



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es

Aranzazu Berbey Alvarez

TRABAJO FIN DE TITULACIÓN

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE TITULACIÓN

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DEL CBTC DEL MODELO CONVENCIONAL AL AUTÓNOMO GOA4 PARA EL CBTC DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE PANAMÁ



TRABAJO FIN DE TITULACIÓN

CURSO ESPECIALISTA EN
CONTROL, MANDO Y
SEÑALIZACIÓN

Marzo 2025

Aranzazu Berbey Alvarez

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:
Juan de Dios Sanz Bobi



Universidad Politécnica de Madrid

TRABAJO FIN DE TITULACIÓN

**CURSO ESPECIALISTA EN CONTROL, MANDO Y
SEÑALIZACIÓN**

**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DEL CBTC
DEL MODELO CONVENCIONAL
AL AUTÓNOMO GOA4 PARA EL CBTC DE
LA LÍNEA 2 DEL METRO DE PANAMÁ**

ALUMNA

Aranzazu Berbey-Alvarez

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:

Juan de Dios Sanz Bobi

Marzo, 2025

DEDICATORIA Y CITA CIENTÍFICA

A Dios por permitirme realizar esta obra científica, y a la memoria de mi madre, Doña Encarnación de las Mercedes Álvarez Alfonso (q.e.p.d), dama ejemplar y tronco de familia.



Tu hija, Arancha

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa su agradecimiento al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid (España) y muy especialmente al Dr. Juan de Dios Sanz Bobi por el otorgamiento de una beca para cursar los estudios de este programa.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de fin de titulación (TFT) es satisfacer los requisitos del programa de postgrado de titulación propia E.05.D420.01 - CONTROL, MANDO Y SEÑALIZACIÓN FERROVIARIAS. Este TFT orientado a la aplicación de las competencias generales asociadas a la titulación de postgrado de titulación propia E.05.D420.01 - CONTROL, MANDO Y SEÑALIZACIÓN FERROVIARIAS con el propósito de integrar y desarrollar la formación, capacidades y habilidades adquiridas para realizar un análisis de la capacidad del CBTC del modelo convencional al autónomo GoA4 para el CBTC aplicadas al contexto de la línea 2 del Metro de Panamá. Se añade que la caracterización de la línea 2 del Metro de Panamá constituye una herramienta didáctica para los cursos de ingeniería, diplomados y postgrado de la Universidad Tecnológica de Panamá.

Palabras clave: ingeniería ferroviaria, señalización y control de trenes, Metro de Panamá.

Códigos de la UNESCO: 3323 tecnologías de los ferrocarriles, 3323.02 Equipo ferroviario y 3323.03 Servicio del ferrocarril.

INDICE

Contenido	Página
1. Introducción	6
2. Descripción de la línea 2 del Metro de Panamá	8
3. Metodología	34
4. Resultados y discusión	59
5. Conclusiones	64
6. Líneas futuras	56
7. Bibliografía	66
8. Índice de figuras	77
9. Índice de tablas	78
10. Abreviaturas, unidades y acrónimos	79
11. Glosario	81

1.INTRODUCCIÓN

De acuerdo al Metro de Panamá [1] en la tabla 1 se presentan las normas relativas a la seguridad aplicadas en el enclavamiento electrónico y el sistema de control de tren para la línea 2 del Metro de Panamá, las cuales son:

Tabla 1. Normas de seguridad[1]

Código	Título de la norma o especificación
EN-50126:	Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la 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.
FIPS 140-2	Exigencias de seguridad para módulos criptográficos
FIPS 140-2.2	Codificación de datos basado en autenticación
IEC 15408	Information technology security
IEC 61508	Seguridad funcional de equipos electrónicos (Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic), Integridad de seguridad Nivel 4 según IEC 61508 Fiabilidad > 99,99% / o SIL 4 probabilidad de falla << 1/10'000
IEC 62290-1	Railway applications – urban guided transport management and command/control systems
IEEE 1473-L	Bus de transmisión de datos a bordo
IEEE 1474-1	IEEE Standard for communications based train control (CBTC) - Performance and functional requirements
IEEE 1472-2 IEEE	Standard for user interface requirements in communications based train control (CBTC) systems
IEEE 1472-3	IEEE Recommended practice for communications based train control (CBTC) System design and functional allocations
IEEE 802.11	WIFI - Red inalámbrica ISO
ISO	ISO Reference Model

Con respecto a la línea 2 del Metro de Panamá, el sistema de señalización y control de trenes está constituido por los siguientes subsistemas:

- Sistema de control de trenes basado en comunicaciones de radio (CBTC).
- Sistema de supervisión automática de trenes (ATS).
- Sistema de apoyo al mantenimiento (MSS).
- Sistema semi-automático de operación de trenes (STO).

La definición adoptada y utilizada por el Metro de Panamá con respecto al concepto de grado de automatización es: «*nivel de automatización para la explotación del tren resultante del reparto de la responsabilidad de las funciones básicas para la explotación del tren entre el personal de explotación y el sistema técnico*»[2]

Las premisas de operación del sistema de señalización y control de trenes para la línea 2 del Metro de Panamá son:

La línea 2 del metro de Panamá cuenta para su fase de operación con un sistema GOA 2, es decir, los trenes serán operados, en modo nominal, por el sistema ATC con protección total del ATP y mediante el ATO; siendo la apertura de puertas habilitada y autorizada por el ATP pero solicitada, para cada puerta, por los pasajeros (no obstante, el conductor también tendrá potestad para abrir todas las puertas de tren una vez se haya autorizado por el ATP) y el cierre de las mismas y la salida del tren son controlados por el conductor. Además, los conductores interactuarán con el sistema monitoreando el funcionamiento correcto de las puertas de los trenes, una vez estos se encuentren en la estación, reaccionando ante incidentes ocurridos en el andén, anunciando información a los pasajeros, realizando los cambios de vías en los extremos en las estaciones terminales y eligiendo el modo adecuado de conducción de los trenes.

La transmisión de los datos para la operación se realiza a través de un sistema WIFI, o similar (pudiendo estar basado en tecnología LTE), ampliamente probado en el sector ferroviario, y más concretamente en metro. El flujo de los datos es redundante y ser seguro contra ataques externos, interferencias y fallas de la transmisión. Este sistema de transmisión debe tener y mantener los medios necesarios para impedir el acceso de agentes externos al sistema de transmisión de datos.

- El principio para la operación ferroviaria es: Un tren avanza, si el enclavamiento le asigna un itinerario exclusivo, que esté fijado y bloqueado, y determinado por un perfil de velocidad de acuerdo con la orden de regulación recibida del ATS; y además tiene asignado un límite de movimiento *moving authority* lo que se conoce en el argot ferroviario como autorización de movimiento).
- En primera instancia, la localización y relocalización del tren se determina mediante balizas instaladas a lo largo de toda la línea en la vía, las cuales son un sistema de posicionamiento de los trenes.
- Por otra parte la posición precisa de los trenes se hace con odometría a bordo del tren por medio de contadores de revoluciones de las ruedas (SIL-4). (Ver glosario)
- La línea 2 de la Metro de Panamá cuenta con un sistema secundario de detección de presencia de trenes como sistema de respaldo para la localización de trenes, sin cortes de de los carriles. Esto hace posible la generación de cantones de distintas longitudes (mayores en tramos en interestación, y menores en zonas de agujas, andenes y cualquier otra área singular de la línea). Este sistema también permite localizar trenes auxiliares o cualquier otro material o equipamiento con ruedas metálicas que pueda circular por las vías y mejorar la explotación en situaciones degradadas.
- La línea 2 de la Metro de Panamá cuenta con un sistema de tipo ATP (*automatic train protection*) a bordo del tren, el cual permite detener un tren en caso de violación de una restricción en la vía o si la velocidad detectada supera la máxima velocidad establecida en ese tramo de la vía férrea.
- Las maniobras de ingreso al patio desde la línea principal hasta la posición de estacionamiento son, en operación nominal, en modo automático, pero de manera que no se circule a una velocidad mayor a los 25 km/h en toda el área de patio y talleres.

- Las maniobras de salida y entrada del estacionamiento se rigen según lo establecido en los criterios de “Iniciación/apagado de los trenes bajo CBTC”.
- Todas las maniobras dentro del patio deben ser a una velocidad limitada de 25 km/hora independientemente del modo de operación (nominal o degradada), exceptuando aquellas en la vía de pruebas.

La norma UNE-EN 13816 titulada: Transporte. Logística y servicios. Transporte público de pasajeros. Definición de la calidad del servicio, objetivos y mediciones, *«especifica los requisitos para definir, establecer objetivos y realizar mediciones de la calidad del servicio en el transporte público de pasajeros (TPP), y proporciona las directrices para la selección de los métodos de medición correspondientes»*[3]. Existen en la literatura varios autores que han realizado publicaciones científicas sobre la gestión y la calidad de los servicios en el transporte ferroviario[4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16].

2. DESCRIPCIÓN DE LA LINEA 2 DEL METRO DE PANAMÁ

2.1 ANTECEDENTES

La Línea 2 inició operaciones el 25 de abril del 2019[17]. Los antecedentes corresponden a la descripción de la Línea 2 del Metro de Panamá con respecto a el diseño conceptual geométrico, los parámetros operacionales, estadísticas de la demanda de pasajeros, electrificación, sistemas de control y señalización de trenes y las características técnicas del material rodante. La línea 2 del metro de Panamá es una vía en placa en toda la línea salvo en la zona de patio y talleres, donde se encuentra sobre balasto; además la línea esta electrificada.

2.1.1 Diseño conceptual geométrico

La línea 2 del Metro de Panamá tiene doble vía con ancho de vía internacional de 1,435 mm [18], se trata de una doble vía elevada sin cruces a nivel, con circulación a la derecha[19], con cambiavías que permiten la operación parcial en modo degradado y señalización que garantizará un intervalo de trenes, en función de la demanda de usuarios[18]. Los rieles son tipo UIC54 E1 (54 Kg/m) en la vía principal y en los Patios y Talleres[18][20] y con un valor de dureza comprendido en el intervalo 260-300 HB y una resistencia a la tracción de al menos 880N/mm²[19]. La superestructura de las vías principales es sin balasto y está formada por rieles 54E1 y fijaciones elásticas fijadas sobre las vigas del viaducto[19].

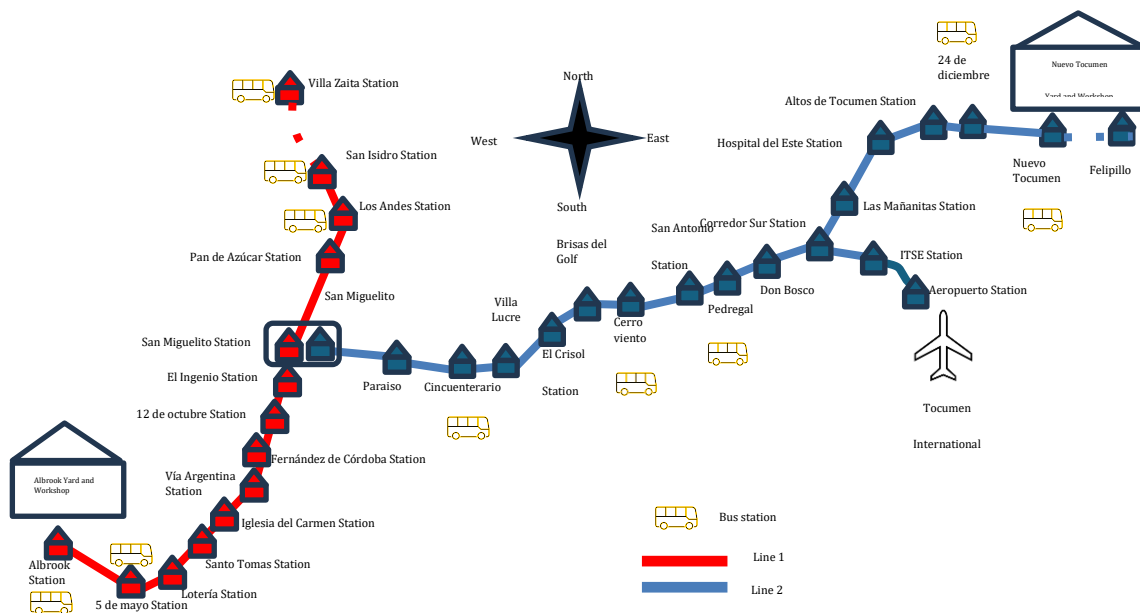


Figura 1. Red del Metro de Panamá (Línea 1 y 2). Fuente: Berbey-Alvarez (2023)

En su primera etapa, la Línea 2 tiene una longitud de 21 kilómetros[18][19] de vía elevada y cuenta con 16 estaciones, ubicadas en los puntos de mayor concentración de usuarios como San Miguelito (conexión con la línea 1), Paraíso, cruce con la Vía Cincuentenario, las

urbanizaciones Villa Lucre, Brisas del Golf, los centros comerciales Los Pueblos y Metromall; Urbanización San Antonio, El Parador en el corregimiento de Pedregal, Urbanización Don Bosco, la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), Las Mañanitas, Hospital del Este, Altos de Tocumen, el centro comercial La Doña ubicado en el sector de la 24 de Diciembre y la comunidad de Nuevo Tocumen. Todas las estaciones son elevadas[18][21]. En todas las estaciones hay paradas de buses y taxis[22]. La pendiente máxima es de 35mm[18]. A continuación, la tabla 2 presenta los parámetros operativos de la vía para la línea 2 del Metro de Panamá.

Tabla 2. Parámetros de la vía

Parámetros	Valor
Ancho de vía [19]	1435 mm
Mínimo radio de curva en sentido horizontal en Patios y Talleres	90m
Mínimo radio de curva en sentido horizontal en línea	300 m
Mínimo radio de curva vertical	3000 m
Máximo peralte de rieles	150 mm
Tipo de riel (R260)	54E1
Máxima Pendiente	30/1000
Altura de las plataformas de estaciones, desde la cabeza de riel	1100 m
Distancia del centro de la vía al borde del andén (referencia Línea 1)	1545 mm
Voltaje de catenaria	1500 vc
Altura del piso del tren desde la cabeza del riel	1150 mm
Altura mínima del hilo de contacto de catenaria desde la cabeza del riel. En Línea, Estaciones. Patios y Talleres	4200 mm
Altura máxima del hilo de contacto de catenaria desde la cabeza del riel. En Línea y Estaciones	5500 mm
Altura máxima del hilo de contacto de catenaria desde la cabeza del riel. En Patios y Talleres	6000 mm
Entrevía mínima: 3,300 mm	3300 mm
Radio mínimo en planta	300 m
Parámetro mínimo de acuerdo vertical:	2000 m
Peralte máximo	150 mm
Velocidad de diseño en patio [19]	15 km /h
Velocidad de diseño en talleres[19]	5 km/h
Carga por eje estático	13,5 toneladas
Máxima aceleración transversal no compensada aceptable[19]	0.65 m/s ²
Máxima aceleración transversal no compensada excepcional[19]	0.85 m/s ²
Máxima insuficiencia de peralte aceptable[19]	100 mm
Máxima insuficiencia de peralte excepcional[19]	130 mm
Máxima variación de la aceleración transversal no compensada aceptable	0.20 m/s ³
Máxima variación de la aceleración transversal no compensada excepcional	30 mm/s
Máxima variación de la insuficiencia de peralte aceptable	55 mm/s
Máxima variación del ángulo de giro de vía aceptable	0.02 rad/s
Máxima variación del ángulo de giro de vía excepcional	0.033 rad/s
Radio mínimo aceptable (vía principal para el tramo elevado los radios de curvatura)	300 m

Radio mínimo excepcional (vía principal para el tramo elevado los radios de curvatura)	250 m
Radio mínimo de cambiavías	190 metros
Vías de estacionamiento de trenes serán rectas y con pendiente del 0%	0%
Máxima rampa de peralte aceptable:	1.50 mm/m.
Máxima rampa de peralte excepcional:	2.25 mm/m
Pendiente máxima aceptable	30 ‰ (tanto por mil)
Pendiente máxima excepcional[19]	35 ‰ (tanto por mil)
Aceleración vertical en acuerdos verticales en alzado	0.20 m/sg

El eje de infraestructura de doble vía de la Línea 2 del Metro de Panamá cuenta con 73 elementos. Estos elementos corresponden a tramos de vía recta, tramos de vía curva y tramos de vía clotoide. Estos elementos se distribuyen en 37 tramos de vía recta, 36 tramos de vía curva y 54 tramos de vía clotoide entre los km 0+567.719 y 23+174.904 (puntos kilométricos)2,3,4,5. La Tabla 3 muestra la vista en planta de los primeros 2956 kilómetros de la línea del Metro de Panamá, que tiene una longitud de 26 kilómetros. Esta tabla 3 presenta los elementos (recto, circular y clotoide) entre los km 0+564.719 y 2+956.569 a modo de ejemplo.

Tabla 3. Sección del diseño conceptual geométrico de la línea 2 del Metro de Panamá[23]

Item	Type	Length	Kilometer point	Radius
1	straight	82.933	0+564.719	
2	circular	35.415	0+648.652	1000
3	straight	155.558	0+684.067	
	clothoid	20	0+839.625	
4	circular	264.172	0+859.625	750
	clothoid	20	1+123.797	
5	straight	326.975	1+143.797	
	clothoid	65	1+470.772	
6	circular	240.44	1+535.772	310
	clothoid	65	1+776.212	
7	straight	885.315	1+841.212	
	clothoid	40	2+726.527	
8	circular	190.042	2+766.527	4000
	clothoid	40	2+956.569	

Este estudio cubrió la ruta completa desde la estación San Miguelito hasta la estación Nuevo Tocumen, ubicada en la Ciudad de Panamá en Panamá. La línea 2 del metro de Panamá tiene una longitud de 21 km (Figuras 1 y 2). Un total de 16 puntos numerados que representan las estaciones elevadas y las paradas de pasajeros en la línea 2 del Metro de Panamá se representan en la Figura 1, once (11) de estas estaciones elevadas están en la Avenida Domingo Díaz y las otras cinco (5) estaciones elevadas están en la Vía Panamericana, como se muestra en la figura x. Los nombres de las estaciones y paradas de pasajeros en el plano se muestran en la Figura 1a correspondiente a la descripción narrativa del trazado de la línea 2 del metro de Panamá, y el perfil de elevación-longitudinal, se presenta en la Figura 1b, de acuerdo con el diseño de ingeniería conceptual establecido en. Una superestructura ferroviaria es un conjunto estructural que comprende, entre otros, los siguientes: rieles, elementos de fijación de rieles y respaldo de losa (sistemas de vía sin balasto). La pendiente máxima y mínima de la Línea 2 del Metro de Panamá es de 35‰ y -34‰, respectivamente. Esta línea cuenta con 59 curvas verticales de hundimiento y cresta (véase la figura 2).

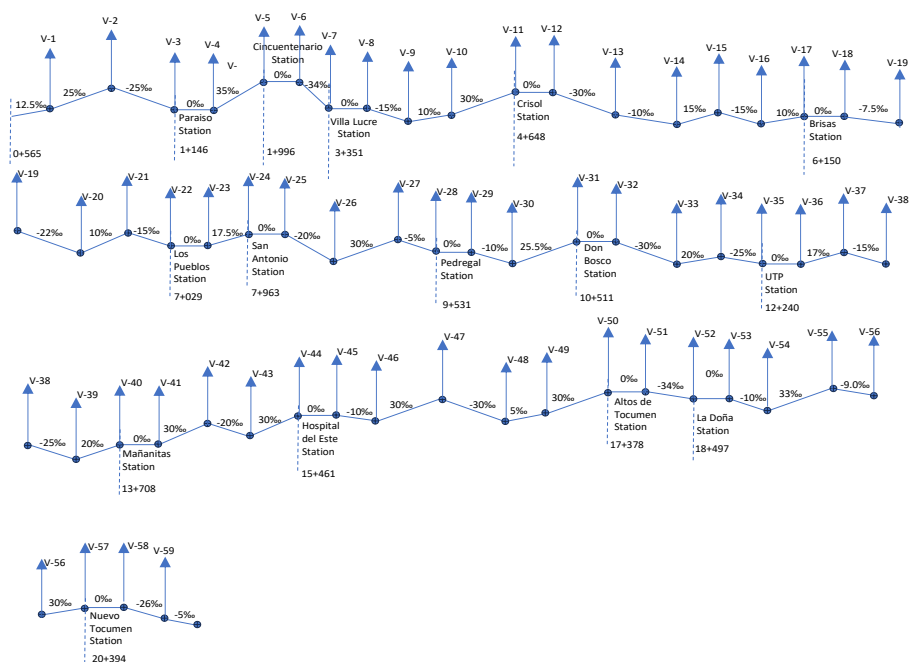


Figura 2. Perfil de la línea 2 de la Metro de Panamá

Los componentes químicos de los rieles les dan diferentes características físicas. El carbono incrementa la resistencia y la fragilidad, el manganeso la resistencia a la tracción y al desgaste, el silicio y el carbono facilitan la eliminación de gases en la elaboración, el cromo, vanadio y molibdeno incrementan la resistencia, el fósforo y el azufre hacen al metal frágil y propicio a roturas[19].

Con mayor cantidad de carbono se aumenta la dureza, y con la de manganeso la resistencia al desgaste. Una excesiva proporción de fósforo aumenta la fragilidad, pero favorece la resistencia al desgaste[19].

La tabla 4 presenta la composición química de los rieles R260 en estado sólido:

Tabla 4. composición química de los rieles UIC 54 R260

Componente	Porcentaje
Carbono	0.60 a 0.82
Manganeso	0.65 a 1.25
Silicio	0,13 a 0,60
Fósforo	<0.030
Azufre	<0.030

Fuente: Metro de Panamá[19]

Los sistemas de fijación soportarán las fuerzas verticales, transversales y longitudinales impuestas por el material rodante y transmitirán estos esfuerzos a las subestructuras con un mínimo de impacto, de vibraciones y de daño[19] y darán aislamiento eléctrico.

Los durmientes de concreto serán de tipo monoblock para vías sobre balasto y podrán soportar cargas hasta 18 ton por eje[19].

La distancia entre durmientes será de 60 centímetros. Los durmientes de concreto tendrán una longitud mínima de 2,500mm. La altura estará comprendida entre un mínimo de 180mm y un máximo de 250mm y el ancho entre un mínimo de 230mm y un máximo de 350mm[19]. El durmiente mono bloque estará formado por una sola pieza de concreto con presfuerzo de acero. La tabla 5 presenta aspectos de dimensiones y tolerancias de los durmientes.

Tabla 5. Dimensiones y tolerancias.

Parámetro	Valor
Longitud mínima	2,500mm
Tolerancia en longitud	4mm
Tolerancia en sección transversal (todas las direcciones)	3mm
Alineamiento (desviación de la línea prevista)	3mm
Perpendicularidad (desviación del ángulo recto):	1 en 300
Planicidad	2 mm por m
Posición de la armadura	15mm
Recubrimiento de la armadura	5mm

Fuente 1: Metro de Panamá[19]

2.1.2 Parámetros de operación

La Línea 2 del Metro tiene una capacidad para transportar 16 mil pasajeros por hora sentido y está diseñada para una capacidad al año horizonte de más de 40 mil pasajeros hora sentido[24]. El seguimiento y control mediante KPI: Actualmente el Metro de Panamá ejecuta medidas de control para mantener un máximo de 90% de pasajeros por tren como indicador de confort[25].

La tabla 6 presenta la oferta diaria de trenes, por franjas horarias en base a la demanda actual para la línea 2 y el ramal hacia el aeropuerto. La oferta diaria se encuentra dividida de acuerdo con los días laborables, sábados y días feriados.

Tabla 6. Oferta de la Línea 2 del Metro de Panamá más ramal (R) al aeropuerto.

Hora	Laborables	Sábados	Feridos
05:00 am	14 +1 R	12 +1R	8+1R
06:00 am	17+1 R	13 +1R	8+1R
07:00 am	17+1 R	13 +1R	8+1R
08:00 am	14+1 R	10 +1R	8+1R
09:00 am	11+1 R	10 +1R	8+1R
10:00 am	11+1 R	10 +1R	8+1R
11:00 am	11+1 R	10 +1R	8+1R
12:00 md	11+1 R	13 +1R	8+1R
01:00 pm	11+1 R	13 +1R	8+1R
02:00 pm	11+1 R	12 +1R	8+1R
03:00 pm	14+1 R	12 +1R	8+1R
04:00 pm	17+1 R	12 +1R	8+1R
05:00 pm	17+1 R	10 + 1R	8+1R
06:00 pm	15+1 R	10 + 1R	8+1R
07:00 pm	12+1 R	10 + 1R	8+1R
08:00 pm	12+1 R	7 +1R	8+1R
09:00 pm	9+1 R	7 +1R	7+1R
10:00 pm	7+1 R	7 +1R	7+1R
11:00 pm	7	-----	-----

Fuente: Memoria anual 2023 Metro de Panamá[25]

La tabla 7 presenta un análisis de medidas de tendencia central y diversión para los datos de la oferta de la línea 2 del Metro de Panamá

Tabla 7. Estadística descriptiva de la oferta de la Línea 2 del Metro de Panamá

Estadística descriptiva	Laborables	Sábados	Feridos
Media	13.47368421	11	8.421052632
Error típico	0.750705014	0.764719113	0.473359213
Mediana	13	11	9
Moda	12	11	9
Desviación estándar	3.272247292	3.333333333	2.063324972
Varianza de la muestra	10.70760234	11.11111111	4.257309942
Curtosis	-0.483938372	6.027617647	17.96905545
Coficiente de asimetría	-0.175278167	-2.132470588	-4.200235693
Rango	11	14	9
Mínimo	7	0	0
Máximo	18	14	9
Suma	256	209	160
Cuenta	19	19	19

Mayor (1)	18	14	9
Menor (1)	7	0	0
Nivel de confianza (95.0%)	1.577172709	1.606615239	0.994490803

Fuente: Elaboración propia de Berbey-Alvarez.

Tabla 8. Criterios de calidad de operaciones

Criterio	2023	2022	2021	2020
Cumplimiento promedio de la oferta programada de servicio	99.35 %	99.92%	99.82%	99.35%
Cumplimiento de la frecuencia promedio de paso de los trenes por las estaciones (intervalo)	92.50 %	92.63%	88.92%	92.50%

Fuente: Metro de Panamá[25], [26], [27], [28]

Como se indica en la tabla 8, el cumplimiento promedio de la oferta programada de servicio es un promedio 99.35%(2023), para la red de Metro, mientras que la frecuencia promedio de paso de los trenes por las estaciones (intervalo) se ha cumplido en un 92.50% (2023) en la red[25].

La tabla 9 presenta los parámetros de operación de la línea 2 del Metro de Panamá. Estos parámetros corresponden a velocidad máxima del material rodante, tiempo de parada en las estaciones, frecuencia en hora pica, frecuencia en hora valle, viajeros en hora pico, viajeros en hora valle, velocidad comercial entre otros aspectos clave tanto para la vía principal de la línea 2 como para el ramal al Aeropuerto Internacional de Tocumen de esta línea.

Tabla 9. Parámetros de operación de la línea 2 del Metro de Panamá

#	Parámetros	Línea 2	Ramal Línea 2 al aeropuerto
1	Tiempo por tramo[18][28][27][26]	San Miguelito-nuevo Tocumen 36:37 minutos (2023, 2022) 36:99 minutos (2021) 36:00 minutos (2020)	Corredor Sur-Aeropuerto Internacional de Tocumen 04:10 minutos
2	Tiempo de vuelta[27] [26]	1:12:06 (2023, 2022) 1:20:00 (2021) 1:20:00 (2020)	0:13:00
3	Velocidad máxima (material rodante)[2][28][29] [27] [26]	80 km/h	80 km/h
4	Tiempo de paradas en las estaciones[18][28][28] [27] [[26]	20-40 segundos	20-40 segundos
5	Velocidad comercial [18][30][28] [27]	35 km/h	35 km/h
6	Máximo de viajeros al día cobrando [25], [27], [28] [26]	192, 614 viajeros/día (2023) 179,471 viajeros/día (2022) 117,663 viajeros/día (2021) 161,858 viajeros/día (2020)	7423 viajeros/día (2023)
7	Trenes hora pica actual [25],	17	1

	[28][27]		
8	Viajeros en hora pico mañana actual [25], [28][27]	7624 viajeros/hora (2023) 11779 viajeros/hora (2022) 5987 viajeros/hora (2021)	468
9	Viajeros en hora pico tarde actual[25], [28]	7044 (2023) 13024 (2022)	490
10	Frecuencia en hora pico [25], [28][27] [26]	4:15 minutos (2023, 2022) 4: 45 minutos (2021) 4: 15 minutos (2020)	13 minutos
11	Trenes hora valle actual [25], [28][27] [26]	11(2023, 2022) 12 (2021) 12 (2020)	1
12	Frecuencia en hora valle[25], [28][27] [26]	6:40 minutos (2023) 6:00 minutos (2022) 6:00 minutos (2021) 6:06 minutos (2020)	15 minutos
13	Viajeros en hora valle actual [25], [28]	2888 viajeros/hora (2023) 6885 viajeros/hora (2022)	272 viajeros/hora

Fuente: Memoria anual del metro de Panamá[25]

2.1.3 Demanda de la línea 2 del Metro de Panamá

La Línea 2 del Metro de Panamá, en sus 10 años de operación (junto con la Línea 1), ha transportado a aproximadamente 917 millones de usuarios, con un aumento del 6% en la demanda en 2024, alcanzando 117 millones de usuarios[31].

Algunos de los aspectos de la demanda, su incremento y extensión de la vía férrea:

- **Aumento de demanda:**

En 2024, la Red Metro (L1 y L2) transportó 117 millones de usuarios, un aumento del 6% respecto a 2023 (110 millones)[31].

- **Días de mayor demanda:**

Los días con mayor demanda en 2024 fueron el 23 de diciembre (437,572 usuarios), el 6 de diciembre (434,164 pasajeros) y el 30 de abril (432,435 viajeros)[31].

- **Capacidad de la Línea 2:**

La línea 2 tiene una capacidad inicial para transportar 16.000 pasajeros por hora y por sentido, y está diseñada para 40.000 pasajeros por hora y por sentido [31]

- **Extensión a Tocumen:**

En marzo de 2023, la Línea 2 fue ampliada con un ramal hacia el Aeropuerto Internacional de Tocumen desde la estación Corredor Sur [31].

- **Futuras extensiones:**

Se planea ampliar la Línea 2 hasta la Universidad Tecnológica en la Vía Ricardo J. Alfaro, con una extensión de aproximadamente 3.6 kilómetros [31].

- **Tramos de mayor demanda:**

Para el año 2025, el tramo de mayor demanda está entre las estaciones Pedregal-Las Acacias y Cincuentenario, con valores que superan los 20 mil pasajeros/hora/sentido [31].

2.1.4 Sistema de electrificación

El sistema de alimentación eléctrica de la Línea 2 proviene de las empresas de servicio eléctrico de la ciudad de Panamá en nivel de media tensión y se obtiene los voltajes de uso de 480v, 208v y 120v en las subestaciones de transformación propia del sistema. Los trenes son alimentados a través de un sistema de catenaria rígida de 1,500 voltios en corriente continua[18][32]. En Monroy et al.,[33] se comentó las principales características del Sistema eléctrico de la línea 2 del metro de Panamá. Se desarrollan puntos importantes como son las subestaciones, los sistemas de catenarias, los cables, sistemas de protección, sistemas de alimentación eléctrica y demás aspectos eléctricos de este sistema de transporte ferroviario. Este artículo de investigación tuvo como propósito ser un recurso didáctico para estudiantes de carreras de ingeniería y afines en los cursos de ingeniería y transporte ferroviario[33].

De acuerdo con Calvo *et al.*, [34], [35], [36] la catenaria rígida está constituida por un perfil de aluminio extrusionado. La catenaria rígida cuenta con una ranura en su base inferior donde se aloja pinzado, elásticamente, sin necesidad de tornillos, el hilo de contacto de cobre (ver figura 3). Los carriles (perfiles PAC) que constituyen la catenaria rígida, están fabricados en barras que en el momento de montaje se unan mediante el diagrama cubrejuntas. La rigidez del carril permite instalar una catenaria rígida con radios de hasta 120 m., sin precauciones especiales. Si el perfil se ha curvado previamente de forma mecánica, se pueden incluso equipar vías con radios de 45 m.

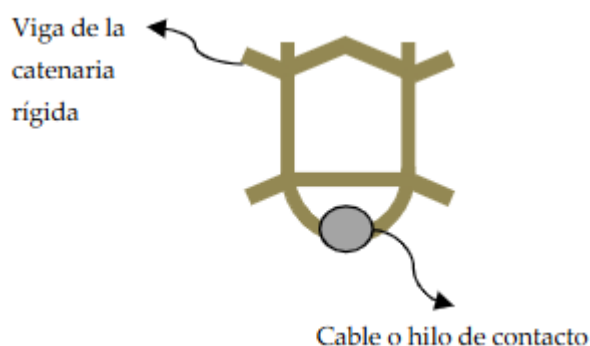


Figura 3. Esquema de catenaria rígida[33], [37]

2.1.5 Sistemas de control y señalización de trenes

El sistema de señalización y control de trenes CBTC se basa en un sistema automático y control de trenes ATC que cuenta con las funciones de protección automática de trenes ATP, operación automática de trenes ATO y supervisión automática de trenes ATS. Todos estos sistemas coadyuvarán a la implementación de un sistema integrado de operación de la línea en modo STO (*semi-automatic train operation* - operación de trenes semi-automática)[1].

Concepto del CBTC

El sistema de Señalización y Control de Trenes CBTC incluye las funciones de operación de trenes ATP (*Automatic Train Protection*), ATO (*Automatic Train Operation*) y ATC (*Automatic Train Control*) respectivamente. Este sistema CBTC utiliza el principio de bloqueo por Cantones Móviles, basado en el intercambio de información entre la vía y el tren mediante la utilización de un sistema de balizas en vía utilizadas para sincronizar el sistema de posicionamiento del tren.

El funcionamiento general del bloqueo por Cantón Móvil se puede resumir de la siguiente manera: En un sistema de cantón móvil, el tren no necesita esperar a que el tren que le antecede salga de ningún cantón ya que le basta con mantener con respecto al mismo la distancia de seguridad que garantiza un frenado seguro en caso de emergencia, esto sólo puede conseguirse conociendo la posición exacta y en todo momento de los trenes sobre la línea y mantener informado de dichas posiciones a los sistemas de control en tierra (en la vía), que les permitirán a los trenes moverse en el preciso instante en que ese movimiento pueda darse de manera segura. Por tanto, el sistema asignará siempre un tramo libre de vía el cual termina con una parada y a través de un trayecto libre de obstáculos. Existirá una transmisión continua que se realizará a través de un sistema WIFI, o basado en tecnología LTE (ver glosario), que permitirá la transmisión bidireccional de datos de manera continua y segura al tren. Los datos principales que se transmitirán del tren al enclavamiento (ver glosario) serán la posición del tren en la línea y sus dimensiones (longitud) y, por otra parte, del enclavamiento al tren se transmitirá la asignación de los itinerarios (ver glosario), modo de operación y velocidades permitidas en dicho tramo. Al final de este tramo asignado seguirá una parada obligatoria. El enclavamiento asignará un tramo virtual (itinerario o *moving authority*), independiente a las estaciones y a la posición de los trenes que se desplacen por delante del tren. De este modo el tren puede acercarse a la próxima estación, mientras el andén está todavía ocupado por el tren precedente, y una vez despejada la vía por el tren precedente el enclavamiento renueva el itinerario. La transmisión de datos desde las antenas en la vía hasta las antenas del tren será continuamente monitoreada por un sistema a bordo del tren (computadora embarcada), el cual activará un frenado de urgencia[38] si detecta que se ha perdido la recepción de los datos de dicha transmisión durante un tiempo mayor a un determinado lapso establecido. Adicionalmente el sistema supervisará la velocidad permanentemente y no permitirá el incremento de esta por encima de unos valores previamente establecidos según el tramo en el cual se desplace el tren; activando el frenado de urgencia o emergencia en el caso de que el tren supere dicho valor.

Concepto vía libre.

Por motivos de seguridad establecidos, para los casos en que se produzca una falla del sistema o se realice una mala operación de este, el tren siempre tendrá un tramo de vía libre por delante, en el cual podrá frenar con total seguridad. Esto es una exigencia para sistemas de cantón móvil (CBTC), entendiéndose por libre a:

- Libre de trenes y,
- Libre de obstáculos (personas, materiales extraños, otros vehículos auxiliares).

Por lo tanto, es necesario supervisar los andenes. La herramienta denominada *Hazard log* [18] es un registro de amenazas, lista de posibles riesgos, su mitigación este documento «recoge todas las actividades de gestión de seguridad, los peligros identificados, así como las soluciones y decisiones tomadas, la cuales deben ser actualizadas. Se trata del componente más importante de un sistema de gestión de seguridad de todo

proyecto ferroviario»

Los proyectos de RAMS Ferroviaria se encuentran basados en la aplicación de las normas EN 50126 [39], [40], [41], EN 50128[42] y EN 50129[43] respectivamente.

Botones de frenado de urgencia (BFU)

La función de los botones de frenado de urgencia o emergencia es ser un mecanismo para garantizar la seguridad de los usuarios. Por ejemplo, los botones BFU se colocan en los andenes de las estaciones, en lugares andenes (mínimo 2 por andén), de manera que en caso de cualquier problema sobre la vía (caídas accidentales o no de personas sobre la vía, obstáculos sobre la vía...) cualquier persona, desde pasajeros hasta el personal de la estación y/o operadores puedan accionar el botón para impedir el tráfico en la estación. Los BFU deben estar visibles y accesibles de manera fácil y rápida tanto para los pasajeros como para los operarios. Sin embargo, los BFU deben contar con la protección adecuada para impedir que sean accionados de manera accidental y/o maliciosa.

También deberán incluir algún tipo de dispositivo que permita al personal de operaciones y/o mantenimiento detectar visualmente el o los BFU's que hayan sido accionados en cada estación para facilitar el rearme de estos. Asimismo, será posible, mediante el procedimiento operativo que corresponda, posibilitar que se pueda realizar el rearme de los BFU's directamente desde el CCO. Asociados a los BFU's se instalarán intercomunicadores que permitirán comunicar, de manera directa y con la máxima prioridad posible, las posibles situaciones de peligro detectadas desde los andenes. Además, al activar cualquier BFU, o intercomunicador asociado al mismo, se mostrará, inmediatamente, tanto en el puesto de estación, como en el puesto del CCO correspondiente al CCTV; y en el puesto del supervisor del CCO, la imagen del BFU o intercomunicador que hayan sido activados (siendo posible que se puedan visualizar al mismo tiempo todos los BFU's de una misma estación), de manera que se pueda identificar a la persona que ha activado el BFU.

Cuando el botón BFU es accionado, se establece un área de frenado de emergencia por el sistema ATC, por lo que cualquier tren en esta zona realiza un frenado de emergencia y se detendrá lo antes posible. Ningún tren controlado por el sistema CBTC podrá acceder al área de frenado de emergencia hasta que la amenaza haya sido eliminada. Además, para el caso de los trenes que circulen en modo de conducción manual (ver glosario); se deberán instalar en las estaciones equipos especiales (por ejemplo señales lumínicas parpadeantes con aspectos diferentes a los mostrados en la línea, etc); que permitan indicarle a cualquier conductor de un tren que pudiera estar aproximándose a la estación donde se ha pulsado el botón BFU y que en dicha estación se está dando una posible situación de riesgo (por lo que deberán detener la marcha del tren). Estos equipos en estaciones deben estar claramente visibles, sin importar el grado de las condiciones meteorológicas posibles (buenas, regulares, malas o muy malas) en la ciudad de Panamá (de día o de noche), y desde una distancia superior a la necesaria para que el conductor del tren pueda detener el tren en condiciones seguras, e impedir que el mismo pueda acceder o entrar, aunque sea de manera parcial, al andén de la estación. Y todo esto con independencia de las comunicaciones que deben poder ser establecidas desde el CCO con ese tren para comunicarle la situación de riesgo.

Enclavamiento y monitoreo:

Un enclavamiento (*interlocking*) es un sistema de señales y cambio de vías que funcionan según un modelo que garantiza la seguridad de la circulación de los trenes[44]. La arquitectura de los enclavamientos puede ser distribuidos, centralizados y de otro tipo. Para la línea 2 del Metro de Panamá, el movimiento de los trenes es supervisado por un sistema ATS, y controlado por un sistema de enclavamiento cumpliendo con los requerimientos del nivel de integridad de seguridad (SIL4).

El nivel de integridad de seguridad *Safety Integrity Level* (SIL) se define como un nivel relativo de reducción del riesgo que provee una función de seguridad, o bien para especificar el nivel objetivo para la reducción de riesgo. SIL podría definirse simplemente como una medida de la prestación requerida para una función instrumentada para la seguridad (SIF). CENELEC (estándares de seguridad europeos) establecen 4 niveles de seguridad, es decir 4 SILs. Estos niveles son SIL1, SIL2, SIL3 y SIL4. Siendo el nivel 4, el de requerimiento más severo y 1 el más bajo. El SIL se determina a partir de un número de factores cuantitativos en combinación con factores cualitativos tales como el proceso de desarrollo y la gestión del ciclo de vida de la seguridad (RAMS).

Ejemplos de nivel SIL:

«SIL1: Unidades de mantenimiento y diagnóstico.

SIL2: Cuadros de mando

SIL3: CTC.

SIL4: Enclavamientos y circuitos de vía»[45].

La fijación del nivel de integridad de la seguridad (nivel SIL) se da en función del nivel de mitigación requerido para reducir el riesgo mediante la fórmula de severidad x probabilidad, de la amenaza detectada a valores despreciables o tolerables[45].

De acuerdo al Metro de Panamá[46], un ejemplo del concepto robustez y confiabilidad para los sistemas de enclavamiento se explica mediante la siguiente figura 4:

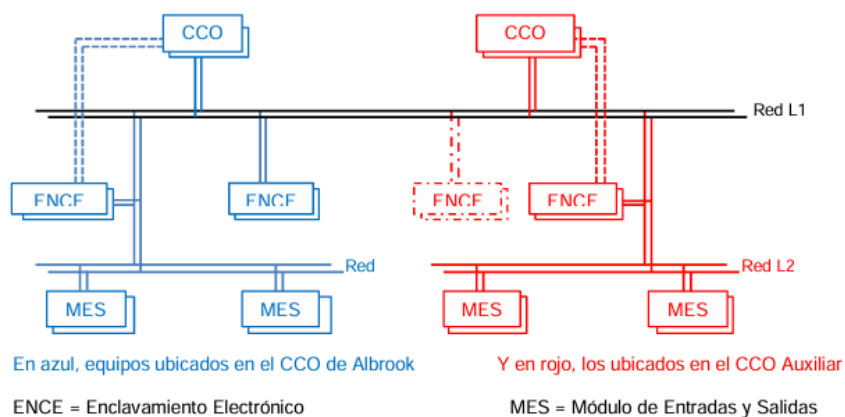


Figura 4. Enclavamiento y monitoreo de la línea 2 del Metro de Panamá[1].

Por ejemplo, la figura 4 muestra 2 enclavamientos centralizados (uno para línea 1 y otro para línea 2), ambos redundantes (ya que son SIL4), ambos duplicados (en configuración

“Hot Stand By” o de “alta disponibilidad”), y todos conectados por medio de una red troncal de Fibra Óptica (Red L1 & L2). Dicha arquitectura permite, ante una eventual indisponibilidad de cualquier enclavamiento seguir operando con el otro enclavamiento para esa Línea sin que la operación pudiera verse afectada, es decir, se opera mediante el principio de redundancia pasiva de RAMS[47], [48]. Adicionalmente, ambas líneas podrían operarse desde cualquiera de los dos CCO’s existentes (para ello el CCO Auxiliar estará también funcionando en configuración “Hot Stand By” o de “alta disponibilidad”). Y para el caso de indisponibilidad de la red troncal, existiría (además de los medios que permitan operar el sistema sin ATS como son el “watchdog” o el Puesto Local de Operaciones (PLO) descritos más adelante), una conexión directa entre cada Centro de Control de Operaciones (CCO) y una de las líneas de manera que ambas pudieran seguirse operando sin afectaciones en la operación.

La configuración en “Hot Stand By” o de “alta disponibilidad” es «aquella en la que se configura un equipo que opera preferentemente y otro ubicado en otro lugar, se configura de manera que esté listo para tomar el control de manera inmediata en el caso en que el primero presentara un mal funcionamiento de cualquier tipo, de manera que esta transición entre uno y otros es transparente para el resto del sistema. En cualquier caso, la arquitectura del sistema debe garantizar una alta disponibilidad, es decir 99%»[46].

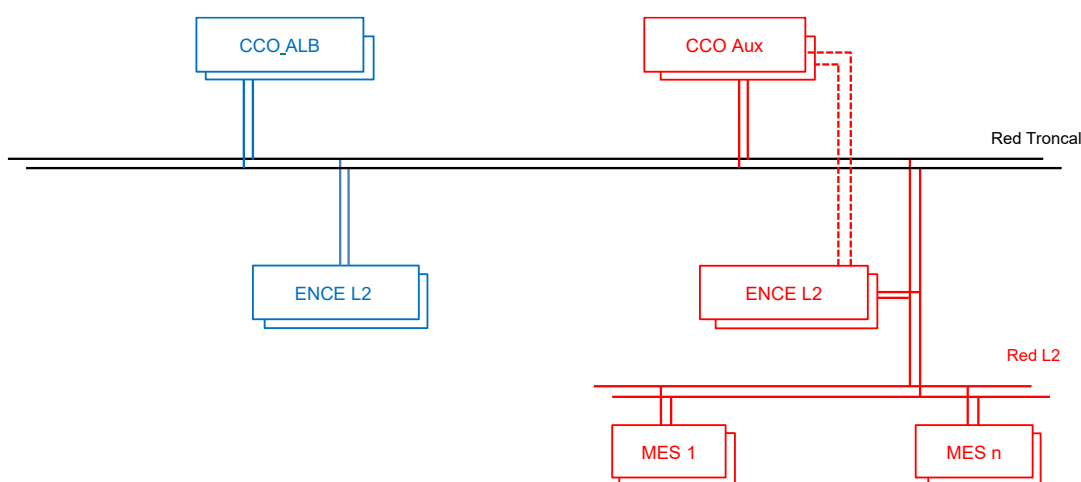


Figura 5. Especificación Conceptual Sistema S&CT – Arquitectura de Enclavamiento[49].

Un ejemplo de la arquitectura del enclavamiento libre, robusta y confiable con valor RAMS de disponibilidad ($D \geq 99.99\%$), para la especificación conceptual del Sistema de señalización y control de la línea 2 del Metro de Panamá se presenta en la figura 5.

Centro de control de operaciones (CCO)

Por ejemplo, el centro de control de operaciones (CCO) de la línea 2 puede verse como como una ampliación del CCO de la línea 1 y con con 2 puestos de operadores (IHM), para el control de trenes de la línea, y 1 puesto para labores de mantenimiento y parametrización

del sistema. La configuración de los puestos permite acceder con cualquier perfil en cualquiera de los puestos existentes para ambas líneas, de manera que éstos puedan ser intercambiables tanto en línea como en funcionalidad (por ejemplo, si se entra, con el “login” y “password” correspondiente al SCADA en el terminal inicialmente previsto para la supervisión del CCTV, se tendría un puesto de SCADA). Independientemente del número de puestos de trabajo que estén activos de un sistema en un momento dado, sólo existirá uno que sea maestro, y desde el cual se puedan enviar mandos.

Los procesadores (servidores) para las funciones de enclavamiento de las rutas, enclavamiento de los movimientos y las funcionalidades de ATP deben cumplir con un Nivel de Seguridad Integrado 4 (IEC 61508 - SIL 4, vital)[50], [51], [52], [53], es decir, todo el sistema de señalización y pilotaje automático debe cumplir el nivel SIL-4 en los sistemas vitales e importantes como enclavamientos, circuitos de vía y sistema ATP del CBTC, etc.

Para el resto de los equipos, es preferiblemente que sean SIL 4 o, en su defecto, se indique el grado SIL alcanzado conforme buenas prácticas internacionales ferroviarias y sistemas homólogos implantados en los últimos 5 años. Se debe presentar a consideración el modo en que demostrará el cumplimiento de estas exigencias. Así mismo indicará cuáles son los elementos críticos de cada subsistema que serán construidos como SIL 4, además de cumplir con la exigencia de que el sistema completo CBTC sea SIL 4.

Las funciones básicas que realiza el centro de control son:

- **Coordinar el ingreso de los trenes desde los estacionamientos o el taller de mantenimiento ligero a las otras zonas de patio y talleres o a la línea:** una vez que cada tren haya adquirido el estatus de “CBTC activo” se establecen los itinerarios de manera automática (ATP y ATO) para operar tanto en la zona de patio y talleres como en la línea 2 mediante la asignación de las rutas. Una vez que los trenes hayan sido enrutados, el sistema de S&CT por intermedio del centro de control principal, en operación nominal, controla automáticamente las maniobras, a efectos de establecer las rutas a seguir por los trenes en las estaciones terminales y mantenerlos en continua circulación sin necesidad de la intervención del conductor del tren u operador.

Monitoreo de las posiciones de los trenes: se deberá poder determinar la posición de cualquier tren en particular que se encuentre en circulación, mediante la utilización de números de identificación de trenes y funciones de rastreo a ser implementadas.

CCO AUXILIAR

El CCO auxiliar es un CCO adicional e independiente del CCO Albrook, inaugurado con la Línea 1 del Metro de Panamá y tiene como propósito fundamental fungir como principal centro de control de operaciones, mediante el principio de RAMS de redundancia pasiva[47], [48], de manera que en el caso que se produzca un fallo del Sistema de Señalización o del Sistema ATS, o bien que se requiera por cualquier otra circunstancia, se pueda continuar de forma instantánea la operación de la línea 2 del Metro de Panamá desde este segundo CCO.

Las razones por las que un CCO auxiliar entra en operación, pueden deberse ya sea por una solicitud desde CCO primario (por trabajos de servicios de mantenimiento o trabajos auxiliares o cualquier otra circunstancia que así lo requiera), o bien por algún fallo crítico

del CCO primario. Por tal motivo, resulta muy importante establecer los fallos que se consideran críticos durante la fase de ingeniería conceptual del proyecto de diseño y construcción de la línea férrea. Ejemplos de este tipo de fallos son: la pérdida total de comunicaciones de los servidores ATS, la pérdida total de comunicaciones del IXL, etc).

El cambio del CCO auxiliar al CCO principal siempre debe deberse a una solicitud del CCO auxiliar. Este CCO auxiliar contará con dicha funcionalidad de cambio y sin posibilidad de que este cambio se realice por equivocación. Por ejemplo, el CCO auxiliar está conectado a los distintos enclavamientos de las líneas mediante un anillo de fibra óptica redundado pero independiente del que se use para el CCO principal.

TRANSMISIÓN DE DATOS DESDE EL CCO A LA VÍA

Red de transmisión de datos.

La transmisión de los datos desde el CCO a la vía, las 2 redes de transmisión de datos, tienen la misma arquitectura, sin compartir algún elemento en común, es decir, tiene una configuración en paralelo y no en serie, esto hace posible que la caída de la red principal nunca pueda provocar una caída de la red secundaria, por ello, para Línea 2 cuenta con cuatro rutas distintas (2 para el anillo redundado de la red principal, y otras dos para el anillo redundado de la red secundaria). Para ambas redes, la principal y la secundaria, se optará por un sistema, redundado y con una arquitectura en anillo para la transmisión de datos, en forma de una transmisión por fibra óptica, llamado FOTS (*Fiber Optics Transmission System*). Un posible esquema para este sistema de transmisión se muestra a continuación en la figura 6:

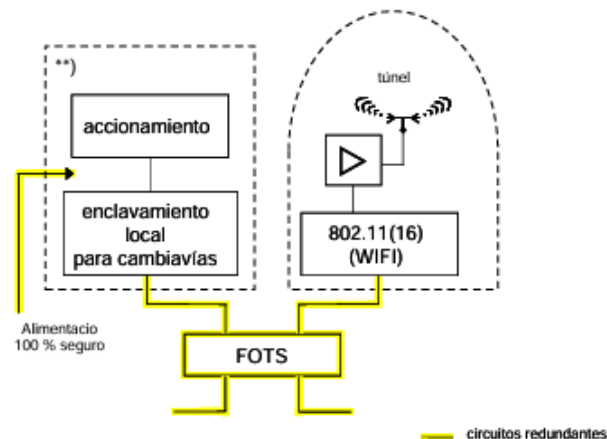


Figura 6. Esquema de bloque de una estación (con cambiavías) para cada una de las dos redes

Redundancia

Tanto para la red principal o secundaria, todos los sistemas de transmisión deberán estar concebidos bajo una arquitectura redundante, es decir, el fallo de un componente no causará restricción alguna a la operación. De esa manera se alcanzará una alta confiabilidad, y adicionalmente la seguridad se alcanzará por encriptación en los sistemas abiertos (dos canales independientes de transmisión por fibra óptica).

Interfaces

Para las comunicaciones del sistema de control de trenes, se conceptualizó la implantación de interfaces Ethernet, utilizando la FOTS como medio de comunicación entre las estaciones (ver figura 7). Un posible esquema del sistema sería el siguiente:

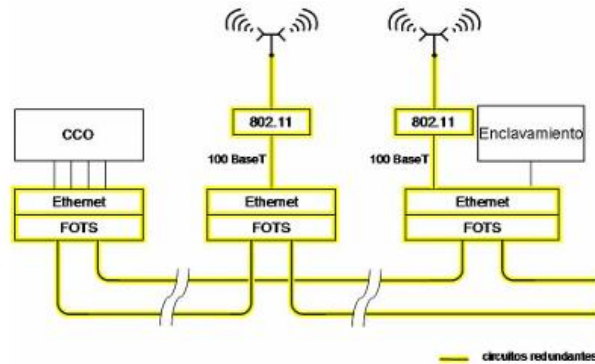


Figura 7. Esquema de circuitos redundantes del CCO y el enclavamiento[1]

Asuntos de seguridad de la transmisión inalámbrica

Para evitar que la transmisión inalámbrica por WIFI sea interceptada más fácilmente a una transmisión por cable o fibra óptica. Por lo tanto, el diseño del Sistema de Comunicación de Datos deberá cumplir con la Norma Internacional IEC 62280-2 “Aplicaciones ferroviarias - Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento - Parte 2: Comunicación segura en sistemas de transmisión abierta”, así como la norma EN50159. Estas normas introducen una descomposición de los sistemas de señalización en capas seguras y no seguras. Asimismo, introduce el Proceso de Protección de Acceso para el Sistema de Transmisión Abierto, que depende de las capas relacionadas con la protección (ver figuras 8 y 9).

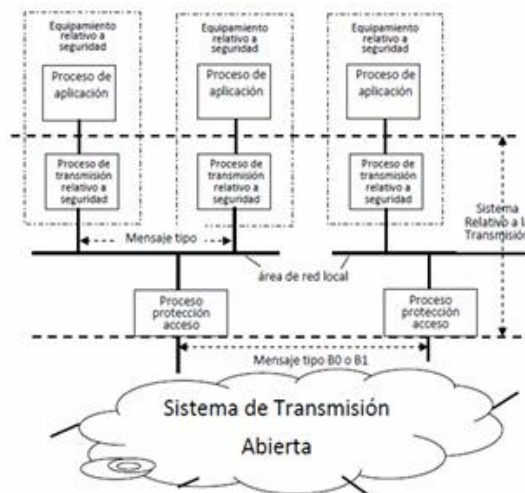


Figura 8. Uso de la capa de protección de acceso separada[1]

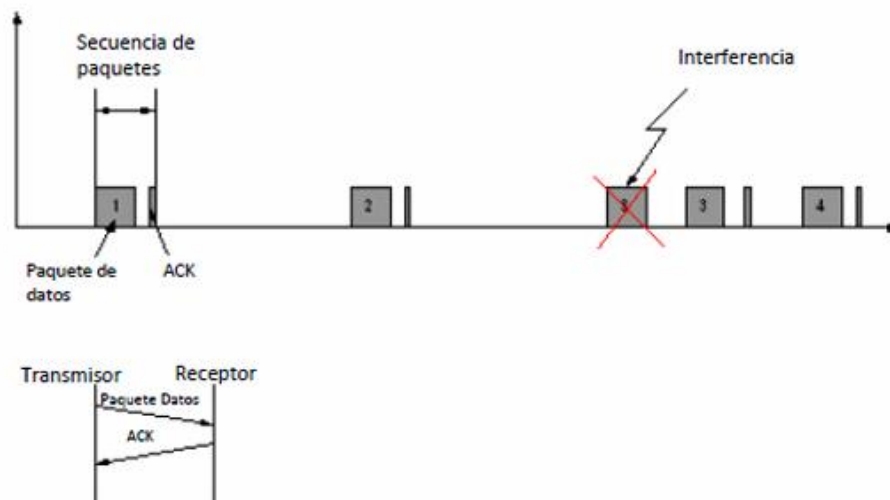


Figura 9. Protocolo de comunicación (solicitud de repetición automática) [1]

COMPUTADORA A BORDO DE TRENES

La computadora embarcada en el tren es la unidad principal a bordo y tiene como función constituir la interfaz entre el tren y todos los dispositivos, el almacenamiento y transmisión de información y la interpretación de los datos (posición y velocidad) que se van recibiendo.

Por lo tanto, se puede concluir que las funciones principales de la unidad a bordo son:

- Calcular las curvas de frenado y los perfiles de velocidad.
- Controlar la velocidad permitida.
- Recibir telegramas de datos desde las balizas, incluyendo datos específicos del vehículo.
- Conocer las características de frenado del tren.
- Controlar las actividades de frenado, accionar el freno de servicio y el freno de emergencia.

Cada unidad estará provista de paneles en las cabinas de los conductores de los trenes, las cuales le permitirán trasladar la señalización de la vía a la cabina del tren para disposición del conductor (ver figura 10).

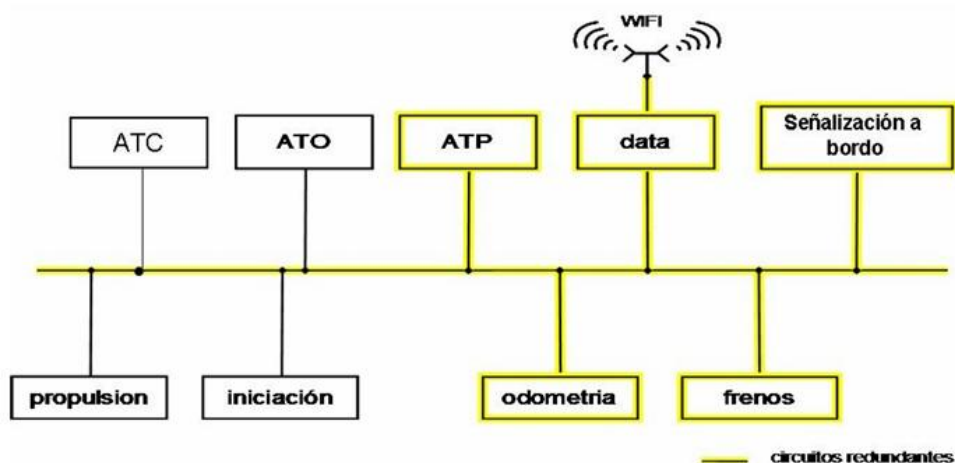


Figura 10. Computadora a bordo del tren (equipo embarcado) [1]

Para garantizar la confidencialidad de los datos del sistema de señalización y control de trenes (S&CT) de la línea 2 del Metro de Panamá, un módulo de encriptación bajo la normativa FIPS 140 o superior, la cual garantiza la protección de información importante del sistema mediante encriptación y autenticación de los datos, de posibles intrusos, sabotajes, hackers, terrorismo o de personal no autorizado para la manipulación de los datos del equipo. FIPS 140 es un estándar del gobierno de EE. UU. que especifica los requisitos de seguridad para los módulos criptográficos utilizados para proteger información confidencial. FIPS 140-2 es el estándar anterior y FIPS 140-3 es el actual (ver figura 11).

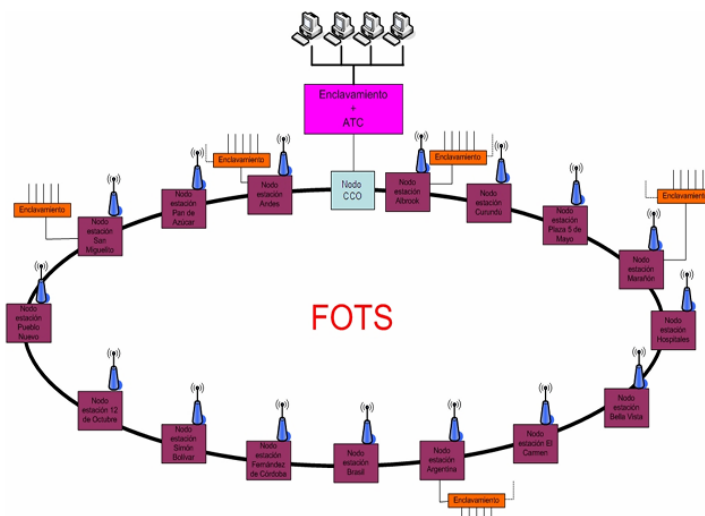


Figura 11. Concepto de FOTS (Análogo al de L1 representado) [1]

2.1.6 Características técnicas del material rodante

Los trenes circulan por la vía derecha[18]. Al cierre del mes de octubre del 2023 se encontraban en operación 17 trenes en línea 2 del Metro de Panamá y un tren en el ramal de la Línea 2 del Metro de Panamá. Los trenes de la línea 2 y del ramal de dicha línea son

trenes de 5 coches[18][25]. La composición normal será M-N-R-N-M con un puesto de conducción en los extremos opuestos[54]. Las características técnicas del material rodante son presentadas en la tabla 9.

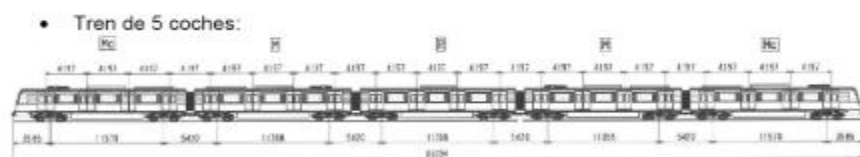


Figura 12. Configuración de material rodante línea 2 de Panamá[55]



Figura 13. Material rodante de la línea 2 del Metro de Panamá. Cortesía: A. Berbey-Alvarez



Figura 14. Vista interior del Material rodante de la línea 2 del Metro de Panamá. Cortesía: A. Berbey-Alvarez

Tabla 10. Características técnicas del material rodante de la línea 2 del Metro de Panamá

Parámetro	Valor
Velocidad máxima	80 km/h [30]
Velocidad comercial	35 km/h [30]
Aceleración máxima aceptable	0.65 m/s ² [19][56]
Aceleración en recta y horizontal (40km/h)	1,0 m/s ² [54]
Desaceleración	1,2 m/s ² ± 0,05 m/sg[54][30]
Desaceleración de urgencia	1,3 m/s ² [54]
Longitud del tren de cinco coches	86 m ± 3 m[30]
Anchura del tren	2710 mm
Altura del piso respecto la cabeza de carril	1150 mm[30]
Altura del coche desde la cabeza del hongo del riel	3.8 m ± 0.20 m[30]
Distancias entre ejes de puertas de la caja del tren	4197 mm
Distribución de asientos	Longitudinal, con sujeción a la pared tipo <i>Cantiléver</i>
Vida útil	40 años[30]
Jerk máximo	0,8 m/seg ³ [30]
Tiempo de parada en estaciones intermedias	20 segundos[30]
Tiempo de parada en las estaciones finales	40 segundos[30]
Coeficiente de adherencia	0.13 [30]
Peso por eje (no será mayor de)	130 KN [30]
Longitud exterior de la caja entre paredes testeras por coche	16500 mm [30]
Longitud total entre partes planas de enganche	17150 mm [30]
Anchura máxima exterior de la caja a nivel del piso	2710 mm [30]
Anchura máxima entre los extremos de los estribos de las puertas	2910 mm [30]
Altura del piso del coche y del plano superior de los estribos de las puertas	1150 mm [30]
Altura mínima interior caja	2100 mm [30]
Altura total del coche	3896 mm [30]
Altura de la sujeción de las barras de los enganches de socorro	1100 mm [30]
Distancia aproximada entre centro de pivotes de los bogíes	11000 mm [30]
Número de puertas en cada costado del coche	4
Anchura útil de cada puerta	1240 mm [30]
Altura útil de cada puerta	1900 mm [30]
Diámetro de las ruedas Nuevas	840 mm [30]
Diámetro de las ruedas Mínimo	740 mm [30]
Espesor de los cristales de las ventanas de los coches	10 mm

2.1.7 Instalaciones de las estaciones

La Línea 2 del Metro de Panamá tiene un patio para el estacionamiento y limpieza de trenes y con talleres para la realización del mantenimiento preventivo y correctivo de equipos instalados en la línea, todo esto desarrollado en un terreno de 12 hectáreas ubicado en el sector de Nuevo Tocumen[57], al este del área metropolitana de la Ciudad de Panamá. El trazado de la L2 se extiende desde San Miguelito hasta Nuevo Tocumen, siguiendo, en su mayor recorrido, por el eje central de la avenida Domingo Díaz y la Vía Panamericana[58].

La línea 2 del Metro de Panamá tiene 16 estaciones, siendo la primera de ellas (San Miguelito) compartida con la línea 1[58]. En total las estaciones de la línea 2 responden al diseño de dos tipologías y tres casos singulares (ver tabla 11).

Tabla 11. Tipológicas de las estaciones y casos singulares[59]

Estación	Clasificación
Tipo	con andenes laterales y apoyo estructural central
	con andenes laterales y apoyo estructural de tipo pórtico
Singular	San Miguelito
	UTP (ISTE)
	Nuevo Tocumen

Estaciones Tipo:

- **Estación tipo con andenes laterales y apoyo estructural central.**

El Metro de Panamá definió las estaciones tipo sobre apoyos central como «*aquellas que se encuentran en el lateral de la vía o alineadas al eje central, soportadas por dos pilares centrales ejecutadas longitudinalmente mediante 6 vanos de aproximadamente 15 metros*»[58]. Los pilares centrales soportarán los dos niveles elevados de la estación a una altura tal que se cumplan el gallo mínimo sobre cualquier paso vehicular que se pudiese ver afectado por estas estaciones ferroviarias, así como se estableció en su día para el tramo del viaducto la Línea 1 del Metro de Panamá. Los pilares centrales con capitel sirven de apoyo a las vigas o elementos estructurales que conforman el nivel vestíbulo y andén, además de dar soporte a las escaleras de vestíbulo al andén (ver figura 15). La distancia de la estructura principal a los accesos variará en función de los condicionantes de la vialidad de la Avenida José Domingo Díaz en el área metropolitana de la Ciudad de Panamá.

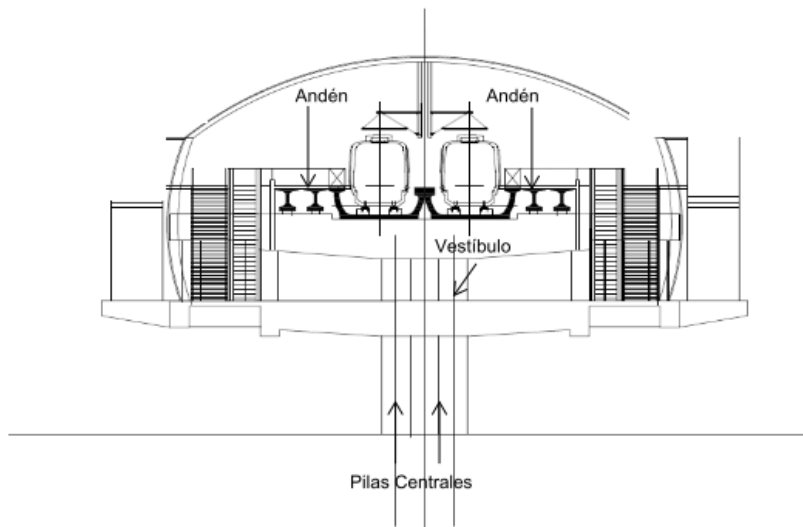


Figura 15 Estación tipo con andenes laterales y apoyo estructural central[58]

- **Estación tipo con andenes laterales y apoyo estructural de tipo pórtico.**

El Metro de Panamá definió las estaciones tipo sobre pórticos como aquellas que están alineadas con el eje del corredor vial y están soportada por una pila central, común a dos pórticos, cuyas pilas laterales se ubicarán fuera de la calzada, esto con el fin de evitar los cambios en el proyecto de ampliación de la avenida Domingo Díaz (ver figura 16). La ejecución de estos pórticos se especificó longitudinalmente mediante 6 vanos de aproximadamente 15 metros. La distancia de vano es un término que se refiere a la *«distancia entre dos apoyos consecutivos en el sentido de avance de la línea»*[33]. Esta estructura soporta 2 niveles elevados de la estación a una altura tal que se permita la circulación vial por debajo de ella. El gálibo libre que se deberá cumplir para determinar la altura de la estación es de 5.50 metros sobre la calzada. El término gálibo se refiere a *«las dimensiones máximas, tanto de altura como de anchura, que pueden tener todos los vehículos»*[33]. También se utiliza para hacer referencia *«a la zona geométrica que debe estar libre de obstáculos alrededor de un sitio»*[60], es decir, *«es un contorno de referencia con unas reglas de aplicación»* [61]. El gálibo es un área en la sección transversal de una línea ferroviaria, dentro de la cual el vehículo ferroviario debe poder transitar. Si un vehículo excede en tamaño el gálibo de una línea, no será autorizado para circular por la misma [62].

Las pilas laterales que forman los pórticos y proporcionan estabilidad a la estructura, sirven de apoyo a las vigas o elementos estructurales que conforman el nivel vestíbulo, además de hacer de soporte de las escaleras de vestíbulo a andén[58]. Su distancia del eje central variará en función de los condicionantes de la vialidad de la Avenida José Domingo Díaz en el área metropolitana de la Ciudad de Panamá.

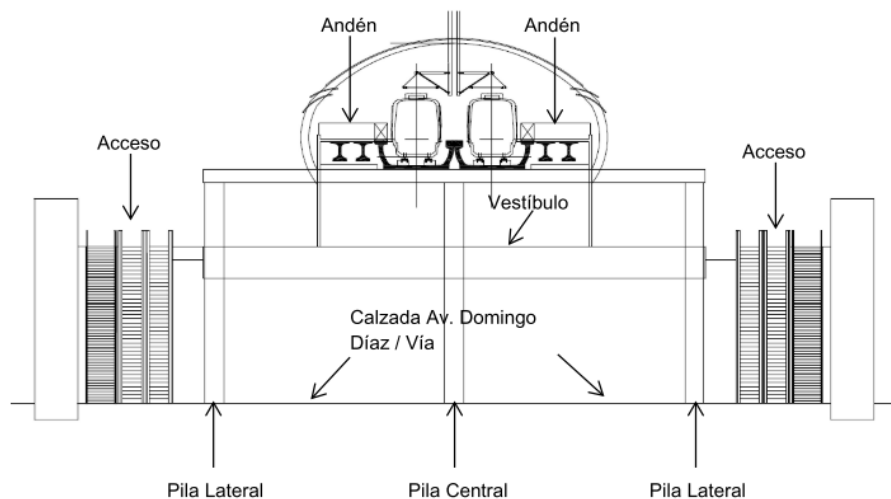


Figura 16. Estación tipo con andenes laterales y apoyo estructural de tipo pórtico[58]

Estaciones singulares:

- San Miguelito.

La estación de San Miguelito de la línea 2 del Metro de Panamá se conceptualizó ubicada lateral a la avenida Domingo Díaz, sobre el lateral sur, el más cercano a la Estación San Miguelito previa de la línea 1 del Metro de Panamá. Esta estación está conceptualizada para que se realice sobre un pórtico simple (ver figura 17). Los pilares que conforman el pórtico se proyectan fuera y paralela a la calzada longitudinalmente mediante 6 vanos de aproximadamente 15 metros [58].

Los pórticos soportan dos niveles elevados de la estación y entre sus pilares a nivel superficie se definió la localización de los cuartos técnicos de la estación. La altura de la estación se da por el galibo libre mínimo y el nivel inferior de la estructura del viaducto de la Línea 1 del Metro de Panamá.

La estación de San Miguelito de la línea 2 del Metro de Panamá cuenta con pasillos conectores en zona paga de vestíbulo a vestíbulo, desde la estación de San Miguelito de la línea 1 hacia la estación de San Miguelito de la línea 2 del Metro de Panamá y viceversa, al igual que las conexiones de andén a andén (plataformas). La estación de San Miguelito de la línea 2 del Metro de Panamá se conceptualizó con un tipo de andén central.

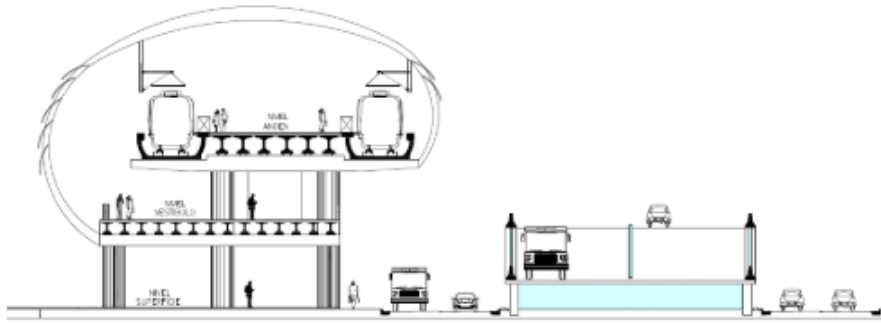


Figura 17. Estación singular de San Miguelito[58]

La estación ISTE (UTP) se conceptualizó para estar soportada por un pilar central, que se ubica al lateral norte del corredor vial, y será común a dos pórticos, cuyas pilas laterales sur se corresponden con el eje del corredor vial, esto con el fin de evitar afectar lo menos posible la avenida Domingo Díaz. Los pórticos se conceptualizaron longitudinalmente mediante 6 vanos de aproximadamente 15 metros. Esta estructura soporta 2 niveles elevados de la estación a una altura tal que se permita la circulación vial por debajo de ella. El gálibo libre mínimo que se deberá cumplir para determinar la altura de la estación es de 5.50 m sobre la calzada[58]. Conceptualmente y en consideración una eventual integración con un sistema del tipo “*people mover*” a nivel vestíbulo se elevará un metro adicional la altura de este último.

Los pilares laterales que forman los pórticos y proporcionan estabilidad a la estructura, sirven de apoyo a las vigas o elementos estructurales que conforman el nivel vestíbulo, además de hacer de soporte de las escaleras de vestíbulo a andén. La distancia entre la estación y el acceso sur (puente usado por el público) se conceptualizó en función de los condicionantes de la vialidad (ver figura 18).

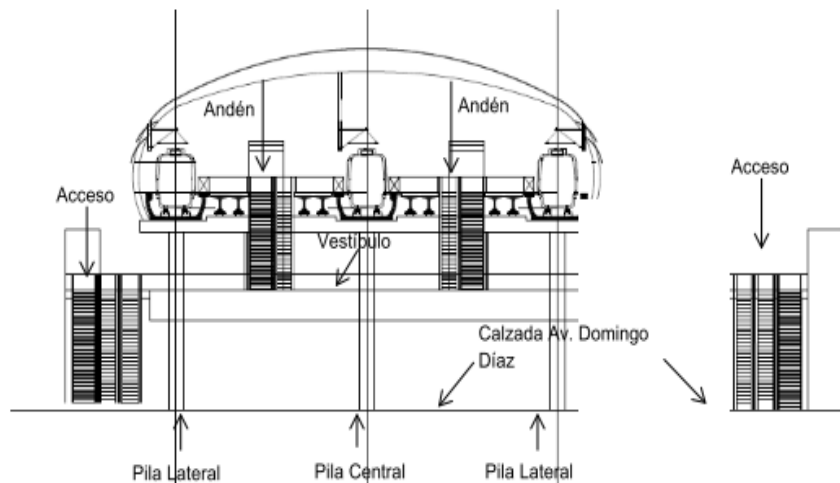


Figura 18. Estación ITSE-UTP

Estación Nuevo Tocumen [59]

La estación Nuevo Tocumen se conceptualizó con un pórtico central con voladizos laterales, cuyo centro forma una isla de transferencia para buses (ver figura 19). Los pórticos se conceptualizaron longitudinalmente mediante 6 vanos de aproximadamente 15m. La estación estará alineada al sur del eje vial de la Vía Panamericana[58]. Esta estructura soporta 2 niveles elevados de la estación a una altura tal que se permita la circulación vial por debajo de ella[58]. El gálibo libre mínimo que se deberá cumplir para determinar la altura de la estación es de 5.50 metros sobre la calzada [58]. Las pilas que forman el pórtico y proporcionan estabilidad a la estructura, sirven de apoyo a las vigas o elementos estructurales que conforman el nivel vestíbulo, además de hacer de soporte de las escaleras de vestíbulo a andén[58].

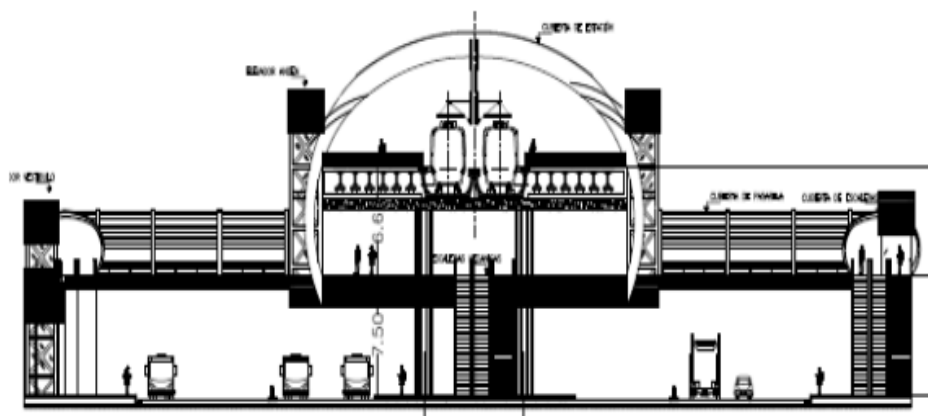


Figura 19. Estación de Nuevo Tocumen

Para efectos ilustrativos se presenta las siguientes figuras sobre las tipológicas de las estaciones, teniendo en cuenta que han podido experimentar ajustes o algunos cambios, en su día, por temas de diseño y construcción de la línea 2 del Metro de Panamá. La ingeniería de los sistemas de la línea 2 del Metro de Panamá está de acuerdo con los requisitos de las normas EN 50126, EN 50128, EN 50129 y EN 50159[17][21].

Tabla 12. Normas de ingeniería ferroviaria para la línea 2 del Metro de Panamá[63]

Código	Título
EN 50126	Aplicaciones ferroviarias. Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad (RAMS). Parte 1: Procesos RAMS genéricos.
EN 50128	Aplicaciones ferroviarias. Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento. Software para sistemas de control y protección del ferrocarril.
EN 50129	Aplicaciones ferroviarias. Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento. Sistemas electrónicos relacionados con la seguridad para la señalización.
EN 50159	Aplicaciones ferroviarias. Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento. Comunicación relacionada con la seguridad en sistemas de transmisión.

2.1.8 Justificación

El objetivo de este trabajo de fin de titulación (TFT) es satisfacer los requisitos del programa de postgrado de titulación propia E.05.D420.01 - CONTROL, MANDO Y SEÑALIZACIÓN FERROVIARIAS. Este TFT orientado a la aplicación de las competencias generales asociadas a la titulación de postgrado de titulación propia E.05.D420.01 - CONTROL, MANDO Y SEÑALIZACIÓN FERROVIARIAS con el propósito de integrar y desarrollar la formación, capacidades y habilidades adquiridas para realizar un análisis de la capacidad del CBTC del modelo convencional al autónomo GoA4 para el CBTC n aplicadas al contexto de la línea 2 del Metro de Panamá. Se añade que la caracterización de la línea 2 del Metro de Panamá constituye una herramienta didáctica para los cursos de ingeniería, diplomados y postgrado de la Universidad Tecnológica de Panamá. Este TFT se desarrolla con el propósito de servir de base conceptual para el desarrollo de las futuras publicaciones científicas del grupo de investigación *Panama Railway Engineering Research Group*.

2.1.9 Objetivos

Los objetivos de este trabajo de fin de titulación son los siguientes:

2.1 Analizar el incremento de capacidad del sistema ferroviario del modelo convencional al autónomo GoA4 para el CBTC de la línea 2 del Metro de Panamá.

2.2 Caracterizar la línea 2 del Metro de Panamá para fines de investigación y docencia como material didáctico de los cursos de grado, diplomados y postgrado de la Universidad Tecnológica de Panamá.

3.METODOLOGIA

La metodología usada para elaborar los requisitos genéricos de seguridad se basa en los principios de las fases de ciclo de vida descritas en la Norma IEC 62278. La figura 20 muestra la presentación en V de ciclo de vida del sistema y se destacan las actividades de la metodología.

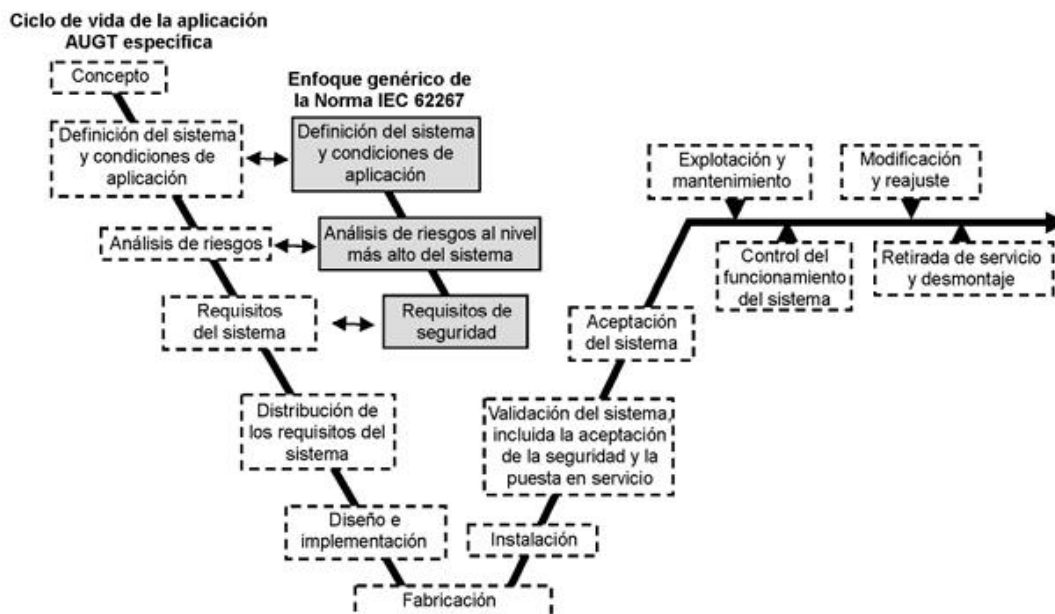


Figura 20. Fases del ciclo de vida cubiertas por esta norma (véase la figura 10 de la Norma IEC 62278 o figura 1 de la Norma UNE_EN 62267).

La metodología consta de la siguiente secuencia de actividades (que se muestra en las zonas sombreadas de la figura 20):

- «• la definición de un sistema AUGT genérico y sus condiciones de aplicación;
- la realización de un análisis de riesgos al nivel más alto del sistema;
- la obtención de los requisitos de seguridad;» [2]

La norma UNE-EN 62267 titulada: Aplicaciones ferroviarias. Transporte urbano guiado automáticamente (AUGT). Requisitos de seguridad, cubre «cubre los requisitos de seguridad de alto nivel aplicables a sistemas de transporte urbano guiado automáticamente, compuestos por vehículos automotores sin máquinas o sin tripulación, que circulan por una vía propia»[2]. Existen en la literatura varios autores que han realizado publicaciones científicas sobre la norma UNE-EN 62267 [6], [64], [65], [66], [67].

Los sistemas CBTC modernos permiten diferentes grados de automatización (*Grade of Automation*, GoA), según se define en la norma IEC 62290-1. De hecho, CBTC no es necesariamente sinónimo de “tren automático o sin conductor”, aunque suele considerarse una tecnología básica para este objetivo.

Los grados de automatización posibles permiten desde un modo de operación manual con protección, hasta el modo de operación completamente automático. Siendo los niveles siguientes:

- **GoA 0** (empleado como modo de emergencia, más habitual en formaciones ferroviarias con cabina de conducción y en el cual el conductor tomar todas las decisiones cruciales e interpretación de señales para un completo manejo de la formación.),
- **GoA 1** (empleado habitualmente como modo degradado o bien como una parte importante para hacer que los pasajeros se sientan más seguros al tener a un agente a bordo, esto porque aquí es donde el conductor aun maneja un papel importante en la aceleración, frenado y apertura de puertas de la formación por se, pero si este ignora una señal de parada en vía con semáforo en rojo o alguna orden desde un puesto de control central el sistema puede reaccionar deteniendo la formación aun sin precisar la orden de frenado del conductor. esto en pro de mejorar la seguridad y reducir la incidencia de accidentes ferroviarios que han ocurrido por excesos de velocidad, nula actuación del conductor por trenes en mal estado o interpretación).
- **GoA 2** (Semi-automated Train Operation, STO, aun con presencia de un conductor, sin embargo, aquí ya toma un papel de apertura y cierre de puertas, así como activar la aceleración de la formación para que esta responda a los canones que indiquen las señales y los bloques de radiofrecuencia de los equipos a bordo, asimismo como catalizador y apoyo durante alguna emergencia que se pueda suscitar).
- **GoA 3** (Driverless Train Operation, DTO). Este último opera sin conductor en cabina, pero con la presencia de un asistente a bordo del tren para hacer frente a situaciones degradadas y guiar a los pasajeros en emergencias.
- **GoA 4** (Unattended Train Operation, UTO, aquí es un modo completamente automático sin intervención humana de por medio dentro de la formación, es decir sin siquiera tener un conductor de facto o bien alguna clase de personal de tren que pueda hacer frente a algunas situaciones).

Asimismo, todos estos tipos de control automático ya sean semi-manuales o mixtos, pasando por otros posibles modos de conducción, son los que puede manejar el CBTC sin problema alguno (como se mencionó anteriormente, es la base para que pueda hacerse una transición a sistema completamente automático sin intervención humana dentro de la formación), sin embargo, debemos recordar que, a mayor nivel de automatización, mayores niveles de seguridad, funcionalidad y rendimiento se hacen necesarios.

La tabla 13 presenta los distintos grados de automatización y su relación con las funciones básicas para la explotación del tren de acuerdo con lo indicado en la norma UNE-EN 62267. Aplicaciones ferroviarias. Transporte urbano guiado automáticamente (AUGT). Requisitos de seguridad [2].

Tabla 13. Grado de automatización [2]

Nota X= Responsabilidad del personal de explotación (puede llevarlo a cabo el sistema técnico) S= Llevado a cabo por el sistema técnico						
Funciones básicas para la explotación del tren		Explotación del tren en conducción marcha a la vista TOS	Explotación no automática del tren NTO	Explotación semiautomática del tren STO	Explotación del tren sin maquinista	Explotación del tren sin tripulación UT0
		GOA0	GOA1	GOA2	GOA3	GOA4
Garantizar el movimiento seguro de los trenes	Garantizar la seguridad de los itinerarios	X (mando y control de los cambios por sistema)	S	S	S	S
	Garantizar la separación segura de los trenes	x	S	S	S	S
	Garantizar la velocidad seguridad de los trenes	x	X (supervisado parcialmente por el sistema)	S	S	S
Conducción	Controlar la aceleración y el frenado	x	x	S	S	S
Supervisar la vía	Evitar la colisión con obstáculos	x	x	x	S	S
	Evitar la colisión con personas	x	x	x	S	S
Supervisar el embarque y desembarque de pasajeros	Controlar las puertas del tren	x	x	x	X o S	S
	Evitar daños a personas entre coches o entre el andén y el tren	x	x	x	X o S	S
	Garantizar las condiciones seguras de puertas en marcha del tren	x	x	x	X o S	S
Poner un tren en explotación	Poner el tren en explotación o poner el tren fuera de servicio	x	x	x	X	S
	Supervisión del estado del tren	x	x	x	X	S
Garantizar la detección y la gestión de las situaciones de emergencia	Realizar el diagnóstico del tren, detectar fuego/ humo y detectar descarrilamientos, gestionar situación de emergencia (llamada/evacuación, supervisión)	x	x	x	X	S y/o miembros del personal del CRC

3.1 Estado de arte

La tabla 14 presenta un resumen de experiencias anteriores sobre la aplicación de los requisitos de seguridad de la norma IEC 62278 en sistema de vehículos autónomos.

Tabla 14. Estado del arte

1: Artículo de revisión 2: Artículo de investigación 3: Tesis 4: Otros							
Autor	Año	1	2	3	4	Organización	País
Kaczorek <i>et al.</i> , [68]	2022	x				Railway Research Institute	Polonia
Dey[66]	2021	x				Ajou University	Corea
Greiner-Fuchs[65]	2024		x			Institute of Vehicle System Technology, Railway Systems, Karlsruhe Institute of Technology	Alemania
Lott <i>et al.</i> , [64]	2021		x			National Renewable Energy Laboratory, Univ. of North Carolina, Automated Mobility Services	USA
Gesmann-Nuissl[69]	2022		x			Chemnitz University of Technology	Alemania
Kour[70]	2023	x				Luleå University of Technology	Suecia
Tagiew [71]	2024		x			German Centre for Rail Traffic Research (DZSF)* at the Federal Railway Authority	Alemania
Yarza[72]	2024				x	AEiC 2024	España
Hyde <i>et al.</i> , [73]	2022		x			School of Engineering, Newcastle University, University of Nis, University of Bremen	Uk, Serbia y Alemania
Ciancabilla y Griebel, [74]	2018				x	Urban rail survey group	UE
Norma UNE-EN 13816 [3]	2003				x	AENOR, CENELEC	UE
Norma UNE-EN 62267 [2]	2011				x	AENOR, CENELEC	UE
Etxebarría-García [75]	2022			x		Universidad de Mondragón	España
Domínguez-Fernández [76]			x			INECO	España
Rispoli[77]	2020		x			Hitachi Rail STS	Italia
Formato <i>et al.</i> , [78]	2023		x			Hitachi Rail STS	Italia
Uranga [79]	2020			x		Universidad Torcuato Di Tella	Argentina
Suzarte-Vásquez[80]	2020			x		Universitat Oberta de Catalunya	España
Sanz-Checa[81]	2023			x		Universidad Politécnica de Madrid	España
Navarro-Álvarez [82]	2020			x		Universidad del desarrollo	Chile
Gómez-Lobo y Price [83]	2020				x	Inter-American Development Bank	USA
Suarez[84]	2020			X		Universidad Torcuato di Tella	Argentina
Ruiz-García [85]	2021			x		Universidad Politécnica de Madrid	España
de Paco-Escámez [86]	2024			x		Universidad Politécnica de Valencia	España
Díaz-Feter[87]	2017			x		UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	España
Zhang <i>et al.</i> , [88]	2021		x				
Ha [89]	2021		x			University of Transport and Communications, University of Poitiers y University of Luxembourg	Vietnam, France, Luxembourg

Atilgan[90]	2021		x				Francia
Chen <i>et al.</i> , [91]	2024		x			Huaqiao University, Tongji University, CASCO Signal Ltd	China
Tefek <i>et al.</i> , [92]	2022		x			Advanced Digital Sciences Cente, University of Illinois at Urbana Champaign	Singapore, USA
Ma [93]	2023		x			Beijing University of Technology	China
Huang y Huang[94]	2021		x			School of Automatic Control, College of Chemistry and Environment, Liuzhou Railway Vocational Technical College, Liuzhou	China
Lu [95]	2021		x			Beijing Jiaotong University, Beijing Northeastern University, Shenyang, Jiaotong University	China
Chen [96]	2024		x			China Machinery Huanyu Certification And Inspection Co., Ltd.	China
Ngadiron <i>et al.</i> , [97]	2024		x			Gustave Eiffel University, JUNIA Engineering School, Software and IT Engineering Department, École de Technologie Supérieure (ÉTS)	Francia
Dagli[98]	2020		x			MEHMET ALI DAGLI Aselsan Electronics Industry and Trade, Inc	Turquía
Qiu <i>et al.</i> , [99]	2024		x			Shanghai Institute of Technology	China
Xun <i>et al.</i> , [100]	2022		x			Beijing Jiaotong University, University of Leeds, Southwest Jiaotong University	China, Ru,
Felez <i>et al.</i> , [101]	2019		x			Universidad Politécnica de Madrid	España
Felez <i>et al.</i> , [102]	2022		x			Universidad Politécnica de Madrid	España
Li <i>et al.</i> , [103]	2024		x			Shanghai Institute of Technology, Shanghai Metro First Operation Co., Ltd	China
Ge <i>et al.</i> , [104]	2025		x			Swinburne University of Technology	Australia
Yang <i>et al.</i> , [105]	2022		x			Beijing Jiaotong University,	
Ge <i>et al.</i> , [106]	2024		x			Swinburne University of Technology	Australia
Aakanksha <i>et al.</i> , [107]			x			Delhi Technological University	India
Zhang <i>et al.</i> , [108]	2023		x			Beijing Jiaotong University,	China
Felez <i>et al.</i> , [109]	2023		x			Universidad Politécnica de Madrid	España
Li <i>et al.</i> , [110]	2024		x			Beihang University, University of Sussex, University of Glasgow, Tsinghua University	China
Vaquero-Serrano y Felez[111]	2023		x			Universidad Politécnica de Madrid	España
Verma <i>et al.</i> , [112]	2021		x			RAILENIUM, COSYS, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, Univ Lille	Francia
Wu <i>et al.</i> , [113]	2021		x			Beijing Jiaotong University, Traffic Control Technology Company Ltd, National Engineering Laboratory	China

					for Urban Rail Transit Communication and Operation Control	
Fantechi <i>et al.</i> , [114]	2022		x		Beijing Jiaotong University	China
Chai <i>et al.</i> , [115]	2024		x		Beijing Jiaotong University, National Railway Track Test Center,	China
Jiao <i>et al.</i> , [116]	2024		x		Beijing Jiaotong University, National Railway Track Test Center,	China
Yuan <i>et al.</i> , [117]	2022		x		Beijing Jiaotong University, Zhengzhou University, University of Twente, Southeast University, Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited	China, Países bajos,
Liu <i>et al.</i> , [118]	2024		x		State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, City University of Hong Kong, Beijing Jiaotong University, Beijing Institute of Technology, Zhengzhou University, Shanghai Jiao Tong University, University of Sydney	China, Australia
Wang <i>et al.</i> , [119]	2024		x		Southeast University, University of Warwick	China, RU
Zemen <i>et al.</i> , [120]	2024		x		University of Southern California, Espol, NIT Durgapur, Beijing Jiaotong University, University of South Carolina, Niigata University, Tokyo Institute of Technology, Durham University, Nokia Bell Labs, University of Southern California	USA, Ecuador, China, Japón,
Rajatheva <i>et al.</i> , [121]	2020		x		University of Oulu, Linköping University, University of Cassino and Southern Latium, Kadir Has University, Universitat Politècnica de Valencia, Beijing Jiaotong University, Beijing Engineering Research Center of High-speed Railway Broadband Mobile Communications ZTE Corporation, University of Technology Sydney, Manchester Metropolitan University, King Abdullah University of Science and Technology, Chalmers University of Technology, National University of Singapore, Huawei Technologies	Finlandia, Suecia, Italia, Turquía, Australia, North-eastern University, Luleå University of Technology, Alemania, Arabia Saudi, Singapur

Narouwa <i>et al.</i> , [122]	2024		x		Gustave Eiffel University, JUNIA Engineering School, Software and IT Engineering Department, École de Technologie Supérieure (ÉTS)	Francia, Canadá
-------------------------------	------	--	---	--	--	-----------------

Kaczorek *et al.*, [68], Dey[66] y Kour[70] se realizan revisiones sobre los aspectos de seguridad de los sistemas de vehículos autónomos. En Kaczorek *et al.*, [68], se presentaron hallazgos relacionados con la escasa aplicabilidad de la interoperabilidad ferroviaria a los sistemas de transporte de tipo hyperloop en su etapa temprana de desarrollo, así como los desafíos y los enfoques propuestos para el enfoque de coherencia dedicado al hyperloop: la hiperoperabilidad tal como se está discutiendo en el marco del proyecto europeo Hypernex.

La revisión de Dey[66] se refirió a los esfuerzos realizados en los últimos quince años para fomentar la seguridad en sistemas inteligentes complejos. Esta revisión sobre aspectos relevantes de la investigación de seguridad de la IA, incluyendo la ingeniería de requisitos de seguridad, el diseño impulsado por la seguridad tanto a nivel de sistema como de componente de aprendizaje automático (ML), validación y verificación desde la perspectiva de los ingenieros de software y sistemas. En Dey[66] se categorizó estos esfuerzos de investigación con base en un marco conceptual de tres capas para el desarrollo y mantenimiento de sistemas de IA y realizó un análisis de brechas para enfatizar los desafíos de investigación abiertos para garantizar una IA segura y presentó una hoja de ruta para la seguridad de la IA.

Kour *et al.*, [70] realizó otra revisión esbozando las tendencias y enfoques emergentes de la ciberseguridad, y también identificó posibles soluciones consultando literatura, académica e industrial, para direcciones futuras. Kour *et al.*, [70] realizaron búsquedas separadas a través de cuatro bases de datos populares, es decir, Google Scholar, Scopus, Web of Science e IEEE explore. Para el proceso de selección, Kour *et al.*, [70] utilizaron palabras clave con operadores booleanos y filtros de bases de datos e identificaron 90 artículos más relevantes para el dominio de estudio. El análisis de estos 90 artículos mostró que la mayoría de los estudios de ciberseguridad que se encuentran dentro de los ferrocarriles son conceptuales y están rezagados en la aplicación de la seguridad basada en Inteligencia Artificial (IA). Kour *et al.*, [70] consideró que al igual que otras industrias, es muy importante que los ferrocarriles también sigan las últimas tecnologías de seguridad, tendencias y capaciten a su fuerza laboral para la higiene cibernética, ya que los ferrocarriles ya están en modo de transición a la digitalización.

Los autores Greiner-Fuchs[65], Lott *et al.*, [64], Gesmann-Nuissl[69] y Tagiew [71] realizaron artículos de investigación con respecto al tema de la seguridad en vehículos autónomos como los ferrocarriles. Greiner-Fuchs[65], estableció un marco para una taxonomía del dominio del diseño operativo específico para el ferrocarril. En Greiner-Fuchs[65], la definición de un sistema ferroviario automatizado se sometió a un análisis y una especificación exhaustivos. Cuando corresponde, se transfirieron directamente elementos del estándar automotriz, mientras que otros se rediseñaron para adecuarse a los requisitos específicos del sector ferroviario. En algunos casos, se eliminaron secciones intransferibles y adaptables, mientras que se añadieron nuevos atributos. Al definir la taxonomía y sus atributos, el enfoque de Greiner-Fuchs[65] se centró principalmente en las condiciones ferroviarias típicas y las tareas operativas, lo que lo diferencia claramente de la conducción automatizada en el sector automotriz. Greiner-Fuchs[65] contribuyó al establecimiento de un marco estandarizado para definir las condiciones operativas de las

operaciones ferroviarias automatizadas, allanando así el camino hacia sistemas ferroviarios más eficientes y sostenibles.

Lott *et al.*, [64] describió una visión de un sistema de tránsito totalmente automatizado que comprende una flota de vehículos automatizados (VA) en operación sin conductor, cada uno con un Sistema de Conducción Automatizada SAE nivel 4, junto con su infraestructura de seguridad relacionada y otros equipos del sistema. Este control a nivel de sistema de VA se comparó con el sistema de control automático de trenes utilizado en la tecnología de tránsito automatizado de carriles-guía, en particular el control de trenes basado en comunicaciones (CBTC). A partir de los principios de seguridad, los métodos de análisis y las evaluaciones de riesgos de los sistemas CBTC, Lott *et al.*, [64] se propusieron definiciones comparables de subsistemas funcionales para flotas de VA en operación sin conductor. Ante la perspectiva de múltiples flotas de VA operando dentro de un único distrito de movilidad automatizada, la importancia de proteger los cruces de carreteras requiere un enfoque similar al de los sistemas de tránsito automatizados de carriles-guía fijos, en el que un enclavamiento de zonas de cambio de carril en cada cruce descongestiona el tráfico ferroviario, garantizan un paso seguro. El subsistema de seguridad de protección de vehículos autónomos (AV) análogo se define como un equipo de seguridad que monitoriza las intersecciones y cruces de carreteras, comunica el estado de las señales de tráfico, detecta y comunica alertas y señales a los vehículos conectados a AV sobre posibles condiciones inseguras, y desempeña las funciones de seguridad primarias relacionadas. Lott *et al.*, [64] concluyó que las funciones de protección de los AV en las intersecciones de carreteras deben ser realizadas por equipos locales de carretera dedicados a proteger cada intersección y cruce. Además, se concluyó que la tecnología de comunicaciones que conecta la infraestructura con el vehículo para proporcionar esta protección vital de seguridad debe cumplir criterios funcionales y de rendimiento específicos.

De acuerdo con Gesmann-Nuissl[69] la inteligencia artificial (IA) promete importantes ganancias en la productividad, seguridad y conveniencia a través de la automatización. A pesar de la euforia asociada, se debe tener cuidado para garantizar que ningún producto inmaduro e inseguro ingrese al mercado, especialmente en áreas de alto riesgo. Por lo tanto, los sistemas de inteligencia artificial se integrarán en el sistema de seguridad de productos existente de la Unión Europea mediante la regulación de IA planificada. De acuerdo con Gesmann-Nuissl [69] esto se logra vinculando horizontalmente el borrador de regulación de IA (AI-Act) con los actos legales de armonización existentes que garantizan la seguridad de los productos y prevén un sistema complejo de conceptos de aprobación y prueba para este propósito. Gesmann-Nuissl[69] consideró que el sector ferroviario no es una excepción, por lo que los posibles sistemas de IA para monitorear vías o la detección de trenes simple y precisa también están sujetos a este régimen de aprobación. En Gesmann-Nuissl[69] se destacó cuáles son los desafíos que existen en el sector ferroviario en el camino hacia sistemas de IA verificables en este contexto regulatorio.

En Tagiew *et al.*, [71] abogó por la introducción de una métrica de rendimiento del usuario final orientada al ferrocarril principal para sistemas de percepción a bordo que reemplazan a los conductores. Se analizó la percepción en la cabeza del tren y se dividió en varias subfunciones. Tagiew *et al.*, [71] presentó una submétrica preliminar para la subfunción de detección de obstáculos, centrándose en los falsos negativos. Hasta donde sabían los autores, no existe otra propuesta similar para sistemas de percepción a bordo del ferrocarril. Según Tagiew *et al.*, [71] un conjunto de submétricas para las subfunciones debería facilitar la comparación de sistemas de percepción orientada al usuario final y guiar la medición del rendimiento del conductor humano. También debería ser útil para una evaluación predictiva estandarizada del número de accidentes para un sistema de percepción dado en un dominio

de diseño operativo específico.

Hyde *et al.*, [73] introdujo el concepto de sistemas de Detección de Obstáculos y Detección de Intrusión en Vía (OD&TID) relacionados con la operación de trenes, junto con un concepto potencial para dicho sistema. El enfoque principal de Hyde *et al.*, [73] es la identificación y descripción de los requisitos del sistema y Casos de Uso (UC), su clasificación detallada, incluyendo UC generales para ferrocarriles de línea principal y UC específicos para mercancías, así como un análisis de los UC y del método utilizado. Los UC identificados se han organizado con respecto al modo de operación, Grado de Automatización (GoA) y condiciones de operación. Los UC se analizaron más a fondo en diferentes escenarios de UC, incluyendo las condiciones previas, la respuesta del sistema, las acciones realizadas por OD&TID y los sistemas asociados y las condiciones posteriores al uso de los escenarios. La prioridad para la implementación y la complejidad de cada UC se discuten con respecto a la probabilidad de ocurrencia del escenario y las interfaces requeridas. El trabajo de Hyde *et al.*, [73] se llevó a cabo como parte del proceso de evaluación de las limitaciones, riesgos y requisitos de implementación, y los escenarios operativos del OD&TID desarrollado dentro del proyecto SMART2 de Shift2Rail, financiado por la UE, que tuvo como objetivo diseñar y desarrollar un prototipo de sistema OD&TID.

El grupo de estudio sobre ferrocarriles urbanos de Ciancabilla y Griebel [74] identificó la necesidad de una nueva norma que abarque la señalización en tranvías y otros sistemas ferroviarios urbanos que no se ajustan directamente a las normas ferroviarias o de carreteras existentes. Este sería el caso típico de partes de los sistemas que se encuentran fuera de la vía pública y que operan con señalización de "línea de visión" o de bloqueo automático con control intermitente de trenes (es decir, como se define en la norma IEC 62290 [2]: GOA0 y GOA1 con sistemas de control intermitente).

De acuerdo a Etxebarria-García [75] los vehículos autónomos se presentan como una realidad cada vez más común, por ejemplo *«trenes GOA3-GOA4 en el dominio ferroviario o vehículos guiados automáticamente en el dominio industrial»*. Los sistemas autónomos tienen la capacidad de llevar a cabo tareas complejas que les permiten percibir su entorno y tomar decisiones, a menudo con poca o ninguna intervención humana. En este contexto, la localización y la estimación del movimiento se convierten en funciones críticas para el funcionamiento de un vehículo autónomo. Contar con información precisa sobre su posición es fundamental para que el vehículo pueda entender su contexto y entorno, y así moverse o actuar de manera adecuada con técnicas de visión por computador en sectores como robótica móvil, drones o automóviles autónomos. No obstante, la implementación y evaluación de soluciones basadas en visión por computadora (CV) son más restringidas en el ámbito ferroviario debido a la complejidad características del sector ferroviario.

Con respecto al impacto habría en la ETI CCS para incorporar niveles más automatizados del transporte guiado para garantizar el movimiento sin restricciones de los trenes y, por otro lado, crear un único mercado para los componentes ferroviarios en Domínguez-Fernández [76] se indica que las especificaciones del ATO cubrirán progresivamente los siguientes Grado de automatización (GoA): GoA2, GoA3 y GoA4 respectivamente. El grado GoA2 corresponde a la conducción automática, aunque el conductor siga presente en la cabina del tren, para retomar el control del tren cuando sea necesario. El grado GoA3 se refiere a la conducción automática sin chofer, pero hay otro personal embarcado dentro del tren, para retomar el control del tren cuando sea necesario y el grado GoA4 es la conducción automática del tren sin la presencia de personal embarcado dentro del tren. Domínguez-Fernández [76] indica que en todos de los grado de automatización GoA2, GoA3 y GoA4

se requiere desarrollo tecnológico. Domínguez-Fernández [76] indica que para una implementación eficiencia de grado GoA2, son necesarios dos contribuciones o desarrollos adicionales:

«una arquitectura de datos entre el puesto de mando y los sistemas ATO de infraestructura que permita las paradas necesarias tanto en situaciones nominales como en situaciones degradadas de perturbación en la red»[76].

«una arquitectura de datos en el vehículo que permita al sistema ATO embarcado realizar un cálculo de velocidad para conseguir una conducción que minimice el consumo energético manteniendo el control de horario»[76].

Con respecto a la implementación del nuevo sistema ATO con grado GoA4, es necesario un nuevo desarrollo o contribución tecnológica que sea adecuada para la detección de obstáculos sobre todos en los túneles [73] [76].

Rispoli [77] consideró que el crecimiento de los sistemas de telecomunicaciones celulares y satelitales, con la introducción del 5G y los satélites móviles de banda ancha, está creando una infraestructura de telecomunicaciones global y omnipresente que ofrece servicios de conectividad en cualquier lugar del mundo. De acuerdo con Rispoli [77], el sistema 5G proporcionará latencias de milisegundos y capacidades de segmentación de red, ideales para implementar redes virtuales a medida. Se está lanzando una nueva generación de pequeños satélites en órbitas terrestres bajas que prometen un menor costo y un rendimiento mucho mayor, con una latencia inferior a 100 m/s. El Sistema Europeo de Gestión de Trenes (ERTMS) utiliza, desde su concepción a principios de la década de 1990, GSM-R como red de telecomunicaciones heredada que conecta los trenes con el Centro de Bloques de Radio. Esta tecnología deberá ser sustituida a medida que se acerque al final de su vida útil y no pueda satisfacer la creciente demanda de conectividad para las nuevas aplicaciones ferroviarias. La UIC ha definido las necesidades de los usuarios del Futuro Sistema de Comunicación Móvil Ferroviaria (FRMCS), uno de los elementos innovadores del ERTMS, y los socios de Shift2Rail – X2Rail-1 han acordado adoptar el ACS (Sistema de Comunicación Adaptable) como arquitectura sucesora del GSM-R. Rispoli [77] abordó en su estudio las nuevas necesidades ferroviarias con el objetivo de compartir redes públicas de telecomunicaciones celulares y satelitales. Rispoli [77] evaluó un sistema multiportador abierto, coherente con ACS y FRMCS, como alternativa o complemento a una red dedicada. Los diversos escenarios posibles con diferentes longitudes de línea y trenes en funcionamiento demostraron importantes reducciones de costes al agrupar portadoras celulares y satelitales para lograr la calidad de servicio (QoS). Rispoli [77] evaluó los beneficios adicionales como la posible reducción de nuevo espectro para las aplicaciones FRMCS, menores emisiones de CO₂ y una operación más rápida. Además, Rispoli [77] destacó el papel de las nuevas comunicaciones por satélite de alto rendimiento para satisfacer la creciente demanda de conectividad ferroviaria y ampliar la cobertura de los futuros servicios 5G en el ecosistema ferroviario

La eficiencia energética en el sector ferroviario está altamente influenciada por la estrategia de conducción adoptada por el conductor, considerando los horarios programados y la normativa del TMS. Una estrategia de conducción eficiente, combinada con una buena regulación, puede reducir significativamente los costos operativos, mejorar la calidad del servicio y aumentar la sostenibilidad ambiental. El sector ferroviario muestra un creciente interés en los algoritmos de ahorro energético, combinados con el Sistema de Asesoramiento al Conductor (DAS) o la Operación Automática de Trenes (ATO), integrados con la información del TMS. En Formato *et al.*, [78] se abordó el aspecto energético,

considerando la programación de horarios y la regulación del TMS. En Formato *et al.*, [78] se centró en la definición de perfiles de velocidad adecuados para optimizar las limitaciones de tiempo del TMS y en la información del estudio. Formato *et al.*, [78] abordó el aspecto energético, considerando la programación horaria y la regulación del TMS de una arquitectura C-DAS de aplicación inmediata a una infraestructura.

Uranga [79], Suzarte-Vásquez[80], Sanz-Checa[81], Navarro-Álvarez [82], Suarez[84], Ruiz-García [85], de Paco-Escámez [86], Díaz-Feter[87] desarrollaron trabajo de fin de titulación tanto de grado como de maestría sobre incremento de la capacidad de un sistema CBTC. Otros trabajos como el de Uranga [79] realizaron un análisis de inversiones en la red del Subterráneo de Buenos Aires. Medición de impacto en volumen de pasajeros. Caso Línea A y B.

Los sistemas de comunicaciones inalámbricas han cobrado una relevancia muy significativa en los medios de transporte públicos. Tanto es así, que dichos sistemas impactan de forma directa en el rendimiento del transporte y en el valor añadido que pueden proporcionar tanto a los operadores de las infraestructuras como a los clientes. Suzarte-Vásquez[80] expuso los factores que se deben tener en cuenta a la hora de realizar el diseño de un sistema de comunicaciones tren-tierra de banda ancha en el contexto del transporte público ferroviario metropolitano suburbano. Suzarte-Vásquez[80] describió los principales servicios a considerar en el diseño del sistema y presentó las distintas problemáticas que afectan a la propagación de las señales radio en el entorno de un túnel y detalló las tecnologías más avanzadas que pueden facilitar el camino hacia la convergencia radio en el sector de la industria ferroviaria. Por último, para trasladar al ámbito práctico el conocimiento adquirido y presentar el conjunto de premisas que se debe abordar en el diseño de una red tren-tierra de banda ancha, se propuso un escenario de aplicación real que servirá como ejemplo para reflejar la complejidad subyacente en un despliegue de estas características. Suzarte-Vásquez[80] destacó el horizonte de posibilidades que existen para continuar desarrollando y avanzando en el campo de las radiocomunicaciones ferroviarias suburbanas, para evolucionar hacia un modelo de transporte eficiente, sostenible, seguro y en el que trenes y clientes dispondrán de una conectividad de alta velocidad.

Sanz-Checa[81] desarrolló en una herramienta de modelado de capacidad el módulo para calcular la potencia de cada transformador del proyecto cuando hay coincidencias de varias líneas en la misma subestación. De esta forma se completa la herramienta y se facilita el trabajo del usuario, evitando el cálculo de potencias de manera manual, realizándolo la interfaz automáticamente.

Navarro-Álvarez [82] presentó un sistema de comunicaciones de movilización ferroviaria para transporte de pasajeros de la ciudad de Santiago, enmarcado en su fase de diseño, caracterizado por poseer alta disponibilidad a pesar de presentar fallos de servicio. Navarro-Álvarez [82] propuso un método de desarrollo de la arquitectura del sistema de comunicaciones ferroviario para la entrega de altos niveles de prestaciones. Para lograrlo se utilizó un enfoque cuantitativo, con iteraciones sobre una estrategia basada en definir, medir, analizar, mejorar y controlar, además del método de análisis deductivo conocido como diagramas de bloques de fiabilidad, y el método inductivo para análisis de vulnerabilidades del sistema llamado análisis de efectos y modos de fallos. Los resultados mostraron que la arquitectura propuesta para el sistema de comunicaciones logra el nivel de servicios requeridos según especificaciones de contrato. En conclusión, la metodología propuesta resultó viable y de fácil aplicación, permitiendo el diseño de un sistema de comunicaciones de altas prestaciones que contribuye a asegurar la oferta de transporte y

reduce las pérdidas por accidentes e indisponibilidad de infraestructura. Este método, dada sus características genéricas, puede ser utilizado para el diseño de otras prestaciones industriales de misión críticas.

Suarez [84] realizó un estudio para la transformación digital del servicio público de transporte ferroviario en el área metropolitana de Buenos Aires.

Ruiz-García [85] desarrollo un estudio de los sistemas de control y señalización ferroviarios a lo largo de los años, y la creación de una simulación de una estación con el software de Unity.

De Paco-Escámez [86], comparó el impacto de los diferentes sistemas de señalización ferroviaria en la capacidad y la explotación de una línea ferroviaria. Para ello, De Paco-Escámez [86] llevó a cabo un análisis detallado de dos escenarios de señalización ferroviaria. En primer lugar, se incluyó la introducción que establece el contexto y el propósito del estudio. A continuación, se detalló la infraestructura de referencia, los tiempos de viaje, la prognosis de tráfico y los horarios de los servicios ferroviarios. Más adelante, se analizó los dos escenarios de señalización. En cada escenario, se caracterizó la infraestructura de la línea ferroviaria y se calculó los intervalos mínimos entre circulaciones, se construyó la malla de circulación base y la malla de máxima capacidad para evaluar el nivel de saturación. Los resultados obtenidos mostraron los niveles de saturación en ambos escenarios.

Díaz-Feter[87] realizó un estudio sobre los beneficios de la automatización del Metro de Sevilla. Díaz-Feter[87] llevó a cabo un análisis sobre los pros y los contras de la automatización del metro de la ciudad de Sevilla, su viabilidad técnica y sobre la componente económica, con un presupuesto de inversión y costes operativos.

Ha *et al.*, [89] investigó el rendimiento de dos puntos de acceso (AP) con sistemas de control de tren basado en comunicación (CBTC) sometidos a un escenario de información del estado del canal (CSI) imperfecta. Primero Ha *et al.*, [89] modeló la distribución realista de desvanecimiento a pequeña escala, para la cual el receptor solo presentó la CSI desactualizada debido a la movilidad del tren. Ha *et al.*, [89] derivó la probabilidad de interrupción (OP) del tren y la capacidad ergódica del sistema en la expresión de forma cerrada basada en el modelo de canal considerado. Además, Ha *et al.*, [89] formuló un problema de optimización que minimiza la OP máxima, que corresponde a la ubicación del tren. Para ello, la relación señal-ruido (SNR) se minimizó en función de la posición de los dos AP. El método de búsqueda de patrones se utilizó para resolver el problema de minimización considerado. Los resultados numéricos confirmaron que, mediante la ubicación óptima de los AP, la OP puede mejorarse significativamente en comparación con otros métodos de ubicación. Además, los resultados numéricos ilustraron que la solución propuesta coincide completamente con la búsqueda exhaustiva, pero con un tiempo de cálculo mucho menor. Finalmente, el marco matemático se verificó ampliamente mediante simulaciones de Monte Carlo.

En Atilgan *et al.*, [90], el CBTC y su subsistema ATP se modelaron mediante autómatas de estados finitos con un enfoque de sistema de eventos discretos. Atilgan *et al.*, [90] demostró que los controladores supervisores correspondientes cumplen las condiciones de controlabilidad y de no bloqueo. Además, los resultados se compararon con la estructura del enfoque monolítico.

Chen *et al.*, [91] desarrolló un enfoque jerárquico para el desarrollo de requisitos de seguridad. El enfoque Chen *et al.*, [91] combinó el análisis STPA con un enfoque de modelado jerárquico para establecer vínculos de trazabilidad desde los requisitos de seguridad hasta arquitecturas específicas, afinó y asignó los requisitos de seguridad a nivel de sistema a los subsistemas relevantes, y abstraer los requisitos de seguridad en niveles jerárquicos superiores para facilitar cambios en implementaciones de nivel inferior. Chen *et al.*, [91] empleó la metodología mencionada en el contexto del sistema CBTC, mejorando así la gestión de riesgos y el análisis de peligros, permitiendo la comprensión temprana y facilitando la generación de requisitos de seguridad del sistema CBTC.

Ma *et al.*, [93] investigó el problema de selección del retransmisor de siguiente salto en redes ad hoc multisalto para minimizar el tiempo de transmisión, mejorar el rendimiento de la red y garantizar la calidad del canal. Además, Ma *et al.*, [93] propuso un algoritmo de aprendizaje profundo Q (DQN) de duelo multiagente para optimizar el retardo y el rendimiento de todo el enlace mediante la selección del nodo de retransmisión de siguiente salto. Los resultados de la simulación mostraron que, en comparación con los algoritmos de enrutamiento existentes, presentó una mejora significativa en cuanto al retardo, rendimiento y la tasa de pérdida de paquetes.

Lu *et al.*, [95] propuso un enfoque de evaluación basado en la resiliencia para medir el nivel de seguridad de los sistemas CBTC. Lu *et al.*, [95] adoptó la entropía de estructura bidimensional para describir el rendimiento del ciberdominio, y el del espacio físico se calculó según el horario práctico y los estados de circulación de los trenes. Con base en las etapas de los ataques, se utilizaron métricas de resiliencia para analizar el nivel de seguridad de toda la línea de metro, considerando tanto el ciberespacio como el espacio físico. Lu *et al.*, [95] construyó dos escenarios típicos de ataque, tomando como ejemplo una línea de metro práctica. Los resultados de la simulación mostraron que el enfoque basado en la resiliencia puede evaluar eficientemente el nivel de seguridad de los sistemas CBTC bajo diferentes ataques.

Chen *et al.*, [96] desarrolló un sistema avanzado de operación automática que abarca módulos clave como sistemas de enclavamiento, ATP a bordo, ATO terrestre y diagramas de simulación de funcionamiento. Mediante una arquitectura distribuida, el sistema permitió la simulación y el control eficientes de redes de líneas a gran escala. Tras múltiples rondas de pruebas y optimización, el rendimiento del sistema mejoró significativamente, con una capacidad de procesamiento de 48 000 solicitudes por segundo y un tiempo de respuesta de 18 ms. Las pruebas de campo en líneas reales demostraron que la fiabilidad del sistema alcanzó el 99,99 %, lo que mejoró significativamente la eficiencia operativa y la seguridad. Este logro supuso un importante apoyo para el desarrollo inteligente del transporte ferroviario urbano.

Dagli *et al.*, [98] propuso una nueva utilidad de comunicación para los sistemas de señalización del transporte urbano. Dagli [98] utilizó la tecnología de comunicación por luz visible (VLC) de vanguardia, mostramos cómo diseñar la iluminación de las líneas subterráneas como medio de comunicación entre los procesadores centrales y los trenes. Además de los sistemas de señalización, gracias al alto ancho de banda de la VLC, se puede soportar la transferencia de big data utilizada en otros sistemas, como la monitorización y la gestión de trenes en tiempo real. El diseño propuesto buscó dotar de nuevas funcionalidades a los sistemas de señalización convencionales recientes mediante la actualización de las bombillas por LED compatibles con VLC Dagli *et al.*, [98] consideró

que los sistemas convencionales existentes pueden actualizarse, implementarse nuevos medios de comunicación o añadir mayor redundancia y disponibilidad a los sistemas de comunicación inalámbrica actuales.

Comparación entre el CBTC y el sistema ECTS

Los sistemas de control garantizan operaciones ferroviarias seguras mediante

- (1) la monitorización y supervisión de la velocidad del tren,
- (2) la definición de la siguiente posición objetivo-permitida y
- (3) la activación de los sistemas de frenado automático.

De acuerdo con Martínez y Martin [123], el CBTC y el ECTS son 2 sistemas de control de trenes diferentes y se utilizan en las operaciones ferroviarias.

(1) el Control de Trenes Basado en Comunicaciones (CBTC), que es el que utiliza la línea 2 del Metro de Panamá. El CBTC se aplica a los sistemas de trenes ligeros y de transporte público urbano.

(2) los Sistemas Europeos de Control de Trenes (ETCS), mientras que el ETCS se utiliza para los sistemas ferroviarios pesados. Estos dos sistemas de control de trenes se han utilizado en todo el mundo durante más de 20 años. Aunque ambos sistemas comparten un campo de aplicación común, su alcance, funcionalidades y objetivos de automatización difieren.

En su análisis Martínez y Martin concluyen que una de las diferencias más importantes entre el CBTC y el ECTS se relaciona con su alcance. El ETCS se concibe como un sistema estandarizado y a prueba de fallos para la operación ferroviaria, mientras que los sistemas CBTC no están completamente especificados y cuentan con funcionalidades más integradas que permiten una automatización total, como las funcionalidades sin conductor relacionadas con la ATO y la reprogramación de trenes relacionada con el ATS, para mantener la puntualidad. El ETCS no pretende lograr una operación completamente automatizada, y las funcionalidades ATO y ATS no forman parte de su alcance. Sin embargo, estas funcionalidades se desarrollan por separado como sistemas externos compatibles con el ETCS para aplicaciones ferroviarias pesadas y ligeras (p. ej., sistemas de gestión del tráfico). No obstante, la pregunta sigue siendo si es razonable integrar estas funcionalidades. Sin embargo, la pregunta persiste: ¿es razonable integrar estas funcionalidades, considerando su interdependencia? Por ejemplo, los resultados de una operación segura (p. ej., la autorización de movimiento) son entradas del Sistema de Gestión de Tráfico (TMS). De esta manera, se podría lograr un mejor servicio para los usuarios ferroviarios y menores costos operativos para los operadores ferroviarios y los administradores de infraestructuras. Además, los sistemas CBTC funcionan bajo el principio de cantón móvil, utilizando principalmente una comunicación continua de radio tren-vía vía Wi-Fi, mientras que el ETCS podría utilizar la Operación de Cantón Fijo o la Operación de Cantón Móvil. La Operación de Cantón Fijo ya se ha especificado para el ETCS Nivel 1, que combina señales de vía, Eurobalizas controladas y circuitos de vía o contadores de ejes para una comunicación puntual vía-tren, y para el Nivel 2, que combina la comunicación de radio GSM-R y circuitos de vía o contadores de ejes para una comunicación continua tren-vía. Se espera que la Operación de Cantón Móvil se incluya en la especificación del ETCS Nivel 3, que está en desarrollo. El éxito del proceso de especificación ETCS Nivel 3 depende en gran medida de la definición de la próxima comunicación por radio para aplicaciones ferroviarias y de cómo lograr la integridad del tren.

En cuanto a las ventajas, el CBTC logró un mayor grado de automatización, implementó diversas funciones, incluyendo varios tipos de autodiagnóstico, y aplicó la Operación de Cantón Móvil con mayor rapidez que el ETCS. De hecho, la tecnología de radiocomunicación utilizada en los sistemas CBTC (Wi-Fi) podría no ser óptima para aplicaciones ferroviarias pesadas; su rápida evolución puede servir como lección aprendida para el ETCS Nivel 3; por ejemplo, para identificar factores clave durante la fase de planificación que garanticen una comunicación fluida entre el tren y la vía en entornos complejos. De igual manera, el ERMTS podría aprender de las buenas prácticas en cuanto a lógica de cantón móvil e integridad del tren ya implementadas en los sistemas CBTC para especificar el ETCS Nivel 3. Finalmente, los sistemas CBTC podrían aprender del ETCS en cuanto a interoperabilidad e intercambiabilidad. El ERMTS ya ha implementado estas características para los niveles 1 y 2 del ETCS, y está trabajando para alcanzar el mismo objetivo en la especificación del ETCS Nivel 3.

Métodos *Virtual coupling*

La metodología de *virtual coupling* para incrementar la capacidad del CBTC ha sido desarrollada un conjunto de autores como: Qiu *et al.*, [99], Xun *et al.*, [100], Felez *et al.*, [101], Felez *et al.*, [102], Li *et al.*, [103], Ge *et al.*, [104], Yang *et al.*, [105], Ge *et al.*, [106], Aakanksha *et al.*, [107], Zhang *et al.*, [108], Felez *et al.*, [109], Li *et al.*, [110], Vaquero-Serrano y Felez[111], Verma [112], Wu *et al.*, [113], Fantechi *et al.*, [114] y Chai *et al.*, [115],

Qui [99] considero que el método de *virtual coupling* es la última línea de investigación en comunicación entre trenes, la tecnología de formación de trenes con acoplamiento virtual ha atraído la atención de numerosos investigadores. Qui [99] estudió la influencia del retardo temporal en la formación de trenes acoplados virtuales. Qui [99] propuso un controlador PID distribuido, lo que significó que los trenes pueden seguir formando una flota estable bajo la influencia del retardo de comunicación y de control. Tras el modelado y el análisis, la investigación utilizó Matlab para realizar una simulación, que incluyó dos conjuntos de experimentos. Se simularon factores como la velocidad, la aceleración, la posición, el error de posición, la distancia esperada entre trenes adyacentes y la distancia real entre trenes adyacentes. Los resultados demostraron que el controlador PID distribuido puede controlar eficazmente el impacto del retardo temporal en la flota de acoplamiento virtual.

Para satisfacer el rápido crecimiento de la demanda de transporte ferroviario, se ha prestado gran atención a la tecnología que permite mejorar su capacidad. El Acoplamiento Virtual (VC) es una nueva tecnología que mejora la capacidad al reducir la distancia entre trenes sucesivos. Su principio básico consiste en controlar la operación de la formación de trenes de forma coordinada, manteniendo la misma velocidad mediante tecnologías de transmisión de datos como la comunicación entre trenes. En Xun *et al.*, [100] primero se revisó la investigación teórica existente sobre el control de la operación de la formación de trenes, dividida en cuatro categorías: seguimiento de trenes, control de retroalimentación, control óptimo y métodos de inteligencia computacional. En segundo lugar, Xun *et al.*, [100] mediante la revisión de proyectos relacionados en Europa y China, basados en el método de análisis de escenarios, se presentaron cinco escenarios generales y dos escenarios de emergencia en el proceso completo de operación del VC. A continuación, Xun *et al.*, [100] propuso una lista completa de indicadores de rendimiento (IP) para evaluar el rendimiento del VC en diferentes escenarios. Además, Xun *et al.*, [100] ofrece una breve perspectiva

sobre la operación del VC, proporcionando un contexto adecuado para comprender los IP propuestos.

Felez *et al.*, [101] presentó un enfoque novedoso en sistemas de control ferroviario basado en el concepto de acoplamiento virtual o convoyes ferroviarios. Este enfoque se basó en los recientes avances en el campo del pelotón seguro de vehículos autónomos. Felez *et al.*, [101] utilizó un marco de control predictivo de modelos (MPC) descentralizado para cada tren que participa en una formación de convoy. Felez *et al.*, [101] presentó diseños de control para los trenes líder y posterior. Felez *et al.*, [101] utilizó una formulación de control óptima para ambos controladores, cuyo diseño se basó en una solución numérica de un problema de control óptimo de horizonte finito. Felez *et al.*, [101] comparó el método propuesto con estrategias de control alternativas, incluyendo el concepto de control de trenes con bloques móviles, ampliamente estudiado. Felez *et al.*, [101] seleccionó el estudio de una línea de metro como primer análisis para este enfoque de control. Los resultados de la simulación para este tipo de líneas ferroviarias demostraron un mejor rendimiento y las ventajas de este nuevo concepto en comparación con el sistema de bloques móviles. Felez *et al.*, [101] Demostró que el concepto de acoplamiento virtual reduce sustancialmente la distancia entre trenes, a la vez que garantiza una separación segura entre dos trenes consecutivos en cualquier instante.

En las últimas décadas, la demanda de transporte ferroviario ha crecido de forma constante y se enfrenta a un doble problema. No solo es necesario aumentar la capacidad de transporte, sino también un servicio más flexible para satisfacer la demanda real. Ambos objetivos pueden lograrse mediante el acoplamiento virtual (VC), que supone una evolución de los sistemas de bloques móviles actuales. Los trenes bajo VC pueden circular mucho más cerca, formando lo que se denomina un conjunto de trenes virtualmente acoplados (VCTS). Felez *et al.*, [102] propuso un enfoque en el que el acoplamiento virtual se implementa mediante control predictivo de modelos (MPC). Felez *et al.*, [102] definió un controlador robusto para predecir basándose en un modelo dinámico del tren, el estado del sistema en momentos posteriores y tomar las decisiones de control adecuadas. Un MPC robusto (RMPC) se obtiene introduciendo dos variables inciertas. La primera se añade a la ecuación de aceleración del modelo dinámico, mientras que la segunda se utiliza para definir la incertidumbre en el posicionamiento del tren. Para probar el RMPC para el acoplamiento virtual, se realizaron dos casos de simulación para una línea de metro, analizando la influencia de ambas incertidumbres. En todos los casos, los resultados obtenidos mostraron un funcionamiento más seguro del acoplamiento virtual sin afectar significativamente el servicio.

Se espera que el acoplamiento virtual mejore principalmente la capacidad de un sistema ferroviario. Los sistemas acoplados virtuales se ven afectados por perturbaciones de múltiples fuentes debido a la complejidad del entorno operativo. Sin embargo, la investigación existente solo considera parcialmente los efectos de las perturbaciones estructurales o externas, lo que limita la estabilidad y robustez del conjunto de trenes acoplados virtualmente (VCTS). En Li *et al.*, [103], se buscó abordar los desafíos que surgen de las perturbaciones estructurales y externas en el acoplamiento virtual. Li *et al.*, [103] propuso específicamente una solución de control predictivo de modelos robustos distribuidos (DRMPC) basada en un modelo linealizado que integra el control de retroalimentación lineal y el control de avance en un marco de control predictivo de modelos (MPC) con un filtro de Kalman discreto (DKF). Li *et al.*, [103] derivó y demostró teóricamente un conjunto de condiciones suficientes para la estabilidad local y de la cadena bajo incertidumbre estructural. Las condiciones de estabilidad se incorporaron al espacio de

restricciones del marco MPC distribuido para garantizar la estabilidad del sistema en presencia de incertidumbres estructurales y externas. Los resultados de la simulación validaron que el método de control propuesto puede estabilizar la formación de pelotones de trenes bajo perturbaciones estructurales y externas. El método de control propuesto redujo particularmente los errores de seguimiento de espaciado y velocidad en aproximadamente un 97,55% y un 99,97% en promedio, respectivamente, en comparación con varias líneas de base.

El acoplamiento virtual de trenes automatizados se ha convertido en una tecnología prometedora para mejorar la eficiencia operativa y la capacidad de línea de los sistemas de transporte ferroviario. Sin embargo, la vulnerabilidad de estos sistemas a ciberataques maliciosos representa una amenaza significativa para su estabilidad, fiabilidad y aplicabilidad. Ge *et al.*, [104] abordó el reto de garantizar el control seguro del acoplamiento virtual de pelotones de trenes conectados, sujetos a diversos ciberataques, incluyendo ataques de inyección de datos falsos, ataques de denegación de servicio y ataques de repetición. En primer lugar, con base en las mediciones de sensores de baja dimensión y ruido, Ge *et al.*, [104] diseñó nuevos observadores con valores fijos para cada tren seguidor, con el fin de estimar sus estados de movimiento longitudinal completo inaccesibles, a pesar de las incertidumbres, ataques y ruidos desconocidos. Posteriormente, Ge *et al.*, [104] se desarrolló leyes de control de acoplamiento virtual distribuidas y seguras basadas en la compensación de ataques para garantizar la estabilidad y resiliencia del pelotón frente a ciberataques. Además, Ge *et al.*, [104] proporcionó un análisis formal de la estabilidad del sistema de error de estimación resultante y del sistema de error de seguimiento del pelotón. Asimismo, se presentaron dos algoritmos para elaborar el proceso de diseño del observador y el controlador fuera de línea, así como su implementación en línea. Finalmente, a partir de los datos de una línea de tránsito ferroviario urbano realista, Ge *et al.*, [104] realizó experimentos de simulación para validar la eficacia de los hallazgos teóricos propuestos.

Yang *et al.* [105] estudió principalmente el problema del acoplamiento dinámico bajo múltiples objetivos de optimización y múltiples restricciones. El acoplamiento virtual (VC), como nuevo modo de operación del tren, mejora eficazmente la eficiencia operativa de la línea, pero reduce el margen de seguridad entre trenes y requiere una mayor precisión de control. Como escenario importante de acoplamiento virtual, la formación dinámica no ha definido un conjunto de estrategias de control de trenes aplicables. Con el objetivo de Yang *et al.* [105] abordó el escenario de formación dinámica de trenes con acoplamiento virtual, se propone una arquitectura de control basada en el control predictivo de modelos distribuidos (DMPC). La simulación numérica con Matlab verifica la eficacia del algoritmo de este artículo. Los resultados de la simulación mostraron que el tren cumple las restricciones operativas. En comparación con el control PID, el método de este artículo es más eficaz y preciso.

Aakanksha *et al.*, [107] exploró la integración de la tecnología 5G en la infraestructura ferroviaria india mediante la implementación del Acoplamiento Virtual de Trenes (VC). Los sistemas tradicionales de acoplamiento de trenes se sustituyen por conexiones virtuales facilitadas por las redes 5G, lo que promete mejoras significativas en eficiencia, seguridad y flexibilidad operativa. El acoplamiento virtual elimina la necesidad de conexiones físicas entre trenes, lo que les permite operar en estrecha proximidad sin restricciones. Aprovechando la velocidad y la baja latencia del 5G, los trenes se comunican en tiempo real, ajustando la velocidad y la distancia según las condiciones del entorno. Esto mejora la seguridad al minimizar el riesgo de accidentes y descarrilamientos.

El estudio de Aakanksha *et al.*, [107] calculó las posibles mejoras de eficiencia en las vías ferroviarias indias con la adopción del VC. Además, destacó la naturaleza adaptable de los trenes una vez establecidas las conexiones virtuales, especialmente beneficiosa en los desvíos y las estaciones donde la flexibilidad operativa es crucial.

Una de las principales ventajas del VC es su capacidad para formar y disolver dinámicamente trenes, reduciendo los tiempos de respuesta y optimizando los horarios. Esto contribuye a una mayor eficiencia operativa y a una mejor adaptación a las necesidades de carga para cada viaje. Aakanksha *et al.*, [107] tuvo como objetivo implementar la señalización 5G para mejorar la eficiencia de las vías ferroviarias existentes en India, lo que representó un avance significativo en la infraestructura de transporte ferroviario del país. Al adoptar la conectividad virtual (VC) con 5G, los Ferrocarriles Indios pueden mejorar la seguridad, la eficiencia y la experiencia de los pasajeros, allanando el camino para una red ferroviaria modernizada e interconectada Zhang *et al.* [108],

En la investigación sobre la nueva generación de sistemas inteligentes de tránsito ferroviario, la prevención de accidentes por colisión de trenes sigue siendo un enfoque. La tecnología de acoplamiento virtual controla la velocidad de circulación y la distancia de intervalo de dos o más trenes de forma cooperativa a través de la tecnología de comunicación directa Tren a Tren (T2T). El objetivo es formar un sistema lógico coordinado y completar conjuntamente el control y despacho de trenes. En Li *et al.*, [110] se propuso un método de control de formación de trenes de acoplamiento virtual basado en el marco de control predictivo de modelos (MPC). A partir del establecimiento del sistema de acoplamiento virtual, la construcción de un modelo MPC y un método de desacoplamiento, se estudió cómo integrar la tecnología de acoplamiento virtual en la protección contra colisiones de trenes de tránsito ferroviario. La seguridad y confiabilidad del sistema se calcularon a través del árbol de fallas y el método de construcción de la función de confiabilidad. La investigación mostró que, si se utiliza la tecnología de acoplamiento virtual para la protección contra colisiones de trenes, se mejora la seguridad y la confiabilidad generales del sistema de control del tren.

La situación actual de la movilidad cambia constantemente a medida que las personas se desplazan cada vez más a zonas urbanas. Por lo tanto, es necesario un modo de transporte flexible con trenes de pasajeros de alta capacidad y un alto grado de modularidad en la composición de los trenes. El acoplamiento virtual (VC) es una solución prometedora a este problema porque aumenta significativamente la capacidad de una línea y proporciona un modo de operación más flexible que los sistemas de señalización convencionales. En Felez *et al.*, [109] se analizaron aproximadamente 200 artículos, identificó los principales temas de la investigación actual de VC relacionada con los ferrocarriles y representó un primer paso hacia la implementación de VC en los ferrocarriles futuros. Se encontró que la investigación de la industria se ha centrado principalmente en la viabilidad de la implementación y operación de VC, mientras que en la academia, que se coordina con la industria, la investigación se centró en los sistemas de control y comunicación. Desde una perspectiva tecnológica, se identificaron los principales desafíos para VC con respecto a aspectos como la seguridad, la tecnología de control, el enclavamiento, la comunicación de vehículo a vehículo, la protección y el control cooperativos de trenes y la gestión integrada del tráfico. Con respecto a la investigación futura que se identificaron para el desarrollo

futuro incluyen modelos dinámicos completos, controladores en tiempo real, comunicación confiable y segura, diferentes topologías de comunicación, ciberseguridad, control inteligente, aprendizaje de refuerzo y análisis de Big Data.

Vaquero y Felez [111] presentaron un enfoque novedoso para sistemas de control de trenes basado en acoplamiento virtual. El acoplamiento virtual es un concepto que ha evolucionado a partir del pelotón de vehículos y permite reducir la distancia y el intervalo entre trenes sin construir nuevas líneas, al tiempo que se garantiza una operación segura. Con este objetivo en mente, Vaquero y Felez [111] propusieron un marco de control predictivo de modelos (MPC) robusto descentralizado para un conjunto de trenes acoplados virtualmente basado en un enfoque mín-máx. A diferencia del MPC nominal, el MPC robusto fue diseñado para considerar perturbaciones y errores externos indeterminados para mejorar la robustez en aplicaciones del mundo real. Por lo tanto, Vaquero y Felez [111] presentaron la formulación de un MPC robusto basado en la resolución de un problema de optimización de horizonte finito con incertidumbres acotadas. Los límites consideraban errores de modelado resistivo, errores de posicionamiento, retrasos en la comunicación y una posible pérdida de adhesión de hasta el 10%. Luego, Vaquero y Felez [111] realizaron cuatro simulaciones para comparar el comportamiento del MPC robusto con el MPC nominal equivalente. En estas simulaciones, Vaquero y Felez [111] simularon una línea de metro, una línea principal y una línea de alta velocidad. Las simulaciones también analizaron el comportamiento del MPC robusto bajo las perturbaciones consideradas y diferentes retardos de comunicación. Los resultados mostraron que el MPC robusto garantiza una operación más segura que el MPC nominal en metros, líneas convencionales y líneas de alta velocidad. Las investigaciones futuras pueden centrarse en el MPC centralizado y la inteligencia artificial.

Se está desarrollando un nuevo paradigma basado en el concepto de acoplamiento virtual de trenes para brindar soluciones innovadoras que aumenten la eficiencia, la flexibilidad operativa, la capacidad de la línea, la competitividad entre los actores del mercado y la calidad de la experiencia del consumidor. Las comunicaciones inalámbricas Tren a Tren (T2T) y Tren a Tierra (T2G) serán la base para la implementación de las funcionalidades de acoplamiento virtual. Verma *et al.*, [112] realizó un análisis de confiabilidad basado en modelos del sistema de comunicación inalámbrica bajo operación de acoplamiento virtual. Concretamente, Verma *et al.*, [112] desarrolló modelos de Red de Petri Coloreada Estocástica (SCPN) para representar el intercambio de la diversa información necesaria bajo la operación de acoplamiento virtual. Posteriormente, se realiza una evaluación de confiabilidad mediante simulación. En particular, Verma *et al.*, [112] analizó el impacto de diversos parámetros de comunicación considerando diferentes escenarios operativos. Los resultados obtenidos permitieron identificar los aspectos más impactantes en el análisis de confiabilidad y brindan información valiosa para respaldar las decisiones tecnológicas en términos de comunicación para implementar el acoplamiento virtual.

Verma [112] Se está desarrollando un nuevo paradigma basado en el concepto de acoplamiento virtual de trenes para brindar soluciones innovadoras que aumenten la eficiencia, la flexibilidad operativa, la capacidad de la línea, la competitividad entre los actores del mercado y la calidad de la experiencia del consumidor. Las comunicaciones inalámbricas Tren a Tren (T2T) y Tren a Tierra (T2G) serán la base para la implementación de las funcionalidades de acoplamiento virtual. En el presente trabajo, se realiza un análisis de confiabilidad basado en modelos del sistema de comunicación inalámbrica bajo operación de acoplamiento virtual. Concretamente, se desarrollan modelos de Red de Petri Coloreada Estocástica (SCPN) para representar el intercambio de la diversa información

necesaria bajo la operación de acoplamiento virtual. Posteriormente, se realiza una evaluación de confiabilidad mediante simulación. En particular, se analiza el impacto de diversos parámetros de comunicación considerando diferentes escenarios operativos. Los resultados obtenidos permiten identificar los aspectos más impactantes en el análisis de confiabilidad y brindan información valiosa para respaldar las decisiones tecnológicas en términos de comunicación para implementar el acoplamiento virtual.

Wu *et al.*, [113] propuso un método de control de formación de trenes virtualmente acoplados (VCTF) basado en el marco de control predictivo de modelos (MPC). El error de espaciamiento entre vías, el error de velocidad y la comodidad de conducción se consideraron como objetivos de optimización, considerando las restricciones de velocidad de línea, prevención de colisiones del pelotón, rendimiento de tracción/frenado y estabilidad de la cadena. El problema de control de operación de acoplamiento virtual se convirtió en un problema de programación cuadrática con restricciones. Wu *et al.*, [113] propuso una estrategia de control de marcha por inercia para mejorar la salida del controlador MPC. Los resultados de la simulación mostraron que, en comparación con el controlador proporcional-derivativo, el método de control propuesto puede reducir simultáneamente el error de seguimiento y la aceleración de salida, lo que reduce el consumo de energía en marcha. Wu *et al.*, [113] realizó un estudio de una línea de metro para analizar el rendimiento de la operación VCTF, y los resultados de la simulación mostraron que el modo de operación VCTF puede mejorar la capacidad máxima y la calidad del servicio en horas llanas, en comparación con el modo de operación de control de trenes basado en comunicaciones.

La posible llegada de sistemas avanzados de control ferroviario, como el bloque móvil y el acoplamiento virtual, plantea la cuestión de los efectos que la incertidumbre sobre parámetros críticos (como la posición o la velocidad) puede tener sobre la fiabilidad. Fancheti *et al.*, [114] propuso diversos enfoques para la evaluación de dichos efectos, generalmente basados en una modelización formal basada en estados del comportamiento del sistema y analizó de dichas propuestas.

El acoplamiento virtual es un novedoso concepto de transporte ferroviario que permite a los trenes separarse y unirse sobre la marcha mediante la conmutación de acopladores mecánicos a virtuales. Uno de los principales retos en la aplicación del acoplamiento virtual en el metro es reducir la distancia de seguimiento entre trenes sin comprometer la seguridad. Chai *et al.*, [115] propuso un modelo de separación de trenes basado en la operación relativa para reducir la distancia de seguridad entre trenes. Chai *et al.*, [115] aplicó un principio de tolerancia a fallos. El principio consistió en que el tren precedente opera normalmente durante un intervalo de tiempo desde su último estado conocido antes de iniciar un frenado de emergencia para detenerlo. Una dificultad en la aplicación del modelo propuesto es predecir el límite de todas las posibles trayectorias de tiempo-posición del tren precedente, que constituye el problema de alcanzabilidad de un sistema híbrido. Para resolver este problema, Chai *et al.*, [115] formalizó la operación del tren precedente mediante un autómata híbrido parametrizado. Chai *et al.*, [115] desarrolló un algoritmo basado en polítopos para calcular un conjunto alcanzable sobreaproximado del autómata. Chai *et al.*, [115] comparó nuestro enfoque con un modelo de vanguardia de separación de trenes basado en la distancia de frenado relativa para el acoplamiento virtual en una línea de metro de concreto en Chengdu, China, y evaluó el método con varios puntos de referencia. Los resultados Muestran que el modelo basado en la operación relativa reduce sustancialmente las distancias de seguridad entre trenes. En comparación con los enfoques convencionales, el modelo propuesto proporciona una reducción considerable del 90,7 %

en el tiempo de espera innecesario en las estaciones de tren para trenes acoplados virtualmente y un aumento del 4,9 % en la capacidad de las líneas ferroviarias en cuestión.

Métodos 6G

La metodología de 6G para incrementar la capacidad del CBTC ha sido desarrollada un conjunto de autores como: Jiao *et al.*, [116], Yuan *et al.*, [117], Liu *et al.*, [118], Wang *et al.*, [119], Zemen *et al.*, [120], Rajatheva *et al.*, [121] y Narouwa *et al.*, [122].

La llegada de la sexta generación de comunicaciones móviles (6G) marca el comienzo de una era de mayor demanda de inteligencia de red avanzada para afrontar los retos de un panorama de red en expansión y la creciente demanda de servicios. El aprendizaje profundo (DL), como técnica crucial para incorporar inteligencia en 6G, ha demostrado un desarrollo potente y prometedor. Jiao *et al.*, [116], ofrece una visión completa del papel fundamental del DL en 6G, explorando las numerosas oportunidades y desafíos que surgen. En primer lugar, Jiao *et al.*, [116], presentó una visión detallada del DL en 6G, haciendo hincapié en áreas como la asignación adaptativa de recursos, la gestión inteligente de redes, el procesamiento robusto de señales, la inteligencia de borde ubicua y la seguridad endógena. En segundo lugar, Jiao *et al.*, [116], analizó cómo los modelos de DL aprovechan sus capacidades únicas de aprendizaje para resolver las complejas demandas de servicios en 6G. Los modelos analizados incluyeron redes neuronales convolucionales (CNN), redes generativas antagónicas (GAN), redes neuronales de grafos (GNN), aprendizaje por refuerzo profundo (DRL), aprendizaje transformador, aprendizaje federado (FL) y metaaprendizaje. Además, Jiao *et al.*, [116], examinó los desafíos específicos que enfrenta cada modelo de aprendizaje automático en el contexto 6G. Asimismo, Jiao *et al.*, [116], profundizó en el campo, en rápida evolución, del Contenido Generado por Inteligencia Artificial (AIGC), examinando su desarrollo e impacto en el marco 6G. Finalmente, Jiao *et al.*, [116], culminó con un análisis detallado de diez problemas críticos pendientes en la integración del aprendizaje automático con 6G, sentando las bases para la investigación y el desarrollo futuros en este campo.

Yuan *et al.*, [117] propuso un modelo de canal de terahercios (THz) doblemente esférico basado en geometría 3D para comunicaciones ultramasivas de entrada múltiple salida (MIMO). Para reflejar las comunicaciones MIMO ultramasivas de THz reales, Yuan *et al.*, [117] consideró en el modelado del canal las características de la antena de matriz de nanomateriales y la alta pérdida de las bandas de THz. Con base en el modelo estocástico basado en geometría (GBSM) propuesto, se derivaron y analizaron el perfil de retardo de potencia (PDP), la función de correlación espacio-tiempo-frecuencia y la densidad espectral de potencia Doppler. Además, el modelo propuesto se validó comparando los resultados simulados con la referencia de medición. Se investigaron las influencias de los parámetros del canal, a saber, el espaciamiento de los elementos de la antena, la frecuencia portadora, el número y la ubicación de los clústeres, en las funciones de correlación. Los resultados indicaron que el espaciamiento de los elementos de la antena y el número de clústeres tienen impactos significativos en la correlación del canal, y la disminución de la función de correlación se vuelve más lenta cuando disminuye el espaciamiento de los elementos de la antena. Además, la ubicación de los clústeres también afecta la tasa de disminución de la función de correlación. Se analizó la influencia del número de clústeres y la concentración de componentes multitrayecto intraclúster (MPC) en la densidad espectral de potencia Doppler. Se observó que un mayor número de clústeres y una distribución más concentrada de MPC intraclúster aumentan el grado de variación del espectro Doppler. El modelo de

canal propuesto y las propiedades estadísticas correspondientes son útiles para el diseño e implementación de sistemas MIMO ultramasivos de THz para 6G y posteriores.

Con la aparición de servicios de comunicación con requisitos tan exigentes como la conducción autónoma o el internet a bordo, se prevé que la red inalámbrica de sexta generación (6G) se convierta en una tecnología que impulse los sistemas de transporte del futuro. En Liu *et al.*, [118] se investigó exhaustivamente dos formas de interacción entre las redes 6G y el transporte. Por un lado, se destacaron los nuevos escenarios de uso y las capacidades de 6G sobre las redes celulares existentes. Liu *et al.*, [118] demostró su potencial para una conectividad fluida y ubicua en los sistemas de transporte heterogéneos espacio-aire-terrestre, donde se investigaron ferrocarriles, aviones, plataformas de gran altitud y satélites. Por otro lado, Liu *et al.*, [118] reveló que la introducción de 6G garantiza un sistema de transporte más inteligente, eficiente y seguro. Específicamente, Liu *et al.*, [118] proporcionó un análisis técnico sobre cómo 6G puede potenciar el transporte del futuro, basado en las últimas investigaciones y avances en estandarización en localización, detección y comunicaciones integradas, y seguridad. También Liu *et al.*, [118] resumió los desafíos técnicos y las perspectivas para el futuro, buscando posibles inspiraciones en el transporte avanzado habilitado por 6G.

Se espera que la banda de terahercios (THz) desempeñe un papel más importante en las redes de comunicación de sexta generación (6G). Puede proporcionar un gran ancho de banda y una alta velocidad de transmisión para respaldar los posibles escenarios 6G, desde el espacio hasta la tierra y desde la macroescala hasta la nanoescala. Sin embargo, las características del canal de THz varían considerablemente según el escenario. Wang *et al.*, [119] presentó una visión general multidimensional de las características del canal de propagación y el modelado para posibles escenarios de comunicación de THz, incluyendo comunicaciones terrestres, espaciales y a nanoescala. En primer lugar, Wang *et al.*, [119] analizó los mecanismos de atenuación atmosférica y propagación para escenarios terrestres. A continuación, Wang *et al.*, [119] investigó las mediciones, características y modelos del canal para escenarios terrestres específicos, incluyendo oficinas interiores, centros de datos, quioscos, trenes inteligentes y MIMO masivo. A continuación, Wang *et al.*, [119] resumió los canales de comunicación espacial de THz según la altitud del satélite. Además, Wang *et al.*, [119] analizó los canales de comunicación a nanoescala de THz, incluyendo los integrados en chip y centrados en el cuerpo.

Una representación de canal de radio específica del sitio (SSCR) considera el entorno del sistema de comunicación considerando la geometría del entorno, incluyendo edificios, vegetación y objetos móviles con sus propiedades materiales y superficiales. Zement *et al.*, [120] presentó métodos para una SSCR espacialmente consistente, de modo que el transmisor y el receptor móviles generen una respuesta al impulso del canal variable en el tiempo y correlacionada, y las antenas con poca separación estén correctamente correlacionadas. Una SSCR se compone de un número de componentes multitrayecto que varían dinámicamente, definidos únicamente por la geometría del entorno y el material de los objetos del entorno. Por lo tanto, la geometría del entorno es la única parametrización natural del escenario, por lo que se deben evitar procedimientos de calibración específicos. Las tecnologías de capa física 5G y 6G son cada vez más capaces de explotar las propiedades de una amplia gama de entornos, desde zonas urbanas densas hasta ferrocarriles, transporte por carretera, automatización industrial y vehículos aéreos no tripulados. La respuesta al impulso del canal en esta amplia gama de escenarios presenta

propiedades estadísticas generalmente no estacionarias; es decir, el espectro Doppler, el perfil de retardo de potencia, el factor K y la correlación espacial son variables espacialmente (o variables en el tiempo para receptores móviles). Los SSCR facilitarán la investigación y el desarrollo de tecnologías emergentes 5G y 6G, como sistemas distribuidos de múltiples entradas y múltiples salidas, superficies inteligentes reconfigurables, comunicación multibanda y comunicación y detección conjuntas. Destacamos el estado del arte y resumimos las líneas de investigación para el trabajo futuro hacia un SSCR.

El informe técnico de Rajatheva [121] exploró el camino hacia la implementación de la conectividad de banda ancha en los futuros sistemas inalámbricos 6G. Rajatheva [121] consideró diferentes categorías de casos de uso, desde capacidad extrema con velocidades de datos máximas de hasta 1 Tbps, hasta el aumento de las velocidades de datos típicas en órdenes de magnitud para soportar la conectividad de banda ancha a velocidades ferroviarias de hasta 1000 km/h. Para lograr estos objetivos, no solo se desarrollarán las redes terrestres, sino que también se integrarán con redes satelitales, lo que facilitará sistemas autónomos y diversas estructuras interconectadas. Rajatheva [121] consideró que se requieren varias categorías de facilitadores a nivel de infraestructura, espectro y protocolo/algorithm para alcanzar los objetivos de conectividad de banda ancha previstos en 6G. A nivel de infraestructura, Rajatheva [121] consideró la tecnología MIMO ultramasiva (posiblemente implementada mediante radio holográfica), superficies reflectantes inteligentes, redes sin células escalables y centradas en el usuario, acceso y backhaul integrados, y redes espaciales y terrestres integradas. A nivel de espectro, la red debe utilizar sin problemas las bandas sub-6 GHz para la cobertura y la multiplexación espacial de numerosos dispositivos, mientras que las bandas superiores se utilizarán para impulsar las velocidades pico de los enlaces punto a punto. Esta última vía conducirá a comunicaciones en THz, complementadas con comunicaciones de luz visible en escenarios específicos. A nivel de protocolo/algorítmico, los facilitadores incluyen mejoras en la codificación, la modulación y las formas de onda para lograr latencias más bajas, mayor fiabilidad y menor complejidad. Se necesitarán diferentes opciones para satisfacer de forma óptima los distintos casos de uso.

La industria ferroviaria actual implementa aplicaciones innovadoras para la monitorización en tiempo real de trenes e infraestructuras ferroviarias, así como para el control remoto de trenes, con el fin de mejorar la seguridad de los pasajeros y la operación ferroviaria. Estas aplicaciones pueden requerir el cumplimiento de múltiples restricciones en términos de latencia, velocidad de datos, fiabilidad, cobertura, movilidad, seguridad, etc. Para lograr la calidad deseada de la experiencia de los usuarios (trenes, pasajeros, controladores, etc.), es esencial aplicar y combinar diversas tecnologías inalámbricas facilitadoras para la arquitectura de comunicaciones ferroviarias, como la segmentación de red (NS) de extremo a extremo (desde las aplicaciones alojadas en la nube hasta el cliente, atravesando la infraestructura de la red de comunicaciones), la segmentación de red (NS), las redes definidas por software (SDN), la virtualización de funciones de red (NFV), la computación en el borde de acceso múltiple (MEC), la cadena de bloques (blockchain) y las herramientas de inteligencia artificial (IA). Narouwa *et al.*, [122] propuso un marco de control global unificado para calcular, implementar y gestionar automáticamente los recursos necesarios en las diferentes infraestructuras de red (nube, núcleo, transporte y redes de acceso múltiple). En este contexto, Narouwa *et al.*, [122] propuso el primer estudio en el sector ferroviario que vincula las restricciones de las aplicaciones con las tecnologías facilitadoras. Tras una breve descripción general del contexto ferroviario, los principales requisitos de las aplicaciones y las tecnologías aplicables, Narouwa *et al.*, [122] propuso una arquitectura de alto nivel para aplicaciones ferroviarias que incorpora las diversas tecnologías identificadas:

MEC, NFV, SDN, herramientas de IA y blockchain. También Narouwa *et al.*, [122] estudió el impacto que estas diferentes tecnologías podrían tener en las aplicaciones ferroviarias existentes e identificamos los desafíos y las futuras direcciones de las redes ferroviarias en la era del 5G y el futuro 6G.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

El enfoque genérico de la norma IEC 62267 ha sido desarrollado en base a las tres etapas de esta norma:

- La definición del sistema y condiciones de aplicación.
- Análisis de riesgos al nivel más alto del sistema.
- Requisitos de seguridad. Análisis del incremento de grado de automatización.

La definición del sistema y condiciones de aplicación. Este apartado de norma IEC 62267 ha sido desarrollado en los capítulos 1 y 2 de este TFT. En el capítulo 1 presenta la definición, caracterización y las condiciones de aplicación del Sistema de señalización y control de trenes (S&CT) de la línea del Metro de Panamá y definiciones oficiales. También presenta aquellas normas relativas a la seguridad aplicadas en el enclavamiento electrónico y el sistema de control de tren para la línea 2 del Metro de Panamá. También se indican los subsistemas del sistema de señalización y control de (ATO, ATP, MSS, UTO) y se presenta un breve resumen conceptual de las premisas de operación de la línea 2 del Metro de Panamá.

En el capítulo 2, operacionales (oferta, demanda, registro histórico de la calidad de las operaciones), estadísticas de la demanda de pasajeros, sistema de electrificación, sistemas de control y señalización de trenes mucho más ampliado, las características técnicas del material rodante y las estaciones.

Análisis de riesgos al nivel más alto del sistema. Para la operación automática del Metro de Panamá se ha adoptado el sistema de conducción semiautomática (Semi-automated Train Operation, STO)[46]. El grado de automatización requerido para la operación del Metro de Panamá es 2 (GoA2) operación semiautomática de los trenes (STO) [46]. El siguiente gráfico muestra el nivel de automatización seleccionado para la Línea 2 del Metro de Panamá:

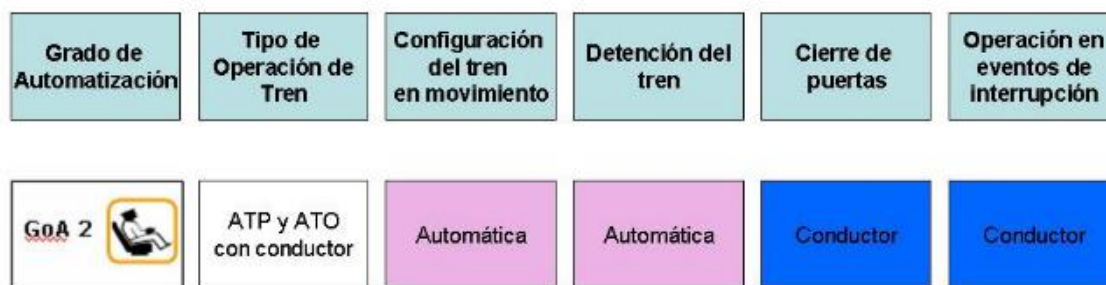


Figura 21. Grado de automatización para la línea 2 del Metro de Panamá[46]
De acuerdo al Metro de Panamá[46] para la línea 2, los elementos claves en el sistema STO son:

- Un sistema de ATC para aplicaciones de transporte masivo es parte de un sistema de señalización en general con enclavamiento, supervisión automática del tren, detección de vía libre y funciones de comunicación. Los equipamientos de señalización son

el corazón de cualquier sistema de conducción semiautomática de trenes (STO).

- La protección automática de trenes (ATP) es el sistema y todo el equipo responsable de la seguridad básica: evita la colisión, rebasamiento de una señal en rojo, el exceso de los límites de velocidad mediante la aplicación de los frenos de forma automática. Una línea equipada con sistema ATP corresponde a GoA1.
- La operación automática de trenes (ATO) asegura parcial o total pilotaje automático del tren y funcionalidades sin conductor. El sistema ATO lleva a cabo todas las funciones del conductor, excepto el cierre de las puertas. El conductor sólo tiene que cerrar las puertas y si la vía está libre, entonces el tren automáticamente pasará a la siguiente estación (GoA2).

De acuerdo con el Metro de Panamá[46], la funcionalidad se refiere a:

Se requiere el uso de la radio como la tecnología de comunicación para el control de trenes (CBTC). La radio proporciona un gran ancho de banda de enlace de comunicación entre los equipos en la vía y los trenes.

En el diseño se tuvo en cuenta el ancho de banda suficiente para la completa protección automática del tren (ATP), la operación automática del tren (ATO) y el control automático del tren (ATC).

Una ventaja importante que ofrece la radio sobre los sistemas basados en cable es la capacidad de crear un vínculo de comunicación totalmente redundante a los trenes.

Con la tecnología actual disponible y requerida para esta explotación, los requisitos de ancho de banda para ATC son bastante pocos, por lo tanto, proporciona un gran ancho de banda disponible para servicios adicionales tales como equipos de diagnóstico a distancia, la comunicación desde el tren al CCO, las informaciones operativas al pasajero y la propagación de anuncios.

La comunicación intermitente es proporcionada por los equipos fijos en la vía (balizas) que transmite los datos almacenados de forma permanente, permitiendo a los trenes determinar su ubicación.

Esta comunicación permite fijar operación de bloques con una supervisión permanente y ofreciendo así una funcionalidad básica necesaria para el ATO.

La comunicación continua podrá ser proporcionada por un sistema de libre propagación de radio.

Requisitos de seguridad. Análisis del incremento de grado de automatización. El incremento del grado de automatización actual de la línea 2 del Metro de Panamá, siendo este GoA2 implicaría una inversión tecnológica y humana para que no solo alcance el grado de Automatización GoA3, grado intermedio entre el GoA2 actual y el GoA4 propuesto.

Para el Grado de automatización 3 (GoA3): operación de los trenes sin conductor:

«Son necesarias medidas adicionales en comparación con GoA2 porque no hay ningún conductor en la cabina del tren para observar el sistema de guiado y detener el tren en caso de una situación peligrosa. En este grado de automatización, un miembro del personal de operaciones de a bordo es necesario (asistente de tren). La salida segura del tren de la

estación, el cierre de las puertas, puede ser responsabilidad del personal de operaciones o se puede hacer de forma automática».

Para el Grado de automatización 4 (goa4): operación de los trenes desatendida.

«En este grado de automatización, se necesitan medidas adicionales en comparación con GoA3 porque no hay personal de a bordo de operación. La salida segura del tren de la estación, incluyendo el cierre de puerta, se hace de forma automática. Más concretamente, el sistema admite la detección y la gestión de las condiciones peligrosas y situaciones de emergencia como la evacuación de los pasajeros. Algunas condiciones de riesgo o situaciones de emergencia, tales como descarrilamiento o la detección de humo o fuego, pueden requerir intervenciones de personal especialmente entrenado para tal fin»

Tabla 15. Incremento del grado de automatización

Nota X= Responsabilidad del personal de explotación (puede llevarlo a cabo el sistema técnico) S= Llevado a cabo por el sistema técnico			
Funciones básicas para la explotación del tren		Explotación semiautomática del tren STO	Explotación del tren sin tripulación UT0
		GOA2	GOA4
Garantizar el movimiento seguro de los trenes	Garantizar la seguridad de los itinerarios	S	S
	Garantizar la separación segura de los trenes	S	S
	Garantizar la velocidad seguridad de los trenes	S	S
Conducción	Controlar la aceleración y el frenado	S	S
Supervisar la vía	Evitar la colisión con obstáculos	x	S
	Evitar la colisión con personas	x	S
Supervisar el embarque y desembarque de pasajeros	Controlar las puertas del tren	x	S
	Evitar daños a personas entre coches o entre el andén y el tren	x	S
	Garantizar las condiciones seguras de puestas en marcha del tren	x	S
Poner un tren en explotación	Poner el tren en explotación o poner el tren fuera de servicio	x	S
	Supervisión del estado del tren	x	S
Garantizar la detección y la gestión de las situaciones de emergencia	Realizar el diagnóstico del tren, detectar fuego/ humo y detectar descarrilamientos, gestionar situación de emergencia (llamada/evacuación, supervisión)	x	S y/o miembros del personal del CRC

La inversión tecnológica y humana incidiría en las funciones básicas para la explotación del tren. Estas funciones serían llevadas por el sistema en lugar del operario de tren. Estas funciones van desde supervisar la vía, supervisar el embarque de pasajeros, poner un tren estado de explotación y garantizar la detección y la gestión de las situaciones de emergencia, es decir, como se muestra en la figura para el GoA4 porque no hay personal de a bordo de la operación del tren, no hay conductor. A diferencia del GoA3, donde hay un operario a bordo del tren para situaciones de manejo degradado del sistema.

Tabla 16. Características de grados de automatización y ejemplos[124], [125][123][126][124], [127].

GoA	Tipo de operación	Puesta en marcha del tren	Freno del tren	Cierre de puertas	Operación en eventos de disrupción	Ejemplos
1	ATP con chofer	Chofer	Chofer	Chofer	Chofer	ECTS 1
2	ATP+ATO con chofer	Automático	Automático	Chofer	Chofer	ECTS 2 ECTS 3
3	Sin chofer	Automático	Automático	Asistente a bordo del tren	Asistente a bordo del tren	-----
4	UTO	Automático	Automático	Automático	Automático	CBTC con todas las funcionalidades

Martínez y Martin [123] realizaron una interesante clasificación y relación de los sistemas de protección y seguridad de trenes utilizando esquemas de la teoría matemática de conjuntos y expresando relaciones de unión e inserción en su respectivos casos. La clasificación de Martínez y Martin [123] se realizó en base a las perspectivas de las funcionalidades del sistema ferroviario por tipo de sistema (ver figura 22).

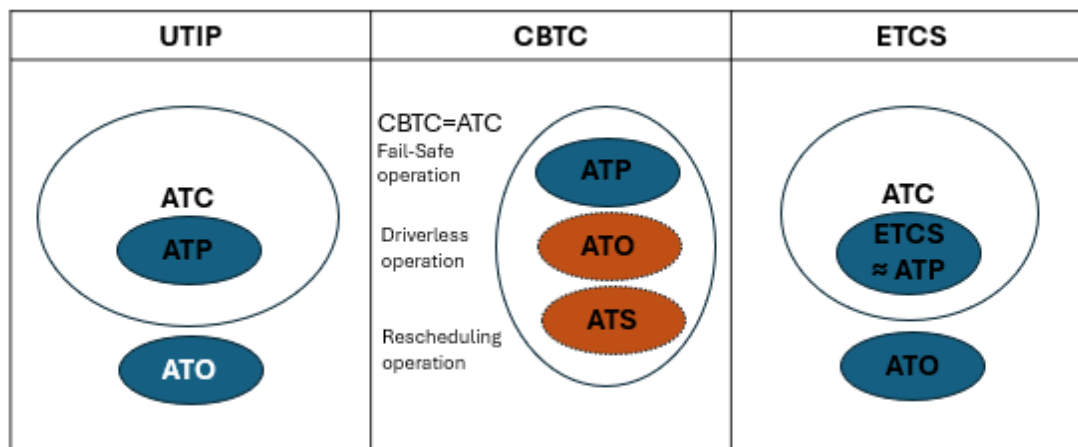


Figura 22. Perspectivas de las funcionalidades del sistema ferroviario según el sistema[123]

Con respecto al sistema CBTC el ATO y el ATS tiene funciones opcionales (*optional function*), mientras que el ATP sus funciones son mandatorias (*Compulsory function*).

También la implementación del GoA4 en la línea 2 del Metro de Panamá puede ocasionar oposición por parte de los conductores de tren, al ver amenazados sus puestos de trabajo. De acuerdo con [125] los grados de automatización tanto 3 como 4 permiten reducir el personal necesario a bordo de las formaciones, es decir, Menor cantidad de personal necesario. Se agrega también que la red de Metro de Panamá, de acuerdo con su plan maestro[128], [129],[130], [131] tiene priorizadas proyecciones de expansión hacia otros sectores del área metropolitana de la ciudad de Panamá, por tal razón, requiere que las inversiones se canalicen hacia proyectos de extensión y construcción de nuevas líneas ferroviaria para incrementar la capacidad de la red de metro de Panamá.

De acuerdo con experiencias regionales, como el caso del Metro de Buenos Aires (Argentina)[125][79], [125], *«los nuevos sistemas automatizados de alto rendimiento necesitan de una base de infraestructura acorde al funcionamiento que se le dará. Por lo tanto, resulta conveniente invertir primero en el reacondicionamiento de la infraestructura básica antes que en la adición de componentes nuevos»*.

Adicionalmente, en el desarrollo del estado del arte se identificaron metodologías para el incremento de la capacidad de una línea con el sistema CBTC[89], [90], [93], [94], [95], [97], [98], [123], [126], [132].

5. CONCLUSIONES

El diseño e implementación de un sistema de operación automática para el transporte ferroviario urbano es crucial en la construcción de ciudades inteligentes. Para la operación automática del Metro de Panamá se adoptó el sistema de conducción semiautomática (Semi-automated Train Operation, STO)[46]. El grado de automatización requerido para la operación del Metro de Panamá es 2 (GoA2) operación semiautomática de los trenes (STO) [46].

El incremento del grado de automatización actual de la línea 2 del Metro de Panamá, siendo este GoA2 implicaría una inversión tecnológica y humana para que no solo alcance el grado de Automatización GoA3, grado intermedio entre el GoA2 actual y el GoA4 propuesto.

La inversión tecnológica y humana incidiría en las funciones básicas para la explotación del tren. Estas funciones serían llevadas por el sistema en lugar del operario de tren. Estas funciones van desde supervisar la vía, supervisar el embarque de pasajeros, poner un tren en estado de explotación y garantizar la detección y la gestión de las situaciones de emergencia, es decir, como se muestra en la figura para el GoA4 porque no hay personal de a bordo de la operación del tren, no hay conductor. A diferencia del GoA3, donde hay un operario a bordo del tren para situaciones de manejo degradado del sistema. También la implementación del GoA4 en la línea 2 del Metro de Panamá puede ocasionar oposición por parte de los conductores de tren, al ver amenazados sus puestos de trabajo. De acuerdo con [125] los grados de automatización tanto 3 como 4 permiten reducir el personal necesario a bordo de las formaciones, es decir, Menor cantidad de personal necesario.

Con el propósito de mejorar los sistemas de gestión de las operaciones de la red de Metro de Panamá se recomienda considerar certificar al Metro de Panamá bajo los requisitos de la norma EN ISO 22163. *Railway applications-Railway quality management system- ISO 9001: 2015 and specific requirements for application in the railway sector* (ISO 22163: 2023) [133]. La norma ISO 22163: 2023 especifica los requisitos para un sistema de gestión de la calidad cuando una organización:

- a) necesita demostrar su capacidad para proporcionar de forma consistente productos y servicios que cumplan con los requisitos del cliente y los requisitos legales y reglamentarios aplicables, y
- b) busca mejorar la satisfacción del cliente mediante la aplicación eficaz del sistema, incluyendo los procesos de mejora del sistema y el aseguramiento de la conformidad con los requisitos del cliente y los requisitos legales y reglamentarios aplicables.

La norma ISO 22163: 2023 especifica los requisitos de un sistema de gestión de la calidad ferroviaria (SGC):

- aplicable a toda la cadena de suministro del sector ferroviario en relación con productos y servicios industriales,
- que facilita la mejora continua, haciendo hincapié en la prevención y reducción de

defectos en la cadena de suministro, y

— que mejora y mantiene la calidad del producto, incluyendo sus aspectos de seguridad.

6. LINEAS FUTURAS

Una vez establecido el marco de referencia se sugiere lograr fondos para realizar investigaciones de carácter experimental sobre los posibles escenarios prácticos relativos al incremento de la capacidad del CBTC de la línea 2 del Metro de Panamá, sobre todo en el tramo principal y también en el ramal que va servicio de transporte hacia y desde el Aeropuerto Internacional de Tocumen.

7. BIBLIOGRAFIA

A continuación, se presenta el listado de las referencias utilizadas en este trabajo de fin de titulación, las cuales corresponde a documentos de acceso público del Metro de Panamá:

- [1] M. de Panamá, “Secretaría del Metro de Panamá. Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos. II.2. Sistema de señalización y control. Revisiones.” Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 86, 2014.
- [2] AENOR, “UNE-EN 62267. Aplicaciones ferroviarias. Transporte urbano guiado automáticamente (AUGT). Requisitos de seguridad.” AENOR, Madrid, España, p. 70, 2011.
- [3] AENOR, “UNE-EN 13816. Transporte. Logística y servicios. Transporte público de pasajeros. Definición de la calidad del servicio, objetivos y mediciones.” AENOR, Madrid, España, p. 34, 2003.
- [4] T. Yannis and A. Georgia, “A complete methodology for the quality control of passenger services in the public transport business,” *Eur. Transp. / Trasp. Eur.*, vol. 38, no. 38, pp. 1–16, 2008, [Online]. Available: <https://www.openstarts.units.it/server/api/core/bitstreams/741b5579-9e42-4a8d-b104-6688e1434137/content>
- [5] R. Anderson, B. Condry, and N. Findlay, “Measuring and valuing convenience and service quality : a review of global practices and challenges from the public transport sector,” p. 44, 2013, [Online]. Available: <http://www.internationaltransportforum.org/jtrc/DiscussionPapers/DP201316.pdf>
- [6] T. Shen, J. Zhou, T. Yuan, Y. Xie, and X. Zhang, “LiDAR-Based Urban Three-Dimensional Rail Area Extraction for Improved Train Collision Warnings,” *Sensors*, vol. 24, no. 15, 2024, doi: 10.3390/s24154963.
- [7] V. Agrawal, V. Tripathi, and A. M. Agrawal, “Methodology for Evaluating Service Quality of Public Transport: Case of Delhi, India,” *J. Supply Chain Manag. Syst.*, vol. 4, no. 1and2, p. 13, 2015, doi: 10.21863/jscms/2015.4.1and2.008.
- [8] E. Cascetta and A. Carteni, “The value of aesthetics in public transportation : A quantitative analysis of perceived quality for railways travel,” pp. 1–9, 2012, [Online]. Available: https://transp-or.epfl.ch/heart/2012/latsis2012_submission_136.pdf
- [9] B. R. Naveen and A. Gurtoo, “The Cause Effect Relationship Model of Service Quality in relation with Overall Satisfaction,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 48, no. 2018, pp. 1694–1721, 2020, doi: 10.1016/j.trpro.2020.08.208.
- [10] R. Anderson, B. Condry, N. Findlay, R. Brage-Ardao, and H. Li, “Measuring and Valuing Convenience,” 2013, [Online]. Available: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2013/09/measuring-and-valuing-convenience-and-service-quality_g17a2380/5k3z04gb6zs1-en.pdf
- [11] A. N. H. Ibrahim, M. N. Borhan, N. I. M. Yusoff, and A. Ismail, “Rail-based public transport service quality and user satisfaction – a literature review | Kualiti perkhidmatan pengangkutan awam berasaskan rel dan kepuasan pengguna: kajian kepustakaan,” *Promet - Traffic - Traffico*, vol. 32, no. 3, pp. 423–435, 2020, [Online]. Available: <https://hrcak.srce.hr/file/349230>
- [12] D. S. Mcleod, “Multimodal Arterial Level of Service,” *4 Int. Symp. Highw. Capacit.*, no. after, pp. 221–233, 2000, [Online]. Available: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/circulars/ec018/20_14.pdf

- [13] Ö. Asya Kaynarca and İ. Ekmekçi, "Service Quality Measurement Model in Urban Public Transportation: the Case of IETT," *J. Int. Trade, Logist. Law*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2017, [Online]. Available: https://www.jital.org/index.php/jital/article/view/50/pdf_25
- [14] L. Eboli and G. Mazzulla, "Customer Satisfaction as a Measure of Service Quality in Public Transport Planning," *Transp. Policy Plan.*, vol. 50, no. January, pp. 220–224, 2021, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-1237-4553-8.00216-1>
- [15] V. Kerkko and J. Kurri, "Quality factors in public transport." p. 7, 2004. [Online]. Available: https://transportation.org.il/sites/default/files/pirsum/quality_factors_in_public_transport_helsinki_0.pdf
- [16] R. Phillips, "Multi-modal quality of service project." p. 126, 2001. [Online]. Available: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/15408>
- [17] Metro de Panamá, "Inicio y terminación de obras," Línea 2 del Metro de Panamá. Accessed: Feb. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/linea-2/#tab-id-6>
- [18] Secretaría del Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. TOMO II - Equipamientos. II.0 Normas generales*. Panamá, República de Panamá: Secretaría del Metro de Panamá, 2014.
- [19] Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos. II.1. Sistema de vías*. Panamá, República de Panamá: Secretaría del Metro de Panamá, 2014.
- [20] Metro de Panamá, "Secretaría del Metro de Panamá. Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos." Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, pp. 1–28, 2014.
- [21] Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos. II.10. Sistemas de accesibilidad*. Panamá, República de Panamá: Metro de Panamá, 2014.
- [22] Metro de Panamá, "Diseño," Línea 2 del Metro de Panamá. Accessed: Feb. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/linea-2/#tab-id-2>
- [23] Metro de Panamá, "Trazado General Consolidado L2." Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 33, 2013.
- [24] Metro de Panamá, "Capacidad," Línea 2 del Metro de Panamá. Accessed: Feb. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/linea-2/#tab-id-3>
- [25] Metro de Panamá, "Memoria Anual 2023." Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 51, 2023. [Online]. Available: <https://www.ceim.es/documento/publication-document-1537882194.pdf>
- [26] Metro de Panamá, *Memoria anual 2020*. Panamá, República de Panamá: Metro de Panamá, 2020. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/wp-content/uploads/2021/08/Memoria-2020-05EPAIta.pdf>
- [27] Metro de Panamá, *Memoria anual 2021*. Panamá, República de Panamá: Metro de Panamá, 2021. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/wp-content/uploads/2022/07/Memoria-Anual-2021-Metro-de-Panama-Digital.pdf>
- [28] Metro de Panamá, *Memoria anual 2022*. Panamá, República de Panamá: Metro de Panamá, 2022. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/wp-content/uploads/2022/07/Memoria-Anual-2021-Metro-de-Panama-Digital.pdf>
- [29] Metro de Panamá, *Memoria anual*. Panamá, República de Panamá: Metro de Panamá, S.A., 2018. [Online]. Available: [68](https://asamblea-

</div>
<div data-bbox=)

dspace.metabiblioteca.com/bitstream/001/244/1/Memoria Anual - Metro de Panama 2018 %28Digital%29.pdf

- [30] Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos. II.7. Material rodante*. Panamá, República de Panamá: Metro de Panamá, 2014.
- [31] E. Quiñones, “Metro de Panamá: Una década de conectividad y progreso al servicio de la comunidad,” Noticias. Accessed: Apr. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/metro-de-panama-una-decada-de-conectividad-y-progreso-al-servicio-de-la-comunidad/>
- [32] Metro de Panamá, “Electrificación,” Línea 2 del Metro de Panamá. Accessed: Feb. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/linea-2/#tab-id-4>
- [33] A. Monrroy, D. Domínguez, E. González, G. García, J. Burgos, and A. Berbey-Alvarez, “Suministro de la Energía Eléctrica de la Línea 2 del Metro de Panamá: Ingeniería Conceptual comentada Supply of the Electric Power of Line 2 of the Panama Metro: Conceptual Engineering commented,” in *III Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Sostenible*, Universidad Tecnológica de Panamá, Ed., David, República de Panamá: Universidad Tecnológica de Panamá, 2018, pp. 103–119. [Online]. Available: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/memoutp/article/view/1796>
- [34] F. J. Calvo, J. Lorente-Gutiérrez, and J. de O. López, *Funcionamiento y explotación de la infraestructura ferroviaria*, Primera. Granada, España: Grupo editorial universitario., 2006.
- [35] F. Calvo-Poyo, R. Jurado-Piña, J. Lorente-Gutiérrez, and J. De Oña López, *Ferrocarriles*, Primera. Granada, España: Universidad de Granada, 2011.
- [36] F. Calvo-Poyo and J. Lorente-Gutiérrez, *Ferrocarriles para la Ingeniería Civil*, Primera ed. Granada, España, España, 2018.
- [37] A. Berbey-Alvarez, “Proyecto de caracterización del sistema ferroviario del Metro de Panamá.” Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 300, 2014.
- [38] A. Berbey-Álvarez, R. Araúz, and F. Henríquez, “Modeling of the BFU incidence of the Panama metro line 1,” in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2022. doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.165.
- [39] AENOR, *UNE-EN 50126-1. Aplicaciones ferroviarias: Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad (RAMS). Parte 1: Procesos RAMS genéricos*. Madrid, España: AENOR, 2018.
- [40] J. González-Sánchez, *Metodología de estudio RAMS según EN 50126 aplicado a equipos de control de trenes para explotación ATP/ATO en red Ferroviaria. N° Proyecto: 10200190*. Madrid, España: UPM, 2011.
- [41] AENOR, *UNE-EN 50126-2. Aplicaciones ferroviarias Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad (RAMS) Parte 2: Aproximación sistemática para la seguridad*. España: AENOR, 2018.
- [42] AENOR, *UNE-EN 50128. Aplicaciones ferroviarias. Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento de software para sistemas de control y protección del ferrocarril*. España: AENOR, 2012.
- [43] AENOR, *UNE-EN 50129. Aplicaciones ferroviarias: Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento de sistemas. Sistemas electrónicos relacionados con la seguridad para la señalización*. Madrid, España: AENOR, 2005.
- [44] P. Lozano-Carbayo, *El libro del Tren*. Madrid, España: Oberon Grupo Anaya, 2004.

- [45] A. Rodríguez-Cea, *Sistemas de señalización y control ferroviario en alta velocidad*. Universidad de Valladolid, 2015.
- [46] Metro de Panamá, *Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo II. Equipamientos.II.2. Sistema de señalización y control*. Panamá, República de Panamá: Metro de Panamá, 2014.
- [47] J. Arques-Patón, "Compatibilidad técnica e integración segura. Definiciones responsabilidades y alcance normativo." UPM, Madrid, España, p. 31, 2021.
- [48] J. Arques-Patón, *Ingeniería y gestión del mantenimiento en el sector ferroviario*, Primera. España: Díaz de Santos, 2009.
- [49] Metro de Panamá, "6_PRESENTACION_SENALIZACION_Y_CONTROL." Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 11, 2014.
- [50] Comisión Electrotécnica Internacional, *Seguridad funcional de sistemas eléctricos/electrónicos/electrónicos programables relacionados con la seguridad - Parte 1: Requisitos generales*, 2.0. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission (IEC), 2010. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/5515>
- [51] IEC, "Overview of IEC 61508 & Functional Safety." IEC, p. 24, 2022. [Online]. Available: <https://assets.iec.ch/public/acos/IEC 61508 & Functional Safety-2022.pdf?2023040501>
- [52] IEC, *Commented version. IEC 61508*, 2.0. Geneva, Switzerland: The International Electrotechnical Commission (IEC), 2010. [Online]. Available: <https://share.ansi.org/Shared Documents/News and Publications/Other Documents/IEC 61508 Commented Version.pdf>
- [53] Consulting ABB, "Introduction to IEC61508 and Functional Safety." ABB Group, p. 29, 2014. [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/23da2b648eb84d75ac3f960d626d9817/IEC 61508 Introduction End User.pdf>
- [54] Metro de Panamá, "Presentaciones Reuniones de Homologación Línea 2. Reunión 10. Presentación material rodante." Metro de Panamá, S.A., Panamá, República de Panamá, p. 9, 2014. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/linea-2/#tab-id-8>
- [55] Metro de Panamá, "Secretaría del Metro de Panamá. Ingeniería conceptual Línea 2. Especificaciones funcionales, técnicas y contractuales. Tomo I-Obras." Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 317, 2014.
- [56] Metro de Panamá., "Sistemas de vías. Reunión previa y de homologación." Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 12, 2014.
- [57] Metro de Panamá, "Patios y talleres," Línea 2 del Metro de Panamá. Accessed: Feb. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/linea-2/#tab-id-5>
- [58] Secretaría del Metro de Panamá, "Ingeniería conceptual línea 2. Especificaciones funcionales, tecnicas y contractuales. Tomo I-Obras civiles." Secretaria del Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá., p. 348, 2014.
- [59] Metro de Panamá, "Presentaciones Reuniones de Homologación Línea 2. Reunión 2. Presentación estaciones." Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 39, 2014. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/linea-2/#tab-id-8>
- [60] Wikipedia, "Gálbo ferroviario," Fundacion wikipedia. Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Gálbo_ferroviario
- [61] Andrés López Pita, *Infraestructura ferroviaria. Colección TTT Temes de transport i*

territorio. 2008.

- [62] Ferropedia, "Gálibo," La enciclopedia colaborativa del ferrocarril.
- [63] Metro de Panamá, "Presentaciones Reuniones de Homologación Línea 2. Reunión 9. Presentación RAMS." Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 15, 2014. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/linea-2/#tab-id-8>
- [64] J. S. Lott, S. Young, and L. Zhu, "Safe Operations at Roadway Junctions - Design Principles from Automated Guideway Transit," *SAE Tech. Pap.*, no. 2021, 2021, doi: 10.4271/2021-01-1004.
- [65] L. Greiner-Fuchs and M. Cichon, "A Framework to Define Operational Design Domains for Automated Train Operations," *IEEE Access*, vol. 12, no. November, pp. 167022–167039, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3495977.
- [66] S. Dey and S. W. Lee, "Multilayered review of safety approaches for machine learning-based systems in the days of AI," *J. Syst. Softw.*, vol. 176, 2021, doi: 10.1016/j.jss.2021.110941.
- [67] R. Palacin, "Public transport technology for the future," in *The Routledge Handbook of Public Transport*, 2021, pp. 551–567. Accessed: Mar. 09, 2025. [Online]. Available: https://ebrary.net/186605/environment/public_transport_technology_future
- [68] A. Kaczorek, I. Karasiewicz, M. Kycko, M. Pawlik, K. Polak, and W. Rzepka, "Hyperoperability – main challenge for the future guided transport systems based on hyperloop concept," *Arch. Civ. Eng.*, vol. 68, no. 4, pp. 5–30, 2022, doi: 10.24425/ace.2022.143023.
- [69] D. Gesmann-Nuissl and S. Kunitz, "Auditing of AI in Railway Technology – a European Legal Approach," *Digit. Soc.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–16, 2022, doi: 10.1007/s44206-022-00015-1.
- [70] R. Kour, A. Patwardhan, A. Thaduri, and R. Karim, "A review on cybersecurity in railways," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 237, no. 1, pp. 3–20, 2023, doi: 10.1177/09544097221089389.
- [71] R. Tagiew and C. Klotz, "Performance Metric for Horn and Brake Automation on Mainline Trains," *Int. Conf. Veh. Technol. Intell. Transp. Syst. VEHITS - Proc.*, no. Vehits, pp. 212–219, 2024, doi: 10.5220/0012553100003702.
- [72] I. Yarza, "Functional Safety on AI-based critical systems," no. 101069595. AEIC, Barcelona, España, p. 31, 2024. [Online]. Available: https://safexplain.eu/wp-content/uploads/2024/07/20240614-SAFEXPLAIN-AEiC-2024_IYA.pdf
- [73] P. Hyde, C. Ulianov, J. Liu, M. Banic, M. Simonovic, and D. Ristic-Durrant, "Use cases for obstacle detection and track intrusion detection systems in the context of new generation of railway traffic management systems," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 236, no. 2, pp. 149–158, 2022, doi: 10.1177/09544097211041020.
- [74] A. Ciancabilla and S. Griebel, "Holistic View on the Charm and Challenge of CENELEC Standards for Railway Signaling," in *Handbook of RAMS in railway systems /Theory and practice*, Taylor & Francis Group, Ed., Taylor & Francis Group, LLC, 2018, pp. 689–695.
- [75] M. Etxeberria-Garcia, "Computer vision for autonomous vehicles applied to urban underground railway," Mondragon Unibertsitatea, 2022. [Online]. Available: <https://ebiltegia.mondragon.edu/xmlui/handle/20.500.11984/5986>
- [76] S. Domínguez-Fernández, "ERTMS: despliegue, innovacion y futuro," *Ing. Civ.*, vol. 200, p. 8, 2022, [Online]. Available: <https://ingenieriacyil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2456/2045>

- [77] F. Rispoli, "Modern Railways: Connecting Train Control Systems With Mobile and Satcom Telecom Networks," in *Computers in Railways XVII*, Witpress, Ed., Witpress, 2020, pp. 393–403. doi: 10.2495/cr200361.
- [78] G. Formato, L. Carbone, F. Grassi, R. Divano, and P. Segarich, "Energy efficiency driving strategy with Connected-Driving Advisory System (C-DAS)," *Transp. Res. Procedia*, vol. 72, no. 2022, pp. 263–270, 2023, doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.403.
- [79] M. Uranga, "Análisis de inversiones en la red del Subterráneo de Buenos Aires. Medición de impacto en volumen de pasajeros. Caso Línea A y B," Universidad Torcuato Di Tella, 2020. [Online]. Available: https://repositorio.utdt.edu/bitstream/handle/20.500.13098/11295/MEU_2020_Uranga.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [80] D. Suzarte-Vásquez, "Estudio y Diseño de un Sistema Tren-Tierra de Banda Ancha para Ferrocarriles Suburbanos," Universitat Oberta de Catalunya, 2020. [Online]. Available: https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/119128/1/dasuzarte_Trabajo Final de Máster.pdf
- [81] P. Sanz-Checa, "Análisis de líneas ferroviarias alimentadas desde una misma subestación," Universidad Politécnica de Madrid, 2023. [Online]. Available: https://oa.upm.es/75257/1/TFG_PRISCILA_SANZ_CHECA.pdf
- [82] H. Navarro-Álvarez, "Propuesta metodologica para diseño de un sistema de misión crítica," Universidad del Desarrollo, 2020. [Online]. Available: <https://repositorio.udd.cl/server/api/core/bitstreams/46bf9591-28bc-45c4-b853-4d1897c91e77/content>
- [83] A. Gómez-Lobo and J. J. Price, "La enfermedad de costos de Baumol y el transporte público," Washington, D.C., No. IDB-WP-1096, Mar. 2020. doi: 10.18235/0002252.
- [84] R. Suárez, "Impacto de la transformación digital en la industria ferroviaria," Universidad Torcuato di Tella, 2020. [Online]. Available: https://repositorio.utdt.edu/bitstream/handle/20.500.13098/11484/MBA_Suárez_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [85] J. Ruiz-García, "Evolución de los sistemas de señalización y control ferroviario - Simulación con el software 'Unity,'" Universidad Politécnica de Madrid, 2021. [Online]. Available: https://oa.upm.es/68596/1/TFG_JORGE_RUIZ_GARCIA.pdf
- [86] A. de Paco-Escámez, "Estudio comparativo del impacto de la señalización en la capacidad de una línea ferroviaria," Universidad Politécnica de Valencia, 2024. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/208729>
- [87] J. Díaz-Feter, "Automatización del Metro de Sevilla," Universitat Politècnica de Valencia, 2017. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg3-sum-vol-sp.pdf>
- [88] X. Zhang, W. Hou, and C. D. Sarris, "Advances in Computational Modeling of EMC/EMI Effects in Communication-Based Train Control (CBTC) Systems," *IEEE Electromagn. Compat. Mag.*, vol. 10, no. 3, pp. 65–75, 2021, doi: 10.1109/MEMC.2021.9614251.
- [89] D. V. Ha, T. L. Thanh, T. T. Huong, and T. Van Chien, "Performance and Optimization of Outage Probability in CBTC Systems," *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.*, vol. 10, no. 6, pp. 439–447, 2021, doi: 10.18178/ijeetc.10.6.439-447.
- [90] C. Atilgan *et al.*, "Decentralized-Hierarchical Control Approach Automatic Train Protection (ATP) of Communication Based Train Control (CBTC) To cite this version : HAL Id : hal-03270963," 2021, [Online]. Available: <https://hal.science/hal->

03270963/document

- [91] Z. X. Chen *et al.*, “Developing CBTC system safety requirement hierarchy through STPA methodology,” *Heliyon*, vol. 10, no. 11, p. e31776, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31776.
- [92] U. Tefek, E. Esiner, L. Wei, and Y. C. Hu, “TASC: Transparent, Agnostic, Secure Channel for CBTC Under Failure or Cyberattack,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 13294 LNCS, pp. 221–237, 2022, doi: 10.1007/978-3-031-05814-1_16.
- [93] S. Ma, M. Li, R. Yang, Y. Sun, Z. Wang, and P. Si, “Next-Hop Relay Selection for Ad Hoc Network-Assisted Train-to-Train Communications in the CBTC System,” *Sensors*, vol. 23, no. 13, 2023, doi: 10.3390/s23135883.
- [94] C. Huang and Y. Huang, “Research and design of data communication subsystem of urban rail transit CBTC system,” *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 12, no. 4, pp. 629–639, 2021, doi: 10.1007/s13198-021-01055-5.
- [95] R. Lu, H. Dong, H. Wang, D. Cui, L. Zhu, and X. Wang, “A Resilience-Based Security Assessment Approach for CBTC Systems,” *Complexity*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/2175780.
- [96] X. Chen, H. Zhang, and H. Shen, “Research on Simulation Testing Technology for Urban Rail Transit CBTC Systems,” *Adv. Eng. Technol. Res.*, vol. 12, p. 10, 2024, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/389505950_Research_on_Simulation_Testing_Technology_for_Urban_Rail_Transit_CBTC_Systems
- [97] Z. Ngadiron, S. Bachok, and N. A. Kamaluddin, “Enhancing The CBTC System in Urban Rail Transit,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2991, no. 1, 2024, doi: 10.1063/5.0198925.
- [98] M. A. Dagli, “Visible light communications based train control,” *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 199, pp. 87–94, 2020, doi: 10.2495/CR200081.
- [99] S. Qiu, N. Li, X. Wei, and G. Li, “Research on the stability of virtual coupling train formation based on a PID controller under the influence of time delay,” *Transp. Saf. Environ.*, vol. 6, no. 3, pp. 0–6, 2024, doi: 10.1093/tse/tdad037.
- [100] J. Xun, Y. Li, R. Liu, Y. Li, and Y. Liu, “A Survey on Control Methods for Virtual Coupling in Railway Operation,” *IEEE Open J. Intell. Transp. Syst.*, vol. 3, no. December, pp. 838–855, 2022, doi: 10.1109/OJITS.2022.3228077.
- [101] J. Felez, Y. Kim, and F. Borrelli, “A Model Predictive Control Approach for Virtual Coupling in Railways,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, no. 7, pp. 2728–2739, 2019, doi: 10.1109/TITS.2019.2914910.
- [102] J. Felez, M. A. Vaquero-Serrano, and J. de Dios Sanz, “A Robust Model Predictive Control for Virtual Coupling in Train Sets,” *Actuators*, vol. 11, no. 12, 2022, doi: 10.3390/act11120372.
- [103] J. Li *et al.*, “Distributed Robust Model Predictive Control for Virtual Coupling Under Structural and External Uncertainty,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 25, no. 8, pp. 8751–8769, 2024, doi: 10.1109/TITS.2024.3363136.
- [104] X. Ge, Q. Han, and X. Zhang, “Secure virtual coupling control of connected train platoons under cyber attacks,” *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 63, no. 1, pp. 93–120, 2025, doi: 10.1080/00423114.2024.2410909.
- [105] Y. Yang and F. Yan, “Research on Train Dynamic Coupling Strategy Based on Distributed Model Predictive Control,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2183, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2183/1/012029.

- [106] X. Ge, Q. Wu, Q. L. Han, and X. M. Zhang, "Resilient Virtual Coupling Control of Automatic Train Convoys With Intermittent Communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 73, no. 5, pp. 6183–6195, 2024, doi: 10.1109/TVT.2023.3339854.
- [107] J. Aakanksha, A. Bansal, and A. Chauhan, "Virtual Coupling in Train using 5G ; Model prediction and simulation," pp. 1–5, [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4925755
- [108] Q. Zhang, H. Wang, Y. Zhan, M. Chai, and S. Ma, "An adaptive safety control approach for virtual coupling system with model parametric uncertainties," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 154, no. 3, p. 32, 2023, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X23002243>
- [109] J. Felez and M. A. Vaquero-Serrano, "Virtual Coupling in Railways: A Comprehensive Review," *Machines*, vol. 11, no. 5, 2023, doi: 10.3390/machines11050521.
- [110] G. Li, J. Zou, W. Ma, and M. Lan, "Research on virtual coupling technology in rail transit train collision protection," *Transp. Saf. Environ.*, vol. 6, no. 1, 2024, doi: 10.1093/tse/tdad012.
- [111] M. A. Vaquero-Serrano and J. Felez, "A decentralized robust control approach for virtually coupled train sets," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 38, no. 14, pp. 1896–1915, 2023, doi: 10.1111/mice.12985.
- [112] S. Verma, M. Ghazel, and M. Berbineau, "Model-based dependability evaluation of a Wireless Communication System in a VirVerma, S., Ghazel, M., & Berbineau, M. (2021). Model-based dependability evaluation of a Wireless Communication System in a Virtually Coupled Train Set. IFAC-PapersOnLine, 54(," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 2, pp. 179–186, 2021, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.06.045.
- [113] Z. Wu, C. Gao, and T. Tang, "A Virtually Coupled Metro Train Platoon Control Approach Based on Model Predictive Control," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 56354–56363, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3071820.
- [114] A. Fantechi, S. Gnesi, and G. Gori, "Future Train Control Systems: Challenges for Dependability Assessment," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 13704 LNCS, pp. 269–285, 2022, doi: 10.1007/978-3-031-19762-8_21.
- [115] M. Chai, H. Wang, T. Tang, J. Chai, and H. Liu, "A Relative Operation-Based Separation Model for Safe Distances of Virtually Coupled Trains," *IEEE Trans. Intell. Veh.*, vol. 9, no. 1, pp. 2031–2045, 2024, doi: 10.1109/TIV.2023.3301009.
- [116] L. Jiao *et al.*, "Advanced Deep Learning Models for 6G: Overview, Opportunities and Challenges," *IEEE Access*, vol. 12, no. June, pp. 133245–133314, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3418900.
- [117] Y. Yuan *et al.*, "A 3D Geometry-Based THz Channel Model for 6G Ultra Massive MIMO Systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 3, pp. 2251–2266, 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3143500.
- [118] R. Liu *et al.*, "6G Enabled Advanced Transportation Systems," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 25, no. 9, pp. 10564–10580, 2024, doi: 10.1109/TITS.2024.3362515.
- [119] J. Wang, C. X. Wang, J. Huang, and Y. Chen, "6G THz Propagation Channel Characteristics and Modeling: Recent Developments and Future Challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 62, no. 2, pp. 56–62, 2024, doi: 10.1109/MCOM.001.2200403.
- [120] T. Zemen *et al.*, "Site-Specific Radio Channel Representation for 5G and 6G," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 1–9, 2024, doi: 10.1109/MCOM.001.2400355.
- [121] N. Rajatheva *et al.*, "White Paper on Broadband Connectivity in 6G," pp. 1–46,

- 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2004.14247>
- [122] M. Narouwa *et al.*, “Enabling Network Technologies For Flexible Railway Connectivity,” *IEEE Access*, vol. 12, no. October, pp. 151532–151553, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3479879.
 - [123] L. Martinez and U. Martin, “Terminology, differences, and challenges of communications-based train control and european train control systems,” *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 199, no. 3, pp. 15–26, 2020, doi: 10.2495/CR200021.
 - [124] The UITP Observatory of Automated Metros, “World Report on Metro Automation 2018,” *UITP (International Assoc. Public Transp.*, no. April, pp. 1–8, 2019, [Online]. Available: https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/Statistics-Brief-Metro-automation_final_web03.pdf
 - [125] M. Rossi, J. Rey-Alvarez, F. Maver, E. Petroncini, J. Cobas, and L. Romero, “Automatización del transporte ferroviario en Buenos Aires,” in *8° Congreso nacional de ingeniería, informática y sistemas de información*, CONAISI, Ed., Buenos Aires, Argentina: CONAISI, 2020, p. 10. [Online]. Available: https://grupogemis.com.ar/wp-content/uploads/2021/12/Automatizacion_Trenes.pdf
 - [126] J. Farooq, J. & Soler, “Radio communication for communications-based train control (CBTC): A tutorial and survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, pp. 1377–1402, 2017, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7836324>
 - [127] UITP, “WORLD REPORT ON METRO AUTOMATION.” UITP, Belgium, p. 8, 2018. [Online]. Available: https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/Statistics-Brief-Metro-automation_final_web03.pdf
 - [128] Metro de Panamá, “Estudio de Prefactibilidad. Nueva red maestra del sistema Metro de Panamá.” Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 501, 2013. [Online]. Available: <https://definicion.de/prefactibilidad/>
 - [129] Metro de Panamá, “Mapa de la nueva red maestra del Metro de Panamá.” Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 1, 2019. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/wp-content/uploads/2019/04/Mapa-de-la-Nueva-Red-Maestra-del-Sistema-Metro-de-Panamá.pdf>
 - [130] Metro de Panamá, “Estudios de Planificación,” Diagnósticos Urbanísticos de las Líneas del Metro de Panamá. Accessed: Apr. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/estudios-de-planificacion/>
 - [131] Metro de Panamá, “Red Maestra del Metro de Panamá.” Metro de Panamá, Panamá, República de Panamá, p. 1, 2025. [Online]. Available: <https://www.elmetrodepanama.com/red-maestra/>
 - [132] C. Atilgan *et al.*, “Decentralized-Hierarchical Control Approach Automatic Train Protection (ATP) of Communication Based Train Control (CBTC).” p. 23, 2021. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-03270963v1>
 - [133] CEN-CENELEC, “EN ISO 22163. Railway applications-Railway quality management system- ISO 9001: 2015 and specific requirements for application in the railway sector (ISO 22163: 2023).” CEN-CENELEC, Bruselas, p. 93, 2024.
 - [134] Wikipedia, “ATC,” Fundación Wikipedia. Accessed: Apr. 04, 2025. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Automatic_Train_Operation
 - [135] Wikipedia, “ATO,” Fundación Wikipedia. Accessed: Apr. 04, 2025. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Automatic_Train_Operation
 - [136] Wikipedia, “ATP,” Fundación Wikipedia. Accessed: Apr. 04, 2025. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Automatic_Train_Operation
 - [137] F. González-Fernández, *Señalización y seguridad ferroviaria*, Madrid , E. 2016.

- [138] IEEE, "IEEE Draft Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements." IEEE, 2025. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/1474.1/6959/>
- [139] Valentín Arranz Rodríguez, *501 términos español-inglés, inglés-español de Señalización ferroviaria moderna explicados*, Primera ed. Madrid, España: Universidad nacional de educación a distancia, 2011.
- [140] Q. Mahboob and E. Zio, *Handbook of RAMS in Railway Systems. Theory and Practice*. Boca Ratón, Florida: Taylor & Francis Group, LLC, 2018.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Red del Metro de Panamá (Línea 1 y 2). Fuente: Berbey-Alvarez (2023)	5
Figura 2. Fases del ciclo de vida cubiertas por esta norma (véase la figura 10 de la Norma IEC 62278 o figura 1 de la Norma UNE_EN 62267)	12
Figura 3. Esquema de catenaria rígida[33], [37]	17
Figura 4. Enclavamiento y monitoreo de la línea 2 del Metro de Panamá[1]	20
Figura 5. Especificación Conceptual Sistema S&CT – Arquitectura de Enclavamiento[49]	21
Figura 6. Esquema de bloque de una estación (con cambiavías) para cada una de las dos redes	23
Figura 7. Esquema de circuitos redundantes del CCO y el enclavamiento[1]	24
Figura 8. Uso de la capa de protección de acceso separada[1]	24
Figura 9. Protocolo de comunicación (solicitud de repetición automática) [1]	25
Figura 10. Computadora a bordo del tren (equipo embarcado) [1]	26
Figura 11. Concepto de FOTS (Análogo al de L1 representado) [1]	26
Figura 13. Material rodante de la línea 2 del Metro de Panamá. Cortesía: A. Berbey-Alvarez	27
Figura 14. Vista interior del Material rodante de la línea 2 del Metro de Panamá. Cortesía: A. Berbey-Alvarez	27
Figura 15 Estación tipo con andenes laterales y apoyo estructural central[58]	27
Figura 16. Estación tipo con andenes laterales y apoyo estructural de tipo pórtico[58]	30
Figura 17. Estación singular de San Miguelito[58]	31
Figura 18. Estación ITSE-UTP	32
Figura 19. Estación de Nuevo Tocumen	33
Figura 20. Fases del ciclo de vida cubiertas por esta norma (véase la figura 10 de la Norma IEC 62278 o figura 1 de la Norma UNE_EN 62267)	35
Figura 21. Grado de automatización para la línea 2 del Metro de Panamá[46]	59
Figura22. Perspectivas de las funcionalidades del sistema ferroviario según el sistema[123]	62

INDICE DE TABLAS

Contenido	Página
Tabla 1. Normas de seguridad[1]	6
Tabla 2. Parámetros de la vía	10
Tabla 3. Sección del diseño conceptual geométrico de la línea 2 del Metro de Panamá[23]	11
Tabla 4. Composición química de los rieles UIC 54 R260	13
Tabla 5. Dimensiones y tolerancias.	13
Tabla 6. Oferta de la Línea 2 del Metro de Panamá más ramal (R) al aeropuerto	14
Tabla 7. Estadística descriptiva de la oferta de la Línea 2 del Metro de Panamá	14
Tabla 8. Criterios de calidad de operaciones	15
Tabla 9. Parámetros de operación de la línea 2 del Metro de Panamá	15
Tabla 10. Características técnicas del material rodante de la línea 2 del Metro de Panamá	28
Tabla 21. Tipológicas de las estuaciones y casos singulares[58]	29
<i>Tabla 12. Normas de ingeniería ferroviaria para la línea 2 del Metro de Panamá[62]</i>	33
<i>Tabla 13. Grado de automatización [2]</i>	37
Tabla 14. Estado del arte	38
Tabla 15. Incremento del grado de automatización	61
Tabla 16. Características de grados de automatización y ejemplos[123], [124][122][125][123], [126].	62

ABREVIATURAS, UNIDADES Y ACRÓNIMOS

AAR: (American A1 associationA1 railways). Asociación de ferrocarriles americanos

ADV: Aparato de vía

ANSI: (American national standard institute). Instituto nacional de normas americanas

ATC: Control automático de trenes. (automatic train control)

ATO: Operación automática de trenes. (automatic train operation)

ATP: Protección automática de trenes. (automatic train protection)

ATS: Supervisión automática de trenes. (automatic train supervision)

BACK BONE: Se refiere a las principales conexiones troncales de la red de datos

BFU: Botón de frenado de urgencia

CBTC: Control de trenes basado en comunicaciones de radio. (communication based train control)

CCO: Centro de control de operaciones

CCTV: Circuito cerrado de televisión

CENELEC: Comité europeo de normalización electrotécnica. (comité européen en normalisation électrotechnique)

ETCS: eUROPEAN TRAIN CONTROL SYSTEMS

FOTS: Red troncal. (fiber optic transmission system)

GOA: Grado de automatización. (Grade of automation)

IBIS: Interconnection bus for integrated sensors

IBIS- BUS: Medio de transmisión de datos

IEEE: Instituto de ingeniería eléctrica y electrónica. (Institute of electrical and electronics engineers)

IHM: Interfaz hombre máquina

IP: Es un número que identifica de manera lógica y jerárquica a una interfaz de un dispositivo (habitualmente una computadora) dentro de una red que utilice el protocolo IP

ISO: Organización internacional para la estandarización

OSI: El modelo de referencia de interconexión de sistemas abiertos

PAF: Pruebas de aceptación en fábrica

PAS: Pruebas de aceptación en sitio

PLC: Controlador lógico programable. (Programmable logic controller)

RAMS: Confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad. (Reliability, availability, maintainability and safety)

SIL: Nivel de integridad de seguridad. (Safety integrity level)

STP: Cables entorchados y apantallados. (Shielded twisted pair)

STO: (Semiautomatic train operation). Operación de trenes en modo

semiautomático

S&CT Sistema de señalización y control de trenes

TCP / IP: Diferentes familias de protocolos para comunicación por red de datos para los sistemas

TRE: Equipamiento radio de la vía. (Track side equipment)

UITP: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF PUBLIC TRANSPORT

UTO: Operación de trenes no atendida sin acompañante. (Unattended train operation)

VMS: Sistema avisos electrónicos al público. (Variable message signs)

WIFI: Wireless fidelity, también llamada WLAN (red inalámbrica)

GLOSARIO

ATC: «Control automático de trenes. (automatic train control). «El ATC es una clase general de sistemas de protección de trenes utilizados en el transporte ferroviario, que involucran un mecanismo de control de velocidad en respuesta a entradas externas. Por ejemplo, el sistema podría aplicar automáticamente el freno de emergencia si el maquinista no reacciona a una señal de peligro. Los sistemas ATC tienden a integrar varias tecnologías de señalización en cabina, y utilizan patrones de desaceleración graduales, en lugar de los frenados bruscos característicos de los sistemas de detención automática de trenes (ATS), una tecnología más antigua. El ATC también se puede usar con operación automática de trenes (ATO) y generalmente se considera que es una parte de seguridad crítica dentro de un sistema ferroviario. El término es especialmente común en Japón, donde el ATC se ha usado en todas las líneas del Shinkansen (tren bala) y en algunas líneas ferroviarias convencionales, como reemplazo del ATS»[134].

ATO: Operación automática de trenes. (automatic train operation). «El ATO es el modo de conducción que gobierna al tren de forma automática sin la intervención del conductor. El ATO es un modo de conducción y no un sistema de seguridad, por lo que el ATO es siempre supervisado por otros sistemas, como el ATP. El modo ATO se utiliza principalmente en sistemas de transporte urbano de pasajeros, tipo metros. Cuando está activado regula la marcha, el frenado, etc. El conductor del tren se limita a abrir y cerrar puertas, dar orden de salida al ATO y supervisar la seguridad de todo el sistema. El sistema ATO permite frecuencias de un tren cada 3 minutos a velocidades de hasta 80 kilómetros por hora. Para iniciar la explotación en modo ATO, se establece para una vía determinada las curvas de aceleración y frenado, la velocidad idónea en cada punto, los puntos de parada y todos los parámetros necesarios para la conducción automática. Con estos datos se decide la situación de las balizas necesarias para el ATO, que pueden ser de dos tipos:

- Indican al tren dónde tiene que acelerar y frenar.
- O indican al tren su posición en la línea, para que este decida dónde acelerar y dónde frenar según el perfil de la vía registrado en la computadora de a bordo en el tren.

Como el ATO regula la conducción del tren y no su seguridad, no es función de las balizas del ATO evitar que el tren supere la velocidad máxima o rebase señales en rojo, sino que estas funciones se dejan a otras balizas de otros sistemas, como el ATP. El ATO puede utilizar la información de las balizas de otros sistemas para regular su conducción, por ejemplo, deteniéndose ante una señal en rojo sin rebasarla como haría un conductor[135]».

ATP: Protección automática de trenes. (automatic train protection). «El ATP es un sistema de seguridad que supervisa la conducción en trenes, que aplica freno de emergencia o impide otras acciones cuando no se cumplen algunas condiciones de seguridad. El sistema ATP se compone normalmente de dos partes:

- Las balizas colocadas en la vía, que informan al tren de las condiciones que se tienen que cumplir (velocidad máxima, punto y lado de apertura de puertas, situación de las señales, etc.).
- Los elementos a bordo del tren, que comprueban si la circulación cumple lo establecido.

Las balizas se sitúan a lo largo de la vía y pueden ser balizas fijas entre los carriles o emisores que transmiten la información a través de ondas de radio o del carril. Las balizas pueden transmitir:

- Información fija, como el límite de velocidad en un tramo determinado.
- Información variable, como la situación de una señal (vía libre, parada, etc.). Para conocer esta información, la baliza tiene que estar conectada al bloqueo o enclavamiento.

Cuando el tren lee la información que le proporcionan las balizas, comprueba que las condiciones impuestas se cumplan. Si no se cumplen aplica freno de emergencia, o en algunos casos, impide una determinada acción (como abrir puertas si el tren no está en el punto adecuado)»[136].

ATS: «Supervisión automática de trenes. (automatic train supervision). Es un sistema de seguridad ferroviaria que detiene al tren automáticamente frente a ciertas situaciones (falta de respuesta del conductor, vía sin salida, violación de una señal, etc.) y previene la ocurrencia de accidentes. En algunas situaciones funciona como un interruptor de hombre muerto. Los sistemas ATS pueden ser mecánicos, donde un brazo se eleva sobre la vía para accionar una palanca en el tren que activa los frenos y corta el suministro eléctrico. Los sistemas mecánicos del mundo son generalmente incompatibles entre sí. Los sistemas mecánicos no son adecuados para altas velocidades, superiores a 110 km/h. Los sistemas ATS también pueden ser magnéticos o inductivos, sin contacto. También suelen ser incompatibles. Pueden utilizarse en altas velocidades»[134].

Autoridad ferroviaria: «el organismo que tiene ante un Regulador la responsabilidad global del funcionamiento de un sistema ferroviario. Las responsabilidades de las autoridades ferroviarias respecto del conjunto del sistema o de sus partes, y de las actividades del ciclo de vida están en ocasiones repartidas entre uno o más organismos o entidades. Por ejemplo:

- El propietario(s) de una o más partes de los activos del sistema y sus agentes de compras;
- El operador del sistema;
- El mantenedor o mantenedores de una o más partes del sistema;
- Dichos repartos se basan en instrumentos estatutarios o en acuerdos contractuales. Tales responsabilidades deberían, por tanto, quedar claramente establecidas en las primeras etapas del ciclo de vida de un sistema»[18].

Autoridad reguladora de la seguridad: «A menudo, un organismo del Gobierno Nacional responsable de fijar o acordar, para un sistema ferroviario, los requisitos de seguridad y de garantizar que cumpla dichos requisitos»[18].

Análisis de árbol de fallos: «Un análisis cuya finalidad es determinar qué modos de defecto del producto, subproductos o sucesos externos, o combinaciones de todos ellos, pueden resultar en un modo de defecto declarado del producto, presentado en forma árbol de fallos».[18]

Averías repetitivas o sistemáticas: «Se considerarán averías repetitivas o sistemáticas, las que supongan que un equipo o subgrupo funcional absorba más del 30% de las averías del subsistema al que pertenece, independientemente del valor absoluto alcanzado en éste. Este tipo de análisis, se realizará, al igual que el de los trenes y subsistemas, como valor mensual y acumulado desde el origen del cómputo»[30].

Averías que reducen la vida de los aparatos: «Aquellas averías o defectos que su completa reparación suponga una merma evidente de la vida de la pieza, aparato o sistema (como es el caso de torneos de ruedas), se imputarán al constructor, además de la repercusión de la inmovilización, los gastos originados en la reparación y valoración de reducción de vida»[30].

Balizas: «Son elementos que se instalarán entre los dos rieles que sirven para suministrar información exacta de la posición de tren, velocidades permitidas y otra información fija de la línea (en la vía, pasiva) y para transmitir los datos de los trenes/itinerarios y códigos de seguridad en el patio (activo). Están diseñadas y construidas para soportar las condiciones ambientales extremas que se dan a la intemperie (grandes variaciones de temperatura, humedad, etc.) sin necesitar mantenimiento. Permiten la transmisión discontinua de datos cuando un tren las activa al pasar por encima de ellas. No requieren de suministro de energía al ser energizadas mediante la señal emitida por las antenas de los trenes, extrayendo de esa señal energía suficiente para alimentar la electrónica que incorporan y emitir una señal de respuesta al tren. Las balizas constituyen elemento actuador del sistema CBTC, ya que mediante estos dispositivos se podrá conocer la posición exacta del tren en la vía». De acuerdo al Metro de Panamá, las balizas son «un dispositivo emisor de señales electromagnéticas que son recogidas por un captador situado en el vehículo»[1].

Cambiavías: «son elementos fundamentales para la operación de los sistemas férreos, que permite a los trenes y al material rodante auxiliar pasar de una vía a otra»[19]

Caso de seguridad: «La demostración documentada de que el producto cumple con los requerimientos de seguridad especificados»[18].

Causa de fallo: «Las circunstancias que, durante el diseño, la fabricación o la utilización han llevado a un fallo. (IEC 60050-191)».[18]

CBTC: De acuerdo con la norma IEEE1474.1, el CBTC es el «sistema de control automático de trenes basado en la localización continua del tren independientemente de los circuitos de vía, y equipado con un sistema de transmisión bidireccional continuo entre tren y tierra, así como procesadores tanto embarcados como en la vía capaces de implementar funciones vitales»[137][138].

CCTV: Sistema de video vigilancia de circuito cerrado de televisión.

Ciclo de vida del sistema: «Las actividades que se desarrollan durante un periodo de tiempo que se inicia cuando un sistema es ideado, y finalizan cuando el sistema ya no está disponible para ser utilizado, es retirado de servicio y eliminado».[18]

Configuración en “Hot Stand By” o de “alta disponibilidad” es «aquella en la que se configura un equipo que opera preferentemente y otro ubicado en otro lugar, se configura de manera que esté listo para tomar el control de manera inmediata en el caso en que el primero presentara un mal funcionamiento de cualquier tipo, de manera que esta transición entre uno y otros es transparente para el resto del sistema. En cualquier caso, la arquitectura del sistema debe garantizar una alta disponibilidad, es decir 99%»[46].

Conformidad (conforme a): «Una demostración de que una característica o propiedad de un producto satisface los requisitos declarados. Contratista (EI)». [18]

Contador de revoluciones de ruedas: instrumento para contar las vueltas de una rueda en un vehículo y con este y el diámetro fijo de la misma se calcula la distancia de recorrida.

Contratista: «Empresa, o grupo de ellas, responsable(s) de la ejecución del Contrato, de acuerdo con esta Norma»[18].

Disponibilidad: «Es la extensión de la calidad operacional, según las necesidades de cada momento. La disponibilidad mide el grado de cumplimiento de la oferta programada. Se valora teniendo en cuenta los trenes que deben circular con pasajeros, según los programas establecidos y los que realmente están a disposición para este servicio. Para el cálculo de la disponibilidad se tendrá en cuenta la siguiente relación:

$$D = TS/TP \times 100$$

Dónde:

D = Disponibilidad en % de cumplimiento.

TS = Número de trenes reales, en servicio comercial en línea, en cada franja horaria.

TP = Número de trenes programados para el servicio en línea con pasajeros. El valor exigido será del 99%, tanto en laborables como en festivos»[30].

«La capacidad que tiene un producto/sistema de hallarse en situación de realizar una función requerida en condiciones determinadas en un momento dado o durante un intervalo de tiempo señalado, suponiendo que se faciliten los recursos externos requeridos»[18][47], [48].

Distribución: «Un proceso mediante el cual los elementos RAMS de un sistema se subdividen entre los diferentes componentes que abarca el sistema a fin de proporcionar objetivos individuales»[18]

Enclavamiento: De acuerdo a Arranz[139], «es el conjunto de equipos que constituyen un sistema lógico de seguridad, capaz de garantizar la circulación en estaciones, controlando, la relación de dependencia entre la posición de los aparatos de vía y las indicaciones de movimientos dadas a las circulaciones a través de las señales de campo o de los equipos embarcados. Básicamente consta de: aparatos de vía, aparatos o dispositivos de control y puestos de operación».

Estación: «Lugar que permite a los pasajeros acceder al sistema embarcando desde un espacio público en los trenes (es decir, la actividad de embarcar y desembarcar del tren)»[2]

Evaluación: «La realización de una investigación con el fin de llegar a un juicio, basado en pruebas, sobre la idoneidad de un producto»[18]

Fallo: «Se entiende por fallo la interrupción de la capacidad del tren para realizar la función prevista, que viene definida en los pliegos de condiciones técnicas, con sus modificaciones posteriores, en la oferta y en el proyecto. Por consiguiente, se entenderá como fallo cualquier anomalía que impida el funcionamiento normal del tren o de cualquier equipo, y que obligue a una reparación de cualquier tipo, siempre que fuerce el desalojo de viajeros, o el retiro del tren, (en cualquier momento de la jornada, y cualquiera que sea el número de vueltas efectuadas desde la anomalía, tanto al final de la línea como a medio recorrido) o provoque un retraso en el servicio superior a 3 minutos, aunque se repare en ruta. Asimismo, se computará como fallo a efectos de fiabilidad, toda anomalía o avería detectada en cocheras o apartaderos, (al efectuar pruebas o comprobaciones previas a la salida de trenes al servicio) que implique una reparación, o sustitución de elemento o equipo averiado produzca»[30].Fallo se define como «el cese de la capacidad de un elemento para realizar la función requerida»[47], [48].

Fallo de causa común: «Un fallo que es el resultado de uno o varios sucesos que ocasionan la coincidencia de estados de fallo de dos o más componentes que conducen a que un sistema no realice la función requerida de él»[18].

Fallo dependiente: «el fallo de un conjunto de sucesos, cuya probabilidad no puede expresarse como el simple producto de las probabilidades incondicionales de cada los sucesos por separado»[18].

Fallo sistemático: «Fallos debidos a errores en cualquier actividad de seguridad del ciclo de vida, en cualquier fase, que provocan que éste falle dándose una combinación particular de supuestos de alimentación o alguna condición ambiental particular»[18].

Fiabilidad: «la posibilidad de explotación comercial de un tren o lote de trenes, durante un recorrido o tiempo determinado, sin que se produzca ninguna disfunción»[30]. «La probabilidad de que un elemento pueda realizar una función requerida en condiciones determinadas durante un intervalo de tiempo determinado (t_1 , t_2). (IEC 60050-191)»[18][47], [48].

Gálbo de la vía: «Espacio predefinido alrededor de la vía y determinado tomando la vía como referencia en el que los trenes en movimiento no pueden, mientras se encuentren en condiciones de funcionamiento, entrar en contacto con personas o bienes que se encuentren fuera de este espacio en su totalidad»[2]

Gálbo estático: «el galibo estático del tren corresponde a sección transversal del vehículo, la cual incluye tanto la carrocería como otros accesorios exteriores que pudieran causar conflictos con las

instalaciones físicas. El gálibo estático considera al vehículo en reposo es decir sin ningún movimiento transversal del tren o de sus accesorios, y está dado por el fabricante del material rodante. Para el Metro de Panamá, el gálibo horizontal del vehículo es 2.710 metros »[19].

Gálibo cinemático: «El gálibo dinámico del vehículo se refiere a la envoltura cinemática que forma el vehículo en movimiento, dicha envoltura del vehículo considera las posibles variaciones de ocupación de espacio del vehículo, debido a su movimiento tanto en condiciones óptimas como en condiciones de desgaste avanzado o fallas en sus sistemas, en especial la suspensión»

Gálibo de paso libre: «El gálibo de paso libre se refiere a la distancia mínima del vehículo a cualquier objeto fijo adyacente. Este gálibo incluye además del gálibo dinámico del vehículo las posibles desviaciones de construcción de 50 mm (gálibo de construcción) y una lámina de seguridad de 100 mm (GAP dinámico 100 mm)»[19].

Gálibo mínimo para vialidad: «El gálibo vertical mínimo para vehículos terrestres será de 5.50m desde el nivel del terreno hasta un punto inferior de cualquier elemento estructural cuya proyección se encuentre sobre la vialidad»[58]. El gálibo vertical para peatones será de 2.05m en vertical y 0.70m en horizontal,

Gestión de la configuración «Una disciplina que aplica la dirección y supervisión técnica y administrativa para identificar y documentar las características funcionales y físicas de un elemento de configuración, controlar el cambio de dichas características, recoger e informar sobre el procesamiento de cambios y el estado de puesta en práctica, y verificar que se cumplen los requisitos especificados»[18].

Grado de automatización: Nivel de automatización para la explotación del tren resultante del reparto de la responsabilidad de las funciones básicas para la explotación del tren entre el personal de explotación y el sistema técnico[2].

Incremento de la fiabilidad: «Una condición caracterizada por una mejora progresiva de una medición del rendimiento de la fiabilidad de un elemento a lo largo del tiempo (IEC 60050-191)»[18].

Industria ferroviaria: «Término genérico que se refiere al proveedor o proveedores de sistemas ferroviarios completos, sus subsistemas o piezas componentes»[18].

Integridad de seguridad: «La probabilidad de que un sistema cumpla satisfactoriamente las funciones de seguridad requeridas en todas las condiciones establecidas dentro de un periodo de tiempo igualmente establecido»[18].

Inmovilización del material móvil: «Es la paralización del material móvil, al no estar apto para prestar servicio comercial, por causas imputables al constructor y entre cuyos motivos habituales están, orientativamente, los siguientes:

- Reparación de averías procedentes de línea.
- Reparación de averías procedentes u observadas en los ciclos de mantenimiento.
- Reparación de averías observadas en cocheras, al inspeccionar o preparar los trenes.
- Paralización del tren por parte del Cliente o constructor, ante reiteradas averías en línea, sin que se encuentre reparación alguna.
- Implantación de modificaciones.
- Sustitución de elementos rechazados.
- Realización de mediciones o comprobaciones específicas.
- En espera o utilizando instalaciones del Cliente (torneado de ruedas, gatos, etc.) Estos tiempos de espera o utilizando las instalaciones del Cliente, sólo se computarán, a estos efectos, cuando sean debidas a causas imputables constructor.

- *Cualquier otra paralización de naturaleza semejante imputable al constructor»[30].*

Mantenibilidad: *«Es la capacidad que ofrece un tren o equipo de ser intervenido o conservado, a cualquier nivel, para dejarlo nuevamente en condiciones operativas durante un período dado de tiempo[47], [48]. En consecuencia, se deberán tener en cuenta los siguientes factores:*

- *Naturaleza y necesidades de los mantenimientos.*
- *Diseño de los sistemas.*
- *Costo del mantenimiento, a lo largo de la vida útil del tren»[30].*

Mantenimiento: *«La combinación de todas las acciones técnicas y administrativas, incluidas las acciones de supervisión, destinadas a mantener un producto en un estado en el que pueda realizar una función requerida, o a devolverlo a dicho estado (IEC 60050-191)»[18].*

Mantenimiento Correctivo. *«El mantenimiento realizado después de la identificación de un defecto y destinado a poner un producto en una condición en la que pueda realizar una función requerida»[18][47], [48].*

Mantenimiento preventivo: *«El mantenimiento llevado a cabo a intervalos predeterminados o de acuerdo con criterios prescritos y destinados a reducir la probabilidad de fallos o la degradación del funcionamiento de un elemento (IEC 60050-191)» [18][47], [48].*

Modo de defecto. *«Uno de los posibles estados de un producto defectuoso para una determinada función requerida. (IEC 60050-191)»[18].*

Modo de fallo: *«Los resultados predichos u observados de una causa de un fallo en un elemento especificado con relación a las condiciones de funcionamiento en el momento del fallo»[18][47], [48].*

Modo de conducción manual: se trata del modo más degradado de circulación, que para el caso de la Línea 2 del Metro de Panamá debe ser modo “MR+25”, es decir a una velocidad de 25 Km./h.

Nivel de Integridad de la Seguridad (SIL): *«Uno de varios niveles discretos definidos para especificar los requisitos de integridad de la seguridad de las funciones de seguridad que se asignen a los sistemas relacionados con la seguridad. El Nivel de Integridad de la Seguridad que tenga la cifra más alta cuenta con el nivel más elevado de integridad de la seguridad»[18].*

Odómetro: es un instrumento diseñado para medir la distancia total recorrida por un vehículo.

Pasajeros: *«Personas que utilizan el sistema para viajar de una estación a otra con un título que da derecho a ello (por ejemplo, al pagar la tarifa del billete) o con una autorización (por ejemplo, emitida por la autoridad en materia de transporte pertinente) que permite usar el sistema. Se supone que las personas que utilizan el sistema en cualquier momento (usuarios) lo hacen por su propia voluntad»[2].*

Peligros/Hazard/Eventos críticos. *«Una situación física que encierra posibilidades de que se produzcan lesiones humanas»[18].*

Perfil de misión: *«Líneas generales del rango y variación previstas en la misión respecto de parámetros tales como tiempo, carga, velocidad, distancia, paradas, túneles, etc., en las fases operativas del ciclo de vida»[18].*

Plan de seguridad: *«Un conjunto de actividades programadas temporalmente, recursos y supuestos*

que sirven para poner en práctica la estructura organizativa, las responsabilidades, procedimientos, actividades, capacidades y recursos que juntos garantizan que un elemento cumplirá unos requisitos de seguridad dados y pertinentes a un contrato o proyecto determinado»[18].

Política de mantenimiento. «Una descripción de la interrelación entre los escalones de mantenimiento, los niveles establecidos en contrato y los niveles de mantenimiento que hayan de aplicarse para el mantenimiento de un elemento (IEC 60050-191)»[18].

Programa de seguridad. «Sirve para poner en práctica la estructura organizativa, las responsabilidades, procedimientos, actividades, capacidades, y recursos que garanticen, conjuntamente, que un producto satisface determinados requisitos de seguridad pertinentes, para un determinado proyecto o contrato»[18].

Programa RAM: «Puesta en servicio Conjunto documentado de actividades, recursos y eventos programados en el tiempo, que buscan implementar una estructura organizacional, responsabilidades, procedimientos, actividades, capacidades y recursos que en conjunto aseguran que un ítem satisfaga los requisitos de RAM, relevantes a un cierto contrato o proyecto. (IEC 60050(191))»[18][47], [48].

Pruebas de tipo: «Las pruebas de tipo tienen por objeto el verificar la conformidad de la fabricación con las prestaciones máximas previstas en las especificaciones y la validez de las funciones aseguradas, de medir todas las características, el realizar pruebas destinadas a comprobar la seguridad y la robustez en servicio»[30].

Puesta en servicio: «Término colectivo referido a las actividades emprendidas a fin de preparar un sistema o producto antes de demostrar que cumple con sus requisitos especificados»[18].

Rampa de peralte: «es un parámetro geométrico ligado a la seguridad del transporte. Valores altos de este parámetro implican un mayor alabeo del bogie por la rodadura de los ejes sobre los distintos planos. Por otro lado, valores altos de la rampa de peralte están asociados con mayores desgastes rueda-carril y por consiguientes mayores costes de mantenimiento»[19].

RAMS: «Siglas que significan: fiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y seguridad, por sus siglas en inglés. (En español se utilizan las siglas FDMS)»[18][47], [48]

Rata de falla (Tasa de fallo): «El límite, si es que existe, de la fracción de la probabilidad condicional de que en un instante de tiempo, T , el fallo de un producto, suceda dentro de un determinado intervalo de tiempo $(t, t + \Delta)$ y de la duración de ese intervalo, Δt , cuando Δt tiende a cero, supuesto que el elemento se halle en estado de funcionamiento al principio del intervalo de tiempo».[18]

Registro de peligros: «El documento en el que todas las actividades de gestión de la seguridad, los peligros identificados, las decisiones tomadas y las soluciones adoptadas quedan registrados o referenciados. También se le conoce como “Registro de Seguridad” (ENV 50129)». [18]

Reparación: «La parte del mantenimiento correctivo en la que se realizan acciones manuales sobre un elemento. (IEC 60050-191)». [18][47], [48]

Restauración: «El evento que se da cuando un elemento recupera la capacidad de realizar una función requerida después de un defecto (IEC 60050-191)».[18][47], [48]

Riesgo (Risk): «La tasa probable de ocurrencia de un peligro que ocasione daño, y el grado de severidad de dicho daño». [18]

Riesgo tolerable: «El nivel máximo de riesgo de un producto que resulta aceptable para la Autoridad ferroviaria».[18]

Seguridad: «Ausencia de riesgos inaceptables que resulten en un daño o una lesión. (IEC 62278)»[18][47], [48].

S&CT: Sistema de señalización y control[49]. Las especificaciones funciones del S&CT para la línea 2 del Metro de Panamá son:

«

- En AM Trenes controlado por ATC, operados por ATO y protegidos por ATP.
- Apertura de puertas por pasajeros o conductor (autorizado por ATP).
- Cierre de puertas y salida controlados por el conductor.
- Transmisión basada en tecnología WiFi, LTE, o similar probada.
- Localización y Relocalización por Balizas, apoyado por Odometría.
- S.S.D. de Presencia de Trenes (para trenes no comunicantes).
- Velocidad Mínima 25 km/h.
- BFU's (cantidad, protección adecuada, rearmables remotamente, intercomunicadores y CCTV, equipos especiales).
- Disponibilidad Sistema CBTC $\geq 99.9\%$ (≈ 6 h. al año)
- Headway de 90 s. en terminales (SMI/UTP/FEL) y 75 s. en tramos interestación.
- Cuando se produzca una pérdida del suministro, a su reposición el sistema deberá detectar de manera inmediata la ubicación del MR y el estado de todos los equipos a lo largo de la línea»[49].

SIL-4: máximo nivel de integridad en la seguridad[140].

Sistema: «Sistema Ferroviario como se especifica en el contrato. El sistema consta de los subsistemas, por ejemplo, RST o SIG. El término "sistema general" también puede ser utilizado para el sistema»[18].

Subsistema. «Subsistema forma de parte de un sistema, por ejemplo, RST o SIG» [18].

Supervisor (EI). «Empresa o grupo de ellas contratada por la Contratante, para la inspección de la correcta ejecución de los trabajos efectuados por el Contratista, en cumplimiento del Contrato que las liga»[18].

Tabla de riesgo (Hazard Log): «Documento en el cual todas las actividades de gerencia de la seguridad, identificación de los eventos críticos, decisiones tomadas y soluciones adoptadas están grabadas o referenciadas. También se conoce como la "Tabla de Seguridad". (ENV 50129)» [18].

Tecnología LTE: La tecnología LTE (Long Term Evolution) es un estándar de comunicación inalámbrica que ofrece velocidades de datos muy altas, superando a la mayoría de los servicios de banda ancha fija, y es la base de las redes 4G. En comparación con el Wi-Fi, este puede ser más económico para áreas pequeñas, mientras que el LTE privado suele ser más adecuado para áreas más grande.

Tiempo fuera de servicio (Tiempo de caída): «El intervalo de tiempo durante el cual un producto se halla fuera de servicio. (IEC 60050(191))»[18].

Trazado en planta o alineamiento horizontal: «El trazado en planta o alineamiento horizontal, consiste en una sucesión de líneas rectas (tangentes) y curvas conectadas mediante curvas de transición en espiral (clotoide). Se requieren clotoides de longitud suficiente para garantizar la variación adecuada de la aceleración lateral o centrífuga y de peralte»[19].

Tren: «Subsistema que funciona en vía, y que, en estaciones para que los pasajeros embarquen condiciones normales, circula a lo largo de dicha vía y desembarquen»[2].

Validación: «Confirmación, mediante examen y aportación de pruebas objetivas, de que los requisitos particulares para un uso específico pretendido han sido cumplidos»[18].

Ventilación menor: «Son los sistemas de climatización y aire acondicionado en el entorno de las estaciones, tanto a nivel de climatización para el correcto ambiente en los cuartos técnicos (mediante aires condicionados de precisión), como para el confort de los pasajeros en las zonas transitadas ("cortinas de aire", aire acondicionado de confort,...)»[20]

Verificación: «Confirmación, mediante examen y aportación de pruebas objetivas, de que los requisitos específicos han sido cumplidos».[18]

Vía de andén: «Parte de la vía situada en una estación frente al andén»[2]

Vía propia: «Vía concebida para uso de un solo sistema de transporte sin que interfieran otros tipos de sistemas de transportes»[2].

Viga: «la superestructura de concreto sobre viaducto»[2].

Vicios ocultos: «Serán considerados como vicios ocultos, la aparición de fallas repetitivas sobre un mismo modulo o componente hasta 24 meses después de concluido el periodo de garantías, y que represente el 10 % o más del número total adquirido[30]».

Zona de espera del andén: «Zona del andén en la que los pasajeros esperan a los trenes que se aproximan, separada del gálibo de la vía por la zona de embarque y desembarque de pasajeros»[2].

Zona de transferencia: «Zona en la que se produce la transferencia de un tren entre zonas automatizadas y no automatizadas»[2].