Señal indicadora de aguja. Catálogo Electrosistemas Bach S.A. (ELECTRANS).

Proyecto Constructivo de Línea 9 de Metro de Barcelona.

- Señalización de límite de circulación: señal triangular formada por tres aspectos de color rojo. Se instala en el final de una vía justo encima de la topera mecánica que ha de absorber el impacto de tren en caso de colisión. Indica el punto a partir del cual no es posible la circulación y es irrebasable.

En los sistemas de señalización ferroviaria metropolitanos con ATP no es necesaria la instalación de señales de velocidad ya que el propio sistema ya informa en el velocímetro del tren de cuál es el límite que no se ha de sobrepasar. Así, es la señalización de ruta con señales luminosas de tres o cuatro aspectos las que se utiliza en la mayoría de explotaciones ferroviarias para regular la circulación y proteger la seguridad de la línea desde el enclavamiento.

Los aspectos de las señales luminosas son los siguientes:

- Verde: vía libre.
- Amarillo: vía libre con precaución.
- Rojo 1: alto (parada).
- Rojo 2: alto (parada irrebasable sin autorización).

El aspecto más restrictivo se suele situar lo más cerca posible de los ojos del conductor, pero en cualquier caso depende de la altura de los mástiles o brazos de sujeción y del explotador ferroviario.



Fig. 55 Representación de una señal semafórica de tres aspectos.

Imagen: elaboración propia.

Las líneas dibujadas dentro de los aspectos del esquema de la figura 55 responden a la simbología empleada tradicionalmente por la ingeniería de señalización en los esquemas de vías.

En los sistemas de señalización tradicionales (sin conducción automática de trenes) las señales semafóricas se instalan en la salida de las estaciones para señalar la ruta:

- Autorizando el arranque de tren cuando las condiciones de señalización-seguridad por delante son las adecuadas (interestación libre de tren, posiciones de aguja correctas, rutas compatibles, etc.).
- Prohibiendo la salida del tren si alguna de las condiciones de señalización-seguridad no se cumple.

Cuando la distancia entre una estación y otra es demasiado larga, se suele instalar una señal intermedia que controla el avance del tren en la interestación y permite la salida desde el andén anterior con una señal luciendo en amarillo (permiso de paso con precaución). El objetivo es mejorar el intervalo de explotación de la línea incrementando el número de trenes que pueden circular simultáneamente, siempre manteniendo la seguridad que proporciona el enclavamiento.

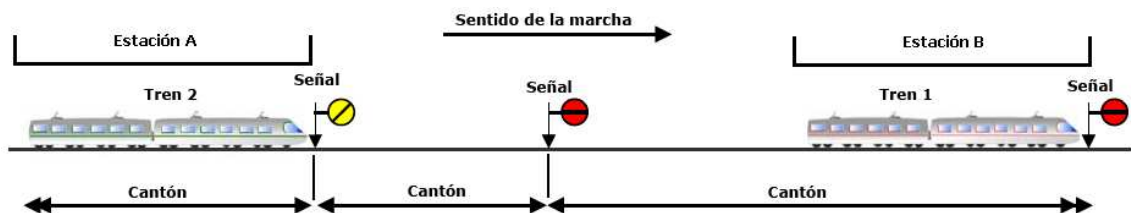


Fig. 56 Señal intermedia en interestación.

Imagen: elaboración propia.

Hay dos tipos de tecnologías que se utilizan en las señales luminosas: lámparas de incandescencia y foco LED (Light Emitting Diode). Aunque con un mismo objetivo, que el aspecto sea visible por el conductor del tren, la tecnología LED presenta ventajas sobre la lámpara convencional incandescente, entre las más importantes:

- Vida útil de hasta diez años, ahorrando costes y tiempo respecto a las lámparas incandescentes, que deben ser sustituidas periódicamente.
- Aunque fallen LED individuales, la unidad de foco sigue funcionando en su conjunto.
- Bajo mantenimiento, reduciéndose éste a limpieza e inspección, siendo innecesarios reajustes ni mediciones.

Así, debido a lo crítico que resulta en una explotación ferroviaria que un foco de señal falle, la tecnología LED está sustituyendo paulatinamente a la de lámparas, ya que ofrece una prolongada vida útil y un alto grado de disponibilidad y eficiencia, de la mano de unos gastos de mantenimiento mínimos, lo que permite reducir los costes de explotación de forma decisiva.

El encendido o apagado de los focos de una señal luminosa está gobernado por el enclavamiento, cuyo subsistema de lógica adquiere los datos a partir de los módulos de entrada, los procesa según las ecuaciones booleanas definidas en cada aplicación y envía el resultado de este procesamiento a los módulos de salida.

Cada foco de la señal luminosa se alimenta a través del cableado eléctrico que parte desde el módulo de salidas vitales para lámparas del enclavamiento, por ejemplo la tarjeta VLOM en la tecnología DIMETRONIC.

La alimentación, tanto de las lámparas como de los focos LED, puede ser de 110 Vac o de 220 Vac, a una frecuencia de 50 o 60 Hz, dependiendo estas especificaciones del país donde esté situada la explotación ferroviaria. Para las señales LED, los fabricantes incorporan un transformador interno de 110/220 Vac a 10/12 Vac, ya que los LED funcionan a tensiones menores.



Fig. 57 Unidades de señal LED 70 y LED 136 de SIEMENS.

Imagen: www.siemens.com/mobility.

Antes se ha hecho referencia a una de las ventajas más importantes de los LED sobre las lámparas: el hecho de que uno falle no repercute en el funcionamiento del foco luminoso. Esto es porque cada LED o línea de LED, dependiendo de la tecnología, está activado por un controlador individual en la placa de LED, de manera que si falla el controlador o un LED, no afecta al resto. Se puede ver el detalle de un módulo de visualización, con una alimentación independiente para cada LED en la figura 58.

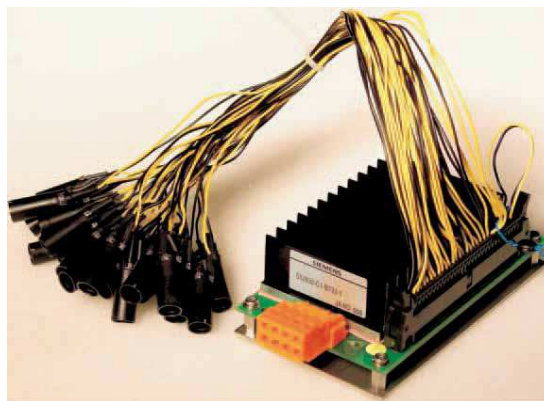


Fig. 58 Módulo de visualización LED.

Imagen: www.siemens.com/mobility.

Es importante tener en cuenta las tecnologías, ya sean lámpara o LED, que incorporan sistemas de seguridad ante posibles averías de fusión o de encendidos indebidos:

- Comprobación de fusión de lámpara o en caliente. Si el foco no se enciende ante una orden enviada por el módulo de salida, un circuito comprobador envía una alarma al enclavamiento, que se transmite a las pantallas del telemando de tráfico y/o de Mantenimiento para poder avisar e iniciar así una posible acción correctiva.
- Control de lámpara en frío. Mediante impulsos de test, con una tensión de intensidad y duración insuficiente para encender la lámpara o los LED, pero sí para detección de error, es posible comprobar si existe fusión sin necesidad de que esté luciendo en ese momento. Las comprobaciones son periódicas.
- Anulación del encendido indebido por inducciones. En las lámparas se suelen instalar filtros para evitar las inducciones producidas, por ejemplo, por los cables de alimentación de los CV que transcurren en tendidos paralelos. La tecnología LED dispone de un control de tensión mínima de funcionamiento, que provoca el apagado del foco cuando ésta es inferior a un valor, por ejemplo 8 Vac.



Fig. 59 Aspecto rojo luciendo en señal foco LED LD-120-P de ELECTRANS.

Imagen: Descripción técnica foco LED LD-120-P. Referencia D2041. Ed. 02 Electrosistemas BACH S.A. Noviembre 2006.

4.4 Subsistema de enclavamiento

4.4.1 Evolución y tipos de enclavamiento

Como se ha explicado en el punto 4.1, las primeras redes ferroviarias disponían de sistemas de señalización totalmente manuales, suficiente para explotaciones en que había pocos trenes en circulación y donde no había exigencias en cuanto a capacidad de la línea.

Pero a medida que este medio de transporte fue creciendo y en respuesta a las expectativas de desarrollo creadas, fue necesario construir y poner en circulación más trenes y con velocidades más altas. Las señales semafóricas y los accionamientos manuales controlados por los guardagujas ya no eran suficientes, ni aún con la creación de las salas técnicas de estación (futuras salas de enclavamiento) donde se concentraron todas las palancas de cambio de agujas y control de las señales semafóricas.

El aumento de las circulaciones, las perturbaciones y las incidencias diarias, dieron lugar a errores en las secuencias de operación y coordinación de acciones, provocando situaciones peligrosas y amenazas contra la seguridad que comúnmente derivaban en accidentes.

Con el objetivo de reducir al máximo el fallo humano y para mitigar las dificultades en la operación de señales y desvíos, se buscaron soluciones técnicas encaminadas a relacionar físicamente las posiciones del desvío (aguja recta o desviada) con las señales que lo protegían (aspectos permisivos o restrictivos). En otras palabras, enclavar la posición del desvío con la autorización de la señal.

Así, surgen a finales del siglo XIX en Gran Bretaña los primeros enclavamientos de tipo mecánico de transmisión rígida, donde a las palancas de maniobra de cambios y señales se añadieron otras de itinerarios, que enclavaban unas con otras, impidiendo que se pudieran establecer rutas incompatibles.



Fig. 60 enclavamiento mecánico Saxby Farmer fabricado en Gran Bretaña el año 1882.

Imagen: http://www.museodelferrocarril.org/colecciones/gal_infraestructura.asp.

La invención de la electricidad y su posterior aplicación en los sistemas de señalización ferroviaria derivó en que los carriles empezaran a ser considerados parte de un circuito eléctrico dando lugar a los circuitos de vía. La presencia del tren, debido a la baja impedancia de sus ejes, cortocircuitaba esta corriente haciendo caer un relé asociado a dicho circuito. Así, la falta de corriente era indicativa de la presencia del tren en la sección correspondiente.

Estos primeros enclavamientos ya operaban bajo la consigna de seguridad fail safe (seguro en caso de fallo), consigna que actualmente sigue siendo un requisito indispensable en el diseño de cualquier componente vital del enclavamiento. Un ejemplo lo encontramos en el circuito de vía, donde el contacto del relé está desexcitado en reposo, interrumpiendo el paso de corriente e indicando por defecto una ocupación del mismo. Para que se muestre como libre, es necesario que el receptor del CV reciba una entrada de tensión y excite el relé, cerrando el circuito. Así, ante cualquier fallo, siempre se irá al modo más seguro, indicando una ocupación y restringiendo las rutas a través de dicho CV.

La aplicación de la tecnología de relés, junto con los avances en los sistemas de transmisión de señales eléctricas, dio lugar a los enclavamientos eléctricos de relés, que sustituyeron a los mecánicos. Los enclavamientos de relés aún se utilizan en algunas explotaciones ferroviarias, pudiendo convivir con enclavamientos de tipo electrónico sin problemas.



Fig. 61 enclavamiento eléctrico de cableado libre.

Imagen: Señalización Ferroviaria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. Marzo 2006.

Cuando los enclavamientos de relés gestionan zonas acotadas a una estación y el control se ejerce desde un puesto de mando local se les llama sistemas de cableado libre. Así era al principio, donde el jefe de estación establecía los itinerarios en función de la información que los jefes de estación de los enclavamientos adyacentes le comunicaban.

A medida que se introdujeron más avances en la tecnología, de los sistemas de cableado libre se pasó a sistemas geográficos o modulares, en las que el diseño del enclavamiento seguía una configuración geográfica más amplia, con capacidad de gestión sobre varias estaciones.



Fig. 62 enclavamiento eléctrico geográfico o modular.

Imagen: Introducción al WESTRACE v1.0. Documentación técnica para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A.

Los avances tecnológicos en computación y microelectrónica han permitido desarrollar la tecnología de enclavamientos, dando como resultado los actuales enclavamientos electrónicos. Estos enclavamientos son capaces de gestionar mayor cantidad de información en poco tiempo, aplicando la lógica programada y permitiendo el establecimiento de rutas actuando sobre los objetos de campo.



Fig. 63 Enclavamiento electrónico WESTRACE de DIMETRONIC.

Imagen: www.dimetronic.es

Los dos grandes bloques modulares en los que se divide un enclavamiento electrónico son:

- Módulo de control de objetos: recibe órdenes y activa las señales de control para el mando de los objetos (señales, agujas, etc.). Los controladores de objetos envían el estado a la CPU del enclavamiento, para la ejecución de las ecuaciones booleanas que tenga programadas. La comunicación con los controladores de objetos se realiza utilizando un lazo de comunicación serie, que se une con los controladores mediante concentradores.
- Módulo de proceso del enclavamiento: se encarga de recibir información de todos los subsistemas a él conectados y realizar la lógica del enclavamiento. Recibe comandos desde un sistema de control y supervisión (Puesto de Control Centralizado) y el estado de los elementos de campo desde el módulo de control de objetos. El programa interno de la CPU del enclavamiento genera órdenes que se envían al módulo de control de objetos.

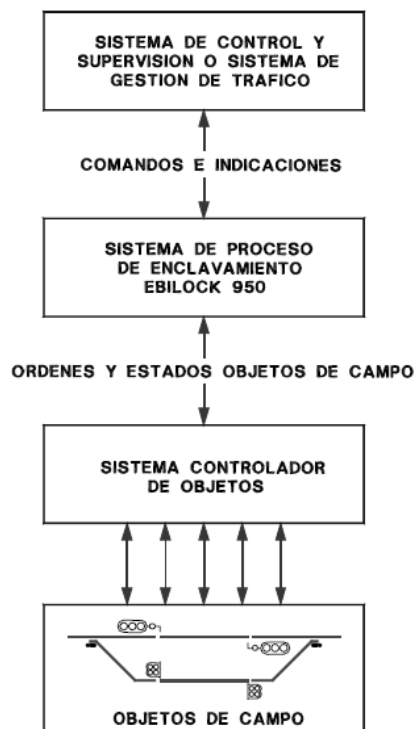


Fig. 64 Arquitectura del enclavamiento electrónico modelo EBILOCK950 de BOMBARDIER.

Imagen: Sesión informativa. Modificaciones Hardware EBILOCK950. Ampliación Línea 3 de Metro de Barcelona. Octubre 2008.

En definitiva, el enclavamiento está considerado el núcleo del sistema de señalización, encargado de controlar el estado de accionamientos y señales en función de la ocupación de los circuitos de vía, para garantizar una ruta segura de circulación de los trenes. Los objetivos fundamentales que ha de cumplir el subsistema de enclavamiento son:

- Establecer un principio y fin de ruta que determinen un camino físico por el que pueda circular un tren.
- Garantizar la no coincidencia entre rutas en espacio y tiempo.
- Enviar información de señalización correcta en lugar y momento adecuado al sistema responsable de controlar la velocidad del tren.

4.4.2 Seguridad

Desde el momento en que el enclavamiento se empieza a automatizar, se asocia con niveles medibles de seguridad. Actualmente se considera el enclavamiento como un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS), donde la seguridad funcional se encarga de certificar que los SIS operen correctamente en respuesta a sus inputs y sean altamente confiables.

Las normas IEC-61508 e IEC-61511 constituyen el estándar técnico internacional donde se definen los requisitos para el diseño y utilización de los SIS. Estas normas definen cuatro niveles de seguridad integral o Safety Integrity Level (SIL) donde cada nivel indica la medida requerida de la función de seguridad:

- SIL 1: riesgo bajo.
- SIL 2: riesgo medio.
- SIL 3: riesgo alto.
- SIL 4: riesgo especial. Este nivel SIL es el utilizado en sistemas complejos con un riesgo elevado para la vida de las personas, como las centrales nucleares o los enclavamientos ferroviarios.

En la filosofía SIL la integridad de la seguridad depende de:

- Integridad ante fallos sistemáticos: causados por errores humanos durante el diseño, fabricación, verificación, validación o mantenimiento.
- Integridad ante fallos aleatorios: inherentes a la fiabilidad del equipo, como fallos debidos a la fatiga, deterioro por el tiempo de vida, etc. En general, se conocen como fallos hardware.

El nivel SIL pretende medir y tabular el grado de integridad de las funciones de seguridad del enclavamiento, y es tenido en cuenta también en la redacción de la normativa CENELEC¹² para los sistemas de señalización ferroviarios.

CENELEC dispone de un conjunto de normas relativas a la seguridad en los enclavamientos, que contienen requisitos de carácter técnico, metodológico y organizativo, a respetar en todo el ciclo de vida del producto. Estas normas son:

- EN-50126: especificación y demostración de la Fiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad y Seguridad (RAMS).
- EN-50128: software para sistemas de control y protección del ferrocarril.
- EN-50129: sistemas electrónicos de seguridad para señalización ferroviaria.
- EN-50159: comunicaciones de seguridad para aplicaciones ferroviarias.

Los elementos que forman parte de la lógica vital del enclavamiento están garantizados con un nivel SIL 4 de seguridad, en concreto todos los elementos que intervienen en el sistema ATP. Un ejemplo es el enclavamiento electrónico WESTRACE[®] de DIMETRONIC o el EVILOCK[®] de BOMBARDIER, que también cumplen la normativa de seguridad CENELEC específica para los sistemas de señalización ferroviarios. Los elementos no vitales pueden no ser SIL 4, pues un fallo no comporta un riesgo para la circulación de los trenes.

En cualquier caso, todos los equipos de señalización deben estar incluidos en un Plan de Seguridad o Safety Case, cuya función principal es recoger la evidencia del cumplimiento satisfactorio de todas las condiciones de seguridad necesarias para la aceptación del sistema de señalización.

¹² CENELEC (en francés Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) es el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica. CENELEC es el responsable de la estandarización europea en las áreas de ingeniería eléctrica y junto a la ETSI (telecomunicaciones) y al CEN (otras áreas técnicas) forma parte del sistema europeo de normalizaciones técnicas.

El Safety Case integra los diferentes documentos (planes, especificaciones, informes, pruebas, registros, etc.) que constituyen las evidencias de seguridad del sistema completo, según la normativa CENELEC para aplicaciones ferroviarias citada anteriormente, argumentando el nivel de seguridad alcanzado por el sistema. De manera resumida, el Safety Case debe contener:

- Descripción general de cada uno de los sistemas y equipos que forman parte del suministrador de enclavamientos, determinando sus funciones principales y el nivel de seguridad asignado a cada una de ellas.
- Breve descripción de los interfaces externos de la aplicación.
- Descripción de las fases del ciclo de vida del proyecto, estableciendo las actividades de seguridad a realizar en cada fase y los procedimientos necesarios para realizarlas, con el objetivo final de alcanzar los niveles de seguridad exigidos.
- Revisiones periódicas para garantizar su adecuación al proyecto.

El Safety Case exige una descripción de cada una de las fases del ciclo de vida del proyecto. El ciclo de vida, aplicable tanto en el desarrollo del enclavamiento (SW y HW) como en la gestión del proyecto (implantación y puesta en servicio), resume las principales medidas que deben adoptarse para garantizar las prestaciones del producto, minimizar los riesgos, certificar la seguridad, cumplir la calidad deseada y reducir costes. Una adecuada gestión de la seguridad en la fase de desarrollo de producto e implantación del proyecto garantizará un sistema seguro cuando la instalación se abra al público.

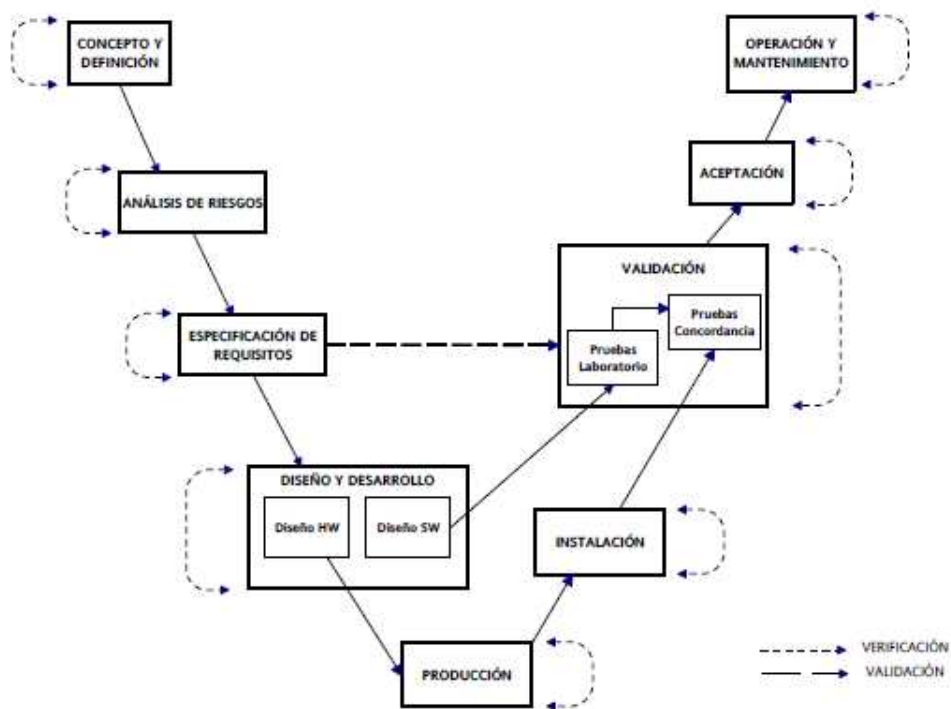


Fig. 65 Ciclo de vida modelo en V según norma CENELEC.

Imagen: www.cenelec.eu.

El ciclo de vida se suele representar en forma de V para describir paso a paso cada una de las acciones a realizar. El lado izquierdo de la V representa la descomposición de las necesidades y la creación de las especificaciones del sistema. El lado derecho de la V representa la integración de las piezas y su verificación.

4.4.3 Automatic Train Protection (ATP)

Los enclavamientos son capaces de garantizar rutas seguras de circulación para los trenes, ya sea mediante cadenas de relés o circuitos electrónicos. El control de los objetos de campo, como accionamientos y señales, permitirá al conductor del tren poder avanzar con seguridad y no colisionar con otros trenes que circulen por la línea. No obstante, existe un serio inconveniente. Por mucha seguridad que garantice el enclavamiento, en última instancia ésta depende de la habilidad y rigor del conductor. Si el conductor no respeta una señal con aspecto rojo que le está restringiendo la entrada a una sección, puede suceder que el tren avance y descarrile debido a una aguja en posición errónea o que colisione con otro tren que ocupa el circuito de vía.

El sistema de Protección Automática de Trenes o Automatic Train Protection (ATP) nació con la intención de integrar la señalización en vía con una intervención en el propio equipo embarcado, que pudiera avisar al conductor de un requerimiento de parada y le forzara a hacerla. El objetivo es garantizar la conducción segura de los trenes en todo momento, teniendo en cuenta las condiciones de señalización, la velocidad máxima permitida por la infraestructura (peraltes, rampas, curvas, etc.) y la limitación de velocidad del material rodante.

Consideramos el sistema ATP como un conjunto de dos subsistemas:

- ATP Tierra: se implementa en el módulo de proceso del enclavamiento, que realiza el procesado de datos según las cadenas de lógica que tiene programadas. Para realizar estos cálculos, necesita conocer el estado de los objetos de vía (accionamientos y circuitos de vía) y las órdenes que se envían desde el sistema de control y supervisión (telemando de tráfico). La transmisión continua de información hacia el tren se realiza a través de los carriles o mediante antenas de radio en los modernos sistemas CBTC.
- ATP embarcado: se implementa en el módulo de control del tren, que a partir de la información que recibe mediante los captadores o antenas de ATP, realiza el procesado de datos siguiendo la lógica programada. El equipo ATP embarcado supervisa la velocidad del tren y calcula las curvas de frenado para interactuar con el equipo de control de tracción y freno de tren.

Las principales funcionalidades de las que dispone un sistema ATP son las siguientes:

- Permitir el establecimiento de rutas por las que pueda circular un tren, garantizando las condiciones de seguridad necesarias para evitar las posibles situaciones de riesgo.
- Enclavar los desvíos para impedir que se autorice a un tren entrar a una zona de cambio de agujas a menos que se haya verificado que el cambio está situado y enclavado (posición segura) en la posición correcta.
- Controlar el estado de los elementos de campo (circuitos de vía, señales, agujas, pasos a nivel, etc.), actuando sobre ellos para facilitar el establecimiento de las rutas.
- Establecer y enclavar itinerarios.
- Supervisar el desplazamiento del tren a las localizaciones de confluencia y bifurcación de itinerarios.
- Detectar de manera continua la presencia de los trenes en la Línea a través de un sistema de transmisión tren-Tierra bidireccional.
- Transmitir a los equipos embarcados la información necesaria para que los trenes puedan circular en modo seguro (eliminando la posibilidad de colisión, descarrilamiento u otro accidente).
- Limitar la velocidad de los trenes según los límites de seguridad y operación fijados.

- Supervisar de forma continua las curvas de frenado de los trenes dando los correspondientes avisos si se sobrepasa el umbral permitido (limitado por la vía y la infraestructura) y aplicando freno de emergencia en caso necesario. Las curvas de velocidad vendrán marcadas por la posición y velocidad del propio tren, más la distancia y velocidad objetivo.
- Supervisar el sentido de desplazamiento de los trenes a lo largo de la Línea.
- Supervisar el retroceso de los trenes.
- Controlar el freno de servicio.
- Controlar y supervisar el estado de las puertas del tren y andén.

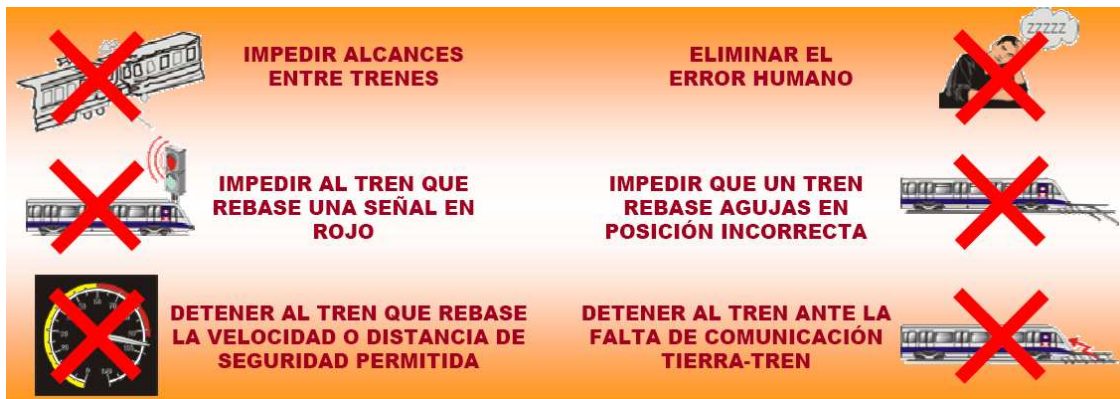


Fig. 66 Principales funcionalidades del sistema ATP.

Imagen: Señalización ferroviaria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. Marzo 2006.

El equipo ATP de tren necesita de una serie de datos provenientes de fuentes distintas para poder garantizar una velocidad segura en todo momento:

- Velocidad y distancia recorrida del tren: según el modelo de tren se obtiene de tacogeneradores montados en los ejes o de radares DOPPLER para medir la velocidad.
- Longitud del tren: acostumbra a ser un valor fijo en la base de datos del equipo ATP, aunque se puede reprogramar en caso de modificación del número de coches.
- Comportamiento en frenado del tren: es conocido por el ATP embarcado y tomado en cuenta en los cálculos de las curvas de velocidad.
- Máxima velocidad del tren: valor que depende de las especificaciones del fabricante y los requerimientos del operador ferroviario.
- Datos de la ruta (gradiente, VMAX en la ubicación actual, VMAX en la siguiente sección, etc.): puede estar grabado en el mapa de tren o transmitirse al tren desde la vía mediante las antenas de ATP.
- Distancia objetivo: a través de la señal VMAX/VOBJ que transmiten los carriles en cada circuito de vía, el enclavamiento informa al equipo embarcado de la distancia que puede recorrer antes de detenerse. En un sistema por escalones de velocidad la referencia que utiliza el conductor es la VOBJ, en cambio en un sistema Distance To Go (DTG) se muestra la distancia al objetivo en un display del panel de conducción.

El ordenador de a bordo calcula continuamente la velocidad máxima permitida (VMAX) y la velocidad objetivo en la próxima sección (VOBJ) para mostrarla al conductor, que ha de reaccionar a los distintos avisos acústicos y visuales para adaptarse a los requerimientos de ATP, en caso contrario el tren se para. Para ello, el conductor dispone de un velocímetro parecido al de los automóviles que indica la velocidad del tren y de una palanca tipo joystick que puede mover adelante y atrás para controlar dicha velocidad, mediante un juego de tracción y frenado.

Debajo de la parte superior de la palanca, existe un botón que ha de ser pulsado constantemente para que la tracción del tren se mantenga. Este botón, llamado "hombre muerto", está situado de manera ergonómica para ser pulsado con el dedo pulgar fácilmente, y es el medio de seguridad para frenar el tren si el conductor abandona su puesto, ya sea por un problema de salud (desvanecimiento, desmayo, ataque epiléptico, etc.) o por incumplimiento voluntario de sus funciones (falta de atención, rebeldía, etc.).

Se conoce como sistema de Control Automático de Trenes o Automatic Train Control (ATC) a la acción combinada de los sistemas de protección y operación de trenes, ATP y ATO.

El modelo de tren S9000 de ALSTOM, utilizado en Línea 2 y Línea 4, dispone de un equipo ATC-D de DIMETRONIC que, mediante su panel de conducción, permite visualizar toda la información necesaria para el control de la conducción (VMAX, VOBJ, velocidad real, modo de conducción, alarmas, etc.). Para que dicho panel muestre toda la información necesaria al conductor y el equipo ATC-D garantice la seguridad de la circulación, los códigos VMAX/VOBJ generados en el enclavamiento han de llegar a las antenas de ATP en cada circuito de vía a medida que avanza el tren.

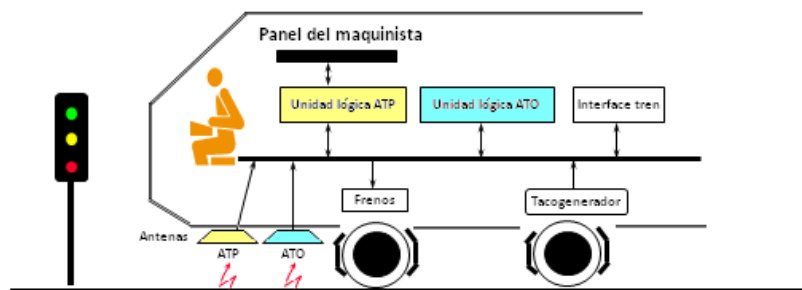


Fig. 67 Diagrama de bloques de los equipos ATP y ATO embarcados.

Imagen: elaboración propia.

El sistema de señalización de L4 fue el primero en utilizar el sistema ATP en una línea de Metro de Barcelona, aunque no dispone de sistema ATO. El enclavamiento se encarga de procesar la información que recibe de los objetos de vía e insertarla en la cadena de relés para, según la lógica programada, activar el envío de los códigos de velocidad al circuito de vía donde se encuentre el tren. La señal que se envía es una señal modulada en amplitud ASK que el equipo ATP embarcado interpreta como un código VMAX/VOBJ.

Una corriente de 50 Hz se envía permanentemente al circuito de vía para detectar ocupación, mientras se mantiene desactivado el envío de la señal de ATP. En el instante que se pida un itinerario, ya sea mediante ciclos automáticos¹³ o manualmente desde el telemando de tráfico, el enclavamiento comprueba todas las condiciones de seguridad según cadena de relés y si lo autoriza, abre la señal, mostrando el aspecto verde o amarillo de la señal inicio de itinerario. Aunque el itinerario esté establecido, el enclavamiento aún no ha activado la transmisión de la señal que contiene la información de códigos de velocidad.

El Transmisor de ATP genera 2 señales portadoras, A de 1365 Hz y B de 1953 Hz, y el Generador de Códigos 3 moduladoras, W de 20,34 Hz, X de 25,43 Hz e Y de 35,15 Hz, que mediante la técnica ASK se combinan para formar el árbol de 6 códigos de velocidad disponibles para el control y protección de la circulación de los trenes.

¹³ Ciclos automáticos: modo automático de establecimiento de itinerarios, sin disolución a paso de tren. En el momento que un tren abandona el último circuito de vía de un itinerario SC1-SC2, la señal SC1 origen del mismo se abre automáticamente para establecerlo e nuevo. No es necesario que un operador establezca continuamente el mismo itinerario de manera manual.



Fig. 68 Bastidor con Transmisores de ATP en sala de enclavamiento de La Pau L4.

Imagen: elaboración propia.

Cuando el tren ocupa el circuito de vía y sus ejes shuntan los carriles, el relé de vía se desexcita al dejar de recibir la señal de 50 Hz y es entonces cuando el enclavamiento activa el Transmisor de ATP habilitando la moduladora correspondiente desde el Generador de Códigos. La señal con la información VMAX/VOBJ se envía a dicho CV y también al inmediatamente posterior, garantizando así la circulación del tren en la frontera cuando el tren abandone un CV para entrar en el siguiente. El CV justo detrás del que está ocupado por el tren no dispondrá nunca de señal de ATP, un código 0/0 garantizará el colchón de seguridad para evitar el acercamiento de otros trenes.



Fig. 69 Generador de Códigos de ATP en La Pau L4.

Imagen: elaboración propia.

Es importante destacar que el sentido de la marcha del tren obliga a entrar en el circuito de vía por el extremo del RX, es decir, que el tren siempre se mueve hacia el TX. El eje del tren cortocircuita la vía, por lo tanto, detrás del eje del tren no existirá señal de ATP.

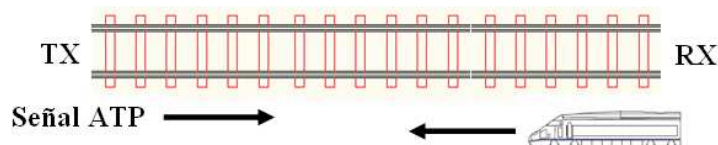


Fig. 70 Captación de la señal de ATP según sentido de la marcha.

Imagen: elaboración propia.

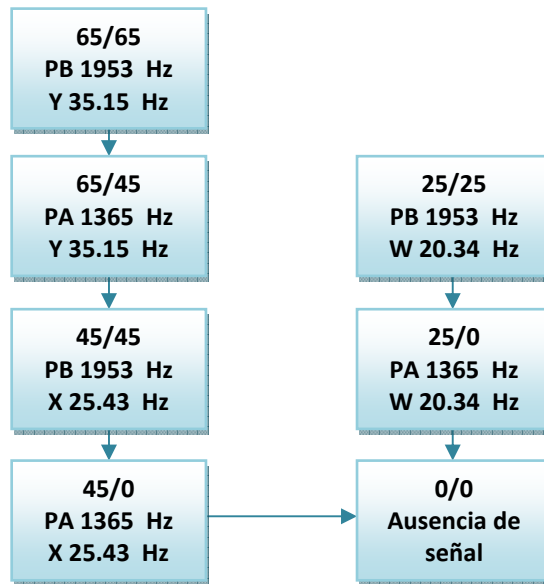


Tabla 5 Árbol de códigos de velocidad VMAX/VOBJ en Línea 4.

Imagen: elaboración propia.

La figura 71 muestra la secuencia de activación de códigos de ATP para un tren circulando en Línea 4 con itinerario establecido. En amarillo se pintan los CV que disponen de códigos VMAX/VOBJ para permitir el avance del tren, en blanco los códigos disponibles en cada CV, pero que aún no han sido enviados por el Transmisor de ATP. En el caso hipotético que todos los CV tuvieran asignados los mismos códigos de velocidad máxima 65/65, el enclavamiento protegería el avance del tren calculando unos códigos descendentes a partir de la señal de apertura del itinerario, 65/45, 45/0 y 0/0, que se van normalizando a medida que la distancia con respecto al tren se hace lo suficientemente segura.

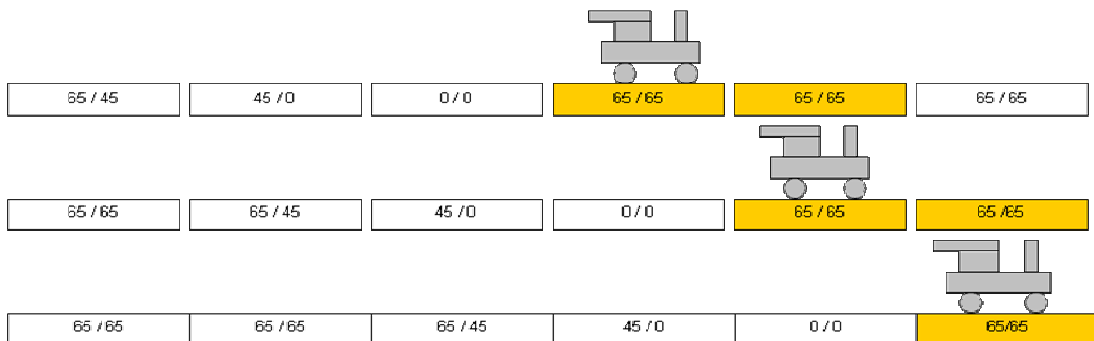


Fig. 71 Secuencia de activación de códigos de velocidad en Línea 4.

Imagen: elaboración propia.

Aunque la representación de las velocidades máxima y objetivo están fijadas en valores constantes, según el árbol de escalones de velocidad, el comportamiento real del tren no es tan estricto. Esto es debido a las numerosas variables que intervienen en el proceso, tales como las condiciones de vía, el juego tracción-frenado del tren, el intercambio de datos entre equipo ATP embarcado y la unidad TBS del tren, etc. En la gráfica de la figura 72 se han representado las curvas reales de velocidad de un tren en movimiento, en función de las VMAX/VOBJ que ha de cumplir.

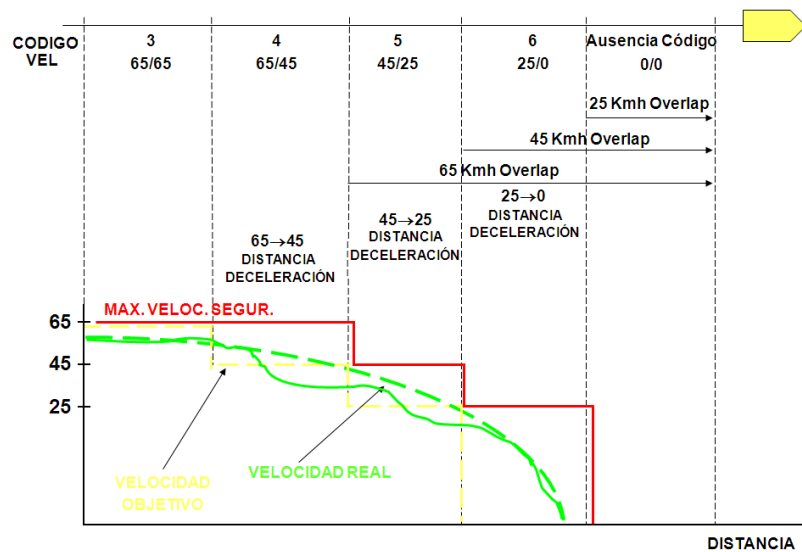


Fig. 72 Curvas de velocidad con códigos ATP.

Imagen: elaboración propia.

A medida que la velocidad del tren se aproxima a los límites máximos permitidos, tanto de VOBJ como de VMAX, se emiten avisos acústicos y en el velocímetro aparecen indicaciones para avisar al conductor que debe reducir la velocidad. Como veremos en el apartado dedicado al ATP embarcado, el equipo de tren actúa inhibiendo tracción en caso de que se supere la VOBJ y aplicando frenado de emergencia en caso de sobrepasar la VMAX.

Es común utilizar dobles códigos de ATP en los circuitos de vía de andén, de manera que el tren tenga una VOBJ_1 cuando penetra en dicho CV y de una VOBJ_2=0 en el momento que libera el CV anterior. Este sistema permite al conductor más flexibilidad para realizar una parada precisa, ya que si el CV de andén obliga a una VOBJ=0 constante, la curva VOBJ desciende tan bruscamente al cambiar de CV que si la inclinación de la vía es negativa, al inhibirse la tracción, incluso podría haber problemas en alcanzar el punto de parada establecido. En Metro de Barcelona la velocidad máxima permitida en los CV de andén es de 50 km/h, siendo el código 50/50 a la entrada del tren y cambiando a 50/0 cuando se libera completamente el CV anterior.

El sistema de señalización de L2 dispone de un ATP más evolucionado, además de un sistema de conducción automática ATO, ambos suministrados por DIMETRONIC. El enclavamiento es el núcleo del sistema, encargado de ejecutar los algoritmos que tiene programados, en caso de enclavamiento de tipo electrónico, o de ejecutar la lógica de relés, en caso de enclavamiento de cableado libre. Mediante los módulos controladores de objetos se intercambia información con circuitos de vía, accionamientos y señales.

La unidad FS2550 5k es el modelo de circuito de vía utilizado en trayecto y para el ATP en zona de agujas. Se utilizan 8 versiones diferentes de TX FS-5k, que se corresponden con 8 frecuencias entre 4080 Hz y 6000 Hz, en pasos de 240 Hz. Aunque el equipo es capaz de generar también moduladoras internas, se utiliza una fuente externa para generar la señal moduladora, que mediante la técnica de desplazamiento en frecuencia FSK, modulará a la portadora en el TX y se enviará a la TU de transmisión situada en la vía.

En zona de agujas y cruzamientos se utiliza el modelo FS2550 2k para la detección de ocupación de circuito, cuyo TX es capaz de generar 4 frecuencias portadoras de entre 1700 Hz y 2600 Hz, en pasos de 240 Hz, además de 4 frecuencias moduladoras, entre 13,2 Hz y 20,4 Hz, en pasos de 2,4 Hz. En cualquier caso, sólo se utilizan combinaciones de las portadoras 1 (1700 Hz) y 3 (2300 Hz) con la moduladora Q (15,6 Hz).



Fig. 73 Detalle del bastidor de CVSJ FS2550 5k en sala de enclavamiento de Clot L2.

Imagen: elaboración propia.

Aunque el modelo CVSJ FS2550 2k y 5k está mayoritariamente instalado en L2 y L5, se conservan todavía modelos antiguos FS2000 y FS5000, cuyo comportamiento es análogo al descrito para el FS2550. Ambas tecnologías son compatibles, lo cual posibilita agotar la vida útil del modelo antiguo y sustituirlos gradualmente por el moderno a medida que se alcanza la obsolescencia del equipo.



Fig. 74 Bastidor con CVSJ FS5000 en sala de enclavamiento de Clot L2.

Imagen: elaboración propia.

La Track Code Output Module (TCOM) es la fuente externa de modulación en los enclavamientos de tipo electrónico WESTRACE. La TCOM proporciona una señal portadora de 2000 Hz que se modula en ASK con 14 frecuencias moduladoras, en pasos de 4 Hz. El TX elimina la portadora de la TCOM y extrae la frecuencia moduladora, que utiliza para modular en FSK la portadora propia del CV. En los enclavamientos de relés, el Módulo Generador de Códigos FST2500 proporciona las frecuencias de modulación, las mismas que las TCOM.



Fig. 75 Tarjetas TCOM en sala de enclavamiento de Clot L2.

Imagen: elaboración propia.

Cada circuito de vía tiene asignada una portadora a través del TX correspondiente. La distribución de frecuencias portadoras en vía 1 es V, W y M y en vía 2 Y, X y K, que se van repitiendo cada 3 CV. El canal L y Z se reservan para zona de agujas y cruzamientos. De esta manera, el TX envía siempre la señal con la frecuencia portadora que tiene asignado el CV. Esta señal se envía siempre, al contrario que el sistema de L4, donde en situación nominal sin itinerario establecido, hay una ausencia de señal en vía. La moduladora por defecto, venga de la TCOM o del CGM, es una señal de frecuencia 80 Hz, que en el TX se combina en FSK con la portadora para ser enviada a vía.

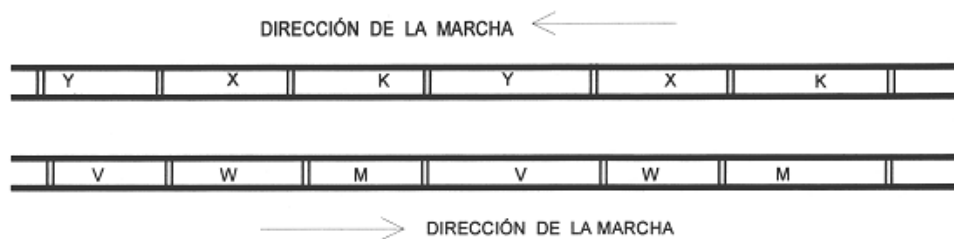


Fig. 76 Distribución de canales asignados a los circuitos de vía.

Imagen: elaboración propia.

Ante la petición de un itinerario, mediante ciclos automáticos o telemando de tráfico, el enclavamiento ejecuta la lógica programada o de relés, mandando la señal inicio de itinerario y activando el aspecto verde o amarillo de dicha señal, siempre que se cumplan todas las condiciones de señalización y seguridad necesarias. El itinerario está entonces establecido, pero el enclavamiento aún no ha conmutado de la moduladora M14 (80 Hz) a la correspondiente del código de velocidad VMAX/VOBJ.

En el instante en que el tren invade el circuito de vía y sus ejes shuntan los carriles, el RX deja de recibir señal y el enclavamiento conmuta de moduladora activando la que contiene información VMAX/VOBJ diferente de 0/0. La señal de ATP con códigos también se envía al CV inmediatamente posterior al ocupado, garantizando así la circulación del tren cuando el tren abandona un CV para entrar en el siguiente. El CV justo detrás del ocupado por el tren siempre mantendrá la modulación M14 (80 Hz) indicando un 0/0, como colchón de seguridad.

La tabla 6 muestra el árbol de 14 códigos de velocidad disponible en la tecnología ATP de Línea 2. En Metro de Barcelona el paso por agujas está limitado a una velocidad máxima de 35 km/h, utilizándose las portadoras L y Z más la moduladora M9 (60 Hz) para los desvíos.

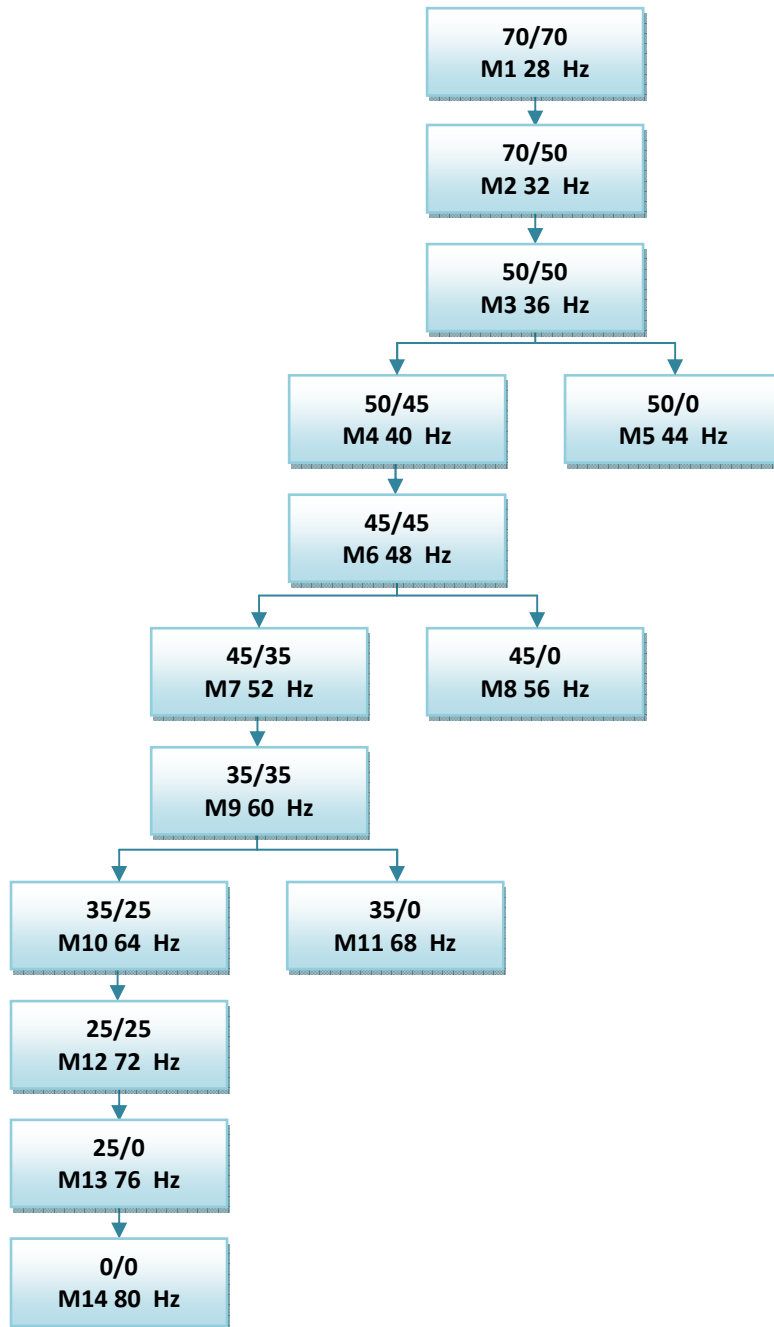


Tabla 6 Árbol de códigos de velocidad VMAX/VOBJ en Línea 2.

Imagen: elaboración propia.

Es importante recalcar que la señal de ATP no es un código de velocidad en sí misma, sino que será el equipo ATP del tren, convenientemente programado, el que interpretará la señal moduladora FSK como valores de velocidad VMAX/VOBJ.

La secuencia de activación de códigos de ATP cuando un tren, con itinerario establecido, está circulando en L2 es análoga a la descrita para L4. La diferencia principal es que al disponer de una cantidad de códigos mayor gracias a la tecnología FM, los cambios de velocidad son menos bruscos y se optimiza la curva de conducción en ATO, mejorando el intervalo y el confort para el pasaje. En la figura 77 se muestra como el avance del tren A está protegido por un circuito de vía colchón con códigos 0/0. El tren B dispone de códigos descendentes a partir de la señal de inicio de itinerario, que nunca le permitirían sobrepasar la distancia de seguridad respecto el tren precedente.

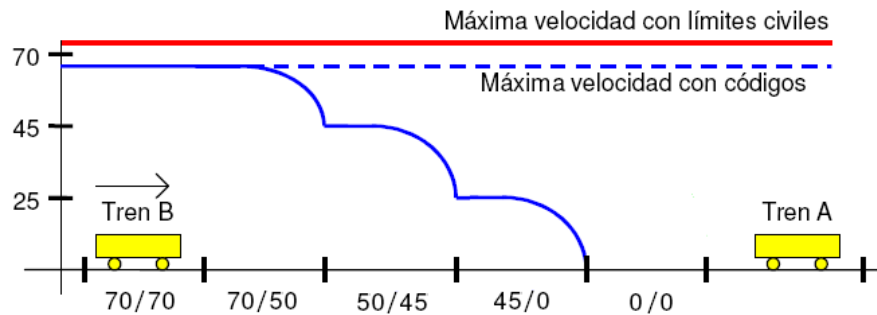


Fig. 77 Curvas de velocidad ATP con circulación de dos trenes.

Imagen: fuente propia.

La Moviola es un PC conectado directamente con el WESTRACE, capaz de grabar en tiempo real y reproducir posteriormente multitud de eventos y alarmas acaecidos durante la circulación diaria. La figura 78 muestra una captura de pantalla de la Moviola del enclavamiento de Clot de L2. Las señales lucen en aspecto verde cuando tienen itinerario establecido y en rojo cuando no. La ocupación del circuito de vía se pinta en rojo y los códigos VMAX/VOBJ se representan encima de cada CV.

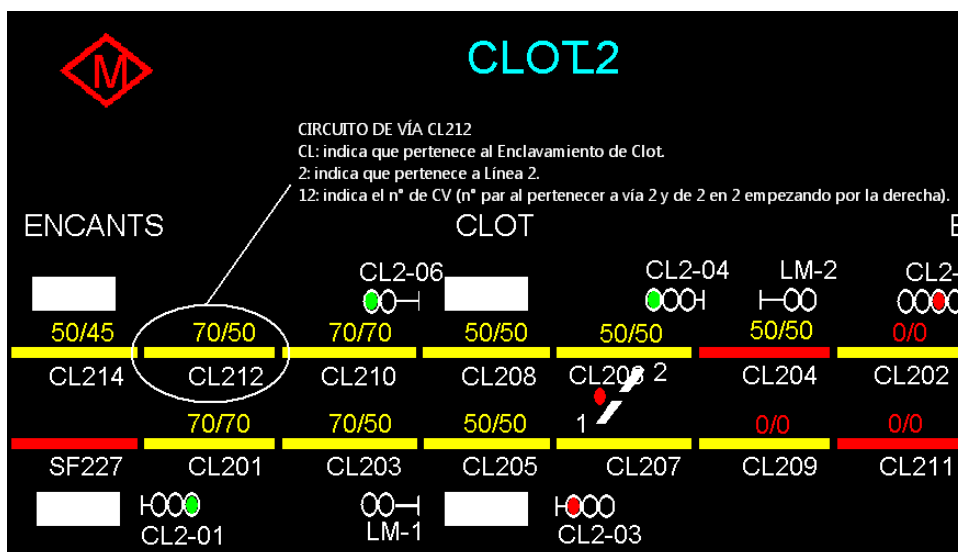


Fig. 78 Captura de pantalla de Moviola en enclavamiento de Clot L2.

Imagen: elaboración propia.

4.4.4 Enclavamiento electrónico WESTRACE

INVENSYS RAIL DIMETRONIC es una empresa española de señalización ferroviaria, con sede central en Madrid y delegaciones en varios puntos de la península, además de en el extranjero (Portugal, Turquía, Venezuela y Brasil). Su actividad se centra en el diseño, fabricación, suministro, instalación, puesta en servicio y mantenimiento de equipos de control y sistemas de señalización, permitiendo la gestión del tráfico ferroviario de una manera segura y eficiente.

DIMETRONIC nace en 1978, a raíz de la escisión de DIMETAL, poseedora de las licencias de la compañía WESTINGHOUSE BRAKE AND SIGNALS, establecida en España desde 1949. Tras muchos cambios en los siguientes años, en 2001 se crea INVENSYS RAIL, grupo en el que se integra INVENSYS RAIL DIMETRONIC.

DIMETRONIC es el fabricante del enclavamiento de tipo electrónico WESTRACE, instalado en L2, L5, L9, L10 y L11 de la red de Metro de Barcelona, con diferentes funcionalidades y alcance según el caso.

El WESTRACE (Westinghouse Train Radio and Advance Control Equipment) es el núcleo del sistema de señalización ferroviaria, encargado de llevar a cabo las funcionalidades de ATP Tierra. Se compone de uno o varios bastidores donde se alojan una serie de tarjetas electrónicas, que contienen por un lado la lógica o datos que definen la funcionalidad del enclavamiento y por otro lado las entradas y salidas con las que se comunica con los elementos de campo (señales, agujas, circuitos de vía...), para enviarles órdenes y recibir indicaciones de su estado real. Este conjunto de tarjetas constituyen la parte vital del WESTRACE, garantizando la seguridad de las circulaciones con un nivel SIL 4.

Distinguimos el módulo principal, que contiene el procesador central con la lógica y datos del enclavamiento, y los módulos vitales de entrada y salida. A través de los módulos de entrada se reciben indicaciones de los elementos de vía (circuitos de vía, accionamientos de agujas, etc.) y mediante los módulos de salida se transmiten órdenes a los distintos elementos de campo (accionamientos, señales luminosas, etc.).



Fig. 79 Enclavamiento electrónico WESTRACE de DIMETRONIC.

Imagen: Introducción al WESTRACE v1.0. Documentación técnica para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A.

La parte no vital del WESTRACE la forman la SCANNER41 y las DIP's y DOP's. Estos equipos se encargan de hacer de interface entre el Cuadro de Mando Local (CML) y el WESTRACE, en ambos sentidos. También se utiliza la SCANNER41 para la conexión con el Puesto Central de Control (PCC) o Control de Tráfico Centralizado (CTC). Cualquier fallo en estas tarjetas no supone ninguna amenaza para la seguridad, ya que el WESTRACE no ejecutará las órdenes que puedan ser una amenaza para la misma.

La figura 80 resume un ciclo completo en el WESTRACE, en el siguiente orden:

1. Se genera una orden, desde el CML o el PCC.
2. La SCANNER41 lee esa orden a través de las DIP's o directamente (PCC).
3. La SCANNER41 analiza la posible viabilidad de la orden. Es como un filtro para cuando, debido a equivocaciones en las pulsaciones sobre el CML, no merece la pena que dicha orden prospere.
4. En caso de que la orden prospere, se envía por un enlace no vital, al WESTRACE.
5. El WESTRACE interpreta la orden y gracias a que posee el estado del enclavamiento de forma vital, procesa la lógica programada y genera una serie de salidas vitales al campo.
6. En consecuencia, el WESTRACE, mediante un enlace no vital, envía a la SCANNER 41 las indicaciones que se deben actualizar en el CML.
7. La SCANNER41, a través de las DOP's, actualiza en el CML los elementos que indican el nuevo estado del enclavamiento.

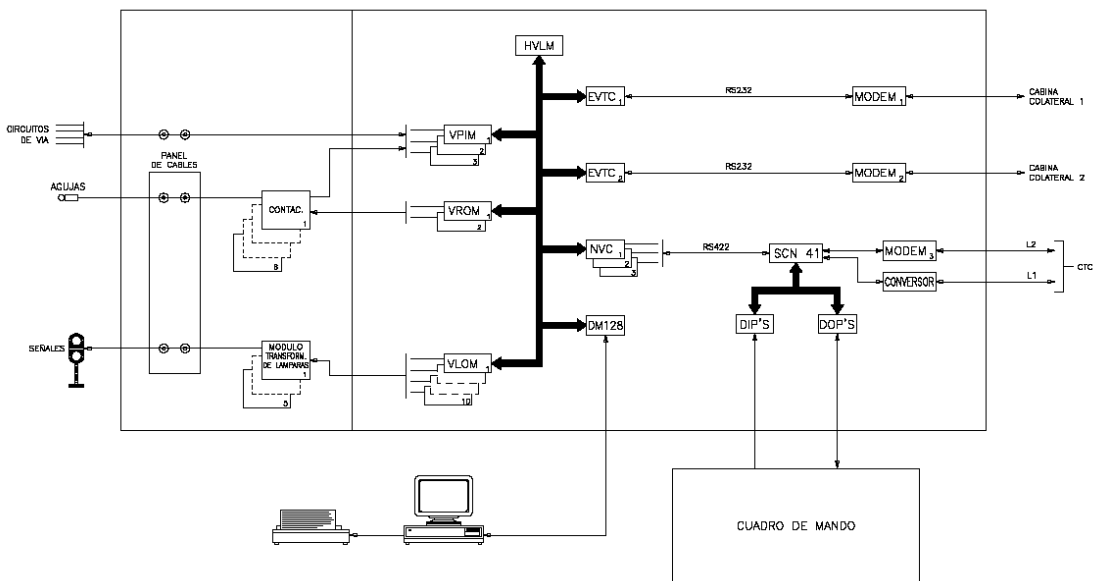


Fig. 80 Diagrama de bloques de un enclavamiento WESTRACE.

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

Los módulos que forman el WESTRACE se introducen en bastidores de 19" que se componen de uno a cuatro racks de 6 U, según los requerimientos del sistema¹⁴. Las entradas y salidas externas desde los Módulos de Filtro y Protección (PFM) asociados se conectan a la parte de abajo y por detrás de cada módulo de WESTRACE.

¹⁴ Rack o bastidor: soporte metálico destinado a alojar equipamiento electrónico, informático o de comunicaciones. Las especificaciones de un rack estándar se encuentran en las normas DIN-41494, UNE-20539, IEC-297 y EIA-310D, siendo el más usual de 2000 x 600 x 800 mm. (alto x ancho x fondo). Las columnas verticales miden 15,875 mm. de ancho, formando un total de 31,75 mm. (5/4"). Están separadas por 450,85 mm. (17 3/4") sumando un total de 482,6 mm. (exactamente 19"). Cada columna tiene agujeros a intervalos regulares llamados Unidad rack (U) agrupados de tres en tres. Fuente: www.wikipedia.org.

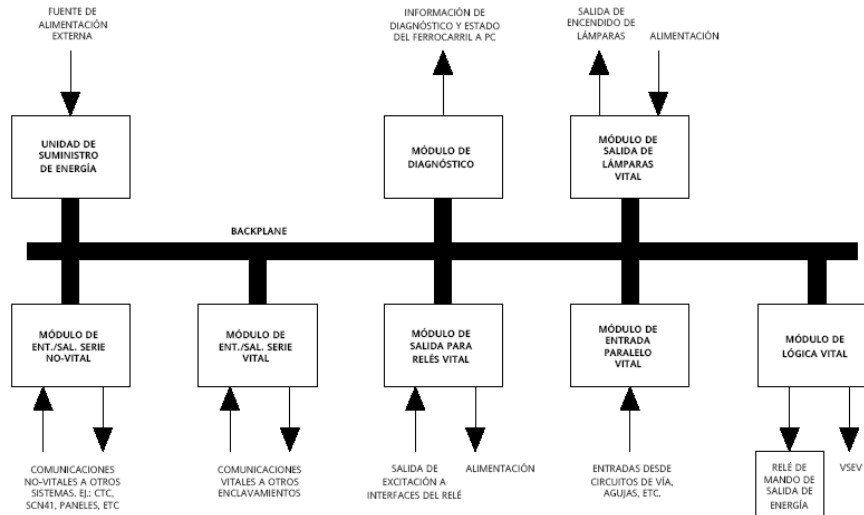


Fig. 81 Diagrama de bloques del equipo de lógica vital del WESTRACE.

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

El Módulo de Lógica Vital Ampliada (HVLM) proporciona el procesador central del Equipo de Lógica Vital (VLE) y se compone de dos tarjetas electrónicas conectadas mediante backplane:

- Tarjeta de Control de Lógica Vital Ampliada (HVLC): es el procesador central, contiene los datos específicos de la instalación o Datos del Elemento de Configuración (CED) en FLASH's EPROM's¹⁵. Dispone de dos inserciones de fibra óptica que pueden utilizarse para conectar dos equipos de WESTRACE en configuración de reserva (hot stand-by).
- Tarjeta de Control de Salida de Energía (OPC): bajo control del HVLM, genera el voltaje de excitación al Relé de Control de Salida de Energía (OPCR) y el Voltaje Vital para Comunicaciones Serie (VSEV). El VSEV se utiliza para autorizar los Módulos de Comunicaciones Vitales Serie.

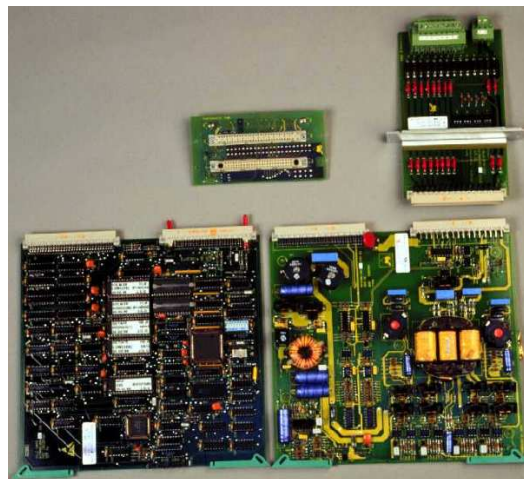


Fig. 82 Módulo de Lógica Vital Ampliado (HVLM128) con filtro HOPC PFM y backplane HVBC.

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

¹⁵ EPROM: Erasable Programmable Read-Only Memory o Erasable Programmable ROM. Es un tipo de chip de memoria ROM no volátil, que puede ser leída, programada y borrada, formada por celdas de FAMOS (Floating Gate Avalanche-Injection Metal-Oxide Semiconductor) o "transistores de puerta flotante".

El Módulo de Entrada Vital en Paralelo (VPIM) proporciona un interfaz del VLE para las entradas de la señalización (receptores de los circuitos de vía y posición de agujas). Cada módulo VPIM dispone de 12 canales de entrada. Una instalación WESTRACE se monta con el número de VPIM's apropiado al número de entradas que se precisen, siendo el máximo de 26 por WESTRACE.

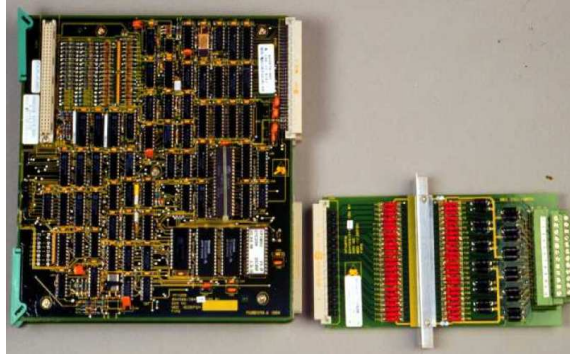


Fig. 83 Módulo de Entrada Vital Paralelo (VPIM) con filtro VPIM PFM.

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

El Módulo de Salida Vital para Relés (VROM) proporciona un interface del VLE con los relés de la señalización. Cada módulo VROM dispone de 8 canales de salida. Una instalación WESTRACE se monta con el número de VROM's apropiado al número de salidas que se precisen, siendo el máximo de 26 por WESTRACE.

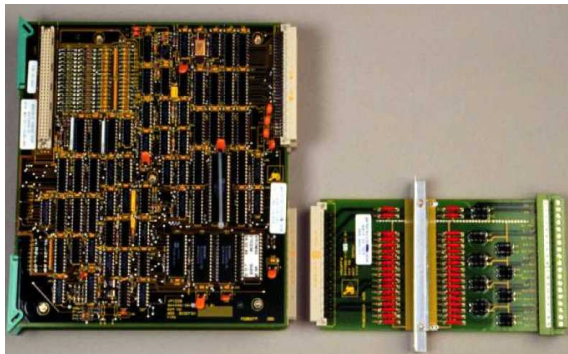


Fig. 84 Módulo de Salida Vital para Relés (VROM) con filtro VROM PFM.

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

El Módulo Vital de Salida para Lámparas (VLOM) proporciona un interface del VLE con las lámparas de señalización. Cada VLOM puede manejar 6 lámparas. Una instalación de WESTRACE se dota del número apropiado de VLOM de acuerdo con el número de lámparas de la misma, limitado con un número máximo de 26.

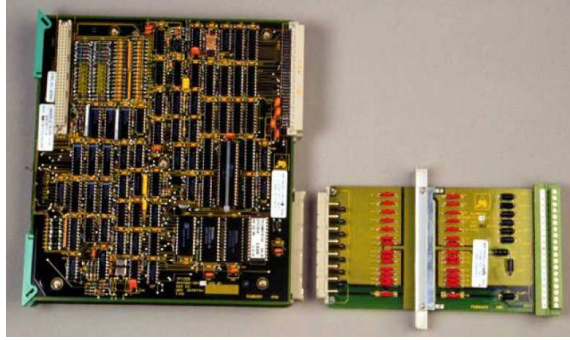


Fig. 85 Módulo Vital de Salida para Lámparas (VLOM) con filtro VLOM PFM.

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

El Módulo de Entrada/Salida Vital en Serie (VSIO) puede configurarse como módulo de Comunicaciones Vitales Continuo (VTC) o como módulo de Comunicaciones Vitales Intermitente (VTI). Para comunicaciones en serie entre instalaciones WESTRACE se usa un par de VTC's, una en cada instalación. La VTC se comunica continuamente, pudiendo transferir hasta 17 entradas vitales y 17 salidas vitales. Cada instalación WESTRACE puede incorporar hasta 8 VTC's. También existe el módulo de Comunicaciones Vitales Continuo Mejorado (EVTC), semejante a su predecesor VTC, pero con la diferencia de que el módulo EVTC puede transferir hasta 66 entradas vitales y 66 salidas vitales.

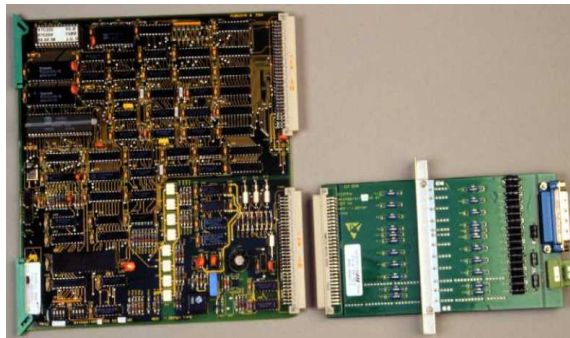


Fig. 86 Módulo de Comunicaciones Vitales Continuo Mejorado (EVTC) con filtro SIO232 PFM.

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

El Módulo de Comunicaciones No Vital (HNVC) proporciona un interface no vital en serie al sistema externo no vital, por ejemplo el Control de Tráfico Centralizado (CTC), el Cuadro de Mando Local (CML), etc. Cada HNVC puede recibir hasta 48 entradas y transmitir hasta 64 salidas. En una instalación WESTRACE se pueden montar un máximo de 10 HNVC's.

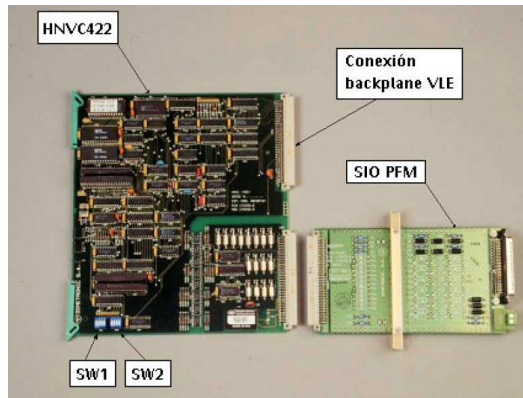


Fig. 87 Módulo de Comunicaciones No Vital (HNVC) con filtro SIO422 PFM.

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

El Módulo de Diagnóstico (DM128) proporciona un interface de registrador de cambios y un interface de diagnóstico vía dos puertos RS232-C. El interface de registrador de cambios es simplex y envía, vía su PFM asociado, información de cambios de estado y fallos para todos los módulos. Mediante estos interfaces se conecta la Moviola local y el PC del técnico para que pueda interrogar al WESTRACE acerca de su estado.

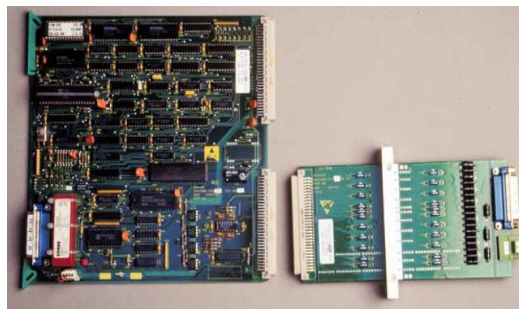


Fig. 88 Módulo de Diagnóstico 128 (DM128) con filtro SIO232 PFM.

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

La Unidad de Suministro de Energía (PSU) está alimentada desde un suministro de 24 Vdc, vía su PFM asociado. Desde este suministro de entrada, la PSU deriva al sistema suministros de potencia de +5V, +12V, -12V y +12V. Estos suministros alimentan a los demás módulos vía backplane de VLE. La PSU también genera la señal de reset.

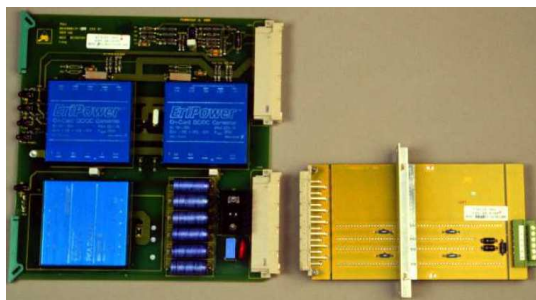


Fig. 89 Unidad de Suministro de Energía (PSU) con filtro PSU PFM.

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

El Módulo de Continuidad (BLANKER) tiene como objetivo mantener la continuidad de las señales vitales que comunican con los módulos del WESTRACE a través del backplane VLE.

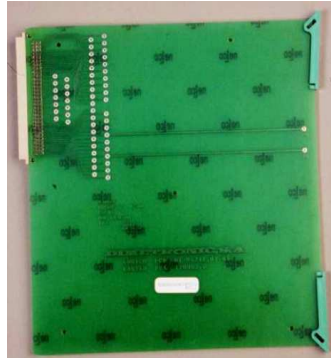


Fig. 90 Módulo de Continuidad (BLANKER).

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

El Módulo de Salida de Propósito General (GPOM) proporciona un interface del VLE con lámparas de señalización, relés y como elemento conmutador de códigos de ATP. Cada tarjeta GPOM dispone de 4 canales.

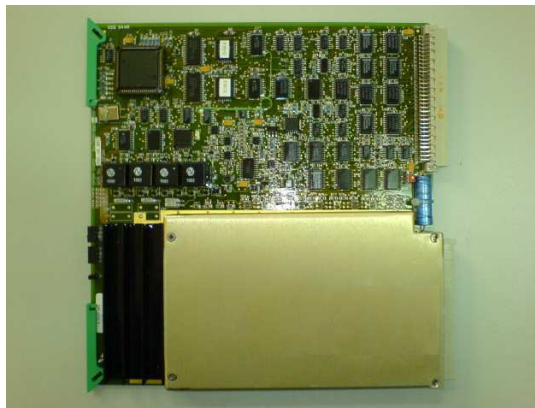


Fig. 91 Módulo de Salida de Propósito General (GPOM).

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

El Módulo de Salida de Códigos de Vía (TCOM) es una tarjeta de 2 canales que proporciona los códigos ATP para transmisores tipo FSK.

Con excepción del interface técnico en el DM128, todas las conexiones externas a la instalación del WESTRACE se hacen vía los PFM que están situados en la parte trasera de cada módulo de WESTRACE. Los PFM proporcionan un filtro para los transitorios de energía y además de Protección Electromagnética (EMC). Unas abrazaderas metálicas fijadas en el centro del PFM hacen que forma parte de la pantalla que rodea los módulos de WESTRACE.

En los WESTRACES modernos, se instala el Módulo de Comunicaciones por Red de WESTRACE (WNCM), compuesto por el Módulo de Lógica Vital (VLM) y el Módulo de Diagnóstico y Comunicaciones por Red (NCDM).

El Módulo de Lógica Vital (VLM6) realiza las siguientes funciones:

- Ejecutar la lógica programada.
- Supervisar la seguridad software y hardware del sistema.
- Supervisar fallos del sistema (códigos de error y descarga de cambios o fallos en el NCDM).
- Control de Salida a Relé de Energía (OPCR).
- Proporcionar tensión VSEV (24 Vdc comunicaciones vitales).

El VLM6 se compone de las siguientes tarjetas electrónicas conectadas mediante backplane:

- Tarjeta de Lógica Vital (VLC6): es el procesador central, contiene los datos y lógica vital del sistema.
- Tarjeta de Backplane Universal hot stand-by (UHVBC): backplane de puentes de configuración de la dirección del WESTRACE.
- Tarjeta de Control de Salida de Energía (OPC): genera el voltaje de excitación al Relé de Control de Salida de Energía (OPCR) y el Voltaje Vital para Comunicaciones Serie (VSEV).

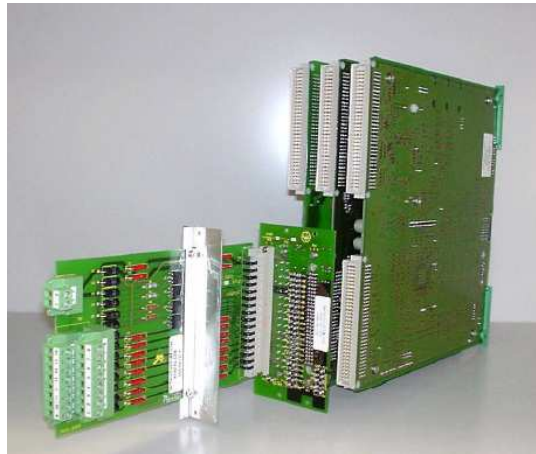


Fig. 92 Módulo de Lógica Vital (VLM6).

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

El Módulo de Diagnóstico y Comunicaciones por Red (NCDM) proporciona comunicaciones por red e interface serie, procesa lógica no vital y crea un registro de datos vitales y no vitales donde se graban todos los cambios y fallos que se producen en el sistema WESTRACE. El NCDM puede utilizarse para formar parte de un sistema WESTRACE o como un módulo procesador de lógica y de comunicaciones en stand-alone. Dispone de filtro propio PFM, para protección y puertos de comunicaciones no vitales.

La parte no vital del WESTRACE la forman las tarjetas SCANNER41, DIP y DOP. La tarjeta SCANNER41 o SCN41 conecta el enclavamiento con el Control de Tráfico Centralizado (CTC) y con el Cuadro de Mando Local (CML). Está situada en un chasis junto a las tarjetas DIP y DOP.

La SCN41 se encarga de leer las entradas proporcionadas por las DIP conectadas al CTC o CML, evaluar la lógica no vital que gestiona, realizar la comunicación serie con las tarjetas de comunicaciones no vitales del WESTRACE (HNVC's) y escribir la salida en las DOP conectadas al CTC o CML.

La SCN41 es una tarjeta configurable, esto es, que dependiendo de los datos que tenga almacenados, funcionará de un modo u otro. Tiene dos memorias EPROM para el código, dos memorias EPROM para los datos y un microprocesador programable.



Fig. 93 Tarjeta SCANNER41 con DIP y DOP en chasis.

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

Las tarjetas DIP hacen una conversión paralelo-serie desde el CML a la SCN41. Son tarjetas de entrada y normalmente se asigna una entrada de DIP a cada pulsador del CML o del Puesto Local de Operación (PLO). En instalaciones antiguas aún se usa el Cuadro de Mando Local, pero los enclavamientos modernos existe un PC llamado PLO, que realiza las mismas funciones en un entorno videográfico. Cada vez que se acciona sobre una de esas entradas, la DIP convierte sus entradas en paralelo a una salida serie para enviar a la SCN41. También puede utilizarse para recibir información paralela de lo más variadas: órdenes desde el CTC, eventos externos al CML o PLO, datos proporcionados por una DOP, etc.

Las tarjetas DOP, al contrario que las DIP, hacen una conversión serie-paralelo desde la SCN41 al CML o PLO. Son tarjetas de salida y normalmente se asigna una salida de DOP a un diodo o grupo de diodos LED del CML o indicadores luminosos en caso del PLO. Cada vez que la SCN41 desea actualizar la información representada en el CML o PLO, las tarjetas DOP reciben el mensaje serie y lo convierten en salidas paralelas a enviar al CML o PLO. También pueden ser utilizadas para generar información paralela de lo más variada: activación de zumbadores, activación de contadores, datos a proporcionar para una DIP, etc.

Cuando se quiere comunicar entre sí dos equipos WESTRACE que se encuentran a una distancia superior a 25 metros, se utiliza un módem. En la figura 94 se muestra como se conectan dos WESTRACE a través de sus tarjetas EVTC's. Entre la EVTC y el módem existe una comunicación estándar RS232-C y entre los módem una comunicación a 2 hilos y a 1200 baudios.

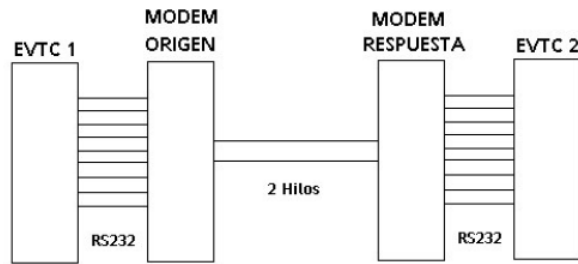


Fig. 94 Comunicación a dos hilos entre dos EVTC's.

Imagen: Manual de Mantenimiento WESTRACE v4.2. DIMETRONIC S.A. Junio 2007.

Existen dos tipos de instalaciones WESTRACE, la configuración stand-alone y la configuración hot stand-by. La primera corresponde a una instalación simple en la que un fallo vital conduce a la caída total del sistema.

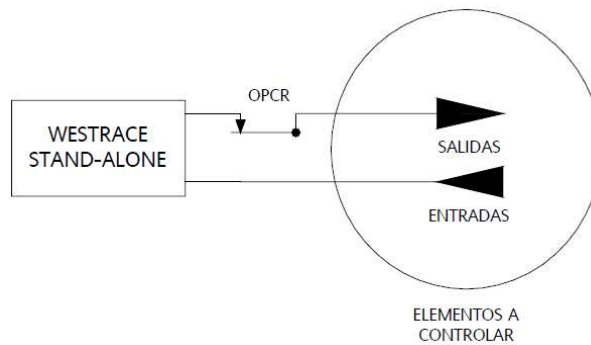


Fig. 95 Configuración WESTRACE stand-alone.

Imagen: elaboración propia.

La configuración hot stand-by utiliza el principio de "redundancia caliente", que consiste en disponer de dos unidades trabajando en paralelo (WESTRACE A y B). Sólo una de ellas está activa en un momento dado, por ejemplo el WESTRACE A, mediante el relé OPCR A activado. Ante un fallo vital de esta unidad, se produce la conmutación inmediata sobre el WESTRACE B, desactivándose el OPCR A y activándose el OPCR B, de manera transparente al entorno de operación. El operador de mantenimiento tiene también la posibilidad de forzar la conmutación de una unidad a otra, ya sea para eliminar alarmas residuales, averías latentes o como parte del mantenimiento preventivo.

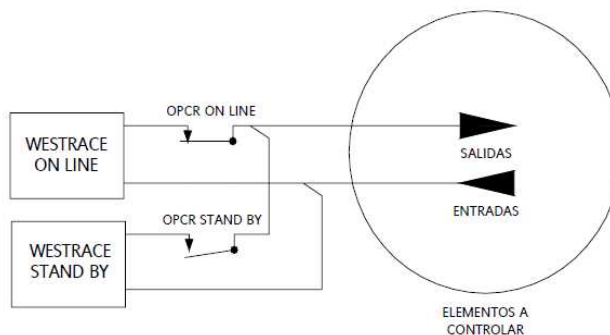


Fig. 96 Configuración WESTRACE hot stand-by.

Imagen: elaboración propia.

4.4.5 Automatic Train Operation (ATO)

El sistema de Operación Automática de Trenes o Automatic Train Operation (ATO) tiene como misión fundamental controlar el tren de manera automática desde que sale de una estación hasta que llega a la siguiente. En modo de conducción ATO, el conductor sólo se encarga de abrir o cerrar las puertas y autorizar la salida del tren mediante unos pulsadores en el pupitre de conducción. La programación del sistema ATO consigue obtener las máximas prestaciones que permite la vía y una alta precisión de parada en andenes.

Las principales funcionalidades de las que dispone el sistema ATO de Línea 2 son las siguientes:

- Arranque automático del tren.
- Regulación de la velocidad en función de la velocidad objetivo marcada por los códigos ATP y las restricciones de velocidad en tramos concretos de la vía. La optimización de las curvas de velocidad consiguen minimizar los arranques y frenazos bruscos producto de la conducción manual, aumentando el nivel de confort y calidad. Además, la aplicación de derivas aumenta la eficiencia y reduce el gasto energético.
- Gestión del salto de estación.
- Parada ante señal en aspecto rojo.
- Parada en un punto fijo de estación con un margen de error de ± 1 m. aproximadamente.
- Detección de marcha atrás.
- Reposicionamiento del tren por la lectura de balizas.
- Comunicación entre vía y tren mediante balizas.

El sistema ATO se basa, tanto desde el punto de vista de la seguridad como de intercambio de información, en la existencia de un sistema ATP Tierra y Embarcado.

El ATO está formado por unos equipos en salas técnicas, llamados Equipos de Vía Con Enclavamiento (EVCE) o Equipos de Vía Sin Enclavamiento (EVSE), dependiendo si están ubicados en la misma sala donde se encuentra el enclavamiento de relés o el electrónico. Estos equipos envían información a los trenes a través de unas balizas situadas en la vía, la unidad de alimentación de lazo o Loop Control Unit (LCU) y el lazo de ATO que se extiende en paralelo a los carriles. Por otra parte, recibe la información de la estación que controla desde el Puesto Central de Control (PCC) a través de un canal serie normalizado.

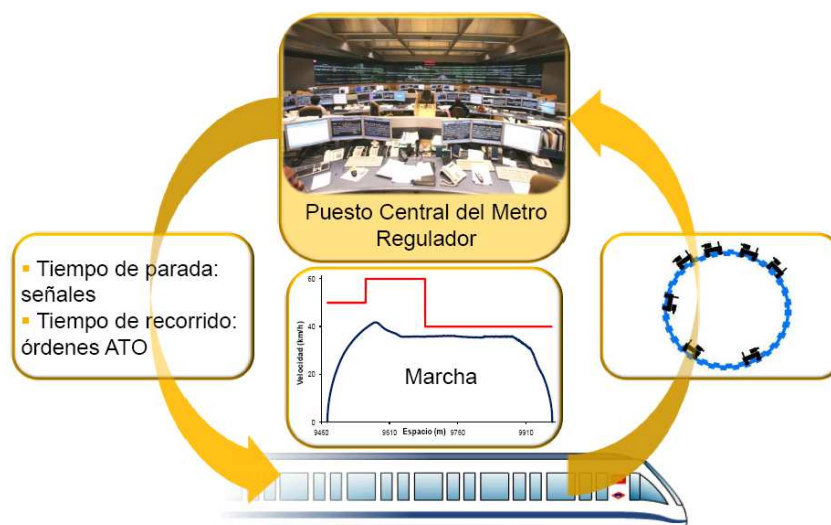


Fig. 97 Regulación del tráfico en ATO.

Imagen: Optimización energética de marchas ATO. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Madrid. Julio 2010.

En la Línea 2 de Metro de Barcelona, el sistema de Regulación del Tráfico (RDT) es el encargado de realizar los cálculos necesarios para mantener un intervalo constante en los trenes que están en servicio en cada momento. El RDT envía en tiempo real a cada tren las órdenes de marcha ATO cuyo tiempo de recorrido asociado mejor se ajusta a los tiempos de recorrido objetivo que calcula el algoritmo de regulación de tráfico en función del retraso o adelanto de cada tren. Para ello, el RDT dispone de una tabla con las marchas y los tiempos ATO prediseñados para cada interestación. Cada una de estas marchas es el resultado de una combinación de los parámetros de configuración del equipo ATO embarcado.

El RDT, dependiendo del retraso o adelanto acumulado de los trenes, envía al equipo fijo de ATO (EVCE o EVSE) una consigna de marcha válida hasta la siguiente estación. Existen cuatro consignas de marcha para el tren:

- Marcha rápida (M0).
- Marcha normal (M1)
- Marcha moderada (M2).
- Marcha lenta (M3).

Es importante un diseño óptimo de las marchas de regulación ATO, que permita aprovechar la infraestructura para lograr un menor intervalo. De igual modo, también es importante el nivel de confort para los pasajeros y el ahorro energético. El ATO contribuye al ahorro energético de dos maneras:

- Durante las horas valle donde no se requiere un intervalo ajustado, los trenes circulan en marcha lenta (M3) o moderada (M2), siempre que no hayan retrasos detectados por el RDT. En Línea 2 el intervalo está en algo más de 4 minutos en hora valle.
- Aplicación de derivas en la conducción automática para evitar el juego de tracción y frenado constante del motor del tren. El ATO Embarcado almacena los valores de deriva, remotor y freno asociados a cada orden de marcha y para cada interestación, por lo que el tren debe conocer siempre en qué interestación se encuentra.

La figura 98 muestra la curva de velocidad en una marcha con la aplicación de deriva o corte de tracción cuando el tren alcanza la velocidad de 80 km/h y de remotor o vuelta a la tracción cuando baja hasta 10 km/h. Si la curva de velocidad es más o menos plana, el esfuerzo que ha de hacer el motor del tren traccionando y frenando constantemente, produce un consumo mayor de energía eléctrica.

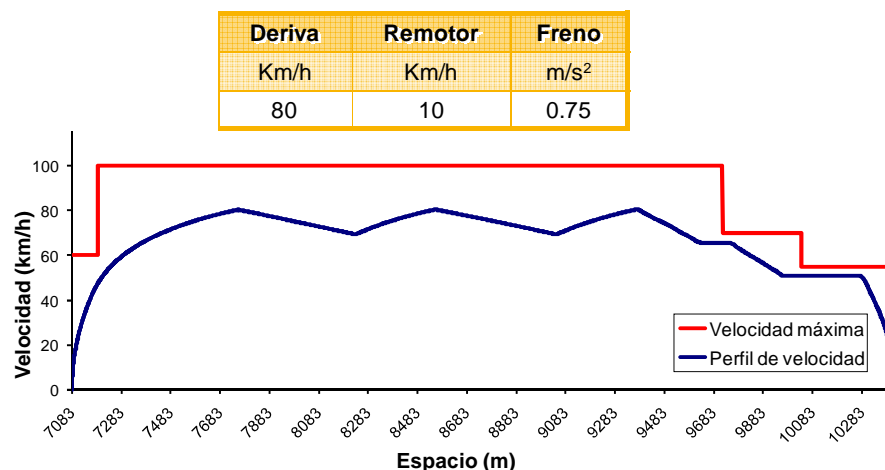


Fig. 98 Marcha con aplicación de consigna deriva y remotor.

Imagen: Optimización energética de marchas ATO. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Madrid. Julio 2010.

4.4.6 Equipo de vía ATO

Los equipos fijos de ATO en las salas técnicas se dividen en Equipos de Vía Con Enclavamiento (EVCE) y Equipos de Vía Sin Enclavamiento (EVSE). El sistema está preparado para recibir información de seguridad desde el enclavamiento y de no seguridad desde el telemando de tráfico, que contiene los siguientes datos variables:

- Programas de regulación, incluyendo deriva y remotor.
- Selección del punto de parada en estación.
- Petición de Vuelta Automática (VA).
- Petición de salto de estación.

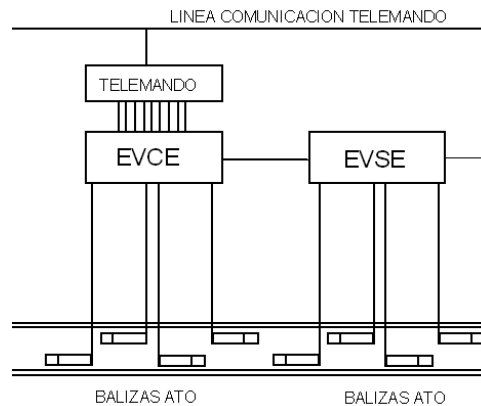


Fig. 99 Conexión del telemando de tráfico con el EVCE.

Imagen: elaboración propia.

El EVCE recibe la información variable que le llega desde el telemando de tráfico (CTC), a través del puesto satélite del enclavamiento, la procesa y la envía a los EVSE asociados que controlan las estaciones a la que va destinada dicha información. Si la información es para la estación controlada por el EVCE no es necesario enviarla a ningún equipo, tan sólo genera el mensaje a transmitir para cada una de las 4 balizas que controla.

El EVCE se compone de un rack de potencia que incluye:

- Fuente de Alimentación (FA) de 24 Vdc.
- Dos módem HFC de transmisión a balizas con frecuencia de transmisión de 36 Khz.
- Dos tarjetas Amplificadoras de Potencia (PA).

También se compone de un rack de lógica con los siguientes elementos:

- Fuente de Alimentación (FA) de 12+5 Vdc.
- Tarjeta de control SCANNER41 (SCN41).
- Tres tarjetas DIP. DIP1 para entrada de datos fijos, DIP2 para entrada de datos variables y DIP3 extra para posibles ampliaciones.
- Tarjeta DOP para salida de indicaciones.
- Módem HFC para comunicaciones EVCE-EVSE con frecuencia de transmisión de 8 Khz y de recepción de 28 Khz.

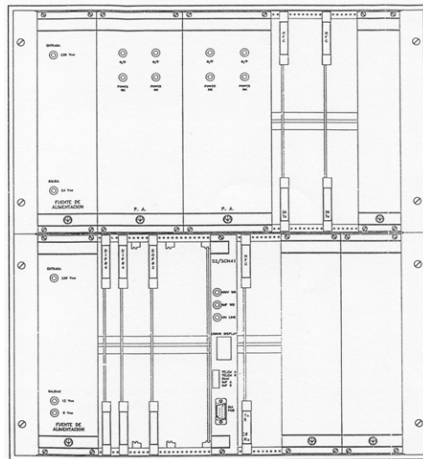


Fig. 100 Equipo de Vía Con Enclavamiento (EVCE).

Imagen: Curso ATO Vía para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A. Marzo 2006.

La información que recibe el EVCE está formada por una parte fija, que indica el código de la próxima estación, y una parte variable que llega desde el puesto satélite del enclavamiento, con la siguiente información:

- Programas de regulación: velocidad de regulación, parábola de frenado, aplicación de deriva y de tracción motora de tren.
- Indicación de lado de apertura de puertas de tren.
- Selección del punto de parada en estación.
- Petición de salto de estación.

Esta información pasa de la SCN41 al HFC para su transmisión a la baliza ATO de la estación que controla el EVCE. De igual modo, la información para las estaciones que cuelgan del EVCE se envía a través del módem HFC a los EVSE colaterales.

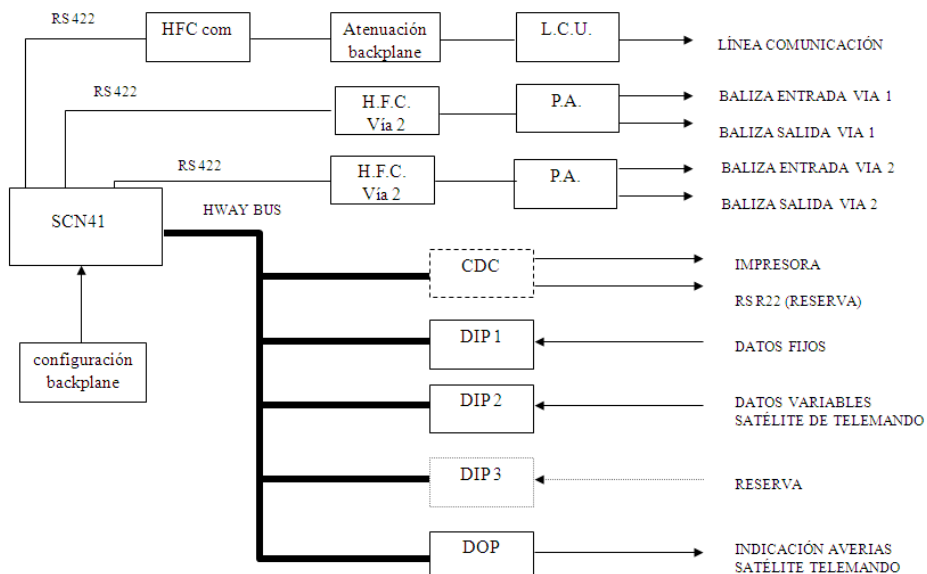


Fig. 101 Diagrama de bloques del EVCE.

Imagen: Curso ATO Vía para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A. Marzo 2006.

El EVSE se comunica con el EVCE para recibir los datos variables y enviar indicaciones de estado. Además, el EVSE genera el mensaje a transmitir para cada una de las 4 balizas que controla.

El EVSE se compone de un rack de potencia que incluye:

- Fuente de Alimentación (FA) de 24 Vdc.
- Dos módem HFC de transmisión a balizas con frecuencia de transmisión de 36 Khz.
- Dos tarjetas Amplificadoras de Potencia (PA).

También se compone de un rack de lógica con los siguientes elementos:

- Fuente de Alimentación (FA) de 12+5 Vdc.
- Tarjeta de control SCANNER41 (SCN41).
- Dos tarjetas DIP. DIP1 para entrada de datos fijos y DIP3 extra para posibles ampliaciones.
- Módem HFC para comunicaciones EVCE-EVSE con frecuencia de transmisión de 28 Khz y de recepción de 8 Khz.
- Tarjeta CDC para comunicaciones.

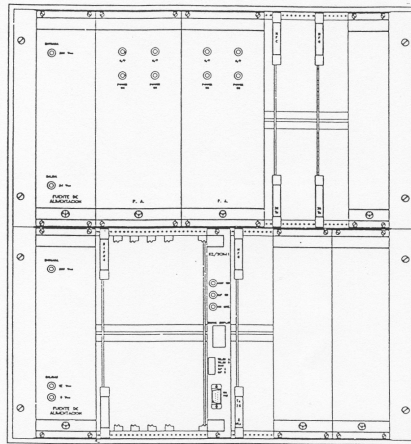


Fig. 102 Equipo de Vía Sin Enclavamiento (EVSE).

Imagen: Curso ATO Vía para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A. Marzo 2006.

Los datos fijos emitidos por la baliza son los siguientes:

- Línea: 5 bits.
- Estación: 6 bits.
- Vía: 1 bits.

Los datos variables son los siguientes:

- Parada en siguiente estación: 1 bit.
- Punto de parada en siguiente estación: 3 bits.
- Programas de marcha:
 - Velocidad de regulación o deriva: 4 bits
 - Velocidad remotora: 2 bits.
 - Parábola de frenado: 2 bits.
- Lado de apertura de puertas: 2 bits.
- Reservas: 9 bits.

4.5 Subsistema de tren

El tren es el vehículo donde los pasajeros se alojan para ser transportados de una estación a otra, es por tanto el objeto principal a proteger por el sistema de señalización. Los trenes utilizados en la red de FMB están impulsados por un motor eléctrico que se alimenta de la tensión que el pantógrafo¹⁶ capta de la catenaria¹⁷. Disponen de dos locomotoras en los extremos de la unidad, en configuración PUSH PULL (una en cabeza y otra en cola) y tres vagones intermedios con enganche.

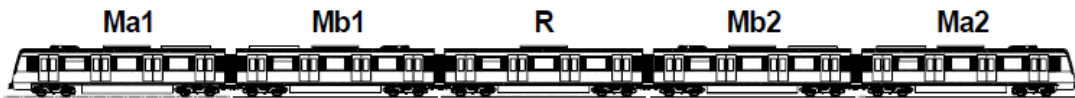


Fig. 103 Nomenclatura de coches en tren modelo S9000 de ALSTOM.

Imagen: Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero 2007.

El modelo S9000 fabricado por ALSTOM que circula en L2, L4, L5 y L9 de Metro de Barcelona se compone de cinco coches denominados Ma1, Mb1, R, Mb2 y Ma2, donde:

- Ma1 y Ma2 son coches motores con puesto de conducción y pantógrafo. Disponen, cada uno, de un enganche de unión automático en el extremo de cabina (para realizar la unión mecánica, neumática y eléctrica con otra unidad de tren).
- Mb1 y Mb2 son coches motores intermedios con pantógrafo.
- R es un coche remolque intermedio.

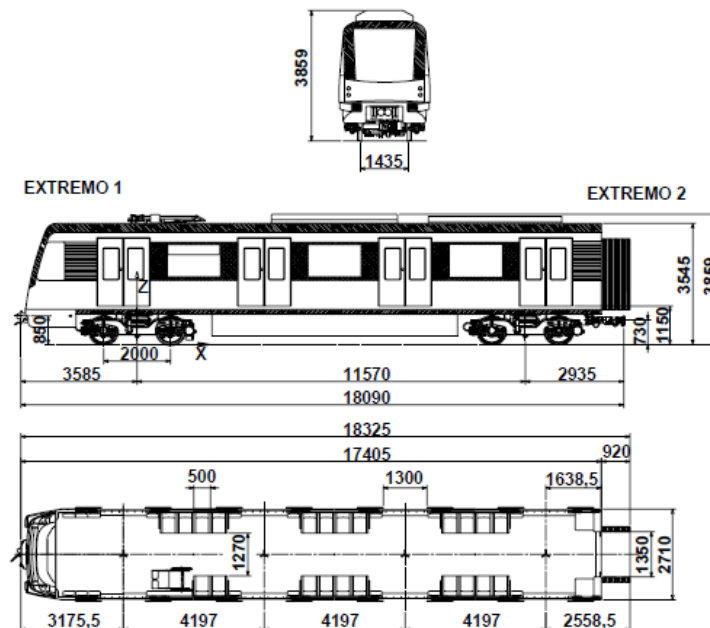


Fig. 104 Dimensiones del coche Ma del S9000.

Imagen: Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero 2007.

¹⁶ Pantógrafo ferroviario: mecanismo articulado que transmite la energía eléctrica y proporciona la fuerza de tracción necesaria para alimentar locomotoras, trolebuses, tranvías y otros vehículos. Fuente: www.wikipedia.org

¹⁷ Catenaria: línea aérea de alimentación que transmite energía eléctrica a la locomotora u otro material motor. La catenaria en Metro de Barcelona es del tipo rígida y la tensión de alimentación se sitúa entre 1200 y 1500 Vdc en corriente continua. En el circuito de alimentación del motor eléctrico, el polo positivo es la catenaria y el negativo son los carriles por donde circula el tren. El circuito eléctrico se cierra en la subcentral de tracción.

La longitud total del tren entre enganches es de poco más de 86 m., siendo las longitudes de los coches Ma de 18090 mm., Mb de 16788 mm. y R de 16338 mm., también entre enganches. El ancho de vía en todas las líneas de FMB es de 1435 mm., excepto en Línea 1 que es de 1668 mm. (ancho ibérico), por tanto la distancia entre ruedas del tren S9000 es de 1435 mm. también.

La línea de tracción es una catenaria rígida que transmite energía al pantógrafo del tren, de valor 1200 Vdc en líneas convencionales y 1500 Vdc en líneas automáticas, siempre en corriente continua. En el S9000 el pantógrafo está montado sobre los 4 coches motores Ma1, Ma2, Mb1 y Mb2. Su función principal es la de proveer energía de alta tensión, básicamente para los equipos de tracción, pero también para el sistema de suministro de energía auxiliar (convertidor estático auxiliar) que a su vez suministra energía eléctrica para todos los equipos del tren. El pantógrafo es del tipo de elevación neumática y descenso por resorte.

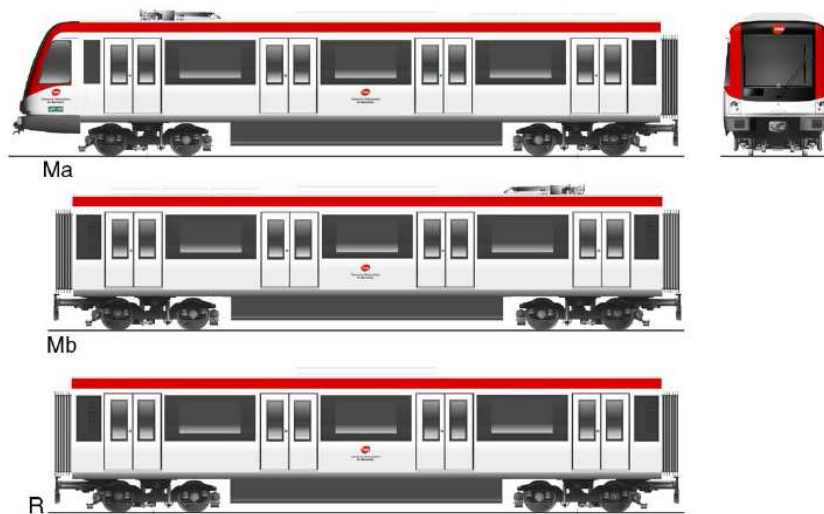


Fig. 105 Pintura exterior en trenes de Metro de Barcelona.

Imagen: archivo Proyectos de Señalización Ferroviaria FMB.

El tren S9000 está equipado con el sistema de asistencia a la conducción ATC-D de DIMETRONIC, que permite el control del tren en diferentes modos de conducción, y consta de varios equipos embarcados, instalados en el bastidor o en los diferentes armarios de aparatos. El conductor obtiene la información que necesita para la conducción a través del panel de mandos y el velocímetro. A su vez, el conductor actúa sobre el comportamiento del tren mediante el manipulador de conducción. La electrónica recibe las señales de las antenas instaladas en el tren, que captan la información procedente de las balizas instaladas en vía.

El manipulador de los trenes S9000 está instalado en la parte central del pupitre, en la cabina de conducción. Durante la conducción, la mano derecha del conductor permanece casi constantemente sobre la palanca principal, ya que así puede mantener pulsado el "hombre muerto" y puede pasar rápidamente a la posición de freno de emergencia. El manipulador se encarga de activar o desactivar el pupitre, seleccionar el modo de conducción y controlar el esfuerzo de tracción-freno del motor. Para ello, el conductor dispone de los siguientes elementos de mando:

- Llave de gobierno, situada en la parte izquierda e imprescindible que esté insertada y girada en la posición CONECTADO para que el tren pueda funcionar.
- Selector de modo de conducción, situado en la parte central izquierda, dispone de cinco posiciones estables dentadas: ATRÁS, CERO, TÚNEL DE LAVADO, MANIOBRA y ADELANTE.

- Palanca principal de control de esfuerzo, ubicada en la parte derecha del manipulador, con una posición de tracción y una de frenado, separadas por una posición dentada neutra. La maneta de la palanca acciona en su traslación los contactos y el potenciómetro, que sirven para regular la transmisión de potencia de tracción al motor del tren.

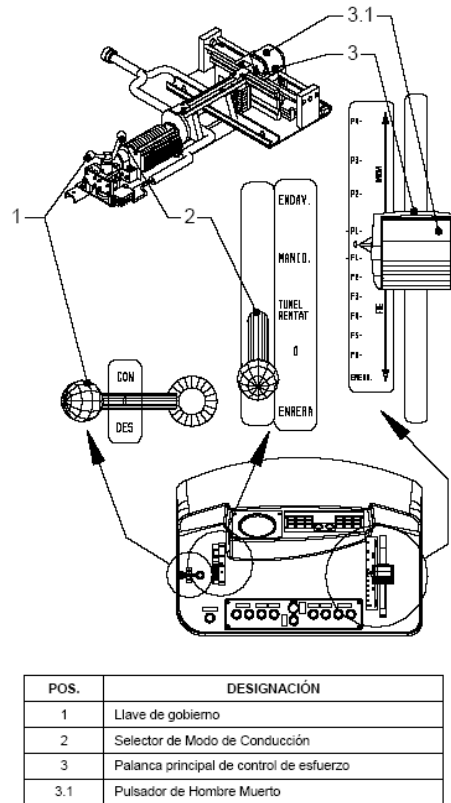


Fig. 106 Manipulador de conducción y acción sobre el esfuerzo motor.

Imagen: Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero 2007.

El TBS (Sistema Basado en la Transmisión de Datos) de ALSTOM interactúa con el tren a partir de la información que obtiene de los equipos embarcados ATP/ATO de DIMETRONIC, en modo códigos de velocidad VMAX/VOBJ. Las unidades TBS intercambian datos e información con los siguientes elementos externos, necesarios para el funcionamiento del sistema.

- Equipo de Interfaz con el Conductor (EIC): se instalan dos por tren, uno por cabina de conducción. El EIC recibe la información de los subsistemas TBS (ATP y ATO) y se la envía al conductor (mediante indicaciones luminosas, sonoras, etc.). Del mismo modo, el subsistema TBS recibe información del conductor (procedente de conmutadores, pulsadores, selectores, etc.). Todo esto se realiza para ayudar al conductor y al TBS en la conducción operativa del tren.
- Panel de mandos e indicaciones: está situado en el pupitre del conductor en cada cabina, contiene los elementos de selección de modos de conducción.

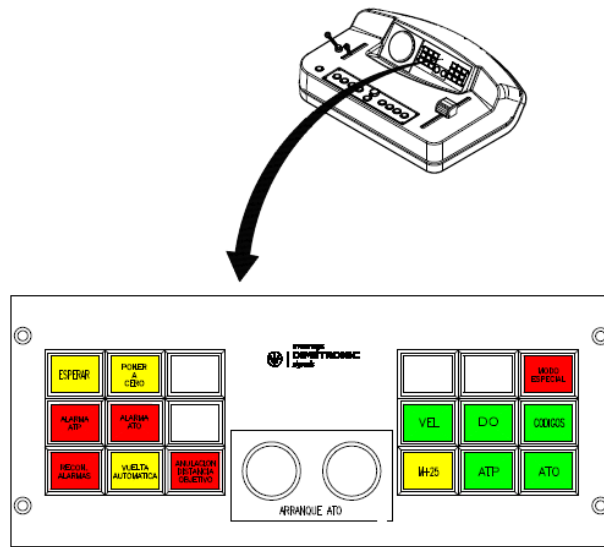


Fig. 107 Panel de mandos e indicaciones del ATC-D.

Imagen: Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero 2007.

- Velocímetro: está integrado en el panel de conducción del tren. La aguja interior marca la velocidad real del tren y la aguja exterior marca la velocidad objetivo (a la que debe aproximarse el conductor cuando se circula en modo ATP).

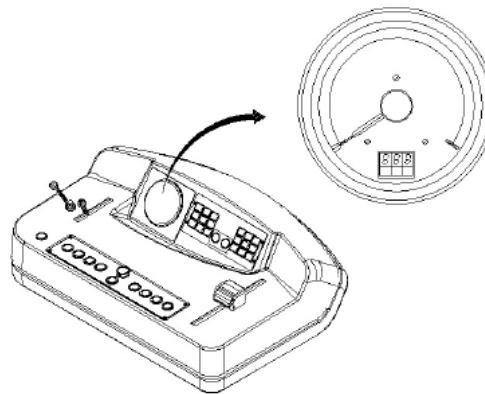


Fig. 108 Velocímetro en el panel de conducción.

Imagen: elaboración propia.

- Panel de auxilio: consiste en una placa que incluye el conmutador de RESET del equipo TBS y el conmutador de LLAVE ESPECIAL. Éste último en posición DES indica que el TBS (ATP/ATO) está condenado y en posición CON (circulación ordinaria) que el TBS (ATP/ATO) está en servicio.

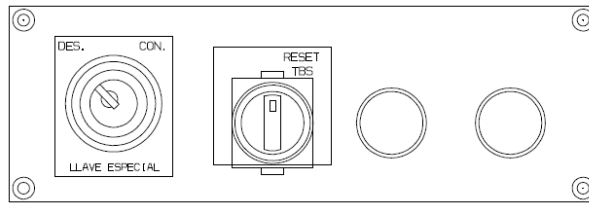


Fig. 109 Panel de auxilio ATC-D.

Imagen: elaboración propia.

- Equipo principal TBS: está situado en un cofre bajo bastidor del coche Ma1, e integra las unidades electrónicas encargadas de procesar las señales de velocidad del tren y códigos de la vía, para dar las órdenes de aplicación de marcha y freno, así como las informaciones ópticas y acústicas al Equipo Interfaz con el Conductor (EIC).

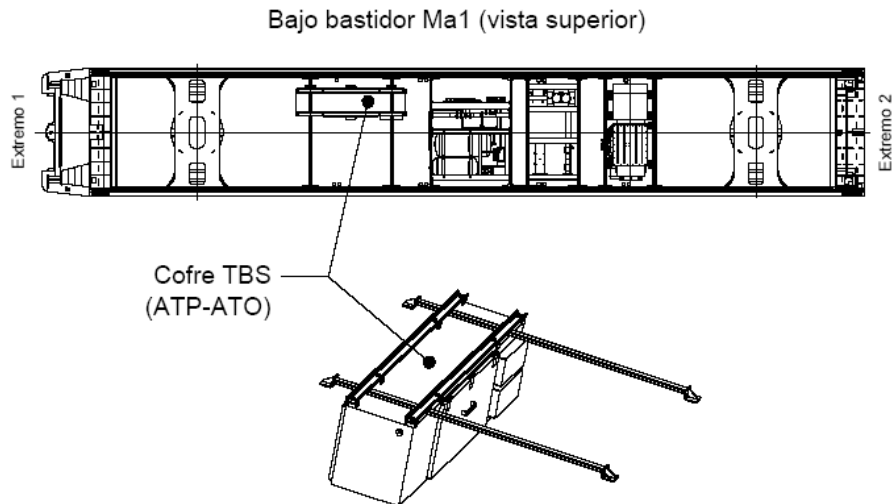


Fig. 110 Ubicación del cofre TBS (ATP-ATO) en coche Ma1.

Imagen: Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero 2007.

- Antenas de ATP: se instalan en el bogie sobre la perpendicular del carril a una altura aproximada de 150 mm. (190 mm. para rueda nueva). Su misión es captar el campo creado por la corriente de ATP (códigos de velocidad) que circula por los carriles delante del tren. Como cada tren puede circular en dos sentidos, se instala un juego de 2 antenas en cada uno de los bogies extremos, es decir, cada unidad llevará 4 antenas, 2 por bogie extremo del coche Ma1 y 2 en el coche Ma2.
- Antenas de ATO: se instalan paralelas y por delante de las antenas de ATP, a la misma altura que éstas. Su misión es captar los datos procedentes de los lazos o balizas de ATO instaladas en la vía y disponen de un canal adicional para captar códigos de ATP. La distribución es igual que las antenas de ATP.

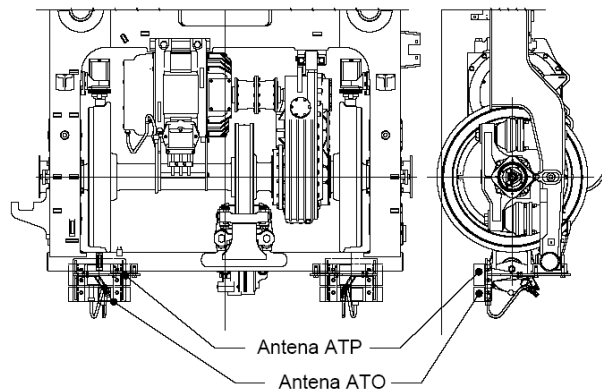


Fig. 111 Ubicación de antenas ATP y ATO en bogie extremo de coche Ma.

Imagen: Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero 2007.

- Tacogeneradores de ATP: tienen como misión la medida de la velocidad del tren. Cada tren dispone de 2 tacogeneradores instalados en uno los bogies del coche Ma1.

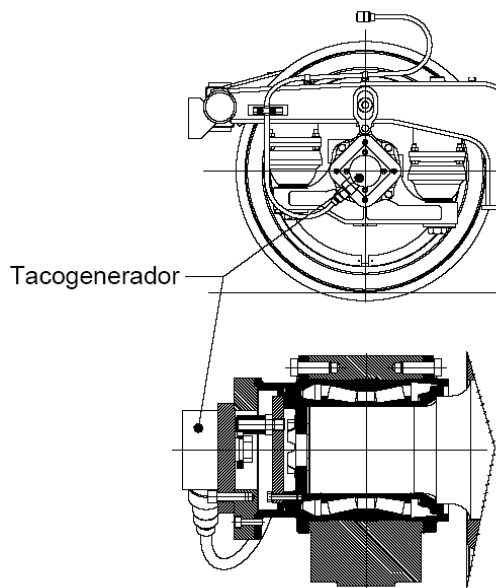


Fig. 112 Tacogenerador.

Imagen: Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero 2007.

- Pilotos azules en los frontales de tren: cuando están iluminados indican que el equipo ATP/ATO está condenado, en modo LLAVE ESPECIAL. Basta con tener una llave especial en posición DES en cualquiera de las dos cabinas para que se iluminen los dos pilotos de tren.

4.5.1 Modos de conducción

El equipo ATC-D, mediante su panel de conducción, proporciona los modos de conducción permitidos en el sistema de señalización ATC/ATO de DIMETRONIC, que pueden ser seleccionados desde el panel de mandos e indicaciones.

Para la selección de los modos de conducción M+25, ATP y ATO es necesario que el conmutador LLAVE ESPECIAL se encuentre en la posición CON en ambas cabinas y que el tren esté parado.

Existen dos funciones de aplicación de freno de emergencia controladas por el ATP embarcado:

- RUNBACK. Si el tren se desliza con cualquier modo seleccionado (excepto en modo LLAVE ESPECIAL), unos 3 m. en el sentido contrario al de marcha.
- ROLLFORWARD. Si el tren se desliza con cualquier modo seleccionado y sin tener activada la línea de tracción (excepto en modo LLAVE ESPECIAL), unos 100 m. en el sentido de la marcha.

Los modos de conducción disponibles son los siguientes:

- Modo LLAVE ESPECIAL: no es un modo de conducción, sino la manera de gobernar el tren cuando se apaga el sistema ATC-D y por consiguiente no actúa la protección automática. Puede mandarse desde cualquier cabina, tanto marcha adelante como marcha atrás.
- Modo MANUAL+25: en este modo de conducción no es necesaria la presencia de códigos en vía. Solamente se utilizará en zonas donde no existen códigos, cuando se efectúen maniobras de trenes, o bien cuando se requiera por necesidades de explotación de la línea. La velocidad máxima de este modo de conducción, por encima de la cual se aplicará freno de emergencia es de 25 km/h, aunque en marcha atrás el TCMS limita la velocidad a 12 km/h.
- Modo ATP: es el modo de conducción protegido por el sistema ATP. A partir de los códigos de velocidad VMAX/VOBJ que el tren capta de la vía, se realiza una supervisión continua de la velocidad real del tren y se calculan las curvas de frenado para interaccionar con el equipo de control de tracción y freno del tren. Funciona con conducción manual pero el ATP garantiza en todo momento una conducción segura, inhibiendo tracción o frenando el tren cuando se superen los límites permitidos. Sólo se puede seleccionar para conducir marcha adelante y desde la cabina extrema. En este modo de conducción es necesario que el conductor pulse permanentemente el "hombre muerto" para desfrenar el tren.
- Modo ATO: es el modo de operación automática, en el que el conductor se limita a accionar el pulsador ARRANQUE ATO, una vez el tren ha cerrado puertas. El sistema ATO está en todo momento supervisado por el sistema de ATP, que garantiza la seguridad de la circulación. Para poder realizar la conducción en modo ATO, es necesario que el tren reciba información que le indique el punto donde se encuentra. Para ello, a lo largo de la vía se han instalado balizas¹⁸, que le sirven para localizarse y eliminar posibles errores de distancia. En este modo, no es necesario pulsar permanentemente el "hombre muerto" ni se activa el corte de tracción durante el control de la velocidad.

¹⁸ Se acostumbra a utilizar el término balizas para referirse al conjunto formado por la unidad de alimentación de lazo o Loop Control Unit (UAL) y el lazo de ATO.

4.5.2 ATP embarcado

El equipo embarcado de ATP, en combinación con los equipos ATP del enclavamiento y vía, actúa sobre el resto de equipos de tren para cumplir los objetivos básicos de protección:

- Impedir que un tren alcance al precedente, frenándole a la distancia suficiente.
- Frenar hasta la parada a cualquier tren que rebase una señal en rojo.
- Frenar, hasta su detención, a cualquier tren que se aproxime a una aguja en posición incorrecta o falsa.
- Frenar, hasta su detención, a cualquier tren que sobrepase la velocidad máxima de seguridad permitida en el tramo de vía donde se encuentre.
- Si durante la marcha se produjera una pérdida de captación de la señal de ATP o apareciese una avería en el equipo de ATP del tren, éste aplicaría el freno de emergencia.
- Si se produjera un desplazamiento del tren en sentido contrario a la posición indicada por el inversor de marcha superior a una distancia prefijada, el equipo de ATP aplicaría freno de emergencia (protección contra RUNBACK).

Estos objetivos se cumplen sin intervención del conductor, es decir, de forma automática. El ATP en todo momento vigila la conducción y actúa si se produce alguno de los casos antes señalados, confiriendo una total protección contra el fallo en la conducción, todo ello sin deterioro del intervalo, velocidad comercial o reducción de la capacidad de la línea. Independientemente de la VMAX, el tren tiene una limitación de velocidad de 80 km/h.

La señal de códigos recibida por el tren indica la velocidad máxima y objetivo, que son comparadas continuamente con la información de la velocidad real que proporcionan los tacogeneradores. La característica fundamental del sistema es la de estar diseñado con técnica fail safe, de manera que en caso de fallo se aplicará el freno de emergencia.

En una circulación en modo ATP, el velocímetro del panel de conducción indica al conductor la velocidad real del tren (aguja interior) y la velocidad objetivo a la que debe aproximarse (aguja exterior). El conductor acelera o frena el tren mediante una palanca, siempre manteniendo pulsado el botón "hombre muerto" con el dedo pulgar.

En el caso de que los códigos de velocidad VMAX/VOBJ coincidan (códigos pares), un aumento de la velocidad del tren hasta alcanzar los 3 km/h por debajo de la velocidad máxima provocará la activación de las siguientes indicaciones:

- Suena permanentemente el avisador acústico.
- Se iluminan las indicaciones RECONOCIMIENTO DE ALARMA y EXCESO DE VELOCIDAD.
- Se aplica la inhibición de orden de marcha, es decir, aunque el conductor acelere no se aplica tracción. De esta manera, se indica que se está aproximando a la velocidad máxima permitida.

Se puede silenciar el avisador acústico mediante el pulsador RECONOCIMIENTO DE ALARMA, sin embargo la indicación EXCESO DE VELOCIDAD continuará iluminada. Si la velocidad disminuye 5 km/h por debajo de la velocidad objetivo se desactiva la bocina, las indicaciones y desaparece la inhibición de tracción.

ATP AM				
VMAX	VOBJ	ACTIVACIÓN	DESACTIVACIÓN	APLICACIÓN EMERGENCIA
CÓDIGOS PARES		VOBJ -3 KM/H	VOBJ -5 KM/H	VMAX
65	65	62	60	65
45	45	42	40	45
25	25	22	20	25
CÓDIGOS IMPARES		VOBJ	VOBJ -2 KM/H	VMAX
65	45	45	43	65
45	0	>0	0	45
25	0	>0	0	25

Tabla 7 Velocidades de activación y desactivación de indicaciones en ATP AM de L4.

Imagen: elaboración propia.

En el caso de que los códigos de velocidad VMAX/VOBJ no coincidan (códigos impares), cuando la velocidad del tren alcance la velocidad objetivo se activarán las siguientes indicaciones:

- Suena permanentemente el avisador acústico.
- Se iluminan las indicaciones RECONOCIMIENTO DE ALARMA y EXCESO DE VELOCIDAD.
- Se inhibe la orden de marcha, indicando que se ha alcanzado la velocidad objetivo.

Se puede silenciar el avisador acústico mediante el pulsador RECONOCIMIENTO DE ALARMA, sin embargo la indicación EXCESO DE VELOCIDAD continuará iluminada. En el momento que la velocidad disminuya 2 km/h por debajo de la velocidad objetivo se desactiva la bocina, las indicaciones y desaparece la inhibición de tracción.

ATP FM				
VMAX	VOBJ	ACTIVACIÓN	DESACTIVACIÓN	APLICACIÓN EMERGENCIA
CÓDIGOS PARES		VOBJ -3 KM/H	VOBJ -5 KM/H	VMAX
70	70	67	65	70
50	50	47	45	50
45	45	42	40	45
35	35	32	30	35
25	25	22	20	25
CÓDIGOS IMPARES		VOBJ	VOBJ -2 KM/H	VMAX
70	50	50	48	70
50	45	45	43	50
45	35	35	33	45
35	25	25	23	35
50	0	>0	0	50
45	0	>0	0	45
35	0	>0	0	35
25	0	>0	0	25

Tabla 8 Velocidades de activación y desactivación de indicaciones en ATP FM de L2.

Imagen: elaboración propia.

Siempre que se supere la velocidad máxima, se aplicará el freno de emergencia, destruyéndose el modo de conducción de forma irreversible hasta la parada total del tren. En el panel de mandos las indicaciones ATP y VELOCIDAD OBJETIVO se apagan, manteniéndose iluminada la indicación de CÓDIGOS.

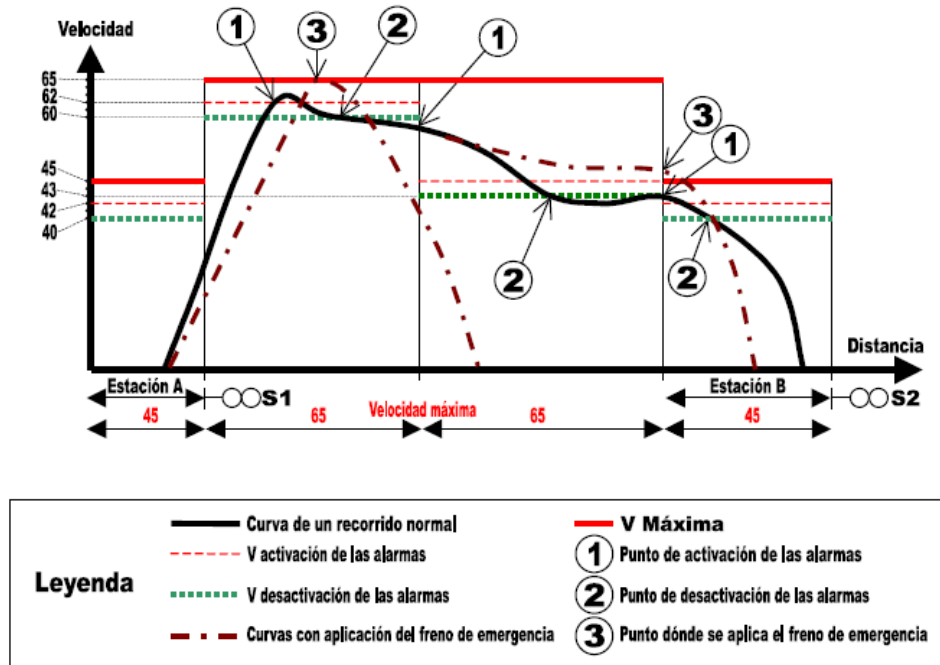


Fig. 113 Gráfica de recorrido en modo ATP.

Imagen: Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero 2007.

4.5.3 ATO embarcado

La unidad de ATO embarcado envía las órdenes a los equipos de tracción y freno para controlar el movimiento del tren, desde el arranque, la regulación de marcha y la parábola de freno, hasta la parada en el punto predeterminado de la estación. Además de realizar estas funciones de conducción automática, proporciona al conductor la información necesaria, mediante el indicador luminoso y el velocímetro.

El sistema ATO precisa en todo momento de informaciones del equipo de ATP para poder realizar sus funciones básicas:

- Arranque bajo la autorización del supervisor del tren.
- Regulación de velocidad durante todo el proceso de marcha, siguiendo las órdenes transmitidas por el equipo de vía y respetando las consignas correspondientes a la velocidad objetivo del ATP.
- Parada en punto fijo en las estaciones.
- Vuelta automática en terminales.
- Autorizar el lado correcto de apertura de puertas de tren.

El equipo ATO estará en todo momento supervisado por el equipo ATP, el cual se encargará de garantizar la seguridad de las circulaciones. En caso de que por cualquier incidencia, el ATO intentara llevar al tren a una velocidad superior a la máxima de seguridad, el equipo de ATP aplicaría automáticamente el freno de emergencia. Para llevar a cabo sus funciones, el equipo de ATO de tren se apoyará en los equipos actualmente instalados en la vía y en las estaciones, sin necesidad de que estos sean modificados.

Una vez que el equipo de ATO ha comprobado que el tren está preparado para iniciar la marcha, solicitará la tracción necesaria para alcanzar la velocidad de regulación. En el primer arranque en ATO, el tren circula a una velocidad baja, alrededor de 25 km/h, hasta leer una baliza de vía. En este momento, el tren se considera localizado y traccionará hasta la velocidad de regulación¹⁹. Si no se recibiese ninguna baliza, el tren recorrería aproximadamente 400 m., aplicando el freno de emergencia, destruyendo el modo y activando la indicación de alarma de ATO, no permitiendo volver a arrancar en ATO. En este caso, se deberá seleccionar el modo ATP y conducir manualmente hasta la siguiente estación. Se podrá seleccionar nuevamente el modo ATO cuando desaparezca la indicación de alarma de ATO.

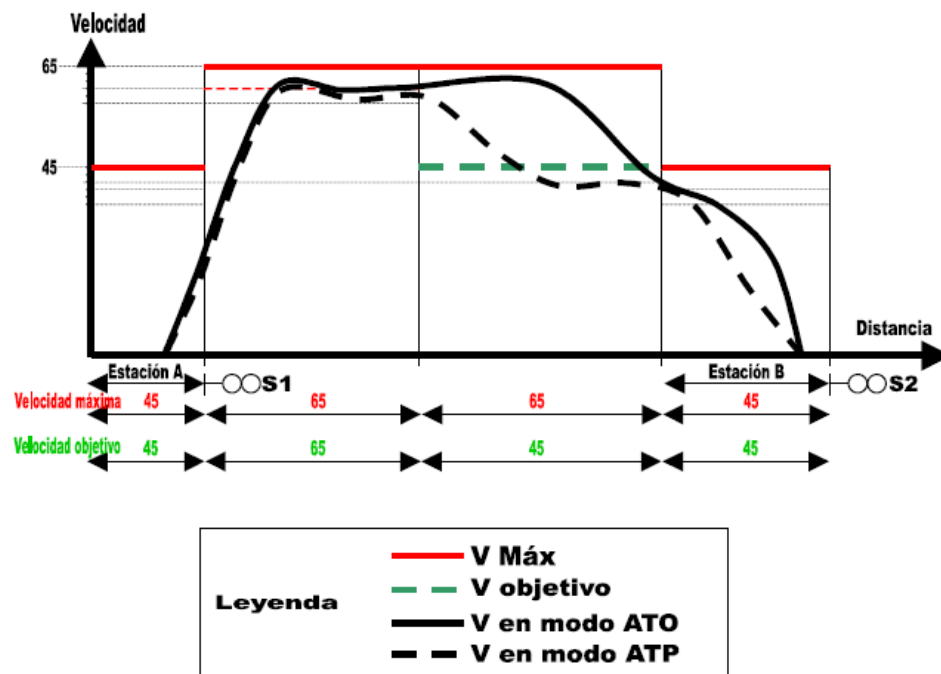


Fig. 114 Gráfica de recorrido en modo ATO

Imagen: Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero 2007.

Cuando el tren va circulando en ATO, si por orden del Puesto de Control Central o por necesidad en la vía, se debe pasar a modo ATP, el conductor puede hacerlo pulsando el "hombre muerto" y haciéndose cargo de la conducción manualmente. El cambio de ATO a ATP se puede efectuar tanto con el tren parado como en marcha. Si la velocidad real es inferior a 25 km/h también es posible seleccionar el modo M+25 actuando sobre dicho pulsador.

¹⁹ En las líneas convencionales de Metro de Barcelona, el sistema de Regulación de Tráfico (RDT) ha de enviar al equipo de ATO la consigna de marcha que ha de aplicar el tren. El RDT realiza los cálculos para mantener una equidistancia entre los trenes que están circulando en ese momento por la línea (regulación por intervalo) y, dependiendo del retraso o adelanto que lleve el tren con respecto a los demás, enviará al ATO una consigna u otra. Hay cuatro consignas que el ATO interpreta y envía al equipo TBS para que actúe en la interestación: MARCHA RAPIDA (M0), NORMAL (M1), MODERADA (M2) Y LENTA (M3).

Si se aplica freno de emergencia, bien por actuación sobre la seta o por accionamiento de un tirador de emergencia, se destruye el modo ATO y se para el tren. Cuando se restaura la seta²⁰ o el tirador de emergencia, es necesario volver a seleccionar el modo ATO, reiniciándose la secuencia de arranque. Tras la aplicación de un frenado de emergencia, no es posible seleccionar modo ATO de nuevo hasta que el tren esté completamente detenido, siendo necesario primero pasar por el modo ATP.

En caso de recibir una $VOBJ=0$ en un circuito de vía que no sea de andén, el equipo ATO envía las órdenes oportunas para que el tren se detenga aproximadamente 8 m. antes del final del circuito de vía. Si durante el proceso de parada, el código ATP cambia a una $VOBJ>0$, el ATO tomaría el control del tren, conduciéndolo de nuevo hasta el punto de parada en destino. En caso de recibir una $VOBJ=0$ en un circuito de vía de andén, el tren efectuará la parada normal en estación. Para agilizar la entrada del tren en el andén y optimizar la precisión en el punto de parada, se acostumbra a generar un doble código de ATP, posibilitando que inicialmente el tren tenga una $VOBJ_1$ que le permita avanzar moderadamente y posteriormente una $VOBJ_2=0$ indicando parada total. El cambio de un código a otro se produce cuando el último eje abandona el circuito de vía precedente al de andén. Cuando el tren se para, el ATO aplica el freno de retención para evitar que el tren se pueda desplazar.

La precisión de parada del sistema ATO DIMETRONIC en L2 es de ± 1 m. Este valor se cumplirá siempre que las condiciones de funcionamiento sean las óptimas: vía limpia de grasas y líquidos, estado del freno adecuado, recepción correcta de la baliza, etc.

Por último, es importante destacar la funcionalidad de vuelta automática, proceso automático para cambiar de vía y sentido de marcha. Se debe realizar mediante manipulación en las dos cabinas extremas (cabeza y cola). La vuelta automática en modo ATO se autoriza desde el Puesto de Control, a través de la información enviada por la baliza de entrada a la estación. Cuando el tren se detiene, se ilumina en la cabina de conducción (cabeza) la indicación amarilla VUELTA AUTOMÁTICA en el panel de conducción. El conductor coloca el inversor de marcha en posición CERO y camina hasta la otra cabina, mientras, en la cabina de cola se iluminará la indicación amarilla VUELTA AUTOMÁTICA. El conductor, ya en la cabina de cola, introducirá el inversor de marcha en posición ATRÁS y una vez cerradas las puertas de tren, sin seleccionar ningún modo de conducción, se pulsarán los botones ARRANQUE ATO. El tren comenzará a moverse hacia atrás a una velocidad de 20 km/h hasta liberar el circuito de vía de agujas, parando a continuación y desapareciendo la indicación VUELTA AUTOMÁTICA. Una vez parada la unidad, en la cabina extrema (cola) que en este momento pasa a ser cabina conductora (cabeza), deberá situarse el inversor en ADELANTE y efectuar el proceso normal de selección de modo ATO.

²⁰ En lenguaje ferroviario se utiliza el término "seta" para referirse al pulsador situado en el pupitre del conductor que precisamente tiene forma de seta y cuya pulsación detiene el tren inmediatamente por la acción del freno de emergencia.

4.6 Subsistema de control del tráfico

El control del tráfico ferroviario en la Línea 2 se realiza desde el Puesto Central de Control (PCC) o Centro de Control del Tráfico (CTC). En la sala de operaciones de CTC se distribuyen los puestos de operación para cada una de las líneas de FMB. Cada puesto está controlado por dos operadores de sala, uno de ellos atiende el PC del telemando de tráfico y el otro el PC corporativo para la gestión de incidencias.

El telemando de tráfico de Metro de Barcelona está suministrado por la empresa TELVENT. El subsistema de control del tráfico en Metro de Barcelona consta de:

- Servidor principal en sala Centro de Control de Metro (CCM) de La Sagrera.
- Servidor auxiliar en sala CCM de emergencia de Sagrada Familia.
- Puestos de operación distribuidos en CCM principal y emergencia.
- Red de comunicaciones entre los enclavamientos y los servidores de tráfico.

El telemando de tráfico de TELVENT permite las siguientes acciones:

- Seguimiento de los trenes mediante la ocupación de circuitos de vía.
- Establecimiento manual y automático de itinerarios.
- Envío de ordenes de apertura y cierre de señales.
- Estado y mando sobre los accionamientos.
- Activación de Vueltas Automáticas (VA).
- Activación de salto de estación.
- Selección de la velocidad de regulación.
- Establecimiento de Limitaciones Temporales de Velocidad (LTV).
- Salida autorizada en los finales de línea.
- Visualización de alarmas y eventos en el enclavamiento.

Existen dos tipos de comunicaciones en los enclavamientos:

- Comunicaciones vitales: aquellas sin las que el sistema no puede funcionar porque se pone en peligro la seguridad del mismo. Estas comunicaciones se refieren básicamente a las comunicaciones entre enclavamientos, más conocidas como comunicaciones de bloqueo. Lógicamente, no se puede dar paso a un tren, sin saber el estado de la vía en las inmediaciones, es decir, en las zonas controladas por los enclavamientos colaterales. Un WESTRACE de Línea 2 se comunica en seguridad con sus colaterales a través del Módulo de Entrada/Salida Vital en Serie (VSIO), utilizando dos tarjetas de Comunicaciones Vitales Continuas (VTC) o Comunicaciones Vitales Continuas Mejorado (EVTC).
- Comunicaciones no vitales: surgen a raíz de la necesidad de centralizar toda la información de los enclavamientos en un puesto de mando, desde el que se pueda controlar el tráfico ferroviario. Estas comunicaciones entre el puesto de mando y los enclavamientos se denominan no vitales, porque no son imprescindibles pues los trenes pueden controlarse en local, desde cada enclavamiento, a través del Puesto Local de Operación (PLO). Sin embargo, al no haber ningún operador en el enclavamiento, si fallaran las comunicaciones no vitales se produciría un corte en el servicio. Las comunicaciones para telemando consisten en disponer de una o varias conexiones seguras entre el CTC y los puestos satélites (enclavamientos).

Los equipos satélites que están directamente ligados a los enclavamientos, tienen un hardware y un software común a cualquier tipo de enclavamiento y son flexibles en cuanto al número de entradas y salidas.

Los equipos necesarios para el telemando en un satélite WESTRACE son los siguientes:

- Módulo de Comunicaciones No Vital (HNVC) + módulo de comunicaciones específico del telemando. La comunicación utiliza uno o dos canales de comunicación, en interface RS-232 de tipo half-duplex.
- Módulo de Comunicaciones por Red de WESTRACE (WNCM) + módulo de comunicaciones específico del telemando. La WNCM posee dos puertos serie DB-9M y un puerto RJ-45 para la comunicación de telemando. Habitualmente los puertos serie (Port 2 y Port 3), se configuran con un interfaz RS-232, aunque tiene la posibilidad de configuración en RS-422.

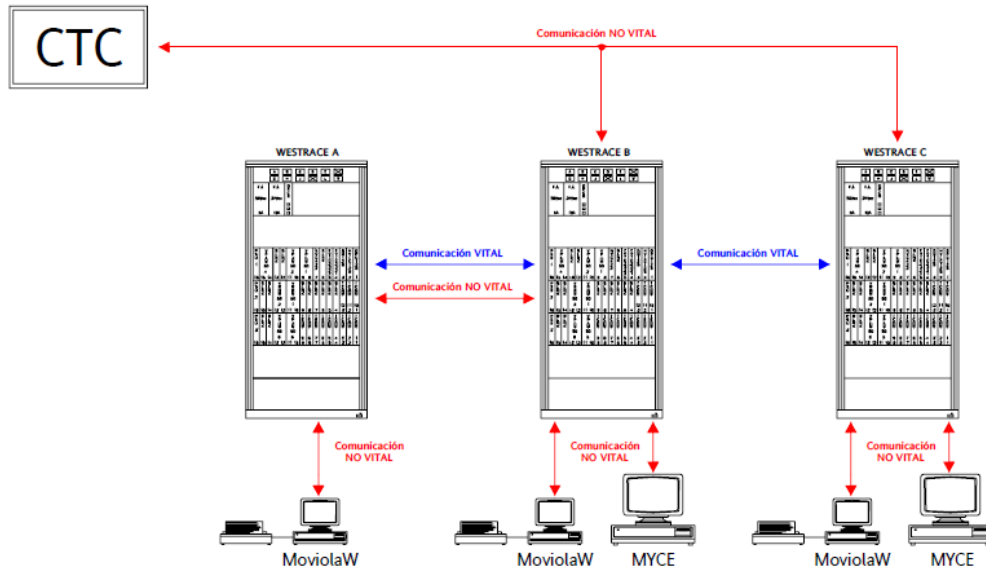


Fig. 115 Comunicaciones vitales y no vitales en enclavamientos.

Imagen: elaboración propia.

Las comunicaciones entre el telemando y los puestos satélite del enclavamiento son del tipo master-slave. Tanto en configuración HNVC o WNCM, es necesario utilizar módems para comunicar los equipos. Los módems que actualmente están en servicio en los puestos satélites son los módems HFC.

Por lo que respecta al Equipo de Vía Con Enclavamiento (EVCE) del ATO, a través de la tarjeta DIP2 recibe los datos variables desde el puesto satélite y mediante la DOP envía el estado de salud (alarmas y eventos) para que se puedan reflejar en el telemando de tráfico.

El operador de tráfico puede actuar sobre el sistema de regulación estableciendo un modo de marcha fijo en los trenes (marcha rápida, normal, moderada o lenta) o bien puede activar la regulación automática. Mediante el sistema de Regulación del Tráfico (RDT) se envían las órdenes de marcha ATO cuyo tiempo de recorrido asociado mejor se ajusta a los tiempos de recorrido objetivo que calcula el algoritmo de regulación de tráfico en función del retraso o adelanto de cada tren en cada momento.

El telemando de tráfico permite visualizar en dos pantallas la información principal para el control del tráfico en la Línea 2. El código de colores de cada elemento de señalización permite al operador conocer el estado del mismo, con el objetivo de que éste pueda intervenir, si lo estima oportuno, enviando una orden desde el telemando o poniéndose en contacto vía radio con el conductor del tren. La figura 116 muestra el primer tramo de línea en el telemando de tráfico de Línea 2.

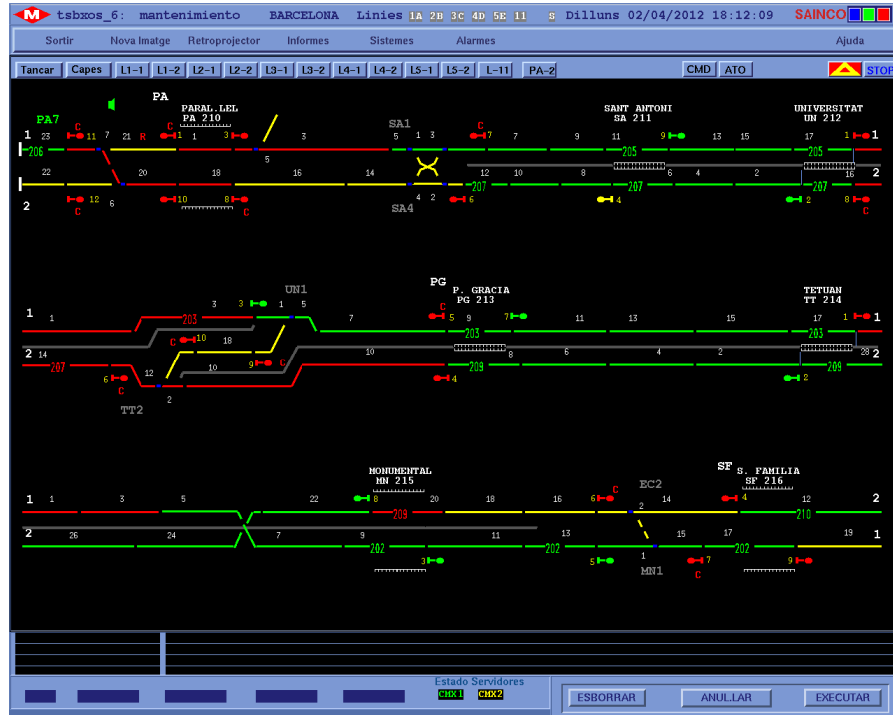


Fig. 116 Pantalla A de control del tráfico en telemando de Línea 2.

Imagen: elaboración propia.

5 SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN CONVENCIONAL EN LÍNEA 2

La seguridad en las circulaciones de la Línea 2 de Metro de Barcelona está controlada por un sistema de señalización ferroviaria del tipo convencional. El hecho de utilizar este calificativo obedece a la necesidad de diferenciarlo de un sistema de señalización ferroviaria de tipo automático, más demandado actualmente en las nuevas explotaciones ferroviarias debido a las mejoras técnicas y de calidad de servicio que aporta al negocio.

El término automático hace referencia a la principal característica diferencial de este sistema, que permite una conducción autónoma de los trenes, sin necesidad de conductor embarcado. Además, los sistemas automáticos utilizan las técnicas más modernas de transmisión digital por radio y se basa en el principio de cantón móvil lógico, que utiliza dicha transmisión para el intercambio de informaciones continuas bidireccionales entre los trenes y los equipos fijos.

El sistema de señalización ferroviaria de Línea 2 está suministrado por el fabricante DIMETRONIC, integrado dentro del grupo internacional INVENSYS RAIL, y proveedor de todo tipo de sistemas y productos de señalización ferroviaria.

5.1 Historia

La construcción de la Línea 2 de Metro de Barcelona se inició con el túnel entre las estaciones de Paral·lel y Sagrada Família en los años setenta, aunque no entró en servicio hasta el 25 de Septiembre de 1995, con la inauguración del tramo entre Sant Antoni y Sagrada Família, que comprendía además las estaciones de Universitat, Passeig de Gràcia, Tetuan y Monumental. Este tramo se caracteriza por tener dos túneles paralelos de sección circular, similar al Tube de Londres. La inauguración de Línea 2 se caracterizó por incorporar dos de las técnicas más avanzadas en transporte interurbano:

- Sistema de Señalización Ferroviaria con funcionalidades ATP y ATO.
- Accesibilidad para Personas con Movilidad Reducida (PMR).



Fig. 117 Andén central en estación de Sant Antoni.

Imagen: www.tmb.cat

El 31 de Diciembre de 1995 se amplía el recorrido de la Línea 2 hasta la estación de Paral·lel, permitiendo el enlace con la Línea 3. La circulación de los trenes entre Monumental y Paral·lel se realiza por la vía situada a la izquierda según sentido de la marcha, a la inversa del resto de la red. En Monumental es donde se realiza la transición de circulación de izquierda a derecha, mediante túneles independientes a diferente nivel.



Fig. 118 Andén en estación de Paral·lel compartido con Línea 3.

Imagen: www.tmb.cat

El 20 de Septiembre de 1997 se inaugura el tramo entre Sagrada Família y La Pau, incorporando las estaciones de Encants, Clot, Bac de Roda, Sant Martí y La Pau. Los enlaces en Clot con Línea 1 y en La Pau con Línea 4 aportaban mayor interconectividad con el resto de la red.



Fig. 119 Vestíbulo de la estación de Sant Martí.

Imagen: www.tmb.cat

Durante el año 2002, el tramo entre La Pau y Pep Ventura, que desde su inauguración en 1985 había pertenecido a la Línea 4, pasa a incorporarse a la Línea 2. Este tramo comprende las estaciones de Verneda, Artigues-Sant Adrià, Sant Roc, Gorg y Pep Ventura.

El 11 de Julio de 2010 se abre al público el nuevo tramo de Línea 2, entre las estaciones de Pep Ventura y Badalona-Pompeu Fabra, justo en el centro de la ciudad de Badalona. Con esta prolongación de Línea, la red de Metro de TMB ya superaba los 100 kilómetros.

La Línea 2 es íntegramente subterránea, sin tramos al aire libre. En la estación de La Pau existe un enlace con los talleres y cocheras de Triangulo Ferroviario, donde se retiran los trenes al final de servicio comercial y se realizan las reparaciones necesarias en el material rodante.

5.2 Características técnicas

Las características generales de Línea 2 son las siguientes:

- Longitud: 13.194 m.
- Estaciones: 18.
- Ancho de vía: 1.435 mm.
- Acceso directo a taller y cochera de Triangle Ferroviari.
- Taller con 14 espacios para reparación de trenes y torneado de ruedas.
- Cochera con 13 estacionamientos de trenes y 1 túnel de lavado.

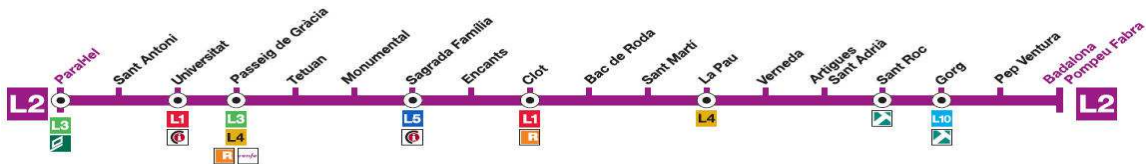


Fig. 120 Mapa de la Línea 2 de Metro de Barcelona.

Imagen: <http://tmbnet/>

DIMETRONIC es el suministrador del sistema de señalización ferroviaria en Línea 2, que incorpora funcionalidades de Protección Automática de Trenes (ATP) y Operación Automática de Trenes (ATO). Dispone de 14 escalones de velocidad, circuitos de vía y señalización vertical. El detalle técnico del funcionamiento del sistema se ha descrito en el punto 4.4 del presente documento.

La Línea la podemos dividir dos partes: la zona de vía general desde la estación de Paral·lel a Badalona-Pompeu Fabra y la zona de taller y cochera de Triangle Ferroviari, con entrada desde el desvío situado entre La Pau y Verneda por vía 2.

5.2.1 Elementos de señalización en vía general

En primer lugar, vamos a enumerar los elementos del sistema de señalización presentes en vía general. Entre las estaciones de La Pau y La Verneda está el desvío que conduce hacia el taller y cochera de Triangle Ferroviari, Dicho desvío está situado en el CV LP206 y aunque desde este punto ya no se considera vía general, todos los elementos de señalización hasta el CV TF01 están gobernados por el enclavamiento de La Pau, por lo que se contabilizarán como vía general.

Existen un total de 8 enclavamientos de la marca DIMETRONIC, 3 de cableado libre y 5 de tipo electrónico WESTRACE.

El número de circuitos de vía es de 165, también suministrados por DIMETRONIC. El modelo CVSJ FS2500 está instalado en los enclavamientos de Paral·lel, Passeig de Gràcia, Sagrada Família, Clot y La Pau. En cambio, en los enclavamientos de Pep Ventura, Artigues-Sant Adrià y Badalona-Pompeu Fabra está instalado el modelo CVSJ FS2550. En ambos casos, el FS-5k se utiliza para circuitos de vía de trayecto y el FS-2k para señalar agujas y cruzamientos.

En los circuitos de vía estándar, la señal de ATP permite el avance del tren en un sentido determinado de la marcha, de manera que la vía tiene definido un sentido único de circulación (vía no banalizada²¹). La entrada de un tren en un circuito de vía se produce por la parte del RX, desexcitando el relé de vía y activando en el TX el envío de códigos de velocidad VMAX/VOBJ cuando se cumplen las condiciones de señalización.

²¹ Una vía está banalizada cuando permite la circulación de los trenes en ambos sentidos de la marcha.

En zona de agujas y cruzamientos es necesario instalar circuitos de vía reversibles para permitir el cambio de sentido del tren. La funcionalidad de este tipo de circuitos de vía consiste en que, una vez se ha establecido el itinerario, el equipo se prepara para recibir el tren definiendo como RX el que corresponda según el sentido de circulación. De igual modo, el TX envía los códigos de velocidad en el sentido que marque el itinerario, permitiendo que el tren se pueda mover en ambas direcciones para cambiar el sentido de la marcha en un servicio parcial. Los códigos VMAX/VOBJ pueden ser diferentes según el sentido de la marcha del tren.

Existen un total de 83 señales luminosas, contabilizando Señales de Circulación (SC) y de Límite de Maniobra (LM). Excepto las 14 señales pertenecientes al enclavamiento de Badalona-Pompeu Fabra, que son de tipo LED, el resto son de tipo lámpara incandescente, aunque ambas disponen de la funcionalidad de detección de fusión en caliente y en frío.

Las señales de tipo lámpara incandescente están fabricadas por la empresa de señalización ferroviaria TREX (Técnicas Reunidas Extremeñas S.L.) y las de tipo LED modelo LD-120-P por la empresa ELECTRANS S.A. (Electrosistemas Bach S.A.).

Un total de 38 motores de aguja permiten los movimientos por los desvíos y breteles, modelo MD-2000 con alimentación 220 Vac monofásica, fabricados por la empresa DIMETRONIC.

El enclavamiento de Paralel es de tipo cableado libre, dispone de un Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI) de 10 KVA de potencia y controla un total de 23 circuitos de vía, 7 accionamientos y 11 señales de tipo lámpara incandescente, todas ellas de circulación. En el CV PA203 existe un desvío que enlaza con la Línea 3.

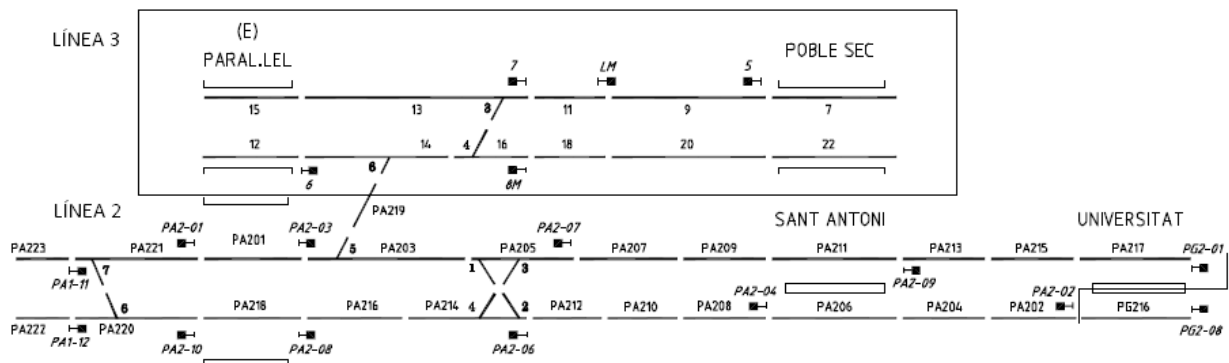


Fig. 121 Elementos de señalización en enclavamiento de Paralel.

Imagen: elaboración propia.

El enclavamiento de Passeig de Gràcia es de tipo cableado libre, dispone de un SAI de 10 KVA de potencia y controla un total de 18 circuitos de vía, 2 accionamientos y 9 señales de tipo lámpara incandescente, todas ellas de circulación.

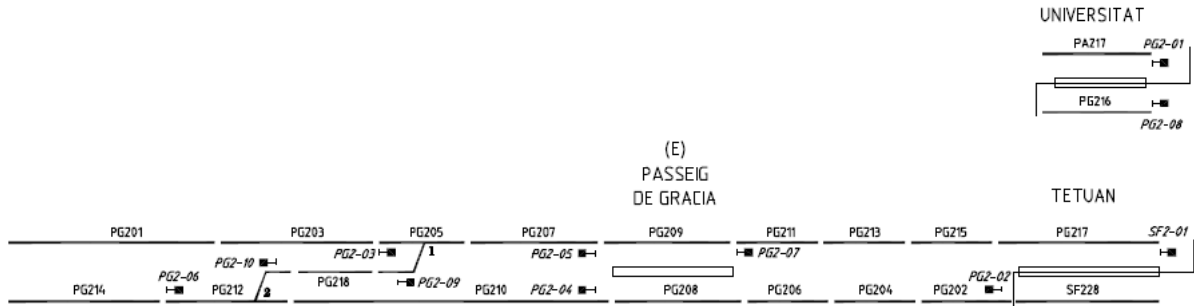


Fig. 122 Elementos de señalización en enclavamiento de Passeig de Gràcia.

Imagen: elaboración propia.

El enclavamiento de Sagrada Família es de tipo cableado libre, dispone de un SAI de 10 KVA de potencia y controla un total de 28 circuitos de vía, 6 accionamientos y 9 señales de tipo lámpara incandescente, todas ellas de circulación.

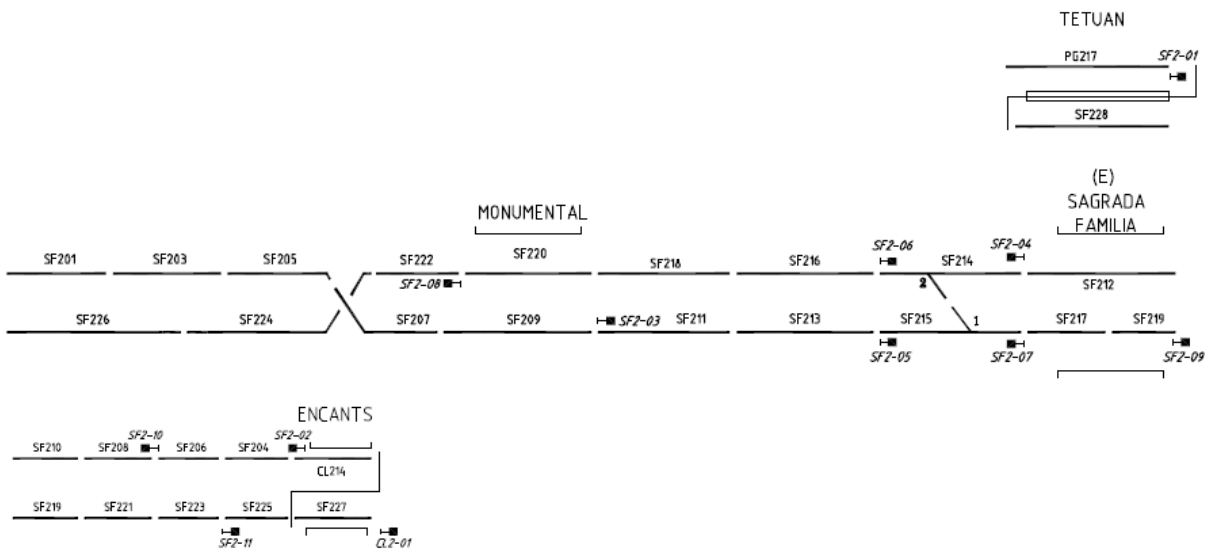


Fig. 123 Elementos de señalización en enclavamiento de Sagrada Família.

Imagen: elaboración propia.

El enclavamiento de Clot es de tipo electrónico WESTRACE en configuración stand-alone. Dispone de un SAI de 10 KVA de potencia y controla un total de 14 circuitos de vía, 2 accionamientos y 7 señales de tipo lámpara incandescente, 2 de límite de maniobra y el resto de circulación.

Las señales de Límite de Maniobra (LM) indican el punto a no rebasar por el tren cuando se está haciendo un movimiento especial que implica un cambio de sentido del tren, por ejemplo un servicio parcial. Si la circulación del tren cuando va a realizar el cambio de dirección es el mismo que el sentido nominal de la marcha se instala una señal mecánica que indica el punto a no rebasar. Si el cambio de dirección se realiza en sentido opuesto al nominal de la vía se instala una señal luminosa con un doble aspecto rojo. En la figura 124 la señal LM-2 indica la existencia de una señal luminosa con aspecto doble rojo, las señales mecánicas no figuran en el esquema.

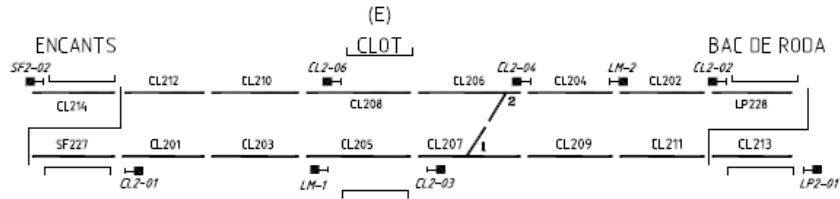


Fig. 124 Elementos de señalización en enclavamiento de Clot.

Imagen: elaboración propia.

El enclavamiento de La Pau es de tipo electrónico WESTRACE en configuración stand-alone. Dispone de un SAI de 10 KVA de potencia y controla un total de 32 circuitos de vía, 10 accionamientos que incluyen 2 descarrilladores, y 15 señales de tipo lámpara incandescente, 2 de límite de maniobra y el resto de circulación.

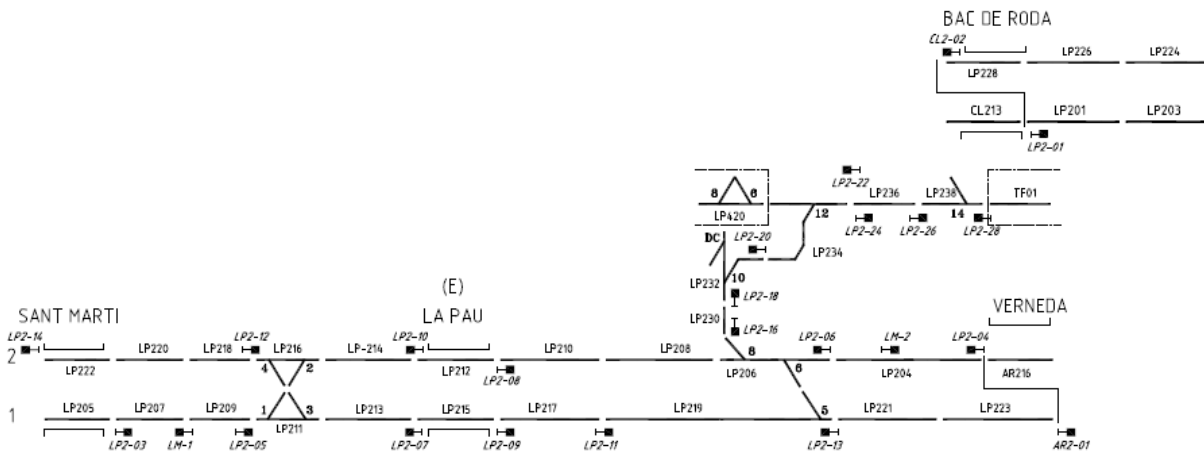


Fig. 125 Elementos de señalización en enclavamiento de La Pau.

Imagen: elaboración propia.

El enclavamiento de Artigues-Sant Adrià es de tipo electrónico WESTRACE en configuración hot stand-by. Dispone de un SAI de 10 KVA de potencia y controla un total de 17 circuitos de vía, 2 accionamientos y 7 señales de tipo lámpara incandescente, todas ellas de circulación.

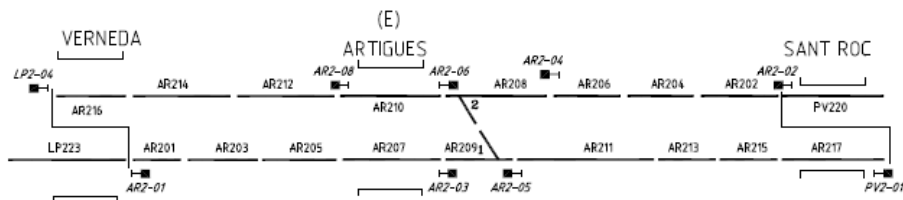


Fig. 126 Elementos de señalización en enclavamiento de Artigues-Sant Adrià.

Imagen: elaboración propia.

El enclavamiento de Pep Ventura es de tipo electrónico WESTRACE en configuración hot stand-by. Dispone de un SAI de 15 KVA de potencia y controla un total de 18 circuitos de vía, 4 accionamientos y 11 señales de tipo lámpara incandescente, 1 de límite de maniobra y el resto de circulación. El CV PV222 funciona como aparcamiento de trenes en horario nocturno, pero también como apartadero para inyectar o retirar trenes durante el horario comercial.

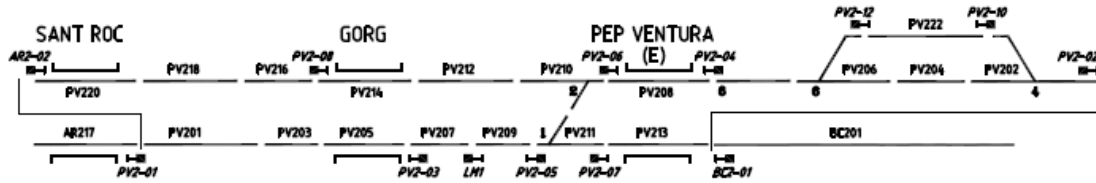


Fig. 127 Elementos de señalización en enclavamiento de Pep Ventura.

Imagen: elaboración propia.

El enclavamiento de Badalona-Pompeu Fabra es de tipo electrónico WESTRACE en configuración hot stand-by. Dispone de un SAI de 15 KVA de potencia y controla un total de 15 circuitos de vía, 5 accionamientos y 14 señales de tipo LED, 1 de límite de maniobra y el resto de circulación.

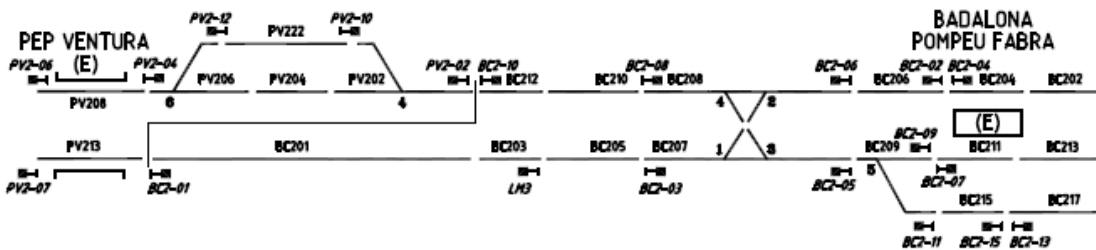


Fig. 128 Elementos de señalización en enclavamiento de Badalona-Pompeu Fabra.

Imagen: elaboración propia.

5.2.2 Elementos de señalización en taller y cochera

Triangle Ferroviari constituye uno de los centros de mantenimiento de material rodante más grandes de Metro de Barcelona, habilitado para albergar 27 trenes entre espacios de aparcamiento, reparación, torno y lavado. Se divide en dos espacios, los talleres y las cocheras, con acceso desde vía general a través de un desvío situado en el CV LP206. Los tres únicos circuitos de vía que disponen de tecnología ATP son el CV TF01, CV TF02 y CV TF03, el resto solamente informan al enclavamiento del estado de ocupación de los mismos.

La zona de talleres está controlada por un enclavamiento de tipo electrónico INTERSIG L905 fabricado por la empresa ALCATEL.

Existen un total de 10 circuitos de vía, 8 de agujas y 2 de apartadero, modelo FTG-S suministrados por SIEMENS. A estos 2 apartaderos hay que sumar 12 espacios más hasta las toperas entre las vías 14 y 25, lugar donde se realizan las reparaciones y el mantenimiento periódico de los trenes que circulan en Línea 2.

Un total de 16 señales luminosas de circulación de tipo lámpara incandescente y 12 señales de topera, todas suministradas por TREX S.L., señalizan la circulación en la zona de talleres.

El sistema de señalización en la zona de taller se completa con 12 accionamientos modelo MD-2000 fabricados por DIMETRONIC, con alimentación monofásica a 220 Vac.

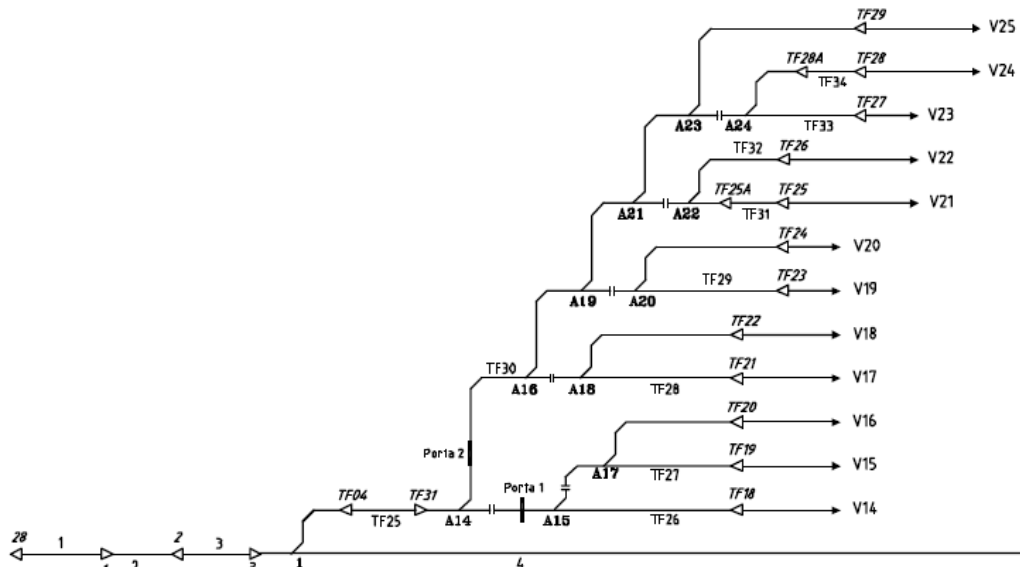


Fig. 129 Elementos de señalización en taller de Triangle Ferroviari.

Imagen: elaboración propia.

La zona de cocheras está controlada por otro enclavamiento de tipo electrónico INTERSIG L905 de ALCATEL.

Se contabilizan un total de 23 circuitos de vía, 8 de agujas, 3 de trayecto con funcionalidad ATP y 13 de estacionamiento, modelo CVSJ FS2500 suministrados por DIMETRONIC. Existen 13 vías numeradas de la 1 a la 13 con los espacios de estacionamiento dispuestos en los circuitos de vía hasta la topera.

Un total de 17 señales luminosas de circulación de tipo lámpara incandescente y 13 señales de topera, todas suministradas por TREX S.L., señalizan la circulación en la zona de cocheras.

Los 11 accionamientos instalados pertenecen al modelo MD-2000 fabricados por DIMETRONIC, con alimentación monofásica a 220 Vac.

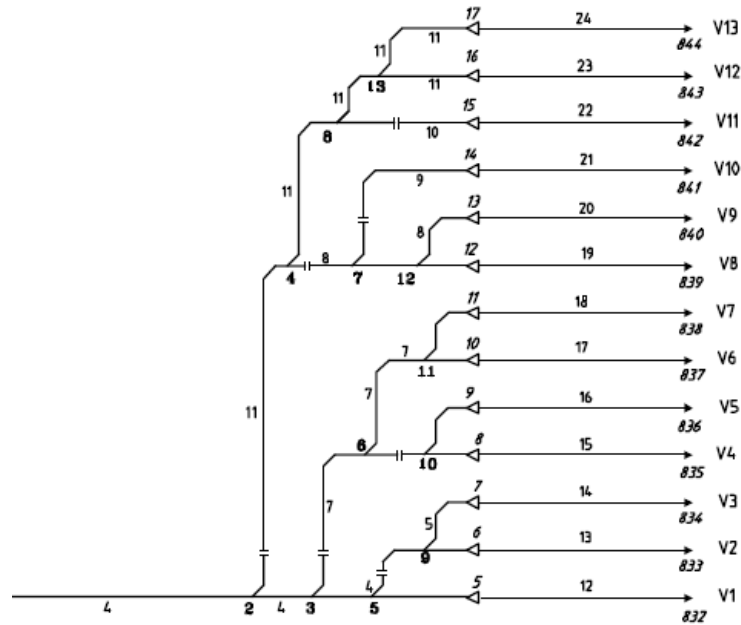


Fig. 130 Elementos de señalización en cochera de Triangle Ferroviari.

Imagen: elaboración propia.

5.3 Prestaciones del sistema

5.3.1 Intervalo de explotación

El intervalo de explotación o headway es uno de los principales parámetros que sirven para valorar la calidad de un sistema de señalización. La capacidad de la línea, es decir, la cantidad simultánea de trenes que pueden circular en ella, es un requisito fundamental en las explotaciones de ferrocarril suburbano, que han de ser capaces de satisfacer la demanda de transporte en las grandes ciudades en hora punta.

El intervalo mínimo que permite el sistema de señalización de Línea 2 está condicionado por tres aspectos fundamentales: las restricciones de seguridad, el número de trenes en circulación y el tiempo de vuelta automática en los finales.

El primer aspecto es una limitación impuesta por el sistema de señalización-seguridad. La señalización por cantones fijos protege la circulación de los trenes a través del ATP, que establece distancias de seguridad entre trenes impidiendo la presencia de más de un tren en interestación. De esta manera, un tren estacionado en un CV de andén no podrá efectuar su salida hasta que el tren precedente haya abandonado el CV de andén de la estación de destino. En casos en que la distancia entre estaciones es muy grande, se permite la salida del tren cuando el precedente está todavía estacionado en el CV de andén destino o incluso si aún este primer tren no ha llegado a dicho CV. Para ello se instala una señal intermedia que señala la interestación.

El segundo aspecto es el número de trenes disponible. La flota de Línea 2 se compone de 23 trenes, de los cuales 1 como mínimo siempre están en retiro, ya sea en reparación o como reserva por si hay una avería en un tren que esté circulando. En las horas punta (entre 7:30-9:00 y 17:00-18:30 los días laborables) y en los acontecimientos especiales (partidos de fútbol, conciertos, etc.) se ponen en circulación un total de 22 trenes. En las horas valle, el número depende del día y la franja horaria, pero la media es de 16 trenes en circulación.

El tercer condicionante es el tiempo necesario para dar la vuelta en los finales. Por muchos trenes que estén en circulación, el tiempo que un tren con final de trayecto en Paral·lel o Badalona-Pompeu Fabra tarda en dar la vuelta para iniciar el recorrido por la otra vía, condiciona inevitablemente el intervalo del carrusel. En este sentido, el tiempo también varía si hay o no personal dedicado en los finales para agilizar el cambio de sentido, son los llamados maniobreros. La operativa consiste en que cuando el tren llega a un final, el maniobrero entra en la cabina opuesta a la del sentido de circulación, donde se encuentra el conductor del tren. Al entrar en el fondo de maniobra, ambos se coordinan para activar y desactivar la cabina de conducción, de manera que se elimina el tiempo que el conductor tarda en recorrer todo el tren para introducir la llave de gobierno en la cabina opuesta.

En Línea 2 la Vuelta Automática (VA) en Badalona-Pompeu Fabra es la que condiciona el headway, consiguiendo en hora punta un tiempo de 3'40" con VA PV2 sin maniobrero, 3'23" con VA PVA sin maniobrero y 2'44" con VA PV3 con maniobrero. Con la vuelta alternativa PVA activada, el intervalo mínimo vendrá dado por el tiempo que tarda en llegar otro tren, ya que el que está esperando en uno de los circuitos de vía de andén de Badalona-Pompeu Fabra no saldrá hasta que se haya liberado el circuito de vía de la bretele.

El sistema de Regulación del Tráfico (RDT) intenta conseguir un intervalo medio constante entre trenes, alterando las variables de tiempo de estacionamiento en andenes y de asignación de las 4 marchas ATO disponibles: Rápida (M0), Normal (M1), Moderada (M2) Y Lenta (M3). Para conseguir el tiempo de intervalo, el RDT realiza un cálculo en función del tiempo en que cada circuito de vía se libera y se vuelve a ocupar, obteniendo en hora valle con 16 trenes en circulación y VA PVA en Badalona-Pompeu Fabra un headway de 4'24". En hora punta con 21 trenes y VA PVA activada se consigue un headway de 3'23".

La conclusión es que las máximas prestaciones que puede conseguir el actual sistema de señalización de Línea 2 es un headway de 2'44" con 22 trenes en circulación y la VA PV3 con maniobrero activada. La velocidad comercial en tales condiciones es de 28,1 km/h.

5.3.2 Modos degradados

Se entiende como modos degradados todas las posibilidades que ofrece el sistema de señalización en caso de incidencia para seguir con la operación de la Línea, ofreciendo inevitablemente una calidad de servicio menor a los pasajeros. Una incidencia es todo defecto, fallo o acontecimiento que comporta un riesgo para la circulación de los trenes y por ende para el pasaje. Las causas puede ser técnicas (ausencia de tensión de catenaria, rotura de un carril, desprendimiento de la bóveda, fallo de un enclavamiento, etc.) o externas (intrusión de personas no autorizadas en vía, atropellos, inundaciones, etc.).

El sistema de señalización de Línea 2 de Metro de Barcelona ofrece la posibilidad de establecer servicios parciales entre estaciones, de manera que si existe un tramo de Línea que no está operativa, desde el telemando de tráfico se puede establecer un servicio parcial que permita la circulación de trenes en una parte de la Línea, completando el servicio con lanzaderas de autobuses por el exterior.

La figura 131 muestra el caso de una incidencia en la estación de Tetuán, que impide el acceso normal de los pasajeros en dicha estación. La estación queda clausurada temporalmente y se establecen los siguientes servicios parciales desde el telemando de tráfico:

- Servicio parcial desde Paral·lel (PA) hasta Passeig de Gràcia (PG) mediante la activación de la vuelta automática UN1.
- Servicio parcial desde Sagrada Família (SF) hasta Badalona-Pompeu Fabra (BC) mediante la activación de la vuelta automática EC2.

Para enlazar las estaciones de Passeig de Gràcia y Sagrada Família se establecería un servicio complementario de autobuses con paradas en Tetuan (TT) y Monumental (MN).

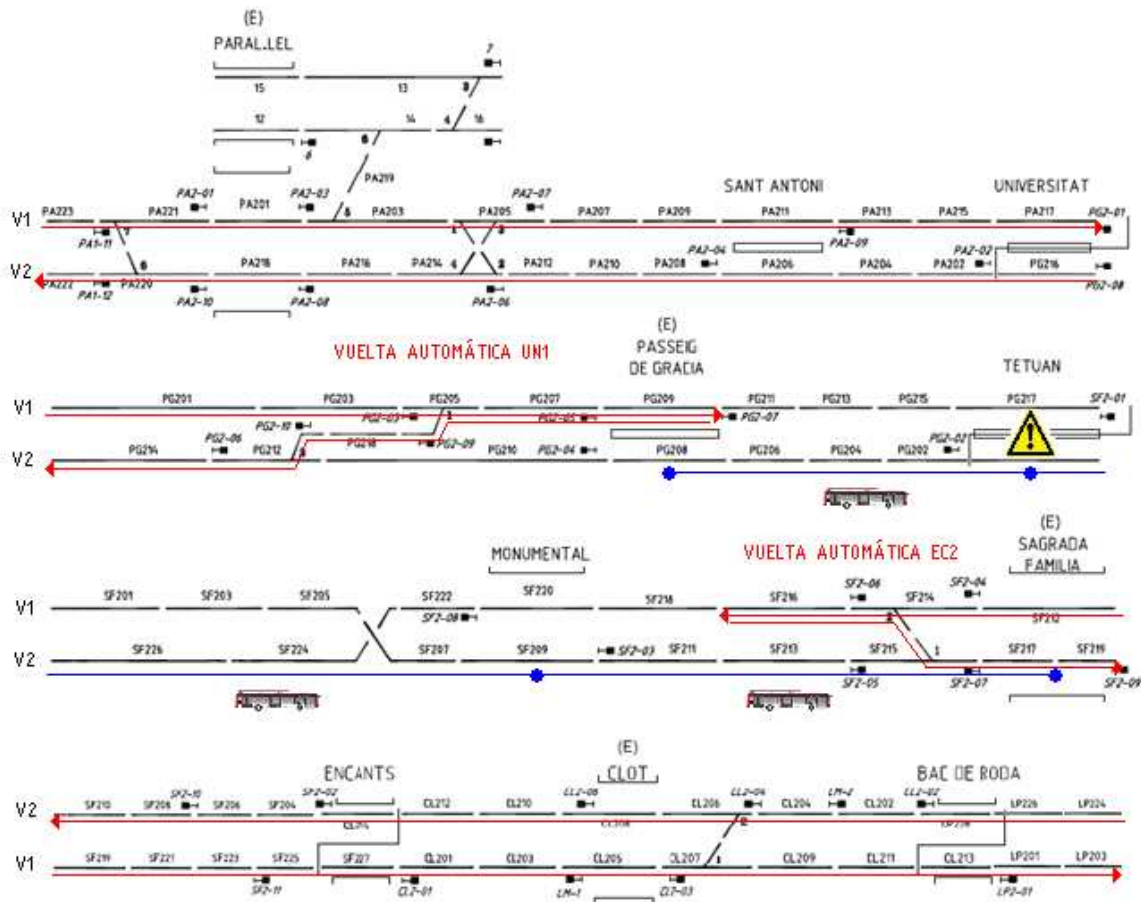


Fig. 131 Servicios parciales PA-PG y SF-BC por incidencia en la estación de Tetuán.

Imagen: elaboración propia.

Las labores de coordinación en campo e información al cliente las llevan a cabo los Agentes de Atención al Cliente (AAC) pertenecientes a la Gerencia de Línea 2, que deben ser distribuidos estratégicamente en los andenes afectados. A medida que los trenes van llegando a la estación final del servicio parcial, el AAC situado en andén debe informar a los pasajeros que en el exterior disponen de un autobús lanzadera que realizará el mismo recorrido que el Metro, parando en las estaciones correspondientes. El autobús finaliza su recorrido en la estación inicio del siguiente servicio parcial, de manera que el pasajero puede proseguir su viaje en el tren. Se suelen disponer varios autobuses intentando alcanzar un intervalo similar al de Metro, aunque el tráfico en el exterior dificulte en ocasiones conseguir este objetivo.

Transports Metropolitans de Barcelona (TMB) es una corporación de empresas formada por Ferrocarril Metropolità de Barcelona (FMB) y Transports de Barcelona (TB), con lo cual la coordinación para conseguir una flota de autobuses auxiliar que realice las funciones de lanzadera es relativamente sencilla. En cualquier caso, una incidencia en la Línea que obligue a establecer un modo degradado de operación supone una labor que implica diferentes aspectos:

- Establecimiento de los servicios parciales desde el Centro de Control de Metro (CCM) mediante las órdenes correspondientes en el telemando de tráfico.
- Retirada de trenes a cochera.

- Desalojo del pasaje en los trenes que los requieran. En casos de avería en el tren, el desalojo se debe hacer por la vía, cumpliendo la normativa de seguridad y los protocolos de actuación adecuados. Las labores de desalojo del tren y coordinación para conducir al pasaje caminando hasta el andén más cercano las realizan los AAC's que se desplazan al lugar de la incidencia y el Agente Único de Tren (AUT) encargado de conducir el tren.
- Envío de mensajes de megafonía a las estaciones de la Línea informando a los pasajeros de la incidencia y la operativa prevista.
- Coordinación entre CCM y el Centro de Regulación del Tráfico (CRT) para la petición del número de autobuses necesarios en las lanzaderas.
- Movilización de AAC's a los andenes afectados para informar al pasaje.
- Instalación de señalética o carteles informativos en las estaciones clausuradas temporalmente y en el andén final de cada uno de los servicios parciales.

Es evidente que cuantos más servicios parciales estén disponibles en el sistema, más fácil será solventar una incidencia y el impacto en la calidad del servicio comercial será menor. Existen dos condicionantes principales para disponer de una cantidad mayor o menor de servicios parciales:

- Agujas y cruzamientos. El número de desvíos disponibles en la Línea es determinante para poder definir un mayor número de servicios parciales, pues los trenes han de realizar un cambio de vía para poder cambiar de dirección. Normalmente la instalación de aparatos de vía para desvíos viene marcada por la infraestructura, las necesidades de operación y el coste económico que supone.
- Instalación de circuitos de vía reversibles. La señal de ATP que se transmite en los circuitos de vía permite el avance del tren en un sentido determinado de la marcha, de manera que la vía tiene definido un sentido único de circulación (vía no banalizada²²). La entrada de un tren en un circuito de vía se produce por la parte del RX, desexcitando el relé de vía y activando en el TX el envío de códigos de velocidad VMAX/VOBJ cuando se cumplen las condiciones de señalización. En el caso de los circuitos de vía reversibles, una vez que se establece el itinerario el equipo se prepara para recibir el tren definiendo como RX el que corresponda según el sentido de circulación. De igual modo, el TX enviará los códigos de velocidad en el sentido que marque el itinerario, permitiendo que el tren se pueda mover en ambas direcciones para cambiar el sentido de la marcha en un servicio parcial.

El sistema de señalización de L2 permite 17 servicios parciales seleccionables mediante la orden Vuelta Automática (VA) en el telemando de tráfico. En los finales de Línea también se puede seleccionar VA para realizar el cambio de vía, pero no se considera un servicio parcial. La orden se compone de un mnemotécnico de dos letras que indica la estación final del servicio parcial y un número que indica el accionamiento por el que el tren ha de pasar dos veces al realizar el movimiento por la diagonal.

La longitud de la Línea 2 obliga a dividir el telemando de tráfico en dos pantallas, la primera de cuales permite controlar la circulación desde la estación de Paral·lel hasta Sagrada Família y la selección de 6 VA's:

- PA7: origen en CV andén Paral·lel V2 y final en CV andén Paral·lel V1.
- SA1: origen en CV andén Sant Antoni V2 y final en CV andén Sant Antoni V1, con parada intermedia en CV andén Paral·lel V1.
- SA4: origen en CV andén Sant Antoni V2 y final en CV andén Sant Antoni V1, con parada intermedia en CV andén Paral·lel V2.
- UN1: origen en CV andén Universitat V1 y final en CV andén Universitat V2, con parada intermedia en CV andén Passeig de Gràcia V1.
- TT2: origen en CV andén Passeig de Gràcia V2 y final en CV andén Passeig de Gràcia V1, con parada intermedia en CV andén Universitat V2.

²² Una vía está banalizada cuando permite la circulación de los trenes en ambos sentidos de la marcha.

- EC2: origen en CV andén Sagrada Família V2 y final en CV andén Sagrada Família V1, realizando el cambio de sentido en CV SF216.
- MN1: origen en CV andén Monumental V1 y final en CV andén Monumental V2, realizando el cambio de sentido en CV SF217.

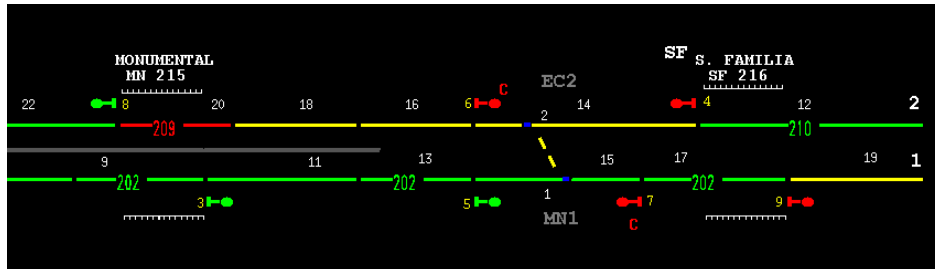


Fig. 132 Vueltas automáticas EC2 y MN1 seleccionables en el telemando de tráfico.

Imagen: captura de pantalla del telemando de tráfico de Línea 2 de Metro de Barcelona.

Desde la segunda de las pantallas del telemando de tráfico se controla el tramo desde la estación de Encants hasta Badalona-Pompeu Fabra y permite seleccionar un total de 15 VA's:

- EC2: origen en CV andén Clot V1 y final en CV andén Clot V2, realizando el cambio de sentido en CV CL204.
- BR1: origen en CV andén Bac de Roda V2 y final en CV andén Bac de Roda V1, con parada intermedia en CV andén Clot V1.
- LP4: origen en CV andén La Pau V2 y final en CV andén La Pau V1, realizando el cambio de sentido en CV LP218.
- SM2: origen en CV andén Sant Martí V1 y final en CV andén Sant Martí V2, con parada intermedia en CV andén La Pau V2.
- LP1: origen en CV andén La Pau V2 y final en andén La Pau V1, realizando el cambio de sentido en CV LP209.
- SM3: origen en CV andén Sant Martí V1 y final en CV andén Sant Martí V2, con parada intermedia en CV andén La Pau V1.
- VN6: origen en CV andén Verneda V2 y final en CV andén Verneda V1, realizando el cambio de sentido en CV LP208.
- LP5: origen en CV andén La Pau V1 y final en CV andén La Pau V2, realizando el cambio de sentido en CV LP221.
- SR2: origen en CV andén Sant Roc V2 y final en CV andén Sant Roc V1, con parada intermedia en CV andén Artigues-Sant Adrià V2.
- AR1: origen en CV andén Artigues-Sant Adrià V1 y final en CV andén Artigues-Sant Adrià V2, realizando el cambio de sentido en CV AR211.
- GO2: origen en CV andén Gorg V1 y final en CV andén Gorg V2, con parada intermedia en CV andén Pep Ventura V2.
- BC1: origen en CV andén Pep Ventura V2 y final en CV andén Pep Ventura V1, realizando el cambio de sentido en CV PV209.
- PV2: origen en CV andén Pep Ventura V1 y final en CV andén Pep Ventura V2, con parada intermedia en CV andén Badalona-Pompeu Fabra V2.
- PV3: origen en CV andén Pep Ventura V1 y final en CV andén Pep Ventura V2, con parada intermedia en CV andén Badalona-Pompeu Fabra V1.
- PVA: vuelta alternativa en la que el tren 1 realiza el movimiento definido en VA PV2 y el tren 2 el movimiento definido en VA PV3, repitiéndose el ciclo para los trenes sucesivos. La salida del tren 1 estacionado en CV andén Badalona-Pompeu Fabra V1 no se producirá hasta que el tren 2 libere el CV BC206 de la bretele. Igualmente, el tren 2 estacionado en CV andén Badalona-Pompeu Fabra V2 no efectuará su salida hasta que el tren 3 libere el CV BC207 de la bretele.

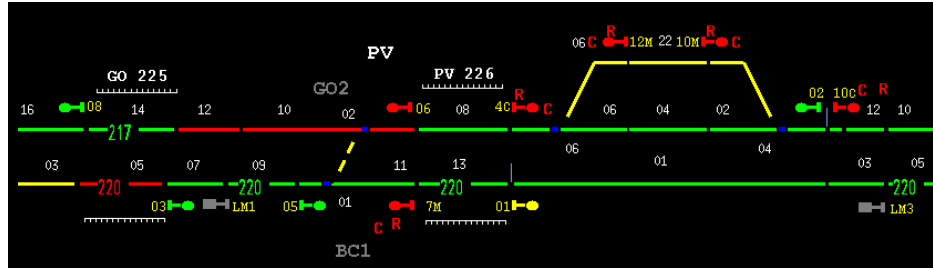


Fig. 133 Vueltas automáticas GO2 y BC1 seleccionables en el telemando de tráfico.

Imagen: captura de pantalla del telemando de tráfico de Línea 2 de Metro de Barcelona.

6 SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN AUTOMÁTICA PROPUESTO PARA LÍNEA 2

El crecimiento experimentado por la población en la ciudad de Barcelona y su Área Metropolitana, que ha pasado de 2.215.901 habitantes en 1950 a prácticamente alcanzar 6.000.000 en 2010²³, ha supuesto todo un reto para los sistemas de transporte metropolitanos. El aumento del uso de dichos transportes, entre ellos el Metro de Barcelona, implica que los sistemas de control ferroviario tengan que adaptarse a una demanda creciente de servicios cada vez más rápidos y eficientes.

La Línea 2 de Metro de Barcelona funciona con un sistema de señalización tradicional basado en el uso de cantones fijos. Cada cantón está protegido por señales que impiden la entrada de otros trenes cuando dicho cantón se encuentra ocupado por otro tren. El sistema de señalización está suministrado por DIMETRONIC y dispone de funcionalidad de Protección Automática de Trenes (ATP) y Operación Automática de Trenes (ATO). El envío de información al tren se realiza a través de la señal que se transmite mediante los circuitos de vía, donde los carriles actúan como antenas emisoras en cada sección de vía. La transmisión es unidireccional desde el enclavamiento al tren, siendo el equipo ATP/ATO embarcado el que se encarga de las funciones de seguridad en función de la programación establecida.

Los sistemas de señalización automática se conocen también como de Control de Trenes Basado en Comunicaciones o Communications Based Train Control (CBTC). La principal novedad respecto a los sistemas de señalización convencionales es que existe una comunicación radio bidireccional entre el enclavamiento y el equipo embarcado, que permite una gestión más eficiente del tráfico ferroviario. De esta manera, el enclavamiento conoce en todo momento la posición exacta de los trenes en circulación, pudiendo establecer cantones móviles en lugar de cantones fijos. Se asocia un cantón móvil a cada uno de los trenes que está en circulación, sirviendo como referencia y punto de parada irrebasable para el resto de los trenes precedentes. Las funcionalidades ATP y ATO, en su conjunto ATC, están igualmente implementadas también en los sistemas CBTC, según el estándar IEEE 1474. El hecho de disponer de una comunicación bidireccional constante entre el tren y el enclavamiento permite el envío de órdenes para la conducción del tren de manera autónoma, es decir, sin necesidad de conductor en cabina.

El sistema CBTC propuesto para automatizar la Línea 2 está fabricado por la empresa alemana SIEMENS y funciona en diferentes explotaciones a nivel mundial, entre ellas Línea la 14 en París (Meteor), la Canarsie Line en New York y la Línea 9 en Barcelona. El nombre completo del producto es Train Guard (TG) Mass Transit (MT) CBTC, es decir, TG MT CBTC.

6.1 Principios generales

El sistema de señalización ferroviaria ATC/ATO de DIMETRONIC que actualmente funciona en la Línea 2 divide la Línea en Circuitos de Vía (CV) y utiliza las Señales de Circulación (SC) como instrumentos básicos para cumplir los principios clásicos de la señalización ferroviaria:

- Si un tren está situado en un CV, el estado del CV es ocupado.
- Si no hay ningún tren en un CV, el estado del CV es libre.
- Un CV debe estar libre entre dos CV ocupados (CV colchón o amortiguador).
- A fin de respetar este principio, se prohíbe a los trenes que salgan de su CV si al menos uno de los dos CV siguientes están ocupado.
- Las SC permiten establecer el itinerario y autorizar el paso de un tren a la siguiente sección de circulación, compuesta por uno o varios CV.
- Si la SC muestra aspecto rojo no se autoriza el paso del tren a la siguiente sección.

²³ Fuente: La población de Barcelona. Cuadernos Fundación BBVA. Serie disponible en www.fbbva.es.

El sistema CBTC de SIEMENS cumple la norma IEEE 1474.1 Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements, que incluye:

- Exigencias funcionales.
- Exigencias de prestaciones.
- Criterios de intervalos/frecuencia.
- Criterios de seguridad del sistema.
- Criterios de disponibilidad del sistema.

Según dicha norma, un sistema CBTC debe implementar las funcionalidades básicas de ATC:

- Realizando un control permanente de los trenes sin necesidad de personal embarcado para la conducción.
- Localizando los trenes con alta precisión y de manera independiente a los circuitos de vía físicos.
- Implementando una transmisión de datos continua bidireccional entre Tierra y tren. Para conseguir una transmisión continua se debe instalar una red de radio WiFi que proporcione las comunicaciones entre el Piloto Automático Embarcado (PAE) y Piloto Automático Suelo (PAS).
- Utilizando equipos de Tierra y a bordo que implementen el procesado de datos de seguridad con un nivel SIL 4.

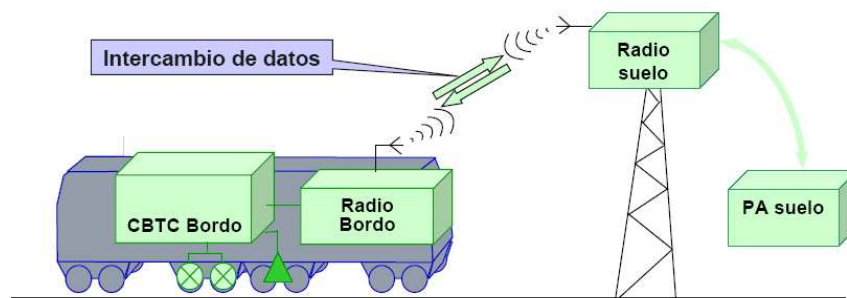


Fig. 134 Comunicación Piloto Automático Embarcado (PAE) y Piloto Automático Suelo (PAS).

Imagen: elaboración propia.

El seguimiento y control de los trenes a través de la radio permite una ubicación exacta de éstos, independientemente de los circuitos de vía que estén ocupando en ese momento. En cualquier caso, como veremos más adelante, los circuitos de vía físicos se mantienen para permitir la circulación mixta en caso de trenes no equipados o con avería en el CBTC.

Con el objetivo de autorizar que los trenes circulen lo más cerca posible, siempre manteniendo la distancia de seguridad, el sistema CBTC implementa los siguientes principios de separación entre trenes:

- Circuitos de Vía Virtuales (CVV). Son subdivisiones lógicas de los circuitos de vía físicos, con longitudes variables entre 50 m. y 150 m. El hecho de disponer de estas subdivisiones permite implementar las funcionalidades ATC de establecimiento de rutas seguras y el seguimiento preciso de los trenes. El subsistema ATS trabaja sobre el ATC para facilitar la operación de la Línea a través del telemando de tráfico, permitiendo localizar los trenes mediante CVV con mayor precisión que con CV físicos, cuyas longitudes pueden llegar incluso a 1400 m.

- Un CVV puede estar ocupado únicamente por un tren, cuya longitud definida para la Línea 2 es de poco más de 86 m. para los trenes ALSTOM S9000 con 5 coches.

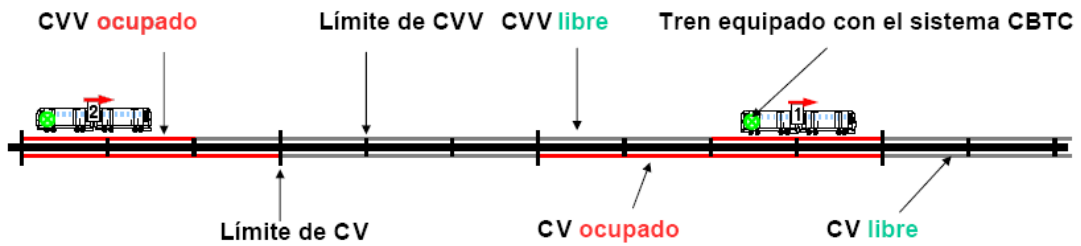


Fig. 135 Seguimiento de trenes y establecimiento de Vital MAL en CBTC.

Imagen: elaboración propia.

- El sistema CBTC define para cada tren un límite de movimiento autorizado o Movement Authority Limit (MAL), calculado según el sentido de la marcha y que nunca debe ser sobrepasado por el tren.
- La MAL vital de un tren corresponde a la parte trasera del tren CBTC que va por delante y la MAL no vital es el límite de entrada del próximo circuito de vía virtual ocupado, permitiendo la existencia de varios trenes de manera simultánea en un circuito de vía.

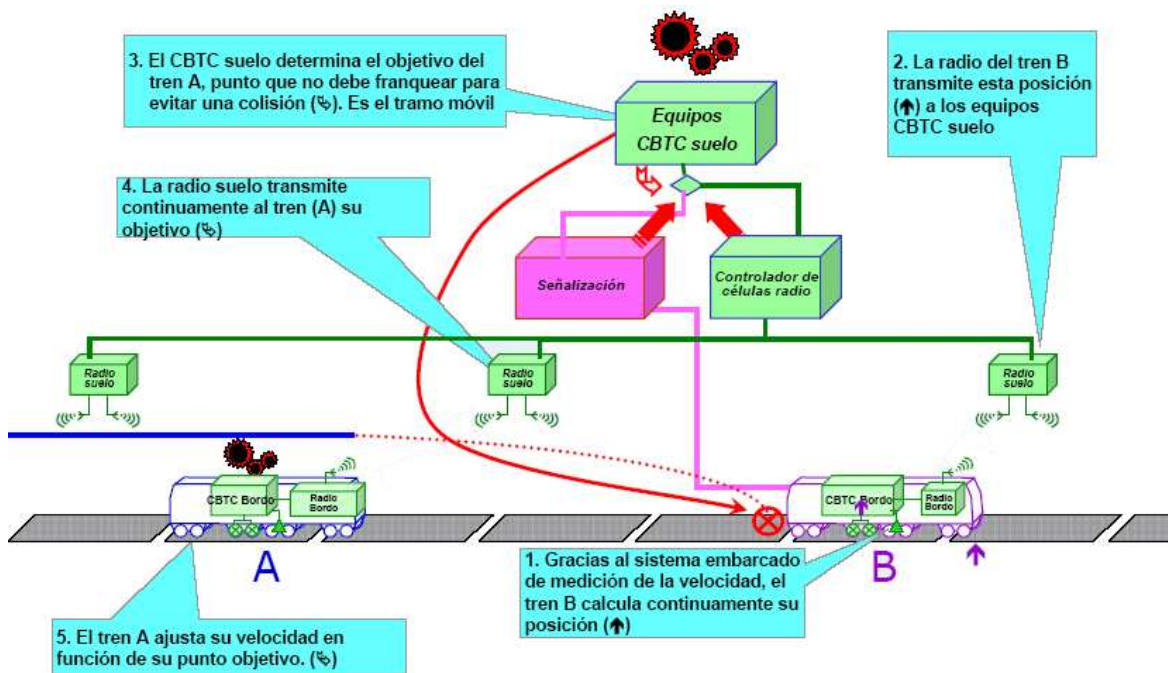


Fig. 136 Principios generales de funcionamiento del sistema CBTC.

Imagen: elaboración propia.

6.2 Arquitectura del sistema

El sistema CBTC incluye los siguientes subsistemas:

- Subsistema de vía: formado por los objetos de vía que interactúan con el enclavamiento. Se compone de circuitos de vía, accionamientos de aguja y señales.
- Subsistema de enclavamiento. Dado que en este sistema las funciones de ATC están realizadas por el Zone Controller, el enclavamiento pierde parte de su lógica y se limita a actuar como un PLC entre los objetos de vía y el ZC, aportando información segura cuando éste lo solicita. Se compone de un equipo de Enclavamiento o Interlocking (IL) que interactúa con el subsistema de vía.
- Subsistema Automatic Train Control (ATC). El ATC se encarga de las funciones de señalización y seguridad del sistema ATP y de las funciones de control y operación automática de trenes del sistema ATO. El PAS se conoce como Controlador de Zona o Zone Controller (ZC) realiza las funciones de ATC Tierra y se instala en la sala de enclavamiento. El PAE es el Controlador Embarcado o Carbone Controller (CC) realiza las funciones de ATC Embarcado y está instalado en el propio tren. Un conjunto de balizas de localización instaladas en vía complementan el sistema para asegurar la localización precisa de los trenes en vía.
- Subsistema de Comunicación de Datos (DCS). La red de radio asegura la comunicación continua entre el CC y el ZC. Los Equipos de Comunicación de Radio o Radio Communication System (RCS) están localizados en la sala de enclavamiento, el Controlador de Células de Tierra o Wayside Cell Controller (WCC), y a bordo del tren, el Equipo de Radio Embarcado o Carbone Radio Equipment (CRE). Para permitir la conexión entre todos los equipamientos se instala una red de fibra óptica a lo largo del túnel intercomunicando las Antenas de Radio de Tierra o Wayside Radio Antenna (WRA) con los WCC en salas de enclavamiento. Además, otra red de fibra óptica comunica los equipos en sala de enclavamiento (ZC, WCC e IL) con el subsistema ATS, es la llamada Wayside CBTC Network (WCN).
- Subsistema Automatic Train Supervision (ATS). El ATS realiza las funciones de supervisión, control y regulación de la Línea, aportando un conjunto de funcionalidades adicionales a los tradicionales Telemandos de Tráfico. Está compuesto por servidores y puestos de operación repartidos en el Puesto de Control Central (PCC) y en el Puesto de Control de Emergencia (PCE).

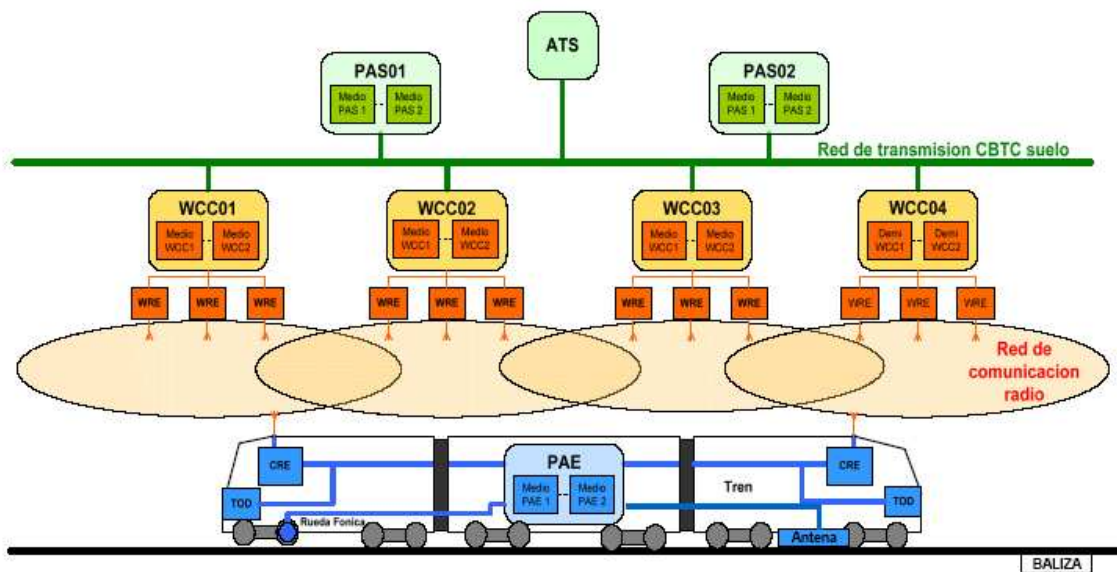


Fig. 137 Arquitectura del sistema CBTC.

Imagen: Descripción general del sistema CBTC. Módulo GEN-T1. SIEMENS Transportations Systems. Mayo 2008.

Los equipos que forman cada uno de los subsistemas descritos aseguran las funcionalidades requeridas, según la siguiente clasificación:

- Nivel 1: Objetos de vía
- Nivel 2: Enclavamiento.
- Nivel 3: Protección Automática del Tren (ATP).
- Nivel 4: Operación Automática del Tren (ATO).
- Nivel 5: Supervisión Automática del Tren (ATS).

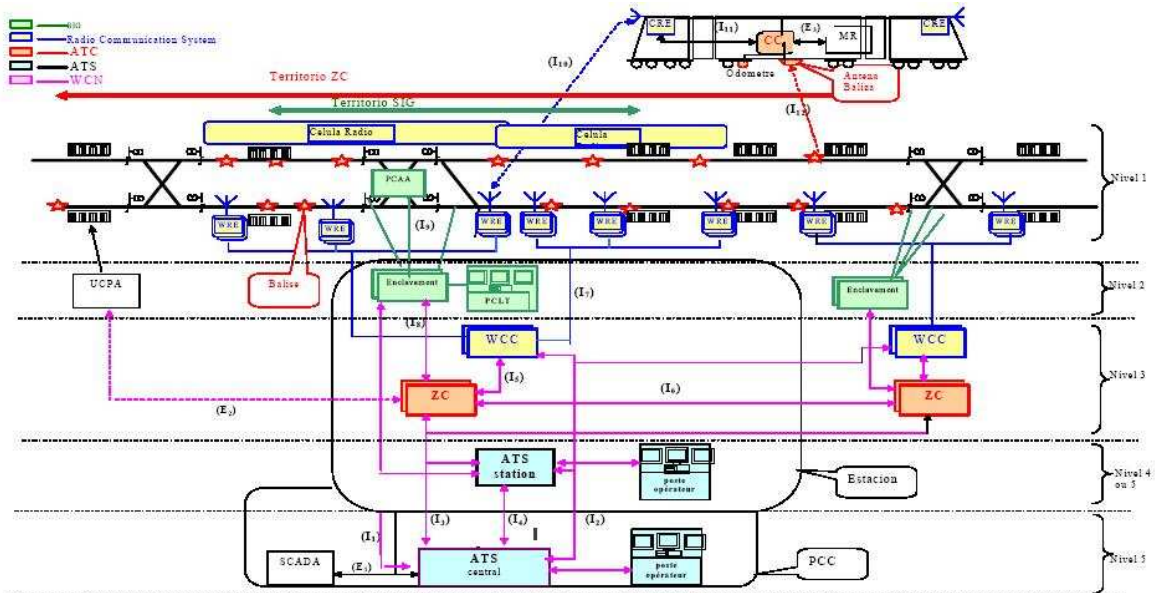


Fig. 138 Niveles del sistema CBTC.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

6.3 Subsistema de vía

Los objetos de vía son todos aquellos elementos situados en campo. El producto CBTC de SIEMENS describe una serie de equipamientos en vía como parte de su sistema, algunos de ellos imprescindibles. La modernización del sistema de señalización de Línea 2 se quiere realizar aprovechando al máximo los actuales equipos instalados en vía y minimizando las nuevas instalaciones. De esta manera, se describen cada uno de los elementos indicando si van a ser instalados o no en la Línea 2 de FMB.

6.3.1 Circuitos de vía

Los requerimientos del sistema CBTC no exigen la instalación de circuitos de vía para cumplir las mismas funcionalidades que en los sistemas de señalización convencional, aunque sí para la señalización en zona de agujas y circulaciones en modo degradado.

En la Línea 2, los circuitos de vía FS2550 de DIMETRONIC son el interface para la transmisión de la señal ATP a los trenes, además de servir para la detección de ocupación y seguimiento de la circulación. En el CBTC las funciones de control y seguridad de ATP se realizan mediante las comunicaciones vía radio, por lo que los circuitos de vía dejan de ejercer dichas tareas.

En modo nominal de circulación todos los trenes funcionan de manera automática bajo conducción Unattended Train Operation (UTO), tanto el cálculo de las distancias de seguridad, autorizaciones de marcha y seguimiento de los trenes se realizan en base a la localización que envían éstos a los equipos ATC Tierra. El cantón móvil del tren, que define la MAL vital del precedente, viene determinado por la longitud física entre enganches, de 86 m. en los trenes de Línea 2, más una zona de incertidumbre de 2 m. por delante y por detrás del tren. Cada tren localizado en la Línea, mide 90 m. para el sistema CBTC, y en base a ello, el ZC calcula las distancias de seguridad y autoriza las rutas. Los circuitos de vía de trayecto no se utilizan para nada, en cambio, sí que se utilizan los Circuitos de Vía Virtuales (CVV), divisiones lógicas de los CV físicos, que establecen la MAL no vital y facilitan el seguimiento de los trenes.

La exigencia de instalación de circuitos de vía viene determinada por una triple necesidad:

- El ZC para realizar los cálculos de seguridad necesita conocer el estado en la zona de agujas. Para ello, cuando el tren se acerca a dicha zona pregunta al enclavamiento por el estado de dicha zona, es decir, si la aguja está enclavada en la posición deseada y si no hay ocupación en la vía. Para poder determinar si la vía está desocupada en la aguja, es necesario instalar un CV de agujas.
- Detección de carril roto. La señal emitida por el TX y recibida por el RX es la única manera de poder detectar un defecto en el carril que pueda suponer un peligro para la seguridad del tren.
- En modo degradado se necesita una información del estado de la vía para poder autorizar rutas restrictivas. En el caso de que un tren sufra una avería en la radio y no pueda transmitir su posición, un agente deberá desplazarse al tren y conducir el tren de manera manual a la próxima estación. Para que el resto de trenes puedan seguir circulando en modo UTO o Manless Train Operation (MTO) se necesita una referencia para definir la MAL vital del tren, que vendrá dada por la ocupación del CV del tren no comunicante.

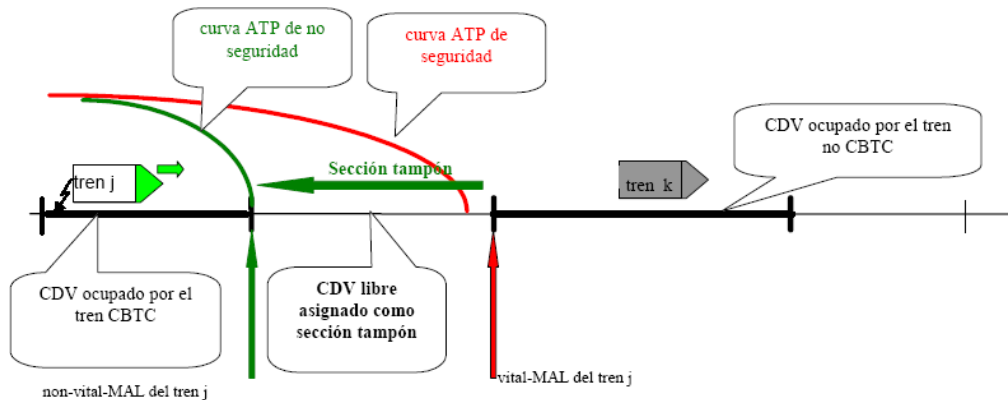


Fig. 139 Seguimiento por circuitos de vía de tren no CBTC.

Imagen: Descripción general del sistema CBTC. Módulo GEN-T1. SIEMENS Transportations Systems. Mayo 2008.

6.3.2 Balizas

El sistema CBTC necesita de la instalación de balizas en vía general para transmitir a los automatismos del tren la información específica de posición en el momento en que el tren circula sobre la baliza. Las balizas son un elemento primordial en la función de localización del tren, determinando la posición geográfica del tren en la red de explotación. La información transmitida por la baliza permite al tren reajustar su posición en la línea.

El interfaz que comunica la baliza con la antena situada en el tren facilita la tele alimentación de la baliza y la recepción de los datos baliza, permitiendo al Carbonne Controller (CC):

- Conocer la posición exacta del tren.
- Reajustar esta posición si es inexacta.
- Calibrar automáticamente el odómetro del CC.

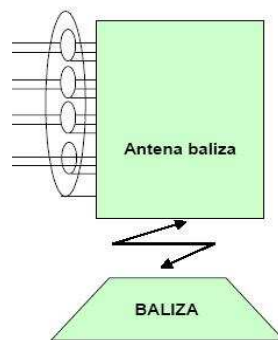


Fig. 140 Comunicación entre la baliza y la antena de tren.

Imagen: elaboración propia.

La localización del tren se obtiene mediante los siguientes mecanismos:

- Lectura de balizas localizadas en ciertos puntos de la red: cada baliza, telealimentada por el CC, transmite un mensaje que indica sin ambigüedad la baliza en la red. Las balizas se instalan en el centro de la vía con el fin de ser leídas por el tren en cualquiera orientación de éste con relación a la vía.
- Medida del desplazamiento del tren mediante los captadores odométricos (teniendo en cuenta su calibración automática).
- Obtener la posición de las agujas, información transmitida por el ZC a partir de su interfaz con el enclavamiento. Este dato permite la actualización de la localización del tren al paso de las agujas de punta.

El sistema CBTC requiere de la instalación de un mayor número de balizas en la zona de andenes que en la zona de interestación. El motivo es que en la zona de andenes la precisión de parada ha de ser máxima, puesto que la instalación de Cerramientos de Puertas de Andén (CPA) obliga a una apertura de puertas solidaria con el tren, debiéndose asegurar una elevada exactitud en la alineación de ambas puertas. En cambio, la función de las balizas en la interestación es asegurar la corrección en la localización que pueda efectuar el odómetro, por ejemplo por un fallo en el torneado de las ruedas.

Es necesario instalar también un número mayor de balizas en la zona de salida de talleres, es decir en la zona del acceso a Triangle Ferroviari en Línea 2, ya que el taller y cochera no está automatizado y por tanto, los trenes salen conducidos manualmente hasta la zona de transferencia y no están calibrados.

Las balizas intervienen directamente en el calibrado de las ruedas de tren, esto es, cuando el tren pasa por una baliza memoriza su posición e inicia un contador. Cuando pasa por la segunda baliza de calibración detiene el contador y utilizando el dato de la distancia entre ambas balizas, extrae el valor del diámetro asignado para la rueda fónica de tren. Este valor será el que utilizará el tren para localizarse a lo largo de la línea. Para poder calibrar un tren con seguridad, es necesario un tramo recto con una distancia entre balizas de 100 m. como mínimo y un tiempo máximo de paso entre balizas inferior a 2 minutos.

La repartición de las balizas de localización a lo largo de la vía es tal que el fallo de una única baliza no es suficiente para que el CC cambie de lugar, es decir que la avería de una baliza de localización es transparente frente a la explotación de la Línea.

Cada CC indica al ATS las balizas que no encontró. Esta información se archiva, y una correlación efectuada entre las informaciones que transmiten varios trenes, permite indicar las balizas averiadas. El operador de mantenimiento lanza regularmente una petición que establece una correlación entre las descripciones de varios trenes memorizados en la base de datos de las descripciones, encontrándose así en condiciones de identificar las balizas defectuosas. La sustitución de estas balizas se efectúa durante la noche cuando el servicio se acaba.

Cuando se produce una avería de varias balizas sucesivas de localización de tierra el operador de tráfico deberá establecer rápidamente un procedimiento que permite a un conductor reanudar cada tren en modo MTO a la estación anterior.

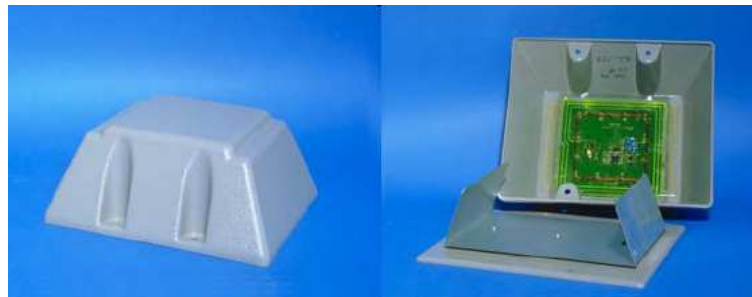


Fig. 141 Aspecto exterior e interior de una baliza de localización.

Imagen: Descripción general del sistema CBTC. Módulo GEN-T1. SIEMENS Transportations Systems. Mayo 2008.

6.3.3 Accionamientos de aguja

Actualmente hay 38 accionamientos instalados en desvíos y breteles de vía general en Línea 2, todos ellos motores de aguja modelo MD-2000 fabricados por DIMETRONIC.

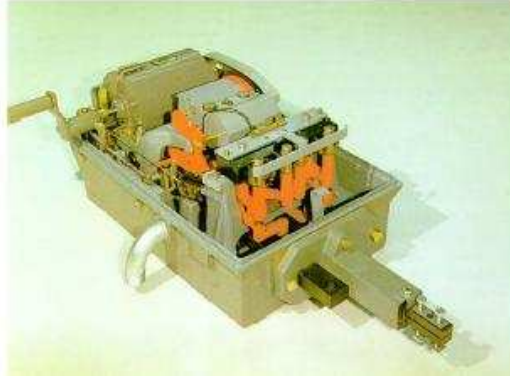


Fig. 142 Motor eléctrico de agujas modelo MD-2000 de DIMETRONIC.

Imagen: Descripción general MD-2000. DIMETRONIC S.A. Ed. 1. Junio 1998.

6.3.4 Señales

Existen un total de 83 señales luminosas instaladas en vía general de Línea 2, entre señales de circulación y de límite de maniobra. Por otra parte, hay 5 señales de topera luminosa instaladas en las vías finales de Paral·lel y Badalona-Pompeu Fabra.

El sistema CBTC no requiere señales de circulación para señalar los cantones ocupados, puesto que la gestión de la circulación de los trenes se basa en cantones móviles. El punto de parada del tren viene dado por la distancia de seguridad que tenga por delante, que el ATC controla en seguridad. De esta manera, el sistema no necesita de señales de circulación que sirvan como punto de referencia para los trenes CBTC. En cualquier caso, determinados operadores ferroviarios deciden instalarlas igualmente como soporte en caso de problema en el sistema CBTC.

Respecto a las señales indicadoras de aguja, su utilidad se restringe a circulaciones en modo degradado o en horario nocturno, donde un conductor maneja el tren de manera manual. En explotación nominal, el tren circulará en modo Manless Train Operation (MTO), por lo que la visualización de la posición de aguja tampoco sería necesaria.

Las señales de topera, formadas por tres focos luminosos de color rojo, se utilizan para indicar al conductor del tren que la vía llega a su fin. Están instaladas en las vías de las estaciones finales, dos en Paral·lel y tres en Badalona-Pompeu Fabra.

6.4 Subsistema de enclavamiento

El ZC requiere de un Enclavamiento o Interlocking (IL) para la gestión de los diferentes objetos de vía, no imponiendo el enclavamiento requisitos para el cantonamiento de los circuitos de vía. El ZC puede trabajar con enclavamientos de cableado libre o de tipo electrónico, debiendo configurarse de diferente manera según el caso. La compatibilidad entre el ZC de SIEMENS y el WESTRACE de DIMETRONIC está asegurada mediante el interface implementado para Línea 9 de Metro de Barcelona.

El WESTRACE consta de uno o varios bastidores donde se alojan una serie de tarjetas electrónicas, que contienen por un lado la lógica o datos que definen la funcionalidad del enclavamiento y por otro lado las entradas y salidas con las que se comunica con los elementos de campo (señales, agujas, circuitos de vía...), para enviarles órdenes y recibir indicaciones de su estado real.

Está compuesto por un módulo principal (WNCM) que contiene el procesador central con la lógica y datos del enclavamiento, y módulos vitales de entrada y salida. A través de los módulos de entrada se reciben indicaciones de los elementos de vía (circuitos de vía, accionamientos de agujas, etc.). Mediante los módulos de salida se transmiten órdenes a los distintos elementos de campo (accionamientos, señales luminosas, etc.).

El enclavamiento lleva a cabo la adquisición de los datos a partir de los módulos de entrada, el procesamiento de los mismos según las ecuaciones booleanas definidas en cada aplicación, y el envío del resultado de este procesamiento a los módulos de salida.

Las funciones principales del enclavamiento en el sistema CBTC son:

- Permitir o rechazar el establecimiento de las rutas solicitadas por el operador desde el ATS dentro de la zona controlada por el enclavamiento, en base al estado de los elementos del enclavamiento y la compatibilidad entre rutas (SIL 4).
- Establecer incompatibilidad entre rutas en el área de taller. Los dos enclavamientos de tipo electrónico ALCATEL modelo INTERSIG L905 que actualmente operan en la zona de taller y cochera no se modifican ni ven alteradas sus funciones, ya que dicha zona no se automatiza.
- Establecer incompatibilidad entre rutas en vías principales (sólo itinerarios por la misma aguja). No se incluyen incompatibilidades por deslizamiento ni protección de flanco (SIL 4).
- Recibir e interpretar adecuadamente el estado de los elementos de campo que intervienen en la señalización, sólo circuitos de vía y agujas, ya que se han eliminado las señales.
- Generar cambios en el estado de las agujas, en función de las órdenes generadas por el operador y el estado anterior de dichos elementos. (SIL 4).
- Comunicarse con otros sistemas de control (ZC) para garantizar la correcta operación del sistema de señalización completo (SIL 4).
- Comunicarse con los sistemas de mando para gestionar las órdenes y transmitirles indicaciones. La comunicación con el ATS se realizará a través del Procesador Auxiliar (SIL 0).

El enclavamiento WESTRACE no está preparado en el sistema CBTC para gestionar el establecimiento de itinerarios en trayecto, las incompatibilidades de dos trenes circulando en sentidos opuestos y las incompatibilidades por deslizamiento, todas ellas garantizadas por las funciones ATC que se desarrollan en el ZC.

En el proceso de cálculo de las curvas de velocidad ATP que realiza el ZC se requiere de la intervención del enclavamiento para el establecimiento de las MAL. A través del enclavamiento el ZC recibe la información del estado seguro de los accionamientos, itinerarios establecidos y ocupación de circuitos de vía.

En la figura 139 hemos visto como el seguimiento de un tren no comunicante por radio se realiza gracias a la detección que proporcionan los circuitos de vía. La figura 143 muestra el caso del cálculo de la MAL en zona de agujas, donde el ZC interroga al IL sobre el estado de la zona:

- Aguja en posición correcta y enclavada por un itinerario.
- Ausencia de proceso de destrucción de dicho itinerario, ya sea inmediato o temporizado a través de un diferímetro.
- Circuito de vía destino libre. El circuito de vía destino es el inmediatamente posterior al de aguja.

Si alguna de estas condiciones no se cumplen, el ZC establecerá una MAL vital hasta la punta del espadín de la aguja, no permitiendo al tren alcanzar nunca este punto mediante la activación del freno de emergencia si es necesario.

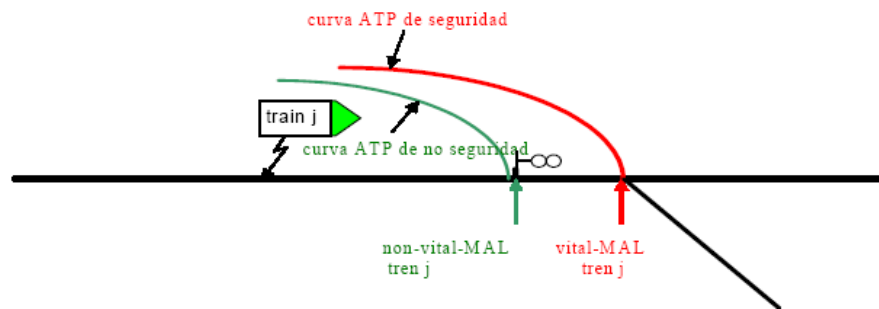


Fig. 143 Establecimiento de MAL vital en una aguja.

Imagen: Descripción general del sistema CBTC. Módulo GEN-T1. SIEMENS Transportations Systems. Mayo 2008.

El enclavamiento manda y autoriza los itinerarios pedidos por el ATS, comprobando la ausencia de itinerarios incompatibles desde el punto de vista de la seguridad. Finalmente, el IL informa al ZC de los itinerarios autorizados.

El subsistema de enclavamiento consta a su vez de los siguientes subsistemas:

- Subsistema de lógica.
- Subsistema de conexión entre red local y WCN (Wayside CBTC Network).
- Subsistema de supervisión y mantenimiento.

6.4.1 Subsistema de lógica

El subsistema de lógica lleva a cabo la adquisición de los datos a partir de los módulos de entrada, el procesamiento de los mismos según las ecuaciones booleanas definidas en cada aplicación, y el envío del resultado de este procesamiento a los módulos de salida.

La figura 144 muestra el subsistema de lógica donde se pueden distinguir tres partes:

- El equipo vital constituido por el WESTRACE en configuración hot stand-by, completamente duplicado.

- El equipo auxiliar para las entradas y salidas no vitales de los Puestos de Control de Accionamiento de Aguja (PCAA). Los PCAA son mandos locales para el accionamiento de los motores de aguja situados en la proximidad de cada motor. En la ingeniería realizada para el CBTC de Línea 2 no se ha considerado su instalación.
- El equipamiento de interface para las comunicaciones con la red local. El enclavamiento de DIMETRONIC necesita dos switch para interconectar todos sus equipos. Una novedad importante del sistema es que las comunicaciones entre equipos se realiza mediante una red TCP/IP, modernizando así las antiguas comunicaciones vía serie RS-232. En lugar de dedicar un par de switches en exclusiva a los equipos de la red local de enclavamiento, se utilizarán los dos routers que interconectan los demás equipos de ATC y ATS.

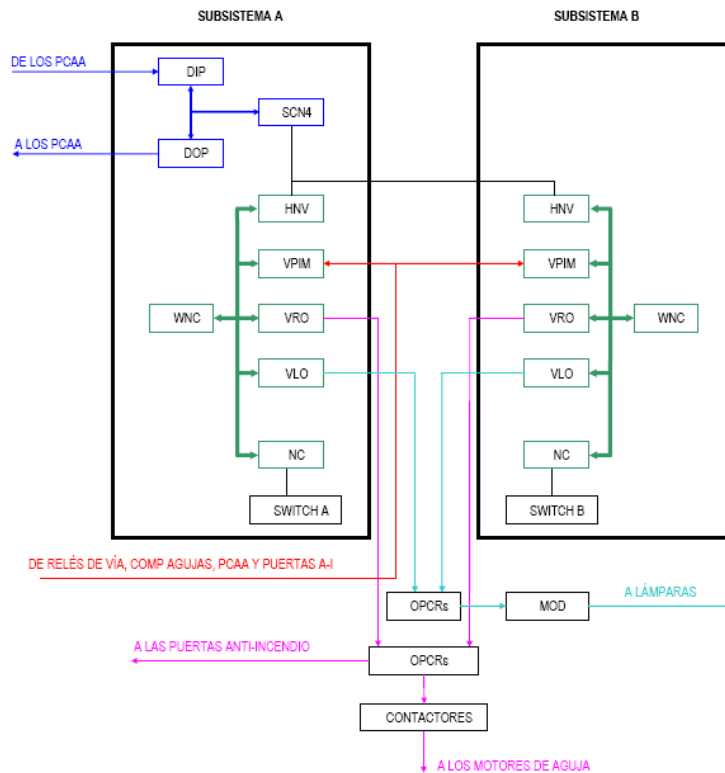


Fig. 144 Subsistema de lógica del WESTRACE.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

La tarjeta WNCM se encarga de ejecutar mediante ecuaciones booleanas la lógica de aplicación definida por la ingeniería de señalización.

La tarjeta VPIM recibe información sobre el estado de las entradas procedentes de los equipos de seguridad de campo, en el caso de Línea 2, los relés de vía que indican las ocupaciones y la comprobación de los espadines de aguja.

La tarjeta VROM envía órdenes a los elementos de seguridad de campo. Tras ejecutar la lógica, el WNCM envía a los VROM el estado de las variables que controlan en estos módulos las correspondientes salidas.

La tarjeta VLOM es el módulo destinado para la conexión de las lámparas de señal, pero al no ser necesarias para el sistema CBTC, no dispone de conexiones.

En caso de detectarse un fallo vital en la unidad activa del WESTRACE, éste conmutaría a la unidad en stand-by mediante el relé OPCR, de manera transparente para la circulación de los trenes.

6.4.2 Subsistema de conexión entre red local y WCN

La red local está formada por los equipos identificados con una dirección IP que forman parte del Interlocking (IL):

- Unidades WESTRACE A y B.
- Procesador Auxiliar A y B. Al Procesador Auxiliar (PCAux) también se le conoce como Non-Safety IL, haciendo referencia al carácter de no seguridad que representa. El PCAux es un PC industrial que ejerce como interface de comunicaciones entre el WESTRACE y el ATS, que intercambian información de manera continua a través de la red WCN.
- Sistema de Ayuda al Mantenimiento Local (SAM-L) o Moviola Local. Se trata de un PC conectado directamente con el WESTRACE, capaz de grabar en tiempo real y reproducir posteriormente multitud de eventos y alarmas.

El subsistema de conexión está compuesto por 2 routers que enlazan el equipamiento de red local del IL con la red WCN y el resto de equipos del ATC. De esta manera, se facilitan todas las conexiones necesarias para el funcionamiento del sistema:

- La comunicación entre los WESTRACES y los ZC.
- La comunicación entre los WESTRACES y el ATS.
- La comunicación entre la Moviola Local y la Remota.

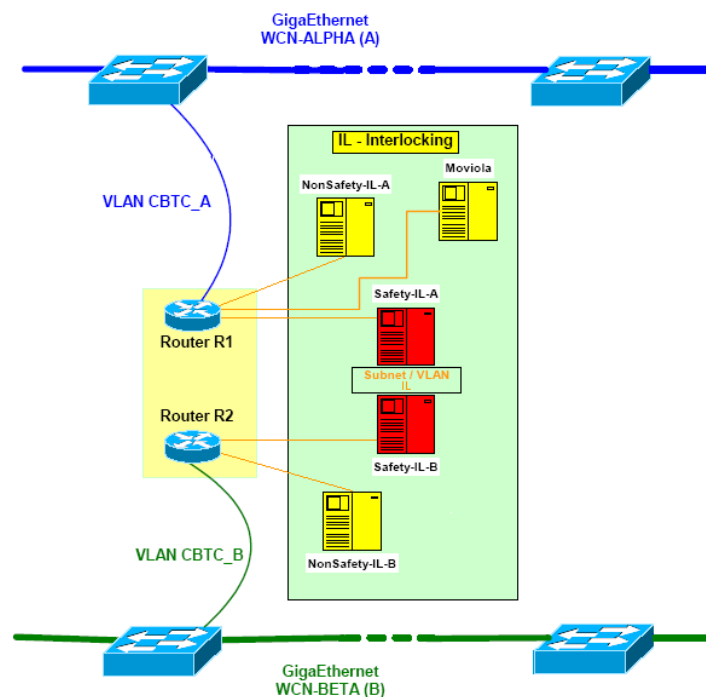


Fig. 145 Arquitectura de conexión del enclavamiento con la red WCN.

Imagen: elaboración propia.

6.4.3 Subsistema de supervisión y mantenimiento

El subsistema de supervisión y mantenimiento local se compone de un PC Industrial (PCI) que registra on-line los procesos, eventos y alarmas que se producen en el WESTRACE. Se conoce como Sistema de Ayuda al Mantenimiento Local (SAM-L) o Moviola Local.

Cada SAM-L registra los datos del WESTRACE al que pertenecen, conservando la información en el disco duro entre uno y dos meses. El tiempo que se conservan los archivos de reproducción depende de la capacidad del disco duro, pero para cumplir la normativa exigida por la ley es necesaria que cualquier entidad de transporte conserve los datos un mínimo de 18 meses, ya que pueden ser utilizados como prueba judicial en caso de un incidente grave en la circulación. Para ello, los ingenieros de mantenimiento graban en un disco óptico externo los ficheros con periodicidad mensual, archivándolos en el Centro de Control de Metro (CCM).

Todas las SAM-L tienen asignada una dirección IP y se centralizan en un PCI instalado en CCM, que constituye el Sistema de Ayuda al Mantenimiento Remoto (SAM-R) o Moviola Remota. A través de la SAM-R se puede actuar sobre las diferentes SAM-L permitiendo reproducir una incidencia en el CCM al poco tiempo de haber sucedido, analizando los fallos y alarmas que se han producido.

6.5 Subsistema Automatic Train Control (ATC)

El sistema Automatic Train Control (ATC) integra las funcionalidades aseguradas por parte del Automatic Train Protection (ATP) y Automatic Train Operation (ATO). El ATP implementa las funciones de señalización, seguridad y protección de los trenes, todas ellas con un nivel de seguridad SIL 4. El ATO controla y regula la circulación de los trenes a través del subsistema Automatic Train Supervision (ATS).

El ATC consta de los siguientes equipos:

- Zone Controller (ZC): realiza las funciones de nivel 3 ATP y se instala en las salas de enclavamiento. El ZC administra la seguridad del movimiento de trenes sobre un tramo de la Línea. Su misión es detectar la presencia de los trenes en su territorio, luego calcular, para cada uno de ellos, una autorización de marcha sobre un ámbito situado delante del tren. Es importante destacar también el papel del ZC en la transferencia de viajeros al andén, pues actúa como interface entre ATC embarcado y la Unidad de Control de Puertas de Andén (UCPA) para los intercambios de seguridad.
- Carbone Controller (CC): realiza las funciones embarcadas de nivel 3 ATP y nivel 4 ATO. Está instalado en cada uno de los trenes. El CC determina la posición de su tren sobre la vía, administra los modos de conducción, manda y controla el movimiento del tren en función de las autorizaciones de movimientos transmitidas por el ZC y de las consignas de explotación dadas por el ATS. Además, autoriza la apertura de las puertas tren y del andén, y controla automáticamente su cierre (en modo MTO).

La figura 146 muestra cómo funciona la Protección Automática de Trenes (ATP) en el sistema CBTC. Un tren B, equipado con CBTC, calcula continuamente su posición (1) mediante odometría, ajustada en determinados puntos fijos mediante las balizas. La posición es transmitida continuamente (2) por las antenas de radio situada en el túnel hasta el ZC. Éste determina (3) el blanco móvil de seguridad detrás de dicho tren B, mediante el principio de cantón móvil. El blanco de seguridad, y la autorización de marcha correspondiente, son transmitidos por radio (4) al tren siguiente, A. La unidad embarcada (OBCU) del propio tren A evalúa y aplica en todo momento (5) sus curvas de control de velocidad, incluyendo protección ATP de dicho blanco, pero también consignas de ATO/ATS y operación sin conductor en caso de que el tren circule en modo MTO. El ZC combina también los posibles blancos fijos para el tren A que resultan, a través del enclavamiento, de los puntos de protección fijos temporales (6), como una aguja no enclavada o un cruce con la ruta de otro tren, así como de la ocupación de circuitos de vía por trenes "mudos" o no equipados (7), ya que éstos no transmiten su posición exacta pero son detectados de forma segura por los circuitos de vía. Para ello, el ZC maneja un nivel adicional de análisis por cantones virtuales.

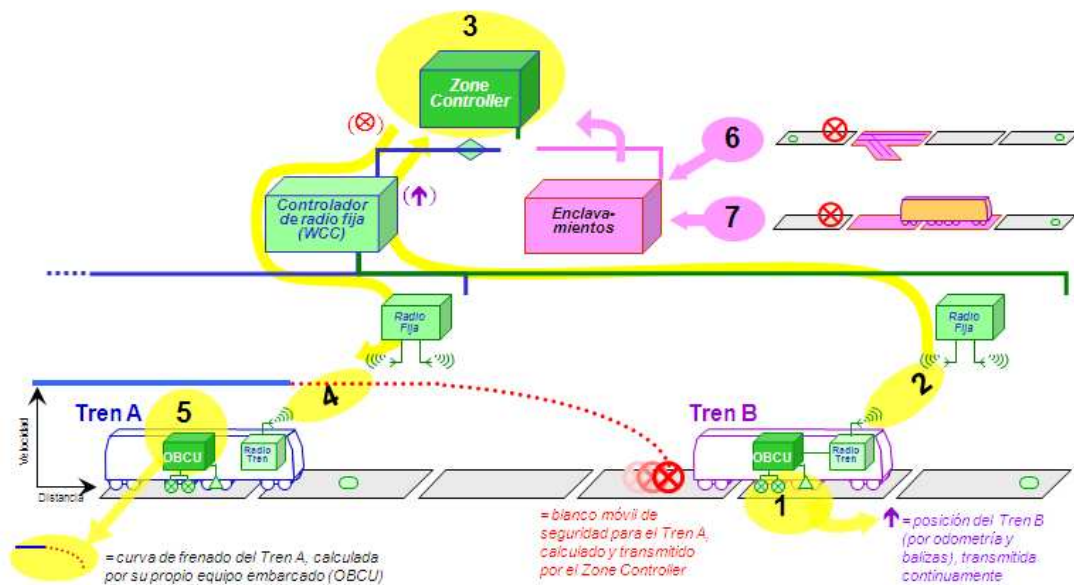


Fig. 146 Funcionamiento del ATP en el sistema CBTC.

Imagen: elaboración propia.

El hecho de que el sistema CBTC disponga de conducción automática sin necesidad de personal en cabina supone una mejora tecnológica importante pero a su vez requiere de nuevas instalaciones que eviten riesgos adicionales. El riesgo principal es que una persona caiga a la vía y no haya un conductor que pueda accionar el freno de emergencia en el tren. Para evitarlo es necesario instalar cerramientos totales o parciales en la zona de andenes que aislen la vía del acceso al público.

En la ingeniería realizada para la automatización de la Línea 2 se ha considerado que la mejor opción es un cerramiento total de andenes, ya que evita totalmente la caída de personas a vía, accidental o intencionadamente, y además consigues un aislamiento térmico de los andenes.

6.5.1 Funcionalidades garantizadas

La primera funcionalidad principal garantizada por el ATC es el seguimiento de los trenes. El objetivo de esta función consiste en determinar la posición de los trenes frente a los otros trenes y frente a los obstáculos fijos. El ATC es capaz de administrar una flota mixta de trenes (trenes equipados y trenes no equipados).

El ATC Tierra (ZC) establece la cartografía de la vía a partir de dos fuentes de información:

- La localización transmitida por el equipo ATC Embarcado (CC) de los trenes equipados.
- El estado de los circuitos de vía y la posición de las agujas que envía el enclavamiento.

La cartografía de la vía se representa mediante Circuitos de Vía Virtuales (CVV):

- Los CVV constituyen un reparto informático de la vía independiente del recorte en circuitos de vía físicos. Los límites de CVV no se asocian a ningún dispositivo material.
- La división en cantones virtuales se define de tal modo que, en situación normal de explotación, sólo un único tren pueda ocupar un cantón virtual en un momento dado.

Para poder realizar el seguimiento de los trenes, primero éstos han de localizarse. Se entiende como localización de un tren a los cálculos necesarios para determinar la posición geográfica del tren en la Línea. La localización del tren se obtiene mediante los siguientes mecanismos:

- Lectura de balizas localizadas en ciertos puntos de la red: cada baliza, telealimentada por el CC, transmite un mensaje que indica sin ambigüedad la posición de la baliza en la Línea. Las balizas se instalan en el centro de la vía con el fin de ser leídas por el tren en cualquiera orientación de éste con relación a la vía.
- Medida del desplazamiento del tren mediante los captadores odométricos, una vez el tren está calibrado.
- Obtener la posición de las agujas desde el enclavamiento. Este dato permite la actualización de la localización del tren al paso de las agujas de punta.

La función de localización es necesaria para que el CC calcule las curvas de velocidad ATP y ATO, permita el handover entre células de radio y pueda localizarse frente a las singularidades de la vía (velocidad de marcha, perfil de vía, posición de los andenes, etc.). Igualmente, también es necesaria para que el ZC conozca la ubicación exacta de trenes en la Línea y pueda realizar el procesamiento de datos para otorgar las correspondientes autorizaciones de marcha.

Fuera de las zonas equipadas de instalación fijas, el tren se deslocaliza. En el caso de Línea 2, todos los trenes que provengan de Triangle Ferroviari vendrán deslocalizados al no disponer de instalación CBTC en el taller y cochera. La circulación en esta zona es en modo manual (BYPASS).

En la zona de transferencia hacia la zona equipada, el tren inicializa su posición por lectura de dos balizas sucesivas, la primera permite al CC conocer su posición en la Línea y la segunda la orientación relativa del tren con relación a la vía por correlación entre el orden de las dos balizas obtenido en los invariantes de vía y el sentido de desplazamiento de los captadores odométricos entre estas dos balizas. Además, el CC calibra automáticamente los captadores odométricos por lectura sucesiva de las dos balizas.

La velocidad se mide mediante los mismos captadores odométricos que los utilizados para la localización. Esta medida se efectúa continuamente, independientemente del estado localizado o no del CC. La precisión depende del estado calibrado o no del captador (alrededor del 10% antes de la calibración y del 1% después de la calibración).

La figura 147 muestra el proceso de localización de un tren mediante la lectura sucesiva de dos balizas. Inicialmente el tren 1 no está localizado, luego no permite ningún modo de conducción CBTC. Un agente debe tomar el tren en conducción manual desde uno de los pupitres de conducción situados en cada extremo del tren. La única información conocida de la OBCU es que el pupitre de conducción activo es el del coche B. En consecuencia, el tren rueda con el coche B hacia adelante. Pero la OBCU no sabe en qué dirección rueda el tren desde el punto de vista de la vía. Una vez el tren lee la baliza T1 sabe dónde está y así lo transmite al ZC, pero aún no tiene calibradas las ruedas ni sabe el sentido de la marcha. A medida que sigue avanzando y lee la baliza T2 transmite la posición exacta y el sentido de la marcha al ZC que otorga los modos de conducción CBTC en el pupitre de cabina.

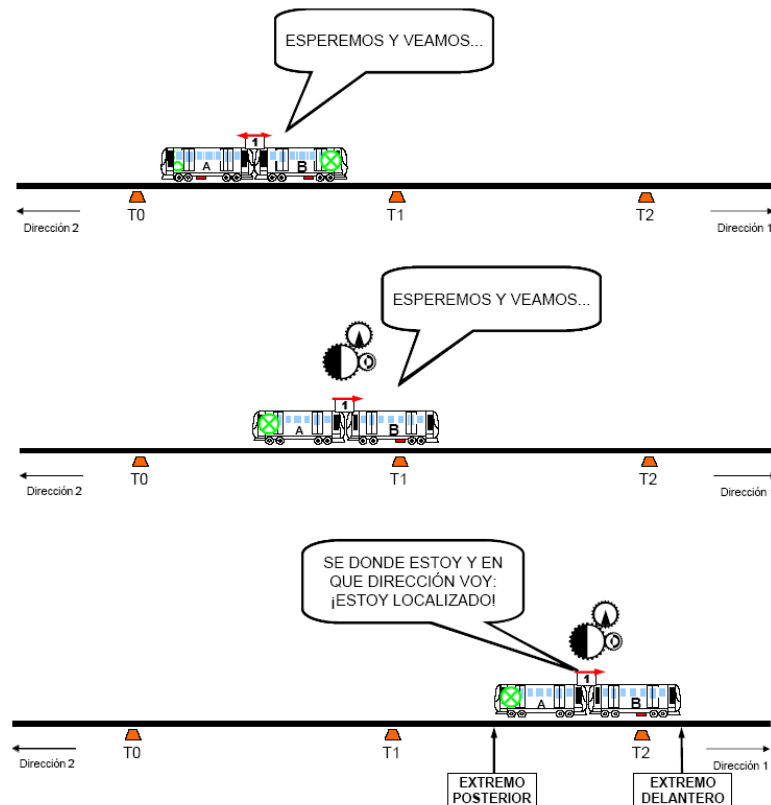


Fig. 147 Proceso inicial de localización de un tren.

Imagen: elaboración propia.

La calibración del tren asigna un valor de diámetro de rueda para que el odómetro pueda calcular la distancia recorrida por el tren. El error de cálculo respecto a la posición real en la vía va aumentando desde el proceso inicial de calibración. Cuando este error aumenta hasta un margen determinado el ZC considera que comporta un riesgo para la seguridad y deslocaliza el tren. Este problema se evita con las balizas en vía, que permiten corregir el error que se va produciendo.

La segunda funcionalidad básica que garantiza el ATC es la anticolidión. El ATC asegura la protección del movimiento de los trenes controlados por el CBTC (en modo de conducción MTO, ATP, ATO y ATPM) que circulan en las zonas automatizadas.

La función de anticolidión consiste en:

- Calcular para cada tren equipado el límite que el tren no debe cruzar, llamado Movement Authority Limit (MAL). Este límite define el extremo del ámbito autorizado de marcha del tren para respetar las obligaciones de anticolidión. Se calcula según el sentido de marcha del tren y tiene en cuenta las obligaciones de seguridad (MAL vital) y las obligaciones de no seguridad (MAL no vital).
- Calcular y hacer respetar el perfil de velocidad inducido por el MAL.
- Tener en cuenta las obligaciones ligadas al estado de los circuitos de vía, por ejemplo la detección de carril roto o una avería en el circuito de vía.

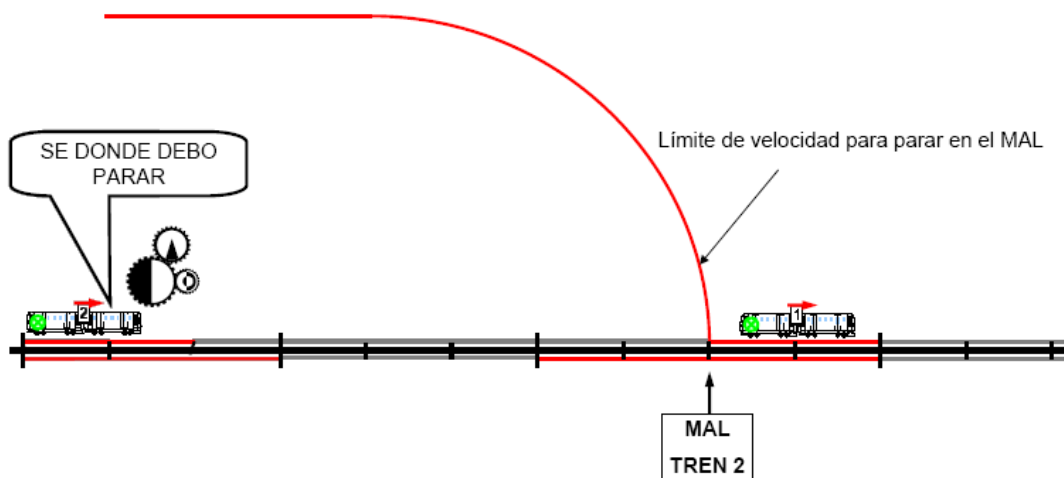


Fig. 148 Límite de curva de velocidad Vital MAL para un tren CBTC.

Imagen: elaboración propia.

En el apartado dedicado al enclavamiento se ha descrito como funciona el establecimiento de la MAL cuando se trata de una aguja. En ese caso, el ZC interroga al IL sobre el estado de la aguja, estableciendo el IL itinerario sobre esa aguja si se cumplen las condiciones de señalización.

El ATC permite los movimientos en ambos sentidos de circulación, es decir, ambas vías están totalmente banalizadas. Mediante una división lógica en secciones de vía o traffic section, el ATC determina la dirección que los trenes CBTC deben respetar. En zona de agujas, la división en traffic section autoriza los movimientos de frente y en sentido contrario para poder establecer los diferentes servicios parciales.

Sólo se autoriza a un tren CBTC a penetrar en una traffic section si el sentido de esta zona es coherente con el sentido de marcha del tren. Este principio garantiza la ausencia de enfrentamiento entre trenes dentro de una misma traffic section.

En caso de movimientos en sentido contrario al requerido por el ATS, el ATC permite suspender momentáneamente la propagación del sentido hasta el límite entre dos traffic section. Este mecanismo se llama traffic split. El límite define el punto límite de la autorización de marcha de cada uno de los dos trenes CBTC frente a frente. Para cada límite de traffic section, el ATS puede mandar o cancelar el traffic split. El ATS establece con este fin el estado de señales virtuales situadas en el límite entre traffic section.

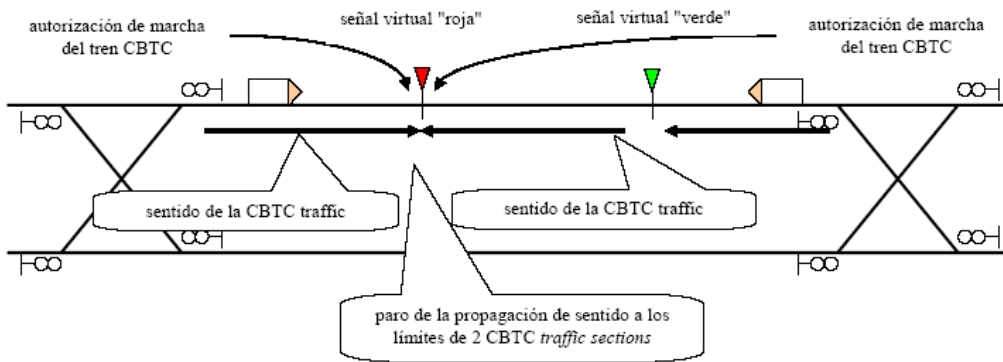


Fig. 149 Seguridad del ATC en las circulaciones en sentido opuesto.

Imagen: Descripción general del sistema CBTC. Módulo GEN-T1. SIEMENS Transportations Systems. Mayo 2008.

La actual restricción que representan los circuitos de vía con señal de ATP en un sentido único de circulación desaparece con el nuevo sistema CBTC. La Línea 2 sólo tendrá limitadas sus Vueltas Automáticas (VA) por la cantidad de agujas que tenga la infraestructura. La disponibilidad de modos degradados aumenta al poder utilizar la vía en ambas direcciones de manera simultánea por dos trenes. El sistema CBTC permite el Servicio Parcial (SP), la lanzadera entre dos estaciones y la Vía Única Temporal (VUT).

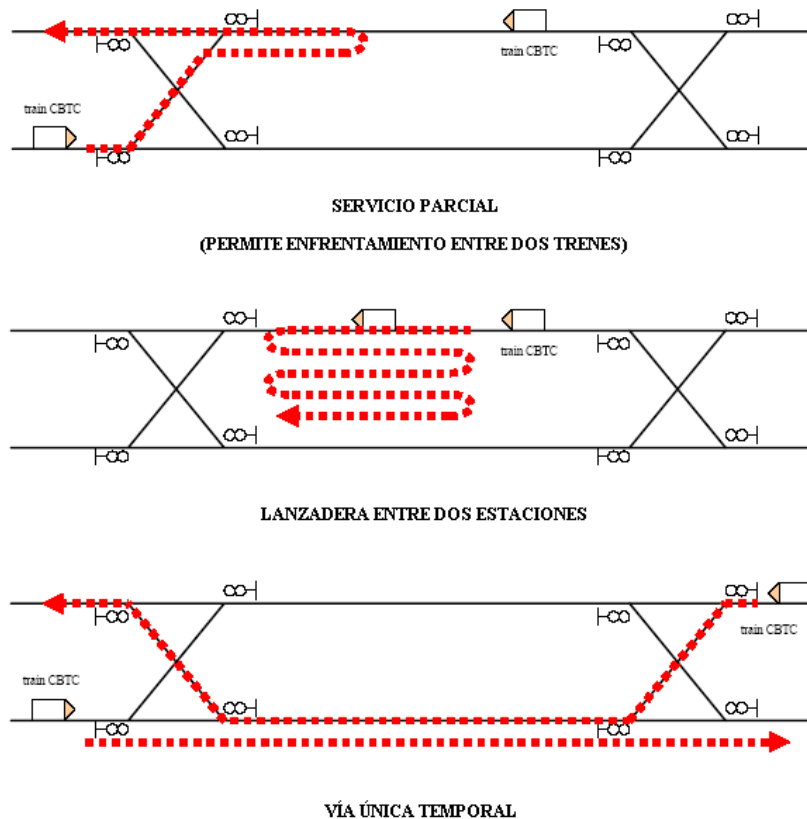


Fig. 150 Movimientos en modo degradado permitidos por el CBTC.

Imagen: elaboración propia.

6.5.2 Zone Controller

El Controlador de Zona o Zone Controller (ZC) realiza las funciones de ATC Tierra, administrando la seguridad del movimiento de los trenes sobre un tramo de la línea llamado territorio ZC. Su misión es detectar la presencia de los trenes en su territorio y calcular una autorización de marcha para cada uno de ellos, teniendo en cuenta las condiciones de seguridad por delante del tren. El ZC participa también en la transferencia de los viajeros en el andén, actuando de interface entre el ATC Embarcado y la UCPA.

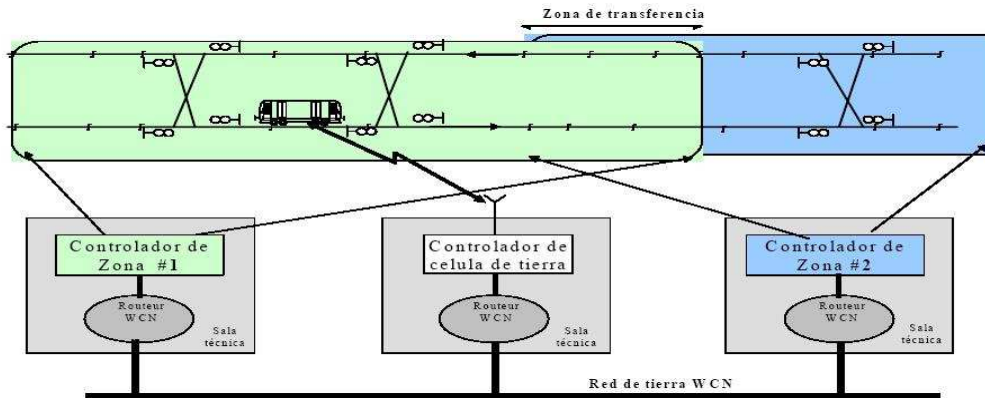


Fig. 151 Zona de transferencia entre territorios ZC.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

Dentro de su territorio, el ZC recibe las solicitudes de todos los trenes de su zona. A partir de estas solicitudes y a partir del estado de los itinerarios transmitidos por el enclavamiento, el ZC determina el perímetro de seguridad de cada uno, después de haber solucionado los conflictos potenciales entre las solicitudes, por ejemplo un enfrentamiento de trenes. En los mensajes destinados a cada tren, el ZC envía el límite exacto hasta el que puede circular en la vía (MAL).

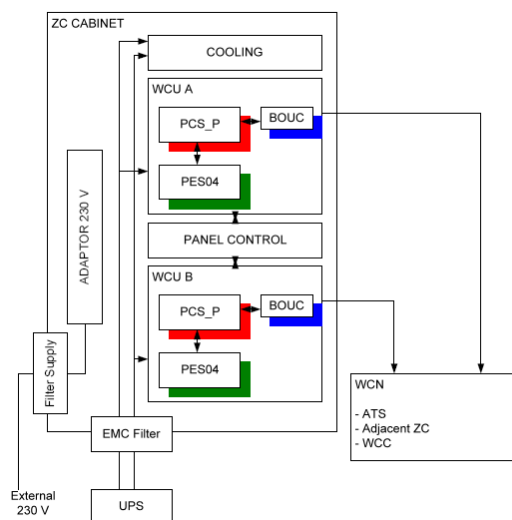


Fig. 152 Diagrama de bloques del Zone Controller (ZC).

Imagen: Zone Controller. Maintenance Training. GEN-T1 Module. SIEMENS Transportations Systems. Mayo 2008.

El ZC mantiene un intercambio constante de información con los siguientes equipos:

- Equipos CC localizados en su territorio, mediante transmisión bidireccional radio.
- Enclavamiento WESTRACE.
- Subsistema ATS.
- ZC's adyacentes. Para garantizar la continuidad de todas las funciones, los territorios ZC tienen una zona geográfica común, llamada zona de transferencia o de handover.
- Equipos de Unidad de Control de Puertas de Andén (UCPA) de las estaciones situadas en su territorio.

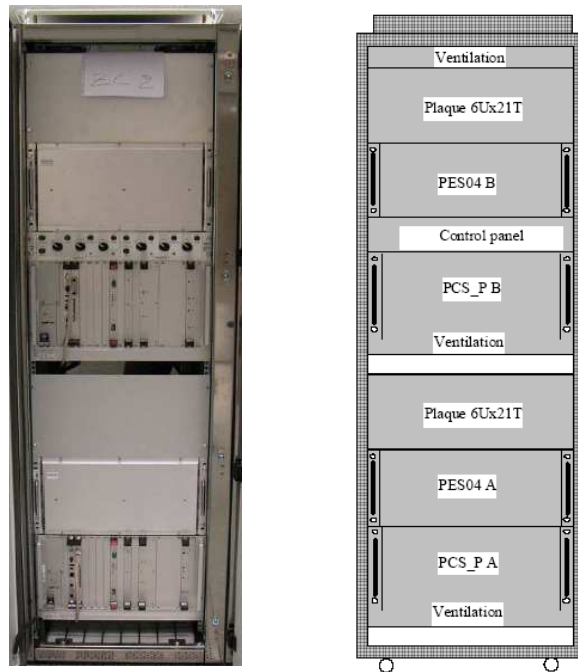


Fig. 153 Zone Controller en Onze de Setembre L9.

Imagen: elaboración propia.

El ZC está compuesto por dos unidades WCU (A y B) en configuración hot stand-by y un panel de mandos desde el que se puede realizar las siguientes acciones:

- Activar o desactivar la tensión de alimentación en cada WCU.
- Conmutar de unidad activa de manera transparente para el funcionamiento del sistema.
- Visualizar el estado de disponibilidad de cada unidad (nominal o defectuoso).

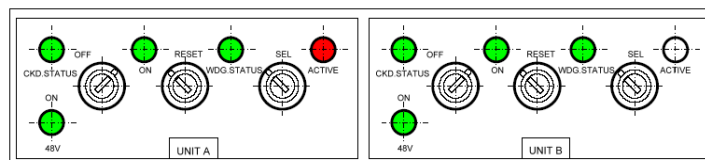


Fig. 154 Panel de mandos del Zone Controller.

Imagen: Zone Controller. Maintenance Training. GEN-T1 Module. SIEMENS Transportations Systems. Mayo 2008.

Cada WCU se compone de los siguientes módulos:

- Cajón calculador PCS_P. Se encarga de los tratamientos de seguridad y no de seguridad. Su interfaz con la red WCN se realiza mediante un acoplador Ethernet.
- Clave analógica de configuración, es la memoria vital que guarda los datos básicos de configuración de la WCU.
- Cajón de entradas/salidas PES04. Permite intercomunicar el calculador con entradas-salidas de seguridad y no de seguridad.

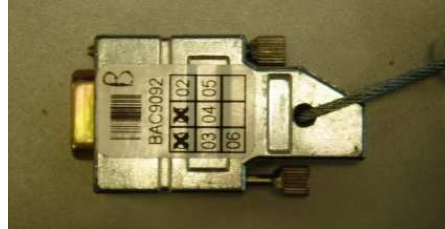


Fig. 155 Clave analógica de configuración BOUC.

Imagen: elaboración propia.

El calculador PCS_P del WCU garantiza en seguridad SIL 4 las siguientes operaciones:

- Soporte de las aplicaciones funcionales y de seguridad implementadas por la tarjeta CUCP. El procesador de la tarjeta CUCP es un INTEL PENTIUM® con una frecuencia de reloj ≥ 200 Mhz, dos bancos de memoria RAM y flash de capacidad de 64 MB cada uno. También el soporte del acelerador de los cálculos de código (MSCAx100) realizado por la tarjeta CTN_P.
- Controlador DIGISAFE. La función controlador DIGISAFE se realiza sobre la tarjeta CTN_P y controla la integridad del procesador codificado de seguridad. Proporciona una base de tiempo de seguridad que permite la generación de las señales de sincronización de los ciclos de seguridad y funcionales así como la fecha para la codificación de los datos.
- Gestión de las entradas y salidas de seguridad ToR²⁴ internas. Esta operación permite a las aplicaciones de seguridad leer las entradas de seguridad internas del WCU mediante la función técnica material entradas ToR de seguridad. Está organizada en torno al bus DIGISAFE, administrada por la tarjeta CTN_P y, distribuida sobre las tarjetas suscritas CESA01 y CSSA_24. La tarjeta CIAL5_01 realiza el interfaz aislado del bus DIGISAFE sobre el cajón PES04.
- Lectura de la clave de configuración. La configuración del equipo está en un elemento material del WCU, solidario del armario y llamado clave (BOUC). Cada unidad A o B posee su propia clave. Permite definir en seguridad la configuración diferenciando cada ZC al que pertenece el WCU, identificando cada WCU dentro del ZC (A o B) y comprobando la versión autorizada del programa informático de seguridad. La clave es adquirida por la tarjeta CTN_P y se fija en cara anterior de esta tarjeta.
- Reset del calculador. Cada calculador puede ser reinicializado desactivando y activando la tensión de alimentación o accionando el reset desde el panel de mandos.
- Conmutación de redundancia. Esta acción se puede llevar a cabo manualmente desde el panel de mandos o remotamente desde el Puesto de Mantenimiento del ATS.

²⁴ Una entrada o salida de tipo ToR es una información caracterizada por 2 estados estables continuos entre los cuales ningún estado se garantiza. El estado alto (todo) indica presencia de una tensión continua y el estado bajo (nada) indica la ausencia de dicha tensión. Un mensaje series es una información caracterizada por una consecuencia de estados continuos altos y bajos, limitada en el tiempo por un protocolo.

- Watchdog del computador. El watchdog del computador permanece activo en la tarjeta CTN_P. El sistema permite la conmutación del WCU activo sin intervención del software cuando éste no está operativo.
- Gestión de las comunicaciones serie y red Ethernet. Esta función permite al computador comunicar con el exterior a través de la red ethernet bimedio (α y β). Administra también las comunicaciones internas al WCU por el canal ethernet de servicio y conexiones serie. En la tarjeta CUCP existe un puerto RS232 para las herramientas de visualización y diagnóstico cuando no funciona el puerto TMSB.
- Detección de averías. La necesidad es detectar toda disfunción material del equipo, con el fin de garantizar la disponibilidad requerida conmutando sobre el WCU el más operativo.

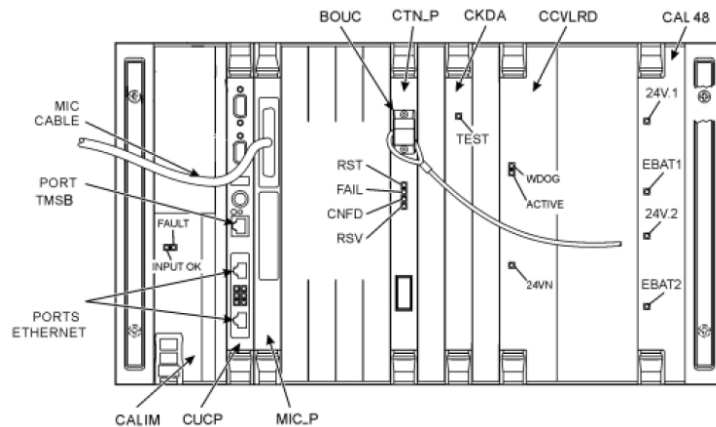


Fig. 156 Tarjetas electrónicas del cajón computador PCS-P del WCU.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

El cajón I/O PES04 del WCU interconecta el PCS-P con las entradas/salidas de seguridad y no seguridad. Está compuesto por las siguientes tarjetas electrónicas:

- CIAL5_01 interface aislado de la red DIGISAFE.
- CSSA_24 encargada de la gestión de 7 salidas de seguridad.
- CESA01 encargada de la gestión de 8 entradas de seguridad.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
C		C					C													
I		S					E													
A		S					S													
L		A					A													
S		-					0													
-		2					1													
0		4					1													
1		1																		

Fig. 157 Configuración del cajón I/O PES04.

Imagen: elaboración propia.

El modo de trabajo del ZC es con las dos unidades WCU en redundancia caliente o hot stand-by. La WCU activa controla las salidas del equipamiento mientras la WCU pasiva no emite ninguna salida y permanece atenta a las entradas de la unidad activa, recibiendo asimismo las salidas del enclavamiento. Cada unidad está en doble conexión con la red WCN, alfa y beta, mediante 4 direcciones IP. Los puertos ethernet pertenecen a 2 subredes independientes (VLAN alfa y beta).

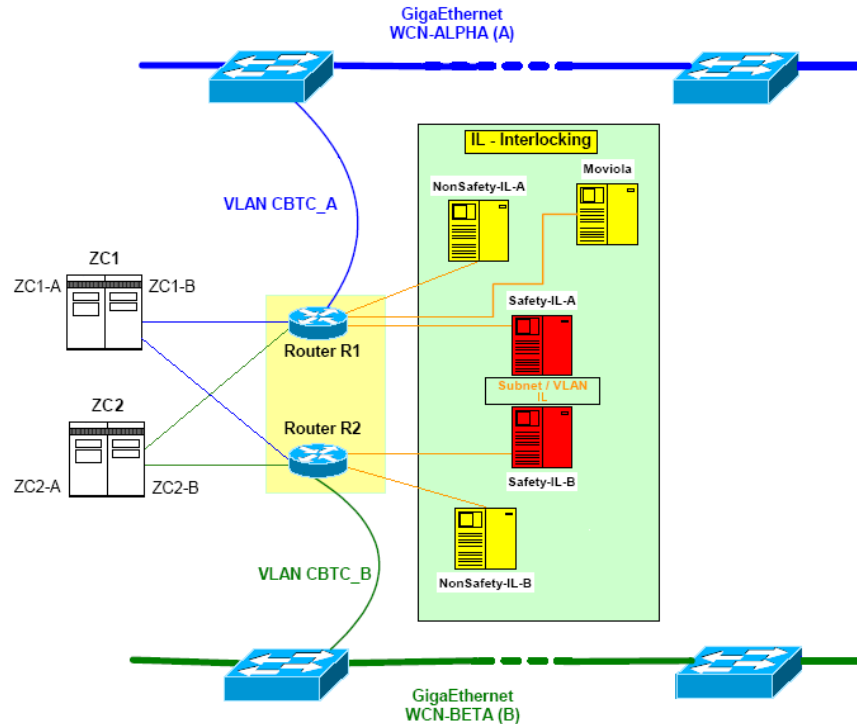


Fig. 158 Arquitectura de conexión del Zone Controller con la red WCN.

Imagen: elaboración propia.

6.5.3 Carbone Controller

El Controlador Embarcado o Carbone Controller (CC) realiza las funciones de ATC Embarcado, concretamente las de nivel 3 ATP y nivel 4 ATO. El CC determina la posición del tren en la Línea, administra los modos de conducción y controla el movimiento del tren en función de las autorizaciones de movimiento transmitidas por el ZC y las consignas de explotación enviada por el ATS. También autoriza la apertura de las puertas de tren y andén y ordena el cierre de las mismas cuando el tiempo establecido ha concluido.

El CC controla la marcha del tren desde el estacionamiento hasta la próxima para definida por la misión recibida por el ATS. Para poder realizar el control es necesario que el CC disponga de un mapa interno de la vía donde estén identificadas las características de la infraestructura (longitud de tramos, posición de agujas, rampas, desnivel, limitaciones de velocidad, etc.). Este mapa interno también está disponible en el Wayside Cell Controller (WCC) para poder ser cargado remotamente en el CC en caso de actualización, evitando tener que desplazar un agente al tren.

El CC asegura el desplazamiento del tren en la vía sin riesgo de colisión con otro tren ni de descarrilamiento. Para ello el CC informa al ZC de la posición de su tren y el sentido en el cual desea desplazarlo (hasta su próximo punto de parada) y espera que el ZC le envíe una autorización de marcha. Esta autorización define un perímetro de seguridad en el cual está garantizada la circulación sin ningún riesgo. Entonces el CC envía orden al TBS de que el tren puede arrancar, permaneciendo las funciones de vigilancia ATP activas por si hay que activar un frenado de emergencia.

El CC también se encarga del control ATO en la regulación, asignando el modo de marcha al tren y el tiempo de estacionamiento en andén. Estas consignas de explotación están definidas en el sistema ATS, donde la tabla de Plan de Circulación Diaria (PCD) establece las horas de salida y llegada a las estaciones. En función de estos horarios establecidos, se aumenta o disminuye el tiempo de espera en los andenes y se asigna el modo de marcha del tren (marcha lenta, normal, rápida y tendida). Estas consignas se actualizan constantemente en función de las perturbaciones que se producen en la Línea.

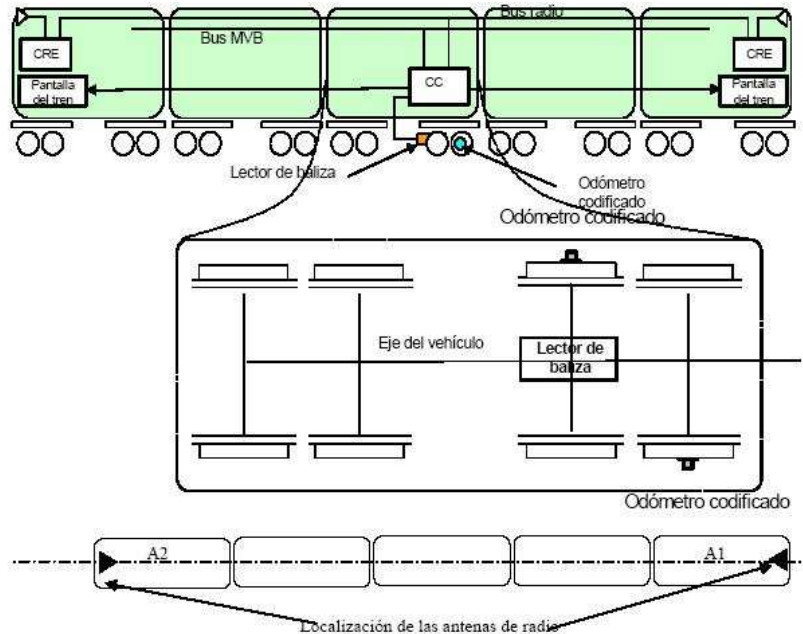


Fig. 159 Localización de los equipos CBTC embarcados.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

El tren consta de un CC con dos unidades en configuración hot stand-by, de manera que en caso de fallo de la unidad activa, el CC bascula automáticamente sobre el segundo de manera transparente para la operación.

El CC intercambia permanentemente información con los siguientes subsistemas:

- El material rodante mediante líneas de tren y el bus MVB.
- El conductor, en caso de modo manual, mediante la pantalla del pupitre de conducción.
- Los ZC mediante el sistema radio RCS y la red de tierra WCN.
- El ATS mediante el sistema radio RCS y la red de tierra WCN.
- Los WCC en caso de carga remota del mapa de descripción geográfica de la red.

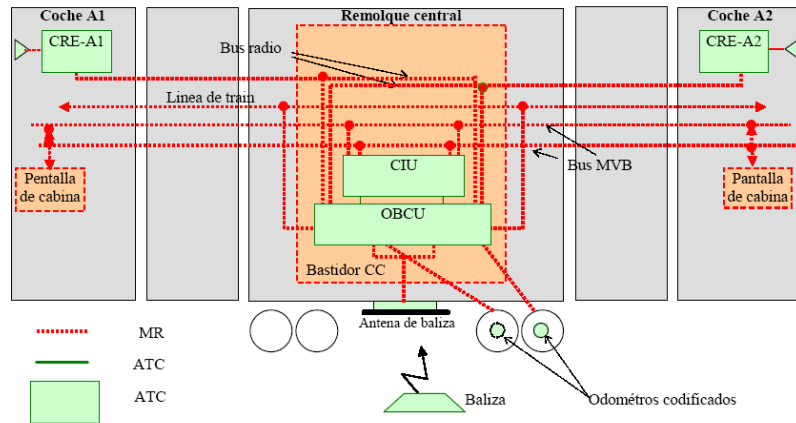


Fig. 160 Sinóptico de los equipos CBTC embarcados.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

Las Antenas de Radio Embarcadas o Carbonne Radio Antenna (CRA) están instaladas en cada una de las cabinas extremas, en una ubicación que permita la emisión hacia el exterior del tren. La ubicación debe determinarse y validarse del punto de vista radioeléctrico, teniendo en cuenta el tipo de los materiales delante de la antena (ausencia de metales o materiales con partículas metálicas en 10 cm. alrededor) y la ubicación de las antenas de los demás sistemas de radio WiFi.

Las CRA están conectadas al Equipo de Radio Embarcado o Carbonne Radio Equipment (CRE), que a su vez se conectan entre ellos y con ambos calculadores OBCU (A y B) mediante una conexión serie llamada TRD. Los cajones CRE están en cofres, lo más cerca posible de las antenas CRA (cada CRE incluye una única unidad CRU_A). Un cajón CRE se compone de:

- Módulo de alimentación.
- Módulo de radio (idéntico al de los WRE).
- Tarjeta de interfaz con el bus Train Radio Distribution (TRD), que proporciona las comunicaciones entre los CRE y las OBCU.



Fig. 161 Cajón del Carbonne Radio Equipment (CRE).

Imagen: elaboración propia.

El tren dispone de una antena de lectura de balizas en la parte inferior central de la unidad. La tarjeta CDIBAL_48 del cajón OBCU proporciona a la baliza una señal a 128 KHz que sirve, después ser detectada, rectificadora y filtrada por la baliza, de alimentación y de reloj de secuencia de los mensajes. Una señal portadora a 10 Mhz se modula por los mensajes, la tarjeta CDIBAL asegura entonces la demodulación y la transmisión en modo serie de los mensajes hacia la CTN_P. La tarjeta CTN_P de la OBCU realiza el muestreo y el fechado de los mensajes recibidos. Las balizas transmiten, tras la recepción de la señal de 128 KHz, una señal 10 Mhz modulada en todo o nada a 128 kbit/s.

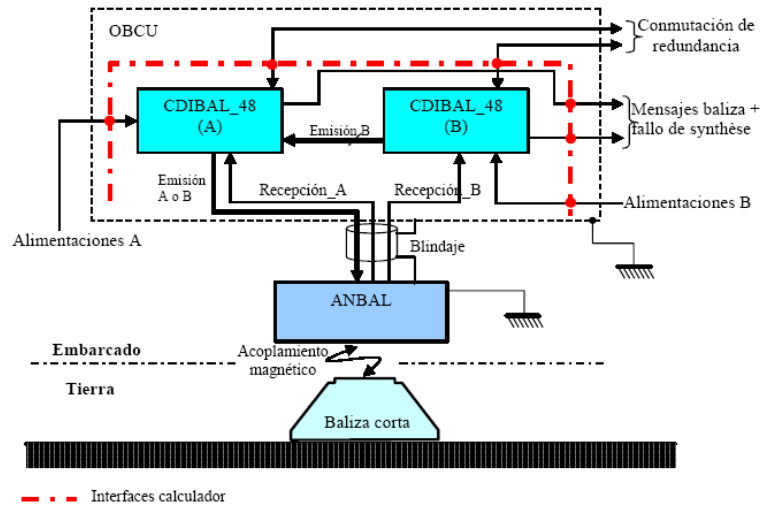


Fig. 162 Sinóptico de la lectura de una baliza.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

El CC conoce permanentemente la medida de desplazamiento, velocidad, aceleración y jerk del tren. Para ello utiliza dos odómetros idénticos (A y B) que se encargan de medir el desplazamiento angular de un eje del tren. Cada odómetro se monta en el extremo de un eje diferente y se acopla mecánicamente a éste de tal manera que la rotación del eje provoca la rotación solidaria del eje del odómetro.

La Unidad de Control Embarcada u On Board Control Unit (OBCU) es el cajón calculador donde se implementan las funcionalidades de ATC. Las funciones aseguradas por el OBCU son las siguientes:

- Soporte de las aplicaciones de seguridad y no de seguridad.
- Control de la seguridad.
- Adquisición de los parámetros del tren.
- Lectura de las entradas y mando de las salidas todo o nada (ToR).
- Lectura de las informaciones del odómetro.
- Lectura de los mensajes series de las balizas.
- Administración de las comunicaciones tren-tierra.
- Administración de la conmutación de redundancia.
- Administración del consumo de alimentación.
- Adquisición de las informaciones de ayuda al mantenimiento.

La configuración del equipo de tren está en un elemento material de la OBCU, llamado clave (BOUC). Permite definir en seguridad la configuración diferenciando el CC de tren al que pertenece la OBCU, identificando cada OBCU dentro del CC (A o B) y comprobando la versión autorizada del programa informático de seguridad.

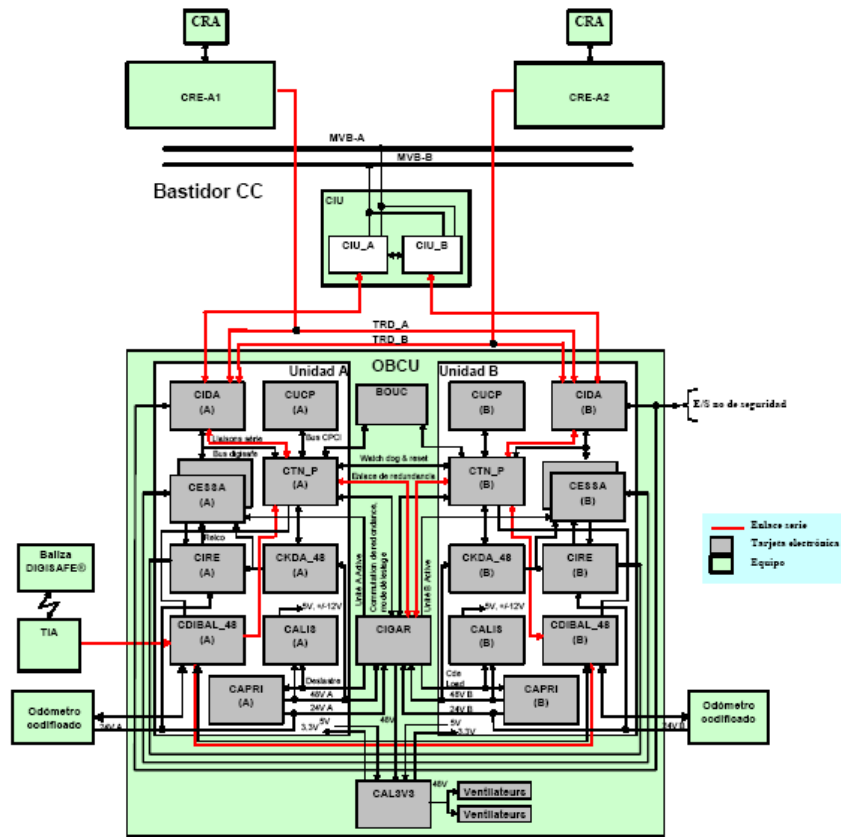


Fig. 163 Diagrama de bloques de la On Board Control Unit (OBCU).

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

Las funcionalidades básicas de las diferentes tarjetas de la OBCU son las siguientes:

- CAPRI: fuente de alimentación primaria que proporciona, a partir de la tensión de batería tren, una alimentación 48 Vdc y una alimentación de seguridad 24 Vdc. La tarjeta informa de la presencia de la alimentación de entrada y de los defectos de la alimentación de salida.
- CALIS: fuente de alimentación secundaria con funciones idénticas a la tarjeta CAPRI.
- CAL3V3: transferencia de 48 Vdc del fondo del cajón hacia los ventiladores.
- CKDA_48: proporciona, a partir de la tensión de 48V entregada por la tarjeta CAPRI, una tensión de 24 Vdc controlada en seguridad que permite la alimentación de los relés de la tarjeta CIRE.
- CUCP: unidad central de proceso, que consta de un procesador INTEL PENTIUM® con una frecuencia de reloj ≥ 200 Mhz, un banco de memoria RAM de 64 MB y flash de capacidad de 128 MB.
- CTN_P: asegura los tratamientos numéricos de las funciones principales, tales como la administración del bus DIGISAFE, la adquisición de la llave de configuración del tren (BOUC), el acelerador de cálculos codificado, la adquisición de los datos y puesta en seguridad del captador de desplazamiento, la adquisición de los mensajes balizas o la administración del reset del cajón OBCU.
- CESSA: tarjeta suscriptor DIGISAFE que asegura la adquisición de 10 entradas y 5 salidas ToR de seguridad 24 Vdc.

- CIDA: tarjeta suscriptora DIGISAFE que asegura la adquisición de 12 entradas y 8 salidas ToR de no seguridad 24 Vdc. También informa del funcionamiento de los ventiladores y vigila las alimentaciones de las tarjetas CAPRI y CALI.
- CDIBAL_48: asegura la detección de las balizas y la adaptación eléctrica del captador de desplazamiento.
- CIRE: proporciona el interface relés de 10 salidas de seguridad y el control de coherencia del conjunto de los relés.
- CIGAR: asegura las interfaces analógicas de puesta en tensión del equipo, conmutación de redundancia, detección de unidad activa, alimentación de los ventiladores e interfaz analógica de la conexión serie.

6.5.4 Modos de conducción

El mismo tren modelo S9000 de ALSTOM que actualmente circula en la Línea 2 bajo control del ATC-D Embarcado puede ser adaptado con los equipos CBTC Embarcados (OBCU's, CRE's y antena baliza) para que pueda circular controlado por el ATC-S. El sistema ATC-S permite el control del tren en diferentes modos de conducción, entre el cual destaca el innovador Manless Train Operation (MTO) totalmente automático sin intervención del conductor. El interfaz del sistema ATC-S con el conductor se efectúa mediante la pantalla DDU del puesto de conducción.

Los mandos del pupitre de conducción en el sistema CBTC están divididos en los que controla el propio material rodante (ALSTOM) y los que controla el ATC Embarcado (SIEMENS). La figura 164 muestra los mandos para la conducción manual disponibles por el sistema del material rodante: pulsador de "hombre muerto", manipulador de tracción y frenado, selector de marcha, llave de gobierno y seta de frenado de emergencia.



Fig. 164 Mandos del material rodante en el sistema CBTC.

Imagen: elaboración propia.

La figura 165 muestra los mandos para la conducción manual específicos del sistema CBTC: conmutador de conducción ATC, pulsadores de arranque ATO, pantalla ATC y pulsador MTO.



Fig. 165 Mandos del ATC Embarcado en el sistema CBTC.

Imagen: elaboración propia.

Existen cinco modos de conducción disponibles en el sistema ATC-S. El primero de ellos es el Manless Train Operation (MTO), que es el modo de explotación sin conductor. El tren se conduce automáticamente bajo control del ATP. Las principales funciones aseguradas bajo este modo son:

- Preparación automática o despreparación del tren en su posición de garaje, sin intervención de agente a bordo.
- Conducción automática del tren desde posiciones de aparcamiento hasta su inyección en línea, durante el servicio comercial y desde línea hasta su retirada a posiciones de aparcamiento.
- El ATP protege completamente todos los movimientos del tren según requerimientos de velocidades autorizadas por la vía, espaciamiento necesario detrás de los trenes CBTC o no CBTC, condiciones de itinerarios y sentido de movimiento autorizados. Después de una parada requerida por el respeto de las obligaciones de anticolidión, el arranque del tren es automático en cuanto la vía se libere adelante del tren.
- En función de su misión, el tren se detiene automáticamente en estación, en las zonas de retorno o en garaje. En una parada en estación, el tren vuelve a salir automáticamente cuando termina el tiempo de estacionamiento. Después de una parada sobre un lugar de retorno, el tren se da la vuelta automáticamente antes de proseguir su misión.
- La conducción automática del tren respeta las órdenes de regulación del ATS (modulación del tiempo de estacionamiento y velocidad del tren en interestación).
- En las paradas del tren en estación, los automatismos autorizan la apertura de las puertas del tren y las puertas del andén por el lado dónde se efectúan los intercambios de los pasajeros, después encargan el cierre automático de las puertas cuando termina el tiempo de estacionamiento.



Fig. 166 Pantalla de visualización ATC-S.

Imagen: Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero 2007.

El segundo modo de conducción es el Automatic Train Operation (ATO), modo de explotación semiautomático con conductor. El tren se conduce automáticamente entre dos paradas sucesivas, bajo la protección del ATP. En cada parada, el modo ATPM se selecciona de nuevo y el tren vuelve a pasar así bajo el control del conductor. Cuando el conductor apriete el botón SALIDA EN ATO, el tren vuelve a pasar en modo ATO hasta su próxima parada. Las principales funciones aseguradas bajo este modo son:

- Conducción automática del tren entre dos paradas sucesivas.
- El ATP protege completamente todos los movimientos del tren según requerimientos de velocidades autorizadas por la vía, espaciamiento necesario detrás de los trenes CBTC o no CBTC, condiciones de itinerarios y sentido de movimiento autorizados. Después de una parada requerida por el respeto de las obligaciones de anticollisión, el conductor se encarga del arranque del tren cuando la vía se libera más abajo del tren. El dispositivo de visualización situado sobre el pupitre de conducción informa al conductor que la salida es de nuevo posible.
- En función de su misión, el tren se detiene automáticamente en la estación, en las zonas de retorno o en garaje. En una parada en estación, el tren vuelve a salir cuando el conductor apriete el botón SALIDA EN ATO y cuando termina el tiempo de estacionamiento. El dispositivo de visualización situado en cabina informa al conductor que puede salir. El conductor debe tener en cuenta las consignas de regulación otorgadas por el ATS en el recuento del tiempo de estacionamiento. Después de una parada en un lugar de retorno, el conductor cambia de extremo de conducción, luego aprieta el botón SALIDA EN ATO para ordenar la salida del tren en el otro sentido de circulación.
- La conducción automática del tren respeta las órdenes de regulación del ATS en las consignas de velocidad en interestación.
- En las paradas del tren en estación, los automatismos autorizan la apertura de las puertas del tren y las puertas del andén por el lado dónde se efectúan los intercambios de pasajeros. El conductor inicia el cierre de las puertas.
- Visualización al conductor de la señal luminosa que indica el momento en que se puede ordenar el arranque del tren en estación (modulación del tiempo de estacionamiento) o en interestación (autorización de circular adelante) y sobre la disponibilidad del modo ATO.

- El modo ATO se sustituye automáticamente por el modo ATPM cada vez que el tren se detiene, o que el conductor coloca el manipulador de conducción en una posición diferente a la del frenado de servicio máximo.

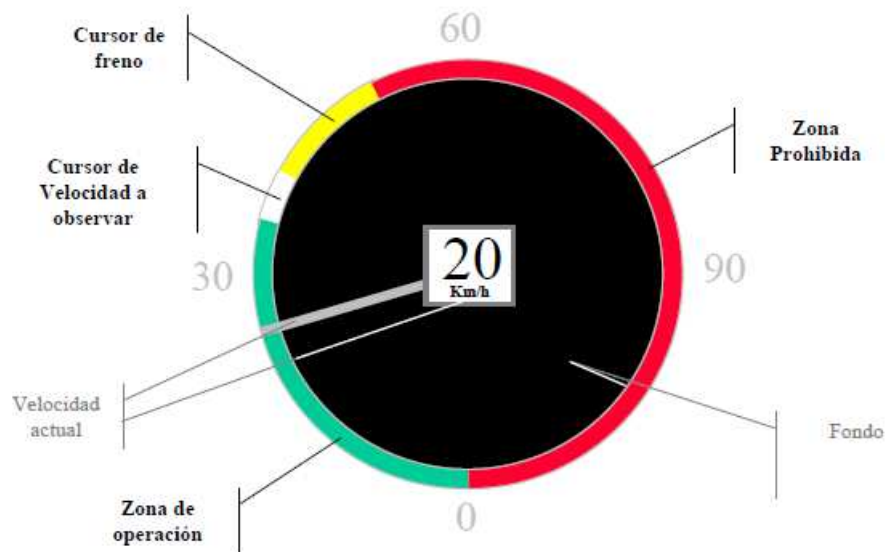


Fig. 167 Velocímetro del sistema ATC-S.

Imagen: Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero 2007.

El tercer modo de conducción es el modo ATPM, modo de explotación manual con protección del ATP. El comportamiento del tren es idéntico a los modos MTO y ATO, añadiendo el tiempo de reacción del conductor. Las principales funciones aseguradas bajo este modo son:

- El ATP protege completamente todos los movimientos del tren según requerimientos de velocidades autorizadas por la vía, espaciamiento necesario detrás de los trenes CBTC o no CBTC, condiciones de itinerarios y sentido de movimiento autorizados. En caso de que el conductor no respete las consignas, el ATC manda automáticamente al tren un frenado de servicio máximo substituyéndose así al conductor. Este frenado de servicio se envía con la antelación suficiente para que actúe el freno de emergencia en caso de no respetarse los límites.
- En las paradas del tren en estación, los automatismos autorizan la apertura de las puertas por el lado dónde se efectúan los intercambios de pasajeros. El conductor controla el cierre de las puertas.
- Un indicador luminoso en cabina proporciona consignas de velocidad permitiendo al conductor manejar el tren por debajo de los límites autorizados por el ATP.

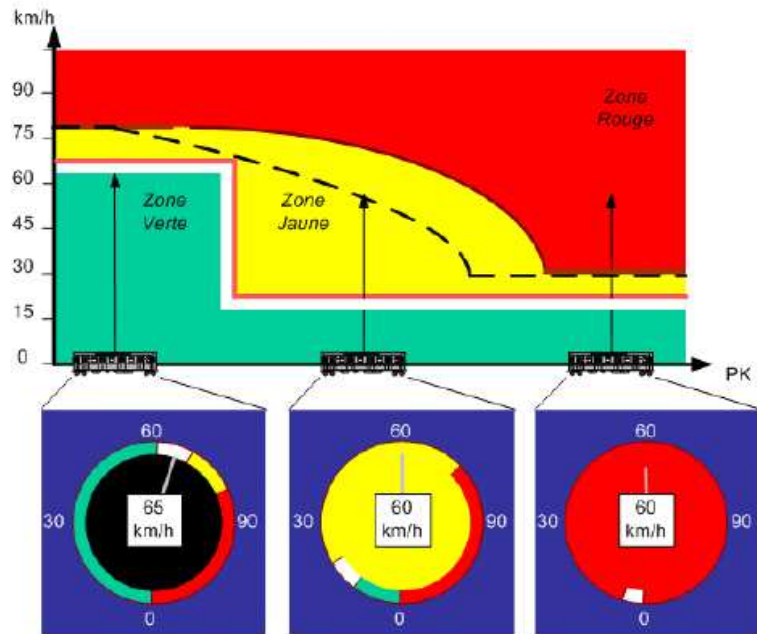


Fig. 168 Límites de velocidad en pantalla ATPM.

Imagen: Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero 2007.

El cuarto modo de conducción es el modo ATPR, utilizado fuera del ámbito CBTC o en modo degradado dentro de éste. Las principales incidencias que pueden obligar a una conducción en modo ATPR son las siguientes:

- Fallo de los equipos ATC Tierra.
- Fallo de los equipos RCS.
- Deslocalización del tren por fallo del ATC Embarcado.
- Fallo del enclavamiento (no comprobación de aguja, avería en lógica de maniobra, etc.).
- Pérdida de integridad del tren.

El ATPR es un modo de explotación que requiere conducción manual del tren con el único control de una limitación de velocidad de 25 km/h impuesta por el ATC Embarcado. En modo ATPR, el ATC no suministra autorización de apertura de las puertas ni participa en la apertura y cierre sincronizado de las puertas del andén y de tren.

Por último, el modo BYPASS no tiene control alguno por parte del ATC-S. La conducción es totalmente manual y la única limitación la impone el propio tren. En el caso del S9000 de ALSTOM la limitación es de 80 km/h.

6.6 Subsistema de Comunicación de Datos (DCS)

El Subsistema de Comunicación de Datos (DCS) se puede dividir en dos partes:

- Subsistema de Comunicación de Radio o Radio Communication System (RCS): subsistema que permite la comunicación continua entre los equipos de ATC Tierra y Embarcado.
- Red CBTC de Tierra o Wayside CBTC Network (WCN): subsistema de red que facilita las comunicaciones entre los equipos de las salas técnicas con enclavamiento, sin enclavamiento, Puesto de Control Central (PCC) y Puesto de Control de Emergencia (PCE).

6.6.1 Subsistema de Comunicación de Radio (RCS)

El papel del Subsistema de Comunicación Radio (RCS) es establecer un canal de comunicación permanente entre los equipos de ATC Tierra (ZC) y ATS por una parte y los equipos ATC Embarcados (CC) por la otra, facilitando una comunicación continuada bidireccional entre los trenes y los equipos fijos. El RCS incluye equipos radio de tierra y equipos radio embarcados.

El equipo radio de tierra es el Controlador de Célula de Tierra o Wayside Cell Controller (WCC), que desempeña el papel de punto de acceso radio. Estos calculadores administran las Bases de Radio de Tierra o Wayside Radio Equipment (WRE), distribuidas a lo largo de la línea y organizadas en células. Un mismo WCC puede administrar un máximo de 16 WRE, que pueden agruparse en un máximo de 4 células distintas con diferente número de WRE en cada una de ellas. Cada célula de radio acostumbra a dar cobertura a dos interestaciones.

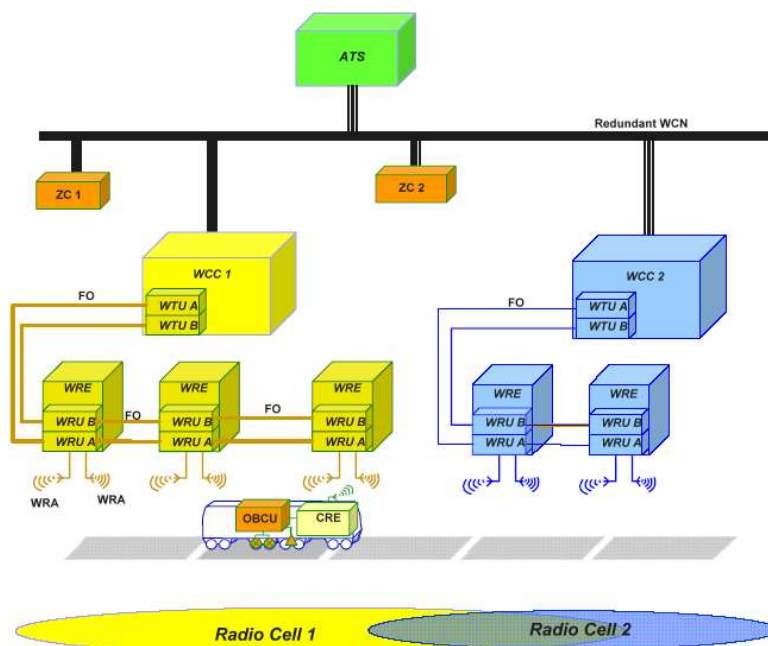


Fig. 169 Distribución de equipos RCS Tierra.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

El Wayside Cell Controller (WCC) se instala en la sala técnica de enclavamiento y se encarga de administrar las comunicaciones de radio en un tramo de la línea. Un mismo WCC puede administrar hasta 4 células simultáneamente, entendiendo como célula la zona geográfica donde todos los trenes tratan un mismo mensaje que viene del equipo de tierra y deben contestar a este mensaje en caso de interrogación.

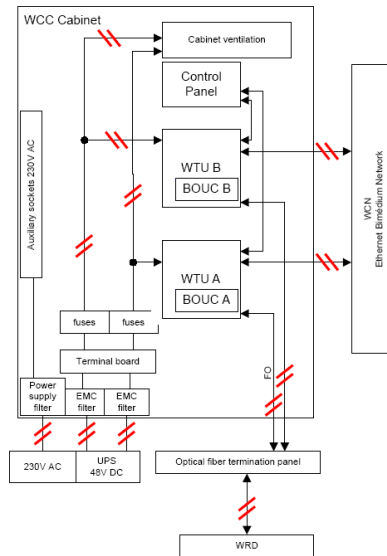


Fig. 170 Diagrama de bloques del Wayside Cell Controller (WCC).

Imagen: Wayside Cell Controller. Maintenance Training. GEN-T1 Module. SIEMENS Transportations Systems. Mayo 2008.

El WCC está compuesto por 2 unidades WCU (A y B) en configuración hot stand-by y un panel de mandos con idénticas funciones que el descrito para el ZC. Cada WTU se compone de los siguientes módulos:

- Módulo de alimentación.
- Tarjeta procesadora que soporta la conexión Ethernet con la red cableada.
- Tarjeta de gestión de redundancia.
- De 1 a 4 tarjetas de interface óptica con los WRE's.

El calculador WTU asegura las siguientes funciones:

- Soporte de las aplicaciones transmisión de radio implementadas por la tarjeta CUCP. El procesador de la tarjeta CUCP es un INTEL PENTIUM® con una frecuencia de reloj ≥ 200 Mhz, dos bancos de memoria RAM y flash de capacidad de 64 MB cada uno.
- Controlador de célula e interface óptico. Esta función se administra por las tarjetas CIO que están conectadas mediante fibras ópticas con los WRE repartidos en la línea. Entre los cuatro CIO, una de ellas ejerce la función de master y el resto son las slave.
- Lectura de la clave de configuración. La configuración del equipo está en un elemento material del WTU, solidario del armario y llamado clave (BOUC). Cada unidad A o B posee su propia clave. Permite definir en seguridad la configuración diferenciando cada WCC al que pertenece el WTU, identificando cada WTU dentro del WCC (A o B) y comprobando la versión autorizada del programa informático de seguridad.
- Reset del calculador. Cada calculador puede ser reinicializado desactivando y activando la tensión de alimentación o accionando el reset desde el panel de mandos.
- Conmutación de la redundancia. Esta acción se puede llevar a cabo manualmente desde el panel de mandos o remotamente desde el Puesto de Mantenimiento del ATS.
- Watchdog del calculador. El watchdog del calculador está controlado por la tarjeta CIO. Permite conmutar el WTU sin intervención del software cuando éste no es ya operativo.

- Gestión de las comunicaciones series y red Ethernet. Esta función permite al computador comunicar con el exterior a través de la red ethernet bimedio (alfa y beta). Administra también las comunicaciones internas al WTU por el canal ethernet de servicio y conexiones serie. En la tarjeta CUCP existe un puerto RS232 para las herramientas de visualización y diagnóstico cuando no funciona el puerto TMSB. La CIO asegura la gestión de los tratamientos numéricos para la conmutación de redundancia, el watchdog, el reset y la sincronización.
- Detección de averías. La necesidad es detectar toda disfunción material del equipo, con el fin de garantizar la disponibilidad requerida conmutando sobre el WTU el más operativo.

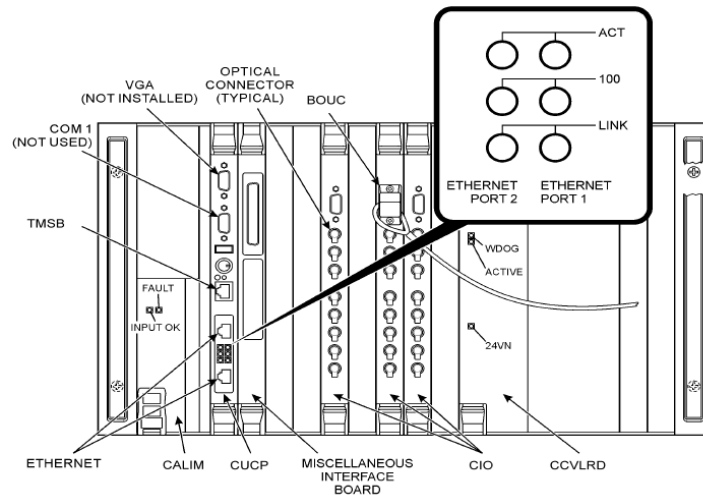


Fig. 171 Tarjetas electrónicas del cajón computador del WTU.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

El WCC constituye el interface del ZC para habilitar la comunicación con el CC de los trenes equipados. Mediante este interface que proporciona la radio, el ZC recibe periódicamente los datos de seguridad de cada tren, tales como la localización, sentido de marcha y modo de conducta. En función de la posición recibida de todos los trenes de su territorio y en función de las autorizaciones de maniobra entregadas por la lógica de enclavamiento, el ZC calcula periódicamente el ámbito de marcha autorizado de cada tren y pone a disposición del equipo de transmisión WCC los mensajes que describen estos ámbitos de marcha.

De igual manera, el WCC también es el interface entre el ATS y el CC de los trenes equipados. Cuando el ATS desea enviar un orden a un tren dado, por ejemplo para indicarle las estaciones de parada o para comunicarles una consigna de regulación, el ATS utiliza este interfaz con el WCC, el cual pone así a su disposición un canal de transmisión directo con el tren en cuestión. Mediante este mismo interface, el ATS recibe a cambio los datos de seguimiento del tren, como su localización en la línea o el modo de conducción del tren.

Para proporcionar la transmisión de radio en el túnel se instala el número necesario de Wayside Radio Equipment (WRE) en los hastiales de túnel, tanto en andenes como en interestaciones. La infraestructura de la vía marca las directrices en cuanto a la cantidad y ubicación de Antenas de Radio de Tierra o Wayside Radio Antenna (WRA) necesarias para garantizar una cobertura redundante de todos los puntos de la línea. Como criterio general se instalan en la zona de entrada a andenes y en zonas de interestación, cuando la distancia entre dos estaciones es muy larga o por requerimientos de la infraestructura.

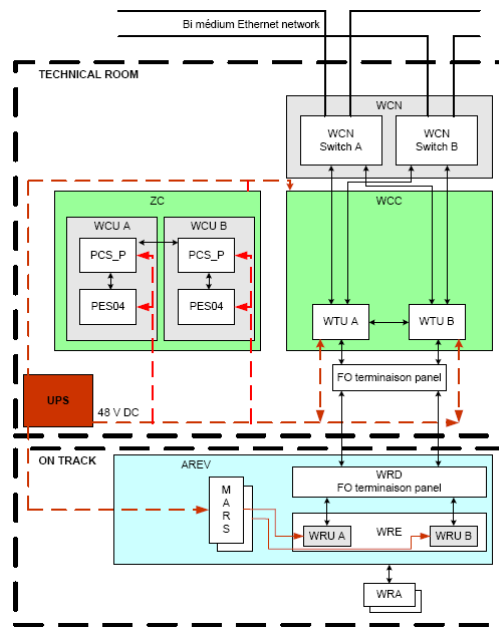


Fig. 172 Diagrama de interconexión entre equipos CBTC.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

El sistema CBTC utiliza una frecuencia radio de 2,4 Ghz en la transmisión bidireccional entre las bases de radio de tierra (WRE y WRA) y las bases de radio de tren (CRE y CRA). Es una frecuencia que pertenece a la banda ISM (Industrial Scientific and Medical), reservada internacionalmente para uso no comercial de radio frecuencia electromagnética en áreas industriales, científicas y médicas.

Una base de radio incluye los siguientes elementos:

- Estructura mecánica de recepción en armario de vía o Radio Case (RC).
- Panel de alimentación con 2 convertidores 230 Vac/24 Vdc.
- Mezclador óptico.
- Cajón WRE.

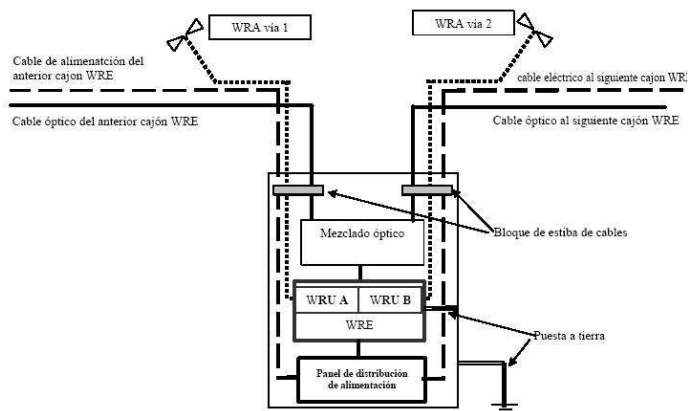


Fig. 173 Diagrama de bloques del Wayside Radio Equipment (WRE).

Imagen: Wayside Radio Equipment. Maintenance Training. GEN-T1 Module. SIEMENS Transportations Systems. Mayo 2008.

El WRE está compuesto por 2 Unidades de Radio de Tierra o Wayside Radio Unit (WRU) en redundancia hot stand-by (A y B). Cada WRU contiene los siguientes módulos:

- Alimentación 24 Vdc.
- Módulo de radio. Cuando la doble cobertura de radio está presente, el módulo de radio se monta solamente en una unidad.
- Organizador de empalme de las fibras ópticas (WRD).
- Antenas de radio WRA conectadas mediante cable coaxial de radiofrecuencia.

Las bases de radio junto con las balizas constituirían los elementos que se instalan en vía para conformar el sistema ATC.

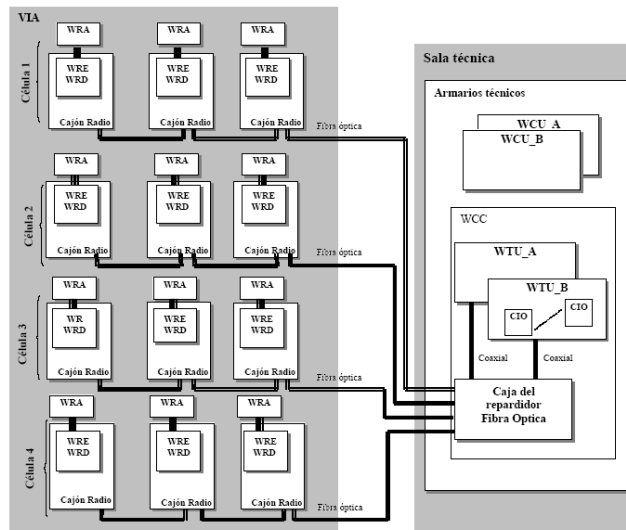


Fig. 174 Esquema de conexiones entre bases de radio y sala técnica.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

Cada célula de radio está constituida por una o más bases de radio, que se conectan a una misma WTU a través de una fibra óptica dedicada, la llamada Wayside Radio Distribution (WRD). La fibra óptica de la WRD une todas las bases de radio con la sala de enclavamiento, pudiéndose utilizar dos soluciones diferentes para realizar los empalmes de fibra en los mezcladores ópticos. En la primera solución la fibra óptica no se interrumpe en ninguna de las bases de radio en vía y las conexiones se realizan en las salas técnicas, haya o no WCC. En la segunda solución la WRD sólo dispone de un cable de fibra óptica y éste se interrumpe en cada ubicación de WRE. La distribución se realiza en el cajón WRE, en el nivel del mezclado óptico, donde algunas fibras están conectadas a cordones ópticos para la conexión con el panel del WRE, mientras un empalme de fusión proporciona continuidad para las otras fibras.

6.6.2 Red CBTC de Tierra (WCN)

La Red CBTC de Tierra o Wayside CBTC Network (WCN) es una red informática de tipo ethernet cuyo propósito es unir físicamente todos los equipamientos del sistema de señalización CBTC de SIEMENS. La WCN incluye switches, routers, módulos de conversión óptica y cableados de fibra óptica en túnel, todos duplicados y en configuración hot stand-by.

Mediante la WCN se establecen los medios de comunicación entre los equipos distribuidos en las salas técnicas de la línea y los puestos de operación del ATS en el PCC y PCE. Es importante destacar que esta red es la interface también entre el ATC y las Unidades de Control de Puertas de Andén (UCPA).

La WCN proporciona los medios de comunicaciones para asegurar los siguientes interfaces:

- Interfaces ATS principal (PCC) con ZC, WCC e IL.
- Interfaces ATS secundario (PCE) con ZC, WCC e IL.
- Interfaces ATS PCC con ATS PCE.
- Interfaces ZC con ZC adyacentes.
- Interfaces ZC con IL.
- Interfaces ZC con WCC.
- Interfaces ZC con UCPA.

Las normas de red bajo las cuales presta sus servicios la red WCN son las siguientes:

- Ethernet (IEEE 802.3) para el nivel 2.
- IP para el nivel 3.
- OSPF (RFC-2328) para el protocolo de transporte.
- VRRP (RFC-2338) o HSRP (RFC-2281) para el protocolo de redundancia de los conmutadores de nivel 3.

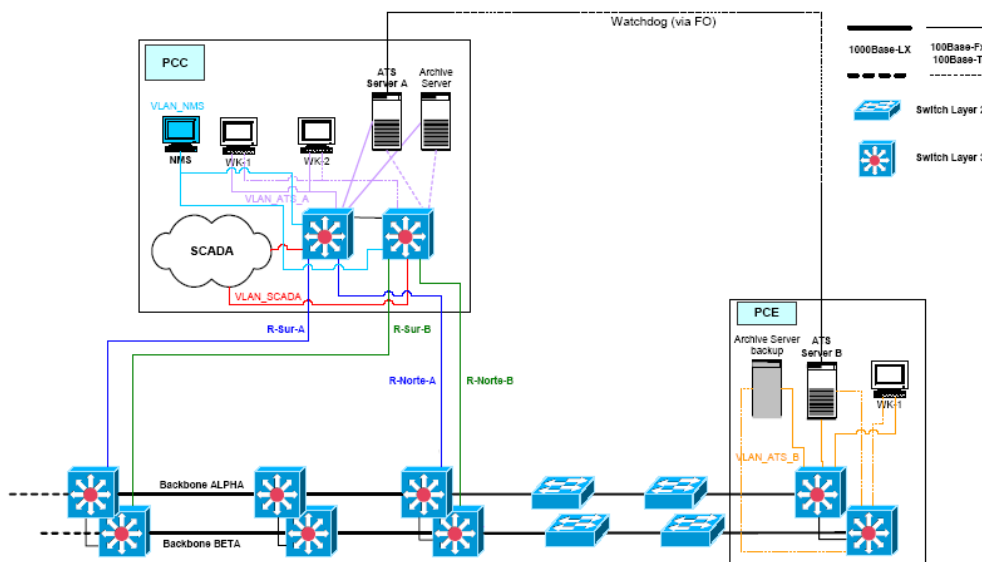


Fig. 175 Arquitectura de la red WCN.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

6.7 Subsistema Automatic Train Supervision (ATS)

Se conoce como Automatic Train Supervision (ATS) al subconjunto del sistema CBTC que se encarga de las funciones de supervisión y control del tráfico.

Las principales funcionalidades de las que dispone el subsistema ATS son las siguientes:

- Seguimiento de los trenes.
- Administración de las misiones para cada tren.
- Aplicación del Plan de Circulación Diario (PCD)
- Regulación según horario de los trenes de acuerdo al programa PCD.
- Regulación por intervalo en modos degradados (SP, VUT, etc.).
- Organización de los modos degradados.
- Mandar los itinerarios cuando los trenes se aproximan.
- Inyección y retirada automática de trenes en zonas de garaje.
- Presentar a los operadores el Interface Hombre Máquina (IHM) para permitir las funciones de telemando de tráfico.
- Dialogar con el sistema SCADA para intercambiar las informaciones necesarias al funcionamiento de cada uno de los dos sistemas. El sistema SCADA concentra los demás telemandos ferroviarios (material rodante, energía, puertas de andén, comunicaciones, etc.) y dispone de un enlace directo con el ATS.
- Almacenar todos los parámetros del sistema CBTC para permitir un análisis ulterior de la operación y la redacción de los informes.
- Ofrecer el nivel de disponibilidad requerido.
- Permitir la redacción de los informes de operación.
- Permitir la formación de los nuevos operadores.

El subsistema ATS consta del siguiente equipamiento:

- Servidor principal ATS A en sala de control principal.
- Servidor auxiliar ATS B en sala de control de emergencia.
- Servidor de archivo.
- Servidor de formación.
- Puestos de operación distribuidos en sala de control principal y de emergencia.
- Puesto de formación.
- Puesto de mantenimiento.

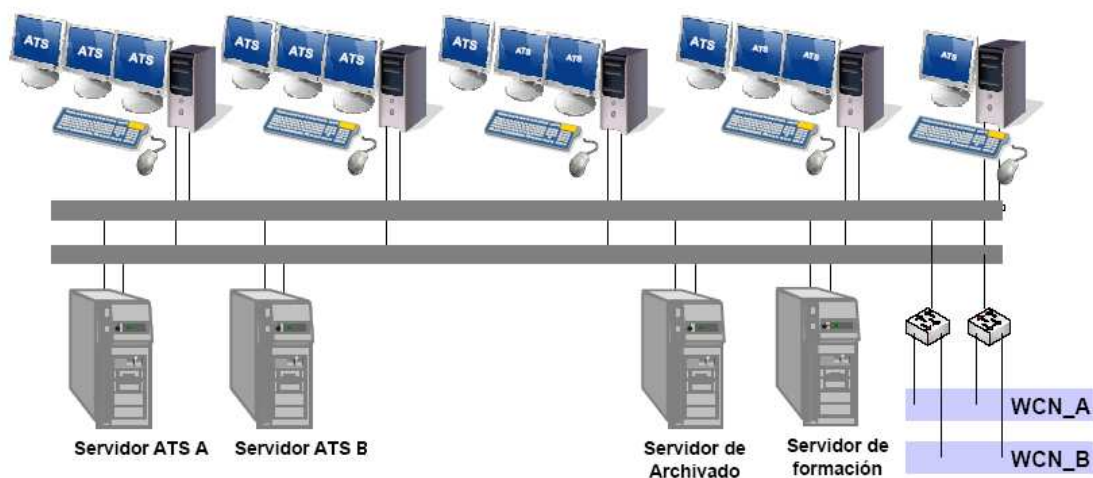


Fig. 176 Arquitectura del subsistema ATS.

Imagen: Descripción de las consolas ATS. OATS-T3 Module. SIEMENS Transportations Systems. Mayo 2008.

El ATS dispone de los siguientes interfaces para garantizar las funcionalidades:

- Del ATC al ATS para las telemetrías de ayuda a la operación y al mantenimiento.
- Del ATS al ATC para el telemando de tráfico, de mantenimiento y la difusión del referencial horario según PCD o modo degradado.
- Del enclavamiento al ATS para la detección de los trenes no comunicantes, las telemetrías de ayuda a la operación (posición de agujas y estado de los itinerarios) y de ayuda al mantenimiento.
- Del ATS al enclavamiento para el telemando de tráfico (mando de los itinerarios) y de mantenimiento.
- Del SCADA al ATS para la adquisición de datos de sistemas externos necesarios para la operación (energía, puertas de andén y transporte vertical).
- Del ATS al SCADA para el envío de datos de explotación (seguimiento de los trenes, hora de llegada al andén, etc.).

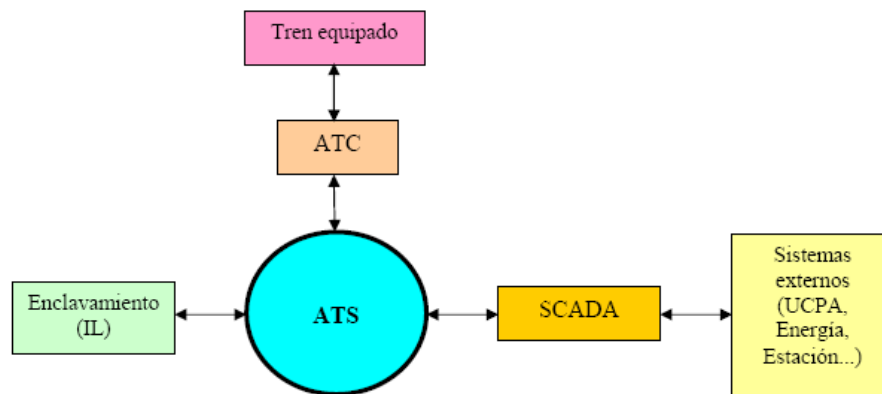


Fig. 177 Interfaces del ATS con el exterior.

Imagen: elaboración propia.

El sistema CBTC permite la explotación sin conductor ni ayuda a bordo de los trenes en el modo de conducción MTO. Los movimientos de los trenes y los mandos de itinerarios se supervisan desde los puestos del telemando de tráfico ATS.

El explotador define previamente el Programa de Circulación Diario (PCD) que corresponde a cada día y lo aplica desde el principio del servicio. El PCD es una tabla que contiene todos los datos necesarios para la explotación de la línea, formada por un conjunto de Líneas de Servicio (LS). Cada LS define el movimiento de un tren entre dos terminales y el horario de realización de este trayecto, o el horario de inyección o retirada de un tren para una terminal dada. Cada PCD se construye a partir de una hipótesis de distribución de los trenes en los distintos garajes de la línea antes del principio de la explotación, y responde a un objetivo de intervalo para cada franja horaria y en función de los distintos servicios de comunicación de la línea.

El PCD describe línea tras línea y para cada terminal:

- Las horas de salida de cada misión de tren para cada terminal de salida que pertenece al ámbito explotado, así como los horarios de paso de este tren en las estaciones intermedias.
- Las horas de inyección del tren para cada terminal de salida.
- Las horas de retirada del tren para cada terminal de llegada.
- Las horas de salida de las misiones de distribución de los trenes entre los garajes en caso de necesidad.
- Las vueltas de los trenes en los finales (andén preferente o vuelta alternativa).

El ATS así dispone de un determinado número de PCD que corresponden a las distintas configuraciones de explotación que pueden presentarse en la línea (en función del día de la semana, del período del año, de la previsión de carga excepcional en función de la frecuencia de algunos acontecimientos exteriores, etc.). El operador de tráfico elige el PCD adaptado al tipo de explotación esperado antes del principio de la explotación, y lo conserva durante todo el día hasta el final de la explotación.

El ATS asigna a cada tren una misión de PCD, que el tren entiende como la descripción del movimiento (servicio comercial, vueltas, retirada, inyección, etc.) entre un origen y un destino, asociada a una lista de puntos de paso obligados. En servicio comercial, se describe la lista de las estaciones donde el tren tiene que pararse.

Respecto a la regulación del tráfico, para cada tren en servicio comercial, el ATS elabora las consignas de regulación para garantizar el respeto del PCD para los trenes en modo MTO, ATO y ATPM. Una vez elaboradas, las consignas se transmiten al CC para ser aplicadas por el tren. Se utilizan dos tipos de consigna:

- La hora de salida del andén que define el tiempo de estacionamiento, siempre comprendido entre un tiempo de estacionamiento mínimo y un tiempo máximo, con el objeto de ser nominal. El operador tráfico define el tiempo de estacionamiento mínimo, nominal y máximo para cada andén.
- La velocidad del tren en la interestación según 4 modos de marchas predefinidos.

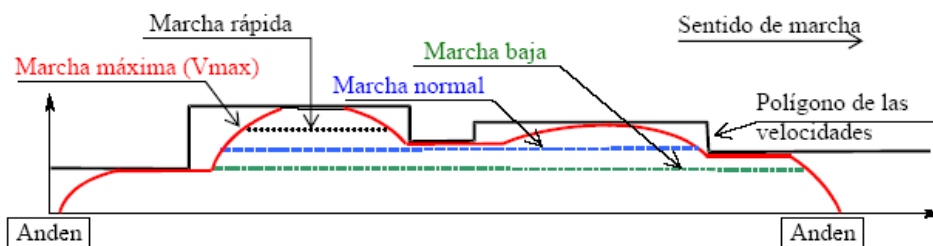


Fig. 178 Modos de marcha en interestación.

Imagen: elaboración propia.

Las 4 curvas de velocidad, predefinidas para cada interestación, que el tren puede seguir durante su recorrido son las siguientes:

- Marcha máxima (M4): corresponde a la velocidad máxima que el tren puede alcanzar en la interestación, está limitada por el gálibo de seguridad de la vía.
- Marcha rápida (M3): se deduce de la marcha M4 agregando 5 segundos por kilómetro con un mínimo de 5 segundos por interestación.
- Marcha normal (M2): se deduce de la marcha M3 agregando 5 segundos por kilómetro con un mínimo de 5 segundos por interestación.
- Marcha lenta (M1): se deduce de la marcha M2 agregando 5 segundos por kilómetro con un mínimo de 5 segundos por interestación.

Cuando el tren llega al andén, el ATS comprueba si va retrasado o adelantado según la hora de salida. Si va retrasado según horario PCD aplica el tiempo mínimo de espera en el andén (fijado en 20 seg. en la Línea 9 de Metro de Barcelona) y se asigna un modo de marcha acelerado (rápida o tendida) para intentar recuperar el retraso en la próxima interestación. Si el tren va adelantado, se aplica el tiempo máximo de espera en el andén y se asigna un modo de marcha moderado (normal o lenta).

Para poder regular con garantías, el ATS tiene en su base de datos el tiempo que tarda un tren en cada uno de los cuatro modos de marcha para cada interestación. De esta manera, puede calcular cuál modo ha de aplicar para conseguir el horario deseado.

El IHM del telemando de tráfico ATS está dividido en varias pantallas, cada una de las cuales muestra una información diferente al operador. La figura 179 muestra la pantalla general de control del tráfico, que se subdivide en 6 zonas:

- Zona 1: alarmas del sistema.
- Zona 2: fecha y hora, botón de reconocimiento de alarma, posibilidad de activar el aviso acústico, botón de stop de la circulación y de inicio de sesión ATS.
- Zona 3: listado de las últimas 100 alarmas del sistema ATS.
- Zona 4: barra de botones para acceder a las pantallas de Línea, Señalización, Tren, Andén, Informes, Mantenimiento y Derechos de acceso.
- Zona 5: imagen de la pantalla seleccionada en la zona 4, desde donde se realiza el seguimiento y control del tráfico.
- Zona 6: mensajes de error relativos a las acciones del usuario.

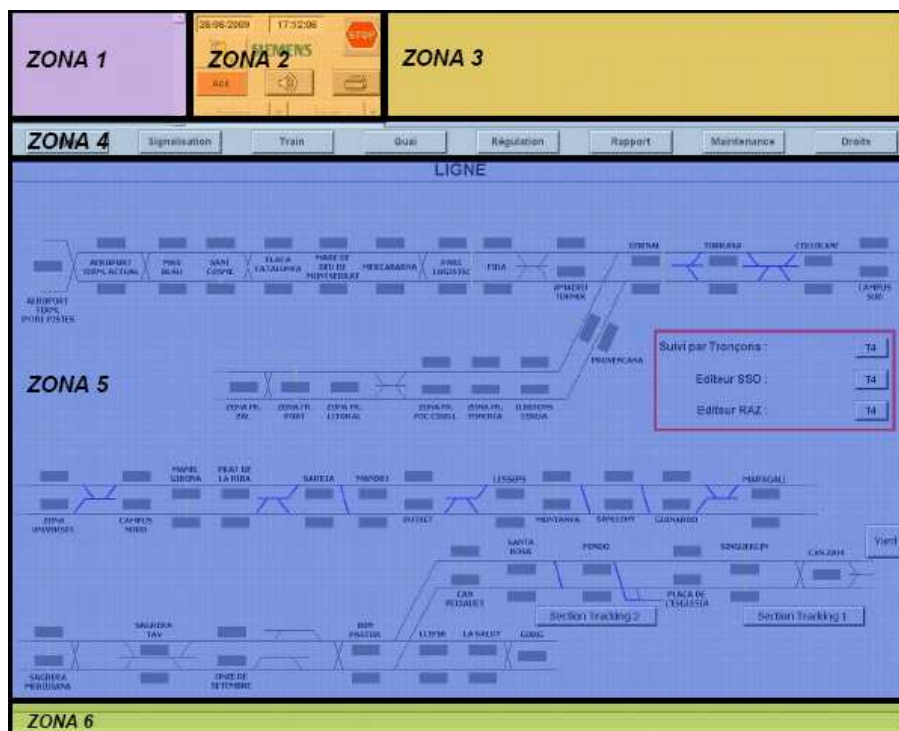


Fig. 179 Zonas del IHM ATS de Línea 9.

Imagen: elaboración propia.

Desde las pantallas de operación ATS se pueden realizar todo tipo de acciones de control sobre los trenes y elementos de señalización, como seleccionar los andenes de parada de un tren, establecer itinerarios manuales, restringir rutas, mover una aguja, etc. Todas estas acciones están siempre supervisadas por el ATC, de manera que un error del operador nunca tendría efecto sobre la seguridad en las circulaciones. La figura 180 muestra la pantalla específica de seguimiento de sección, donde el operador puede actuar sobre elementos como agujas, itinerarios o señales.

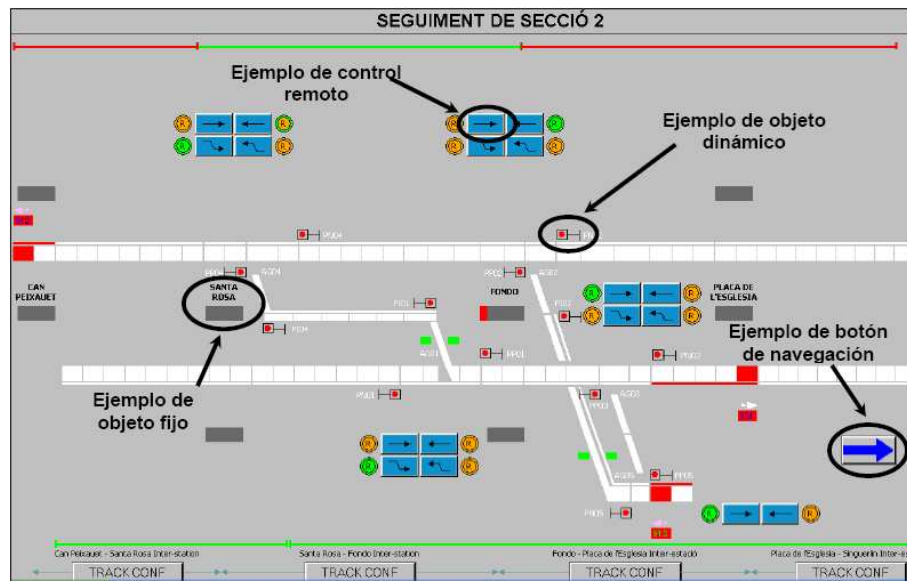


Fig. 180 Elementos de señalización en pantalla "seguimiento de sección" de Línea 9.

Imagen: elaboración propia.

En caso de que una incidencia obligue a interrumpir la circulación en un tramo de la línea, el operador puede establecer los modos degradados desde el ATS. Seleccionando las estaciones de inicio y de final del Servicio Parcial (SP) puede establecer un carrusel fuera de la zona de incidencia, que permita seguir con el tráfico en una zona de la línea. El número de trenes que introduzca en el carrusel marcará el intervalo que el ATS asignará al SP. Para el establecimiento de lanzaderas el procedimiento es similar, pero el ATS no ha de efectuar ningún cálculo de intervalo al ser el operador el que establece el tiempo que el tren esperará en el andén antes de cambiar el sentido de la marcha.

Las comunicaciones internas entre los equipos de la red ATS y externas con el resto de equipos del sistema de señalización se implementan a través de la red WCN. El protocolo TCP/IP rige todos los intercambios de información y el routing OSPF garantiza la alternancia de caminos en caso de que se produzca un corte de red. El hecho de que se instalen dos servidores ATS responde a la necesidad de redundar el servicio en caso de caída de uno de ellos. La conmutación entre servidores es transparente para la operación y no hay ningún impacto en el servicio.

7 INGENIERÍA DE SEÑALIZACIÓN EN LÍNEA 2

El objetivo de este punto es analizar cada uno de los elementos de señalización que han de ser modificados para poder implantar un sistema de señalización automática en Línea 2 de Metro de Barcelona. El reto es importante, pues supone pasar de un sistema de señalización ATP/ATO GoA 2 de DIMETRONIC a un sistema CBTC GoA 4 de SIEMENS, aprovechando al máximo los recursos técnicos que ya están instalados y minimizando el gasto adicional a realizar.

El sistema CBTC de SIEMENS permite la utilización de circuitos de vía suministrados por otro fabricante, por lo que se aprovecharán los CVSJ FS2500 y FS2550 instalados actualmente en la Línea 2. El hecho de que no sean imprescindibles para la circulación en trayecto comporta que en zonas de interestación donde no existen agujas sea posible reducir el número e instalar sólo un circuito de vía. De esta manera, se consigue reducir costes de mantenimiento en términos de tiempo y económicos.

Los criterios para definir los circuitos de vía en el sistema CBTC son los siguientes:

- Instalación de un circuito de vía por cada motor de aguja con el fin de permitir el desenclavamiento secuencial de los itinerarios. En las breteles no es posible, así que se mantienen los 2 circuitos de vía para los 4 motores de aguja.

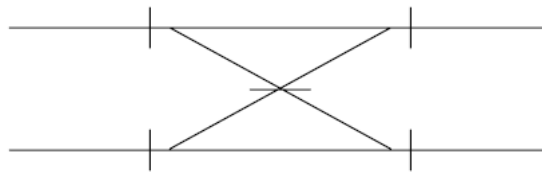


Fig. 181 Dos circuitos de vía en zona de bretele.

Imagen: elaboración propia.

- Instalación de un circuito de vía a cada lado del de agujas con el fin de facilitar la detección del paso del tren por el de agujas. Estos circuitos de vía serán los de trayecto en interestación.
- Instalación de un circuito de vía único en andén. Se mantendrán los circuitos de vía de andén que existen actualmente en Línea 2.
- Por cada circuito de vía de aguja, se considera un distancia de seguridad para protección de la punta de la aguja por los menos igual a la distancia del segundo eje del tren al frontal del mismo. Para la protección de talón esta distancia se añadirá a la de gálibo.
- Los límites entre enclavamientos contiguos se establecen de forma que no sea necesario enviar información de circuitos de vía entre WESTRACES adyacentes.

La reingeniería de circuitos de vía en Línea 2 supone una reducción de 44 CV, que representa un 26% menos que los que hay actualmente instalados.

En vía, la reconfiguración de los CV se realizará manteniendo las Tuning Unit (TU) de los extremos y eliminando las centrales. Esto es posible porque el modelo FS2500 y FS2550 de DIMETRONIC permite longitudes de hasta 1400 m. en circuitos de vía de trayecto.

En sala de enclavamiento, se desmontarán del rack los CV eliminados, en concreto la Fuente de Alimentación (FA), el Transmisor (TX) y el Receptor (RX) de cada uno de ellos.

El SW del enclavamiento también debería ser modificado para poder autorizar los itinerarios en función de las nuevas condiciones de señalización. En cambio, la modificación a realizar en los enclavamientos incluirá un alcance mayor, al ser el ATC el encargado de las funciones de señalización y seguridad en el establecimiento de itinerarios de trayecto.

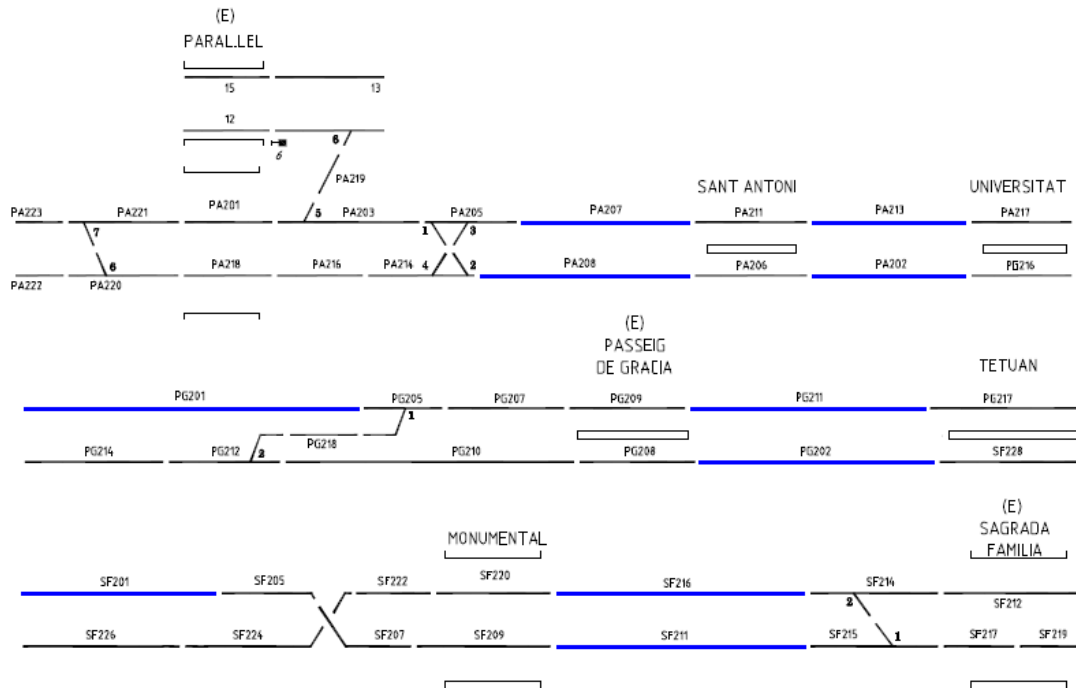


Fig. 182 Reingeniería de SC y CV entre Paral·lel y Sagrada Família.

Imagen: elaboración propia.

El CBTC necesita incorporar balizas en vía para colaborar en las funciones localización, calibración y reposicionamiento del tren. El número de balizas depende de la zona en que se instalen:

- En zona de trayecto se instalará 1 baliza cada 100 m. aproximadamente para localización y reajuste de la posición del tren, dando un total de 50 balizas.
- En zona de andenes se instalarán 5 balizas para garantizar la parada de precisión y la recalibración del tren, aportando un total de 90 balizas.
- En la zona de transferencia de modo manual a modo automático y viceversa, se instalarán 3 balizas para localización y calibración. Esta zona está situada en el CV TF01 de salida de Triangle Ferroviari y el tren deberá conducirse en modo ATPR desde la zona de taller y cochera hasta el punto de parada en este CV. Una vez localizado, el conductor conmutará a modo MTO y desde el ATS se inyectará en la línea. Para garantizar una calibración exacta, se disponen las balizas en un tramo recto del CV TF01 con una separación de 100 m. El tren deberá circular a una velocidad mínima de 5 km/h para garantizar que no se superan los 2 min. de paso entre balizas.

La instalación de 143 balizas en las zonas especificadas garantizan un error de localización de ± 15 cm. en estación y posiciones de garaje, que garantizan una precisión de parada de ± 25 cm. La precisión de parada en el andén ha de ser muy exacta, ya que el hecho de que existan puertas de andén obliga a que éstas queden encaradas con las puertas del tren para permitir la transferencia de pasajeros.

En las zonas de maniobra, por ejemplo en el punto de parada donde el tren cambia el sentido en un servicio parcial, el error de localización aumenta hasta ± 2 m. Este factor es tenido en cuenta por el ATC a la hora de asignar la MAL a otro posible tren enfrentado.

Las balizas han de ser instaladas en el centro de la vía, sobre un soporte que garantice una separación mínima por debajo de la pera de carril. Esta separación debe ser de 25 mm. en un carril nuevo y de 15 mm. en uno gastado. La tolerancia lateral es de ± 10 mm.

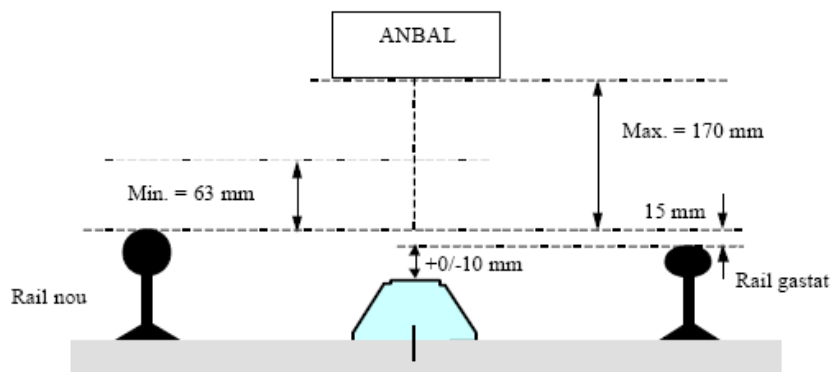


Fig. 183 Gálibos de lectura y posición de la baliza.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

Los accionamientos instalados son perfectamente compatibles con el sistema CBTC, por tanto no se realizan modificaciones en este elemento. Se mantienen los 38 motores de aguja MD-2000 de DIMETRONIC instalados en desvíos y breteles de vía general en Línea 2.

El sistema CBTC no requiere Señales de Circulación (SC) para señalar los cantones ocupados, puesto que la gestión de la circulación de los trenes se basa en cantones móviles. El sistema no necesita de señales de circulación, por lo que las que están actualmente instaladas no son necesarias.

Respecto a las señales indicadoras de aguja, el uso se restringe a circulaciones en modo degradado o en horario nocturno, donde un conductor maneja el tren de manera manual. En explotación nominal, el tren circulará en modo Manless Train Operation (MTO), por lo que la visualización de la posición de aguja no será necesaria. La ingeniería realizada para la implantación del nuevo sistema presta especial atención a la reducción de costes, siempre sin perjudicar la seguridad, por lo que se considera que una circulación en modo manual siempre ha de basarse en las autorizaciones que se indiquen desde el Centro de Control de Metro (CCM), sobre todo en horario nocturno.

Las señales de topera, formadas por tres focos luminosos de color rojo, se utilizan para indicar al conductor del tren que la vía llega a su fin. Están instaladas en las vías de las estaciones finales, dos en Paral·lel y tres en Badalona-Pompeu Fabra.

La ingeniería realizada elimina 83 señales luminosas, entre SC y Límite de Maniobra (LM). Las señales de límite de maniobra tampoco son necesarias, puesto que los movimientos de los trenes para realizar cambios de sentido están controlados por el CBTC y no se requiere una señalización visual que indique el punto a no rebasar, ya que el tren funciona de manera automática.

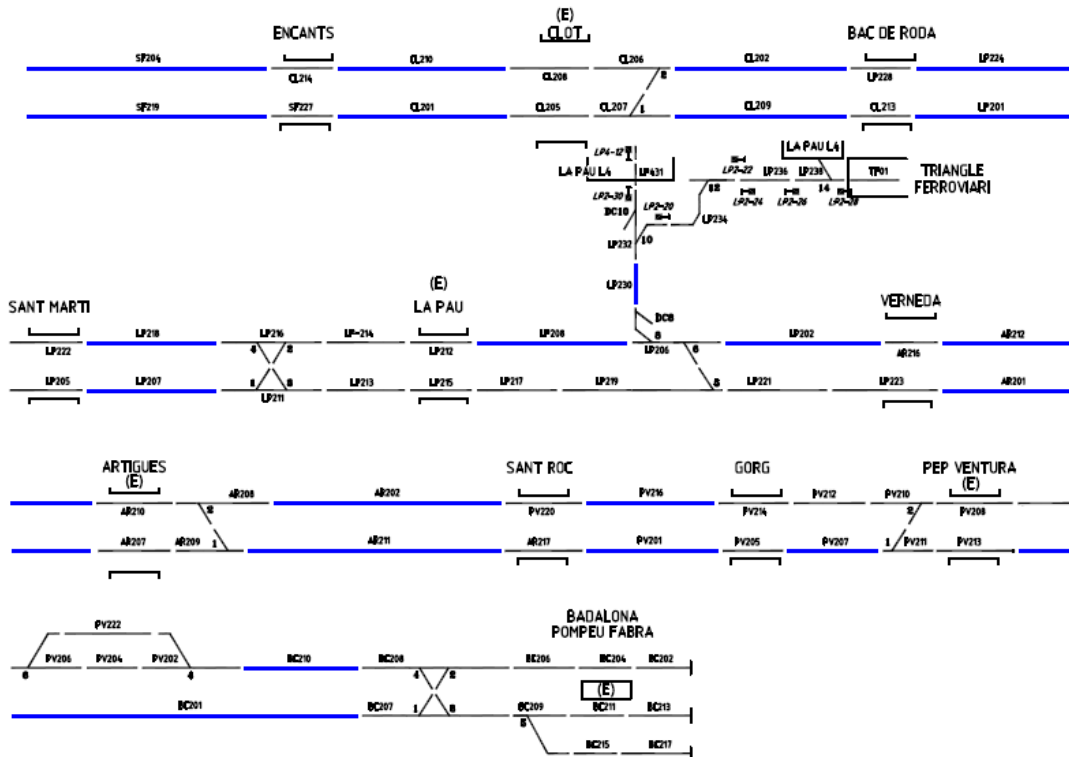


Fig. 184 Reingeniería de SC y CV entre Encants y Badalona-Pompeu Fabra.

Imagen: elaboración propia.

Todos los equipos del sistema ATO de DIMETRONIC deber ser desinstalados, pues el sistema ATC/ATS incorpora todas las funcionalidades ATO sin necesidad de dichos elementos.

En vía se deben desmontar las balizas ATO, formadas por la unidad de alimentación de lazo o Loop Control Unit (LCU) y el lazo de ATO que se extiende en paralelo a los carriles.

En sala de enclavamiento, se deben desmontar los EVCE y EVSE, así como todo el cableado tendido entre ellos, con el enclavamiento y con los objetos de vía.

El sistema CBTC necesita de los enclavamientos para poder interactuar con los objetos de vía. La Línea 2 dispone de un total de 8 enclavamientos DIMETRONIC, 3 de cableado libre y 5 de tipo electrónico WESTRACE. El ZC puede trabajar con enclavamientos de relés y de tipo electrónico, no condicionando de esta manera la opción de mantener los actuales enclavamientos tal como están. No obstante, sería una buena oportunidad para modernizar los enclavamientos de relés y sustituirlos por WESTRACES.

Hay dos aspectos fundamentales que han hecho decantar la ingeniería de enclavamientos por la opción de mantener los 3 enclavamientos de cableado libre. El primero de ellos es la fiabilidad que aportan los enclavamientos de cableado libre y el segundo es la reducción de costes que supone no instalar un WESTRACE, el precio del cual es aproximadamente de 600.000 € incluyendo suministro e instalación.

Los enclavamientos, de tipo electrónico o de cableado libre, no ejercen la lógica de señalización y delegan esta función al Zone Controller (ZC). De esta manera, el enclavamiento se convierte en una especie de PLC para los objetos de campo (accionamientos y circuitos de vía), subordinados a las órdenes del ATC y ATS, garantizando un nivel de seguridad SIL 4.

Los itinerarios de agujas se piden al enclavamiento y es éste el que autoriza el establecimiento mediante la señal Apertura de Itinerario (API) que envía al ZC. Para ello, tiene en cuenta varias condiciones, entre ellas la posición enclavada de la aguja (a recta o desviada) y el circuito de vía destino libre (el inmediatamente posterior al de agujas).

El enclavamiento reporta si un circuito de vía físico (CV) está ocupado, mediante la alarma Always Reporting Blocked (ARB) en el telemando de tráfico ATS. El ATC realiza un seguimiento de los trenes mediante los Circuitos de Vía Virtuales (CVV), de manera que puede saber si se trata de una falsa ocupación o una ocupación verdadera. El operador tiene la opción de reconocer la alarma y seguir con el servicio comercial.

Se instalarán un total de 6 Zone Controller (ZC), ubicados en bastidores estándar de 19", idénticos a los que alojan las tarjetas del WESTRACE. El enclavamiento de Clot estará controlado por el ZC de Sagrada Família y el de Pep Ventura por el ZC de Badalona-Pompeu Fabra. La capacidad de la CUCP es suficiente para la gestión de la circulación en estos tramos, dadas las pocas diagonales y trenes en circulación que hay que controlar. Además, en caso de saturación de la CUCP, siempre sería posible actualizar la versión SW de CR7 a CR9, aumentando así la capacidad de proceso.

Se instalarán 6 Wayside Cell Controller (WCC), 1 por sala de enclavamiento excepto en Pep Ventura y Clot, donde no se instalará ninguno. Cada WCC administra un máximo de 16 WRE, que pueden agruparse en un máximo de 4 células distintas con diferente número de WRE en cada una de ellas. Cada célula de radio acostumbra a dar cobertura a dos interestaciones.

El WCC de Sagrada Família será el encargado de controlar la célula que cubre la interestación entre Bac de Roda y Sant Martí, que también quedará cubierta por otra célula que controlará el WCC de La Pau (redundancia de radio).

Las células de radio del andén de Gorg y las interestaciones colaterales estarán controladas por el WCC de Artigues-Sant Adrià y el WCC de Badalona-Pompeu Fabra. La ingeniería realizada se basa en la infraestructura de la Línea 2 y la experiencia en Línea 9, aunque pueden existir diferencias con la instalación definitiva, que efectuará el Ingeniero de Radio de SIEMENS.

Cada célula de radio está constituida por una o más bases de radio, que se conectan a una misma WTU a través de una fibra óptica dedicada, la Wayside Radio Distribution (WRD). La fibra óptica de la WRD une todas las bases de radio con la sala de enclavamiento, pudiéndose utilizar dos soluciones diferentes para realizar los empalmes de fibra en los mezcladores ópticos.

En la primera solución la fibra óptica no se interrumpe en ninguna de las bases de radio en vía y las conexiones se realizan en las salas técnicas, haya o no WCC.

En la segunda solución la WRD sólo dispone de un cable de fibra óptica y éste se interrumpe en cada ubicación de WRE. La distribución se realiza en el cajón WRE, en el nivel del mezclado óptico, donde algunas fibras están conectadas a cordones ópticos para la conexión con el panel del WRE, mientras un empalme de fusión proporciona continuidad para las otras fibras.

Se escoge la segunda solución, un solo cable de fibra óptica interrumpido en el mezclador óptico del WRE, por ser de alta fiabilidad y precio más económico que la primera. Se utilizará fibra óptica de tipo multimodo con las siguientes características:

- Fibra tipo sílice.
- Diámetro de la base: $62.5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.
- Revestimiento óptico: $125 \mu\text{m}$.
- Atenuación máxima (peores condiciones) $\leq 3.5 \text{ dB/km}$ a 820 nm .
- Atenuación mínima (peores condiciones) $\leq 1.5 \text{ dB/km}$ a 1300 nm .

La instalación en vía del cajón WRE y del módulo de conexión de la fibra óptica se realiza sobre unos soportes en forma de L invertida en los tramos en que el hastial es recto, en caso de tramos con túnel abovedado se puede instalar en unas rejiband verticales colladas al suelo. Las dimensiones del cajón WRE es de 150 cm. x 40 cm. x 45 cm. (altura x anchura x profundidad).

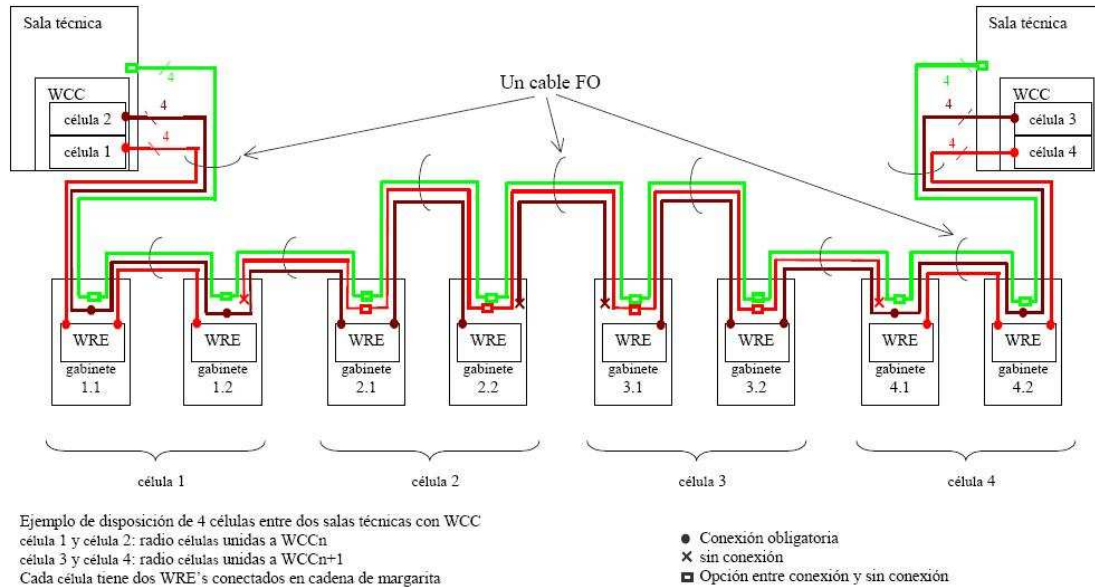


Fig. 185 Distribución de la fibra óptica interrumpida en cada WRE.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

Cada Wayside Radio Unit (WRU) permite la conexión de varias antenas de radio o Wayside Radio Antenna (WRA). Las asociaremos por parejas, cada una apuntando en una dirección específica, con un divisor o alimentado directamente desde el WRU.

Las conexiones hasta el WRU y dentro del propio WRU se realizan mediante un conector tipo N. El requerimiento nominal es una atenuación coaxial total entre WRE y WRA de menos de 2 dB. Se pueden utilizar dos tipos de cable coaxial:

- Hasta 15 m - 1/2 pulgada coaxial (10.7 dB/100 m. a 2 Ghz; 13.4 dB/100 m. a 3 Ghz).
- Más largo de 15 m - 7/8 pulgadas coaxial (6.11 dB/100 m. a 2 Ghz; 7.76 dB/100 m. a 3 Ghz).

Las antenas de radio se instalarán a 10 m. de la entrada y salida de las estaciones, a una altura de 1,829 m. por encima del techo del tren, justo en el lado de la vía o entre vías. La instalación de cada antena debe hacerse eliminando al máximo los obstáculos frente a ella o, en todo caso, con una separación mínima de 10 m. en la dirección de la antena. Para evitar interferencias es recomendable que se respeten unas distancias mínimas de 1,5 m. a catenaria y 30 cm. a techo de túnel.

La ubicación de la antena en andenes debe ser tal que la antena del tren en la posición de parada en estación sea visible desde un ángulo inferior a 45° .

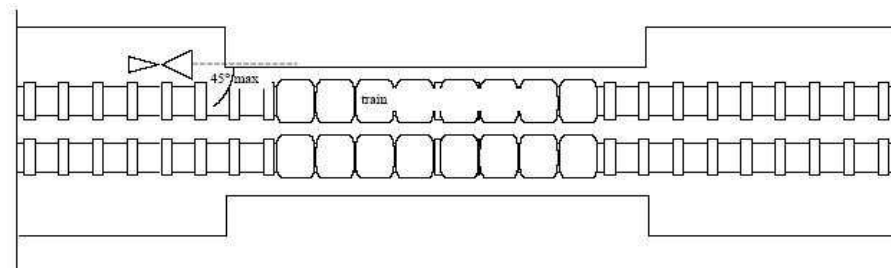


Fig. 186 Ubicación de la antena en las estaciones.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

La infraestructura del túnel, como curvas o rampas pronunciadas, puede provocar que sea necesaria la instalación de antenas en interestación. En tal caso, la antena se debe instalar siempre que sea posible en el centro del túnel, con el fin de asegurar la comunicación con ambas vías y minimizar el impacto de un tren que pueda quedar bloqueado.

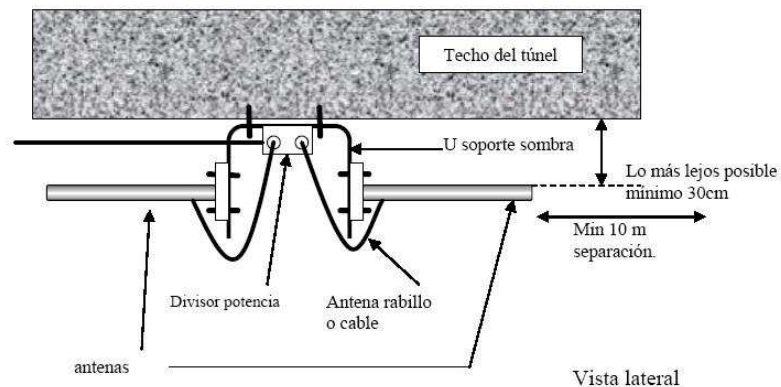


Fig. 187 Instalación de las antenas en túnel.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

En cada WCC se instalan 2 routers A y B, para interconectar los equipos ATC con el resto de equipamiento del sistema CBTC, mediante la red Wayside Communication Network (WCN). Esta red estará formada por un backbone α y un backbone β , cada uno de ellos compuesto por 4 fibras ópticas de tipo monomodo que se deberán tender por hastiales alternativos de túnel. El objetivo es redundar la red física y lógicamente, aportando robustez en caso de avería simple de algún elemento. La longitud de Línea 2 es de 13.194 m., por tanto la longitud de fibra óptica necesarios para el backbone α y β es de 110.000 m., incluyendo los tramos hasta las salas técnicas y al PCC de La Sagrera.

En caso de avería en el backbone α o β , debido a la fibra óptica o a un router, el tráfico de datos se redirige sobre el backbone disponible después de un tiempo t , período de convergencia del protocolo de red (OSPF). Este tiempo no deberá superar nunca los 30 segundos.

En las estaciones que no dispongan de enclavamiento se deben instalar 2 switch A y B, con el fin de comunicar los equipos del subsistema de puertas de andén con el ZC. El ZC debe tener información del estado de las puertas de andén de las estaciones que controla, con el fin de autorizar los movimientos de los trenes con seguridad. En caso de apertura del lazo de puertas, el ATC activa una restricción de entrada a la estación, impidiendo la entrada de los trenes en modo CBTC.

En cada estación se debe instalar un módulo óptico, como el que muestra la figura 188. Las fibras de la WCN se interrumpen en dicho módulo para permitir la conexión con los routers A y B, en caso de sala de enclavamiento, o con los switch A y B, en caso de sala sin enclavamiento.

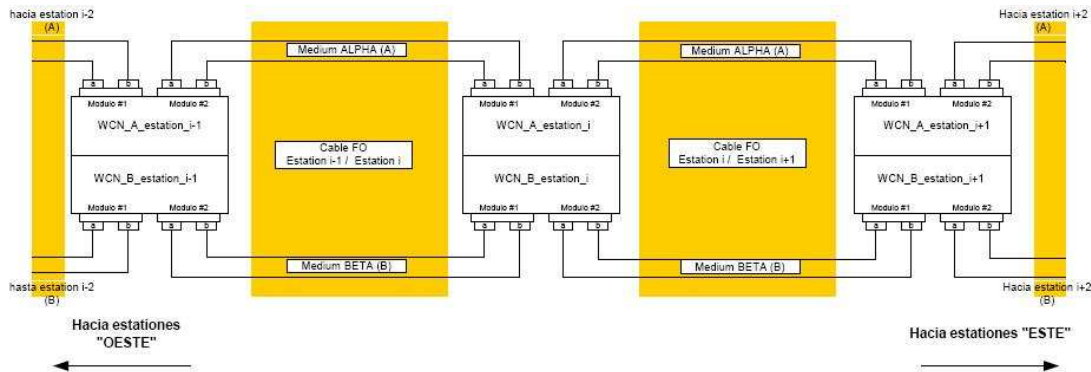


Fig. 188 Diagrama de conexión de los módulos ópticos de la WCN en estación.

Imagen: Proyecto y obra del ATC, señalización y PCC de la Línea 9 del Metro de Barcelona. UTE SIEMENS-DIMETRONIC. Marzo 2004.

Las normas de red bajo las cuales presta sus servicios la red WCN son las siguientes:

- Ethernet (IEEE 802.3) para el nivel 2.
- IP para el nivel 3.
- OSPF (RFC-2328) para el protocolo de transporte.
- VRRP (RFC-2338) o HSRP (RFC-2281) para el protocolo de redundancia de los routers.

El subsistema ATS también debe conectarse a los equipos del subsistema ATC mediante la WCN, por tanto esta red deberá llegar al PCC en La Sagrera y PCE en Sagrada Família.

El tren que circula en Línea 2 es el modelo S9000 de ALSTOM, que puede ser utilizado también en el nuevo sistema de señalización CBTC. Para ello, ha de ser sometido a algunas modificaciones, entre ellas la eliminación de la cabina de conducción y la sustitución del tablero de mandos por un pupitre escamoteable. El ATC-D debe ser sustituido por el ATC-S, que incorpora:

- 1 controlador embarcado o Carbone Controller (CC), formado por los siguientes elementos:
 - 1 cajón calculador OBCU con 2 unidades A y B en hot stand-by.
 - 1 equipo de interfaz de comunicación o Communication Interface Unit (CIU).
 - 2 captadores de velocidad u odómetros codificados (que deberían estar ya instalados en ATC-D).
 - 1 antena de captación de balizas o Transponder Interrogator Antenna (TIA).
 - 2 pantallas CC, una en cada coche de cabina.

- 2 antenas CRA, una sobre cada cabina extrema del tren, en una ubicación que permita la emisión hacia el exterior del tren. La ubicación debe determinarse y validarse del punto de vista radioeléctrico, teniendo en cuenta el tipo de los materiales delante de la antena (no metal, ni materiales con partículas metálicas) y la ubicación de las antenas del sistema de radio wireless. Es imprescindible asegurar que no hay piezas metálicas en un radio de 10 cm. alrededor de la antena.
- 2 cajones CRE en sus respectivos cofres, lo más cerca posible de las antenas CRA (cada CRE incluye una única unidad CRU_A).
- Red Train Radio Distribution (TRD) para conectar los 2 OBCU redundantes a cada CRE.

Se desinstalan los actuales sistemas de control y regulación del tráfico:

- Subsistema de telemando de tráfico suministrado por TELVENT, compuesto por 2 servidores y 4 puestos de control del tráfico, repartidos en PCC y PCE.
- Subsistema de Regulación de Tráfico (RDT), suministrado por el Departamento de Proyectos de Telecontrol de TMB. Se compone de 2 servidores, 2 puestos de administrador y equipamiento en estaciones.

Las funcionalidades desempeñadas por ambos subsistemas estarán implementadas por el subsistema ATS. En el PCC de La Sagrera se debe instalar el siguiente equipamiento:

- 1 servidor de tráfico principal ATS.
- 1 servidor de archivo.
- 1 servidor de formación.
- 2 puestos de telemando de tráfico ATS.
- 1 puesto de supervisor ATS.
- 1 puesto de entrenador.
- 1 puesto de formación.
- 1 puesto de mantenimiento.

En el PCE de Sagrada Família, necesario para operar en caso de incidencia en el PCC, se instalarán los siguientes equipos:

- 1 servidor de tráfico auxiliar ATS B.
- 1 puesto de telemando de tráfico ATS.
- 1 puesto de supervisor ATS.
- 1 puesto de mantenimiento.

Cada una de las máquinas estará equipada con una CPU INTEL PENTIUM® 4 como mínimo, con una frecuencia ≥ 1 Ghz, bus interno ≥ 100 Mhz y memoria R/W ≥ 1.024 MBytes. Es suficiente con un sistema operativo WINDOWS 2003 Service Pack o superior. El sistema operativo se instalará de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, suficiente para cumplir con las funcionalidades exigidas al sistema ATS.

Todos los cables de red utilizados han de ser UTP de categoría 5 para distancias iguales o menores a 10 m. y de cable STP categoría 5 para distancias mayores a 10 m. La longitud máxima permitida de cable entre puntos activos no superará nunca 90 m.

8 IMPACTO EN EL NEGOCIO

El análisis realizado hasta ahora demuestra la viabilidad técnica de sustituir el actual sistema de señalización convencional ATP/ATO DIMETRONIC de Línea 2 por el sistema de señalización automática CBTC SIEMENS. Para ello, es necesario modificar la red actual, eliminando o reaprovechando equipos existentes e incorporando nuevo equipamiento específico.

El hecho de modificar técnicamente el sistema no sólo tiene impacto en el Departamento de Proyectos y Mantenimiento de TMB, que necesariamente han de adaptar sus planes de actuación a los nuevos requisitos del sistema. El Departamento de Operación y Gerencia han de rediseñar el proceso de negocio para ofrecer al cliente un nivel de calidad superior al que ofrecían con el sistema de señalización convencional. El impacto en el modelo operativo de Línea 2 es evidente, pues se pasa de un sistema de señalización ATP/ATO GoA 2 a un sistema CBTC GoA 4 de SIEMENS. El cambio más evidente es que un GoA 2 necesita de conductor embarcado, con posibilidad de conducción semiautomática en ATO, y el GoA 4 no requiere de personal a bordo, siendo posible la conducción en modo totalmente automático.

La puesta en servicio del sistema CBTC en la Línea 2 implica una redefinición del negocio, asumiendo el reto de gestionar eficazmente el proyecto y preparando al personal de la compañía para asumir los nuevos roles. El éxito de este nuevo modelo operativo supondría incrementar el nivel de eficiencia, calidad de servicio y posicionamiento tecnológico de Metro de Barcelona. Pero también hay riesgos. La ATM designa a TMB como operador de la Línea 2 y renueva la concesión periódicamente en función de unos ratios establecidos, básicamente kilometraje de servicio comercial, intervalo entre trenes y disponibilidad de la línea. Así pues, el peligro estriba en que una gestión ineficaz del proyecto y una coordinación inadecuada conduzcan a la imposibilidad de ofrecer el grado de servicio que exige la ATM, corriendo así el riesgo de perder la licencia como operador.

En el presente punto se desglosarán los principales aspectos del área de negocio a redefinir con la incorporación de la nueva tecnología CBTC. El impacto que esta mejora técnica tiene en el modelo operativo de Línea 2 enmarca el grado de transformación del negocio en el nivel 4 según el modelo SAMR²⁵.



Fig. 189 Modelo SAMR de integración de las TIC.

Imagen: <http://elbonia.cent.uji.es/jordi/>.

²⁵ SAMR: siglas de las palabras Sustitución – Aumento – Modificación – Redefinición. Modelo creado por Rubén R. Puentedura para clasificar los diferentes niveles de integración de las TIC en el área educativa. El modelo es perfectamente extrapolable al área ferroviaria y operativa de TMB.

8.1 Flexibilidad

El Metro estructura la ciudad, actuando como la columna vertebral en torno al cual se edifican barrios de viviendas y centros de actividad económica y sociocultural. En este sentido, el Metro desempeña a la perfección la función de líder de la integración de políticas de transporte, urbanismo y ciudad.

El Metro también cumple una función pública, descongestionando las grandes ciudades del tráfico de vehículos privados y ofreciendo al viajero una opción de transporte fiable, cómodo y económico. Estos conceptos configuran la imagen de marca de una empresa de transportes, criterios que el cliente utiliza para elegir en qué medio de transporte y con qué empresa operadora quiere viajar.

El concepto de flexibilidad es vital para el Metro, pues el servicio comercial no es lineal en el tiempo y es necesario adaptar de manera ágil la oferta a la demanda cambiante de los pasajeros. El cliente escoge la opción del Metro para acudir al trabajo, llevar los niños al colegio o visitar a su médico, porque confía en que este medio de transporte le ofrece una frecuencia elevada de paso entre trenes, lo que llamamos intervalo, que le permitirá llegar a tiempo a su cita.

La oferta comercial del Metro es mayor en días laborables que en días festivos, debido a que el tráfico de pasajero se incrementa considerablemente. Los días laborables se suelen dividir en las siguientes franjas horarias:

- Horas punta: entre 7:30 – 9:00 h. en horario de mañana y entre 17:00 – 18:30 en horario de tarde, coincidiendo con las horas laborables y escolares de entrada y salida²⁶.
- Horas valle: el resto de horas del día.

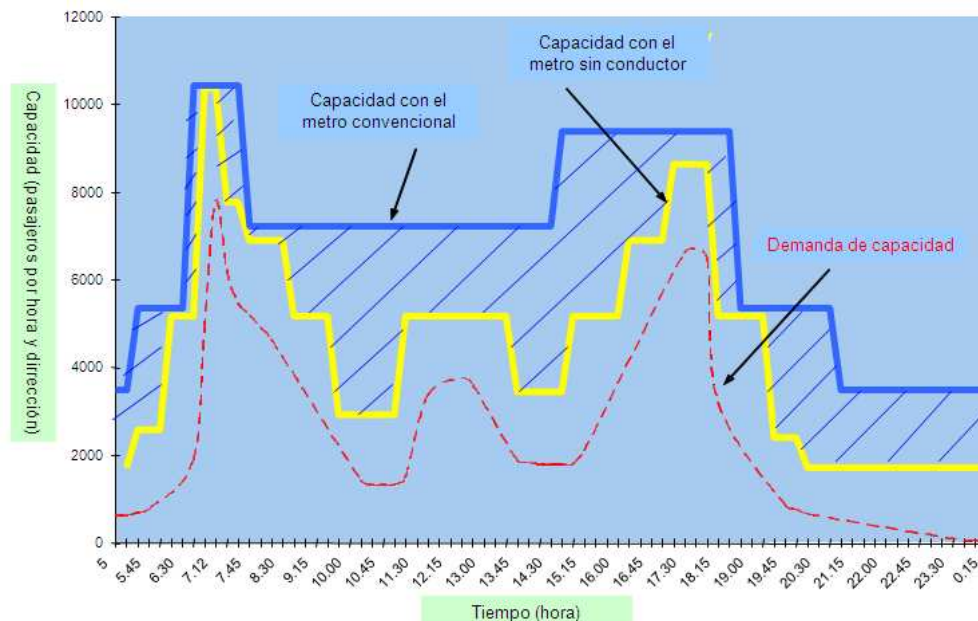


Fig. 190 Comparativa de ajuste de tráfico entre línea convencional y automática.

Imagen: CETECAM. Presentación del sistema CBTC para Línea 9. SIEMENS S.A. Marzo 2006.

²⁶ Franjas horarias utilizadas en Metro de Barcelona. Dependiendo del país, clima y condiciones socioculturales, las horas punta y valle pueden variar considerablemente.

Cuando hay eventos extraordinarios, como partidos de fútbol, conciertos o manifestaciones, se suele aumentar el tráfico de trenes para poder absorber toda la demanda requerida.

La manera de satisfacer un incremento de la demanda en determinadas franjas horarias es poder inyectar un mayor número de trenes a la línea. De igual modo, debe ser posible retirar dichos trenes cuando la demanda disminuye. Es lo que entendemos por flexibilidad operativa.

Uno de los obstáculos para mejorar la flexibilidad en una línea con señalización convencional es la necesidad de personal embarcado para conducir los trenes. El hecho de que cada tren que se ponga en circulación necesite de personal a bordo limita las posibilidades de adaptarse a la demanda variable, ya que todo cambio en la flota del servicio comercial depende en última instancia del personal disponible.

La planificación del personal se hace en función de unos estándares de servicio, que implica tener gente de retén por si surge algún imprevisto, como una baja por enfermedad o un accidente. Sin conductor no sale el tren, lo cual también tiene su afectación por ejemplo durante las jornadas de huelga.

Estas limitaciones desaparecen con la implantación de una tecnología de señalización automática. El sistema CBTC permite inyectar o retirar trenes de manera automática sin necesidad de movilizar personal para conducir los trenes. La línea puede estar trabajando en hora punta con 30 trenes en circulación y en hora valle con 15, tan sólo gestionando el sistema desde el telemando de tráfico ATS. Esto permite que con tan sólo dos operadores pueda ajustarse la demanda variable y satisfacer la necesidad de servicio. Además, ante una situación inesperada, es posible actuar sobre el sistema sin impacto en la plantilla.

La Línea 2 dispone de una flota de 23 trenes, 1 de los cuales siempre está de retén en un apartadero (CV PG218 o CV PV222) o en una posición de garaje en los fondos de maniobra de los finales (Paral·lel o Badalona-Pompeu Fabra). En las horas punta y en los acontecimientos especiales se ponen en circulación un total de 22 trenes. En las horas valle, el número depende del día y la franja horaria, pero la media es de 16 trenes en circulación. Por tanto, el dimensionamiento de la plantilla es de 22 conductores en hora punta, más 5 de retén por si ocurre algún imprevisto.

El personal de retén ha de estar situado estratégicamente por la línea para minimizar el tiempo de actuación cuando se ha de sustituir a un conductor indispuerto o que no acude a su puesto de trabajo por otras causas. Además, los relevos han de estar bien planificados pues la legislación laboral impide un tiempo de conducción de más de 4 horas en túnel.

El sistema de señalización automática CBTC permitiría en Línea 2 la inyección y retirada de trenes de manera ágil y rápida, sin necesidad de planificar relevos, sustituciones o retenes de plantilla. La flota de 23 trenes puede adaptarse a las franjas horarias de manera más exacta, variando la cantidad de trenes en circulación con sólo enviar una misión al tren. Los trenes en modo CBTC permanecen "dormidos" en el puesto de garaje, pudiendo ser "despertados" remotamente para inyectarlos en el carrusel. El operador debe entonces asignarle una misión manual e integrarlos en el PCD.

La flexibilidad del sistema CBTC permite que se puedan introducir nuevos trenes en el futuro, aumentando la oferta durante las horas punta en Línea 2. Para ello, se puede crear un nuevo PCD que contenga más trenes en dichas horas o bien se pueden crear misiones manuales, ambas opciones técnicamente posibles.

8.2 Ergonomía de explotación

Una mejora muy ligada al concepto de flexibilidad operativa es la ergonomía de explotación. El ATS supervisa los trenes, establece los itinerarios de las rutas y se encarga de la regulación, todo de manera automática. El operador no ha de estar permanentemente actuando en el telemando, pudiendo relajar la atención sin perjuicio de la seguridad y concentrándose en los eventos imprevistos que puedan surgir durante la operación.

El sistema de señalización convencional de Línea 2 sólo permite cierto número de modos degradados. Los Servicios Parciales (SP) o Vueltas Automáticas (VA) están limitados por la funcionalidad de los circuitos de vía, que permiten la circulación en un solo sentido de la marcha, de izquierda a derecha en vía 1 y viceversa en vía 2. Para permitir el cambio de sentido en las agujas, se debe instalar el modelo de CVSJ FS-5k reversible. Las lanzaderas entre estaciones o la Vía Única Temporal (VUT) no están permitidas en un sistema de señalización convencional.

La tecnología CBTC no tiene restricciones en cuanto al establecimiento de servicios parciales, las dos vías están totalmente banalizadas, permitiendo la circulación en ambos sentidos de la marcha. Los circuitos de vía no deben ser reversibles, porque no tienen funcionalidad de envío de códigos ATP. El seguimiento y control de los trenes se realiza vía radio, pudiéndose establecer desde el telemando de tráfico ATS cualquier servicio parcial que se requiera para responder a la demanda de pasajeros cuando se produce una incidencia.

El sistema CBTC de SIEMENS permite también las lanzaderas entre estaciones por ambas vías, tan sólo restringiendo el uso automático cuando se trata de compartir andén. En tal caso, es el operador el que ha de controlar los itinerarios de los trenes cuando se intercalan en su llegada al andén, siempre bajo el control de seguridad del ATC.

La vía única temporal es otro modo degradado muy útil cuando se tiene una incidencia en vía, pues permite la circulación por la otra en ambos sentidos de la marcha de manera automática.

Estas mejoras en la ergonomía de explotación optimizan la agilidad de respuesta cuando hay un problema en la línea y minimizan el impacto en el servicio comercial al reconfigurar los trenes que están circulando.

8.3 Seguridad y salud

La innovación principal que introduce el sistema CBTC es la ausencia de conductor para el manejo del tren. Esta mejora tecnológica no sólo permite evitar los problemas de reordenamiento del personal cuando hay que introducir un nuevo tren en el carrusel, sino que contribuye a mejorar aspectos de seguridad y salud.

En primer lugar, se aumenta la seguridad del sistema, pues se evita el riesgo de un fallo humano en la conducción, accidental o intencionado.

El sistema ATP protege contra los fallos humanos accidentales, pero existe el riesgo de que el conductor lo desactive intencionadamente, conmutando modo M+25 o incluso LLAVE ESPECIAL, donde no hay ningún tipo de supervisión del sentido de la marcha y velocidad del tren. En modo CBTC no hay conductor a bordo, lo cual impide este problema. Además, se trata de un sistema Fail safe, es decir, que incluso ante el fallo propio del sistema, éste responde de manera segura evitando accidentes. Ante cualquier fallo de seguridad, el sistema CBTC aplica el frenado de emergencia del tren.

El hecho de no necesitar de conductor embarcado evita también problemas médicos en los conductores y maniobreros. El Convenio Colectivo de TMB limita el tiempo de conducción continuada a 3 horas, ya que se considera que la conducción en túnel provoca enfermedades como dolor de espalda, lumbalgia, stress o agotamiento psicológico, que no sólo perjudica la salud del conductor, sino que puede afectar a la seguridad del pasaje. Así, cada 4 horas \pm 15 minutos, es necesario realizar una sustitución entre conductores.

Respecto al stress psicológico de los conductores, destacar que Metro de Barcelona, como el resto de explotaciones ferroviarias, sufre un problema de suicidios. La media de suicidios oscila entre uno y dos mensuales, con una desviación mayor en los meses de navidad y verano. Un conductor que atropella a un suicida ve afectada seriamente su estabilidad psicológica y necesita de unos meses de tratamiento para poder volver a su puesto de trabajo, si es que no se le concede la incapacidad definitiva para conducir trenes.

La instalación de puertas de andén juega un papel fundamental en el aumento de la seguridad del sistema. El cerramiento cubre todo el andén, lateral y verticalmente, evitando que ninguna persona pueda acceder a la vía. Las puertas sólo se abren bajo autorización del ATP cuando un tren está totalmente parado en el andén y ha abierto sus puertas. Un fallo en el lazo de seguridad de las puertas de andén provoca la restricción de entrada de trenes CBTC. La estanqueidad de los andenes contribuye también a la climatización de éstos, ya que no hay fugas de aire acondicionado por el túnel. Por tanto, el confort de los pasajeros se ve mejorado.

Los problemas de stress y fatiga se agravan en los finales, donde son necesarios los maniobreros que deben realizar el cambio de sentido del tren intentando respetar el intervalo mínimo de la línea. El maniobrero ha de esperar el tren en vía 1, realizar el cambio de sentido en las agujas y moverlo hasta el andén de vía 2, donde el conductor retoma sus funciones. Esta operación ha de realizarse en el mínimo tiempo posible, incluyendo el desplazamiento caminando a paso ligero para volver al andén de vía 1 a realizar la misma operación. El trabajo continuado como maniobrero causa más fatiga que el de conductor y provoca un mayor número de accidentes de trabajo, tales como caídas, esguinces, etc. En este caso, cada 3 horas \pm 15 minutos es necesario realizar una sustitución entre maniobreros.

Otra limitación importante que se elimina al no haber conductor embarcado es el derivado de la ergonomía del puesto de conducción. Las dimensiones de la cabina son limitadas y no todas las personas se adaptan al espacio con comodidad. El exceso de altura, de peso o las minusvalías descarta un determinado grupo de agentes, que no pueden realizar funciones polivalentes.

El sistema CBTC sin conductor elimina todos los problemas anteriores, aportando valor añadido a las funciones que desempeñan los empleados. Éstos pueden ver reasignadas sus tareas por otras más provechosas o más necesarias para la empresa, como la atención a los pasajeros o la resolución de incidencias. En el primero de los casos, el empleado puede aprender idiomas para atender a los turistas que tienen dificultades en las máquinas de validación y venta. En el segundo, puede formarse técnicamente para poder resolver averías de bajo nivel, con el objetivo de recuperar el servicio comercial una incidencia técnica menor.

8.4 Capacidad

La capacidad es el número de trenes en circulación que puede absorber el sistema de señalización de manera simultánea. De la capacidad de la línea depende el intervalo entre trenes, parámetro vital para poder satisfacer la demanda de pasajeros.

En un sistema de señalización convencional la principal limitación estriba en la tecnología de cantonamiento fijo. Los trenes respetan el punto de parada que les marca el cantón ocupado por delante, de manera que no puede haber más trenes que número de andenes tiene la línea.

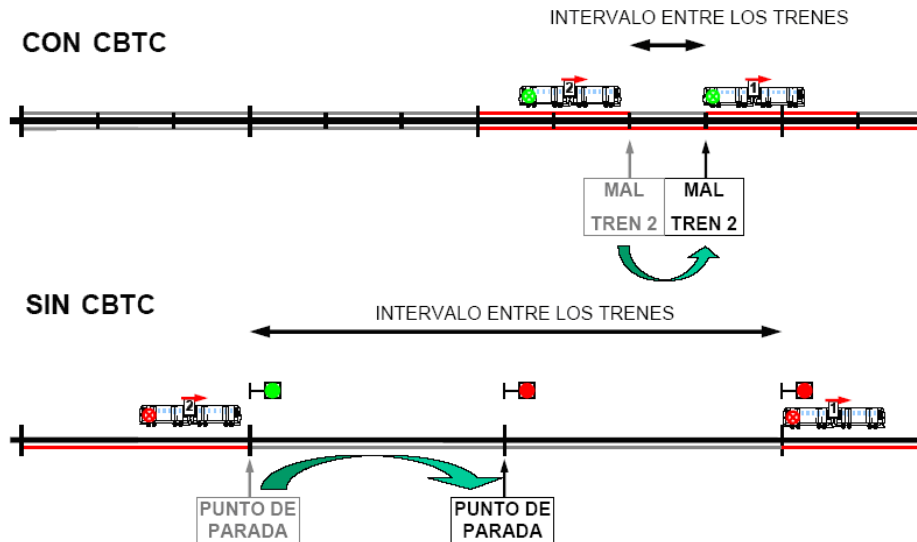


Fig. 191 Diferencia en el intervalo en un sistema convencional y CBTC.

Imagen: elaboración propia.

El concepto cambia en un sistema de señalización CBTC por cantones móviles. La distancia de seguridad por delante del tren no viene marcada por un cantón fijo protegido por una señal. Cada tren envía su localización permanentemente por la radio embarcada, de manera que pueden establecerse los puntos de parada en función de la situación real del tren en la línea. La seguridad del sistema se basa en el cantón móvil definido por el tren.

El sistema CBTC de SIEMENS permite la circulación de trenes con una distancia de seguridad variable entre los mismos, en función de la infraestructura y la velocidad de circulación. En las pruebas efectuadas en la Línea 9 del Metro de Barcelona, se han conseguido circulaciones con distancias de separación de un mínimo de 50 m. entre trenes.

La capacidad del sistema de señalización DIMETRONIC de Línea 2 es de 22 trenes con un intervalo de 2'44". En caso de instalarse el sistema CBTC de SIEMENS la capacidad viene marcada por el número de trenes disponibles y la infraestructura, pudiendo doblar la cifra a 44 trenes sin problema. Respecto al intervalo, está condicionado al tiempo de vuelta en los finales, garantizando el producto TG MT CBTC de SIEMENS en 90" si las condiciones de contorno lo permiten (infraestructura de la vía y número de trenes).

8.5 Costes

La flexibilidad y la autonomía del sistema permiten reducir costes operativos, sobre todo de personal de conducción, que no ha de permanecer ocioso mientras espera la hora punta para conducir un tren. Los agentes polivalentes pueden ser reasignados a otras tareas, aportando valor añadido de servicio al cliente.

Los maniobreros en los finales también desaparecen, puesto demasiado estresante para el trabajador y costoso para la compañía.

Durante las horas de poca actividad, los trenes pueden retirarse automáticamente y aparcarse en las zonas de garaje. El reajuste del personal no condiciona el hecho de tener que mantener un tren en circulación porque el perfil del agente es de motorista. Un motorista es un agente con funciones exclusivas de conducción de trenes. Es irónico que se deba mantener un tren circulando cuando la demanda no lo requiere sólo porque el perfil del empleado es el de motorista. El consumo eléctrico de un tren en stand-by es insignificante comparado con el consumo eléctrico cuando está en circulación.

El nuevo sistema también reduce costes en el mantenimiento. La reingeniería de señalización para Línea 2 es la siguiente:

- Eliminación de 44 circuitos de vía, una reducción del 26%.
- Eliminación de 83 señales luminosas de circulación (SC) y de maniobra (LM).
- Eliminación de las balizas ATO en vía y equipos en cabina (EVCE y EVSE).
- Eliminación del sistema de Regulación del Tráfico (RDT).

La reducción de circuitos de vía es especialmente importante, ya que un fallo del mismo tiene impacto en la circulación y obliga a una inspección visual de la vía. Como dato orientativo, el Plan de Mantenimiento de Línea 9 asigna 415 h. de técnico especialista para 119 CV, prácticamente 4 h. para realizar el mantenimiento preventivo del un CV. La inspección se realiza en parejas de dos técnicos, uno en vía y otro en cabina. Las horas de trabajo nocturno son escasas, ya que la explotación en jornada laboral finaliza a las 12:00 h., no autorizándose el corte de tensión para bajar a vía hasta la 1:00 h. aproximadamente. A las 4:00 h. todo el personal técnico ha de estar fuera de la vía, para preparar los trenes y activar la tensión de catenaria, con el objetivo de iniciar el servicio comercial a las 5:00 h. El margen del horario laboral nocturno se reduce a 3 h. Eliminando los viernes por la noche, que TMB cierra sus puertas al público a las 2:00 h. y el sábado que hay non-stop, sólo quedan 5 noches para trabajar, de las cuales normalmente 1 se dedica a trabajos con prolongación de tensión y circulación de trenes.

En resumen, 12 h. semanales para poder hacer el mantenimiento de 6 circuitos de vía a lo sumo. Eliminando 44 CV se liberan 176 h. de técnico especialista, 88 h. de una pareja de técnicos, más de 3 semanas que pueden dedicarse a otras tareas.

El sistema CBTC supone un ahorro evidente de los costes operativos, pero no tanto de los de mantenimiento. El esfuerzo en este sentido para cada uno de los nuevos equipos es el siguiente:

- Balizas en vía: elementos pasivos, no requieren apenas de mantenimiento.
- Bases de radio: deben ser introducidas en el Plan de Mantenimiento.
- ZC: el check-list preventivo se hace en paralelo al del WESTRACE, supone un mínimo esfuerzo extra por parte del técnico.
- WCC: el check-list preventivo se hace en paralelo al del WESTRACE, supone un mínimo esfuerzo extra por parte del técnico.

- CC: debe ser incluido en el Plan de Mantenimiento de tren, antes ATC-D DIMETRONIC y ahora ATC-S SIEMENS (incluye OBCU's y CRE's).
- ATS: supone el mismo esfuerzo que el del telemando de tráfico de TELVENT actual de Línea 2.

El esfuerzo adicional para mantener el sistema de señalización es mínimo a nivel de tiempo y costes. En cambio, el subsistema de puertas de andén si requiere de un Plan de Mantenimiento específico, que orientativamente tiene un coste anual de 25.000 € por andén. La valoración de esta cifra hay que hacerla considerando varios factores, pues aunque sí que es un gasto adicional para la compañía, supone un aumento de la seguridad y una mejora de la eficiencia energética en la climatización de andenes.

8.6 Oportunidad de negocio

Vivimos en un mercado globalizado, en el que el poder de las TIC ha ampliado la red de negocio de las empresas más allá de sus fronteras y en el que competidores externos pueden acceder a los territorios nacionales fácilmente. TMB no es ajeno a esta realidad, como operador ha de mantener una imagen de seguridad, fiabilidad y calidad en el servicio, pues conservar la licencia de operación en Metro de Barcelona depende del buen funcionamiento de la compañía según estos criterios. Adoptar una tecnología CBTC en Línea 9 e incorporarla ahora en Línea 2 contribuiría a mantener y mejorar estos ratios, reforzando las barreras de entrada para otros operadores que pretendan conseguir la licencia en la red (RENFE, FGC, Metro de Madrid, etc.).

TMB forma parte de la Unión Internacional del Transporte Público (UITP), organización formada en 1885 y que agrupa a los diferentes operadores de transporte público mundiales. La UITP agrupa a 3400 miembros de 92 países diferentes²⁷. Los objetivos de esta organización son muy diversos, entre ellos podemos destacar:

- Homogeneización de procesos entre operadores.
- Establecer estándares técnicos.
- Compartir know-how de las diferentes áreas.
- Convocar congresos y ferias, próximamente el International Transport Forum en Leipzig, Alemania, del 2 al 4 de Mayo de 2012.
- Promover criterios de eficiencia y sostenibilidad en el sector.

Dentro de la UITP se ha creado el Observatorio de Metros Automáticos (OMA) impulsado por TMB. El objetivo de este grupo es trabajar los aspectos específicos de las líneas automáticas con tecnología CBTC, impulsando la evolución de los sistemas de señalización tradicionales a los automáticos, aprovechando todas las ventajas operativas que éstos aportan.

TMB no sólo refuerza el mercado interno con la tecnología CBTC, sino que mejora su imagen corporativa de cara al exterior y se posiciona como empresa líder en la vanguardia tecnológica. El hecho de que la imagen de TMB se asocie a unos valores de calidad, eficiencia e innovación es muy importante a la hora de entrar en nuevos mercados.

Recientemente, TMB ha recibido la visita de Metro de Moscú dentro del marco de cooperación de la UITP, con el objetivo de conocer la Línea 9, equipada con CBTC, y valorar in situ las ventajas de esta nueva tecnología. Esta visita puede derivar en un contrato externos para personal técnico y operativo de TMB especializado en el sistema CBTC (Proyectos, Mantenimiento y Operación). Así ha ocurrido, por ejemplo, con la Línea 1 de Metro de Panamá. En dicha ciudad se está construyendo la primera línea de Metro del país, tecnología CBTC de ALSTOM. TMB trabaja en labores de consultoría y asesoramiento en las áreas de señalización, seguridad y operación. Esta colaboración permitirá a Metro de Panamá implantar un sistema seguro y eficaz, minimizando costes adicionales y aprendiendo de la experiencia de una empresa operadora como TMB.

²⁷ Información extraída de la página web oficial de la UITP <http://www.uitp.org/>.

En la situación de crisis actual, en que la inversión en nuevas infraestructuras ferroviarias es mínima, el hecho de que TMB esté presente en Panamá, Argelia o Portugal, es vital para poder seguir creciendo como empresa y conseguir unos ingresos extra, gracias a una red de negocio extendida.

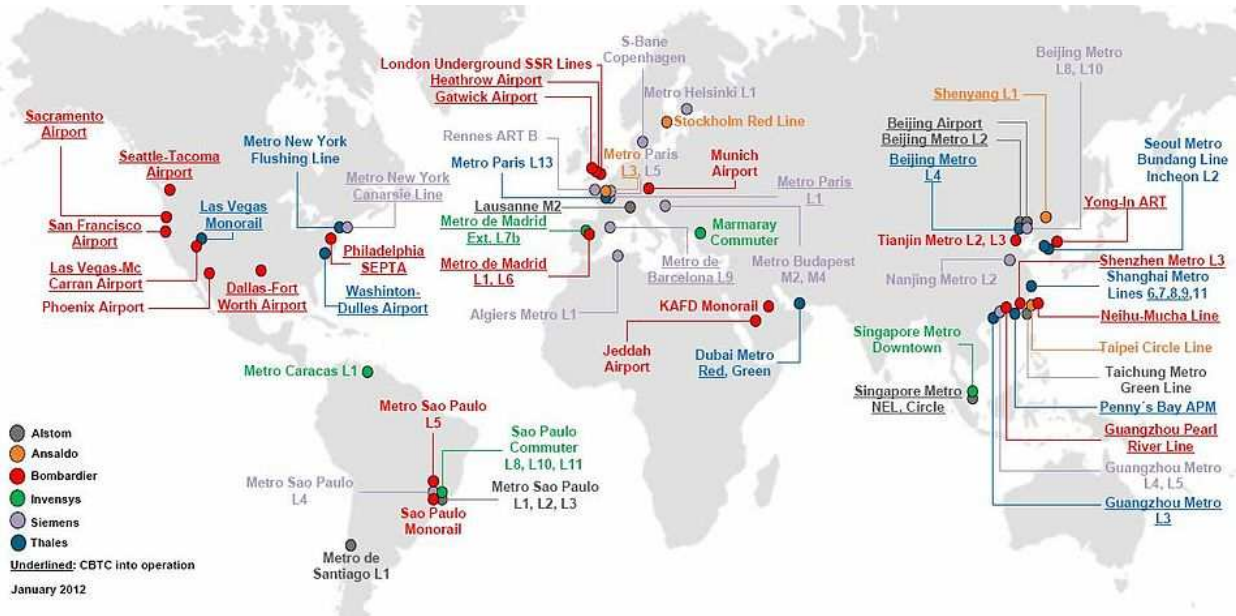






Fig. 192 Proyectos CBTC en el mundo, subrayados en servicio comercial.

Imagen: http://es.wikipedia.org/wiki/sistema_CBTC.

8.7 Matriz DAFO

AMENAZAS	OPORTUNIDADES
 <ul style="list-style-type: none"> • Pay-back no destacable: imposible justificar la inversión inicial en las nuevas instalaciones CBTC (balizas, ZC, WCC, red de radio, ATS y embarcado). • Poca inversión disponible a nivel estatal para poder llevar a cabo el proyecto o ejecutar posibles modificados en el futuro. <ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de estanqueidad de andenes: cerramientos de puertas de andén que encarecen el precio global. • Disminución de las subvenciones al transporte que provoquen el encarecimiento de los precios en los billetes. • Riesgo de empeorar la imagen corporativa de TMB ante los competidores directos (FGC, RENFE, etc.). • Mercado CBTC competitivo: difícil penetrar a nivel mundial y expandir red de negocio. • Falta de normativa en la explotación de una línea automática: riesgos nuevos y desconocidos. • Liberalización del transporte metropolitano: licencias a nuevos explotadores en un futuro próximo. 	 <ul style="list-style-type: none"> • Conducción automática de los trenes: posibilidades de reasignación de tareas y ahorro en costes. • Mejora de la salud: disminución del stress y de problemas médicos en conductores y maniobreros. <ul style="list-style-type: none"> • Reasignación de las tareas de los empleados aportando valor añadido: apoyo técnico y atención a los pasajeros. • Eliminación de problemas de reordenamiento de personal. • No exclusión de personal polivalente por ergonomía en el puesto de conducción. • Andenes estancos: posibilidad de climatización y aumento de eficiencia energética. • Ahorro de costes de energía de hasta un 10%. • Nuevas funcionalidades permitidas por la mejora tecnológica: radio WiFi y red TCP/IP. • Satisfacción del cliente. • Posicionamiento de la compañía en el exterior: TMB como referencia de la vanguardia tecnológica. • Barreras de entrada a operadores nacionales. • Oportunidad de negocio en el extranjero: contratos de colaboración, consultoría y auditoría. • Apertura de nuevos mercados.
 <ul style="list-style-type: none"> • Riesgos en el traspaso al nuevo sistema: asegurar no impacto en el servicio comercial. • Entender los beneficios a nivel de operación, innovación y posicionamiento. • Inexperiencia en asumir la operación y mantenimiento del nuevo sistema. <ul style="list-style-type: none"> • Cambio de roles y funciones operativas: agentes de circulación en campo y operadores en Puesto de Control • Nuevos equipos en producción: necesidad de mantenimiento eficaz para garantizar la disponibilidad del sistema. • Asumir costes de mantenimiento de los nuevos equipos: necesidad de extender el período de garantía de los fabricantes o subcontratar el segundo nivel. • Diseño de un Plan de Formación adecuado. • Red de radio en túnel: primera experiencia en TMB. • Integración entre todos los subsistemas. • No saber aprovechar todas las ventajas que aporta el sistema CBTC. • Incapacidad de rentabilizar la inversión. • Incluir conceptos como innovación y tecnología punta en la imagen de marca TMB. • Necesidad de una política de promoción y comunicación adecuada enfocada al usuario. • No saber crecer hacia nuevos mercados. • Rediseño inadecuado de la red de negocio. 	 <ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la flexibilidad operativa: respuesta ágil a la demanda de tráfico variable en el tiempo. • Adaptación a la demanda variable sin impacto en la plantilla: no es necesario tener conductores de retén ni reordenar personal según horas del día <ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la calidad de servicio. • Conducción automática mejora la seguridad al evitar fallos humanos: accidentales o intencionados. • Bajo coste marginal en las horas de poca actividad: ahorro energético de trenes en stand-by y motoristas de retén. • Reducción de costes operativos: ausencia de maniobreros y conductores. • Reducción de costes de mantenimiento: disminución del 26% de circuitos de vía, desinstalación del 100% de las señales, equipos ATO y subsistema RDT. • Aprovechar mejor el tiempo nocturno de mantenimiento. • Mejora de ergonomía de explotación: disponibilidad total de servicios parciales, lanzaderas y VUT. ATS permite cambiar rápidamente de servicio nominal a parcial, disminuyendo impacto en la operación y en el pasaje. • Regulación automática ATS: optimización y confort. • Andenes cerrados con puertas de andén: aumento de la seguridad. • Aumento de la capacidad del sistema. • Disminución del intervalo a 90" dependiendo de la infraestructura. • Know-how de equipos de señalización actuales que son reaprovechados.

DEBILIDADES

FUERZAS

9 CONCLUSIONES

La principal conclusión demostrada por la presente tesis es la confirmación de la viabilidad técnica de sustituir el actual sistema de señalización ferroviaria de Línea 2, basado en cantonamiento fijo, por un sistema de señalización automática, basado en cantonamiento móvil.

El sistema de señalización convencional de Línea 2 suministrado por la empresa DIMETRONIC, garantiza las funcionalidades ATP/ATO y presenta un nivel de automatización GoA 2, esto es, requiere de conductor embarcado. El sistema de señalización automática CBTC al que se pretende evolucionar, garantiza igualmente las funcionalidades ATP/ATO, integrándolas en el sistema global CBTC e incorporando nuevas funcionalidades que aportan mayor flexibilidad, capacidad y ergonomía de explotación. El nivel de automatización de la tecnología CBTC de SIEMENS es GoA 4, sin necesidad de conductor embarcado y con un control remoto de los trenes desde el Puesto de Control Central (PCC).

La reingeniería de señalización realizada sobre el actual sistema de DIMETRONIC ha dado como resultado la eliminación de equipos que no son necesarios en la nueva tecnología CBTC, tales como las señales luminosas, el balizamiento y equipos ATO en cabina o el subsistema de Regulación del Tráfico (RDT). Asimismo, también se eliminan 2 enclavamientos WESTRACE y se redefinen sus funciones vitales, que pierden protagonismo y pasan a controlar las zonas de agujas, asegurando el establecimiento de itinerarios a petición del Zone Controller (ZC). Por último, se reduce un 26% la cantidad de circuitos de vía, que pasan a ejercer un papel secundario de detección en caso de modo degradado (tren sin radio embarcada).

La reducción del número de equipos del actual sistema de señalización supone un ahorro en costes de mantenimiento y una disminución del riesgo de averías. Además, el hecho de poder reaprovechar gran parte de estos equipos para el nuevo sistema CBTC tiene dos aspectos positivos muy destacables: el ahorro en costes de implantación y el know-how por parte de TMB, tanto a nivel de operación como de mantenimiento.

No obstante, la tecnología CBTC de SIEMENS, requiere de la implantación de equipamiento propio, que implica unos costes de mantenimiento y un proceso de asimilación del sistema por parte de todas las áreas de TMB. En vía se incorporan principalmente balizas de localización y bases de radio. En salas técnicas aparece el Zone Controller (ZC), encargado de la lógica de señalización y seguridad del sistema, y el Wayside Cell Controller (WCC), controlador de todas las bases de radio que se comunican constantemente con los trenes de la línea.

El actual telemando de tráfico de Línea 2, suministrado por TELVENT, es eliminado y sus funciones se integran dentro del subsistema ATS, parte del CBTC. El ATS optimiza las funcionalidades del telemando, incorpora la regulación horaria y gestiona el establecimiento de itinerarios de manera automática, descargando de trabajo a los operadores.

En cualquier caso, no se puede afirmar que exista un ahorro significativo de costes de mantenimiento con el nuevo sistema CBTC. En cambio, sí que podemos encontrar un ahorro gracias a la flexibilidad operativa que aporta el sistema, capaz de adaptarse a una demanda de tráfico variable en el tiempo y por tanto disminuir el coste marginal en las horas de poca actividad (energía y personal). Además, la introducción de parámetros de eficiencia en los modos de marcha, con la aplicación de derivas para disminuir el esfuerzo de tracción y frenado puede suponer un ahorro energético de hasta un 10%, contribuyendo asimismo a la sostenibilidad y eficacia medioambiental.

Independientemente del ahorro que pudiera suponer la implantación del CBTC, que no es significativo en cuanto a retorno de la inversión inicial (pay-back), sí que es importante destacar la mejora que supone en cuanto a oferta al cliente, imagen de marca y oportunidad de negocio.

Parte del trazado de Línea 2 transcurre por el centro de Barcelona, con estaciones emblemáticas como Universitat, Passeig de Gràcia o Sagrada Família que son de las más frecuentadas por turistas y residentes. El CBTC permite aumentar la capacidad de la línea, es decir, introducir un mayor número de trenes, hasta lograr un intervalo de 90 segundos entre trenes si la infraestructura lo permite, optimizando los casi 3 minutos del actual sistema de señalización y mejorando la oferta en la zona centro, la de mayor demanda de la ciudad.

El ATS permite además una gestión más eficaz de los modos degradados que se han de establecer en caso de incidencia en la línea, disminuyendo el impacto operativo en la circulación y normalizándola rápidamente. Esto repercute en la mejora de la imagen de marca de TMB, que se posiciona ante el cliente local como una empresa de transportes eficaz, puntual y seria.

La imagen de marca de TMB no solo beneficia a la propia empresa, estableciendo barreras de entrada a otros explotadores, sino que repercute positivamente en la marca Barcelona, que exteriormente se percibe como una ciudad puntera en tecnología. El hecho de que no haya personal embarcado en los trenes sorprende gratamente a los visitantes, dando una imagen de modernidad y vanguardismo.

Por último, es necesario destacar la oportunidad de negocio que supone la incorporación del CBTC en Línea 2, ampliando la red automática iniciada con la Línea 9 y 10. Nuevos proyectos de consultoría y colaboración en el extranjero, como Metro de Panamá o Metro de Argelia, permiten a TMB crecer como empresa y ampliar la red de negocio, pudiendo diversificar ingresos y ser más sólida como organización.

Es evidente el salto cualitativo y la apuesta de futuro que supone la evolución de Línea 2 a un sistema de señalización automática CBTC, siendo innegables las mejoras que introduce en los aspectos señalados anteriormente. Pero el hecho de que se haya demostrado la viabilidad técnica del proyecto y los beneficios que aporta no justifica necesariamente la inversión que supone la obra. Sería necesario efectuar un estudio de la demanda de transporte actual y futura en la ciudad de Barcelona, especialmente en Línea 2, considerando factores antropológicos, sociales y económicos, que respalden las mejoras técnicas y operativas del CBTC y justifiquen la inversión de cara al ciudadano, que es al final quién financia la obra y quién ha de ver satisfechas sus necesidades de transporte.

10 BIBLIOGRAFÍA

Reglament de circulació. Ferrocarril Metropolità de Barcelona, S.A. Transports Metropolitans de Barcelona. Diciembre de 2009.

Principios básicos de señalización ferroviaria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. José Manuel Mera y Carlos Mera. Marzo de 2003.

Señalización ferroviaria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. Marzo de 2006.

Curso de ferrocarriles. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. 2005.

Projecte i obra del ATS, senyalització i PCC de la Línia 9 del Metro de Barcelona. Generalitat de Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques. Direcció General de Ports i Transports. C. Chauvet y R. Sánchez Rebollo. UTE SIEMENS – DIMETRONIC. Marzo de 2004.

Curso circuitos de vía sin juntas FS-2k y FS-5k para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A. Marzo de 2007.

Sistema de circuitos de vía FS2550. Descripción del equipo. DIMETRONIC S.A. Ed. 4. Mayo de 1999.

Manual de Descripción del Sistema. Sección 1: Introducción. DIMETRONIC S.A. Ed. 4. Mayo de 1999.

Descripción general MD-2000. DIMETRONIC S.A. Ed. 1. Junio de 1998.

Descripción técnica foco LED LD-120-P. Referencia D2041. Ed. 02 Electrosistemas Bach S.A. Noviembre de 2006.

Catálogo anual ELECTTRANS. Electrosistemas Bach S.A. Febrero de 2008.

Introducción al WESTRACE v1.0. Documentación técnica para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A. Marzo de 2000.

Sesión informativa. Modificaciones Hardware EVILOCK950. Ampliación Línea 3 de Metro de Barcelona. BOMBARDIER S.A. Octubre de 2008.

Manual de Mantenimiento WESTRACE versión 4.2. DIMETRONIC S.A. Junio de 2007.

Optimización energética de marchas ATO de trenes metropolitanos. Área de sistemas ferroviarios. Instituto de Investigación Tecnológica. Universidad Pontificia ICAI – ICADE de Comillas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Madrid. Antonio Fernández y Paloma Cucala. Julio de 2010.

Curso ATO Vía para Metro de Barcelona. DIMETRONIC S.A. Marzo de 2006.

Manual descriptivo de componentes. Metro de Barcelona Serie 9000. ALSTOM MDC-Vol.1 General. Enero de 2007.

Descripción general del sistema CBTC. Módulo GEN-T1. SIEMENS Transportations Systems S.A. Mayo de 2008.

Zone Controller. Maintenance Training. GEN-T1 Module. SIEMENS Transportations Systems S.A. Mayo de 2008.

Wayside Cell Controller. Maintenance Training. GEN-T1 Module. SIEMENS Transportations Systems S.A. Mayo de 2008.

Wayside Radio Equipment. Maintenance Training. GEN-T1 Module. SIEMENS Transportations Systems S.A. Mayo de 2008.

Descripción de las consolas ATS. OATS-T3 Module. SIEMENS Transportations Systems S.A. Mayo de 2008.