

## TABLA DE CONTENIDO

<b>2.2.18.1</b>	<b>NORMATIVIDAD APLICABLE</b>	2.2.18.1.1	Normas	Internacionales	2
<b>2.2.18.2</b>	<b>REVISIÓN DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ</b>				7
<b>2.2.18.3</b>	<b>ASPECTOS RELEVANTES ASOCIADOS A LA PRIMERA LINEA DEL METRO DE BOGOTÁ</b>				14
2.2.18.3.1	Subestaciones Receptoras Alta Tensión (SER)				14
2.2.18.3.2	Subestaciones Tracción (SET)				14
2.2.18.3.3	Vías y Talleres				15
2.2.18.3.4	Distribución MT				15
<b>2.2.18.4</b>	<b>REVISIÓN DE EXPERIENCIAS INTERNACIONALES Y APLICACIÓN AL CASO DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ</b>				16
2.2.18.4.1	Alimentación AT/MT				16
2.2.18.4.2	Eficiencia Energética				16
2.2.18.4.3	Calidad de Energía				16
<b>2.2.18.5</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	2.2.18.5.1	Estudio	de	Prefactibilidad
					17
2.2.18.5.2	Aspectos Relevantes PLMB				18

### 2.2.18 ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA Y TRACCIÓN

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E2 - DEBIDA DILIGENCIA TÉCNICA – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0001 \_VF

<b>Disciplina:</b>	<b>Alimentación eléctrica y tracción</b>
<b>Entregable de referencia:</b>	<b>Entregable 14 / ET18 – Alimentación eléctrica y tracción</b>

## 2.2.18.1 NORMATIVIDAD APLICABLE

### 2.2.18.1.1 Normas Internacionales

NÚMERO	NOMBRE
En 50123	Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Aparata de corriente continua.
EN 50124	Aplicaciones ferroviarias. Coordinación de aislamiento.
EN 50125	Aplicaciones ferroviarias. Condiciones ambientales para el equipo.
EN 50126	Aplicaciones ferroviarias. Especificación y demostración de la seguridad de funcionamiento, fiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y seguridad (RAMS)
EN 50128	Aplicaciones ferroviarias. Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento. Software para sistemas de control y protección de ferrocarril.
EN 50149	Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Tracción eléctrica. Cables de contacto acanalado de cobre y de aleación de cobre.
EN 50151	Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Tracción eléctrica. Requisitos esenciales para aisladores compuestos.

EN 50152	Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Requisitos particulares para aparamenta de corriente alterna.
EN 50153	Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Medidas de protección relativas a riesgos eléctricos.
EN 50163	Aplicaciones ferroviarias. Tensiones de alimentación de las redes de tracción.
EN 50266	Métodos de ensayos comunes para cables eléctricos sometidos a fuego. Ensayo de propagación de la llama en cables colocados en capas en posición vertical. Categoría B.
EN 50265	Métodos de ensayos comunes para cables eléctricos sometidos a fuego. Ensayo de propagación de la llama para un conductor individual aislado o cable.
EN 50267	Métodos de ensayos comunes para cables eléctricos sometidos a fuego. Ensayo de gases emitidos durante la combustión de materiales procedentes de los cables.
EN 50268	Métodos de ensayos comunes para cables eléctricos sometidos a fuego. Medida de la densidad de los humos emitidos por cables en combustión bajo condiciones definidas.
EN 50327	Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Armonización de los valores asignados para grupos convertidores y ensayos sobre grupos convertidores.
EN 50328	Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Convertidores electrónicos de potencia para subestaciones.
EN 50329	Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Transformadores de tracción.

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E2 - DEBIDA DILIGENCIA TÉCNICA – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0001 \_VF

EN 50343	Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Reglas para la instalación del cableado.
EN 50345	Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Tracción eléctrica. Conjuntos de cables sintéticos aislantes para el apoyo de líneas aéreas de contacto.
EN 60811, CEI 811	Métodos de ensayos comunes para materiales de aislamiento y cubiertas de cables eléctricos.
IEC 44	Transformadores de medida.
IEC 56	Disyuntores de alta tensión en corriente alterna.
IEC 60	Ensayos en alta tensión.

IEC 71	Coordinación de aislamientos.
IEC 76	Transformadores de potencia.
IEC 185	Transformadores de corriente.
IEC 186	Transformadores de tensión.
IEC 228	Conductores de cables aislados.
CEI 229	Ensayo de cubiertas exteriores de cables.
IEC 265	Interruptores de Alta Tensión.

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E2 - DEBIDA DILIGENCIA TÉCNICA – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0001 \_VF

IEC 270	Medida de descargas parciales.
IEC 287	Cálculo de intensidades de corriente en los cables.
IEC 296	Aceites minerales para transformadores.
IEC 376	Especificaciones para la recepción del SF6.
CEI 949	Cálculo de las corrientes de cortocircuito admisibles.
CEI 60287	Cables eléctricos. Cálculo de la intensidad admisible.
IEC 60076	Power Transformers
IEC 60076-10 (2016)	Power Transformers - Part 10: Determination Of Sound Levels
IEC 60502-2 (2014)	Power Cables With Extruded Insulation And Their Accessories For Rated Voltages From 1 Kv (Um Equal 1,2 Kv) Up To 30 Kv (Um Equal 36 Kv)
IEC 61869	Instrument Transformers
IEC 62305	Protection Against Lightning
IEC 62497	Railway Applications – Insulation Coordination–
IEC 61128	Seccionadores para corriente alterna. Corrientes transferidas durante la maniobra del seccionador.
IEC 61129	Seccionadores de puesta a tierra para corriente alterna. Corrientes inducidas durante la maniobra del seccionador.

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E2 - DEBIDA DILIGENCIA TÉCNICA – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0001 \_VF

IEEE 80 - 2013	Guide for Safety in AC Substation Grounding
IEEE 519 - 2014	Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems
IEEE C37.2 - 2008	Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations
IEEE Std C37.20.2-2015	Standard for Metal-Clad Switchgear
IEEE C37.74	Standard Requirements for Subsurface, Vault, and Padmounted Load- Interrupter Switchgear and Fused Load-Interrupter
IEEE C37.122	Standard for High Voltage Gas-Insulated Substations Rated Above 52 kV.
NFPA 130	Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems.

#### 2.2.18.1.2 Normas Nacionales y Codensa:

NÚMERO	NOMBRE
NTC 2050	Código Eléctrico Colombiano
RETIE	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas
Resoluciones CREG: * Código Eléctrico Colombiano	* Resolución 025 de 1995 y sus actualizaciones * Resolución 070 de 1998 y sus actualizaciones

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E2 - DEBIDA DILIGENCIA TÉCNICA – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0001 \_VF

	Reglamento de Distribución Eléctrica
E-PCM-001	Especificación técnica: Protección Sobrecorriente Multifuncional
E-PCM-002	Especificación técnica: Protección para Bancos Condensadores de M.T
E-PCM-003	Especificación técnica: Protección Diferencial Transformador
E-PCM-004 E-PCM-005	Especificación técnica: Protección de Distancia
E-PCM-006	Especificación técnica: Protección Diferencial de Línea
E-PCM-007	Especificación técnica: Protección de Sobrecorriente Homopolar
GSTQ001	Global standard: Fixed installed indoor Power Quality Instrument
GSTQ002	Global standard: Extended Power Quality Data Interchange Formats
GSCH005	Metal-Oxide Polymer-Housed surge arresters without GAPS for A.C. systems for substations from 12KV to 245 KV
E-SE-003	Especificación técnica: Interruptor de media tensión
E-SE-005	Especificación técnica: Transformador de Instrumentación de Alta Tensión
E-SE-006	Especificación técnica: Seccionadores de media tensión
E-SE-007	Especificación técnica: Transformadores de instrumentación MT

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E2 - DEBIDA DILIGENCIA TÉCNICA – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0001 \_VF

E-SE-008	Especificación técnica: Celdas de Media Tensión
E-SE-012	Especificación técnica: Pararrayos de Óxido Metálico para Subestaciones de Potencia
GSH001	Global standard: HV Circuit-Breakers
GSH002	Global standard: Hybrid Modules
GSH 003	Global standard: HV Disconnectors and Earthing Switches With Rated Voltage From 72,5 kV To 245 kV
GST002	Global standard: Power Transformers
E-SE-013	Especificación técnica: Banco de Baterías y Cargador
E-PCM-008	Especificación técnica: Sistema digital para el sistema de automatización de subestaciones

### 2.2.18.2 REVISIÓN DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ

<b>Entregable de referencia:</b>	Producto 6 – Propuesta de integración de Sistemas infraestructura Metro ferroviarias Entregable 10 – Propuesta de integración de Sistemas infraestructura Metro ferroviarias / Informe de Sistemas y Operación
<b>Actividades desarrolladas en el marco del estudio de prefactibilidad:</b>	El estudio de prefactibilidad para el Sistema Alimentación Eléctrica se estructuró en tres ámbitos, los que corresponden a la descripción general, a los requisitos funcionales y a los requisitos técnicos. A continuación, se resumen el contenido de cada uno:

**1. Descripción general,**

- Se definen el nivel de suministro AT, nivel de distribución MT y el nivel de utilización de tracción y baja tensión.
- Se definen de modo general, la alimentación eléctrica para los niveles de suministro Alta Tensión (AT), conversión a Media Tensión (MT):
  - Interfaz con la red pública y el operador de red para la Subestaciones Receptoras (SER), lo propuesto es la conexión en AT a la red pública mediante 2 SER.
  - Los equipos de control, supervisión y medición de las SER
- Se describe la distribución MT de las Subestaciones de tracción (SET) y Centros de Transformación de Energía (CTE)
  - La distribución MT, considera 2 anillos 34,5 KV, uno de cada SER, con posibilidad de interconexión entre ellos.
- Se presenta la Distribución Tracción definida en 750 Vcc de Línea y Patio - Taller
  - Los estudios de detalles de los consumos, de acuerdo al Plan Operacional, permitirán determinar la cantidad y potencia de las SET.
  - Infraestructura de las SET (Interruptores, Grupo Transformador/rectificador, Cables, etc.)
  - Los equipos de control, supervisión y medición de las SET
- Se define la Distribución Baja Tensión (BT) de los CTE:
  - Anillos de alimentación de los CTE
  - Alimentación de servicios (fuerza y alumbrado)

**2. Requisitos Funcionales Fundamentales:**

- Suministro de energía en modo normal y degradado de sistema de transporte
  - Criterios de diseño definidos para la redundancia de sistemas y equipos que permitan asegurar funcionamiento, en principio similar a la PLMB, considerando la topología de las SER, los anillos MT, las SET y CTE.
  - Definición de las zonas eléctricas y seccionamientos tracción, para la definición de las zonas de maniobras de trenes.
  - Sistema de Tracción Patio Taller en cuanto al movimiento de trenes y de la independencia eléctrica de la línea principal.
- Se indica que todas las instalaciones conformadas por sistemas, equipamientos y componentes deben cumplir con las exigencias RAMS para el diseño, construcción y mantenimiento, recomendadas por las normas y reglamentos correspondientes.

### 3. Requisitos Técnicos

- Estimación de la Potencia Requerida para tracción, sistemas electromecánicos, iluminación, etc.
- Potencia de Tracción; modelación preliminar de la línea 2 (curvas, pendientes, interestaciones, etc), simulación de la operación de trenes (cantidad, número vagones, intervalo, etc.).
- Estimación de los requisitos de Potencia para BT, en estaciones subterráneas, en estaciones elevada media, pozos de ventilación y sector Taller. Sobrecarga estimadas en estaciones enterradas y pozos de ventilación, para la extracción de humo
- Validar los criterios e hipótesis de consumos para ser revisados en las próximas etapas del proyecto”.
- Propuesta de ubicación preliminar de las SER, verificación distancia a SEAT de la empresa pública, también verificar futuros crecimientos de la Línea u otros .

#### Distribución de potencia SER

Dos anillos MT para reparto homogéneo de potencia en las SER

Potencia Media:

SER 1 = 25809 kVA.

SER 2 = 25834 kVA.

#### Potencia Máxima

Tabla 14.21 potencia máxima

	Anillo 1	Anillo 2
<b>Tracción</b>	43.849 kVA	42.198 kVA
<b>Baja Tensión</b>	15.750 kVA	12.250 kVA
<b>Total</b>	<b>59.599 kVA</b>	<b>54.448 kVA</b>

	<p><b>Requisitos para la Integración con la PLMB T1</b></p> <p>Se plantea la posibilidad de integración de la red de media tensión 34,5 kV de la línea 2 con la de la línea 1, para aumentar la disponibilidad de la energía, permitir modos de suministro de energía de emergencia adicionales, y posiblemente permitir un ahorro de coste.</p> <p>Algunos parámetros de análisis:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Impacto sobre la red MT de la línea 1.</li> <li>- Distorsión armónica.</li> <li>- Caída de tensión máxima.</li> <li>- Potencia disponible en cada SER.</li> </ul>	
<p><b>Conclusiones del estudio de prefactibilidad:</b></p>	<p>Se definieron en el marco del estudio de prefactibilidad los lineamientos preliminares del sistema de alimentación eléctrica que según nuestra experiencia corresponden con los objetivos iniciales y con el dimensionamiento planteado. Sin embargo, se requerirá a lo largo de la consultoría precisar más en detalle estos criterios y parámetros, ajustándose entre otros a las necesidades del proyecto y optimizando los costos CAPEX y OPEX.</p> <p>Cabe también precisar que se seleccionó durante la etapa de prefactibilidad la opción de la alimentación eléctrica por tercer riel 750 V que se irá manteniendo como premisa de trabajo en la presente consultoría salvo opinión contraria.</p>	
Ítem	Aspectos relevantes	¿Cómo atenderlos en el marco de la asesoría técnica?
<p><b>Potencia de Baja Tensión pág. 56</b></p>	<p>Potencias medias de Estaciones y Talleres</p>	<p>Los valores indicados son demasiado altos en comparación a potencias medidas de redes existentes similares. Se debe realizar una revisión de las potencias y consumos, teniendo en cuenta que actualmente existen tecnologías afines con la eficiencia energética, tales como variadores de frecuencia en escaleras mecánicas y alumbrado led, que permiten reducir fuertemente los consumos de baja tensión.</p>

<p><b>Subestaciones Receptoras Alta Tensión</b></p>	<p>Se indica a priori la alimentación AT desde 2 subestaciones conectadas a la red de distribución de 115 KV de la ciudad.</p>	<p>¿como se respalda esta configuración desde el punto de vista de disponibilidad? Se deben estudiar en la fase 3, las alternativas de conexión, en base a definiciones de fiabilidad y disponibilidad. Como referencia, en la PLMB se definió una indisponibilidad anual de 315 segundos, la cual fue posible sólo con una redundancia n-2.</p>
<p><b>Interconexión Media Tensión con la PLMB</b></p>	<p>Se plantea estudiar una interconexión de emergencia, a nivel de media tensión, con la red de la PLMB</p>	<p>Parece una buena alternativa, que se debe profundizar en la asesoría, incluyéndose como una opción, en el estudio del punto anterior. Se deberán realizar los estudios de flujos de potencia y armónicos para respaldar su factibilidad técnica. Analizar Impacto en contratos de suministro.</p>
<p><b>Potencias Medias y Máximas de L2MB</b></p>	<p>Se definen valores para dimensionamiento de los Equipos</p>	<p>Aclarar que se refiere con potencias medias y potencias máximas. ¿La potencia media es la promedio diaria? o la de una hora? La potencia máxima es de 15 minutos? ¿O instantánea? Los transformadores de poder de las SER se dimensionan por la potencia de media diaria y de punta de 2 horas de mañana y tarde. Revisar en la asesoría. Atendiendo además a los escenarios actualizados de operación 2030 y 2050.</p>
<p><b>Potencia de Tracción</b></p>	<p>Se concluye una potencia de 31 MVA para los consumos de tracción, en base a simulación con trenes similares a los de PLMB, y 129 seg. de intervalo.</p>	<p>Los resultados se observan razonables para una carga máxima de 50000 pax/hora sentido, con trenes de 1800 pax. En la asesoría se contempla realizar la simulación para los escenarios de demanda ajustados y considerando el perfil de carga definido para cada interestación, y la estimación de potencia del patio taller</p>
<p><b>Alimentación Tracción</b></p>	<p>Se define tercer riel 750 V</p>	<p>De ser requerido, se podrá revisar la alternativa de catenaria rígida 1500V, en la fase 3</p>

Aspectos críticos por atender:	A corto plazo para el desarrollo de las actividades de ingeniería conceptual (Aval Técnico y Fiscal – Fase 2):	A mediano plazo para el desarrollo de las actividades de Estudios y Diseños para la Estructuración (Fase 3):
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Validar el tipo de alimentación eléctrica (tercer riel 750 V).</li> <li>- Validar de manera preliminar los equipamientos requeridos para el componente de alimentación eléctrica y tracción.</li> <li>- Validar de manera preliminar la estrategia de suministro de energía eléctrica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Insumos del proveedor de alimentación eléctrica para determinar los aspectos de conexión y de disponibilidad de energía eléctrica.</li> <li>- Plan de Operación Preliminar para las simulaciones de Tracción. Estas simulaciones serán la base para el dimensionamiento de las SET y el consumo de energía.</li> <li>- Consensuar Demandas Eléctricas de Baja Tensión.</li> <li>- Estudio de disponibilidad de Alimentación Primaria para definir la topología del sistema.</li> </ul>
Interfaces:	No hay mención explícita a las interfaces ni a su tratamiento	
CAPEX y OPEX	<p><b>Capex:</b> Los valores globales del sistema eléctrico, 3,5 M€/Km, se encuentran dentro de un margen razonable, en comparación a presupuestos de contratos para proyectos similares, escaladas sus magnitudes de acuerdo a sus singularidades. Sin embargo, el desglose por subsistemas presenta diferencias importantes y debe ser revisado de acuerdo a las definiciones de equipos, en la etapa de Estudios y Diseños para la Estructuración.</p> <p><b>Opex Energía</b>  <b>Consumo anual energía tracción:</b>                      En el estudio se establece el consumo en base al producto entre la producción de tren-Km/año y el consumo específico medio de KWh/tren-km. El cálculo de consumo de tracción se realiza para el escenario año 2030 con una producción de 2,8 M Km-tren/año y un consumo específico de 17 KWh/tren-km, el cual se considera razonable para trenes con capacidad de 1800 pax.</p>	

	<p>Dado que los trenes-Km/año para el escenario 2050 es muy similar al del 2030, el estudio ha considerado para el OPEX sólo los valores del 2030, y que alcanzan a 48GWh/año</p> <p><b>Consumo Anual de Baja Tensión</b>                  Para el consumo anual se han considerado valores globales por cada estación y talleres. Los consumos se han estimado en base a las potencias, pero no se indican factores de carga y diversidad, resultando los valores bastante aumentados respecto a la comparación con redes similares, aún más atendiendo a la aplicación de tecnologías eficientes, tales como iluminación LED y equipos electromecánicos accionados con variadores de frecuencia. El valor de consumo anual calculado es de 27,6 GWh y de acuerdo a nuestra experiencia, podría reducirse a 18 GWh/año.</p> <p><b>Tarifa</b>                  El valor unitario de tarifa utilizado, de 90 USD/MWh, resulta adecuado, considerando el valor de energía y potencia para clientes de Alta Tensión con bajo factor de carga, como es una línea de Metro.</p> <p><b>Costo Anual Energía</b>  <b>Definido Estudio: 6.8 MUSD/año</b>  <b>Corregido: 5,9 MUSD/año</b></p> <p><b>Aplicando un criterio conservador se propone, para efectos del presupuesto preliminar, mantener la cifra del estudio, esto es: 6,8 MUSD/año</b></p>
<p><b>Otros aspectos relevantes:</b></p>	<p>En el caso que se confirme un sistema de Túnel bi-tubo; se deben considerar enlaces entre ambos túneles para las conexiones intermedias de cables equipotenciales entre los rieles de ambas vías cada 200 a 300 metros.</p> <p>Interfaces sistema Puertas de Andén, régimen de puesta a tierra y protecciones riel-tierra.</p> <p>Criterios de redundancia subestaciones de tracción, regímenes de sobrecarga</p> <p>Resonancias armónicas en red de media tensión.</p>

### **2.2.18.3 ASPECTOS RELEVANTES ASOCIADOS A LA PRIMERA LINEA DEL METRO DE BOGOTÁ**

#### **2.2.18.3.1 Subestaciones Receptoras Alta Tensión (SER)**

La PLMB fue diseñada con 3 SER y redundancia n-2, con el objeto de cumplir con los requerimientos de confiabilidad y disponibilidad establecidos: 99,999 y 5 minutos de corte total al año.

Se evaluaron 2 alternativas:

- 1) 2 SER redundantes en transformación y alimentación
- 2) 3 SER no redundantes (un transformador y 1 conexión AT cada una)

Se eligió la alternativa de 3 SER no redundantes por ser la de menor costo.

La tecnología elegida fue la de subestaciones de tipo blindadas, por sus ventajas de espacio reducido y menor impacto visual.

Para la L2MB, se propone mantener el mismo nivel de confiabilidad, para lo cual se deberá evaluar en la fase 3, la cantidad y configuración más apropiada de las SER, dependiendo de las ubicaciones y disponibilidad de subestaciones primarias de Codensa.

En la topología de alimentación media tensión de la L2MB se analizará la alternativa de un enlace con PLMB.

#### **2.2.18.3.2 Subestaciones Tracción (SET)**

Para la PLMB, se contempló el diseño con redundancia n-1 de cada subestación, existiendo soluciones bigrupo o trigrupo, dependiendo de las condiciones de potencia requeridas en cada ubicación.

La tensión de alimentación en corriente continua se estableció en 750 Volts con tercer riel, más apropiado en zonas de viaducto por el menor impacto visual respecto a la catenaria. Inicialmente se estudió la alternativa de tercer riel en 1500 V, pero se descartó por ser una solución no suficientemente masificada en líneas de metro.

La tecnología definida en la etapa de ingeniería para las subestaciones fue de rectificadores no controlados de 12 pulsos, elegidos por su confiabilidad y menor distorsión armónica.

La ubicación y potencia de cada subestación, se obtuvo a partir de simulaciones de tracción, tomando en cuenta las características dinámicas de los trenes, características del trazado, restricciones de velocidad e intervalos de operación de corto y largo plazo.

Para la L2MB, se propone en principio, mantener los criterios de diseño de las SET y realizar, como parte de la 3ª fase, la modelación y simulación de tracción para determinar la ubicación óptima y capacidad de las subestaciones.

#### **2.2.18.3.3 Vías y Talleres**

En la PLMB se consideraron, a nivel de vías, seccionamientos eléctricos del tercer riel en las zonas de maniobra para servicios parciales y en terminales.

Para Talleres y Depósito se consideró alimentación 750 V independiente de las vías principales, mediante una subestación SET dedicada. Esta solución permite una mayor flexibilidad y seguridad operacional.

Se consideraron equipos seccionadores para cada una de las áreas funcionales del taller: Naves de Mantenimiento, Lavado, Estacionamientos, Vía de Prueba, etc.

Para la L2MB se propone mantener los criterios de diseño de distribución, tracción de vías y talleres.

#### **Protecciones Sobretensión Puertas de Andén**

En la PLMB se ha definido que las estructuras de puertas de andén sean conectadas al potencial de la masa del tren (negativo de tracción) y aisladas eléctricamente de la losa, de modo de evitar diferencias de potencial peligrosas para los pasajeros. Este diseño se acompaña de protecciones de sobretensión entre riel y tierra.

Para la L2MB, se propone mantener el mismo principio.

#### **2.2.18.3.4 Distribución MT**

En la PLMB se determinó la utilización de un doble anillo de media tensión con criterio de redundancia n-2, para alimentación tanto para las SET como los CTE, con el objeto de lograr una disponibilidad acorde con un sistema UTO.

Para la L2MB, se propone mantener los criterios de diseño puesto que también será una línea automática.

Dada la particularidad de ser la L2MB en gran parte subterránea y automática, se propone analizar en la fase 3, la incorporación de un generador de emergencia para desplazamiento de trenes hasta la estación más próxima en caso de blackout, para evitar así las dificultades de evacuación de pasajeros en túnel

## **2.2.18.4 REVISIÓN DE EXPERIENCIAS INTERNACIONALES Y APLICACIÓN AL CASO DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ**

### **2.2.18.4.1 Alimentación AT/MT**

Normalmente para líneas de metro pesado, la alimentación se realiza mediante transformadores dedicados, conectados a la red de distribución primaria de alta tensión de la ciudad.

La distribución a las SET se realiza normalmente en anillo o en algunos casos en forma radial (Paris, Santiago).

Las líneas 6 y 3, automáticas, del metro de Santiago se alimentan desde una subestación de 220 KV del sistema de transmisión nacional, la que tiene un nivel de disponibilidad mayor que las subestaciones de distribución primaria de 110 KV de la ciudad.

### **2.2.18.4.2 Eficiencia Energética**

Para aprovechamiento de la energía regenerada por el frenado de los trenes, se utilizan rectificadores reversibles (metro de Bilbao) o acumuladores estáticos (Metro de Tokio), también existe a nivel experimental, convertidores de corriente continua a alterna para aprovechamiento directo de la energía de frenado, en los sistemas de estaciones (prototipo metro de Madrid).

La iluminación mediante lámparas LED de Alto Brillo (HB-LED), permite disminuir fuertemente el consumo y el calor ambiente en estaciones subterráneas, por lo cual su utilización en la L2MB es muy recomendable.

Las escaleras mecánicas de última generación funcionan con variadores de frecuencia, que permiten graduar las velocidades y regeneración de freno, lo cual redundará en un ahorro considerable de energía en relación a las escaleras mecánicas convencionales.

### **2.2.18.4.3 Calidad de Energía**

Las regulaciones nacionales e internacionales referidas a Calidad de Energía deben ser tomadas en cuenta tanto a nivel de diseño como en la realización del sistema eléctrico, esto teniendo en cuenta que los rectificadores de tracción son fuentes de distorsión armónica de corrientes y voltaje de la red eléctrica, tanto al interior como al exterior de la red. En algunos casos, como Metro de Santiago, la contaminación de armónicas se ve amplificadas por un fenómeno de resonancia debido a la capacitancia de los cables de media tensión. Para la L2MB, se propone efectuar un estudio de armónicas en la fase 3.

## **2.2.18.5 CONCLUSIONES**

Se presentan a continuación conclusiones preliminares de la debida diligencia técnica que conformarán el punto de arranque de los servicios de consultoría asociados con el componente de alimentación eléctrica y tracción del proyecto de L2MB.

#### **2.2.18.5.1 Estudio de Prefactibilidad**

- El estudio de prefactibilidad referido al sistema eléctrico entrega una visión general de los subsistemas, siendo un buen punto de partida para la fase de diseño.
- Los valores de CAPEX del Sistema Eléctrico se consideran adecuados globalmente, sin embargo, su distribución en los distintos subsistemas debe ser revisada en la etapa de Diseño.
- El valor de OPEX, referido al consumo de Energía Eléctrica, se considera adecuado a nivel de presupuesto, no obstante que los consumos de estaciones se consideran sobrevalorados.
- Los valores de potencia para la especificación de transformadores de las SER deben ser ajustados en la etapa de diseño, ya que se estiman muy sobrevalorados, principalmente a nivel de Estaciones y Talleres.
- Para la L2MB se propone mantener el mismo nivel de confiabilidad de la PLMB, para lo cual se deberá evaluar en la fase 3, la cantidad y configuración más apropiada de las SER, dependiendo de las ubicaciones y disponibilidad de subestaciones primarias de Codensa.

#### **2.2.18.5.2 Aspectos Relevantes PLMB**

En general son aplicables los criterios de diseño de la PLMB, debido a las particularidades de una línea subterránea.

NB: no se presenta en el documento correspondiente un análisis detallado de los documentos técnicos elaborados para contratar la concesión de la PLMB (apéndices técnicos, preguntas y respuestas) pero se afirma que se tomarán en cuenta estos documentos para la definición y redacción de las especificaciones técnicas relacionadas con la ET correspondiente