



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Puesta en servicio del sistema SCADA 1500 V_{CC}
que alimenta la tracción de trenes de la Línea 12
del Metro de la Ciudad de México

INFORME DE TRABAJO PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO
P R E S E N T A:

LUCIANO VELASCO MARTÍNEZ

ASESOR: DR. LUIS AGUSTÍN ÁLVAREZ - ICAZA LONGORIA

CIUDAD UNIVERSITARIA A 1 DE MAYO DE 2016



JURADO:

PRESIDENTE: Dr. Marco Antonio Arteaga Pérez

VOCAL: Dr. Luis Agustín Álvarez - Icaza Longoria

SECRETARIO: Dr. Paul Rolando Maya Ortíz

1ER. SUPLENTE: M. en I. Hoover Mujica Ortega

2DO. SUPLENTE: M. en I. José Daniel Castro Díaz

Asesor:

Dr. Luis Agustín Álvarez - Icaza Longoria

Agradecimientos

A mi honorable Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas y brindarme un gran conocimiento dentro de mi querida Facultad de Ingeniería.

A la empresa Alstom por seguir creyendo en mí y permitirme desarrollarme profesionalmente.

A Damian Bedeau por su amistad y apoyo para la realización del presente trabajo.

A mi amigo de la preparatoria José Daniel Castro por compartir sus ideas, tiempo y brindarme paciencia.

Al Dr. Luis Álvarez - Icaza por su disposición, consejos y tiempo invertidos para culminar este trabajo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivo del informe	2
1.2. Organización del informe	2
2. Antecedentes	5
2.1. La historia de Alstom	5
2.2. Alstom en México	7
2.3. Alstom y la automatización de la Línea 12	9
3. Marco Teórico	11
3.1. Fundamentos de los sistemas SCADA	11
3.1.1. Hardware de los sistemas SCADA	12
3.1.2. Software de los sistemas SCADA	12
3.1.3. SCADA y Redes de Area Local	13
3.1.4. Interfaz Hombre-Máquina (HMI)	14
3.1.5. Redundancias	14
3.2. Tecnologías de la Información	15
3.2.1. OLE for Process Control (OPC)	16
3.2.2. Datos soportados por OPC	17
3.2.3. Servidor OPC	18
3.2.4. Cliente OPC	18
3.2.5. Modbus	19
3.3. Tracción de trenes	20
3.3.1. Mecanismos de tracción	20
3.4. Tracción eléctrica de trenes	20
3.4.1. Breve historia de la tracción eléctrica	21
3.4.2. Electrificación de sistemas ferroviarios	21
3.4.3. Sistemas de electrificación de vía	22
3.5. Alimentación de tracción en Corriente Continua	22
3.5.1. Sistemas ferroviarios alimentados por CC	23

3.5.2.	Distribución de CA para la alimentación de sistemas de rectificación (CC)	23
3.5.3.	Distribución de energía de CC	24
3.6.	Principios de subestaciones ferroviarias rectificadoras	25
3.6.1.	Entrada de alimentación de la compañía eléctrica	25
3.6.2.	Transformadores de potencia	26
3.6.3.	Puentes rectificadores	27
3.6.4.	Celdas de <i>feeder</i> y <i>by-pass</i>	28
3.6.5.	Configuración de subestaciones	28
3.7.	Telemando de subestaciones	30
3.8.	Alimentación de los motores de los trenes	33
3.8.1.	Catenaria	33
3.8.2.	Pantógrafo	34
3.8.3.	Motores de tracción	35
3.9.	Comentarios del capítulo	36
4.	Contexto de la participación profesional	37
4.1.	Automatización de sistemas ferroviarios	37
4.2.	Sistema CBTC	38
4.2.1.	Control Automático de Trenes (ATC)	39
4.2.2.	Protección Automática de Trenes (ATP)	39
4.2.3.	Operación Automática de Trenes (ATO)	39
4.2.4.	Supervisión Automática de Trenes (ATS)	40
4.2.5.	Arquitectura de un sistema CBTC	40
4.3.	Proyectos CBTC de Alstom	42
4.4.	Línea 12 del Metro de la Ciudad de México	44
4.4.1.	Características físicas y operativas	44
4.4.2.	Características técnicas	45
4.4.3.	Estaciones	45
4.5.	Alimentación eléctrica de la Línea 12	47
4.5.1.	Subestaciones de Alumbrado y Fuerza	48
4.5.2.	Subestaciones de Rectificación	48
4.5.3.	Zonificación de tracción eléctrica	48
4.5.4.	Catenaria utilizada	50
4.5.5.	Material rodante utilizado	50
4.6.	Automatización integral de la Línea 12	50
4.7.	Sistema Urbalis 400	52
4.7.1.	Objetivos del sistema Urbalis 400	52
4.7.2.	Elementos del sistema Urbalis 400	52
4.7.3.	Equipo y estaciones de trabajo de Urbalis 400	54
4.7.4.	Ubicación de los trenes mediante Urbalis 400	56

4.7.5.	Aseguramiento de la comunicación de datos	57
4.7.6.	Interacción entre los subsistemas de Urbalis 400	57
4.7.7.	Interacción de Urbalis 400 con sistemas externos	58
4.8.	Sistema de Mando Centralizado (SMC)	59
4.8.1.	Objetivos del SMC	59
4.8.2.	Equipo y puestos de trabajo del SMC	60
4.8.3.	Interacción del SMC con sistemas externos	61
4.9.	Sistema SCADA 1500 V _{CC}	62
4.9.1.	Objetivos del sistema SCADA 1500 V _{CC}	62
4.9.2.	Arquitectura del sistema SCADA 1500 V _{CC}	63
4.9.3.	Equipos SCADA 1500 V _{CC} en estación y en el PCL	64
4.9.4.	Comunicación SCADA SEAT 23 KV - SCADA 1500 V _{CC}	66
4.9.5.	HMI del SCADA SEAT 23 KV	67
4.10.	Comentarios del capítulo	69
5.	Participación profesional	71
5.1.	Organigrama	71
5.2.	Puesto desempeñado	72
5.2.1.	Misión del Ingeniero de Pruebas ATS - SCADA 1500 V _{CC}	73
5.2.2.	Actividades realizadas	74
5.3.	Descripción del equipo	76
5.3.1.	Armarios de servidores/tráfico/tracción	76
5.3.2.	Servidores ATS/SCADA	77
5.3.3.	Servidores FEP - PLC	78
5.3.4.	Servidores de Base de Datos (BD) histórica	79
5.3.5.	Conmutador/Ruteador Ethernet	79
5.3.6.	Reloj GPS	80
5.3.7.	Consola de sistema de servidores	80
5.3.8.	PLC de tráfico/alarmas de estación	81
5.3.9.	PLC de caja de explotación	82
5.3.10.	Caja Frontera de Alarma (CFA)	83
5.3.11.	Platina de alarmas	83
5.4.	Aportaciones principales	84
5.4.1.	Instalación de armarios y equipo	84
5.4.2.	Conexión de interfaces	85
5.4.3.	Instalación de software	87
5.4.4.	Diseño de arquitectura	88
5.5.	Resultados	91
5.5.1.	IHM del SCADA 1500 V _{CC}	91
5.5.2.	Tablero de Control Óptico (TCO)	92
5.6.	Comentarios del capítulo	93

6. Conclusiones	99
6.1. Comentarios finales	99
6.2. Trabajo profesional actual	100

Capítulo 1

Introducción

La carrera de Ingeniería Eléctrica Electrónica impartida en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México tiene como objetivo fundamental la formación de profesionales de alto nivel con capacidad de diseñar, innovar, integrar, planear y poner en operación sistemas eléctricos y electrónicos. Estos se aplican a diversos sectores como son el eléctrico, de comunicaciones, salud, transporte, industrial y de servicios, contemplando y manteniendo siempre altos niveles de calidad. Todo ello con el fin de elevar la productividad y la competitividad de las empresas y el bienestar de la sociedad.

El ingeniero eléctrico electrónico es el profesionista que aplica y crea tecnología en los campos de la electricidad, las comunicaciones, el control y la electrónica mediante la aplicación de los conocimientos adquiridos durante su formación académica. Además, dirige y planea la operación de sistemas de generación y distribución de energía eléctrica e interviene en el estudio y la puesta en operación de sistemas de comunicación inalámbrica. Asimismo diseña sistemas de control de procesos industriales y de servicio con base en microcomputadoras.

En el contexto de este informe de trabajo profesional, el ingeniero eléctrico electrónico participa en el área eléctrica:

- En el diseño de todo tipo de instalaciones eléctricas.
- En el mantenimiento, conservación y administración de equipo y material eléctrico de alta complejidad técnica, buscando la mayor eficiencia en el uso de la energía.

En el área electrónica:

- En el desarrollo de sistemas que le permiten medir, analizar, controlar y automatizar diversos procesos industriales, informáticos y de comunicaciones.
- En la formulación e instrumentación de proyectos para la solución de problemas de ingeniería en el área de transporte, haciendo uso de circuitos microprocesadores y microcontroladores, así como de sistemas electrónicos analógicos y digitales.

Como egresado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, mi desarrollo profesional ha estado ligado a lo anterior con la puesta en funcionamiento de los sistemas que automatizan íntegramente un sistema ferroviario metropolitano: la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México. De esta forma pude aplicar los conocimientos adquiridos durante mis estudios profesionales, tanto de sistemas eléctricos de potencia y máquinas eléctricas como de automatización de sistemas eléctricos, control distribuido y sistemas SCADA, por mencionar los más relevantes.

A lo largo de este informe daré a conocer dichos conocimientos y como pude aplicarlos a mi labor profesional, misma que fue desarrollada al integrarme a una empresa líder en el ramo de transporte a nivel mundial y mediante un proyecto de gran trascendencia para la Ciudad de México.

1.1. Objetivo del informe

El objetivo del trabajo profesional realizado y del cual se plantea dar a conocer en este informe es:

“Poner en servicio el sistema SCADA 1500 V_{CC} encargado de alimentar la tracción de trenes de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México”

Para ello, primero se abordarán los antecedentes de la empresa Alstom tanto en México como en el mundo. Después se hará una revisión de la teoría básica necesaria para comprender, no sólo un sistema SCADA sino también los sistemas eléctricos que se monitorean dentro de una vía ferroviaria. Se sigue con la descripción particular de la tecnología utilizada por Alstom para automatizar de manera integral la Línea 12; desde el control de tráfico de trenes hasta la regulación de su tracción eléctrica, para después describir las actividades realizadas como parte del trabajo profesional.

Cabe señalar que el sistema SCADA 1500 V_{CC} no fue el único sistema con el que estuve en contacto al trabajar dentro del proyecto de la Línea 12, sin embargo fue el más relevante y en el que más pude aplicar los conocimientos de ingeniería eléctrica y electrónica adquiridos durante mis estudios profesionales.

1.2. Organización del informe

Siguiendo la línea de lo citado anteriormente, este informe de trabajo profesional está organizado de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se exponen los antecedentes de la empresa francesa Alstom y su relación con la Línea 12 del metro de la Ciudad de México. Se sigue con el Capítulo 3 en donde se describe el marco teórico necesario para el desarrollo de la participación profesional mientras que en el Capítulo 4 se aborda

el contexto de dicha participación dentro de la empresa, dando pie a la descripción de las actividades realizadas en el Capítulo 5. Finalmente en el Capítulo 6 se exponen las conclusiones del informe.

Capítulo 2

Antecedentes

En esta sección daré a conocer cómo la empresa francesa Alstom se convirtió en la compañía transnacional que es hoy en día. Cabe destacar que su crecimiento se ha debido principalmente a la asociación con otras compañías del ramo de la generación y distribución de energía eléctrica y del transporte.

2.1. La historia de Alstom

Siendo heredero de una tradición familiar industrial que se remonta al siglo XVIII, André Koechlin, natural de Mulhouse, Francia, deja de lado su trabajo en el campo textil y en 1826 se lanza a la fabricación de maquinaria con su empresa *André Koelchin et Compagnie* (AKC). Su motivación, construir máquinas de generación de energía, impulso que compartía con sus contemporáneos que por ese entonces se encontraban desarrollando los mecanismos de los primeros vehículos automóviles. No lejos de ese deseo se encontraba el mismo Koechlin quien como hombre de negocios, vio la gran rentabilidad que existía en este naciente campo de la industria. Su propio primo Nicolas Koechlin había obtenido en 1839 la autorización para construir y administrar la vía ferroviaria que correría de Mulhouse a Thann, ciudades de la región de Alsacia en Francia. Así, André se daría a la tarea de diseñar en su talleres su propia versión de la recién inventada máquina de vapor. La máquina, bautizada como Napoleón, correría sobre las vías que su primo se había encargado de fabricar, poniendo así a su compañía en la competencia por el pujante mercado de los transportes terrestres.

Y no se equivocó. Su compañía prosperó y se fusionó con la empresa *Ateliers de Grafenstaden* dando origen a la *Société Alsacienne des Constructions Mécaniques* (SACM) quien desarrollaría una cadena de embalaje entre Francia y Alemania. Esto dio a Koelchin tiempo y recursos para iniciar una fructífera carrera política que lo colocaría en el primer plano de la escena francesa de su tiempo al hacerle ganar la condecoración de caballero de la Legión de Honor. Sin distraerse del todo de sus labores empresariales, se daría a la tarea de construir un complejo industrial llamado *La Fonderie* en el que sus trabajado-

res, a la par de fabricar las primeras locomotoras francesas, vivirían cómodamente bajo la protección de la compañía. Estas instalaciones aún existen hoy en día pero han sido remodeladas para albergar, desde 2007, una extensión del campus de la Universidad de la Alta Alsacia. Nunca durante su vida vería a su empresa en ruina.

Sin embargo, la turbulencia política de la década de 1870 obligó a SACM a dividirse debido a la anexión de Alsacia a Alemania en 1871. Fue así que la parte alemana se dedicaría a la construcción de las nuevas locomotoras eléctricas mientras que la francesa continuaría trabajando con las máquinas propulsadas por vapor.

Del otro lado del atlántico, Elihu Thompson, un migrante inglés radicado en Filadelfia, y el estadounidense Edwin J. Houston fundan en 1880 la *Thompson-Houston Electric Company*, una empresa dedicada a la fabricación de máquinas magneto-eléctricas, dinamos y motores de corriente alterna monofásica, bifásica y trifásica. Basándose en los conocimientos de Thompson y en la visión emprendedora y capital de Houston, la compañía se posicionó rápidamente a la punta del aún inexplorado mercado de la electricidad y en 1892, después de haber adquirido la *Van Depoele Electric Light Company*, se fusiona con la sociedad *Edison General Electric Company* para dar luz a la *General Electric Company*. Bajo este tenor, en 1893 es fundada la *Compagnie Française Thompson-Houston* (CFTH) como filial francesa de la *General Electric* y se encargaría de poner en práctica los métodos de diseño y producción de la compañía estadounidense.

Es así como se llegaría el año 1928 en el que CFTH, después de verse atraída por años por el negocio del transporte ferroviario, buscaría en SACM la posibilidad de abrirse camino. De la unión de una parte de CFTH y la porción alemana de SACM nacería *Als-Thom: société de construction électro-mécanique*, contracción de los nombres de las dos empresas *ALSace-THOMpson*, siendo Auguste Detoef, su primer director.

Así comenzaría la vida de producción eléctrica de la empresa. Dejando atrás para entonces la obsoleta tecnología de vapor, *Alsthom* encabezó la transición de los transportes terrestres a la electricidad y la absorción de la sociedad constructora de trolebuses *Vetra*, en 1937, fortaleció su posición de vanguardia.

Ya entrado el siglo XX, *Alsthom* se asoció con la importante *Compagnie Générale d'Électricité* (CGE, descendiente de una de las fracciones de SACM) y juntas crearon en 1965 tres sectores filiales de fabricación diferentes: ALSTHOM - SAVOISIENNE (transformadores y máquinas eléctricas), DELLE - ALSTHOM (equipos de tensión media) y UNELEC (equipos de baja tensión). Tras este proceso, CGE se convirtió en el accionista mayoritario de *Alsthom* y varios años más tarde, en 1982 ambas se nacionalizarían.

Para 1989, *Alsthom* se volvería a encontrar con *General Electric* pues uniría sus fuerzas con la rama británica *GEC Powers Systems* para formar *GEC Alsthom* que sería administrada como filial de GEC y la CGE. Debido al cambio de nombre de CGE a *Alcatel* en 1991, la sociedad pasaría a llamarse *Alcatel Alsthom*.

Durante varios años la empresa navegaría con aguas tranquilas siempre estando a la vanguardia de la innovación tecnológica y asociándose con las empresas más importantes cuya colaboración significaría ampliar el ya de por sí vasto campo de acción de la compañía.



Figura 2.1: En la década de los 90's *Alcatel Alsthom* se convierte en Alstom

Sin embargo, ya en la década de los noventa, una decisión al interior de *General Electric* produciría uno de los movimientos económicos más grandes de la historia de la industria francesa. GEC y *Alcatel Alsthom* decidirían separarse para focalizar sus esfuerzos en áreas específicas de la tecnología, la primera se dedicaría a desarrollar electrónica para sistemas de defensa renombrándose *Marconi PLC* y la segunda se dedicaría a las telecomunicaciones conservando el nombre *Alcatel*. Ambas compañías se repartirían un 24 % del capital total dejando un 52 % a la venta lo que significaría una de las operaciones bursátiles más grandes de la historia.

La recién nacida sociedad independiente tomaría el nombre de Alstom, sin la h de Thompson que en un origen constituyó su nombre. Pero las cosas no irían tan bien para la nueva sociedad como lo había sido en el pasado. Pasando ya el siglo XX, en el año 2003, la compañía se enfrentaría a una severa crisis provocada por los excesivos dividendos de sus accionarios *Marconi PLC* y *Alcatel* y a una alta multa producto de las fallas en sus turbinas de alto poder GT24/26 en varios países. Pero la compañía no se quedaría en ese lugar porque en menos de dos años, y gracias al trabajo y al aumento de capital provocado por el interés del gobierno francés por parte del ministro de economía Francis Mer.

Desde ese entonces hasta la actualidad Alstom ha estado a la cabeza de la industria al seguir con su costumbre de diversificarse y unir fuerzas con compañías competitivas en distintos ramos de la tecnología. Actualmente la corporación se dedica a la generación de energía eléctrica y a la fabricación y operación de trenes y barcos. Así mismo, se dedica a diseñar, proveer y prestar servicios de sistemas de generación y transmisión eléctrica. Además fabrica equipos ferroviarios como vagones y sistemas de señalización así como instalaciones de lujo para pasajeros de trenes, barcos navales y tanques cisterna para gas natural. La empresa tiene presencia en 100 países al rededor del globo y en lo que respecta a América Latina, tiene instalaciones en México, Argentina y Brasil.

2.2. Alstom en México

La historia de Alstom en nuestro país se puede rastrear hasta los inicios del siglo XX cuando en 1905 se registró la primera transacción de la empresa francesa en México. Pero no fue sino hasta 1957 que se estableció en suelo mexicano al absorber AEG Mexicana de Electricidad S. A. para convertirse poco tiempo después en *Alsthom T & D, S.A. de C.V.* Así, la empresa contribuyó al crecimiento económico de México durante la época del lla-

mado “milagro mexicano” auspiciado por las políticas de los gobiernos de Miguel Alemán Valdés, Adolfo Ruiz Cortines y Adolfo López Mateos, etapa en la que se logró transformar la economía del país de rural a industrial.

Uno de los proyectos más importantes y significativos de este periodo de transformación fue la construcción del Metro de la Ciudad de México, tarea en la que *Alsthom* contribuyó de manera significativa al proporcionar los carros de rodadura neumática que a partir de 1961 transportarían a millones de usuarios de la Línea 1. A partir de este momento, las relaciones entre la empresa y el gobierno mexicano serían de estrecha colaboración pues después del éxito del proyecto de la Línea 1, le seguirían las Líneas 2 y 3 a partir de 1970. Paralelamente a la colaboración en la construcción y equipamiento de las líneas 4 y 5 del Metro, ya con su nuevo nombre, Alstom se dedicó a construir instalaciones que le permitieran abastecer la demanda de generadores de energía, tarea que comenzó en 1977 con la fabricación de los primeros equipos de alto voltaje en México. Le seguiría la fabricación en 1988, a petición de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de dos generadores de 350 MW para las unidades 3 y 4 de la Central Termoeléctrica Carbón II ubicada en Coahuila, la más grande en su tipo de Latinoamérica.

Poco después, en 1991, la empresa colaboraría en la construcción de la Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos en Tuxpan, Veracruz. Así, la compañía francesa seguiría contribuyendo con el desarrollo tecnológico del país pues no solamente fabricaría tecnología y daría soporte a sus estaciones generadoras, sino que trabajaría con el gobierno mexicano para mantener las instalaciones y los sistemas del Metro de la Ciudad de México en óptimas condiciones, Así, en 2006, todas las corporaciones que trabajaban bajo el control de Alstom en México se fusionan para crear Alstom Mexicana S.A. de C.V.

La participación de Alstom en México, al igual que en el resto del mundo, se divide en tres campos: la generación de energía con Alstom Power, la distribución de la red eléctrica con Alstom Grid y el transporte con Alstom Transport.

En la rama de energía, Alstom Power provee aproximadamente el 20 % de la producción nacional que es de aproximadamente 10500 MW. Su fábrica de componentes de turbinas generadoras en Morelia, Michoacán, emplea ingenieros mexicanos y exporta 80 % de su producción a varias partes del mundo. Manufactura componentes de turbinas (diafragmas, rotores, veletas y cubiertas) para estaciones de energía termoeléctrica, nucleoelectrica y geotérmica y los ensambla. Así mismo cuenta con un centro de servicio para plantas nucleo y geotérmicas y de generación de energía por combustible: carbón, ciclo combinado y ciclo único que se localiza en Monterrey Nuevo León.

En la rama de red de distribución de energía Alstom Grid cuenta con una fábrica de redes en Toluca que tiene instalaciones de manufactura, servicio y automatización. La fábrica se especializa en el diseño y manufactura de disyuntores de alto voltaje, transformadores y baterías de condensadores. También provee capacitación para la operación, mantenimiento, modernización, soporte técnico, reparación de productos fabricados para redes eléctricas automatizadas.

En cuanto al transporte, Alstom Transport provee servicios de mantenimiento y auto-

matización de vías y locomotoras para los transportistas más importantes de México incluyendo al Metro de la Ciudad de México al cual suministra 40 % de los trenes utilizados. La empresa equipó el Centro de Control de Tráfico para Ferrocarriles Mexicanos en Guadalajara y actualmente está negociando contratos de mantenimiento a largo plazo de locomotoras para Ferromex, Ferrosur y Ferrovalle.

Hoy en día, Alstom cuenta con 7 instalaciones ubicadas en territorio mexicano, dos unidades de manufactura, dos centros de servicio, un centro regional de plantas de energía renovables y dos oficinas corporativas que se distribuyen de la siguiente manera

- Oficinas corporativas de Alstom Power y Alstom Transport en La ciudad de México.
- Oficinas corporativas de Alstom Grid en la Ciudad de México.
- Fabrica de componentes de turbinas generadoras en Morelia, Michoacán.
- Centro de ejecución de plantas de energía renovable en Morelia, Michoacán.
- Centro de servicio de generación de energía en Monterrey, Nuevo León.
- Centro de servicio de red en Toluca, Estado de México.

En este tenor, Alstom se integró al trabajo de la construcción y automatización de la más reciente línea del Metro: la Línea 12, que empezaría a construirse en el año 2008.

2.3. Alstom y la automatización de la Línea 12

En 2008 el Gobierno del Distrito Federal, a cargo de Marcelo Ebrard, emitió la convocatoria para la licitación de la Línea 12 del Metro a través de su Secretaría de Obras y Servicios. El ganador de dicha licitación fue el consorcio integrado por las empresas Ica - Carso - Alstom para la construcción de la obra civil y electromecánica con plazo a 31 de diciembre 2011. Mientras que Ica y Carso se encargarían de la construcción de la obra civil, Alstom sería la encargada de no sólo de la obra electromecánica sino de la instalación y mantenimiento de todos los sistemas automáticos de la línea.

Planeada para ser la línea de metro urbano más moderna de América Latina, Alstom incorporó en la llamada “Línea Dorada”, un sistema CBTC (*Communication Based Train Control*) haciendo que una de sus características más sobresalientes sea la conducción automática de los trenes y convirtiéndose en la primer línea del Metro en México que cuenta con este tipo de sistema.

Capítulo 3

Marco Teórico

Hoy en día la automatización se utiliza de modo generalizado en las principales industrias del sector productivo y de servicios. Mientras su común denominador es el uso de dispositivos especializados, sistemas de control y aplicaciones computacionales, todas tienen un reto común que cada vez es más importante: compartir información entre dichos elementos y el resto de la organización. Esto implica combinar tecnologías que permitirán administrar los sistemas industriales de una manera más fácil, global y eficiente.

Durante mi formación como ingeniero aprendí conceptos teóricos, principalmente en el área de automatización de sistemas eléctricos, subestaciones eléctricas, comunicaciones electrónicas y programación, mismos que me ayudaron a desempeñar exitosamente mi trabajo en Alstom. Dichos conceptos me dieron una base sólida para entender como combinar las tecnologías que hacen posible la automatización integral de sistemas industriales a un nivel que anteriormente no se lograba y que es lo que hoy en día demanda el sector productivo.

En este capítulo daré un panorama general de los conocimientos teóricos necesarios para el desarrollo de mi trabajo profesional, los cuales fueron adquiridos durante mis estudios en la Facultad de Ingeniería.

3.1. Fundamentos de los sistemas SCADA

La telemetría es una tecnología que permite la medición remota de magnitudes físicas y el posterior envío de la información hacia el operador del sistema. En los procesos industriales y de manufactura modernos, así como en servicios públicos y privados, continuamente se requiere de ella para conectar equipos y sistemas que están separados por largas distancias. Estas pueden tener un rango de unos cuantos metros o cientos de kilómetros. La telemetría es usada para enviar y recibir información desde y hacia estos lugares alejados.

SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) es la combinación de telemetría y adquisición de señales. Los sistemas SCADA abarcan desde la recolección de información,

su transferencia a una central y la ejecución de cualquier análisis o control hasta la visualización de dicha información en pantallas o indicadores. Después, las acciones de control son realimentadas hacia el proceso.

En los principios de la adquisición de señales, la lógica de relevadores era usada para el control y producción en la planta. Con el nacimiento de los procesadores y otros dispositivos electrónicos, los fabricantes incorporaron electrónica digital en el equipo de lógica de relevadores, disminuyendo el cableado y el número de relevadores necesario para realizar un proceso. El PLC (*Programmable Logic Controller*) sigue siendo uno de los sistemas de control más usados en la industria. Ya que es necesario el monitoreo y control de varios dispositivos y procesos en una planta, los PLC se distribuyen en ella y el sistema se vuelve más inteligente y más pequeño.

3.1.1. Hardware de los sistemas SCADA

Un sistema SCADA consiste en un número de unidades remotas (RTU por sus siglas en inglés). Debido a su bajo costo, dichas RTU son implementadas usualmente mediante PLC's que recolectan datos y los envían de vuelta hacia una estación maestra por medio de un sistema de comunicación. La estación maestra despliega los datos adquiridos y permite al operador realizar tareas de control remotas. Qué tan precisos y en tiempo sean procesados estos datos permitirá la optimización de la planta y el proceso en sí. Otros beneficios incluyen operaciones más eficientes y sobre todo seguras. Todo lo anterior conlleva un menor costo de operación comparado con los sistemas no automatizados.

3.1.2. Software de los sistemas SCADA

El software de los sistemas SCADA puede ser dividido en dos tipos, propietario o abierto. Las compañías desarrollan software propietario para comunicarse con su hardware. Estos sistemas son vendidos como soluciones “llave”. El principal problema con esto es la dependencia hacia el proveedor del sistema. Por otro lado, el software abierto ha ganado popularidad debido a la interoperabilidad que trae al sistema entero. Esto se refiere a la habilidad de mezclar equipos de fabricantes diferentes en un mismo sistema.

Las características clave del software SCADA son

- Interfaz Hombre Máquina (HMI)
- Pantallas gráficas
- Alarmas
- Interfazces RTU y PLC
- Escalabilidad

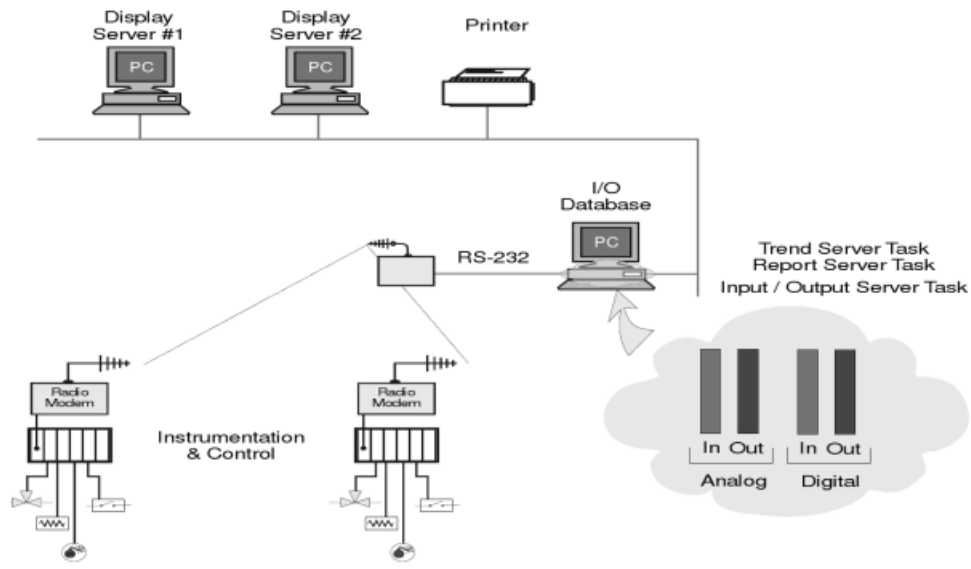


Figura 3.1: Sistema SCADA típico

- Acceso a datos
- Base de datos
- Integración de redes
- Tolerancia a fallas y a redundancias
- Procesamiento distribuido cliente/servidor

En la Figura 3.1 pueden apreciarse los componentes típicos de un sistema SCADA.

3.1.3. SCADA y Redes de Area Local

Los sistemas SCADA requieren de un medio para compartir información entre todos sus componentes, tanto de hardware como de software. La opción más común es la red de área local o LAN (*Local Area Network*) que es la encargada de compartir información y recursos entre ellos.

Los elementos de una red SCADA están unidos mediante nodos y, para comunicarse entre sí, deben estar conectados por algún medio de transmisión al mismo tiempo que comparten dicho medio. De esta manera se permitirá a todos ellos el acceso a la red sin la interrupción del flujo de información.

Básicamente, una red LAN es una vía de transmisión entre computadoras, servidores, terminales, estaciones de trabajo, y otros equipos periféricos. Permite el acceso a dispositivos que son compartidos por un gran número de usuarios con total conectividad entre todas

las estaciones de la red, la cual es administrada por un solo usuario al que se le denomina administrador. La conexión de la red SCADA a una LAN permite a cualquier usuario con el software y permisos adecuados acceder al sistema, aún sin ser administrador. Ethernet es la red LAN más usada hoy en día ya que es barata y fácil de usar.

3.1.4. Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

Una Interfaz Humano-Máquina o IHM (también HMI por *Human-Machine Interface*) forma parte esencial del software de un sistema SCADA. Es un mecanismo que le permite a un operador humano interactuar con un proceso industrial y determinar el estado (encendido/apagado) de los dispositivos así como la magnitud de las variables físicas que están presentes en él.

Una HMI puede ser tan simple como un interruptor para encender un motor y una lámpara indicadora del estado del mismo, hasta una o varias pantallas conectadas a una computadora que muestran representaciones esquemáticas de todo el proceso bajo supervisión, incluyendo valores en tiempo real de las variables presentes en ese momento en la planta. Para poder manejar un sistema SCADA se recurre a una o varias pantallas de este tipo que actúan como interfaz gráfica entre el hombre y la máquina. De esta forma es posible supervisar o reconfigurar dispositivos en el proceso supervisado a través de acciones ingresadas por el operador al sistema por medio de una computadora central o bien por pantallas colocadas en secciones específicas del proceso. Además, el software del sistema SCADA permiten proveer a un nivel superior administrativo información selecta que se genere durante el proceso.

En la Figura 3.2 se puede ver una HMI clásica de un sistema SCADA para un sistema hidráulico.

3.1.5. Redundancias

En la industria es común que, por diversas circunstancias, los sistemas automáticos presenten fallas, ya sea de manera global o en una parte de ellos. Si eso se llegara a presentar, no es conveniente que dejen de funcionar. Un ejemplo es el de un sistema ferroviario metropolitano, el cual no puede interrumpir su servicio debido a la falla en alguno de sus sistemas automáticos. La ocurrencia de esto acarrearía diversos problemas siendo el más importante la aglomeración de los pasajeros y el consecuente riesgo que esto implica. Para prevenir que los sistemas dejen de funcionar, se utilizan redundancias. Una redundancia implica la transmisión de un carácter dos veces. Si no se recibe el mismo carácter de esta manera, se dice que se ha presentado un error de transmisión.

Los sistemas redundantes son aquellos en los que se repiten aquellos datos o hardware de carácter crítico cuyo funcionamiento se quiere asegurar ante los posibles fallos que puedan surgir debido a su uso continuo y prolongado. Es una solución a los problemas de protección y confiabilidad. Este tipo de sistemas se encarga de realizar el mismo proceso

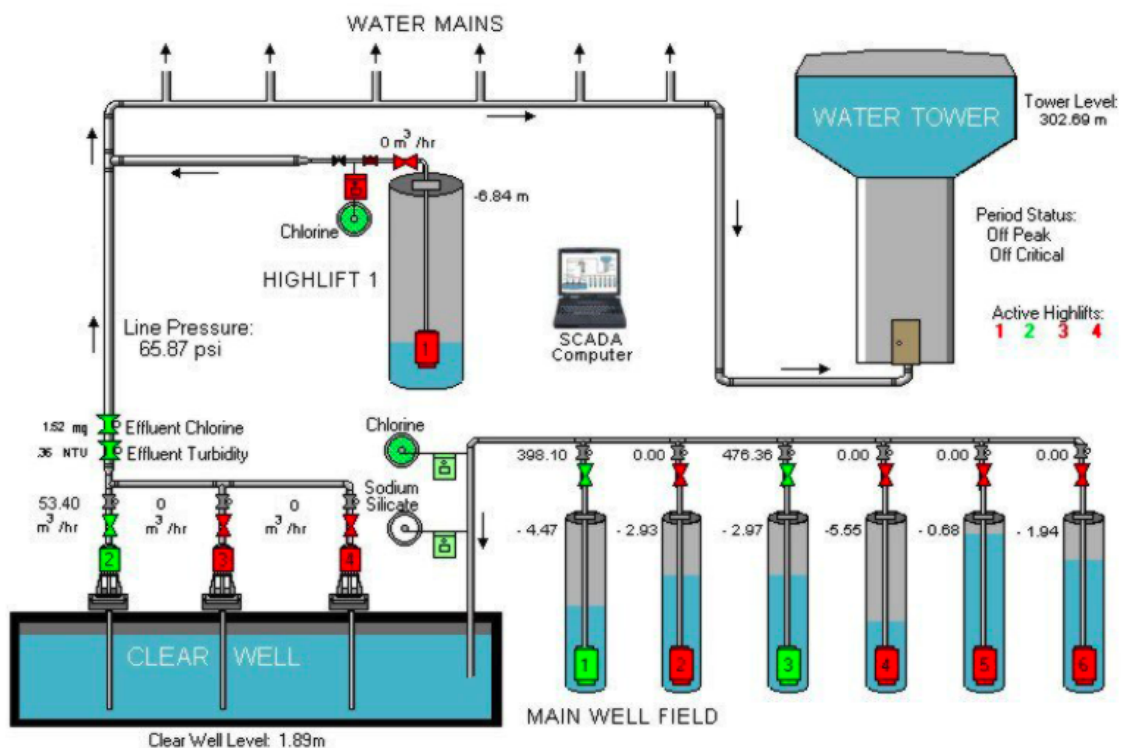


Figura 3.2: Ejemplo de una IHM en un sistema SCADA

en más de una estación y/o red, ya que si por algún motivo alguna de ellas dejara de funcionar o colapsara, inmediatamente la otra ocuparía su lugar y realizaría las mismas tareas. Así por ejemplo, para dotar de redundancia a un sistema como el que se muestra en el sistema A de la Figura 3.3, debería haber el doble de recursos para construirla y ser implementados como se muestra en el sistema B, en donde se replican la red LAN, el servidor, el bus de acceso y el disco duro.

Aún cuando los SCADA han sido una solución en automatización ampliamente utilizada desde la década de los setenta, la evolución de los sistemas automáticos en cuanto a complejidad y escalabilidad ha exigido el diseño y perfeccionamiento de nuevos de ellos y en donde el SCADA se encarga de una parte muy específica de supervisión y monitoreo.

3.2. Tecnologías de la Información

La demanda de sistemas automatizados de mayor tamaño y capacidad hace necesario que las empresas los implementen a base de software y hardware de diferentes fabricantes. A raíz de este hecho es que se incorporan en ellos las tecnologías de la información, lo-

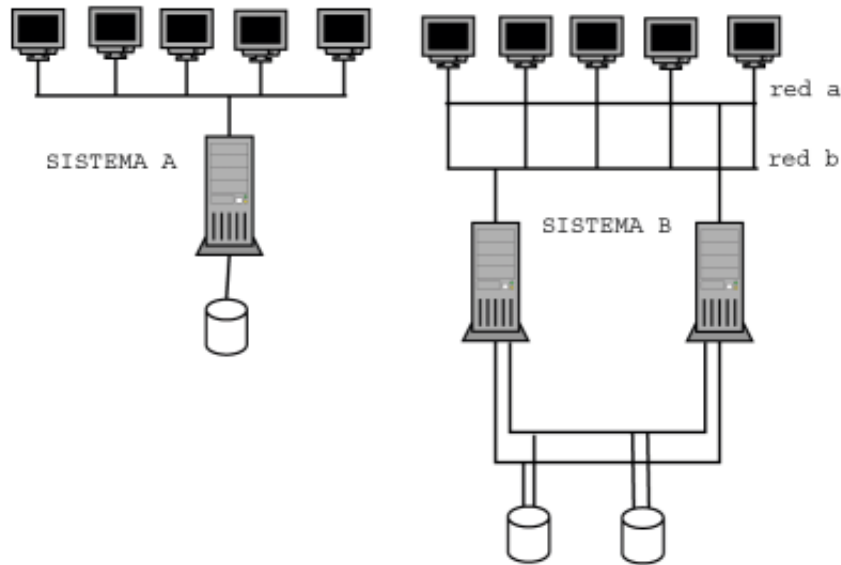


Figura 3.3: Sistema (A) y su correspondiente sistema redundante (B)

grando además que los datos compartidos en la red del sistema sean accesibles a cualquier miembro de la empresa, desde los ingenieros de diseño y campo hasta personal administrativo y de dirección.

Se conoce como tecnología de información (TI) a la utilización de tecnología tal como computadoras y telecomunicaciones, para el manejo y procesamiento de información, específicamente la captura, transformación, almacenamiento, protección, y recuperación de datos. Debido a su gran funcionalidad, la TI abarca todas las disciplinas del quehacer humano, desde plataformas basadas en red para bioinformática hasta complicadas redes de sistemas para administración bancaria o de comunicaciones. En el contexto de este informe de trabajo profesional se abordarán dos estándares de comunicación utilizados comúnmente en la industria: OPC y Modbus.

3.2.1. OLE for Process Control (OPC)

El OPC (OLE¹ for Process Control) es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos industriales. Ofrece una interfaz común para comunicación, permitiendo que componentes software individuales interactúen y compartan datos. La comunicación OPC se realiza a través de una arquitectura cliente - servidor. El servidor OPC es la fuente de datos (por ejemplo un dispositivo hardware a nivel de planta) y cualquier aplicación basada en OPC puede acceder a él para leer y/o escribir cualquier

¹ *Object Linking and Embedding*: estándar que permite la incrustación y vinculación de objetos informáticos.

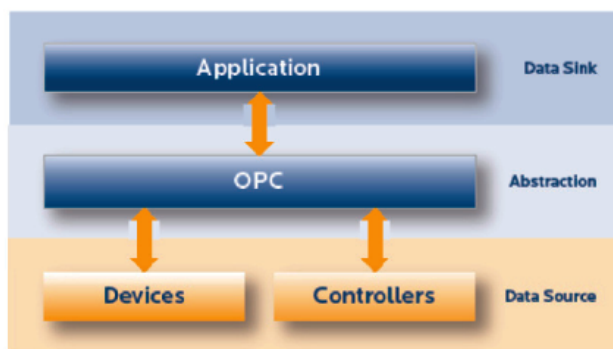


Figura 3.4: Arquitectura OPC

variable que ofrezca. Es una solución abierta y flexible al clásico problema de los drivers propietarios, es por ello que prácticamente todos los mayores fabricantes de sistemas de control e instrumentación han incluido OPC en sus productos.

La arquitectura OPC puede verse en la Figura 3.4 y se representa como una capa de “abstracción” intermedia que se sitúa entre la fuente de datos y el cliente de datos, permitiéndoles intercambiar información sin saber nada uno del otro. Dicha abstracción OPC se consigue utilizando dos componentes llamados cliente OPC y servidor OPC.

Es importante señalar que el hecho de que la fuente de datos y el cliente de datos se puedan comunicar entre sí mediante OPC, no significa que sus respectivos protocolos nativos dejen de ser necesarios o hayan sido reemplazados por OPC. Al contrario, estos protocolos y/o interfaces nativos siguen existiendo, pero sólo se comunican con uno de los componentes del software OPC y son estos los que intercambian la información entre sí.

3.2.2. Datos soportados por OPC

Los tipos de datos más comunes transferidos entre dispositivos, controladores y aplicaciones en automatización se pueden encuadrar en tres categorías

1. Datos en tiempo real
2. Datos históricos
3. Alarmas y eventos

A su vez, cada una de las categorías anteriores soporta una amplia gama de tipos de datos. Estos pueden ser enteros, punto flotante, cadenas, fechas y distintos tipos de arreglos, por mencionar algunos. La tarea del OPC es especificar de forma independiente, cómo se va a transmitir cada uno de ellos a través de la arquitectura cliente OPC - servidor OPC.

3.2.3. Servidor OPC

Un servidor OPC es una aplicación de software. Es un driver estandarizado desarrollado específicamente para cumplir con una o más especificaciones OPC. La palabra “servidor” no hace referencia al ordenador donde este software se está ejecutando sino a la relación con el cliente OPC.

Los servidores OPC funcionan como traductores entre el mundo OPC y los protocolos nativos de una fuente de datos. OPC es bidireccional, esto es, los servidores OPC pueden leer y escribir en una fuente de datos. La relación servidor OPC - cliente OPC es de tipo maestro/esclavo, lo que significa que un servidor OPC sólo transferirá datos desde/hacia una fuente de datos si un cliente OPC así lo pide.

Los servidores OPC pueden comunicarse prácticamente con cualquier fuente de datos cuyos datos puedan ser leídos o escritos por medios electrónicos tales como

- PLC
- RTU
- Instrumentos de medición
- Bases de datos
- Software de cualquier tipo (i. e. Excel)
- Páginas web
- Dispositivos móviles

Para comunicar con cualquiera de estos dispositivos se requiere únicamente el uso de un servidor OPC que utilice el protocolo o interfaz nativa apropiados. Una vez que se ha configurado dicho servidor, cualquier aplicación cliente que use OPC y tenga los permisos adecuados, puede empezar a comunicarse con la fuente de datos sin que importe la forma en que esta se comunica de forma nativa.

3.2.4. Cliente OPC

Un cliente OPC es un módulo de software utilizado por una aplicación para permitir comunicarse con cualquier servidor OPC compatible y visible en la red. Inicia y controla la comunicación con servidores OPC basados en peticiones recibidas desde la aplicación en la que están embebidos. Los clientes OPC traducen las peticiones de comunicación provenientes de una aplicación dada en la petición OPC equivalente y la envían al servidor OPC adecuado para que la procese. A cambio, cuando los datos OPC vuelven al servidor OPC, el cliente OPC los traduce al formato nativo de la aplicación para que esta pueda trabajar de forma adecuada con los datos. Típicamente, los clientes OPC están embebidos en aplicaciones tales como

- HMI
- SCADA
- Graficadores
- Generadores de informes.

Es muy común referirse a la aplicación que contiene un cliente OPC embebido como “cliente OPC” a pesar de que sólo la parte que implementa OPC es el verdadero cliente.

3.2.5. Modbus

Modbus es un protocolo de comunicaciones basado en la arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor diseñado para comunicar PLC's. Desde 1980 se convirtió en un protocolo de comunicaciones estándar en la industria y es el que goza de mayor disponibilidad para la conexión de dispositivos electrónicos industriales. Las razones por las cuales el uso de Modbus es superior a otros protocolos de comunicaciones son:

- Es público
- Su implementación es fácil
- Maneja bloques de datos

Modbus permite el control de una red de dispositivos y la comunicación de los resultados de dicho control a una computadora. También permite la conexión de una computadora de supervisión con una RTU en sistemas SCADA.

Cada dispositivo en la red Modbus posee una dirección única. Cualquiera de ellos puede enviar órdenes Modbus, aunque lo habitual es permitirlo sólo a un dispositivo maestro. Cada comando Modbus contiene la dirección del dispositivo destinatario de la orden, todos reciben la trama pero sólo el destinatario la ejecuta. Cada uno de los mensajes incluye información redundante que asegura la integridad en su recepción. Los comandos básicos Modbus permiten controlar una RTU para modificar el valor de alguno de sus registros o bien solicitar el contenido de dichos registros.

Una vez revisada una parte de la tecnología que se usa para la automatización de sistemas industriales, a continuación se describirá el sistema a automatizar en sí: la energización eléctrica que regula la tracción de trenes de una vía ferroviaria. Para ello se abordarán los conceptos básicos de tracción, electrificación de vías y subestaciones rectificadoras.

3.3. Tracción de trenes

Se le llama tracción a la acción y efecto de tirar de algo para moverlo. En el contexto de un sistema ferroviario, es la que provee la energía necesaria para que los trenes puedan desplazarse a lo largo de la vía. Para ello existen diferentes mecanismos como la tracción diesel y la tracción eléctrica y todo se reduce a producir la energía para alimentar los motores de tracción (que son siempre motores eléctricos) que están acoplados a los ejes de las ruedas del tren y producir el desplazamiento. En el caso específico de la tracción eléctrica se dice que el material rodante es autopropulsado tomando la energía mediante catenaria o bien mediante un tercer riel.

3.3.1. Mecanismos de tracción

Se denomina material rodante al arreglo de material motor provisto de motor para su autopropulsión y para la tracción del propio material rodante. En función de la fuente de energía utilizada, los sistemas de tracción que se emplean en la actualidad se engloban en dos grandes grupos: tracción eléctrica y tracción diesel. A su vez, el material rodante se clasifica en función de la fuente de energía para conseguir la fuerza de tracción. De esta forma se tiene:

- Locomotora o automotor diesel. Si la fuerza motriz se obtiene de uno o más motores diesel.
- Locomotora o automotor eléctrico. Si la fuerza motriz es suministrada por uno o más motores eléctricos alimentados por líneas aéreas, tercer carril o acumuladores eléctricos transportados en ella.

La decisión entre uno u otro tipo de tracción, diesel o eléctrica, se ha realizado siempre con base en motivos de tipo económico, puesto que el coste asociado a la electrificación de las líneas sólo puede justificarse cuando existe un volumen suficiente de tráfico, siendo preferible la tracción diesel cuando éste es reducido. Ya que en la actualidad lo que se requiere es precisamente un gran volumen de tráfico, desde el año de 1998 ha habido en el mundo un incremento considerable del uso de la tracción eléctrica.

3.4. Tracción eléctrica de trenes

La tracción eléctrica para sistemas ferroviarios tiene una historia de más de 120 años mientras que el tren como medio de transporte es cercana a los 210 años. La evolución de su técnica ha pasado por muy diversas etapas; desde la alimentación directa en corriente continua con arquitecturas de circuitos eléctricos o de potencia enfocados a motores de corriente continua, hasta la optimización basada en motores de corriente alterna trifásica.

3.4.1. Breve historia de la tracción eléctrica

El verdadero precedente de toda la tracción eléctrica fue una pequeña locomotora construida por la sociedad Siemens & Haske. Su creador fue Werner Siemens y a él le ocupó el honor de ser el constructor de la primer vía férrea electrificada del mundo, abierta al servicio el 31 de mayo de 1879. A partir de ese día se pueden distinguir tres claros periodos en la historia de la tracción eléctrica:

- Un primer periodo, desde 1879 hasta 1905, constituido por la aparición del motor eléctrico de corriente continua a baja tensión (inferior o igual a 600 V), con aplicación limitada a automotores de líneas subterráneas o de tráfico urbanos en superficie, y siempre próximos a los centros de producción.
- El segundo periodo se inició en 1905 y se caracterizó por la aplicación del transformador de corriente alterna, que permitió transportar la corriente eléctrica a tensiones muy elevadas desde el centro de producción hasta el centro de consumo, sea cual fuere la distancia, permitiendo así expandir las redes ferroviarias. Se utilizaron, corriente continua a elevada tensión (entre 1200 y 3000 V) y corriente alterna también a alta tensión, bien trifásica (de 3 a 10 KV y con frecuencias de 15 a 25 Hz) o bien monofásica (de 8 a 16 KV y con frecuencias bajas, de 16 2/3 y 25 Hz).
- El tercer periodo, iniciando en 1938 está ligado a la aparición de los convertidores que permiten transformar, dentro del propio vehículo, la corriente alterna en continua a utilizar por los motores de tracción.

A raíz de la fuerte evolución de los años 60 de la electrónica de potencia, el control de los motores de tracción sufre enormes avances, mejorando así no sólo las prestaciones a los usuarios sino reduciendo además, costes de mantenimiento.

3.4.2. Electrificación de sistemas ferroviarios

La electrificación es el sistema de alimentación de tracción por el cual la energía eléctrica procedente de una línea exterior de alta tensión pasa por una subestación, circula por el elemento conductor instalado a lo largo de la línea, penetra en el tren a través del captador de corriente, alimenta los motores y retorna cerrando el circuito por los carriles y *feeders* negativos, si los hubiera y accidentalmente por tierra. Como se mencionó anteriormente, la electrificación se aplica más frecuentemente cuando la densidad de tráfico es suficiente para justificar el alto costo de su instalación. En pocas palabras, cuando hay suficientes trenes, resulta más económico remover las fuentes de poder de los motores y en su lugar construir otras más grandes en lugares estacionarios pero en menor número. También existe un aparente conflicto entre el uso de CA y CC. Mientras que los sistemas de corriente alterna (CA) de alta tensión tienden a tener equipo fijo más barato y material rodante más caro, los sistemas de corriente continua (CC) de media tensión tienen un equipo fijo más extenso y costoso pero material rodante más barato.

3.4.3. Sistemas de electrificación de vía

Hay dos tipos de sistemas de electrificación dentro de la tracción eléctrica:

- Por corriente continua: La tensión en la línea y en los motores es la misma y oscila en un rango de entre $700 V_{CC}$ y $3000 V_{CC}$. Una tensión muy baja, por lo que para conseguir la potencia necesaria, la intensidad que circula por la línea debe ser muy alta y ésto tiene como consecuencia que se deban instalar subestaciones muy próximas para evitar las caídas de tensión.
- Por corriente alterna trifásica: Aunque en un principio se dejó de lado este tipo de tracción ya que pese a usar motores trifásicos que son robustos y baratos, tenía el inconveniente de que se necesitaba instalar doble catenaria con la vía como tercera fase y además, la regulación de velocidad presentaba gran dificultad al depender ésta directamente de la frecuencia. Más adelante se retomó esta opción debido al gran desarrollo tecnológico que se ha experimentado en el campo de la electrónica de potencia y de los semiconductores.

Los dos caminos más comunes alrededor del mundo para la electrificación de una línea férrea son mediante el sistema monofásico de $25 KV_{CA}$ a la frecuencia industrial de 50 Hz y el sistema de $750 V_{CC}$. En un principio estos sistemas parecen ser totalmente diferentes pero de hecho, tienen muchas características en común. Esto se debe a que, hasta hace muy poco, los trenes eléctricos eran accionados generalmente por motores de tracción de $750 V_{CC}$. Por lo tanto, la potencia eléctrica entregada al sistema del tren debe ser debidamente acondicionada de tal forma que pueda ser aplicada y usada para el control de la velocidad y potencia de salida del motor y en consecuencia a la velocidad y rendimiento del tren. La diferencia esencial entre sistemas de electrificación de CA y CC es que en los sistemas CC la potencia eléctrica es transformada y rectificadora a su forma CC en subestaciones fijas distribuidas a lo largo de la vía férrea mientras que en los sistemas de CA la potencia es transformada y convertida en una subestación móvil a bordo del tren. Para mayor capacidad, mayor densidad, menor velocidad y con muchos trenes espaciados unos pocos minutos uno del otro, los sistemas de CC han probado ser mejores y más económicos. Por otro lado, para alta velocidad y trenes que deben correr con menor frecuencia uno de otro, los sistemas de CA son más efectivos. En el contexto de este informe de trabajo profesional se explicará la alimentación eléctrica para sistemas de tracción en CC ya que las labores desempeñadas se centraron en un sistema ferroviario metropolitano, en el cual ocurre lo primero.

3.5. Alimentación de tracción en Corriente Continua

Una vez establecidas las diferencias entre los sistemas de electrificación de CA y CC, toca el turno de describir las características de este último. En la Figura 3.5 se puede

observar un diagrama de bloques en donde se representa, de manera simplificada, los componentes de un sistema de distribución usado para la tracción de trenes, desde una estación eléctrica de potencia hasta el motor a bordo del tren, además del rango de tensiones que se ocupa entre cada uno de ellos. En esta sección se explicará, de manera simplificada, cómo es que la energía sigue este camino y los diferentes dispositivos que se necesitan para ello.

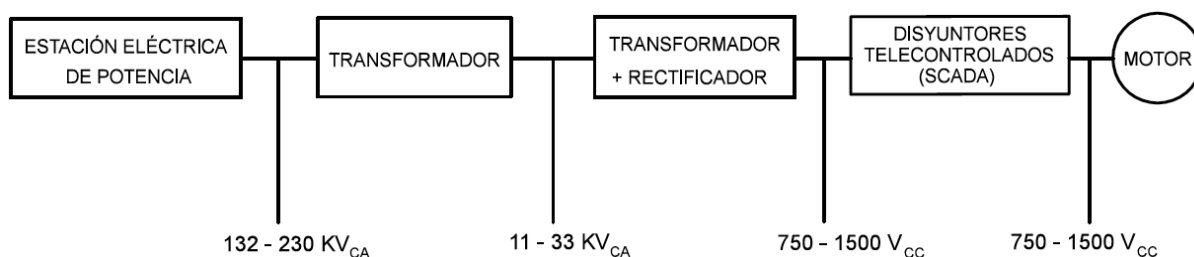


Figura 3.5: Diagrama de bloques de un sistema de distribución de tracción

3.5.1. Sistemas ferroviarios alimentados por CC

En sistemas metropolitanos se puede generalizar que la alimentación existente en la mayoría de las redes hasta ahora construidas es de

$$[600, 750, 900, 1200, 1500 \text{ ó } 3000] V_{CC}$$

debiendo subrayar que estos valores son significativamente bajos, en comparación con los habituales en las redes de distribución y transporte de energía.

Para redes metropolitanas con un tráfico relativamente intenso, las subestaciones eléctricas para el caso de 600 V_{CC} de corriente continua abastecen normalmente tramos de línea comprendidas entre los 2 y 3 km y, para el caso de 1500 V_{CC} , alrededor de 4 a 7 km, aunque estas distancias están directamente condicionadas por el mayor o menor número de trenes que prestan servicio en el tramo en cuestión, sus potencias y consecuentemente las caídas de tensión que las mismas generan en el extremo de dicho tramo.

3.5.2. Distribución de CA para la alimentación de sistemas de rectificación (CC)

La alimentación de energía para la red de CC (red de tracción) requiere de un sistema trifásico de abastecimiento de energía en CA para las subestaciones de tracción localizadas a lo largo de la vía. En cada una de ellas toma lugar la transformación y rectificación a CC y la potencia es conducida directamente a los motores de los trenes por medio de

una catenaria, tomando en cuenta las protecciones eléctricas necesarias.

El sistema de distribución de CA transmite la alta tensión a cada subestación por medio de un cable principal que es continuo entre dos puntos de abastecimiento. Un disyuntor² de media tensión (DMT) es instalado en cada subestación para cada entrada o salida de dicho cable y hacia cada rectificador.

Bajo condiciones normales, entre subestaciones también se instalan disyuntores normalmente cerrados y que mantienen la tensión entre zonas en un mismo potencial. En condiciones de falla de una subestación estos sirven para alimentar la sección en donde se encuentra la misma.

El diseño de los sistemas de distribución de CA debe, por lo tanto, ser de tal manera que el total de la energía requerida por la subestación, pueda ser transmitida por uno o más puntos de suministro. La elección de la tensión en los nodos de distribución depende tanto del requerimiento total de energía como de la distancia entre puntos adecuados o de la redundancia requerida por el sistema.

3.5.3. Distribución de energía de CC

La Figura 3.6 muestra la relación entre los sistema de distribución de CA y CC en una vía ferroviaria usando suministro para tracción en CC. El sistema de distribución de

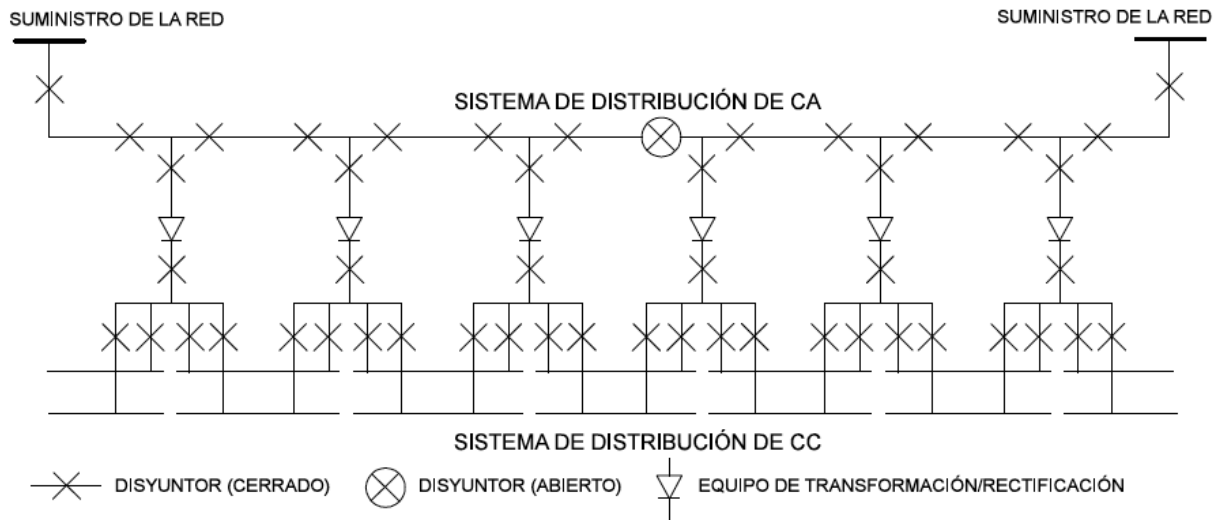


Figura 3.6: Distribución de CA y CC en un sistema de CC

energía de CC entre la subestación y el conductor de la vía debe de ser diseñado para cumplir con los siguientes requerimientos:

²Un disyuntor o *breaker* es un dispositivo capaz de interrumpir o abrir un circuito eléctrico cuando la intensidad de la corriente eléctrica que circula por él excede de un determinado valor, con el objetivo de evitar daños a los equipos eléctricos.

- Permitir que picos de corriente sean tomados por los trenes en cualquier lugar de la vía.
- Proporcionar un voltaje suficiente a cualquier tren como para cumplir con una tabla de horarios de trenes predefinida.
- Permitir cortes de mantenimiento a equipo sin afectar la disponibilidad y el tránsito de los trenes para cumplir con la tabla de horarios.
- Permitir el servicio a trenes bajo condiciones de falla de equipo.

Todos los tramos de conducción en CC son usualmente dobles con el fin de proveer el nivel de seguridad y los voltajes necesarios para el tren. Además, todos los disyuntores son normalmente mantenidos en posición cerrada.

Aún el sistema de distribución de CC más económico es capaz de mantener la tensión requerida para el tren a pesar de la separación entre subestaciones. Típicamente, las subestaciones están separadas por distancias no menores de 4 km y no mayores de 7 km dependiendo de la carga máxima en horas pico.

3.6. Principios de subestaciones ferroviarias rectificadoras

Para las tensiones usuales en el mundo de la tracción continua (600 - 3000 V_{CC}), los esquemas eléctricos de potencia de las subestaciones suelen ser muy similares en términos generales. En la Figura 3.7 se muestra un esquema eléctrico tipo de una subestación de tracción. Adicionalmente existen un importante número de equipos complementarios para protecciones de sobrecorriente, protecciones de sobreintensidades, termómetros, transductores de medida, voltímetros, amperímetros, etc. También suele incorporarse la parte relativa a transformadores que, abasteciéndose de la misma red de alimentación, transforman la tensión de entrada para servicios auxiliares como pueden ser alumbrado de estaciones, pozos de bombeo, ventilación de túneles, equipamientos electromecánicos de estaciones, etc.

A continuación se describen las principales características de los dispositivos que componen la estructura eléctrica de potencia de la gran mayoría de subestaciones rectificadoras.

3.6.1. Entrada de alimentación de la compañía eléctrica

Las entidades suministradoras abastecen normalmente a 15000 V, 20000 V ó 40000 V_{CA} desde su subestación de potencia o centro de transformación más cercano. Todas las entradas de alimentación a las subestaciones ferroviarias se hacen a través de una celda de seccionamiento y protección que es exigida por las compañías suministradoras.

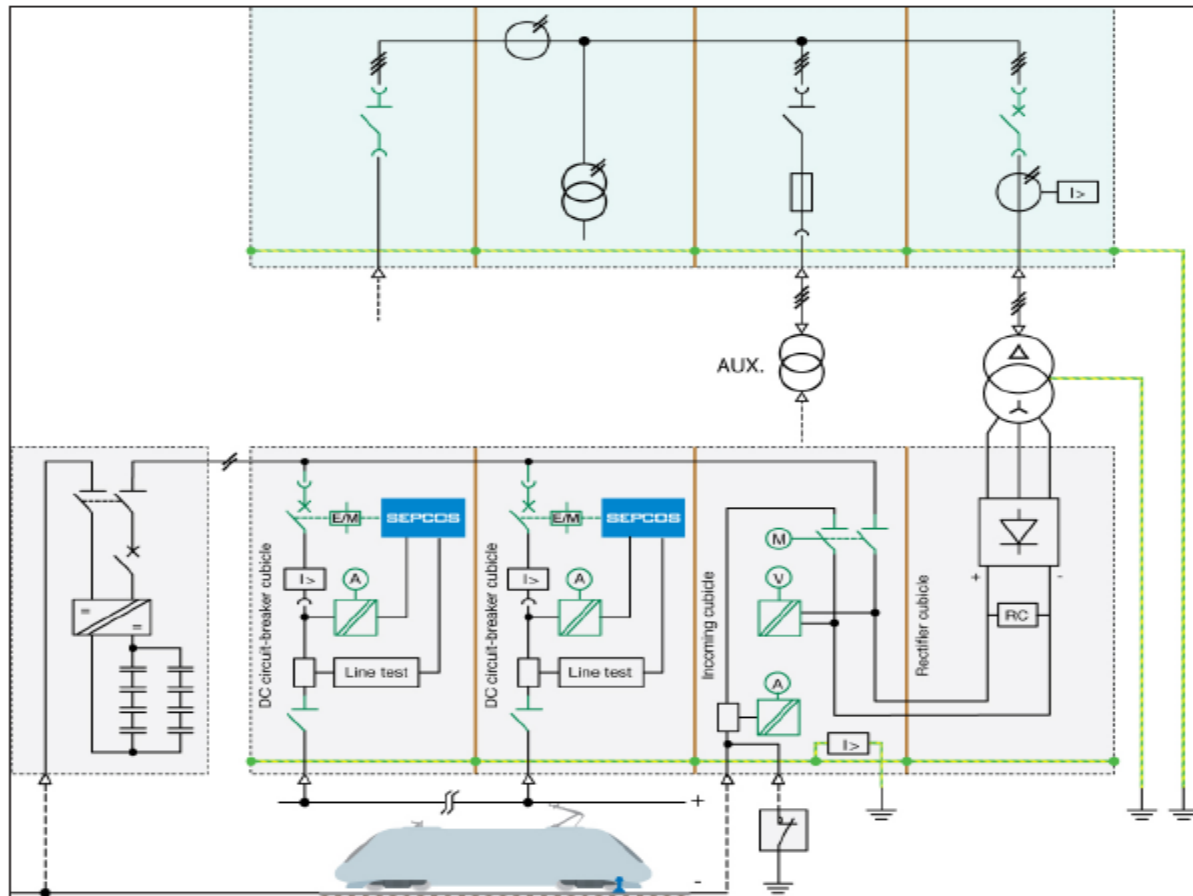


Figura 3.7: Esquema eléctrico de una subestación de tracción

La alimentación básica suele complementarse, por motivos de disponibilidad y fiabilidad del servicio, con segundas alimentaciones procedentes de subestaciones cercanas a la propia explotación ferroviaria, procediéndose a su interconexión mediante seccionadores estratégicamente distribuidos a lo largo de la red en caso de falla de la alimentación principal.

3.6.2. Transformadores de potencia

Es usual diseñar las subestaciones rectificadoras con sistemas redundantes en paralelo por idénticas razones de disponibilidad y fiabilidad, es por ello que se suele disponer de dos, tres o más transformadores de potencia en cada subestación.

La relación de transformación

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \eta$$

de estos transformadores se diseña para que, a partir de la tensión alterna de suministro, se obtenga una tensión transformada cuyo valor eficaz (RMS) rectificado sea el de la explotación de energía eléctrica en cuestión: 600, 750, 900, 1200 ó 3000 V_{CC}.

Una imagen de un transformador de potencia se puede observar en la Figura 3.8.



Figura 3.8: Transformador de potencia

3.6.3. Puentes rectificadores

A continuación del paso de transformación, la tensión alterna ya en baja pasa a un equipo rectificador como el que se muestra en la Figura 3.9. Este es el elemento principal de la subestación y convierte la corriente alterna en corriente continua mediante diodos de potencia. Normalmente estos diodos se encuentran en una configuración puente Graetz con 12, 18 ó 36 de ellos montados sobre sus correspondientes disipadores de aluminio.

Dada la elevada disponibilidad que se demanda a las subestaciones rectificadoras, se exigen diseños de puentes rectificadores que impliquen un doble número de diodos, pues la filosofía es que la subestación o su parte rectificadora pueda seguir funcionando ante el fallo de uno de sus diodos.

En el diseño de las celdas rectificadoras cada explotación ferroviaria debe especificar de forma muy clara los sistemas de protección y lógica interna de cara a su operación y mantenimiento, indicando por ejemplo, el orden de desconexión de disyuntores ante manipulaciones manuales, niveles de alarma de sobret temperatura, pulsadores, etc.

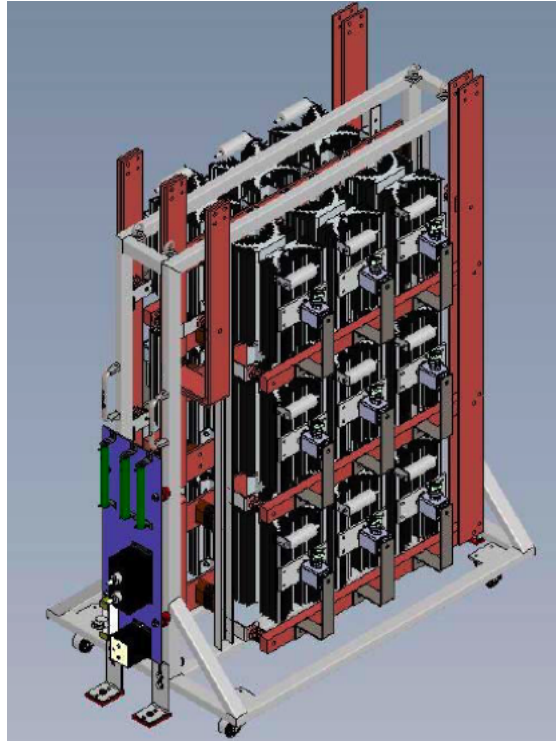


Figura 3.9: Puente rectificador

3.6.4. Celdas de *feeder* y *by-pass*

Por cada equipo rectificador, las modernas subestaciones suelen equipar una celda denominada *feeder* y *by-pass* cuyo destino es albergar dos funcionalidades concretas: el equipamiento de barras conductoras positivas, barras conductoras de tierra, la conexión de cables, el seccionador de *by-pass* y el dispositivo para ensayo de línea y, por otro lado, el disyuntor de vía (DV) extrarrápido, con un aparellaje de mando, señalización y control. Adicionalmente se puede equipar una celda específica de detección de fallas cuya función es la vigilancia de la tensión existente entre las barras negativas y tierra, y asimismo de la intensidad entre la estructura de las celdas de la subestación y tierra (derivación a tierra). Una celda de *feeder* se puede observar en el lado izquierdo de la Figura 3.10, mientras que del lado derecho se aprecia su correspondiente disyuntor de vía extrarrápido.

3.6.5. Configuración de subestaciones

Los equipos anteriormente citados: celdas, transformadores y rectificadores constituyen la subestación de tracción en sí. Dependiendo de cómo se conectan al tramo de catenaria o tercer riel que alimentan y si este está aislado (alimentación en T) o unido (alimentación en π) al contiguo, se suele instalar un equipo adicional denominado arrastre.

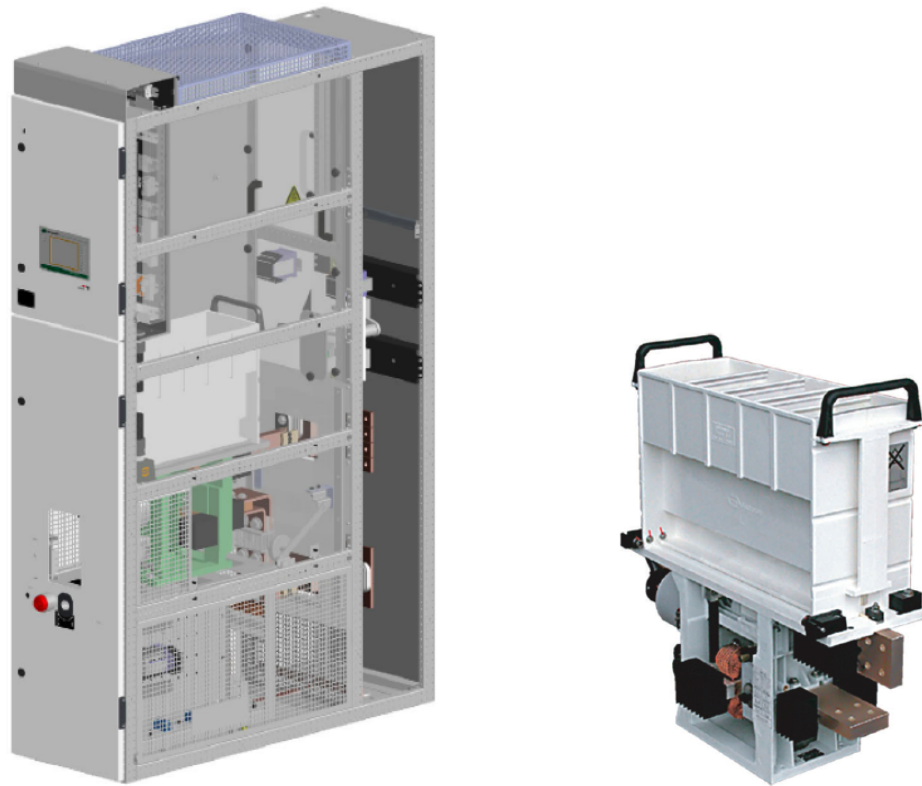


Figura 3.10: Celda de *feeder* y su correspondiente disyuntor de vía

La alimentación en T, representada esquemáticamente en la Figura 3.11, implica que cada tramo se separa de los contiguos mediante un aislador de línea aérea y por un seccionador motorizado o manual normalmente abierto.

La alimentación en π , mostrada en la Figura 3.12, se materializa cerrando permanentemente el seccionador de línea aérea, lo que implica que los dos positivos del esquema se encuentran en paralelo y cada subestación aporte energía de forma análoga, según lo próxima o alejada que se encuentre la unidad ferroviaria que esté traccionando en el tramo entre ambas. Esto implica un mejor reparto de cargas y una menor caída de tensión en zonas extremas. Sin embargo, esta configuración tiene el potencial problema de que un cortocircuito en un tramo puede hacer saltar las protecciones, no sólo de una subestación sino también de sus contiguas, por lo que se montan equipos de vigilancia de extrema rapidez ante fallas, cuya función es aislar eléctricamente la zona con problemas.

Adicionalmente, las configuraciones T y π pueden implementarse en subestaciones de tracción de manera individual tal y como se muestra en la Figura 3.13 y en donde

- DMT - Disyuntor de media tensión
- TR - Transformador de rectificación

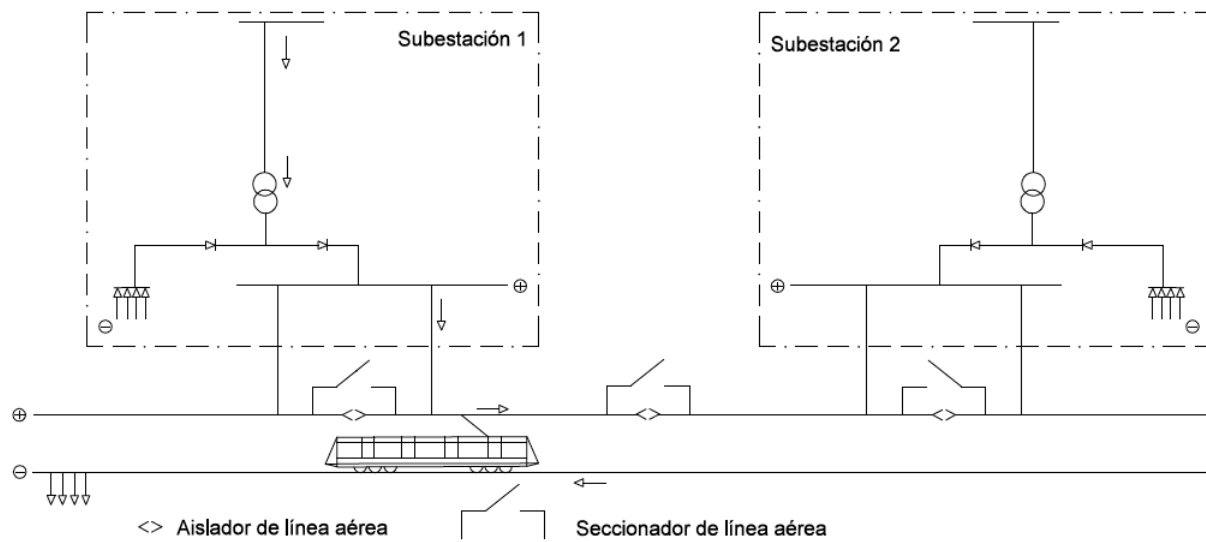


Figura 3.11: Alimentación en T

- R - Equipo de rectificación
- DV_x - Disyuntor de vía X
- DV_y - Disyuntor de vía Y

Siendo los disyuntores los encargados de energizar una sección de vía específica entre subestaciones y los cuales forman parte del equipo que generalmente es controlado por un sistema SCADA de baja tensión. Para el caso de la Figura 3.13 se muestran los valores de voltage utilizados en la Línea 12.

3.7. Telemando de subestaciones

Si bien la arquitectura de las subestaciones en sí mismas ha variado poco en los últimos años, el aspecto que más ha cambiado en estos sistemas es el telemando.

La necesidad de una cada vez mayor fiabilidad de las subestaciones y, asociadamente mínimo gasto de explotación y mantenimiento hizo crear sistemas de información y mando a distancia que posibilitaran, desde un puesto de control central, disponer de las medidas oportunas para la operación asociada de las subestaciones.

De forma muy resumida se puede decir que las subestaciones pueden operarse en primer nivel (conectar, desconectar, etc.) de forma local; esto es actuando manualmente celda a celda (rectificadora, de *feeder*, etc.) sobre los pulsadores, mandos o bien, sobre el propio PLC que equipan los sistemas de las modernas celdas.

En un segundo nivel pueden operarse de forma centralizada, desde la propia computadora

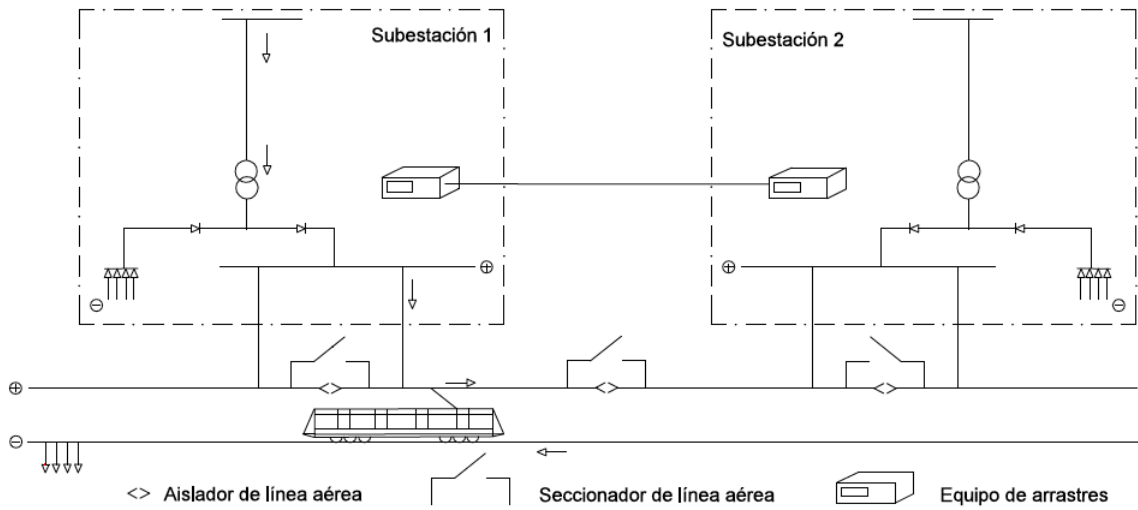


Figura 3.12: Alimentación en π

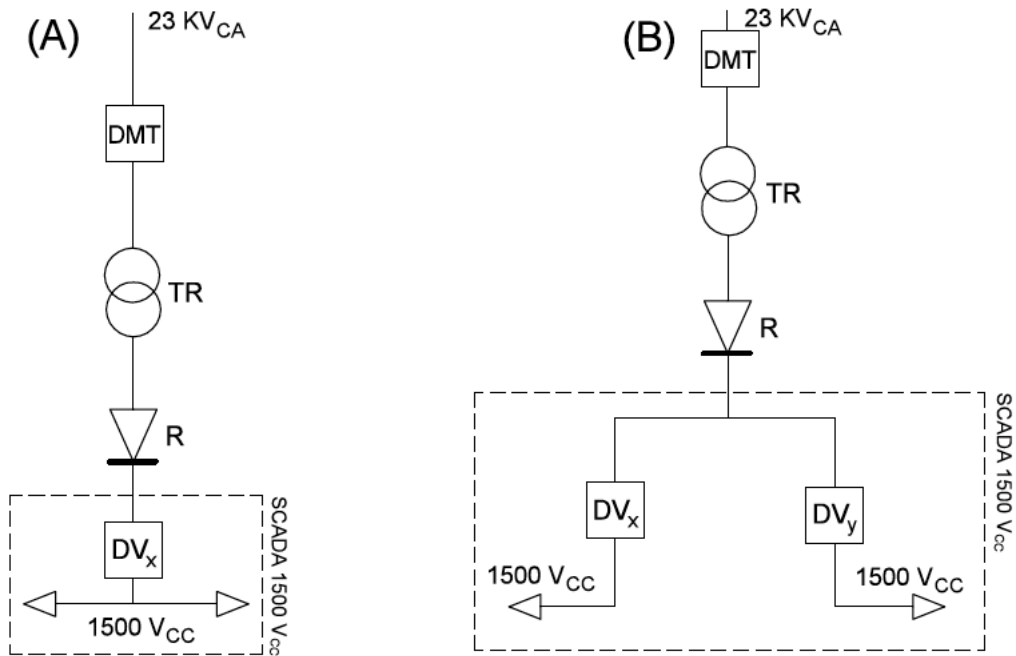


Figura 3.13: Configuración en T (A) y configuración en π (B)

de control, situado normalmente en el recinto de la subestación.

Por último, como máximo nivel de telemando, desde un puesto de Control Centralizado que puede ser específico para el campo de energía o integrado con el puesto de control de tráfico, de seguridad, de estaciones, etc.

En general, cualquier telemando se subdivide en tres estratos, los cuales se describen a continuación:

- La red de captación de datos y de situación de elementos y eventos recopila el estado físico de los dispositivos de potencia tales como disyuntores, transformadores o rectificadores, por medio de equipos periféricos a los mismos. Los valores de control y alarmas son transmitidos a un centro de control y mando.
- El centro de mando o de control recibe la información de todas las subestaciones de la red o línea. Después la procesa, prioriza y la presenta al operador de forma fácilmente interpretable.
- Red y sistema de mando. Este último estrato es el encargado de intervenir en la propia subestación desde el centro de control, así como en los elementos de desconexión o interconexión entre ellas para que, desde dicho centro de control, se vuelva a poner en servicio, se reconozcan alarmas, etc.

El telemando de subestaciones se basa, por lo tanto, en la captación de información en la subestación, su transmisión a un centro de control y el posterior reenvío de órdenes asociadas a dicha subestación.

En la actualidad, el principio de funcionamiento dentro de la subestación se suele basar en una serie de PLC a los que llegan las señales de los elementos de vigilancia y control (transformadores de medida, señales de disparo, alarmas, etc.). Dichos PLC son capaces de realizar un gran número de tareas y están conectados por medio de un bus de comunicaciones, formando la red local del sistema de control. Un procesador maestro supervisa y controla todas las señales procedentes de los PLC y envía otras de regreso a los mismos. Cada PLC de un determinado puesto (disyuntor, rectificador, etc.) lee de la red únicamente los valores y órdenes que le afectan. De esta forma, además del nivel de mando local en la propia subestación, se puede alcanzar desde un puesto de control un segundo nivel de mando a distancia, en el último estrato, un nivel de mando telemandado desde un puesto de control central para todas las subestaciones en conjunto.

Un telemando de una subestación real para un ferrocarril metropolitano se realiza usualmente mediante un sistema SCADA, trabajando bajo una arquitectura Modbus, aunque hay otras arquitecturas en el mercado que se aplican según la necesidad del proceso.

Cada celda cuenta con un PLC de mando y control comunicado con un procesador central en la subestación y que además incorpora un rack para protecciones.

Todo el sistema se conecta a la red de comunicaciones de la explotación ferroviaria generalmente mediante fibra óptica, considerando niveles de redundancia y seguridad.

3.8. Alimentación de los motores de los trenes

Para que por una red ferroviaria puedan circular trenes mediante tracción eléctrica es preciso implementar, a lo largo de los trayectos y en las estaciones, un sistema de alimentación capaz de suministrarles durante todo su recorrido y de forma continua y adecuada, la energía eléctrica procedente de la red de suministro, convenientemente transformada y rectificada en las subestaciones. Para ello, son colocados un conductor eléctrico aéreo a lo largo de la vía y un colector eléctrico de contacto deslizante en el tren, mismos que a continuación se describen.

3.8.1. Catenaria

Se puede definir el sistema de alimentación como la estructura para situar una superficie conductora accesible al tren, de manera que este pueda captar la energía necesaria para su movimiento. Los dos más comunes son el tercer carril y la línea aérea de contacto o catenaria.

El tercer carril es el sistema en el que la alimentación se realiza mediante un conductor activo situado en las inmediaciones de la vía férrea y paralelo a los carriles por los que circulan los trenes.

El otro sistema, la línea aérea de contacto (LAC) denominada globalmente como catenaria, está formado por una serie de conductores eléctricos situados a una altura determinada sobre el tren y que permite que todo el convoy circule por debajo de él, llevando la locomotora un elemento extensible de captación de corriente por frotación llamado pantógrafo. Es el sistema más utilizado ya que, al contrario del tercer carril, sitúa las zonas de tensión eléctrica fuera del alcance accidental de personas o animales.

Los tipos de catenaria han ido evolucionando con el aumento de la velocidad de los trenes, lo que exige la construcción de líneas aéreas de contacto con cada vez más demandas, tanto mecánicas como eléctricas, especialmente en el caso de las líneas de alta velocidad. Atendiendo precisamente a la velocidad que pueden soportar, se distinguen los siguientes tipos de catenaria:

- Catenaria tranviaria
- Catenaria normal o convencional
- Catenaria de alta velocidad
- Catenaria rígida.

Todas ellas cuentan con sus particularidades pero en el contexto de este informe de trabajo profesional, se incluirán solamente la catenaria normal y la catenaria rígida. La catenaria de tipo normal, cuyos componentes pueden verse en la Figura 3.14, es de doble suspensión y puede desarrollar velocidades de material rodante de hasta 120 km/h. Por otro lado

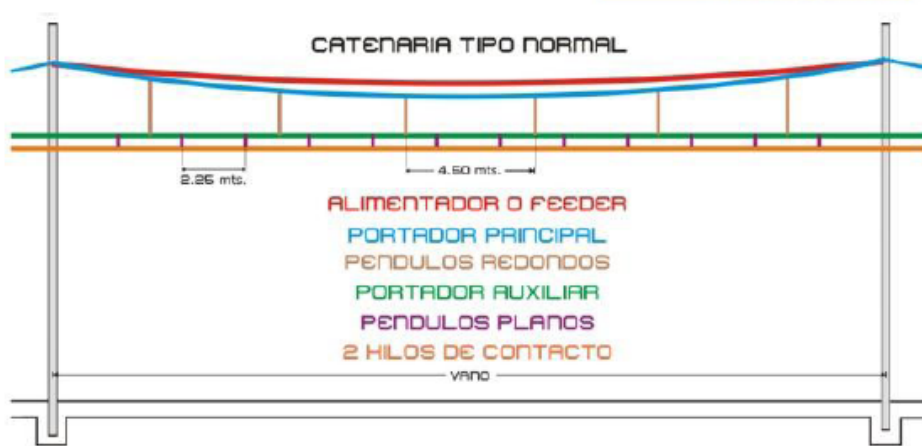


Figura 3.14: Catenaria de tipo normal o convencional

la catenaria rígida, cuyo perfil puede verse en la Figura 3.15, cuenta con un solo hilo conductor; dándole una mayor vida útil y menor mantenimiento. Al igual que la catenaria normal, el material puede alcanzar velocidades de hasta 120 km/h y generalmente se utiliza en tramos de túnel, como es el caso de la Línea 12.

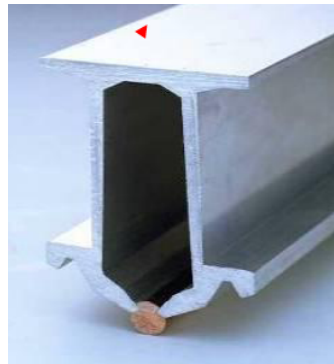


Figura 3.15: Catenaria de tipo rígida

3.8.2. Pantógrafo

Después de la catenaria es necesario mencionar al pantógrafo. Este elemento que aunque no forma parte de la línea de alimentación, es muy importante ya que es el encargado de captar la energía eléctrica de la catenaria y transmitirla a los motores del tren. Ubicado en el techo de locomotora y aislado de ésta mediante aisladores de porcelana, consiste en una mesilla con una o varias placas conductoras que cuentan con regulación y amortiguamiento vertical mediante muelles o a través de un sistema neumático que le permiten

mantener el contacto con el hilo conductor durante el desplazamiento del convoy. La imagen de un pantógrafo convencional puede observarse en la Figura 3.16.



Figura 3.16: Pantógrafo

3.8.3. Motores de tracción

Por último se abordará brevemente los tipos de motores usados en la tracción eléctrica para sistemas ferroviarios.

Los modernos dispositivos de electrónica de potencia y sus controladores basados en microprocesadores asociados han hecho posible, con la misma facilidad, la alimentación de motores de tracción de CA o CC a partir de fuentes de CA o CC. Las combinaciones posibles se muestran en la Tabla 3.1.

Entrada	Alimentación de CC	Alimentación de CA
Motor de CC	Resistencia conmutada o control chopper	Transformador y rectificador de control de ángulo de fase
Motor de CA	Entrada chopper e inversor trifásico	Transformador, inversor y entrada PWM

Tabla 3.1: Opciones de conversión para motores de tracción

Los cuatro arreglos mostrados están implementados en un número sustancioso de sistemas ferroviarios al rededor del mundo, aunque hay una clara tendencia en el uso de motores

de inducción trifásicos de AC, conocidos como motores asíncronos.

Las razones principales para preferir máquinas asíncronas en aplicaciones de tracción son:

- La eliminación de elementos inherentes a las características de las máquinas de CC (conmutador, escobillas, etc.).
- El incremento en la densidad de potencia.
- Contar con un motor “sellado de por vida”, lo que hace que su mantenimiento sea prácticamente nulo.

A pesar de estas ventajas, tiene que sopesarse el requerimiento de fuentes de energía trifásicas VVVF (*variable-voltage, variable-frequency*) a bordo del tren y en forma de convertidores electrónicos de alto rendimiento. Estos son más caros y complejos que los rectificadores y choppers usados con máquinas de CC. Sin embargo, gracias a los avances en la electrónica de potencia, se pueden lograr soluciones más simples, compactas y baratas.

3.9. Comentarios del capítulo

En este capítulo se revisaron los conceptos necesarios para comprender como se lleva a cabo el desplazamiento de los trenes de una vía férrea desde el punto de vista de la alimentación eléctrica. Este proceso implica un camino que inicia en una estación de alta potencia y termina en los motores de tracción a bordo del tren. Más aún, se explicó como los modernos sistemas ferroviarios incorporan tecnologías de supervisión y monitoreo tales como SCADA, que hacen que el proceso sea más seguro y eficiente. En el siguiente capítulo se abordarán nuevamente estos conceptos, pero sobre el sistema ferroviario en donde se llevó a cabo el trabajo profesional.

Capítulo 4

Contexto de la participación profesional

El núcleo de mi trabajo profesional se centra en la automatización integral de un sistema ferroviario moderno: la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México. Naturalmente, los sistemas ferroviarios han ido evolucionado con el paso de tiempo y gracias al rápido avance de la ingeniería electrónica, de control y de comunicaciones se ha podido lograr una eficiencia nunca antes experimentada en sistemas antiguos. Dicha eficiencia se traduce en una mayor movilización de pasajeros y sobre todo en el ahorro de consumo de energía. En este capítulo expondré el contexto necesario para situar mi labor en Alstom, enfatizando los temas que están relacionados con la automatización eléctrica de sistemas ferroviarios.

4.1. Automatización de sistemas ferroviarios

A medida que las ciudades crecen y se opta por el uso de sistemas de transporte metropolitanos, los sistemas de control ferroviario tienen que adaptarse a una demanda creciente de servicios cada vez más rápidos y eficientes. Para responder a esta situación, los operadores buscan la optimización de la capacidad de transporte en las líneas que gestionan así como el control de sus costos.

Los sistemas tradicionales de control se han basado históricamente en la detección de la presencia de un tren en una sección de la vía denominada cantón ferroviario. Cada cantón es protegido por señales que impiden la entrada de otros trenes cuando dicho cantón se encuentra ocupado por otro tren. Dado que cada cantón es fijo una vez construida la infraestructura de la vía, estos sistemas se conocen como sistemas de cantón fijo.

Con la llegada de las Tecnologías de la Información surgen los sistemas CBTC cuyo principal objetivo es aumentar la capacidad de transporte, reduciendo los intervalos entre trenes en las líneas ferroviarias y, al contrario de lo que ocurre en los sistemas de cantón fijo, la zona protegida en torno a cada tren no está definida de forma estática por su

infraestructura. Estos sistemas son conocidos como sistemas de cantón móvil y en ellos los trenes actualizan continuamente su posición exacta y la transmiten a los equipos electrónicos mediante un sistema de comunicación bidireccional vía radio.

4.2. Sistema CBTC

Un sistema CBTC, en español sistema de Control de Trenes Basado en Comunicaciones es un sistema de control y señalización que hace uso de comunicaciones bidireccionales entre el equipo embarcado en el tren y el equipo distribuido a lo largo de la vía para gestionar el tráfico. De esta forma, la posición exacta de un tren sobre la línea es conocida con mayor precisión que en los sistemas de control tradicionales y con ello, dicha gestión del tráfico ferroviario se lleva a cabo de una forma más eficiente y segura.

Está basado en la comunicación continua y de alta capacidad de datos entre el tren y la vía y con procesadores en ambos, capaces de implementar funcionalidades de protección (Automatic Train Protection, ATP) y de control (Automatic Train Operator, ATO). Al conjunto de ATP y ATO se le llama comunmente ATC (Automatic Train Control). Adicionalmente existe un sistema que tiene funcionalidades de supervisión y regulación (Automatic Train Supervision, ATS) sobre el desempeño general del ATC.

En los sistemas CBTC modernos son los trenes los que comunican su estado vía radio a los otros trenes distribuidos a lo largo del camino apoyándose del equipo de vía. Este estado incluye parámetros tales como

- Posición exacta
- Velocidad
- Sentido de marcha
- Distancia de frenado.

Esto permite por lo tanto, calcular la zona potencialmente ocupada por el tren durante su marcha mediante el equipo embarcado. Con esta información, el equipo de vía puede calcular los puntos que no deben ser sobrepasados por los trenes que circulen por la misma vía. Estos puntos son comunicados para que los trenes ajusten de forma automática y continua su velocidad a la vez que circulan con total seguridad. Es decir, los trenes reciben constantemente información de su distancia respecto al tren precedente y puede ajustar en consecuencia, su distancia de seguridad.

Los sistemas CBTC permiten reducir la distancia de seguridad a respetar entre trenes consecutivos. Ésta varía de forma continua con la posición actualizada de los trenes y con su velocidad de circulación, de este modo se consigue reducir el intervalo de tiempo entre trenes consecutivos y en consecuencia, aumentar la capacidad de transporte si hay trenes disponibles.

4.2.1. Control Automático de Trenes (ATC)

El equipo embarcado y el equipo de vía hacen posible, cuando se implementan adecuadamente, un control de trenes completamente automático o ATC.

La exactitud en el control del tren exigida en los sistemas de tránsito de elevada velocidad y de poca separación entre trenes sucesivos está fuera del alcance incluso, de los operadores humanos más diestros. El ATC vence ese obstáculo y da lugar a una regularidad de funcionamiento cuyo criterio es el de máximo rendimiento. Como quiera que exige una menor destreza por parte del operador ATC, existe un mayor número de personas capaces de realizar dicha función. Los errores humanos de juicio se eliminan y se ejecutan rígidamente las exigencias de funcionamiento.

4.2.2. Protección Automática de Trenes (ATP)

El Automatic Train Protection (ATP) forma parte del ATC y es el sistema de seguridad que supervisa la conducción de trenes y que aplica freno de emergencia o impide otras acciones cuando no se cumplen algunas condiciones de seguridad.

El sistema ATP se compone de dos partes:

1. Las balizas, que son dispositivos emisores de señales electromagnéticas y que están colocadas a lo largo de la vía. Sirven para calcular posición, velocidad y sentido de marcha entre otros parámetros del tren, por medio del equipo embarcado.
2. El equipo embarcado, que comprueba si la circulación de los trenes cumple con lo establecido por el operador.

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 del carril. Cuando el tren lee la información que proporcionan las balizas, comprueba que las condiciones impuestas se cumplan. Si no se cumplen aplica el freno de emergencia, o en algunos casos, impide una determinada acción (como abrir una puerta si el tren no está en el lugar adecuado). Una baliza sobre la vía ferroviaria puede apreciarse en la Figura 4.1

4.2.3. Operación Automática de Trenes (ATO)

Automatic Train Operation (ATO) es el nombre que recibe el modo de conducción que gobierna al tren de forma automática sin la intervención del conductor y también forma parte del ATC. El ATO es sólo un modo de conducción por lo que tiene que ser siempre supervisado por el ATP.

Para iniciar el modo de conducción ATO se establecen primero las curvas de aceleración y frenado, la velocidad idónea en cada punto y los puntos de parada para una vía determinada, entre otros parámetros.

Como el ATO sólo regula la marcha del tren, no es función de las balizas evitar que el



Figura 4.1: Baliza montada en vía

tren supere la velocidad máxima o rebase señales en rojo, dichas funciones se dejan a las balizas del ATP pero pudiendo el ATO usar la información de las balizas para regular su conducción, por ejemplo, deteniéndose ante una señal en rojo sin rebasarla como lo haría un conductor.

4.2.4. Supervisión Automática de Trenes (ATS)

El sistema Automatic Train Supervision (ATS) tiene como principal función la de gestionar el tráfico ferroviario de acuerdo con criterios de regulación específicos. Este subsistema actúa como principal interfaz entre el operador y el sistema de señalización CBTC al gestionar la interfaz para el enrutamiento de trenes, la regulación de horarios, las alarmas y eventos.

4.2.5. Arquitectura de un sistema CBTC

En la Figura 4.2 se puede apreciar la arquitectura típica de un sistema CBTC basado en radio, incluyendo los siguientes equipamientos fundamentales:

- Equipamiento de vía, que incluye a su vez el sistema de enclavamiento y los Controladores de Zona en las que se puede dividir una línea o red de metro (y que normalmente incluyen las funcionalidades ATP y ATO de vía). Dependiendo de la solución técnica se selecciona entre arquitectura centralizada o distribuida. El control del sistema se realiza desde un puesto de mando central ATS y, en ocasiones, se pueden incluir también equipos de control local distribuidos como modo de respaldo.
- Equipamiento CBTC embarcado, que integra las funcionalidades ATP y ATO.
- Comunicación Tren-Vía, basado en la actualidad en sistemas de comunicaciones vía radio.

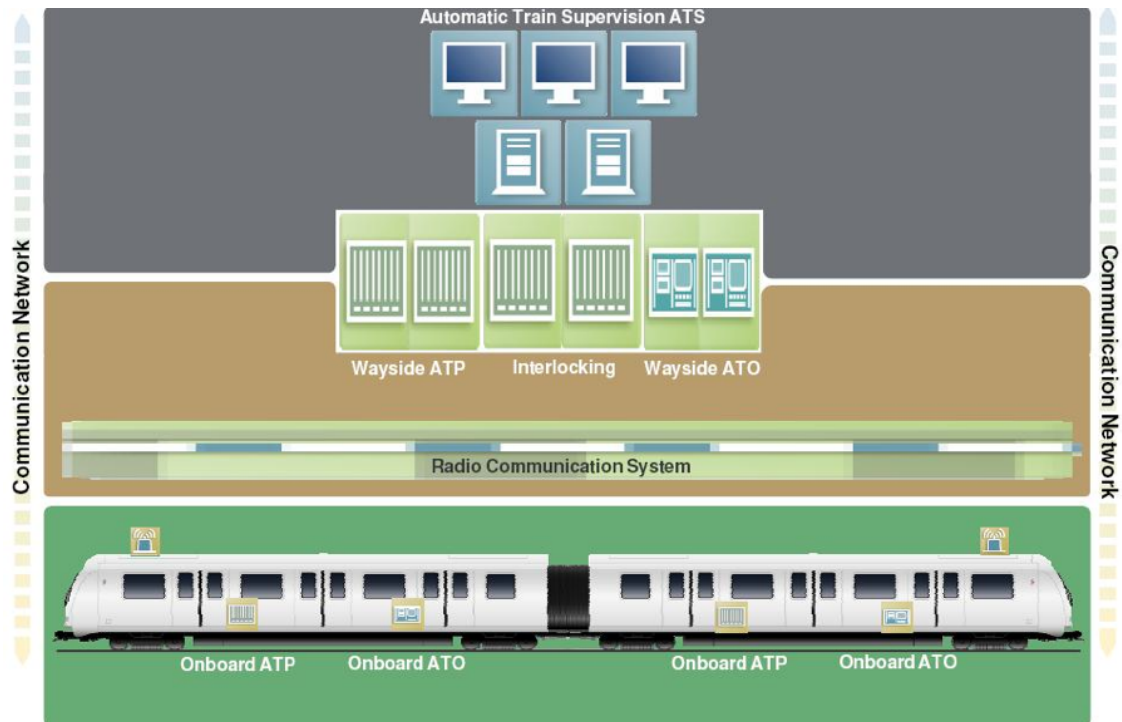


Figura 4.2: Arquitectura de un sistema CBTC

Aunque depende de la solución técnica de cada proveedor, de forma lógica se pueden distinguir los siguientes componentes principales dentro de la arquitectura típica de un sistema CBTC, mismos que pueden apreciarse en la Figura 4.2:

- Sistema ATS (*Automatic Train Supervision ATS*).
- Sistema de Comunicación de Datos (*Data Communication System*). Siendo un sistema basado en la comunicación bidireccional de datos entre los trenes y los equipos de vía, los sistemas CBTC modernos integran normalmente una red de radio digital mediante antenas o cable radiante. Es habitual el uso de la banda libre de 2.4 GHz (la misma empleada por los sistemas WiFi).
- Sistema ATP de vía (*Wayside ATP*). Este sistema gestiona las comunicaciones con todos los trenes en su área o territorio de influencia. Además calcula los puntos de parada que no debe sobrepasar cada tren que circula por dicha área. Su cometido es por tanto fundamental para garantizar la seguridad de la circulación.
- Sistema de Enclavamiento (*Interlocking*). Cuando es requerido como un subsistema independiente (entre otros casos, por ejemplo por la necesidad de un enclavamiento como sistema de respaldo en caso de fallo del sistema CBTC), se encarga del control de los objetos de campo como las agujas, señales y sus funcionalidades relacionadas.

- Sistema ATO de vía (*Wayside ATO*). Es el encargado de controlar el destino y la operación de los trenes. Indica a cada tren su próximo destino o estación y puede informarle de la duración de la parada. Igualmente proporciona otras funciones auxiliares y no relacionadas con la seguridad, como órdenes de parada, salto de estación o la gestión de alarmas y eventos, todas ellas indicadas en la IHM del ATS.
- Sistema ATP embarcado (*Onboard ATP*). Es el encargado de controlar en todo momento la velocidad del tren para mantenerla dentro de un perfil de operación seguro, forzando la aplicación de un frenado de urgencia en caso necesario.
- Sistema ATO embarcado (*Onboard ATO*). Se encarga de controlar automáticamente la petición del esfuerzo de tracción o frenado del tren con objeto de regular su velocidad por debajo del límite fijado por el sistema ATP. Su cometido fundamental es facilitar la tarea del conductor o asistente (u operar sin conductor en el caso que se requiera) asegurando los objetivos de regulación del tráfico y el confort del pasajero.

Actualmente los principales proveedores de sistemas CBTC en el mundo son las compañías Thales, Siemens, Ansaldo STS, Bombardier y Alstom.

4.3. Proyectos CBTC de Alstom

Son cada vez más las aplicaciones de sistemas CBTC que se implementan (y se están implementando) alrededor del mundo, tal y como se muestra en la Figura 4.3 para el caso particular de Alstom. Estas van desde implantaciones de pequeño tamaño y funcionalidad y con un número limitado de vehículos, hasta complejos sistemas que son superpuestos sin afectar al servicio en metros pesados existentes que transportan cientos de miles de pasajeros al día a bordo de más de 100 trenes.

En lo que respecta a América Latina, Alstom implementó el sistema CBTC con nombre comercial *Urbalis Classic 400* (Urbalis 400 en lo subsecuente) en la Línea 1 del metro de Santiago en Chile, en las líneas 1, 2 y 3 en el metro de São Paulo en Brasil y en la Línea 12 en el Metro de la Ciudad de México.

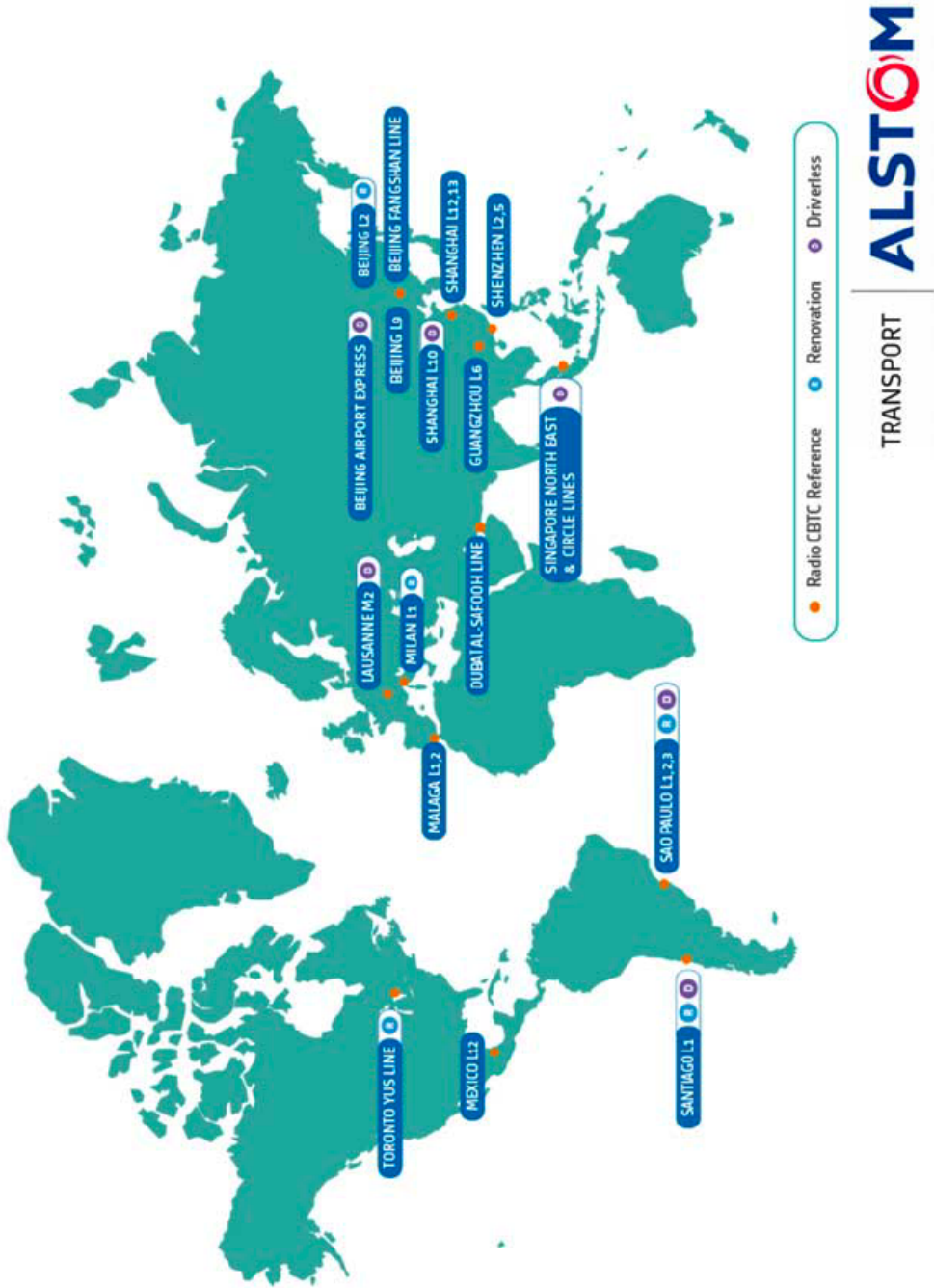


Figura 4.3: Proyectos CBTC de Alstom alrededor del mundo

4.4. Línea 12 del Metro de la Ciudad de México

La línea 12 del Metro brinda servicio de transporte masivo de pasajeros a los habitantes de siete delegaciones: Tláhuac, Iztapalapa, Coyoacán, Benito Juárez, Xochimilco (desde Tulyehualco), Milpa Alta y Álvaro Obregón.

Comienza en la terminal Tláhuac y finaliza en la terminal Mixcoac. El trazo de la obra inició en los predios baldíos Terromotitla de la Delegación Tláhuac, corriendo paralela al Canal Acalote, incorporándose en el cruce de la calle Luis Delgado con la Avenida Tláhuac y desarrollándose a lo largo de ésta hasta la Calzada Ermita Iztapalapa. Sigue al poniente por la Avenida Popocatepetl y toma a la derecha en la Avenida División del Norte, retomando el poniente por las Avenidas Municipio Libre, Félix Cuevas, Extremadura y la calle Benvenuto Cellini hasta Periférico.

La Línea 12 se compone de una zona de servicio comercial para pasajeros con 20 estaciones desde la estación Tláhuac hasta la estación Mixcoac. Cada estación cuenta con dos andenes, excepto las estaciones Periférico Oriente y Tlaltenco, que tienen un andén central. También tiene una zona de servicio de trenes sin pasajeros que incluye las vías secundarias de la línea (vías A, B y C atrás de la estación Tláhuac, vía Z en la estación Atlalilco y vía Y entre las estaciones San Lorenzo Tezonco y Los Olivos).

En las siguientes secciones se abordan las características más sobresalientes de la Línea 12 incluyendo las que se relacionan estrechamente con la implementación y puesta en servicio de su sistema CBTC.

4.4.1. Características físicas y operativas

Dentro de las características físicas y operativas de la Línea 12 se consideran:

- 26 km de línea
 - 2 km en solución superficial
 - 14 km en solución elevada
 - 10 km en tramo subterráneo
- 20 estaciones
 - 1 estación terminal con taller
 - 1 estación terminal con correspondencia
 - 3 estaciones de correspondencia
 - 15 estaciones de paso
- 28 trenes en intervalos de 3.9 minutos idealmente al inicio de la operación
- 35 trenes en intervalos de 2.5 minutos idealmente en horas pico

- Mínima distancia entre transbordos
- Preparaciones para extender la red del Metro mediante la ampliación de la línea
- Infraestructura planeada considerando necesidades de operación y mantenimiento de la línea
- Áreas de estacionamiento para bicicletas en terminal Tláhuac y estaciones
- Conexión con Tren Ligero, Metrobús Insurgentes y Terminal de Autobuses del Sur.

4.4.2. Características técnicas

Dentro de las características técnicas de la Línea 12 se consideran:

- Trenes de rodada férrea de 7 carros por tren
- 20 motores de inducción de corriente alterna por tren con fuentes de energía VVVF
- Talleres de mantenimiento y pruebas cercanos a la estación Tláhuac
- 1 Puesto de Control de Línea (PCL) cercano a la estación Tláhuac
- 1 Puesto de Maniobra en Talleres (PMT)
- 3 Puestos de Maniobra Local (PML) en Talleres, estaciones Tláhuac y Mixcoac
- 14 Subestaciones de Rectificación (SR) a lo largo de la línea y 1 en Talleres
- Alimentación de energía eléctrica en alta tensión de 230 KVA
- Tracción mediante línea elevada de contacto (catenaria) de 1500 V_{CC}
- 5 pantógrafos por tren
- Señalización lateral
- Sistema CBTC Urbalis Classic 400
- Radio telefonía: radio troncalizado digital de tecnología TETRA
- Videovigilancia: basada en CCTV con cámaras vía red (IP) y análogas

4.4.3. Estaciones

La totalidad de estaciones de la Línea 12, los talleres y el PCL junto con su sectorización y códigos usados en las HMI se enlistan en la Tabla 4.1. A su vez, la ubicación de estas estaciones en un mapa y el tipo de vía por la que corren los trenes (túnel, sección superficial o sección elevada) puede verse en la Figura 4.4.



Figura 4.4: Línea 12 del Metro de la Ciudad de México

Número	Nombre	Código	Sector
1	Tláhuac	TLH	A
2	Tlaltenco	TLT	
3	Zapotitlán	ZAP	
4	Nopalera	NOP	
5	Los Olivos	OLV	
6	San Lorenzo Tezonco	SLO	
7	Periférico Oriente	PEO	
8	Calle 11	C11	
9	Lomas Estrella	LE	
10	San Andrés Tomatlán	STO	
11	Pueblo Culhuacán	CLH	
12	Atlalilco	ATL	
13	Mexicaltzingo	MEX	B
14	Ermita	ERM	
15	Eje Central	ECE	
16	Parque de los Venados	PAV	
17	Zapata	ZAA	
18	Hospital 20 de Noviembre	H20	
19	Insurgentes Sur	INS	
20	Mixcoac	MIX	
100	Talleres de Tláhuac	DEP	C
101	PCL	PCL	D

Tabla 4.1: Estaciones de la Línea 12

4.5. Alimentación eléctrica de la Línea 12

La Línea 12 es alimentada mediante la ampliación de la subestación de alta tensión SEAT Estrella cuya función es la producción y distribución de energía a la línea 8 existente (Garibaldi - Constitución de 1917). Esta transforma la tensión eléctrica de 230 KV proveniente de la Comisión Federal de Electricidad a 23 KV para alimentación de los transformadores de media tensión (TMT). A partir de dichos transformadores, la sección eléctrica de media tensión de la Línea 12 se pueden dividir en dos subsecciones:

- Subestaciones de alumbrado y fuerza (SAF)
- Subestaciones de rectificación (SR)

Enseguida se explican brevemente las características de estas subestaciones.

4.5.1. Subestaciones de Alumbrado y Fuerza

Estas subestaciones fueron instaladas para proveer energía a túneles y estaciones. Las SAF de la Línea 12 se alimentan de la red de 23 KV en forma de anillo abierto desde la SEAT estrella por medio de cuatro disyuntores de 23 KV desenchufables. Estos se alimentan de los Buses de Alumbrado A y B.

4.5.2. Subestaciones de Rectificación

Las SR tienen por objeto la producción y distribución de la energía de tracción de los trenes. Su función es transformar la tensión eléctrica de 23 KV_{CA} que proviene de la SEAT Estrella a través de los buses de tracción en una tensión de 1500 V_{CC} y distribuirla por medio de un sistema de catenaria para la alimentación de los motores de trenes. En total son 15 SR, 14 de ellas distribuidas a lo largo de la vía y una en los Talleres de Tláhuac. Las configuraciones en las que están dispuestas son:

- Ocho SR's en arreglo π con dos disyuntores de vía (DV_x, DV_y)
- Seis SR's en arreglo T con un disyuntor de vía (DV_x)

Es conveniente señalar que la línea dispone de más disyuntores en Talleres (DT's) y Vías Secundarias (DVS) y que las estaciones que no cuentan con SR asociada son: Zapotitlán, San Lorenzo Tezonco, Lomas Estrella, Eje Central, Zapata e Insurgentes Sur.

4.5.3. Zonificación de tracción eléctrica

Los equipos requeridos para la alimentación de tracción están distribuidos de la siguiente manera:

- En ocho zonas (Z):
 - Desde ZA hasta ZH y,
- En quince secciones eléctricas (S):
 - Desde S01 hasta S15.

Además de una zona de talleres (ZVS TLAH) y una sección de vías secundarias (SVS) en la terminal Mixcoac. Esta zonificación se puede apreciar en la Figura 4.5.

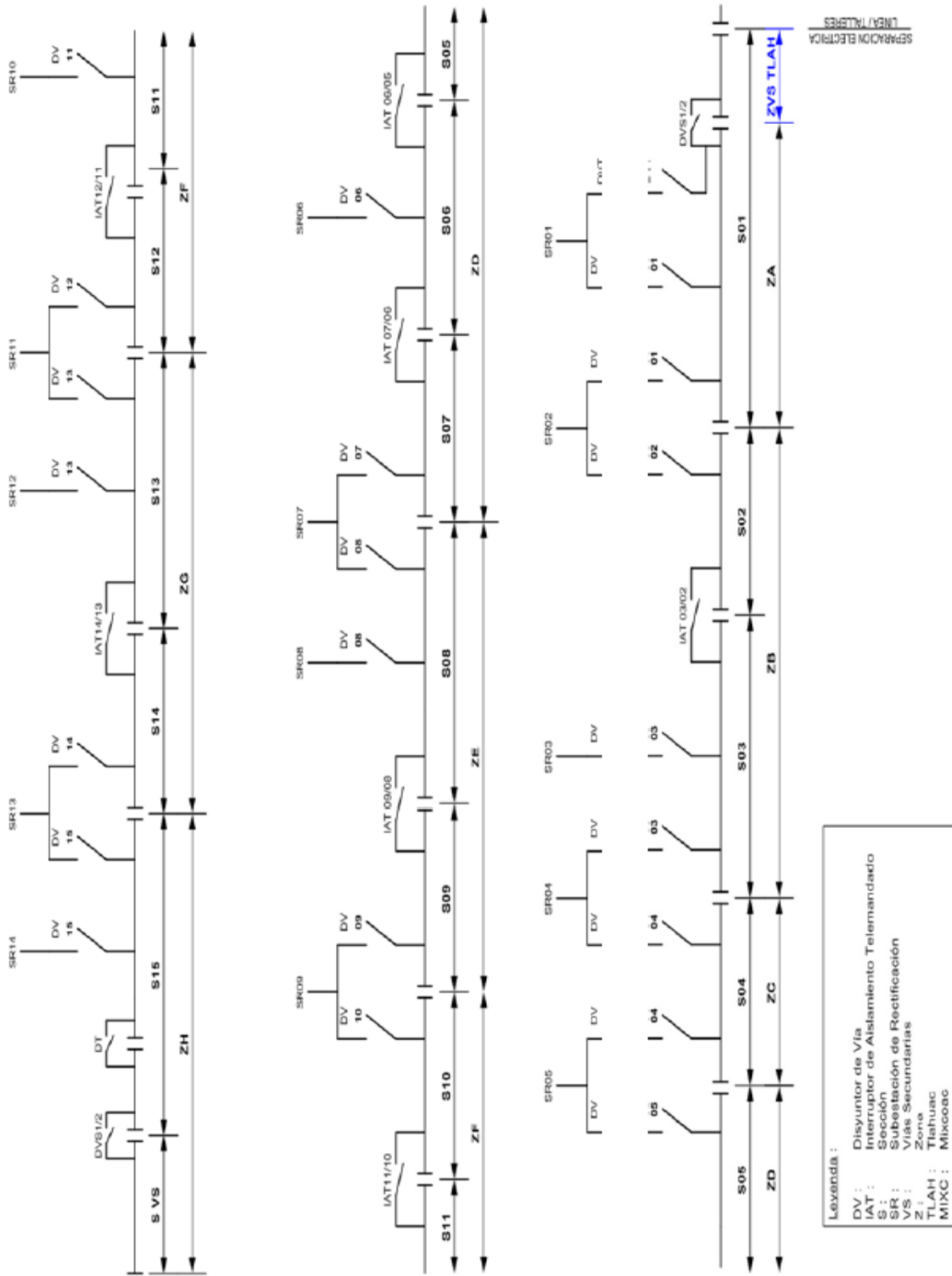


Figura 4.5: División eléctrica de la Línea 12 - Zonas y Secciones

4.5.4. Catenaria utilizada

En cuanto a la catenaria, en la Línea 12 se consideraron dos soluciones:

- Catenaria rígida. Aplicada en la sección de túnel que va desde la interestación Culhuacán - Atlalilco hasta la terminal Mixcoac
- Catenaria convencional. Instalada en vías principales desde Culhuacán - Atlalilco hasta la terminal Tláhuac.

Ambas catenarias están diseñadas para desarrollar velocidades de material rodante de hasta 120 km/h.

4.5.5. Material rodante utilizado

El material rodante de la Línea 12 está compuesto por trenes bidireccionales y articulados que cuentan con

- 7 carros por tren en configuración “FR - FN - FN - FN - FN - FN - FR”
- 10 bogies¹: 2 por cada carro FN
- 10 fuentes VVVF: 1 por cada bogie
- 20 motores eléctricos: 2 por cada bogie y fuente VVVF
- 5 pantógrafos con tensión nominal de 1500 V_{CC}: 1 en cada carro FN.

Cada tren cuenta con una capacidad máxima para transportar 2234 personas.

4.6. Automatización integral de la Línea 12

La división de Alstom, Alstom Transport fue la encargada de la instalación y puesta en servicio de la totalidad de los sistemas electrónicos y electromecánicos de la Línea 12 a través de Alstom TIS (*Technologies de l'Information et Systemes*²); desde los circuitos cerrados de televisión (CCTV) o control de pagos en taquillas, hasta la automatización integral de los trenes. En la Figura 4.6 se pueden apreciar todos los sistemas que Alstom TIS instaló, configuró y que actualmente da mantenimiento. Todos ellos pueden ser englobados en tres áreas de acción principales:

¹Dispositivo giratorio dotado de dos ejes paralelos (cada uno con dos ruedas) sobre el que se apoya el vehículo ferroviario.

²Tecnologías de la Información y Sistemas

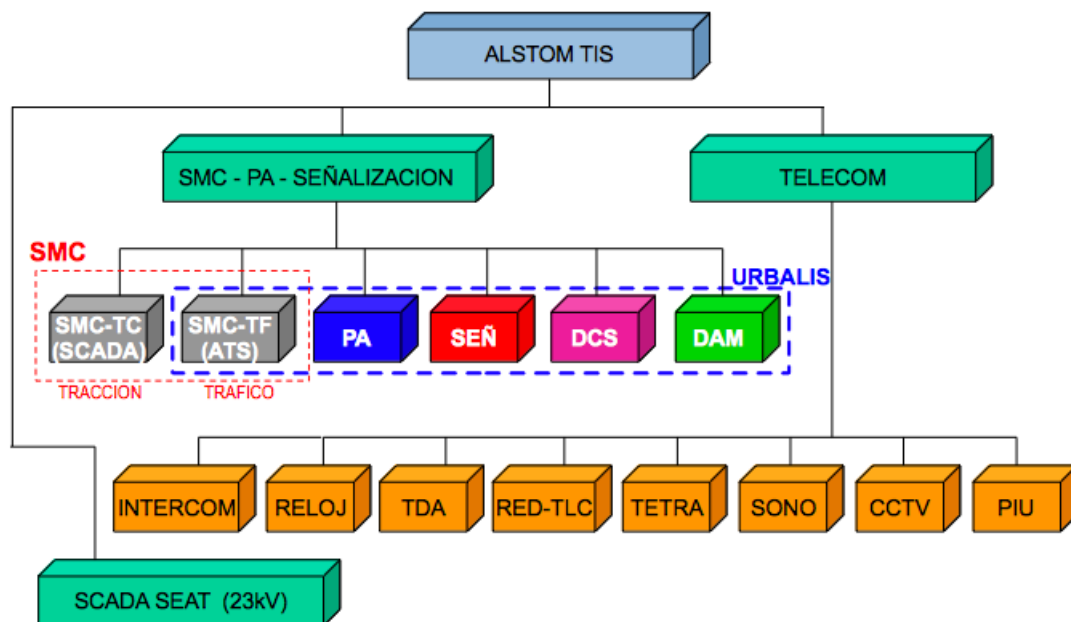


Figura 4.6: Sistemas de Alstom Transport sobre la Línea 12

- TELECOM: Se encarga de los sistemas de telecomunicaciones de la línea tales como el TETRA (TERrestrial Trunked RAdio) o Sistema de Telefonía de Trenes, el SONO (Sistema de Sonorización y Voceo) o bien el PIU (Pantallas de Información de Usuario), por mencionar algunos.
- SCADA SEAT (23 KV): Se encarga de monitorear y regular la energía proveniente de la SEAT (Subestación Eléctrica de Alta Tensión) Estrella quien es la que alimenta, después de una etapa de transformación a media tensión, a todas las Subestaciones de Rectificación (SR) de la línea así como a las Subestaciones de Alumbrado y Fuerza (SAF).
- SMC - PA - Señalización: El conjunto de Sistema de Mando Centralizado (SMC), Pilotaje Automático (PA) y Señalización³ hacen posible la conducción automática de los trenes de la Línea 12. Mientras que el SMC se encarga de regular el tráfico de trenes, el sistema SCADA 1500 V_{CC} controla el suministro de energía para su tracción.

En las siguientes secciones se describirá con más detalle los sistemas Urbalis 400, SMC y SCADA 1500 V_{CC}.

³Es el conjunto de botones de frenado de urgencia (BFU), circuitos de vía (CdV), agujas y otras señales que se encuentran a lo largo de la vía y en estaciones y que indican a los trenes las condiciones del camino que se encuentran por delante.

4.7. Sistema Urbalis 400

La línea 12 cuenta con el sistema CBTC Urbalis 400. Como se mencionó en la Sección 4.3, fue desarrollado por Alstom y está siendo usado en varios sistemas ferroviarios metropolitanos alrededor del mundo. Dentro de sus principales bondades se encuentran el operar sin conductor, señalización lateral y circuitos de vía. Además utiliza sistemas de cantón móvil así como sistemas de comunicación de última generación.

Urbalis 400 es un sistema altamente fiable ya que, en caso de presentarse averías o fallas que pudieran afectar la operación de los trenes y/o funcionamiento de la línea, existe redundancia en todos sus subsistemas al incorporar Tecnologías de la Información en combinación con hardware y software altamente especializado. En esta sección daré una visión muy general de cada uno de los elementos que lo conforman, la manera de comunicarse entre ellos y su función en la tracción de los trenes.

4.7.1. Objetivos del sistema Urbalis 400

El sistema Urbalis 400 tiene elementos en estaciones, talleres, a lo largo de la vía, a bordo de trenes y en el PCL. Dentro de sus principales objetivos se encuentran los siguientes:

- Proveer protección automática de los trenes
- Asegurar la seguridad de los usuarios
- Proveer comandos de movimiento de trenes
- Informar a los usuarios de su posición
- Proporcionar órdenes de regulación de tráfico
- Llevar a cabo el monitoreo de los equipos de vía y a bordo de los trenes

4.7.2. Elementos del sistema Urbalis 400

El sistema Urbalis 400 consta de los subsistemas PA (Pilotaje Automático), SEÑ (Señalización), DCS (Sistema de Comunicación de Datos) y DAM (Dispositivo de Ayuda al Mantenimiento). A continuación se enlistan cada una de sus funciones

- PA maneja la posición de cada tren y asegura la protección y operación de trenes.
- SEÑ maneja la formación y destrucción de itinerarios y opera los equipos en la vía.
- DCS asegura la comunicación entre todos los subsistemas de Urbalis 400. Este sistema de comunicación de datos intercambia mensajes a través de canales independientes.

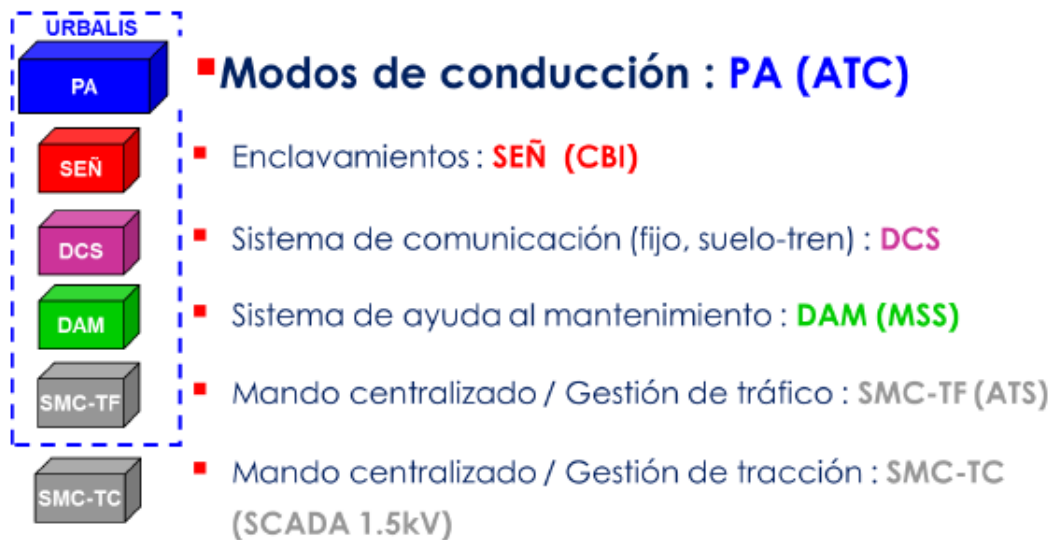


Figura 4.7: Arquitectura de Urbalis 400

- DAM provee capacidad de mantenimiento a todos los subsistemas de Urbalis 400.

El SMC está integrado a Urbalis 400 en la parte de gestión de tráfico de trenes mientras que la parte de gestión de tracción se logra mediante el sistema SCADA 1500 V_{CC}, que es independiente y forma parte del SMC tal como se puede observar en la Figura 4.7.

El diseño de Urbalis 400 incluye redundancias en el equipo del PCL y a lo largo de la vía. Por lo tanto, una falla única no tiene impacto en la disponibilidad de todo el sistema. En el caso poco probable de fallas múltiples, la consecuencia consiste en su pérdida temporal parcial o total sobre la línea. En estos casos se proporciona la información apropiada a los equipos de mantenimiento para que tomen decisiones y actúen para compensar dichas fallas siguiendo el siguiente proceso, que además ilustra la interacción entre los subsistemas de Urbalis 400:

- El estado del hardware de Urbalis 400 es monitoreado en los sistemas del SMC y del DAM
- El SMC recibe alarmas del equipo que proporciona al regulador del PCL la información suficiente como para que tome decisiones operacionales.
- El DAM recibe de los equipos del CBTC una Base de Información para la Gestión (MIB), la cual proporciona al equipo de mantenimiento información detallada sobre la naturaleza de la falla.

Es importante destacar que el objetivo principal de Urbalis 400 es la conducción automática de los trenes de la Línea 12 a partir de un conjunto de parámetros establecidos

por un operador. Estos parámetros pueden ser perfiles de velocidad, tablas de horarios u otros que en conjunto hagan más eficiente el transporte de pasajeros de forma segura y el logro de un menor consumo de energía. Desde esta perspectiva, los subsistemas PA, SEÑ, DAM complementan las funciones del SMC compartiendo información mediante el DCS y logrando así una gestión efectiva del tráfico de trenes. Además se logra también una supervisión adecuada de su tracción mediante el sistema independiente SCADA 1500 V_{CC}.

4.7.3. Equipo y estaciones de trabajo de Urbalis 400

A continuación se enlistan, de manera general, los equipos y estaciones de trabajo más importantes que hacen posible el funcionamiento del sistema Urbalis 400.

- Equipo central ubicado en el puesto central de línea (PCL)
 - Servidores centrales del SMC: gestión central de la supervisión de los trenes
 - Estaciones de trabajo del SMC
 - Estación de trabajo del DAM: gestión de las actividades de mantenimiento
- Equipo PML/PMT
 - Controlador de línea (LC): gestión de las versiones de software y sincronización del tiempo del ATC.
 - Controlador de Zona (ZC): gestión de la protección de los trenes (desde el punto de vista PA) para el área del PML.
 - Unidad de almacenamiento de datos (DSU): telecarga los ficheros de datos de los equipos del PA embarcado.
 - Controlador SEÑ (CLC): gestión de enclavamiento.
 - Estación de trabajo del DAM: gestión de las actividades de mantenimiento
 - Estación de trabajo PML/PMT: gestión local de la supervisión de trenes
 - Front End Processor (FEP)
 - PLC de tráfico: adquisición de entradas y salidas remotas.
- Red primaria de la línea: asegura todas las comunicaciones entre los equipos fijos así como entre éstos y los equipos embarcados.
 - Nodos de SDH e interruptores de Ethernet
 - Fibra óptica a lo largo de la vía
- Puntos de acceso por radio: aseguran las comunicaciones por radio con los trenes y están ubicados a lo largo de la vía y conectados a la red primaria.

- Equipo embarcado: gestiona las funciones de Pilotaje Automático a nivel de tren.
 - En cada cabina de conducción: visualizador de cabina o VisuCab, botón de vigilancia, controlador de cabina del PA, antena de la baliza, odómetro, modems de radio y antenas.
 - A lo largo del tren: red Ethernet embarcada.
- Equipo de vía: balizas utilizadas por el equipo embarcado para ubicar al tren

En la Figura 4.8 se puede observar los sistemas Urbalis y SMC en interacción con la vía y con el tren. Se sigue el mismo código de colores que en la Figura 4.7, en verde se muestra el subsistema DAM, en rojo el SEÑ, en azul el PA, en gris el SMC y en rosa la red de comunicaciones del DCS, todos ellos con las redundancias necesarias en caso de fallas.

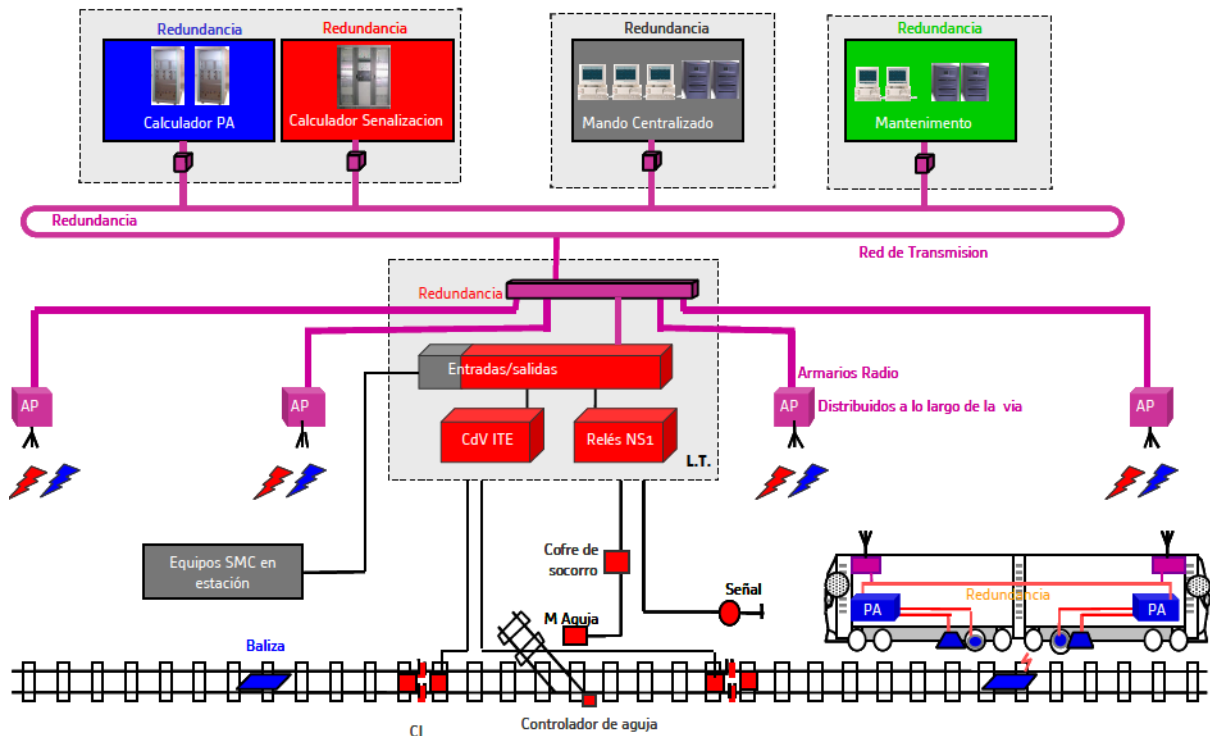


Figura 4.8: Interacción de Urbalis con el tren y la vía

Se muestran también las balizas a lo largo de la vía, mientras que en la Figura 4.9 se pueden apreciar los componentes del equipo embarcado. La interacción de ambos y su contribución en el ATP de un sistema CBTC se detalla en la Sección 4.2.2.

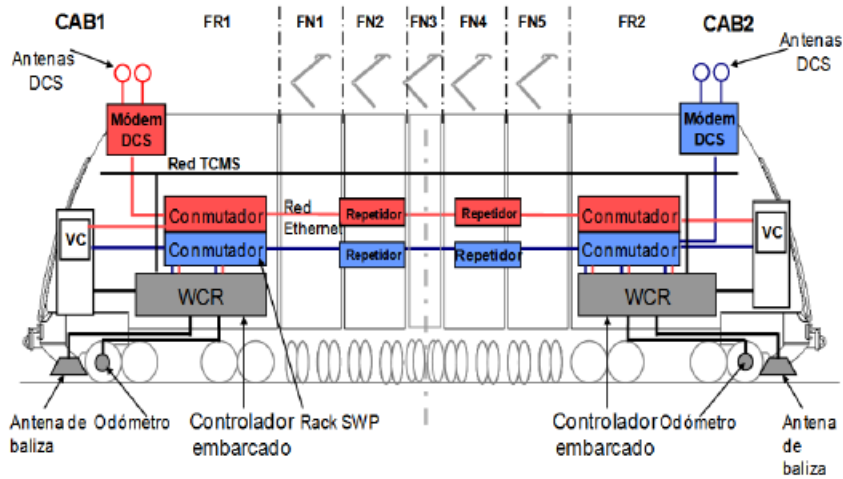


Figura 4.9: Equipo embarcado

4.7.4. Ubicación de los trenes mediante Urbalis 400

Cuando un tren ingresa en Territorio Urbalis (área geográfica en donde el tren puede moverse en Piloto Automático), el sistema inicializa automáticamente su localización de la siguiente manera y sin requerir ninguna contribución humana:

- El primer par de balizas calibran el odómetro del tren: las balizas colocadas en la salida de posiciones de estacionamiento y entrada a las zonas CBTC calibran el odómetro. Son seguidas de una tercera baliza que confirma dicha calibración.
- Las balizas de memorización de localización están presentes en las posiciones de estacionamiento del tren. Estas balizas se ubican a 2 m de distancia unas de otras, junto a las antenas lectoras de baliza del tren y se utilizan para confirmar la localización del mismo tras su activación.
- Una vez en movimiento, la velocidad estimada del tren es procesada a través de mediciones del odómetro.
- La calibración de las mediciones brutas del odómetro se efectúa a través de la posición precisa de las balizas.
- La posición precisa del tren se obtiene actualizando las medidas procesadas del odómetro con la posición precisa de las balizas

Una vez obtenida la posición exacta del tren, esta información es ingresada a la red del DCS por medio de los armarios de radio distribuidos a lo largo de la vía, encontrándose disponible para el subsistema de Urbalis 400 que lo solicite.

4.7.5. Aseguramiento de la comunicación de datos

El sistema Urbalis 400 proporciona comunicación remota y permite el acceso remoto a datos, comandos y controles relevantes entre todos los equipos del sistema, incluyendo los equipos de supervisión y mantenimiento, independientemente de su ubicación geográfica y del contenido del mensaje. Se utilizan dos mecanismos con estos fines:

- Implementar redes de comunicación independiente roja y azul con LAN privada y un ancho de banda garantizado para cada aplicación crítica.
- Implementar principios de redundancia automática para brindar protección contra fallas unitarias.

En cada nivel, el sistema se configura para garantizar que el fallo de cualquier aplicación que esté usando el DCS no perturbará la comunicación de ninguna otra que sea crítica.

4.7.6. Interacción entre los subsistemas de Urbalis 400

En la Tabla 4.2 se presenta de forma simplificada la información que intercambian los subsistemas de Urbalis 400 entre ellos.

Subsistema	Subsistema(s)	Interacción
DCS	Todos los subsistemas	El Sistema de Comunicación de Datos garantiza el intercambio de datos entre todos los equipos.
SMC	PA	Tiempos de salida y de llegada, solicitud de retención de tren, salto de estación, identificación de tren y velocidad funcional máxima.
PA	SMC	Estado del tren y posición en la línea.
SEÑ	PA	Estado del equipo fijo (señalización, circuitos de vía, agujas) y dirección de tráfico.
PA	SEÑ	Tren detenido o en avance
SMC	SEÑ	Mando de itinerarios.
SEÑ	SMC	Estado de equipos de vía, itinerarios.
DAM	Todos los subsistemas	Todos los dispositivos que constituyen el sistema son sondeados en forma cíclica por el DAM para reunir la información de su estado y configuración.

Tabla 4.2: Interacción entre los subsistemas de Urbalis 400

4.7.7. Interacción de Urbalis 400 con sistemas externos

También existe información que se intercambia entre Urbalis 400 y los subsistemas externos de la Línea 12 tales como el material rodante, el reloj maestro o la tracción SCADA 1500 V_{CC}. En la Figura 4.10 se puede ver de manera esquemática dicha interacción mientras que en las Tablas 4.3 - 4.4 se hace una breve descripción de la misma.

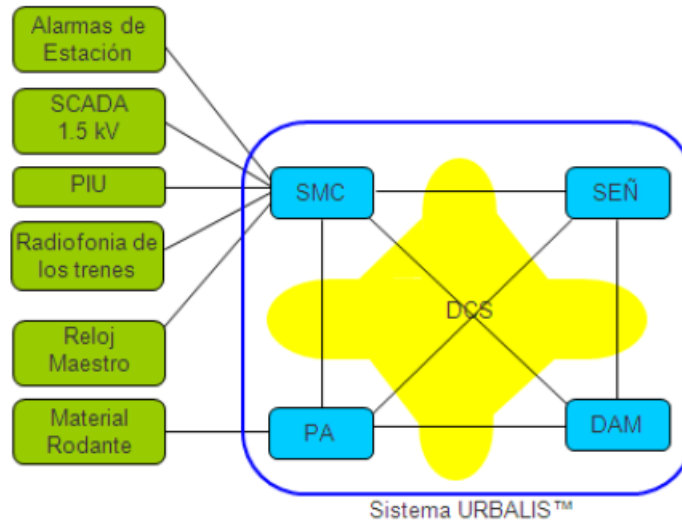


Figura 4.10: Interacción de Urbalis 400 con subsistemas externos

Urbalis 400	Externo	Interacción
PA	Material rodante	El PA recibe en entrada la información procedente del material rodante (estado de las puertas, cabina seleccionada, etc.) y envía al material rodante las salidas (frenado de urgencia, autorización de apertura de puertas, solicitud de inmovilización)
SMC	Reloj maestro	Sincroniza el sistema Urbalis 400 con el reloj de referencia global de toda la línea. Este proceso se realiza periódicamente.

Tabla 4.3: Interacción de Urbalis 400 con subsistemas externos (1)

Urbalis 400	Externo	Interacción
SMC	TETRA	El sistema SMC proporciona al TETRA <ul style="list-style-type: none"> • Identificación de servicio • Identificación del material rodante
SMC	PIU	El sistema SMC proporciona al sistema de Pantallas de Información a Usuarios (PIU) información sobre: <ul style="list-style-type: none"> • La llegada programada de los siguientes dos trenes en cada estación • Las siguientes dos salidas en las estaciones terminales
SMC	SCADA 1500 V _{CC}	El sistema SMC recibe información de SCADA para el control de la energía de tracción, mediante los PLC en las estaciones, así como de las alarmas en cada una de ellas.

Tabla 4.4: Interacción de Urbalis 400 con subsistemas externos (2)

4.8. Sistema de Mando Centralizado (SMC)

El SMC es un sistema que proporciona la regulación del tráfico y la lógica de tracción de trenes a lo largo de la Línea 12 principalmente. Además, gestiona los recursos informáticos en esta y en los talleres. Todas estas acciones las lleva a cabo desde el Puesto de Control de Línea.

Mientras que el tráfico de trenes se representa en pantallas donde aparecen las vías disponibles y los trenes en circulación, los técnicos del SMC disponen de controles para establecer un itinerario a cada uno de ellos.

4.8.1. Objetivos del SMC

Dentro de los objetivos específicos del SMC se encuentran:

- Supervisar y gestionar el tráfico de trenes a lo largo de la línea. Estas acciones incluyen:

- Seguimiento del tren
- Gestión de llegada y partida del tren en estaciones terminales
- Regulación del intervalo automático de trenes
- Supervisar y gestionar la lógica de tracción de trenes
- Supervisar los sistemas SCADA de las estaciones
- Supervisar y controlar las Subestaciones de Rectificación (SR)
- Supervisar y gestionar las alarmas de las Subestaciones de Alumbrado y Fuerza (SAF)

4.8.2. Equipo y puestos de trabajo del SMC

Los componentes principales del SMC son los servidores ICONIS ATS/SCADA que cuentan con una arquitectura basada en PC. Dichos servidores incluyen, entre otros elementos:

- Servidores ATS/SCADA. Son responsables del procesamiento en línea. Estas unidades son redundantes y se ubican en la sala técnica del PCL y en los locales técnicos de cada PML y del PMT. Debido a la integración del CBTC con el SMC la arquitectura redundante propuesta está basada en dos servidores redundantes en el PCL y dos servidores redundantes en cada PML, con un total de 6 servidores para la línea principal.
- Servidores redundantes de base de datos histórica. Son responsables por la recolección de archivos de datos históricos.
- Procesadores Front End (FEP). Son responsables de las comunicaciones y se pueden subdividir en
 - FEP PLC: Aseguran la comunicación entre el SMC y el sistema de energía.
 - FEP URBALIS: Aseguran la comunicación del SMC con los otros subsistemas URBALIS.
 - FEP PLC/TETRA/PIU: Aseguran la comunicación entre el SMC, el sistema de energía, el sistema TETRA y el sistema PIU.
- Red de área local (LAN). Una red LAN redundante enlaza todo el hardware del SMC. Todos los servidores y puestos de trabajo del PCL se conectan a ella.

Así mismo, algunos de los puestos de trabajo del SMC son:

- Puestos de regulador de tráfico: Están a cargo de la HMI relacionada con operaciones de tráfico, SCADA y gestión de alarmas.
- Jefe de reguladores: Una HMI relacionada con tráfico, SCADA, pantalla y reportes de alarma y se encuentra en la sala de operación del PCL.
- Puesto de mantenimiento de hardware: Está a cargo de una HMI relacionada con actividades de mantenimiento y se ubica en la sala técnica del PCL.

Los equipos y puestos mencionados están distribuidos en el PCL, PMT y los PML de las estaciones Tlahuac y Mixcoac, todos ellos conectados por la red LAN exclusiva del SMC.

4.8.3. Interacción del SMC con sistemas externos

En la Figura 4.11 se puede ver como interactúa al SMC con los subsistemas de Urbalis. Para conocer más detalles acerca del tipo de interacción que se tiene, se pueden consultar las Tablas 4.2, 4.3 y 4.4.

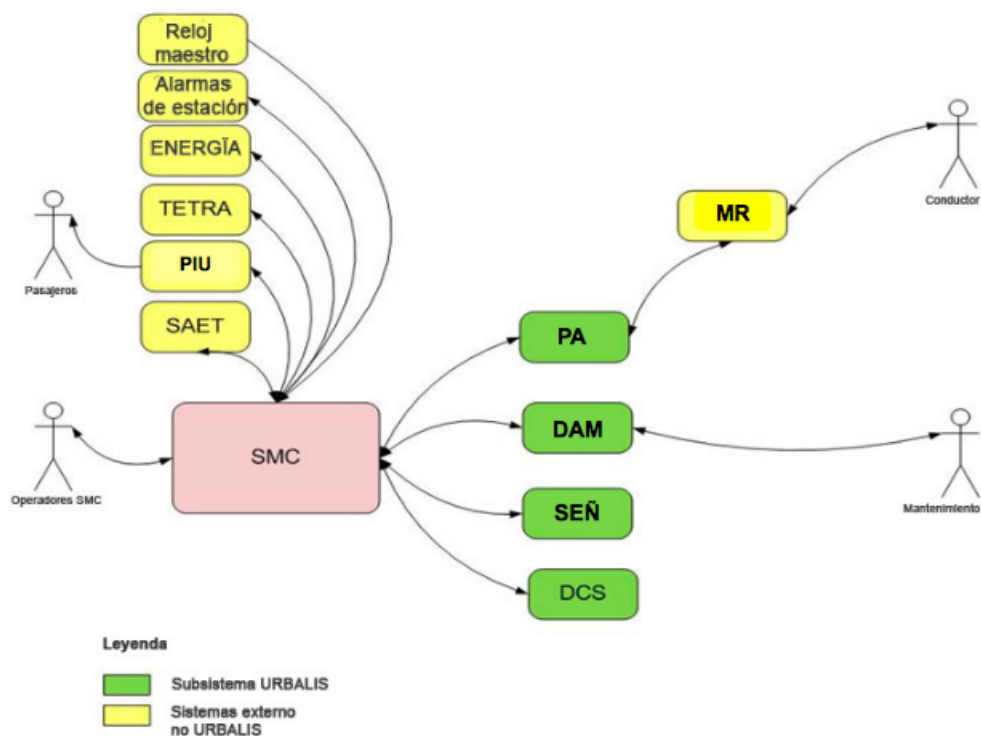


Figura 4.11: Interacción de SMC con subsistemas externos

4.9. Sistema SCADA 1500 V_{CC}

El sistema SCADA 1500 V_{CC} forma parte del Sistema de Mando Centralizado y entre una de sus principales funciones está la de supervisar y regular el suministro de la tensión eléctrica de tracción que mueve los trenes que circulan sobre las vías de la Línea 12 mediante PLC ubicados en estaciones.

En esta sección se mostrará, de manera simplificada, la estructura del Sistema SCADA 1500 V_{CC} y sus componentes principales, dando a conocer el sistema eléctrico que fue necesario automatizar y supervisar y cómo es que dicho SCADA lo logra.

Ya que el trabajo profesional realizado en Alstom se centra en este sistema, en el siguiente capítulo se abordará con más detalle su explicación, combinándola con las actividades realizadas para su puesta en servicio.

4.9.1. Objetivos del sistema SCADA 1500 V_{CC}

Los objetivos específicos del sistema SCADA 1500 V_{CC} son

- Monitorear todos los equipos de tracción de la Línea 12 mediante el sinóptico de tracción
- Controlar mediante una HMI los equipos de tracción de la línea
- Mostrar el estado de los siguientes equipos:
 - Disyuntores de Media Tensión (DMT)
 - Disyuntores de Vía (DV)
 - Interruptor de Aislamiento Telemandado (IAT)
 - Interruptor Tramo de Protección (ITP)
- Supervisar las alarmas de:
 - Corte de Urgencia (CU)
 - Corte de Urgencia de Fuera de Servicio (CUFS)
 - Relevador de Mantenimiento (RM)
 - Relevador de Mantenimiento Fuera de Servicio (RMFS)
 - Mando Local (ML)
 - Incidente en Línea (IL)

Desde el PCL se supervisa que estos objetivos sean cumplidos mediante el monitoreo continuo que implica contar con un sistema SCADA.

4.9.2. Arquitectura del sistema SCADA 1500 V_{CC}

La arquitectura del sistema SCADA 1500 V_{CC} puede apreciar en la Figura 4.12.

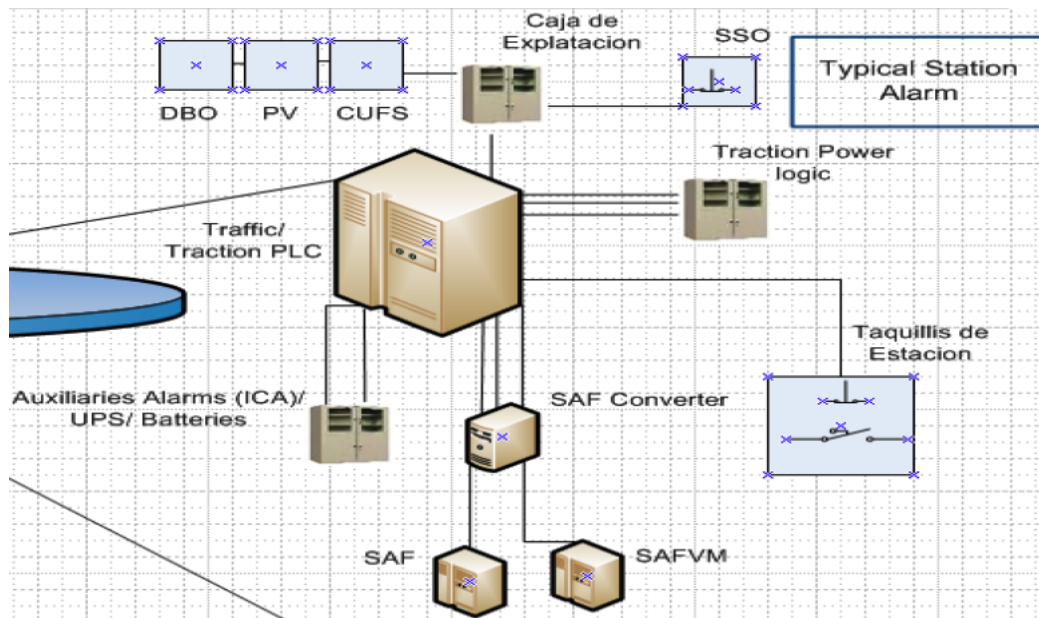


Figura 4.12: Arquitectura del sistema SCADA 1500 V_{CC}

En cada una de las estaciones de la Línea 12 se encuentran los mismos equipos de tracción, todos ellos comunicados a través de la red exclusiva del SMC.

Cabe mencionar que hay equipo SCADA en el PMT y en los PML de Tláhuac y Mixcoac, sin embargo sólo a través de los equipos de tracción de las estaciones es que se le proporciona energía a los trenes para que puedan moverse. Dicho equipo SCADA en el PMT y PML tienen varias funciones, tales como:

- Servir de interfaz entre el personal de mantenimiento y los PLC de tráfico/tracción de las estaciones
- Servir de redundancia PML - SCADA, PCL - SCADA
- Procesar información a nivel local
- Replicar la información al PCL

En resumen, la arquitectura del sistema SCADA 1500 V_{CC} es tal que toda su información se comparte con el SMC mediante los PLC de las estaciones. El usuario en el PCL puede monitorear el sistema y tomar decisiones sobre él, a partir de dicha información desplegada en las HMI.

4.9.3. Equipos SCADA 1500 V_{CC} en estación y en el PCL

Para lograr la supervisión efectiva por parte del sistema SCADA 1500 V_{CC} es necesaria la instalación de equipo en los locales técnicos de las estaciones de la Línea 12 así como su comunicación con en el PCL. En la Figura 4.13 se pueden observar dichos equipos y la forma en la que están enlazados con este último, mientras que en la Tabla 4.5 se indican sus nombres de acuerdo a las etiquetas enmarcadas en rombos amarillos.

Componente de hardware	Etiqueta	Componente de hardware	Etiqueta
Armario de tráfico	a	Cofre indicador DBO	m
Armario repartidor	b	Cofre indicador CUFS-SSO	n
Switch red	c	Cofre indicador personal en vías	p
Armario de tracción	d	Tablero próxima salida	q
Armarios UPS's	e	Zumbador	r
Armarios de Telecom	f	Indicador próxima salida	s
Baliza y alarma sonora	g	Estación de trabajo	t
Pedal de emergencia	h	Armario de servidores ATS (PCL)	u
Botón de emergencia	i	Armario de tráfico (PCL)	v
Caja frontera de alarma	j	Armario repartidor (PCL)	w
Caja de explotación	k	Platina de alarmas	x
Cofre de mando SSO	l		

Tabla 4.5: Equipos en estación

En el siguiente capítulo se dará una descripción más detallada del equipo que lleva a cabo la energización de las vías para la tracción de trenes, entre ellos el armario de tráfico, el armario repartidor y el armario de tracción.

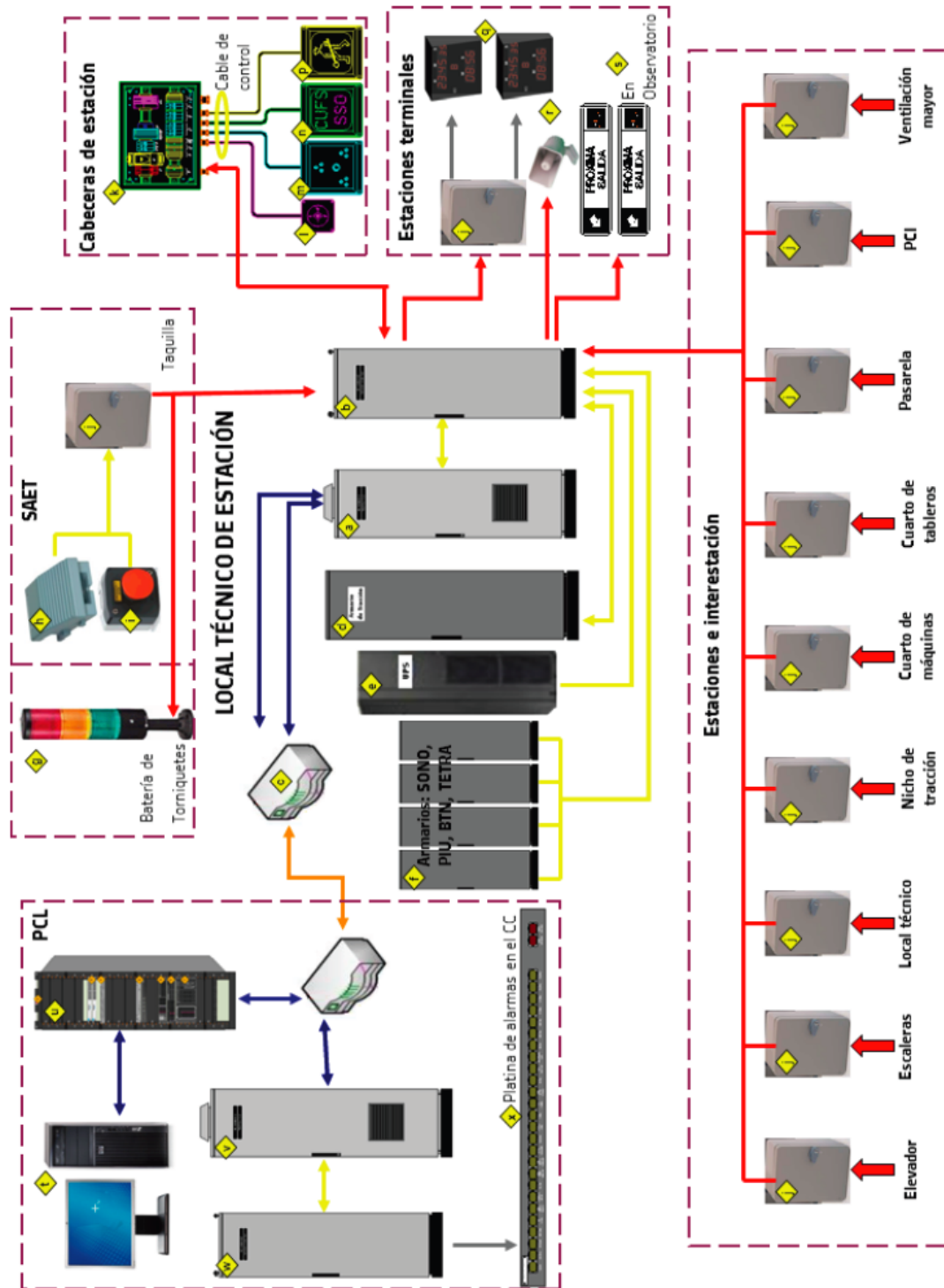


Figura 4.13: Equipos SCADA en estación

4.9.4. Comunicación SCADA SEAT 23 KV - SCADA 1500 V_{CC}

La SEAT Estrella también cuenta con un sistema SCADA, el SCADA SEAT 23 KV. Tal y como se especificó en la Sección 4.6, este monitorea y regula la energía suministrada por dicha subestación. Está conformada por una red redundante en anillo que recorre los

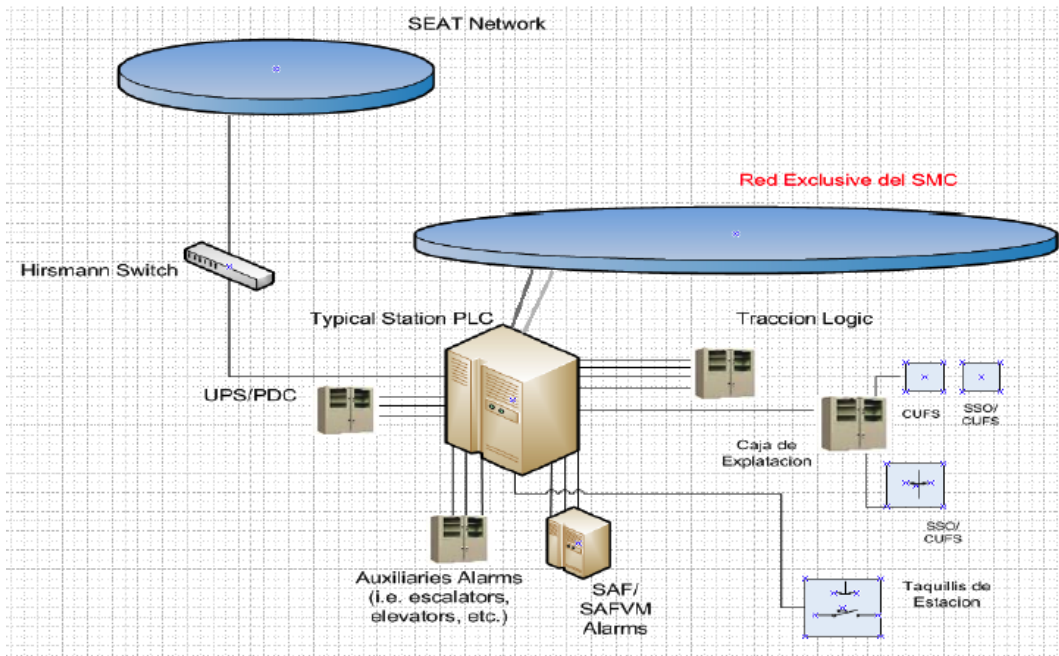


Figura 4.14: Conexión del SCADA 1500 V_{CC} con el SCADA SEAT 23 KV

diferentes locales a lo largo de la Línea 12 pasando por:

- SAF's
- Locales técnicos de interconexión con las SAF
- Subestaciones de Ventilación Mayor
- SR's
- La propia SEAT

La forma en el que el sistema SCADA SEAT 23 KV está comunicado con el sistema SCADA 1500 V_{CC} se muestra en la Figura 4.14. A través de interruptores industriales Hirschmann la red del SCADA SEAT se conecta a los PLC's de tráfico/tracción ubicados en las estaciones y éstos a la red del SMC.

Es muy importante conocer la estructura e intercomunicación del SCADA SEAT 23 KV con el SCADA 1500 V_{CC} ya que ambos sistemas comparten información en relevante para

la tracción de trenes. Mientras que el SCADA 1500 V_{CC} recibe el estado de los Disyuntores de Media Tensión (DMT) del SCADA SEAT 23 KV, este último recibe el estado de los Disyuntores de Vía (DV) y alarmas del primero. Este intercambio de datos es esencial para el correcto funcionamiento de ambos sistemas.

4.9.5. HMI del SCADA SEAT 23 KV

La información entre el SCADA 1500 V_{CC} y el SCADA 23 KV debe poder visualizarse tanto en el PCL como en la SEAT Estrella. El personal que se encuentre en dichos lugares debe ser capaz de poder tomar una decisión sobre los sistemas automáticos, dependiendo a la magnitud de las variables físicas en los dispositivos que supervisan, o bien del estado de sus alarmas. Para ello se cuenta con HMI en dichos puestos de control y mando.

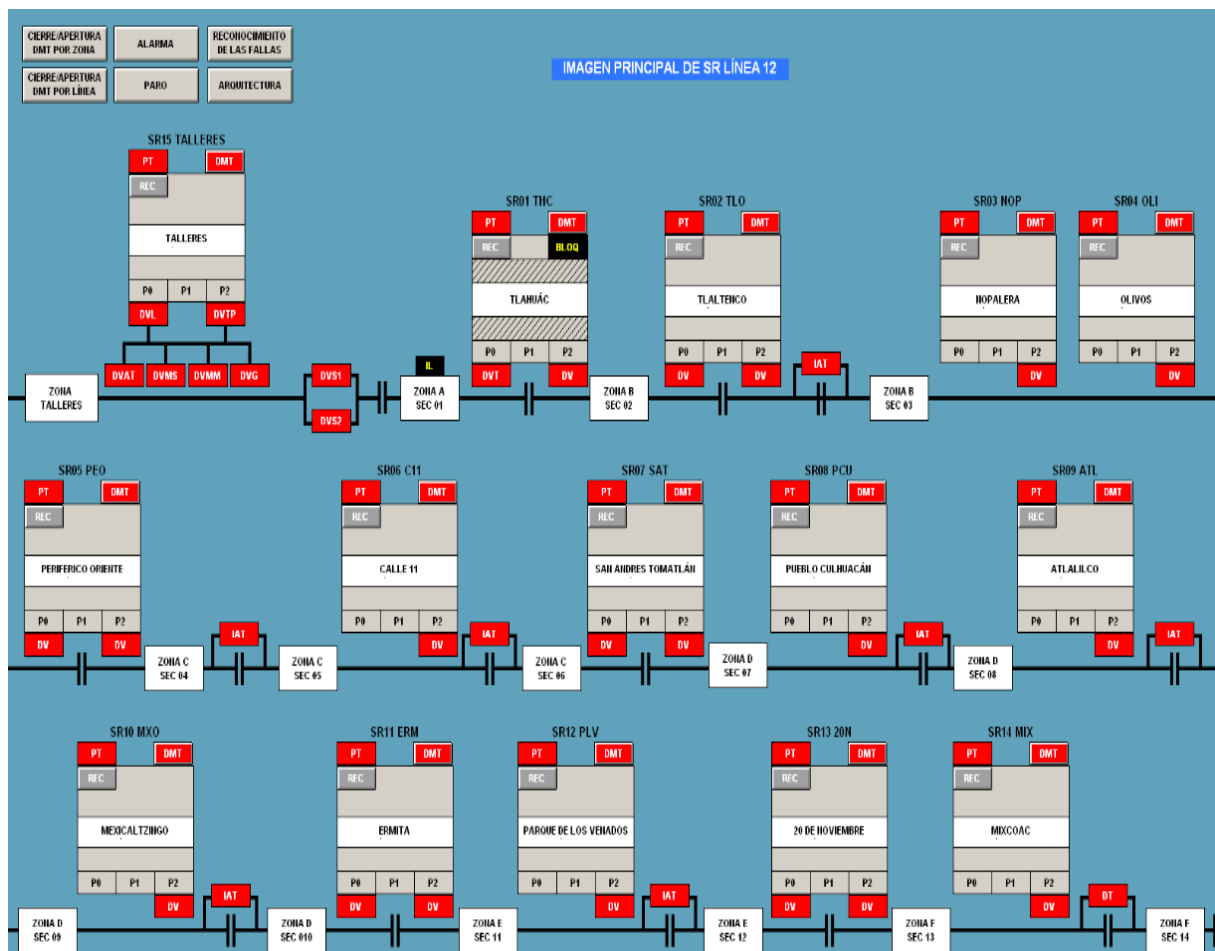


Figura 4.15: HMI principal del sistema SCADA SEAT 23 KV

En la Figura 4.15 se puede observar la HMI principal del SCADA SEAT 23 KV en donde

cada uno de los bloques representa a una SR. Si se hace un acercamiento en donde se encuentran las estaciones Nopalera y Olivos se produce la Figura 4.16. De acuerdo a la zonificación descrita en la Sección 4.5.3, estas estaciones se encuentran en la zona ZB y en la sección S03.

La HMI debe mostrar por cada SR:

- La presencia de 23 KV en la SR
- La presencia de 23 KV en el DMT
- Bloque DMT
- Síntesis de los estados de alarma tipo P0
- Síntesis de los estados de alarma tipo P1
- Síntesis de los estados de alarma tipo P2
- Estado de los DV (obtenidos a través del SCADA 1500 V_{CC}):
 - DV_x si la SR está en arreglo T
 - DV_x y DV_y si la SR está en arreglo π

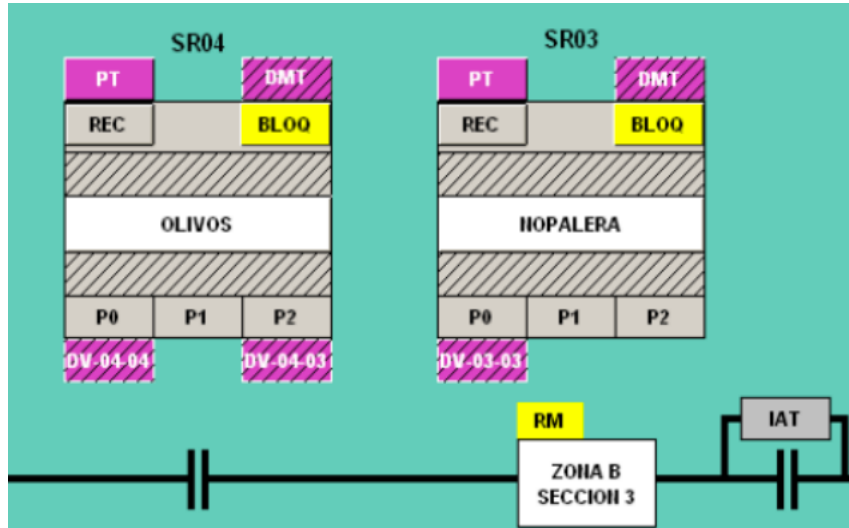


Figura 4.16: Acercamiento Nopalera - Olivos

En la Figura 4.16 se puede observar que en la SR04 de la estación Olivos hay dos Disyuntores de Vía, el DV-04-04 (DV_x) y el DV-04-03 (DV_y). Esto se debe a que esta SR está en configuración π . Por otro lado, para la SR03 de la estación Nopalera hay un solo

Disyuntor, el DV-03-03 (DV_x) ya que dicha SR está en configuración T.

Cabe mencionar que a partir de la HMI principal hay HMI secundarias que muestran más a detalle el estado de los equipos en cada SR mediante alarmas tales como:

- PLC desconectado
- Falla de comunicación PLC - SEAT
- Corte de urgencia
- DMT bloqueado
- Corto Circuito

Todas ellas sirven para monitorear el correcto funcionamiento del circuito que forma la SEAT con las SR mediante la supervisión del SCADA 23 KV.

Ya que el sistema SCADA 1500 V_{CC} fue sobre el que se llevó a cabo la actividad profesional, su HMI será descrita en el siguiente capítulo.

4.10. Comentarios del capítulo

En este capítulo se describieron los sistemas utilizados al automatizar íntegramente la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México y sobre los cuales se llevó a cabo la participación profesional. Cada uno de ellos se complementa con el otro para lograr que los trenes se desplacen sobre la vía sin la necesidad de intervención humana. Más específicamente, fue el sistema SCADA 1500 V_{CC} en el que pude hacer uso de una gran cantidad de conocimientos de ingeniería mediante las actividades que se describirán en el siguiente capítulo.

Capítulo 5

Participación profesional

Una vez conocidas las bases teóricas de un sistema ferroviario de tracción eléctrica en el Capítulo 3 y los sistemas de automatización que Alstom implementó sobre la Línea 12 en el Capítulo 4, en este capítulo daré a conocer las actividades desempeñadas como **Ingeniero de Pruebas ATS**, centrándome en la puesta en servicio del SCADA 1500 V_{CC}. Cabe señalar que, debido a que todos los sistemas automáticos de la línea funcionan bajo una muy estrecha simbiosis, mis conocimientos también se aplicaron en el SCADA SEAT 23 KV, el PA, el DCS, el DAM y sobre todo en el SMC. De esta manera me fue posible ampliar mi campo de acción y conocer a detalle como fue que se llevó a cabo la automatización integral de la Línea 12.

5.1. Organigrama

Alstom Mexicana S. A. de C. V. tiene, al igual que en Francia y en sus filiales de otros países, tres divisiones principales: Alstom Power, Alstom Grid y Alstom Transport. Ésta última es la encargada de diseñar, instalar, instrumentar y darle mantenimiento a todos los sistemas electromecánicos de los proyectos de transporte, incluida la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México. A su vez cuenta con Alstom TIS quien es la encargada de la implementación, puesta en servicio y mantenimiento de todos los sistemas automáticos incluyendo el sistema CBTC Urbalis 400 y el sistema SCADA 1500 V_{CC}.

En la Figura 5.1 se puede apreciar el entorno laboral en el que desarrollé el trabajo profesional en Alstom, siendo un equipo de franceses y mexicanos quienes nos ocupamos de la puesta en servicio de los sistemas automáticos de la Línea 12. Se puede apreciar que al mando de Alstom TIS está un gerente que se encarga de supervisar los proyectos de automatización directamente desde Francia. A él le reporta el Gerente de Proyecto de la Línea 12 en México y quien, a su vez, tiene bajo su mando a los siguientes líderes:

- Líder ATS: SCADA 1500 V_{CC} y 23 KV
- Líder ATC

- Líder SEÑ
- Líder TELECOM

Ellos son responsables de la completa instalación y puesta en servicio de los sistemas ATS, ATC, SEÑ y TELECOM.

Mientras que el Líder ATC cuenta con un sólo Ingeniero de Pruebas ATC, el Líder ATS cuenta con dos: uno que se encarga del sistema SCADA 23 KV y otro del sistema SCADA 1500 V_{CC}. Este último fue el puesto desempeñado al realizar mi labor profesional en Alstom.

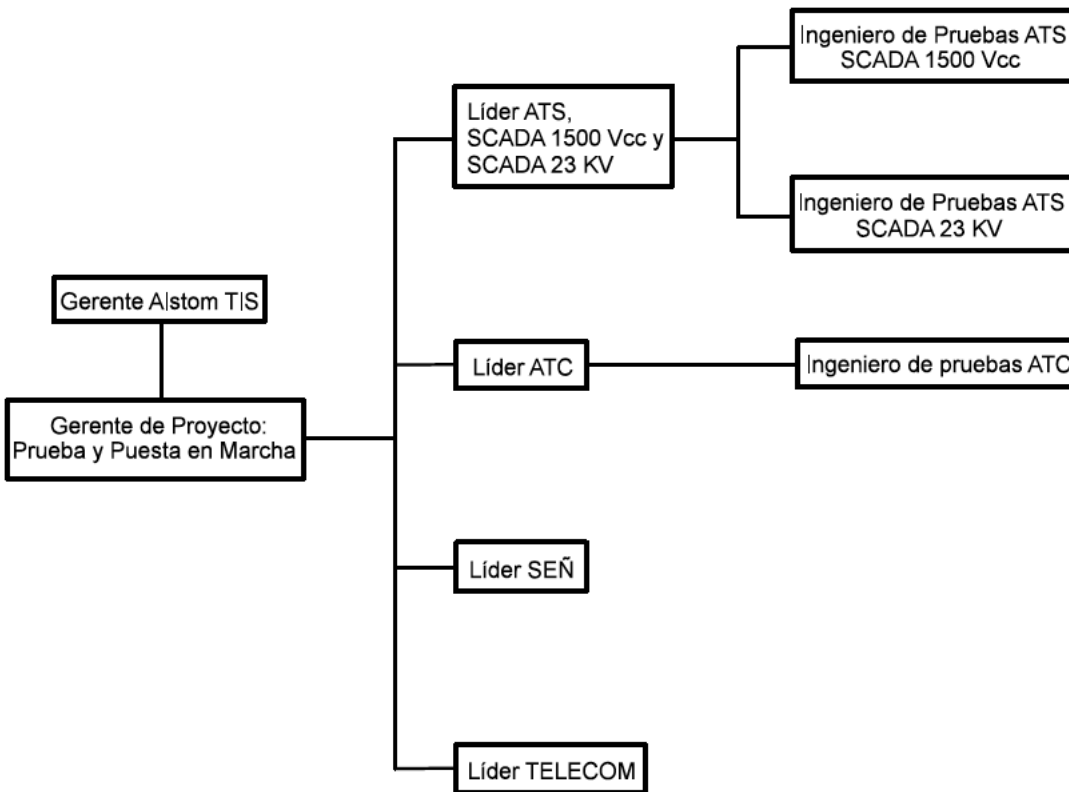


Figura 5.1: Organigrama de Alstom TIS

5.2. Puesto desempeñado

Como se explicó en la Sección 4.2.3, el sistema ATS tiene como principal función la de gestionar el tráfico ferroviario de acuerdo con los criterios de regulación específicos establecidos por un operador. En el caso de la Línea 12, la funcionalidad del ATS se

obtiene mediante el sistema Urbalis 400 a través del Sistema de Mando Centralizado. A su vez, el SMC hace uso de los datos proporcionados por los sistemas SCADA 1500 V_{CC} y SCADA SEAT 23 KV para llevar a cabo la supervisión y gestión de tráfico de los trenes sobre la línea. La forma en que estos dos sistemas coadyuvan al correcto cumplimiento de estas acciones es mediante la supervisión y monitoreo de la distribución de energía eléctrica a lo largo de toda la línea, desde la correcta alimentación de las SR desde la SEAT Estrella por medio del SCADA SEAT 23 KV hasta la alimentación de secciones de vía mediante el SCADA 1500 V_{CC}.

Haber puesto en servicio dos sistemas tan extensos y de tal importancia para el proyecto de la Línea 12 conllevó la necesidad de haber contado con dos ingenieros de pruebas ATS que trabajando en estrecha colaboración con el Líder ATS, instalamos y pusimos en marcha todo el equipo de hardware y software relacionado. Además, llevamos a cabo las pruebas correspondientes para verificar el correcto funcionamiento de los sistemas.

5.2.1. Misión del Ingeniero de Pruebas ATS - SCADA 1500 V_{CC}

La misión de un ingeniero de Pruebas ATS del sistema SCADA 1500 V_{CC} es la de contribuir con la instalación y verificación de correcto funcionamiento del hardware y software de dicho sistema en estaciones y en el Puesto Central de Línea (PCL) con el fin de que la puesta en servicio del sistema correspondiente se lleve a cabo cumpliendo con la fecha compromiso establecida por el cliente, en este caso el Sistema de Transporte Colectivo Metro del Distrito Federal.

Debido a que el equipo asociado al sistema ATS tiene varias interfaces, es imprescindible que el ingeniero de pruebas sea una persona multidisciplinaria ya que tiene bajo su responsabilidad un gran número de equipos electrónicos altamente especializados en adquisición de datos y supervisión SCADA así como de su software, por lo que además debe ser diestro en programación y manejo de sistemas computacionales. De la misma forma debe conocer los equipos involucrados en la transmisión de energía eléctrica, especialmente en las Subestaciones de Rectificación (SR), debido a su interacción con el Ingeniero de Pruebas ATS - SCADA 23 KV.

Además de lo ya mencionado, otras de las actividades que desempeñé como Ingeniero de Pruebas ATS - SCADA 1500 V_{CC} se pueden enlistar :

- Garantizar, una vez instalado, la óptima operación del hardware y software relacionado al SCADA 1500 V_{CC}.
- Asistir en las actividades del Líder ATS.
- Dar seguimiento a pendientes de instalación.
- Servir de interfaz entre problemas de sitio y de diseño del SMC - Tráfico.
- Servir de Interfaz entre problemas de sitio y de diseño del SMC - SCADA 1500 V_{CC}.

- Dar solución a problemas que surgan en las interfaces físicas en sitio.

Es importante destacar que más allá de sólo usar equipo de monitoreo y supervisión SCADA, la automatización integral de la Línea 12 implicó el uso de las Tecnologías de la Información expuestas en el capítulo 3.

5.2.2. Actividades realizadas

Como se mencionó en el Capítulo 3, un SCADA recolecta información de un sistema de manera remota, la transfiere a una central en donde se visualiza dicha información y se ejecutan diversos análisis para después realimentar acciones de control hacia el mismo sistema. Estas acciones están encaminadas para garantizar el correcto funcionamiento del sistema o bien para atender alguna emergencia. En la Línea 12 ocurre este proceso de monitoreo y supervisión continua sobre el sistema de tracción de trenes, llevándose a cabo a través del SCADA 1500 V_{CC}. Para ello fue necesario la instalación y la puesta en funcionamiento del equipo que en esta sección se describirá.

De la Figura 4.13 del Capítulo 4 se obtiene la Figura 5.2. En ella aparece el equipo SCADA que se encuentra en cada uno de los locales técnicos de las estaciones de la Línea 12 y cuyos nombres se pueden ver en la Tabla 5.1. También, de la Figura 4.13 se obtiene

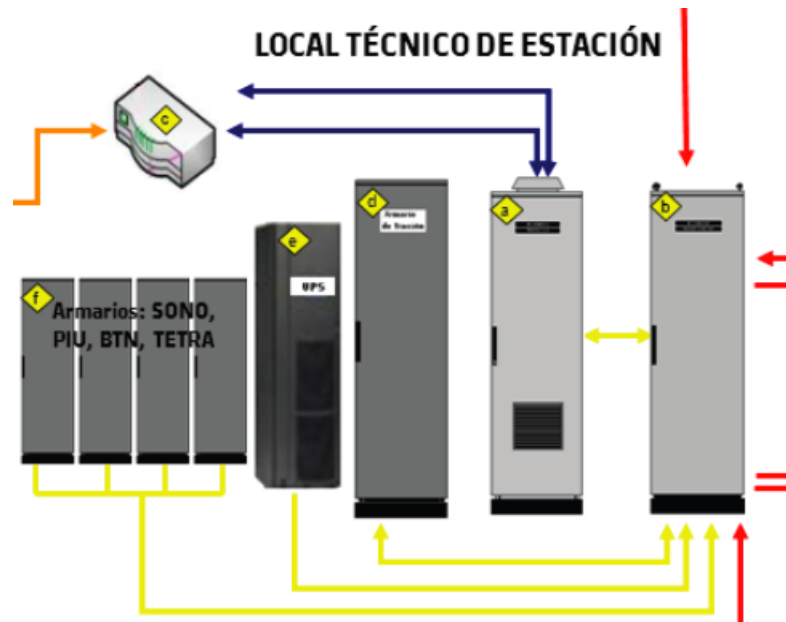


Figura 5.2: Equipo en el Local Técnico de Estación

la Figura 5.3 en donde se aprecia el equipo SCADA que se encuentra en el PCL y cuyos nombres pueden verse en la Tabla 5.1.

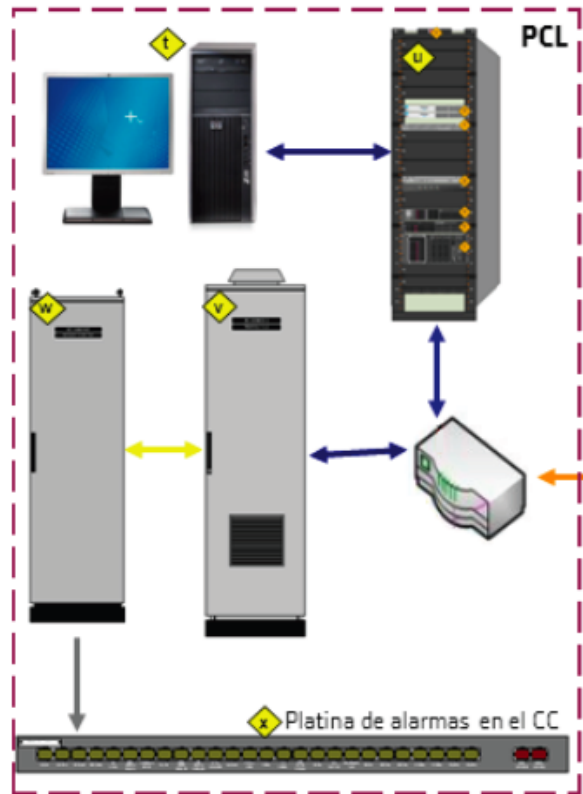


Figura 5.3: Equipo en el PCL

Las actividades realizadas como Ingeniero de Pruebas ATS en cuanto a la puesta en servicio del sistema SCADA 1500 V_{CC} fueron desarrolladas en gran medida en los locales técnicos y en el PCL e involucraron principalmente la instalación y puesta en funcionamiento de los PLC de tráfico de la línea, así como de sus interfaces con las Subestaciones de Alumbrado y Fuerza (SAF), la lógica de tracción, alarmas, indicadores, eventos, bucles de seguridad o ruptores, entre otros. También se trabajó en menor medida, pero no de menos importancia, en el PMT, los PML, los Sistemas de Alarmas de Estación de Taquillas (SAET), cabeceras de estación, estaciones terminales y estaciones e interestaciones, todas ellas también se aprecian en la Figura 4.13.

En las siguientes secciones haré una descripción del hardware y software necesario para la puesta en servicio del sistema SCADA 1500 V_{CC} para después explicar cómo es que fue interconectado y habilitado. Finalmente, mostraré los resultados de este trabajo profesional mediante la descripción de la HMI del sistema.

Componente de hardware	Etiqueta
Armario de tráfico	a
Armario repartidor	b
Switch red	c
Armario de lógica de tracción	d
Armarios UPS's	e
Estación de trabajo	t
Armario de servidores ATS	u
Armario de tráfico del PCL	v
Armario repartidor del PCL	w
Platina de alarmas	x

Tabla 5.1: Equipos en el Local Técnico de Estación y en el PCL

5.3. Descripción del equipo

Comenzaré por dar una breve descripción del equipo usado, tomando en cuenta que mi labor profesional la llevé a cabo principalmente en el Puesto Central de Línea y en los locales técnicos de estación instalando y configurando dicho equipo. Cabe señalar que se trata de dispositivos altamente especializados cuya descripción detallada se puede consultar en [18]. Además, también se omite la descripción de equipo auxiliar tales como escritorios, computadoras, monitores e impresoras que el personal de Alstom utilizaba diariamente para llevar a cabo sus labores.

5.3.1. Armarios de servidores/tráfico/tracción

Los armarios marca Himel ubicados en el PCL y en los locales técnicos de estación son usados para albergar tanto el equipo de Urbalis como el equipo de monitoreo del SCADA 1500 V_{CC}. Uno de ellos se pueden apreciar en la Figura 5.4. Están conformados por una estructura modular de perfil triangular cerrado de acero galvanizado con el cuadro superior e inferior soldado y montantes atornillados extraíbles. El fondo y las laterales están formados por paneles metálicos de 1.5 mm de espesor y puertas de 2 mm reforzadas. Las partes que componen el armario son:

1. Cáncamos de elevación
2. Bisagra de acero
3. Cierre interior de maneta
4. Cierre estándar de manecilla

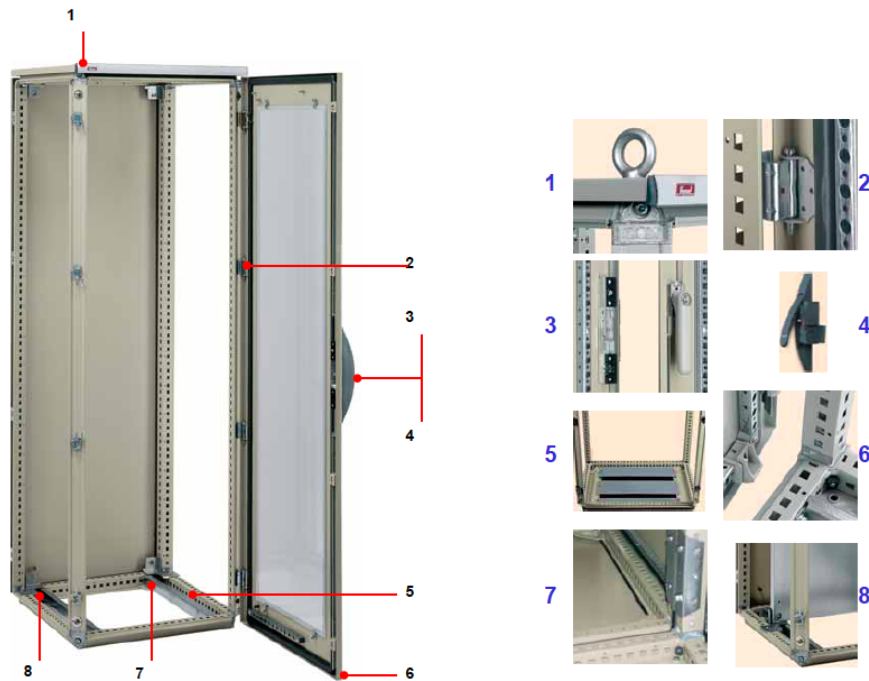


Figura 5.4: Partes que integran el armario

5. Tapas para entrada de cables
6. Patín de autocentrado para puerta
7. Sistema de unión para más armarios
8. Desplazamiento para la placa de montaje mediante guía desplazable

Los armarios están especialmente diseñados para montar dispositivos electrónicos en sus paneles y cuentan con guías para cable que, al usarlas permiten el acomodo del equipo de una manera limpia y ordenada.

5.3.2. Servidores ATS/SCADA

En el PCL hay dos servidores ATS/SCADA marca HP que recolectan la información de otros servidores llamados FEP - PLC que sirven para retransmitir el estado de los equipos SCADA además de controlarlos de forma remota. Los servidores ATS/SCADA trabajan de manera paralela por lo que no importa si una IHM está conectada a uno o a otro, el servicio está asegurado redundantemente. En la Figura 5.5 se pueden ver los diversos elementos de esta interfaz mientras que en la Tabla 5.2 se pueden ver los elementos que la componen.

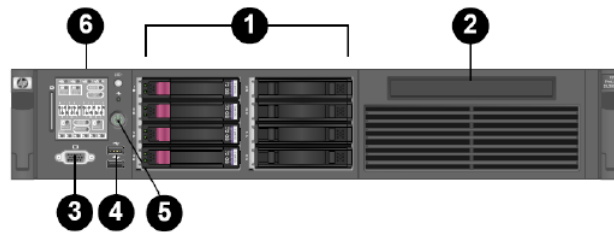


Figura 5.5: r ATS/SCADA

Los discos duros que se instalan en estos servidores se configuran de tal manera que se asegura la tolerancia al fallo de uno de ellos sin pérdida de disponibilidad.

Elemento	Descripción
1	Bahías de discos duros
2	Unidad DVD - ROM/CD - RW
3	Conector VGA
4	Conectores USB
5	Encendido - Apagado
6	LED's de estado del servidor

Tabla 5.2: Funcionalidades de Hardware del Servidor ATS/SCADA

5.3.3. Servidores FEP - PLC

Por cada sector de Línea 12 hay dos servidores FEP - PLC que proporcionan redundancia a los servicios de tracción, alarmas de estación y Subestaciones de Rectificación. Los FEP - PLC hacen que la información que se les muestra a los operadores sea continua y sin interrupciones en caso de una falla en dichos servicios. En la Figura 5.6 se pueden ver los diversos elementos de esta interfaz mientras que la Tabla 5.3 indica sus nombres.



Figura 5.6: Servidor FEP

Elemento	Descripción
1	LED's de estado del servidor
2	Botón de encendido - apagado
3	Unidad DVD - ROM/CD - RW
4	Dos discos duros SFF 160 GB
5	Dos puertos USB

Tabla 5.3: Funcionalidades de Hardware del Servidor FEP

5.3.4. Servidores de Base de Datos (BD) histórica

En el PCL hay dos servidores de Base de Datos histórica marca HP, uno primario y otro secundario que proporciona redundancia a la información contenida en los FEP y Servidores ATS/SCADA, por lo que permiten reproducir cualquier evento en la línea. En la Figura 5.7 se muestra un servidor de este tipo y en la Tabla 5.4 se enlistan los elementos que lo componen.

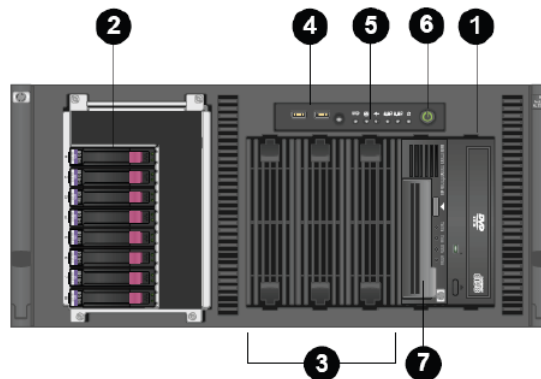


Figura 5.7: Servidor de BD histórico

5.3.5. Conmutador/Ruteador Ethernet

En el PCL hay dos conmutadores/ruteadores Ethernet marca HP que se utilizan para conectar el equipo a la LAN SMC y ésta a la red troncal (BTN) de la Línea 12. Es un conmutador que permite:

- El enrutamiento automático a las VLAN¹ conectadas
- Contar con hasta 16 rutas estáticas.

¹Red de área local virtual

Elemento	Descripción
1	Unidad DVD-ROM/CD-RW
2	Ocho bahías SFF 146 GB
3	Bahías de medios removibles libres
4	Dos puertos USB
5	LED's de estado del servidor
6	Botón encendido - apagado
5	Unidad de cinta ULTRIUM 920 de 800 GB

Tabla 5.4: Funcionalidades de Hardware del Servidor de BD

En la Figura 5.8 se muestra un conmutador de este tipo.



Figura 5.8: Conmutador/Ruteador Ethernet

5.3.6. Reloj GPS

El Reloj GPS que se muestra en la Figura 5.9 es de la marca Spectracom NetClock y proporciona temporización mundial exacta. Hay uno de ellos en el PCL y cuenta con soporte para servidores, directorio de empresa para la autenticación de usuarios, inicios de sesión internos y externos y monitoreo de errores de mensaje. Este reloj puede rastrear hasta 12 satélites GPS de modo simultáneo lo cual proporciona tiempos precisos al sincronizarse con los relojes de dichos satélites.



Figura 5.9: Reloj GPS

5.3.7. Consola de sistema de servidores

Para controlar los servidores dentro del gabinete, todos los anaqueles incluyen una consola de sistema como la que se muestra en la Figura 5.10. Esta consola cuenta con un

teclado, una pantalla y un mouse. También se cuenta con una KVM (Keyboard, Video



Figura 5.10: Consola de sistema de servidores

and Monitor) que sirve de interfaz para interactuar con los servidores dentro del armario.

Para conocer el estado de los equipos anteriormente mencionados se cuenta con los siguientes puestos de trabajo.

- Puesto de trabajo de mantenimiento de hardware
- Puesto de trabajo de administración de red
- Laptop de diagnóstico de línea

Estos permiten visualizar dicho estado mediante un sinóptico gráfico.

5.3.8. PLC de tráfico/alarmas de estación

Un PLC de alarmas de taquilla marca Schneider modelo Modicon Quantum se ubica en el PCL. Contiene tarjetas de entrada y salida digital que interactúan con la platina de alarmas de taquilla ubicada también en el PCL y a su vez con el operador. Dentro de sus principales características se encuentran el contar con 1024 salidas/entradas, 256 entradas/salidas analógicas, alimentarse con 24 V_{CC} y comunicarse por medio de Modbus TCP redundante con los servidores ATS/SCADA.

Sus tarjetas de entrada digital pueden conectarse con los sensores de alarma de estación y el PLC es capaz de dar reconocimiento cuando se presiona un botón de asalto de taquilla en estación.



Figura 5.11: PLC de alarmas de estación

También hay PLC's de este tipo dentro de los armarios de tráfico en los locales técnicos de y se usan para detectar alarmas en estación y conectarse con los servidores en el PCL.

5.3.9. PLC de caja de explotación

Cada caja de explotación en los extremos de andén contiene un PLC de marca Schneider modelo TWIDO como el que se muestra en la Figura 5.12.



Figura 5.12: PLC de caja de explotación

A su vez, los indicadores de andén se conectan a la caja de explotación mediante un PLC de tráfico ubicado en el local técnico de estación.

Dentro de las características principales del PLC TWIDO están el contar con 24 entradas digitales a $24 V_{CC}$, 16 salidas a transistor a 1 A y $24 V_{CC}$, comunicarse mediante un puerto serie Modbus RS485 y ejecutar 1000 instrucciones por cada 1 ms.

5.3.10. Caja Frontera de Alarma (CFA)

Se instalaron cajas frontera de alarma cerca del equipo monitoreado en cada una de las estaciones. Cada CFA como la que se muestra en la Figura 5.13 cumple con los siguientes requisitos:

- Identifica el sistema de alarmas
- Está fabricada con un material con acabado y tratamiento anticorrosivo
- Contiene borneros de interfaz
- Incluye una cerradura con llave



Figura 5.13: Caja Frontera de Alarma

5.3.11. Platina de alarmas

La Platina de Alarmas se encuentra en el PCL y contiene botones para todas las estaciones de la Línea 12. La configuración de la platina cuenta con

- Un botón de prueba de lámparas
- Una sirena para alarma audible
- Un botón pulsador luminoso retenido para apagar la sirena (LED)
- Lámparas de LED de color rojo

Durante el desarrollo de mi labor profesional tuve que conocer a detalle el equipo que se ha descrito en esta sección. Para ello hice uso de los manuales y especificaciones técnicas proporcionados por los fabricantes de los mismos, teniendo especial atención en su conectividad con otros equipos y en su función dentro de todo el sistema SCADA 1500 V_{CC}. Cabe señalar que, al tratarse de varios fabricantes, es imprescindible que conociera Modbus y OPC para implementar su comunicación.

5.4. Aportaciones principales

Mi aportación principal como Ingeniero de Pruebas ATS dentro del proyecto de la Línea 12 fue la colaboración en el diseño de los sistemas informáticos y la correspondiente instalación del hardware y software relacionados. En conjunto (diseño + hardware + software) contribuyeron a la puesta en servicio del sistema SCADA 1500 V_{CC}. En esta sección explicaré los puntos más relevantes de mis aportaciones dentro del proyecto de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México.

5.4.1. Instalación de armarios y equipo

La totalidad del equipo SCADA que se ubica en estaciones es controlado y supervisado por los PLC de tráfico localizados en los locales técnicos, cumpliendo con las siguientes características

- En cada estación existen dos cajas de explotación que se comunican con los PLC de tráfico mediante el protocolo MODBUS RS-485.
- Hay una caja de explotación por andén y para el caso de terminales (Tlahuac y Mixcoac) se consideran diferentes arreglos respecto a necesidades de tráfico.
- En las cajas de explotación existe un PLC TWIDO que controla de forma remota los cofres indicadores de CUFS, PV o DBO.

Antes de que un PLC de tráfico llegue a ser instalado en sitio existe un riguroso procedimiento denominado FAT (*Fabric Acceptance Test*). Se trata de pruebas de aceptación en fábrica en las cuales los PLC son revisados desde su compra hasta que son montados en una *rack*. Al final son empacados y llevados a su respectiva estación o terminal.

Los armarios de tráfico se fijan al piso una vez que llegan a los locales técnicos de estación y junto de ellos se instalan armarios repartidores que sirven de interfaz con los equipos de sitio y con los armarios de lógica de tracción, tal y como se muestra en la Figura 5.2 de la Sección 5.2.2.

En el caso del PCL, los armarios y equipo se instalan como se muestra en la Figura 5.14 y cuyos componentes se indican por letras dentro de rombos amarillos, pudiéndolos distinguir mediante la Tabla 5.5.

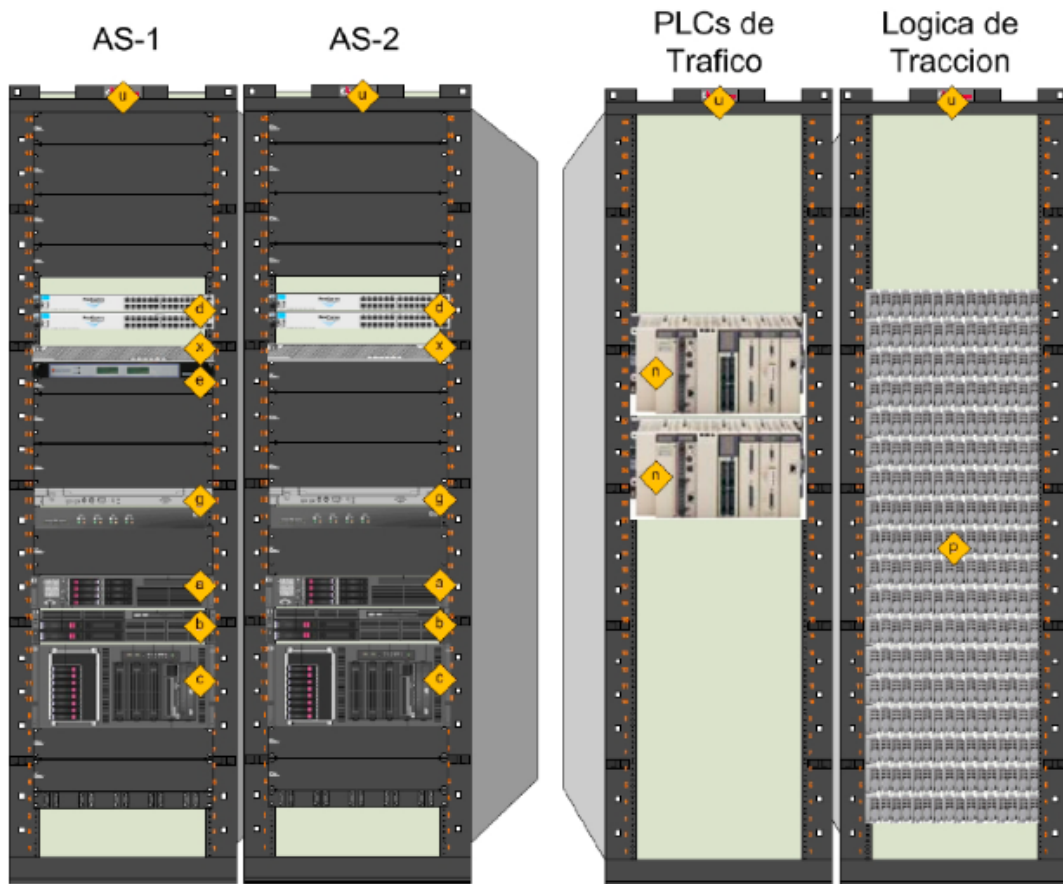


Figura 5.14: Armarios instalados en el PCL

Es en el PCL en donde se ubican los armarios de servidores AS-1 y AS-2. Desde ahí se comparte la información entre los equipos SCADA y Urbalis 400 mediante la red DCS redundante del Sistema de Mando Centralizado.

5.4.2. Conexión de interfaces

Una vez que en el local técnico de estación se terminó la conexión entre el armario de tráfico y su correspondiente armario repartidor y éstas fueron verificadas, se procede a hacer la conexión de sus interfaces.

Un solo armario repartidor tiene las siguientes interfaces:

- Alarmas de estación
 - Alarmas contra incendio
 - Alarmas de próxima salida

Componente de Hardware	Cantidad	Etiqueta
Servidor ATS/SCADA	2	a
Servidor FEP - PLC	2	b
Servidor de BD histórica	2	c
Conmutador/Ruteador Ethernet	4	d
Reloj GPS	1	e
Interruptor KVM	2	g
PLC de alarmas de estación	2	n
Armario de lógica de tracción	1	p
Armario para la instalación de servidores	2	u
BTN redundante del SMC	1	q
Firewall	2	x

Tabla 5.5: Elementos instalados en los armarios del PCL

- Averías en elevador
- Averías en escalera
- Asalto en taquilla
- Control de acceso a locales técnicos y SR
- Conmutación entre SAF 1 y SAF 2 para conocer cual es la que alimenta la estación
- Avería de aire acondicionado en local técnico
- Indicadores de estación
 - DBO's
 - PV
 - CUFS
- Lógica de tracción
 - Mando
 - Apertura y cierre de IAT's
 - Prueba de corte de urgencia
 - Apertura y cierre de DV's de forma individual o en conjunto, dependiendo de la zona
 - Control
 - Apertura de RMFS

- Cierre de RMFS
- Apertura de RM
- Bucle de seguridad abierto (CU)
- Apertura de IAT's
- Cierre de IAT's
- Falla a tierra
- Detección de corto circuito
- Plexiglas² retirado
- Mando local

Es importante hacer notar que el armario repartidor sirve para dar orden y estructura al cableado de los equipos. Es por ello que todos los cables de entrada de los dispositivos de campo van conectados a ellos para después “repartir” los cables de salida hacia los armarios de tráfico y de lógica de tracción respectivamente.

5.4.3. Instalación de software

El software usado para la implementación de los sistemas automáticos de la Línea 12 es muy extenso. En esta sección daré una breve descripción de aquellos que se instalaron en los sistemas Urbalis 400 y SCADA.

ICONIS ATS Urbalis

El software para el Sistema de Mando Centralizado que Alstom proporcionó para el control central de la Línea 12 se llama ICONIS ATS Urbalis. Esta plataforma está diseñada para instalarse y ser usada por el SMC con la ventaja de que se puede personalizar de acuerdo a las necesidades específicas de los contratos de obras acordados con el Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México. Dicha personalización se apoya en la parametrización y el desarrollo de componentes adicionales.

El ICONIS ATS se apoya en hardware de PC comercialmente disponible y en el sistema operativo Windows 2008. Además utiliza equipo y productos externos, tanto como sea posible con el fin de reducir esfuerzos de desarrollo y mantenimiento. Entre esos equipos y productos externos se encuentran:

- Bibliotecas Microsoft ATL y MFC de Visual Studio.
- Equipo de herramientas FactorySoft OPC de Axeda. Se utiliza para desarrollar servidores OPC.

²Acrílico de protección para el personal de mantenimiento el cual, al ser retirado abre la zona para evitar un accidente en caso de alguna mala manipulación.

- Microsoft Visual Studio .NET que se utiliza para desarrollar el simulador de tráfico, y los clientes de calidad de servicio QOS y TAB-OTM.
- Herramientas de desarrollo Northern Dynamics SLIK-DA OPC utilizadas para el simulador de tráfico
- Visualizaciones ILOG de tiempo de ejecución utilizadas para componentes Tabular Display (TAB)
- NTP Server
- Microsoft SQL Server 2008 que es el gestor de base de datos para el SMC utilizado por SCADA 2000, la BD histórica y por los componentes ICONIS
- Crystal Reports que es una herramienta de generación de reportes. Contiene dos partes distintas: el motor de tiempo de ejecución y el editor. Es utilizado para reportes SCADA 2000 y de calidad de servicio.

SCADA 2000

Además del equipo anterior, ICONIS se apoya fuertemente en SCADA 2000 quien es el cimiento del producto. En especial proporciona el marco de trabajo de los servidores de tiempo de ejecución además de:

- Infraestructura SCADA 2000, parte del servidor de aplicación
- Client Builder SCADA 2000, parte de la interfaz del usuario HMI
- Explorador de configuración SCADA 2000, herramienta de preparación de datos
- Base de datos SCADA 2000

Para el tratamiento del software descrito a nivel de puesta en marcha del sistema, fue necesario que dentro de mis conocimientos se encontraran paqueterías tales como, SQL Server, Visual Basic o Visual C. Estas requirieron el conocimiento de programación estructurada, manejo de base de datos o bien procesamiento distribuido cliente/servidor.

5.4.4. Diseño de arquitectura

De manera general, la arquitectura del sistema SCADA 1500 V_{CC} se muestra en la Figura 4.12. Ésta forma parte del SMC, es decir; está embebida en él. Por otro lado, en el esquema de la Figura 5.15 se muestra más detalladamente dicha arquitectura pero esta vez mostrando los equipos de campo, los equipos en las SR y el tipo de conexión que existe entre ellos y el PCL.

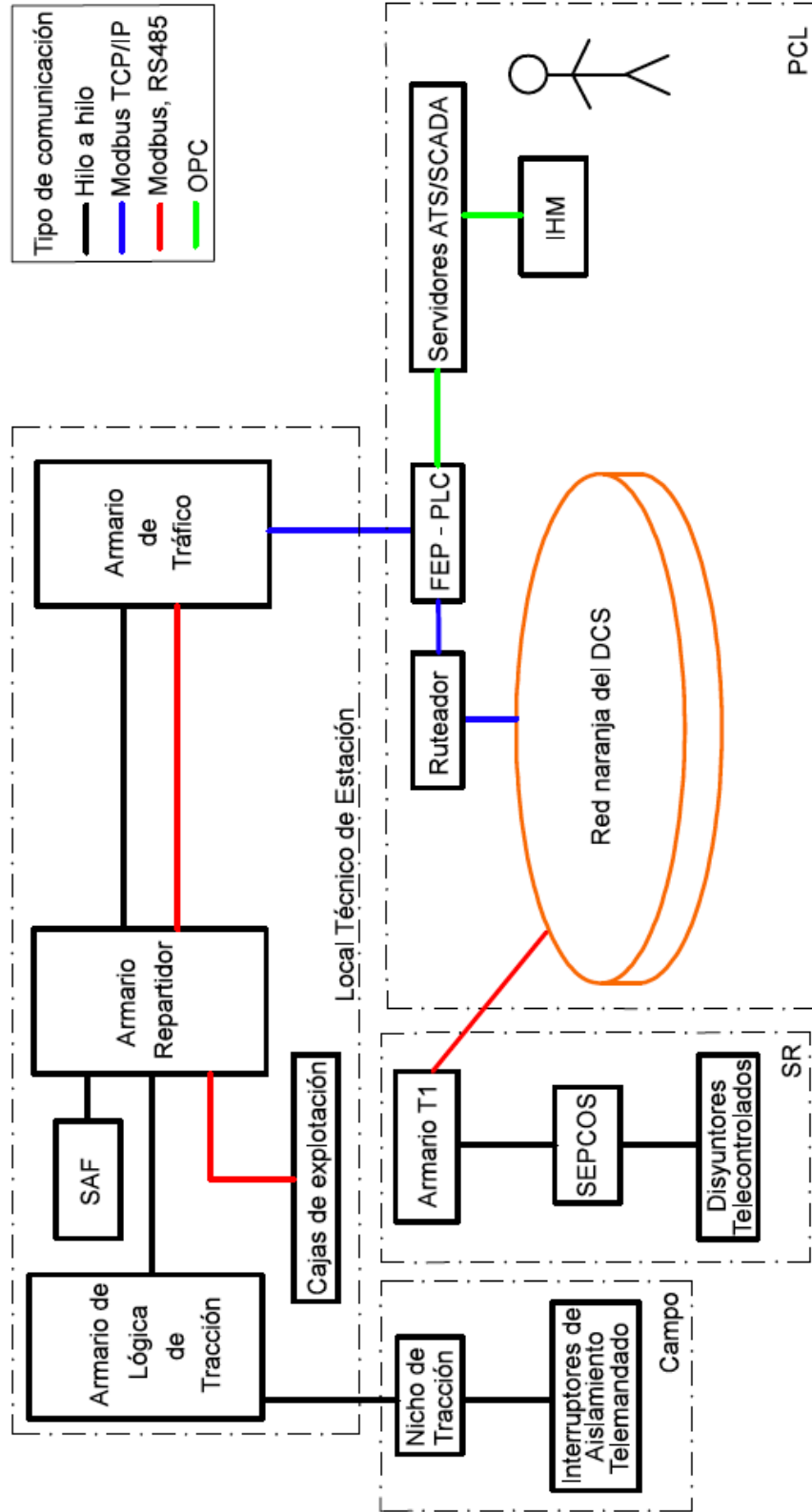


Figura 5.15: Diseño del sistema SCADA

Se distinguen dos procesos bidireccionales en el esquema: uno que acciona los Interruptores de Aislamiento Telemandado (IAT's) y otro que hace lo propio con los Disyuntores de Vía (DV's). A continuación se explican brevemente estos procesos.

- Los IAT dividen por zonas toda la vía de la Línea 12 como se especifica en la Figura 4.5 y son los dispositivos que conforman la lógica de tracción. Por “lógica de tracción” se entiende el conjunto de zonas de la línea que serán energizadas. Para que esto suceda, se sigue el siguiente proceso:
 1. Los IAT's actúan respecto a las ordenes provenientes del Nicho de Tracción.
 2. En el Nicho de Tracción se realiza la interconexión entre los IAT y el Armario de Lógica de Tracción.
 3. En el Armario de Lógica de Tracción se recupera información de campo y la envía al armario repartidor. También envía al Nicho de Tracción las órdenes provenientes del operador de la línea.
 4. El Armario Repartidor sirve de interconexión y frontera para el Armario de Tráfico.
 5. El Armario de Tráfico sirve de enlace entre el FEP - PLC y los equipos de campo para su administración de forma remota desde el Puesto Central de Línea.
 6. El FEP - PLC sirve para recompilar información de los PLC de tráfico y traducirla a un idioma común OPC.
 7. Los Servidores ATS/SCADA toman la información y la procesan para luego enviarla a la HMI o bien regresarla a los FEP - PLC en forma de comando para controlar los equipos de campo.
 8. Finalmente, en la HMI se muestra la información de las acciones solicitadas por el operador y el estado de los equipos de campo.
- Para los DV:
 1. Los DV actúan respecto a la orden del relevador de control y protección SEP-COS.
 2. El SEPCOS verifica las condiciones de los DV utilizando su microprocesador y autoriza su cierre o apertura.
 3. Existe un Armario T1 por cada SR que sirve de interconexión y frontera entre los equipos de ésta y los ubicados en el PCL mediante la red naranja del DCS.
 4. La red naranja del DCS es la encargada de transportar toda la información referente al tráfico de la línea, mediante ella llegan los datos de los estados de los equipos al PCL y sean distribuidos correctamente mediante el ruteador.

5. El ruteador almacena los paquetes de datos recibidos y procesa la información de origen y destino por el camino o ruta más adecuada en cada momento.
6. El FEP - PLC sirve para recompilar la información proveniente del router y traducirla a un idioma común OPC.
7. Los Servidores ATS/SCADA toman la información del FEP - PLC y la procesan para luego enviarla a la IHM o bien regresarla en forma de comando para controlar los equipos de las SR.
8. Nuevamente, en la HMI se muestra la información de las acciones solicitadas por el operador y el estado de los equipos en las SR.

Tanto para los IAT como para los DV, ambos procesos se repiten cada vez que el operador lo solicite pero la supervisión que implica se realiza de manera continua.

5.5. Resultados

El resultado principal de mi trabajo profesional dentro del proyecto de la Línea 12 fue que el sistema SCADA 1500 V_{CC} fuera puesto en servicio y que las secciones de vía fueran energizadas de manera adecuada, tomando en cuenta los requerimientos del operador. Lo más sobresaliente de ello fue la implementación de las HMI principal y secundarias del sistema logrando una arquitectura Cliente HMI - Servidores redundantes de aplicación mediante OPC.

5.5.1. IHM del SCADA 1500 V_{CC}

El sistema SCADA 1500 V_{CC} no contaba con alguna interfaz que controlase la lógica de tracción de trenes. Por esa razón, apoyando al líder ATS, se desarrolló dicha interfaz con el fin de que los equipos fueran controlados desde un puesto de trabajo con HMI, siendo este trabajo mi aportación más sobresaliente dentro del proyecto. Además, realizamos las pruebas correspondientes sobre la línea para comprobar su funcionamiento.

En la HMI del SCADA 1500 V_{CC} se visualizan las zonas y los sectores de la Línea 12 y la manera en como están energizados. Esto se observa en la Figura 5.18 en donde se encuentra la HMI principal del sistema y que funge como sinóptico de tracción de la Línea 12. Dicha interfaz utiliza el etiquetado de estaciones de acuerdo a los códigos presentados en la Tabla 4.1.

Si al igual que para el SCADA SEAT 23 KV se hace un acercamiento a donde se encuentran las estaciones Nopalera y Olivos, se observa una situación muy parecida a la de la Figura 4.16 del capítulo anterior, sólo que para este caso no se muestran detalles de las SR (más que si se encuentran en configuración T o π) sino del estado de las secciones de vía a las cuales se les alimenta de energía. Se tiene que en color amarillo se indican las secciones de vía energizadas y en color rojo las no energizadas, al igual que los estados de los RM

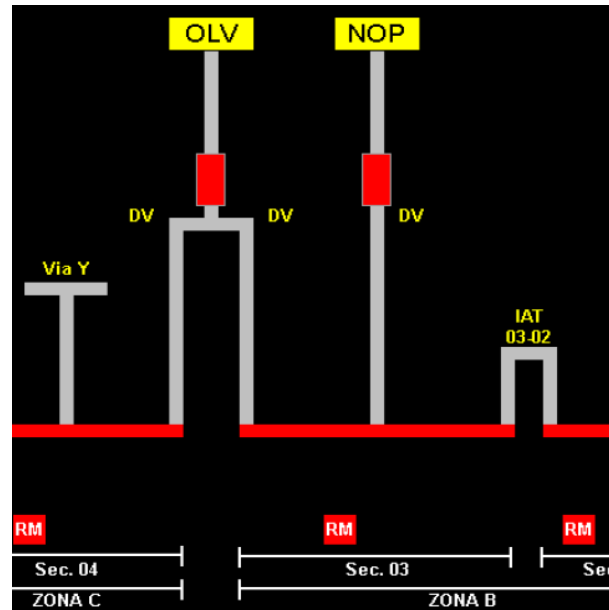


Figura 5.16: Acercamiento: Nopalera - Olivos

(rectángulos horizontales en rojo) y de los DMT (rectángulos verticales en rojo). Éstos últimos proporcionados por el SCADA SEAT 23 KV.

Al navegar por las pantallas de tracción dentro de la HMI principal, se observan algunas de las HMI secundarias como las de la Figura 5.17. En ellas se aprecia a detalle el estado de los DV, contando además con controles tales como “Consignar DV” con los que se les envía una señal a dichos DV para que cambien su estado.

Es por medio de estas HMI que se cumplen los objetivos de monitoreo y supervisión del SCADA 1500 V_{CC} presentados en la Sección 4.9.1, más específicamente a los que involucran los estados de los DMT's, DV's, IAT's, RM's e ITP's.

Apoyándose en todas estas HMI, el operador del sistema puede tomar decisiones en caso de ocurrir algún corte de energía en vías, la presentación de una alarma en las estaciones o el fallo de algún equipo de comunicación y control. Finalmente son las representaciones visuales y simplificadas de los sistemas automáticos de la Línea 12 del Metro.

5.5.2. Tablero de Control Óptico (TCO)

Para lograr un mayor nivel de supervisión sobre todos los sistemas automáticos de la Línea 12, instalamos un Tablero de Control Óptico en el PCL. En él se muestra la tracción, tráfico y señalización de la línea, desde la estación Tláhuac hasta la estación Mixcoac.

El TCO es un panel con cuatro pantallas de gran dimensión en donde se puede visualizar la siguiente información:

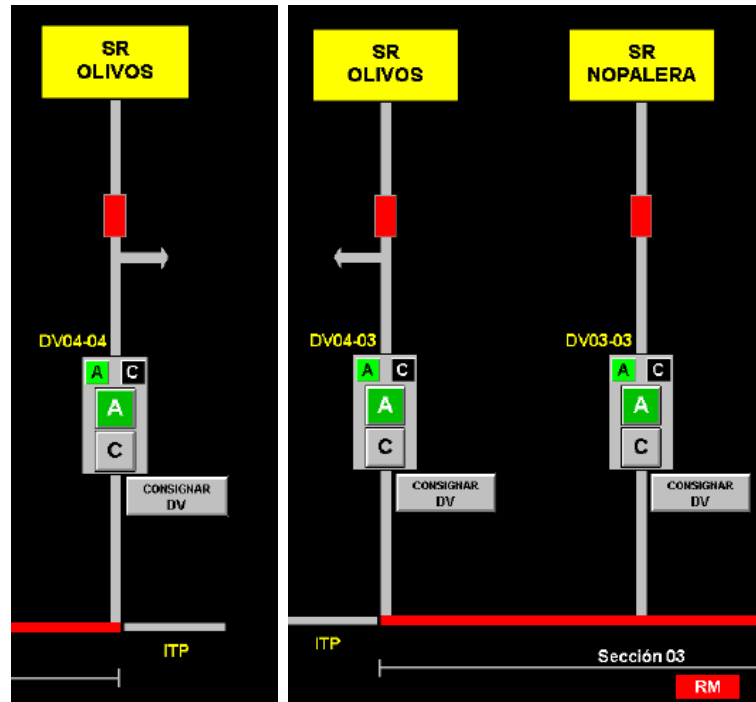


Figura 5.17: HMI secundarias

- Modos de conducción de trenes
- Hora de salida de cada terminal
- Información de señalización
- Información de tráfico
- Información de tracción

Dichas pantallas pueden verse en la Figuras 5.19 - 5.22.

5.6. Comentarios del capítulo

En este capítulo se mostró el trabajo profesional realizado en la empresa Alstom. Básicamente consistió en el diseño de los sistemas informáticos para la puesta en servicio del sistema SCADA 1500 V_{CC}, además de la posterior instalación y configuración del equipo relacionado con ellos. Gracias al este trabajo en conjunto con el de otros ingenieros de Alstom, los sistemas eléctricos permiten el desplazamiento de los trenes sobre las vías de la Línea 12 mediante el sistema SCADA antes mencionado.

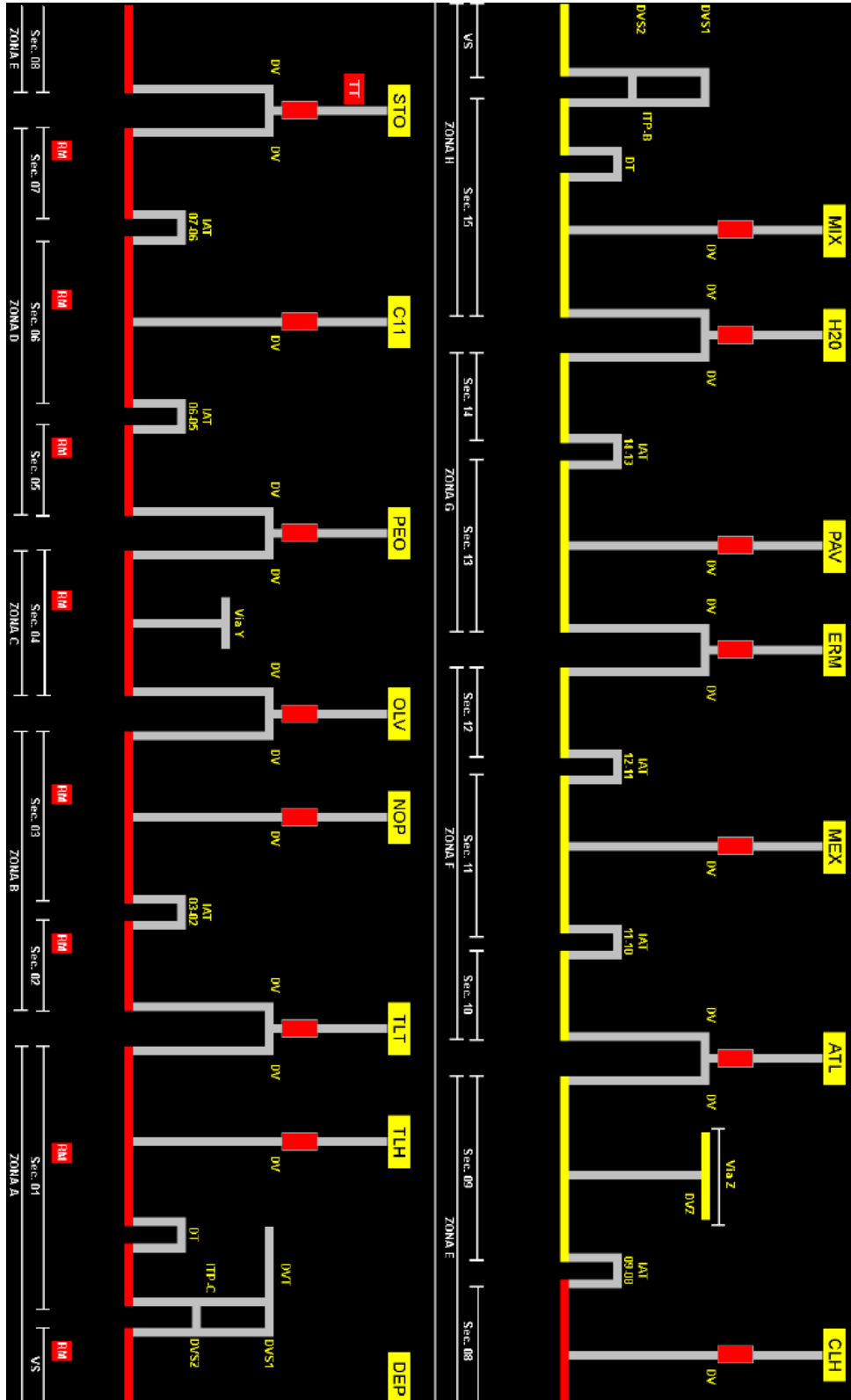


Figura 5.18: HMI principal del sistema SCADA 1500 Vcc

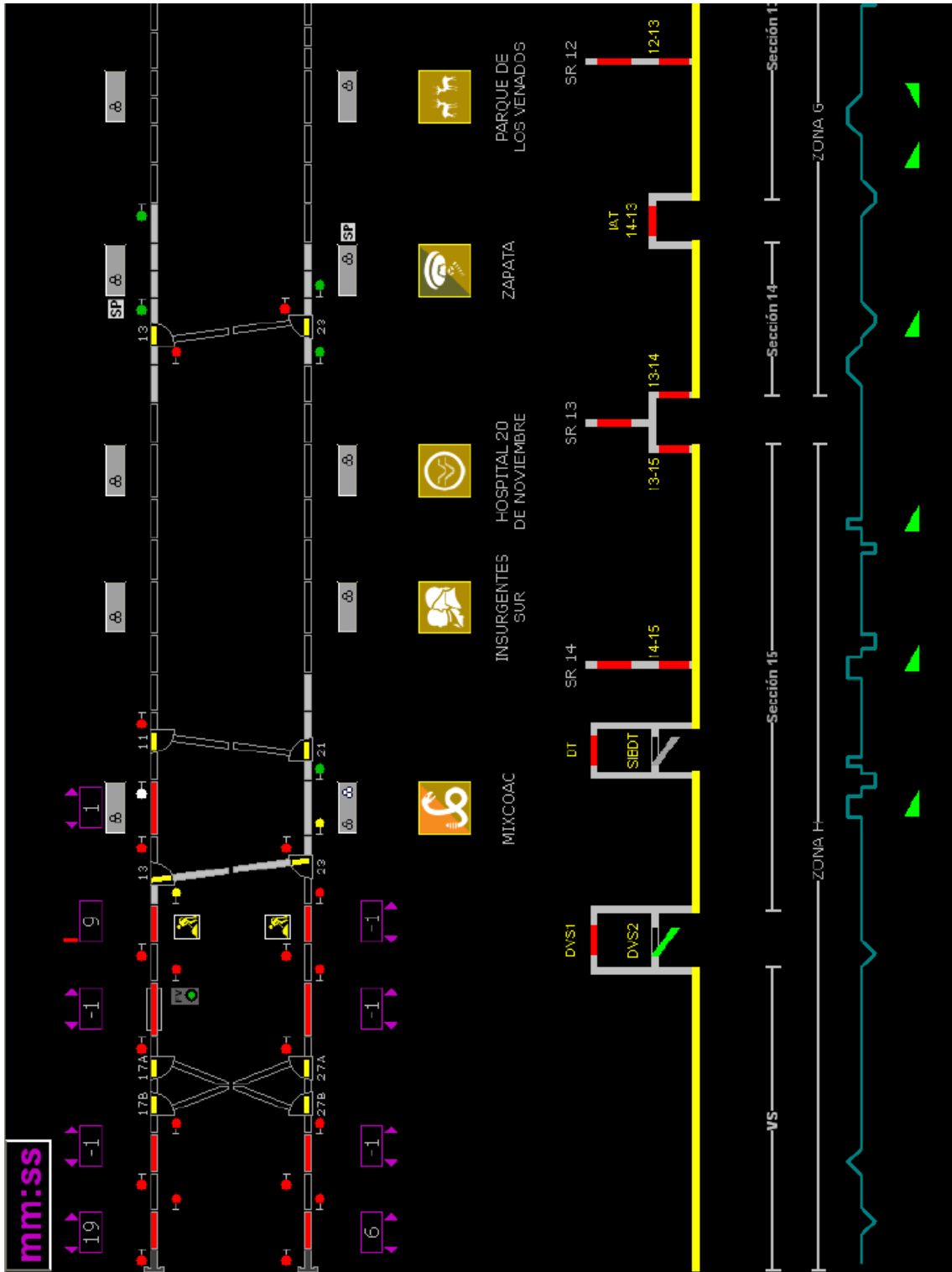


Figura 5.19: Pantalla 1 del TCO

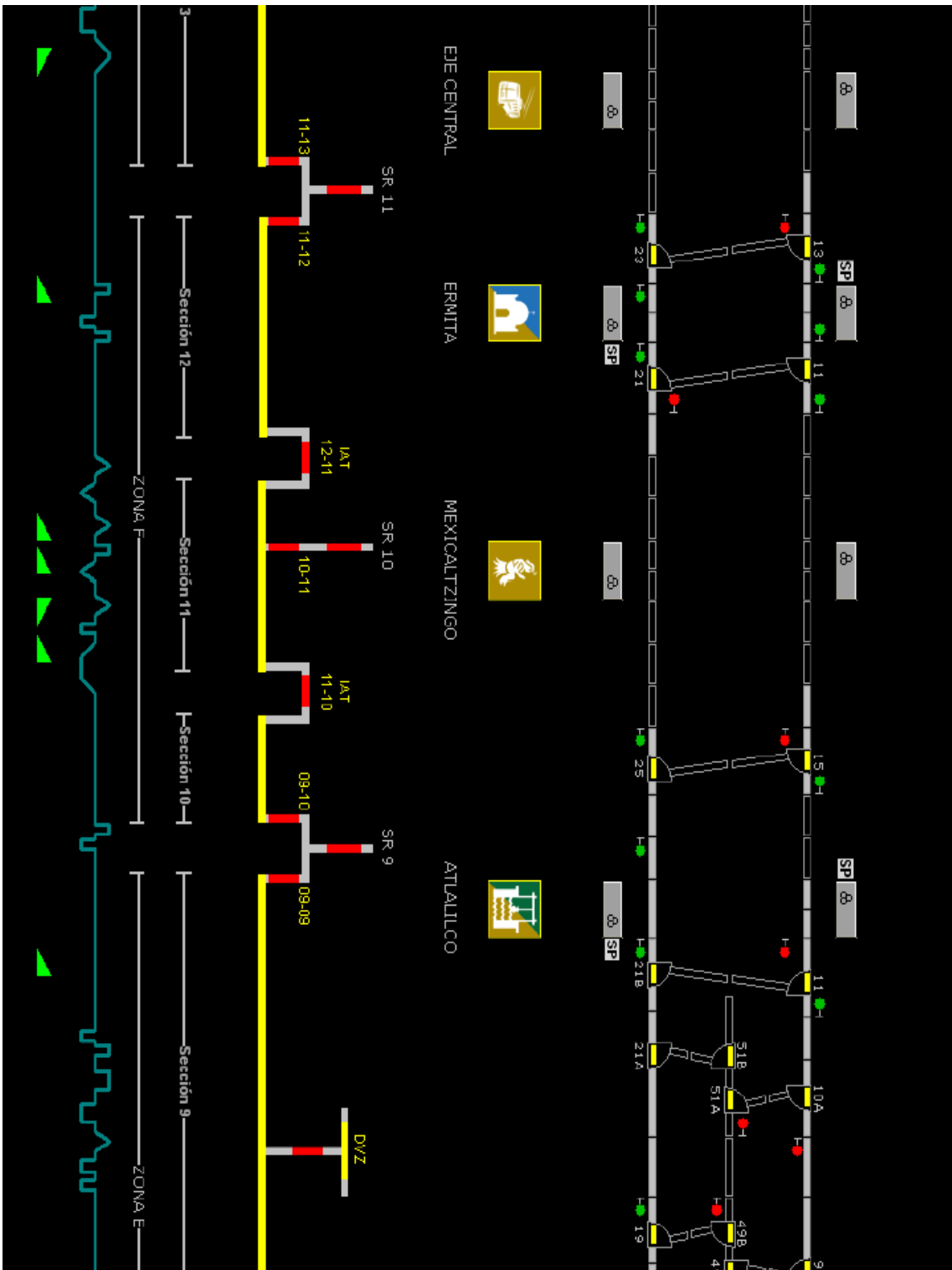


Figura 5.20: TCO: Pantalla 2 del TCO

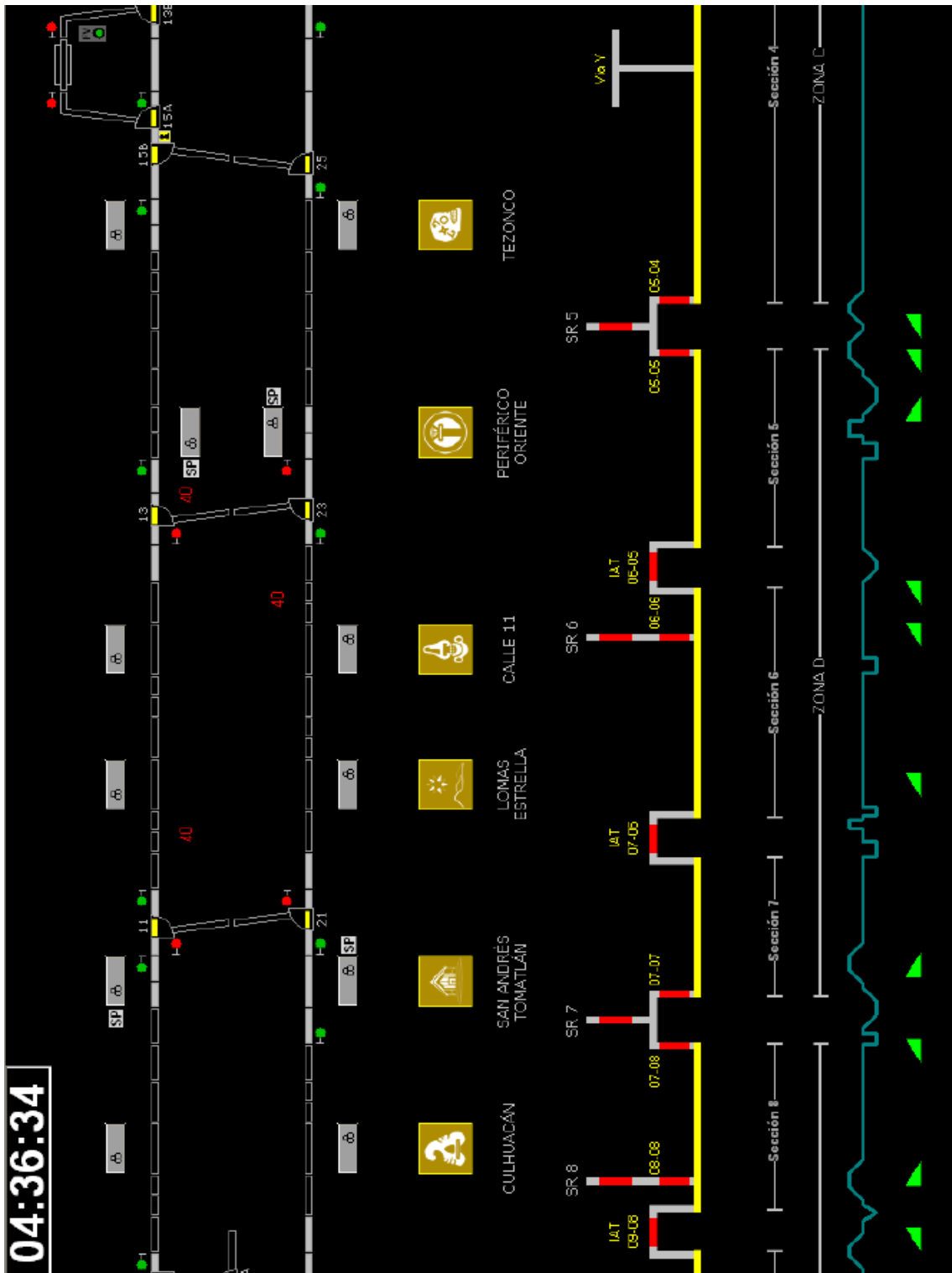


Figura 5.21: TCO: Pantalla 3 del TCO

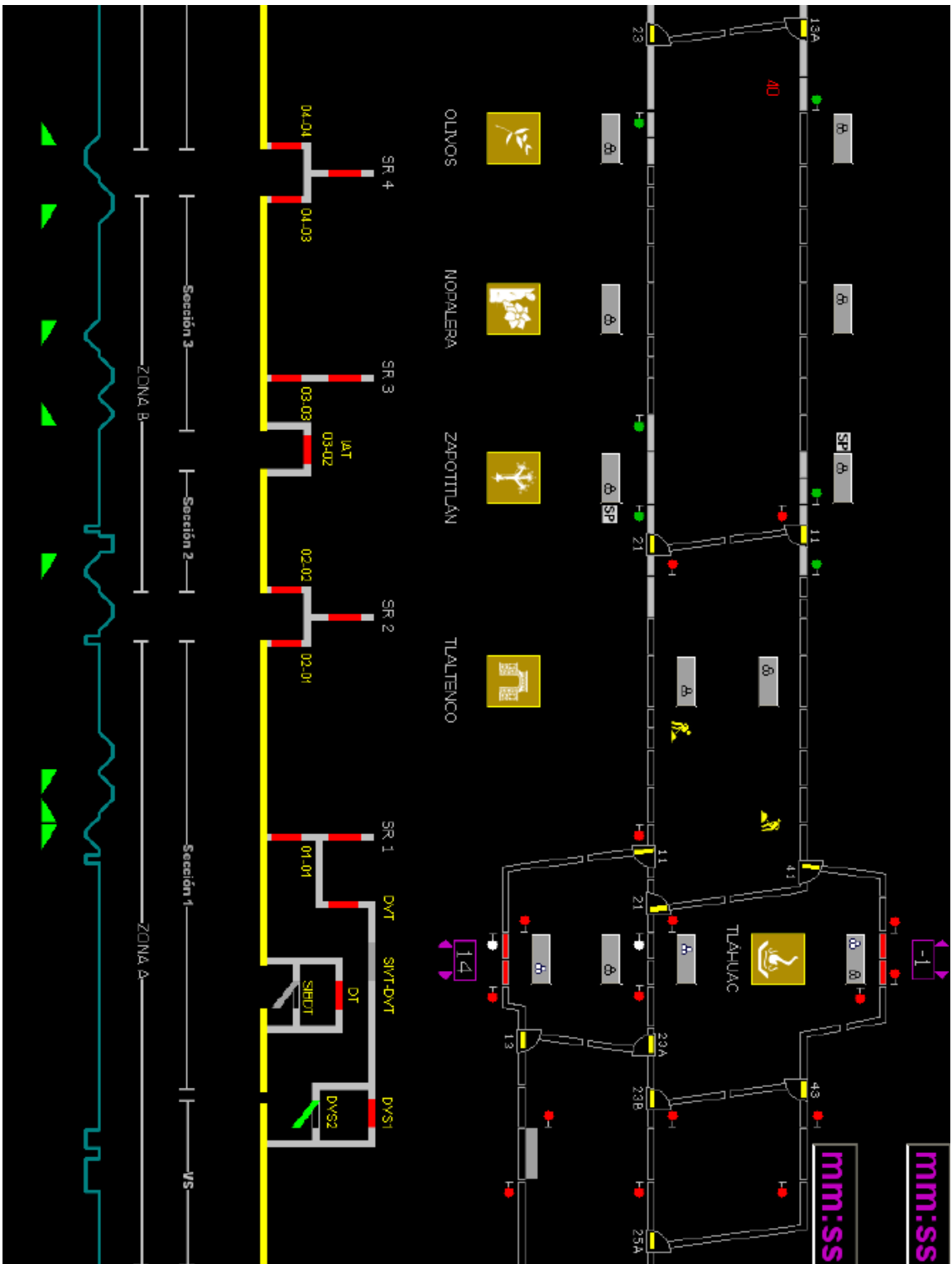


Figura 5.22: TCO: Pantalla 4 del TCO

Capítulo 6

Conclusiones

A lo largo de mis estudios profesionales en la carrera de Ingeniería Eléctrica Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM fueron adquiridos los conocimientos necesarios para desempeñar adecuadamente mi trabajo profesional en la empresa Alstom, tal y como se ha dado constancia en este informe. Cursar asignaturas del área de Ingeniería Aplicada tales como Automatización de Sistemas Eléctricos, Subestaciones Eléctricas o Instalaciones Eléctricas Industriales me dieron las bases para comprender los sistemas con los que estuve en contacto durante mi labor profesional. Pero además, asignaturas de las áreas de Ciencias de la Ingeniería y de Ciencias Básicas fueron fundamentales para desarrollar las habilidades de análisis y abstracción propias de un ingeniero. En definitiva, el cúmulo de estos conocimientos y habilidades fueron determinantes para desenvolverme adecuadamente en el proyecto de la Línea 12 de la Ciudad de México aplicando, de forma ética, profesional y multidisciplinaria, las ciencias de la ingeniería eléctrica y electrónica.

6.1. Comentarios finales

En cuanto al objetivo concreto de la labor profesional planteado en el capítulo 1 de este informe, puedo afirmar que se cumplió cabalmente ya que el sistema SCADA 1500 V_{CC} funciona correctamente, cumpliendo así con los criterios acordados con el Sistema de Transporte Colectivo Metro.

Los logros puntuales de mi trabajo profesional en Alstom incluyen:

- Haber colaborado en el diseño de los sistemas informáticos del sistema SCADA 1500 V_{CC} de la Línea 12.
- Haber instalado y configurado los equipos Urbalis y SCADA, a lo largo de la línea.
- Haber implementado la programación de las HMI del sistema.
- Haber realizado las pruebas del sistema sobre los equipos eléctricos de las Subestaciones de Rectificación y finalmente,

- Haber cumplido con la puesta en servicio final del sistema al momento de la inauguración de la Línea 12.

Estas labores conllevaron, además de la aplicación de conocimientos de ingeniería, el aprendizaje de otros nuevos que complementando a los primeros, serán sin duda la base de mi futuro desarrollo profesional.

6.2. Trabajo profesional actual

Actualmente me desempeño como **Ingeniero de Diseño del SMC Tráfico** para la extensión de la Línea 12 del Metro. Mis labores en este nuevo puesto incluyen:

- Servir de interfaz entre el personal de diseño en Alstom Francia y los requerimientos del STC, con el objetivo de que el producto final cumpla con lo establecido en los contratos.
- En sitio llevar a cabo las migraciones de software a nuevas versiones de los sistemas CBTC tales como el ATS, SMC Tráfico, DAM y SCADA.
- Realizar documentación acerca de la estructura, especificaciones técnicas y pruebas de los sistemas ATS con el objetivo de que sean implementados en la extensión de la línea.

En conclusión, los conocimientos adquiridos durante mis estudios en la Facultad de Ingeniería de la UNAM fueron indispensables para haber desarrollado y seguir desarrollando mi labor profesional en Alstom. Asignaturas tales como Automatización de Sistemas Eléctricos, Subestaciones Eléctricas, Protección de Sistemas Eléctricos o Microprocesadores y Microcontroladores, por mencionar sólo algunas me han proporcionado todo lo necesario para desenvolverme profesionalmente de forma exitosa. No sólo eso, el haber cursado asignaturas de ciencias básicas, ciencias de la ingeniería y ciencias sociales fue decisivo para que dicha labor fuera realizada de forma metódica, analítica y con el sentido humano que debe caracterizar a todo egresado de la Facultad de Ingeniería.

Bibliografía

- [1] Dirección General de Orientación y Servicios Educativos, UNAM. *Guía de carreras UNAM 2008-2009*. Ciudad Universitaria, México, D. F. 2008.
- [2] Meyer Lorenzo. De la estabilidad al cambio. *Historia General de México*. Colegio de México. México, 2000.
- [3] Alstom Communication. *Alstom in Mexico*. Alstom. Marzo, 2014.
- [4] Sistema de Transporte Colectivo. *Antecedentes del transporte en la Ciudad de México*. México, 2007.
- [5] Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2010.
- [6] Consejería Jurídica y de Servicios Legales del Distrito Federal. *Licitación Pública Internacional: Convocatoria No. 024*. Gaceta Oficial del Distrito Federal. Gobierno del Distrito Federal, 8 de octubre de 2007. Ciudad de México, México.
- [7] Bailey David, Wright Edwin. *Practical SCADA for Industry*. Elsevier. Gran Bretaña. 2003.
- [8] Kominek Darek. *OPC: ¿De qué se trata y cómo funciona?*. MatrikonOPC. Alberta, Canadá. 2009.
- [9] Villaronte Fernández - Villa J. Antonio. *Tecnología e ingeniería ferroviaria*. Publicaciones Delta. Madrid, España. 2012.

- [10] Bonnett Clifford F. *Practical Railway Engineering*. Imperial College Press. London. 2005.
- [11] Álvarez Mántaras Daniel, Luque Rodríguez Pablo. *Ferrocarriles: Ingeniería e infraestructura de los transportes*. Universidad de Oviedo. 2003.
- [12] González F. Javier, Fuentes Julio. *Ingeniería Ferroviaria*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, 2010.
- [13] Schmid F., Goodman C. Electrical Railway Systems in Common Use. *The IEE Residential Course on Electric Traction Systems*. The IEE Railway Professional Network. Manchester, United Kingdom. October, 2004.
- [14] Hartland David. Pantograph, Shoe gear and Conductor Rail Interfaces. *The IEE Second Residential Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems*. The IEE Railway Professional Network. England. May, 2005.
- [15] IEEE Rail Transit Vehicle Interface Standards Committee of the IEEE Vehicular Technology Society. *IEEE Standard for CBTC Performance and Functional Requirements* (IEEE 1474.1-1999). September, 1999.
- [16] Kindelán R. *Urbalis CBTC Solution*. Alstom Transport. 2012.
- [17] Herrera Reyes Roberto. *Compendio de datos técnicos y operativos de la Línea 12*. Sistema de Transporte Colectivo Metro. 2012.
- [18] Sobreira William. *Sistema de Mando Centralizado: Especificaciones particulares y expedientes de definición del sistema y subsistemas*. Alstom México. Junio, 2011.