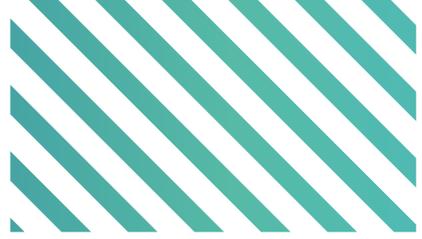




21 DE MAYO DE 2024

Resumen Ejecutivo

Impacto del Desarrollo del Transporte Público Eléctrico sobre el Sistema Eléctrico Chileno



ÍNDICE



ÍNDICE

PRÓLOGO.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. PANORAMA INTERNACIONAL.....	8
3. LA SITUACIÓN EN CHILE.....	10
4. MODELO DE DIMENSIONAMIENTO.....	13
5. RESULTADOS DE DIMENSIONAMIENTO.....	16
6. REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA.....	19
6.1 Carga plena de la batería a 100% sin carga de oportunidad.....	20
6.2 Carga de la batería entre 80% a 20% con carga de oportunidad.....	22
7. INFRAESTRUCTURA DE CARGA TERMINALES MONOSERVICIO.....	23
8. INFRAESTRUCTURA DE CARGA TERMINALES MULTISERVICIO.....	26
9. CONDICIONES DE SUMINISTRO ELÉCTRICO.....	32
9.1 Forma de curva de carga.....	33
9.2 Energía Limpia.....	34
9.3 Instalación de paneles fotovoltaicos en el terminal.....	35
9.4 Redundancia de infraestructura.....	38
9.5 Seguridad de servicio.....	38
10. IMPACTO SOBRE LA RED ELÉCTRICA.....	39
10.1 Región Metropolitana.....	40
10.2 Estimación de la demanda para flota de 1200 buses.....	41
10.3 Regiones.....	43



PRÓLOGO

PRÓLOGO

A fines de 2023, el Comité Chileno de Cigré aprobó la formación del Grupo de Trabajo WG C6 para estudiar la modernización de la distribución de energía eléctrica en Chile y su marco regulatorio.

Con Pedro Miquel como Coordinador Nacional y el liderazgo de Aniella Descalzi y Sergio Barrientos, este grupo se enfocó en tres áreas clave: la modernización del sector energético, las mejoras en la calidad del servicio promoviendo la sostenibilidad mediante el uso de recursos energéticos distribuidos (DERs) y el impacto de la electromovilidad sobre el sistema eléctrico.

En el ámbito de la modernización del sector energético, se está realizando un diagnóstico exhaustivo del marco regulatorio actual de la distribución de energía eléctrica en Chile con el fin de proponer medidas para modernizar el actual modelo de remuneración, evaluar el impacto de la infraestructura avanzada de medición (AMI), investigar estrategias de comercialización y explorar nuevos modelos de negocio emergentes.

En cuanto a las mejoras en la calidad del servicio, se revisaron experiencias internacionales y casos prácticos para implementar soluciones efectivas en Chile. Se están explorando, además, opciones para mejorar la resiliencia de los sistemas de distribución y su respuesta ante emergencias, así como la planificación de sistemas de distribución en interacción con la transmisión. También se propondrán mecanismos para incorporar de manera efectiva los recursos energéticos distribuidos, que incluyen la generación distribuida, el almacenamiento de energía, respuesta a la demanda y los vehículos eléctricos. El enfoque de este trabajo es crear un sector eléctrico enfocado en los clientes, más moderno, eficiente y alineado racionalmente con los objetivos climáticos, con señales de precios transparentes y tarifas justas para los clientes finales. La colaboración activa de todos los miembros del grupo fue esencial para alcanzar estos objetivos y contribuir a la modernización y sostenibilidad del sector energético en Chile.

El tercer tema aborda cómo el transporte público eléctrico y la electromovilidad en general afectan el sistema eléctrico chileno. Se analizan las necesidades de demanda, infraestructura, transporte y distribución, así como la gestión de energía para los futuros vehículos eléctricos, asegurando que el sistema eléctrico pueda admitir esta transición.

El presente Resumen Ejecutivo sintetiza las principales conclusiones obtenidas en los 10 capítulos del Informe de Impacto del Desarrollo del Transporte Público Eléctrico sobre el Sistema Eléctrico Chileno. Dicho estudio desarrollado por Pedro Miquel incluye valiosos aportes de Juan Carlos Urbina, Diego Fernández, Aniella Descalzi, Eduardo Andrade y Patricio Celis.

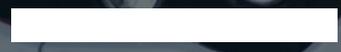
Las actividades del grupo se llevaron a cabo con la colaboración activa de todos sus miembros, quienes participaron en reuniones periódicas para revisar avances y ajustar estrategias según fuera necesario. El objetivo final es consolidar un informe final del WG completo a fines de 2024, que reflejará las conclusiones y recomendaciones del grupo para la modernización y sostenibilidad de segmento de distribución de energía eléctrica en Chile.

La colaboración y el compromiso de todos los participantes han sido fundamentales para el éxito de este grupo de trabajo y de esta forma alcanzar los objetivos propuestos.



1

Chile



INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Dado el creciente interés en el transporte público eléctrico y su relevancia en la Estrategia Nacional de Electromovilidad de Chile, el objetivo principal del estudio que aquí se resume, es analizar el impacto que produce la demanda de energía eléctrica de las flotas de buses sobre la infraestructura de transporte y distribución del sistema eléctrico chileno.

Son objetivos específicos de este trabajo los que se indican a continuación:

- Entendimiento del estado del arte del desarrollo del transporte público eléctrico a nivel internacional.
- Analizar las prioridades y objetivos para el transporte público eléctrico establecidos en la Estrategia Nacional de Electromovilidad.
- Compenetrarse de las normas chilenas que aplican a los buses en general.
- Conocer la oferta de los fabricantes de buses eléctricos y sus características técnicas, incluyendo los cargadores de baterías disponibles.
- Desarrollar un modelo que permita determinar el tamaño de los terminales y las flotas de buses, considerando condiciones de borde tales como distancia de recorrido, número de paradas por kilómetro, velocidad de circulación, tiempo de detención para atención de pasajeros, etc.
- Empleando el modelo para situaciones típicas, determinar el tamaño de la flota de buses, la demanda de potencia y energía eléctrica de los terminales.
- Establecer los requerimientos de diseño básico de los terminales, considerando la relación que existe entre la capacidad de las baterías, el régimen de carga y los tiempos de carga.
- Determinar la magnitud de demanda agregada que el servicio de transporte eléctrico público impone al sistema eléctrico. Se analiza la situación de la región metropolitana y las demás regiones por separado. En este último caso se analiza lo que ocurre en las principales ciudades.
- En función del número de buses que atiende un terminal definir si el diseño requiere de una conexión en alta o en media tensión a la red.
- Entregar algunas recomendaciones respecto de la redundancia de la infraestructura del terminal y las soluciones técnicas que deben adoptarse en cuanto a seguridad de suministro para asegurar la continuidad del servicio de transporte.

Habiéndose cumplido los objetivos planteados para este trabajo y analizado todos los temas que se definieron como necesarios para responder las preguntas fundamentales del tema, llega el momento de explicitar las principales conclusiones obtenidas en los 10 capítulos del Informe de Impacto del Desarrollo del Transporte Público Eléctrico sobre el Sistema Eléctrico Chileno. Este resumen está dedicado a eso.

PANORAMA INTERNACIONAL



2. PANORAMA INTERNACIONAL

Como en casi todos los trabajos de investigación, lo primero fue entender la dinámica de transformación del transporte público urbano en el contexto internacional. En Estados Unidos, Europa, China y Latinoamérica, el reemplazo de buses diésel por cero emisiones es un proceso irreversible en marcha. En el corto plazo priman los buses eléctricos y se observan iniciativas para empleo de hidrógeno verde transformado a electricidad mediante celdas de combustible. Las políticas públicas de los países que impulsan el reemplazo pueden resumirse en lo siguiente:

- En Estados Unidos no se aprecia una estrategia nacional pero cada estado si tiene una. La costa oeste en general, incluidos California, Oregón y Washington, representa el 41% de todos los buses cero emisiones del país. El mayor avance de la inserción de buses cero emisiones se aprecia en California, en donde al 2030, todos los vehículos vendidos deben ser cero emisiones. Se observa a nivel país, la participación de buses eléctricos (95%) y de buses a hidrógeno con celdas de combustible (5%).
- En Europa los factores que están impulsando la demanda de autobuses eléctricos son las estrictas regulaciones de emisiones, la alta dependencia de combustibles convencionales o no renovables, una fuerte ética ambiental y la creciente necesidad de integrar las energías renovables en una red. El Reglamento de Estándares de CO₂ de la Unión Europea establece que al 2035 el 100% de los autobuses deben ser cero emisiones. Las flotas de autobuses urbanos deberían hacer una transición en gran medida a la energía eléctrica para 2030, respaldadas por el objetivo propuesto de que el 75% de todos los autobuses vendidos en Europa sean eléctricos.

Los principales mercados europeos de buses eléctricos incluyen el Reino Unido (no UE), los Países Bajos, Noruega, Luxemburgo y Polonia. El Reino Unido y otros países de Europa Central están actualizando su flota con autobuses de bajas o cero emisiones y modernizando los autobuses antiguos con trenes motrices de bajas emisiones. Otros tantos países han tomado medidas para hacer la transición de su flota de transporte público a vehículos impulsados por combustible de hidrógeno para cumplir con sus propios objetivos de emisiones. Por ejemplo, en junio de 2020, Alemania adoptó la Estrategia Nacional del Hidrógeno después de la aprobación de su gabinete federal.

- China es sin duda líder mundial en transporte público eléctrico, cerca del 90% de los buses eléctricos en servicio del orbe están en ese país. En 2018, Shenzhen se convirtió en la primera ciudad del mundo en tener una flota de autobuses públicos totalmente eléctricos. Este rápido avance en la electrificación de la flota china fue posible gracias a un fuerte apoyo gubernamental, como ocurrió, por ejemplo, en Shenzhen. Otro punto claro que contribuye al dominio de China en el sector de los vehículos eléctricos (VE) es su estrategia de proximidad geográfica. La región de Asia-Pacífico, por ejemplo, fue con diferencia el mayor mercado de autobuses eléctricos en 2022 (105.021 unidades), al igual que otros mercados adyacentes, como Corea del Sur, donde los autobuses chinos representaron aproximadamente la mitad del mercado. Además, a partir de 2022, el gigante chino BYD produciría aproximadamente el 70% de los autobuses eléctricos de Japón.
- En Latinoamérica, el reemplazo de buses diésel por eléctricos se observaba en muchos países, no obstante, no se puede decir lo mismo respecto de la existencia de políticas públicas concretas que lo impulse y en consecuencia el progreso de la transformación difiere entre una nación y otra. Son excepciones, lo observado en Colombia y Chile, en donde está explicitada la política pública y la estrategia para facilitar esta transformación. Actualmente Chile es el país con más buses eléctricos en la región seguido por Colombia. En ambos casos, los buses se concentran en las ciudades capitales.

A large, bold, white number '3' is positioned in the upper right quadrant of the image, partially overlapping the sky and the mountain range. The background is a scenic landscape featuring a prominent, snow-capped mountain peak in the distance, a range of lower, dark mountains in the middle ground, and a bright blue lake in the foreground. The sky is filled with soft, white clouds.

**LA SITUACIÓN
EN CHILE**

3. LA SITUACIÓN EN CHILE

Tempranamente Chile se ha autoimpuesto la meta de ser carbono neutral al año 2050, existiendo plena conciencia que una parte importante de las emisiones de CO₂ proviene del transporte terrestre y en particular del transporte público urbano.

Estrategia Nacional de Electromovilidad (EEM)

En el año 2017 fue promulgada la primera versión de la Estrategia Nacional de Electromovilidad (EEM), que reconoce al Transporte público como motor de desarrollo estableciendo dos metas de largo plazo: alcanzar el 40% de vehículos particulares y 100% del transporte público urbano eléctricos al 2050. La revisión 2021 de la Estrategia de Electromovilidad sumó nuevas metas para el mediano y largo plazo. Las más relevantes son: el 100% de las nuevas incorporaciones al transporte público urbano serán vehículos cero emisiones al año 2035, el 100% de ventas de vehículos livianos y medianos sean cero emisiones al año 2035 y el 100% de las ventas de vehículos para el transporte de pasajeros interurbano y transporte terrestre de carga sean cero emisiones al año 2045.

Composición de flotas de buses, licitaciones y servicios en marcha

El sistema de transporte público Red Metropolitana de Movilidad (RED) de la Región Metropolitana (RM) cuenta con 6.700 buses, 2.000 de los cuales son eléctricos y la licitación pública de uso de vías 2023 busca proveer otros 1.200. Haciendo un total de 3.200 buses eléctricos en la RM.

Actualmente en regiones el número de buses diésel es de 11.100 aproximadamente y son de menor tamaño que los existentes en la capital. La mayoría son autobuses del tipo Livianos de clase A1. Hoy en día no existe aún un sistema de transporte público con las características del de la RM. No obstante en la revisión 2021 de la EEM si se detallan algunas metas por región, su estado se explicita en la Tabla 1 mostrada a continuación.

¹ Buses de Clase A, vehículos con una longitud igual o superior a 8 metros e inferior a 11 metros.

Tabla 1: Estado de Proyecto de Transporte Público en Regiones

REGIÓN	PROYECTO	ESTADO
Antofagasta	Despliegue de 40 buses eléctricos para operar un corredor de aproximadamente 20 kilómetros de longitud por sentido entre Chimba Alto y Campus Coloso.	En marcha desde 3 de Diciembre 2023.
Atacama	Implementación de 12 nuevos servicios de buses eléctricos en Copiapó. Se contempla una flota de al menos 100 buses eléctricos, con dos centros de carga situados en Cuesta Cardones y Paipote.	Operación para segundo semestre de 2025.
Coquimbo	Dos nuevos servicios de transporte público eléctrico que conectarán Coquimbo y La Serena, con una flota prevista de 42 buses eléctricos.	Operación para segundo semestre 2024.
Valparaíso	Se incorporará un total de 44 buses eléctricos para entregar 4 nuevos servicios.	Previsto para segundo semestre 2024
O'Higgins	En Rancagua, 10 buses eléctricos en reemplazo de buses antiguos (Plan Renueva tu Micro 2022)	En servicio desde el 14 de Mayo de 2024.
Biobío	En colaboración con EFE SUR, se ha propuesto un proyecto de integración con Biotrén en el gran Concepción. Este proyecto incluirá 25 buses eléctricos y dos nuevos servicios que cubrirán un total de 45 kilómetros, vinculando eficazmente los nodos de transporte existentes. Al 2030 contar con 200 nuevos buses eléctricos.	25 buses adquiridos por EFE para complementar servicio Biotrén a entrar en servicio en 2025.

En base a lo anterior, según el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT), Chile se ha ido consolidando como el segundo país a nivel mundial con la mayor flota de buses eléctricos después de China.

MODELO DE DIMENSIONAMIENTO



4

4. MODELO DE DIMENSIONAMIENTO

Medir el impacto sobre el sistema eléctrico que produce la electrificación del transporte público urbano implica cuantificar la demanda de potencia y energía de las nuevas flotas de buses eléctricos, y antes que eso, determinar el número de buses que componen un recorrido y la demanda eléctrica asociada a su operación diaria. Para lograr lo anterior, en este trabajo se ha optado por construir un modelo que entregue los resultados necesarios.

Con el propósito de establecer el modelo se realizaron las dos actividades que se resumen a continuación. Mismas que proporcionaron los datos necesarios para alimentar el modelo que se explicita a posteriormente.

Análisis de recorridos actuales y condiciones técnicas de licitaciones

Con el propósito de entender cuáles son las características principales del servicio de transporte público urbano, se optó estudiar los recorridos de la Red Bus de la RM, los informes de gestión anual 2022 del Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM)², las condiciones técnicas de prestación del servicio para la Licitación Pública de Uso de Vías 2023³ y los servicios de transporte mediante buses eléctricos ya en marcha tanto en la RM como en regiones⁴.

La investigación permitió concluir que los recorridos de Red Bus de la RM, tienen longitudes en un sentido desde 10 Km a 20 Km en un sentido (circuitos de 20 Km a 40 Km), con un número de 3 a 4 paradas por kilómetro y una velocidad media de circulación no superior a 20 Km por hora. Viendo las características técnicas de los buses eléctricos que actualmente prestan servicio se pudo apreciar que poseen baterías de hasta 300 KWh y cuentan con aire acondicionado. Actualmente en regiones existen servicios mono recorrido (un terminal) y en la RM multi recorridos que son abastecidos de energía en un terminal compartido.

Buses eléctricos y tecnologías complementarias disponibles en el mercado

Escogiendo a China como proveedor de buses eléctricos para transporte público urbano, se estudiaron sus principales características, tales como dimensiones físicas, potencia motriz, velocidad, servicios de comodidad, rendimiento y requerimientos de energía.

También se analizaron las características de las baterías de litio, los ciclos y tipos de carga que se les aplican. Así mismo se estudiaron los tipos de cargadores a la venta en el mercado⁵. La conclusión de este análisis es que lo más adecuado es emplear cargas lentas y para optimizar la vida útil de las baterías, administrar la carga entre 80% y 20% de la capacidad, aplicando recargas de oportunidad.

Características del modelo de dimensionamiento

Se desarrolló un modelo de transporte simple que es capaz de determinar el tiempo de viaje del bus en un sentido, el tiempo acumulado de detenciones en las paradas, el tiempo total de recorrido en un sentido y el número de buses que presta el servicio en los dos sentidos de recorrido.

El modelo considera la existencia de un recorrido entre 2 extremos. La distancia entre el extremo 1 y el extremo 2, es igual a la distancia que existe entre el extremo 2 y el extremo 1. El número de paradas por kilómetro de recorrido en cada sentido es el mismo. El tiempo de detención es el mismo en todas las paradas. Cada bus tiene un tiempo de detención obligada en uno de los extremos. La velocidad con que se desplaza el bus es

² Informe de gestión 2022 del DTPM (Ver apartado 12.2.1 en el capítulo del Informe de Impacto del Desarrollo del Transporte Público Eléctrico sobre el Sistema Eléctrico Chileno).

DTPM: Directorio del Transporte Público Metropolitano, dependiente del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones.

³ Detalles en sección 6.2 del 6 del Informe Impacto del Desarrollo del Transporte Público Eléctrico sobre el Sistema Eléctrico Chileno.

⁴ Detalles en el capítulo 6 del Informe Impacto del Desarrollo del Transporte Público Eléctrico sobre el Sistema Eléctrico Chileno.

⁵ Detalles en el capítulo 7, sección 7.5 del Informe de Impacto del Desarrollo del Transporte Público Eléctrico sobre el Sistema Eléctrico Chileno.

constante. La frecuencia de pasada de cada bus por una parada es la misma durante todas las horas de prestación del servicio.

Los datos de entrada son los siguientes:

- Distancia entre los extremos [Km].
- Número de horas diarias en que se presta el servicio [Horas]
- Cantidad de Terminales del recorrido [1 o 2].
- Velocidad media del bus [Km/h].
- Número de paradas por kilómetro de recorrido.
- Frecuencia de paso de un bus en una parada [Min].
- Tiempo de detención del bus en una parada [Min].
- Tiempo de detención del bus en el extremo 1 [Min].
- Capacidad de la batería [KWh].
- Consumo unitario en marcha [KWh/Km].
- Consumo de energía para aire acondicionado [KWh].
- Tiempo de carga de las baterías en el terminal [Horas].
- Rendimiento de los buses [Wh/Km].

El modelo tiene tres salidas principales:

Dimensionamiento de la flota de buses para un recorrido: Para una distancia de recorrido fija, tomando como parámetros, el número de paradas por kilómetro y la frecuencia de pasada del bus por una parada, el modelo entrega:

- El número total de buses del recorrido y la cantidad de recorridos diarios para cumplir con las horas de servicio.
- La energía demandada por bus y la necesidad de energía adicional si la capacidad de la batería es insuficiente.
- La potencia del cargador y la potencia del terminal empleando como parámetro el tiempo de carga de la batería.

En esta etapa el modelo también analiza cómo cambian los resultados si el recorrido cuenta con uno o dos terminales de carga.

Potencia demandada por los terminales: Esta salida provee resultados para analizar lo que ocurre cuando se decide en horas del servicio suspendido, la modalidad de carga plena de las baterías a 100%, o se adopta por un uso de carga entre 80% - 20% de la capacidad admitiendo carga de oportunidad durante las horas de prestación del servicio. Las salidas entre caso son 3:

- Para cada modalidad de carga en el terminal y en función del número de horas de carga de la batería, entrega la potencia nominal del cargador y la demanda del terminal.
- La demanda agregada y el número de terminales de carga, suponiendo en servicio todos los buses eléctricos de la RM simultáneamente.
- Parametrizando el número de buses para simular terminales multi recorrido, entrega el número de terminales y la potencia que estos demandan.

Forma de la curva de carga del terminal: Tomando como parámetro el número de recorridos de un terminal multiservicio para la modalidad de carga 100% y carga 80%-20% con carga de oportunidad, esta salida permite determinar:

- El número de buses por terminal.
- A nivel diario la potencia del terminal y la energía demandada en horas de no servicio.
- La potencia y la energía demandada para carga de oportunidad.
- El total anual de energía demandada.



5

**RESULTADOS DE
DIMENSIONAMIENTO**

5. RESULTADOS DE DIMENSIONAMIENTO

Basándose en la evidencia obtenida en el análisis de los servicios existentes estudiados⁶, se desarrollaron 3 ejemplos representativos de dimensionamiento de flotas de buses. Se consideraron distintas distancias de recorrido en un sentido (10, 20 y 30 Km) y frecuencia de paso por parada (entre 2 y 15 minutos). El número de paradas por kilómetro varía entre 1 y 4. El tiempo de detención en cada parada es de 1 minuto, el de detención en un extremo es 10 minutos y la velocidad del bus es de 20 Km/hora. El tiempo total de prestación de servicio son 17 horas al día. Se estudió un caso con un terminal de carga en un extremo y otro caso con un terminal en cada extremo del recorrido.

Los resultados mostraron lo siguiente:

Número de terminales de carga: Se analizaron 2 casos, un solo terminal para todo el recorrido y luego otra opción con un terminal de carga en cada extremo del recorrido. El número de buses que compone la flota es el mismo, pero existe una diferencia en el número de recorridos diarios que esta realiza. Existe un recorrido más en el caso de 1 sólo terminal de carga, porque se ha supuesto que en ambos casos el horario de prestación del servicio en cada sentido de viaje es el mismo, de este modo en el caso 1 es necesario enviar un conjunto de buses al extremo lejano⁷ previo a la apertura del servicio y lo mismo ocurre cuando termina su horario. Allí los buses del extremo lejano deben retornar al terminal de carga. Esos traslados ocurren con buses fuera de servicio.

Distancia diaria recorrida: Para recorrido de 10 Km en un sentido, la distancia diaria recorrida fluctúa entre 140 – 240 Km (1 terminal) y entre 120-220 Km (2 terminales). En el caso de 20 Km, la distancia diaria recorrida fluctúa entre 160 – 280 Km (1 terminal) y entre 120-240 m (2 terminales). Cuando el recorrido es de 30 Km, la distancia diaria recorrida fluctúa entre 180 – 300 Km (1 terminal) y entre 120-240 m (2 terminales).

Número de buses: El número de buses para sostener un recorrido aparentemente depende en primer lugar de la extensión del recorrido, pero también está fuertemente condicionado por la frecuencia de pasada de un bus por cada parada para atención de pasajeros, el número de paradas por kilómetro y el tiempo de detención en ella. (ver Tabla 2). En verde se muestran las frecuencias más usuales.

Tabla 2: Número de buses en función de distancia del recorrido, frecuencia de pasada y número de paradas por kilómetro

Distancia Recorrido	10 km				20 km				30 km			
	N° de paradas por Kilómetro				N° de paradas por Kilómetro				N° de paradas por Kilómetro			
Frec. de Pasada bus [Min]	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
2	78	68	58	48	148	128	108	88	218	188	158	128
3	52	46	38	32	98	86	72	58	146	126	106	86
4	38	34	28	24	74	64	54	44	108	94	78	64
5	30	26	22	18	58	50	42	34	86	74	62	50
6	26	22	18	16	48	42	36	28	72	62	52	42
7	22	18	16	14	42	36	30	24	62	54	44	36
8	18	16	14	12	36	32	26	22	54	46	38	32
9	16	14	12	10	32	28	24	18	48	42	34	28
10	14	12	10	8	28	24	20	16	42	36	30	24
11	14	12	10	8	26	22	18	16	38	34	28	22
12	12	10	8	8	24	20	18	14	36	30	26	20
13	12	10	8	6	22	18	16	12	32	28	24	18
14	10	8	8	6	20	18	14	12	30	26	22	18
15	10	8	6	6	18	16	14	10	28	24	20	16

⁶ Detalles en el Capítulo 9 del Informe de Impacto del Desarrollo del Transporte Público Eléctrico sobre el Sistema Eléctrico Chileno.

⁷ El número de buses a desplazar fuera de recorrido al extremo remoto es el necesario para establecer un circuito continuo de tránsito entre los extremos. Por ejemplo, para frecuencias de pasada de 6, 10, 12 y 15 minutos es de 10, 6, 5, y 4 buses respectivamente.

Cantidad de recorridos diarios de un bus: Depende principalmente de la extensión del recorrido, porque el viaje a velocidad constante define el tiempo de viaje. La disminución del número de paradas por kilómetro permite realizar más recorridos durante las horas de servicio. Esto último colabora a reducir el número de buses necesarios (ver Tabla 3). La frecuencia de pasada por una parada no afecta al número de recorridos de un bus. En verde se muestran las frecuencias más usuales.

Tabla 3: Cantidad de recorridos diarios de un bus en función de distancia del recorrido, frecuencia de pasada y número de paradas por kilómetro

Distancia Recorrido	10 km				20 km				30 km			
	N° de paradas por Kilómetro				N° de paradas por Kilómetro				N° de paradas por Kilómetro			
Frec. de Pasada bus [Min]	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
2	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
3	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
4	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
5	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
6	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
7	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
8	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
9	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
10	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
11	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
12	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
13	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
14	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5
15	7	8	10	12	4	5	5	7	3	3	4	5



6

REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA

6. REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA

Considerando los supuestos explicitados en el estudio⁸, teniendo presente que para una misma prestación de servicio la demanda de energía es única, se estudiaron las 2 estrategias de carga que se indican, con el propósito de verificar la suficiencia de la capacidad de la batería basal (300 KWh):

Carga plena de la batería a 100% sin carga de oportunidad

Carga de la batería entre 80% - 20% con carga de oportunidad

6.1 Carga plena de la batería a 100% sin carga de oportunidad

La Tabla 4 muestra el resultado del análisis de la suficiencia de capacidad de la batería de un bus, en función de la distancia del recorrido. Se resumen en ella las conclusiones de los casos de uso de un y dos terminales de carga.

Caso de 1 Terminal:

- Para recorridos de 10 y 20 Km en un sentido con 4 paradas por kilómetro, la batería de 300 KWh de capacidad es adecuada, al disminuir el número de paradas se requiere una capacidad mayor.
- Para recorridos de 30 Km en un sentido, la batería de 300 KWh de capacidad es insuficiente independiente del número de paradas. Se requiere una capacidad mayor.
- Emplear una carga de oportunidad ligera para mantener la capacidad de la batería en 300 KWh, es aplicable para recorridos de 10 y 20 Km. Para el caso de 30 Km, la batería es inadecuada porque se requeriría un cargador de oportunidad de mayor tamaño que el necesario para carga lenta.

Caso de 2 Terminales:

- Para recorridos de 10, 20 y 30 Km en un sentido con 4 paradas por kilómetro, la batería de 300 KWh de capacidad es adecuada, al disminuir el número de paradas se requiere una capacidad mayor.
- Emplear una carga de oportunidad ligera para mantener la capacidad de la batería en 300 KWh, es aplicable para recorridos de 10 y 20 Km. Para el caso de 30 Km, la batería es inadecuada porque se requeriría un cargador de oportunidad de mayor tamaño que el necesario para carga lenta.

⁸ Para facilitar la discusión de los resultados se destacan previamente los supuestos principales.

- Los recorridos entre extremos estudiados tienen una longitud de 10, 20 y 30 Km respectivamente.
- El número de paradas por kilómetro en un mismo sentido de viaje analizadas escogidas son 4, 3, 2 y 1. Los 2 valores más altos están en línea con lo que ha definido el Ministerio de Transporte en las licitaciones. El tiempo de detención en cada parada, es de 1 minuto.
- La velocidad media de los buses es 20 Km/hora.
- Se estudiaron 2 casos para el terminal de carga: caso 1: 1 terminal para el recorrido y caso 2: 1 terminal en cada extremo del recorrido.
- Se supone una detención obligada de 10 minutos en sólo uno de los terminales de carga, independientemente del caso estudiado, 1 o 2 terminales de carga. El propósito de esta detención es permitir el reemplazo de conductor cuando corresponda y admitir cargas de oportunidad.
- La prestación del servicio se otorga durante 17 horas al día.
- El caso base se estudia para buses con baterías de 300 KWh de capacidad. El rendimiento promedio de los buses es de 1,5 KWh por kilómetro.
- Todos los buses tienen aire acondicionado frío/calor obtenido mediante tecnología inverter. El acondicionamiento de aire está en servicio tanto si el bus está en movimiento o si está detenido. El consumo de energía diario es de 70 KWh.

Con todo, la variable clave para que la capacidad de 300 KWh de las baterías sea suficiente es el rendimiento del bus en marcha, (en el caso base se ha supuesto igual a 1,5 KWh/km). Para los casos de 1 o 2 terminales, si el rendimiento es de 0,95, 0,83 y 0,75 KWh/Km para distancias de recorrido de 10, 20 y 30 Km en un sentido respectivamente. Los dos primeros valores se pueden encontrar en la oferta de buses eléctricos, no así la tercera. En esta última situación se podría recurrir a una carga de oportunidad ligera y mantener la capacidad de la batería.

Tabla 4: Análisis de suficiencia de capacidad de batería en función de la distancia del recorrido.
Estrategia de carga plena 100%.

	Caso 1: Un Terminal de Carga		Caso 2: Dos Terminales de Carga	
Recorrido de 10 Kilómetros	La energía de la batería de 300 KWh es insuficiente cuando el número de paradas por kilómetro es inferior a 4. La capacidad de la batería que resuelve el problema en función del número de paradas por kilómetro: 3, 2, 1, es de 350, 400 y 450 KWh.	Otra opción es mantener el tipo de batería y recurrir a una carga de oportunidad ligera. Si se procede de este modo, la carga de oportunidad en cada detención en el terminal estará en el rango entre 4,2 y 8,9 KWh.	La energía de la batería de 300 KWh es insuficiente cuando el número de paradas por kilómetro es inferior a 3. La capacidad de la batería que resuelve el problema en función del número de paradas por kilómetro: 2 y 1, es de 350 y 400 KWh.	Otra opción es mantener el tipo de batería y recurrir a una carga de oportunidad ligera. en las magnitudes diarias que muestra la Tabla 16. Si se procede de este modo, la carga de oportunidad en cada detención en el terminal estará entre 4,2 y 8,9 KWh.
Recorrido de 20 Kilómetros	La energía de la batería de 300 KWh es insuficiente cuando el número de paradas por kilómetro es inferior a 4. La capacidad de la batería que resuelve el problema en función del número de paradas por kilómetro: 3, 2, 1, es de 400, 400 y 500 KWh.	Otra opción es mantener el tipo de batería y recurrir a una carga de oportunidad ligera. Si se procede de este modo, la carga de oportunidad en cada detención en el terminal estará en el rango entre 11,6 y 27,1 KWh.	La energía de la batería de 300 KWh es insuficiente cuando el número de paradas por kilómetro es igual a 3 o igual a 1. La capacidad de la batería que resuelve el problema en función del número de paradas por kilómetro: 3 y 1, es de 350 y 450 KWh.	Otra opción es mantener el tipo de batería y recurrir a una carga de oportunidad ligera. Si se procede de este modo, la carga de oportunidad en cada detención en el terminal estará en el rango entre 2,3 y 21,7 KWh.
Recorrido de 30 Kilómetros	La energía de la batería de 300 KWh es insuficiente para todo el rango de paradas por kilómetro. La capacidad de la batería que resuelve el problema en función del número de paradas por kilómetro: 4, 3, 2, 1, es de 350, 350, 450 y 550 KWh.	Otra opción es mantener el tipo de batería y recurrir a una carga de oportunidad ligera. Si se procede de este modo, la carga de oportunidad en cada detención en el terminal estará en el rango entre 7 y 43,8 KWh. La potencia de carga de oportunidad en función del número de paradas por kilómetro fluctúa entre 42, 186 y 262 KW, estas 2 últimas magnitudes superarían la capacidad de los cargadores de energía y desde este punto de vista el uso de baterías de 300 KWh ya no es atractivo.	La energía de la batería de 300 KWh es insuficiente cuando el número de paradas por kilómetro es inferior a 3. La capacidad de la batería que resuelve el problema en función del número de paradas por kilómetro: 2 y 1, es de 350 y 450 KWh.	Otra opción es mantener el tipo de batería y recurrir a una carga de oportunidad ligera. Si se procede de este modo, la carga de oportunidad en cada detención en el terminal estará en el rango entre 11,3 y 32,3 KWh. La potencia de carga de oportunidad en función del número de paradas por kilómetro fluctúa entre 68 y 193 KW, esta última magnitud superaría la capacidad de los cargadores de energía y desde este punto de vista el uso de baterías de 300 KWh para un recorrido de 30 Km con detención por kilómetro ya no es atractiva.

6.2 Carga de la batería entre 80% a 20% con carga de oportunidad

El supuesto de este análisis es que las baterías de 300 KWh se cargan a un 80 % de su capacidad en el terminal de carga durante la noche (240 KWh) y se mantiene una carga mínima de 20% (60 KWh). Así la energía inicial disponible para circular en cada bus es 180 KWh. En el ciclo diario la recarga de energía debe abastecer hasta 180 KWh mediante cargas de oportunidad. La carga de oportunidad ocurre cada vez que el bus visita el terminal de carga. La energía debe suministrarse en un lapso de 10 minutos.

Por la modalidad del ciclo de carga, el uso de la batería es menos restrictivo. Cómo se está recurriendo a una carga de oportunidad en el terminal, mantener un nivel de energía adecuado es posible, no obstante eso se consigue empleando un cargador de mayor potencia, entonces lo importante es verificar la potencia requerida para llevarla a cabo. Los resultados mostraron lo siguiente:

Caso de 1 Terminal:

- Para recorridos de 10 Km en un sentido, la carga de oportunidad por cada recorrido es de 15,3, 17,5, 20,9 y 22,5 KWh, dependiendo si el recorrido tiene 4, 3, 2 o 1 paradas por kilómetro respectivamente.
- Para recorridos de 20 Km en un sentido, la carga de oportunidad por cada recorrido es de 39,9, 47,2, 44,4 y 51,7 KWh, dependiendo si el recorrido tiene 4, 3, 2 o 1 paradas por kilómetro respectivamente. El problema con estas magnitudes es que se requiere para ello de cargadores de oportunidad con capacidades que superan a los necesarios para carga lenta en horas de no servicio.
- Para recorridos de 30 Km en un sentido, la carga de oportunidad por cada recorrido es de 74,5, 70,4, 81,3 y 84,7 KWh, dependiendo si el recorrido tiene 4, 3, 2 o 1 paradas por kilómetro respectivamente. El problema con estas magnitudes es que se requiere para ello de cargadores de oportunidad con capacidades que superan largamente a los necesarios para carga lenta en horas de no servicio.

Caso de 2 Terminales:

- Para recorridos de 10 Km en un sentido, la carga de oportunidad por cada recorrido es de 12,4, 15,4, 19,7 y 21,8 KWh, dependiendo si el recorrido tiene 4, 3, 2 o 1 paradas por kilómetro respectivamente.
- Para recorridos de 20 Km en un sentido, la carga de oportunidad por cada recorrido es de 29,9, 42,9, 39,2 y 50,0 KWh, dependiendo si el recorrido tiene 4, 3, 2 o 1 paradas por kilómetro respectivamente. El problema con estas magnitudes es que se requiere para ello de cargadores de oportunidad con capacidades que superan a los necesarios para carga lenta durante horas de no servicio.
- Para recorridos de 30 Km en un sentido, la carga de oportunidad por cada recorrido es de 59,0, 50,8, 76,9 y 22,9 KWh, dependiendo si el recorrido tiene 4, 3, 2 o 1 paradas por kilómetro respectivamente. El problema con estas magnitudes es que se requiere para ello de cargadores de oportunidad con capacidades que superan largamente a los necesarios para carga lenta durante horas de no servicio.

Manteniendo el rendimiento del bus en marcha en 1,5 KWh/km, el emplear baterías con capacidad de 450 y 550 KWh, es aplicable para recorridos de 20 y 30 Km. El cargador de oportunidad sería el mismo que el de carga lenta durante horas de no servicio.

Para mantener la capacidad de las baterías en 300 KWh, una alternativa es escoger buses con mayor rendimiento. Es así con magnitudes de 0,85 y 0,7 KWh/Km para recorridos de 20 y 30 Km respectivamente, es posible mantener el proceso. No obstante es difícil encontrar ofertas de buses con rendimiento de 0,7 KWh/Km, de modo que se cree necesario emplear baterías de mayor capacidad para recorridos de 30 Km.

A red bus is parked at a charging station. Two thick orange charging cables are connected to the bus. The bus has "red Metropolitana de Movilidad" written on its side. The background is a grey, overcast sky.

7

**INFRAESTRUCTURA
DE CARGA
TERMINALES
MONOSERVICIO**

7. INFRAESTRUCTURA DE CARGA TERMINALES MONOSERVICIO

Empleando los supuestos explicitados en el informe detallado del estudio⁹ y teniendo presente que para una misma prestación de servicio la demanda de energía es única, se estudió el dimensionamiento de potencia para los terminales de carga. Como se verá, una variable relevante para establecer la demanda agregada de potencia del terminal es el tiempo de carga de las baterías en las horas de no servicio. Para explicitar las conclusiones en forma resumida, en esta sección se ha restringido la presentación de resultados a las frecuencias de pasada de un bus en cada parada a 6, 10, y 12 minutos, que corresponden a 10, 6 y 5 buses por hora. El análisis completo se muestra en el Informe detallado¹⁰.

Carga Plena 100%: Para la flota de un terminal monoservicio los resultados se muestran en la Tabla 5. Cuando el tiempo de carga es de 3 horas, se admiten 2 cargas diferidas con un mismo cargador durante las horas de no servicio (7 horas según los supuestos). Esto implica cargadores de mayor potencia que los escogidos para carga en 4 horas, pero la demanda agregada del terminal se reduce considerablemente.

Tabla 5: Potencia Nominal de Terminal Monoservicio. Carga plena 100%

Tiempo de carga [Horas]				3			4					
Recorrido en un sentido [Km]	Capacidad de la batería [KWh]	Frec. Pasada bus en parada [Min]	N° Buses por Terminal Monoservicio		Máximo de cargas diferidas	Potencia del Cargador [KW]	Potencia Nominal Del Terminal [KW]		Máximo de cargas diferidas	Potencia del Cargador [KW]	Potencia Nominal Del Terminal [KW]	
10	300	6	26	22	2	100,00	1300	1100	1	75	1950	1650
		10	14	12	2	100,00	700	600	1	75	1050	900
		12	12	10	2	100,00	600	500	1	75	900	750
20	450	6	48	42	2	150,00	3600	3150	1	112,5	5400	4725
		10	28	24	2	150,00	2100	1800	1	112,5	3150	2700
		12	24	20	2	150,00	1800	1500	1	112,5	2700	2250
20	450	6	72	62	2	150,00	5400	4650	1	112,5	8100	6975
		10	42	36	2	150,00	3150	2700	1	112,5	4725	4050
		12	36	30	2	150,00	2700	2250	1	112,5	4050	3375
Número de paradas por Km			4	3			4	3			4	3

⁹ Para facilitar la discusión de los resultados se destacan previamente los supuestos principales.

- Los recorridos entre extremos estudiados tienen una longitud de 10, 20 y 30 Km respectivamente.
- El número de paradas por kilómetro en un mismo sentido de viaje analizadas escogidas son 4, 3, 2 y 1. Los 2 valores más altos están en línea con lo que ha definido el Ministerio de Transporte en las licitaciones. El tiempo de detención en cada parada, es de 1 minuto.
- La velocidad media de los buses es 20 Km/hora.
- Se estudiaron 2 casos para el terminal de carga: caso 1: 1 terminal para el recorrido y caso 2: 1 terminal en cada extremo del recorrido.
- Se supone una detención obligada de 10 minutos en sólo uno de los terminales de carga, independientemente del caso estudiado, 1 o 2 terminales de carga. El propósito de esta detención es permitir el reemplazo de conductor cuando corresponda y admitir cargas de oportunidad.
- La prestación del servicio se otorga durante 17 horas al día.
- Rendimiento de los buses 1,5 KWh/Km.
- El caso base se estudia para buses con baterías de 300 KWh de capacidad. El rendimiento promedio de los buses es de 1,5 KWh por kilómetro.
- Todos los buses tienen aire acondicionado frío/calor obtenido mediante tecnología inverter. El acondicionamiento de aire está en servicio tanto si el bus está en movimiento o si está detenido. El consumo de energía diario es de 70 KWh.

¹⁰ Detalles en el Capítulo 11 del Informe de Impacto del Desarrollo del Transporte Público Eléctrico sobre el Sistema Eléctrico Chileno.

Carga 80%-20%+Carga de oportunidad: El uso de esta modalidad de carga reduce la demanda agregada del terminal, en comparación con la carga plena 100%. Para la flota de un terminal monoservicio los resultados se muestran en la Tabla 6. Cuando el tiempo de carga es de 3 horas, se admiten 2 cargas diferidas con un mismo cargador durante las horas de no servicio (7 horas según los supuestos). Esto implica cargadores de mayor potencia que los escogidos para carga en 4 horas, pero la demanda agregada del terminal se reduce considerablemente.

Tabla 6: Potencia Nominal de Terminal Monoservicio. Carga 80%-20% + Carga de oportunidad

Tiempo de carga [Horas]				3				4				
Recorrido en un sentido [Km]	Capacidad de la batería [kWh]	Frec. Pasada bus en parada [Min]	N° Buses por Terminal Monoservicio		Máximo de cargas diferidas	Potencia del Cargador [KW]	Potencia Nominal Del Terminal [KW]		Máximo de cargas diferidas	Potencia del Cargador [KW]	Potencia Nominal Del Terminal [KW]	
10	300	6	26	22	2	80,00	1040	880	1	60	1560	1320
		10	14	12	2	80,00	560	480	1	60	840	720
		12	12	10	2	80,00	480	400	1	60	720	600
20	450	6	48	42	2	120,00	2880	2520	1	90	4500	3780
		10	28	24	2	120,00	1680	1440	1	90	2520	2160
		12	24	20	2	120,00	1440	1200	1	90	2160	1800
20	450	6	72	62	2	120,00	4320	3720	1	90	6480	5580
		10	42	36	2	120,00	2520	2160	1	90	3780	3240
		12	36	30	2	120,00	2160	1800	1	90	3240	2700
Número de paradas por Km			4	3			4	3			4	3

Conclusión: Independiente de la distancia del recorrido y la modalidad de carga, la potencia de los terminales monoservicio puede ser suministrada desde la red de media tensión. Serán las condiciones particulares del diseño aplicable en cada caso si se requiere un alimentador dedicado o si podrá utilizarse uno compartido.

INFRAESTRUCTURA DE CARGA TERMINALES MULTISERVICIO

8



8. INFRAESTRUCTURA DE CARGA TERMINALES MULTISERVICIO

En la mayoría de las ciudades medianas o grandes, el transporte público requiere de más de un recorrido para prestar el servicio. Esto en forma natural un concesionario lo asociaría con un terminal de buses multiservicio. Para calibrar el tamaño de los terminales multiservicio, se empleó el número de buses en distintas ciudades del país (ver Tabla 7). Tomando en consideración esas cifras se hizo el análisis que se muestra a continuación.

Tabla 7: Número de buses por ciudad de Chile

Ciudad	Nº de Buses	Ciudad	Nº de Buses	Fuente
Región Metropolitana	6452	Rancagua	298	Informe Técnico de Gestión DTPM 2022
Arica	248	Talca	264	Nuria Hartmann, In-Data SpA: Consultoría para Catastro de Terminales y/o Depósitos de Buses para el Transporte Público Urbano, preparado para la Agencia de Sostenibilidad Energética. (18.06.2021)
Iquique + Alto Hospicio	355	Chillán	353	
Antofagasta	729	Concepción	787	
Coquimbo	271	Temuco	648	
La Serena	223	Valdivia	317	
Valparaíso	919	Osorno	329	
Viña del Mar	480	Puerto Montt	518	

Región Metropolitana. A julio de 2023, la cantidad de buses de la RM es de 6452 y el número de concesionarios de servicio de transporte público es 8. El cociente entre ambas cifras es cercano a 800 buses por concesionario. Empleando ese valor se analizan los resultados para las dos estrategias de carga de las baterías. Arbitrariamente se definieron terminales con 100, 200 y 400 buses eléctricos.

Carga Plena 100: la Tabla 8 muestra los resultados obtenidos para las distancias de recorrido de 10, 20 y 30 Km en un sentido, diferenciando tiempos de carga de 3 y 4 horas, parámetros que condicionan el número de cargas diferidas en el terminal durante las horas de no servicio y la potencia del cargador. En síntesis es posible concluir lo siguiente:

- Para el recorrido de 10 kilómetros, un terminal que aloja 100 buses puede ser alimentado desde la red de media tensión. Cuando el terminal tiene 200 buses la situación se extrema y sólo con una duración de cargas de 3 horas es posible alimentarlo desde la red de distribución empleando uno o más de un alimentador para suplir la demanda. La seguridad de la red de distribución es un tema aparte.
- Para el recorrido de 20 y 30 kilómetros, un terminal que aloja 100 buses puede ser alimentado desde la red de media tensión, la magnitud de potencia demandada sugiere el uso de un alimentador dedicado. Cuando el terminal tiene 200 buses, es posible alimentarlo desde la red de distribución, siempre que se consideren al menos 2 alimentadores. Para 400 buses, la solución involucra a la subestación de bajada AT/MT. Hay 2 variantes según sea la situación específica que se presente:
 - Construir una subestación de transformación desde alta a media tensión y la alimentación en MT si esta no está disponible en el sitio del terminal. Esto corresponde a una ubicación geográfica del terminal lejana a una subestación.
 - Si existe una subestación de bajada AT/MT en la cercanía, ver si esta tiene capacidad disponible para admitir la carga en horas de demanda mínima, si eso ocurre, determinar el número de alimentadores necesarios para conducir la energía al terminal.

En todos los casos debe aplicarse un diseño que soporte primera contingencia en transformación y distribución.

Tabla 8: Potencia de un terminal multiservicio en función del número de buses y distancia de recorrido.
Caso Carga Plena 100%

Tiempo de carga [Horas]			3				4			
Recorrido en un sentido [Km]	Capacidad de la batería [KWh]	N° de Buses por Terminal	Máximo de Cargas Diferidas en Terminal	Potencia Cargador [KW]	Número de Terminales	Potencia del Terminal [MW]	Máximo de Cargas Diferidas en Terminal	Potencia Cargador [KW]	Número de Terminales	Potencia del Terminal [MW]
10	300	100	2	100	8	5	1	75	8	8
		200	2	100	4	10	1	75	4	15
		400	2	100	2	20	1	75	2	30
20	450	100	2	150	8	8	1	112,5	8	11
		200	2	150	4	15	1	112,5	4	23
		400	2	150	2	30	1	112,5	2	45
20	450	100	2	150	8	8	1	112,5	6	11
		200	2	150	4	15	1	112,5	3	23
		400	2	150	2	30	1	112,5	2	45
Número de paradas por Km					4	3			4	3

Carga 80%-20% + Carga de Oportunidad: la Tabla 9 muestra los resultados obtenidos para las distancias de recorrido de 10, 20 y 30 Km en un sentido, diferenciando tiempos de carga de 3 y 4 horas, parámetros que condicionan el número de cargas diferidas en el terminal durante las horas de no servicio y la potencia del cargador. En síntesis, es posible concluir lo siguiente:

- Para el recorrido de 10 kilómetros, un terminal que aloja 100 buses puede ser alimentado desde la red de media tensión. Cuando el terminal tiene 200 buses la situación se extrema y sólo con una duración de cargas de 3 horas es posible alimentarlo desde la red de distribución.
- Para el recorrido de 20 y 30 kilómetros, un terminal que aloja 100 buses puede ser alimentado desde la red de media tensión, la magnitud de potencia demandada sugiere el uso de un alimentador dedicado. Cuando el terminal tiene 200 buses, es posible alimentarlo desde la red de distribución, siempre que se consideren al menos 2 alimentadores. Para 400 buses, la solución involucra a la subestación de bajada AT/MT. Hay 2 variantes según sea la situación específica que se presente:
 - Construir una subestación de transformación desde alta a media tensión y la alimentación en MT si esta no está disponible en el sitio del terminal.
 - Si existe una subestación de bajada AT/MT en la cercanía, ver si esta tiene capacidad disponible para admitir la carga en horas de demanda mínima, si eso ocurre, determinar el número de alimentadores necesarios para conducir la energía al terminal.

En todos los casos debe aplicarse un diseño que soporte primera contingencia en transformación y distribución.

Tabla 9: Potencia de un terminal multiservicio en función del número de buses y distancia de recorrido. Caso Carga 80%-20% + Carga de Oportunidad

Tiempo de carga [Horas]			3				4			
Recorrido en un sentido [Km]	Capacidad de la batería [KWh]	Nº de Buses por Terminal	Máximo de Cargas Diferidas en Terminal	Potencia Cargador [KW]	Número de Terminales	Potencia del Terminal [MW]	Máximo de Cargas Diferidas en Terminal	Potencia Cargador [KW]	Número de Terminales	Potencia del Terminal [MW]
10	300	100	2	80	8	4	1	60	8	6
		200	2	80	4	8	1	60	4	12
		400	2	80	2	16	1	60	2	24
20	450	100	2	120	8	6	1	90	8	9
		200	2	120	4	12	1	90	4	18
		400	2	120	2	24	1	90	2	36
20	450	100	2	120	8	6	1	90	6	9
		200	2	120	4	12	1	90	3	18
		400	2	120	2	24	1	90	2	36
Número de paradas por Km					4	3			4	3

Ciudades en Regiones, La situación en este caso es diversa pero existen patrones que se pueden analizar:

Valparaíso, Concepción y Antofagasta según lo mostrado en la Tabla 7, tienen un número de buses comparables a los 800 estudiados para la RM. De este modo las soluciones en términos de cantidad de buses alojados en un terminal multiservicio y el número de terminales serían similares.

Para otras ciudades como Viña del Mar, Temuco y Puerto Montt que tienen entre 450 a 650 buses, la Tabla 10 y la Tabla 11 exhiben el número de terminales y su potencia, considerando como parámetro la duración de la carga (3 o 4 horas) y el uso de carga plena 100% o carga 80%-20% + carga de oportunidad. Los resultados, independiente de la longitud del recorrido, muestran que es posible la alimentación del terminal multiservicio desde la red de distribución en MT empleando un alimentador dedicado cuando se alojan 100 buses, dos alimentadores dedicados cuando se alojan hasta 200 buses, la seguridad de la red de distribución no se ha tomado en cuenta aún. De allí en adelante las magnitudes de potencia involucran la presencia de una subestación de bajada AT/MT.

- Si el sitio del terminal no es próximo a una subestación eléctrica, deberá desarrollarse una conexión en alta tensión y una subestación transformadora de alta a media tensión para alimentar desde allí la red de reparto interna de media tensión.

Al comparar las potencias de los terminales de igual condición entre la Tabla 10 y la Tabla 11 nuevamente queda en evidencia la importancia de escoger una estrategia de carga 80%-20% + carga de oportunidad y un tiempo de carga de 3 horas.

Tabla 10: Potencia y Número de Terminales para flotas de 450 a 600 Buses.
Caso de Carga Plena 100%

Tiempo de carga [Horas]			3				4			
N° de Buses			450		600		450		600	
Recorrido en un sentido [Km]	Capacidad de la batería [KWh]	N° de Buses por Terminal	Número de Terminales	Potencia del Terminal [MW]	Número de Terminales	Potencia del Terminal [MW]	Número de Terminales	Potencia del Terminal [MW]	Número de Terminales	Potencia del Terminal [MW]
10	300	100	5	5,0	6	5,0	5	7,5	6	7,5
		200	3	10,0	3	10,0	3	15,0	3	15,0
		300	2	15,0	2	15,0	2	22,5	2	22,5
20	450	100	5	7,5	6	7,5	5	11,3	6	11,3
		200	3	15,0	3	15,0	3	22,5	3	22,5
		300	2	22,5	2	22,5	2	33,8	2	33,8
20	450	100	5	7,5	6	7,5	5	11,3	6	11,3
		200	3	15,0	3	15,0	3	22,5	3	22,5
		300	2	22,5	2	22,5	2	33,8	2	33,8
Número de paradas por Km					4	3			4	3

Tabla 11: Potencia y Número de Terminales para flotas de 450 a 600 Buses.
Caso de Carga 80%-20% + Carga de Oportunidad

Tiempo de carga [Horas]			3				4			
N° de Buses			450		600		450		600	
Recorrido en un sentido [Km]	Capacidad de la batería [KWh]	N° de Buses por Terminal	Número de Terminales	Potencia del Terminal [MW]	Número de Terminales	Potencia del Terminal [MW]	Número de Terminales	Potencia del Terminal [MW]	Número de Terminales	Potencia del Terminal [MW]
10	300	100	5	4,0	6	4,0	5	6,0	6	6,0
		200	3	8,0	3	8,0	3	12,0	3	12,0
		300	2	12,0	2	12,0	2	18,0	2	18,0
20	450	100	5	6,0	6	6,0	5	9,0	6	9,0
		200	3	12,0	3	12,0	3	18,0	3	18,0
		300	2	18,0	2	18,0	2	27,0	2	27,0
20	450	100	5	6,0	6	6,0	5	9,0	6	9,0
		200	3	12,0	3	12,0	3	18,0	3	18,0
		300	2	18,0	2	18,0	2	27,0	2	27,0
Número de paradas por Km					4	3			4	3

Las demás ciudades cuya cantidad de buses es inferior a 360, entre ellas Arica, Iquique, La Serena, Coquimbo, Rancagua, Talca, Chillán, Valdivia y Osorno, podrían tener flotas de buses con terminales multiservicio que serían alimentados desde la red de distribución en MT empleando un alimentador dedicado cuando se alojan 100 buses, dos alimentadores dedicados cuando se alojan hasta 200 buses. La seguridad de la red de distribución no está considerada aún. De allí en adelante las magnitudes de potencia ameritan el desarrollo de una conexión en alta tensión y una subestación transformadora de alta a media tensión para alimentar desde allí la red de reparto interna de media tensión.



9

**CONDICIONES DE
SUMINISTRO
ELÉCTRICO**

9. CONDICIONES DE SUMINISTRO ELÉCTRICO

Se resumen aquí 5 aspectos: la curva de carga del terminal de buses en forma y temporalidad, el tipo de energía que demandarán los terminales, el uso de paneles fotovoltaicos en los terminales, la redundancia de la infraestructura eléctrica y la seguridad de suministro de energía.

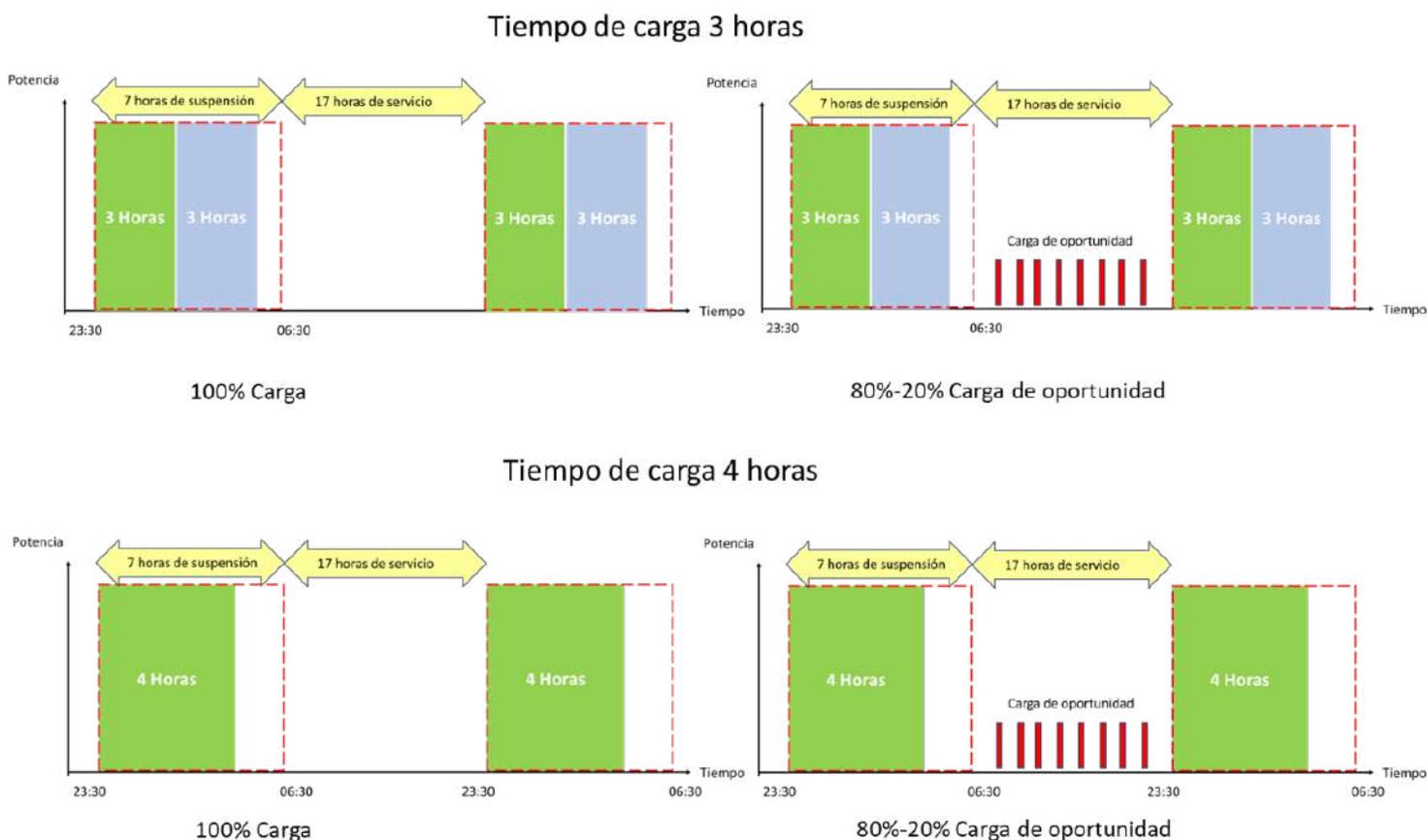
9.1 Forma de curva de carga

Atendiendo a que una parte importante de la carga de las baterías de los buses eléctricos se lleva a cabo en el terminal durante las horas nocturnas cuando el servicio está suspendido, la mayor demanda se registrará durante esas horas. Si se emplea carga 80%-20% con carga de oportunidad, también existirá una demanda de carga de oportunidad durante las horas en que se está prestando el servicio, cada vez que un bus visite el terminal.

Las formas de las curvas de carga para distintos tiempos de carga y los casos de ciclo de carga 100% y de carga 80%-20% con carga de oportunidad se muestran esquemáticamente en la Figura 1.

La potencia demandada por el terminal cuando sólo se puede hacer una carga masiva durante el tiempo de reposo (4 horas) duplica a la necesaria cuando es posible emplear carga secuencial (3 horas).

Figura 1: Formas esquemáticas de curva de carga para terminales



En los casos de carga plena 100%, la totalidad de la demanda se registra cuando los buses están estacionados en el terminal en horas de no servicio.

Por su parte si se emplea carga 80%-20% + carga de oportunidad, existen 2 situaciones:

- Para el recorrido de 10 Km en un sentido, la carga en el terminal en horas de no servicio y la de oportunidad durante las horas de servicio se reparte en una proporción de 2/3 es a 1/3 independientemente si se trata de un terminal monoservicio o multiservicio.
- Para el recorrido de 20 Km en un sentido, la carga en el terminal en horas de no servicio y la de oportunidad durante las horas de servicio se reparte en una proporción que depende del número de paradas por kilómetro. Cercana a 10% para 4 paradas, mientras que en el caso de 3 paradas la carga de oportunidad se acerca a 1/3 de la de carga plena.

Finalmente hay que destacar que la demanda máxima de potencia y energía del terminal ocurre en las horas de noche. En los casos analizados entre las 23:30 de un día y las 6:30 del siguiente, condición que es relevante para efectos del impacto sobre la infraestructura de la red eléctrica, particularmente para los transformadores AT/MT de las subestaciones de bajada y también en cierta medida sobre la red de distribución en MT. Detalles cuantitativos se pueden encontrar en el capítulo 10.

9.2 Energía Limpia

Bajo el supuesto que se quiere emplear energía limpia para alimentar las flotas de buses:

Si se adopta la estrategia de carga plena 100%, la energía que demandarán los terminales será requerida en las horas en que el servicio está suspendido y todos los buses en el terminal. Según los supuestos adoptados en este estudio, esto ocurriría entre las 23:30 de un día y las 6:30 AM del día siguiente. Las implicancias de esta decisión es que la carga ocurre en horas de ausencia de generación fotovoltaica y de ausencia o a lo menos escasez eólica, quedando disponible sólo las plantas hidráulicas, situación que reduce la oferta a menos que los proveedores empleen sistemas de almacenamiento de energía. Ambas situaciones presionan el costo del suministro al alza en el corto plazo (uno o dos años). Con la reciente incorporación masiva de BESS en centrales generadoras PV y Eólicas para conformar plantas ERNC con capacidad de almacenamiento, la oferta de energía limpia existirá aún de noche.

Si se usa la estrategia de carga 80%-20% + carga de oportunidad, la energía se demandará tanto en las horas en que el servicio está suspendido y todos los buses en el terminal, como en las horas en que los buses están prestando el servicio y reciben carga de oportunidad en el terminal. La magnitud relativa de la demanda de energía durante la noche comparada con la requerida en horas de día, según los resultados obtenidos en este estudio, aparentemente depende de la longitud del recorrido, pero en estricto rigor la variable que explica la proporción es la capacidad de la batería del bus. Es así que la proporción es cercana a 2/3 a 1/3 (terminal no servicio, oportunidad en servicio) en el recorrido de 10 Km para buses con baterías de 300 KWh. Cuando el recorrido es de 20 Km, los buses que prestan el servicio usan baterías de 450 KWh y la necesidad de carga de oportunidad se reduce. En estas condiciones la proporción cambia a 80% versus 20% (terminal no servicio, oportunidad en servicio). Con todo, la oferta de energía limpia fuera de las horas de sol, estará garantizada por el desarrollo de plantas ERNC con capacidad de almacenamiento.

Un enfoque distinto es no emplear energía limpia, allí la forma de la curva de demanda de los terminales (horas de no servicio y oportunidad), tiene una importancia menor.

9.3 Instalación de paneles fotovoltaicos en el terminal

La inclusión de paneles fotovoltaicos en el diseño de un terminal de carga, ya sea para complementar la energía obtenida desde la red, o bien por adoptar una solución autosuficiente aislada del sistema, es una definición estratégica que implica evaluar conjuntamente dimensiones económicas, técnicas y de riesgo, las que por su naturaleza están fuera del alcance de este trabajo. Lo anterior no impide que al estudiarse el tema técnico se puedan establecer algunas recomendaciones como las que se resumen a continuación.

El empleo de paneles fotovoltaicos tiene sentido cuando se ha escogido la opción de carga nocturna + carga de oportunidad o simplemente de uso pleno de carga de oportunidad. Bajo estos supuestos se analizan los aspectos que se indican a continuación. Se supone el desarrollo de un mismo proyecto en distintas regiones del país, representadas por las ciudades de Antofagasta, La Serena, Santiago, Talca, Concepción, Temuco y Puerto Montt. La información empleada se extrajo del Explorador Solar de la Universidad de Chile.

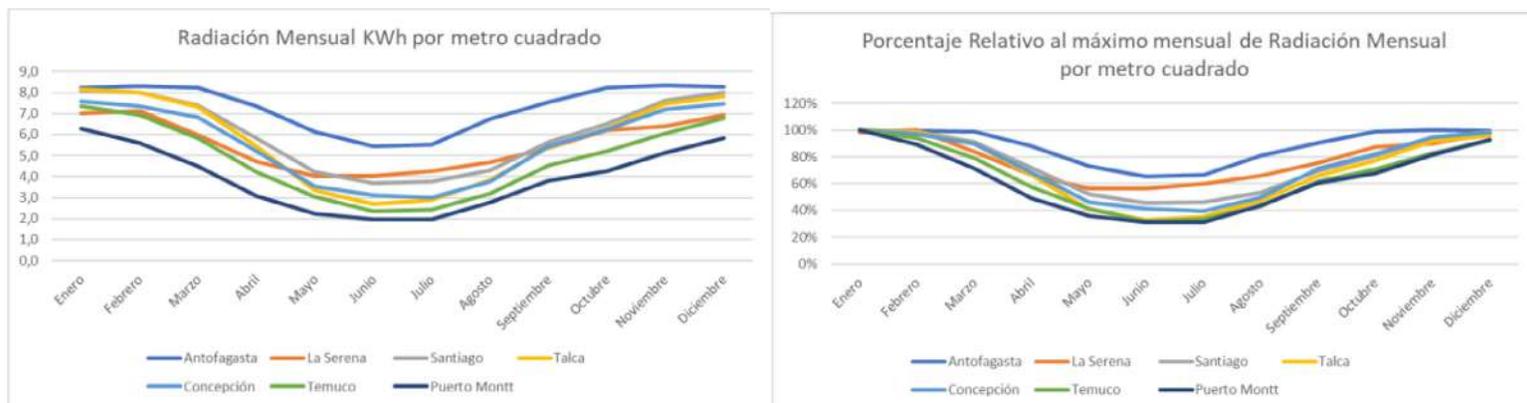
Magnitud de Radiación y Variación Mensual:

En su lado izquierdo, la Figura 2 muestra la radiación total mensual por metro cuadrado de las ciudades antes mencionadas. Se observa que la ciudad de mayor radiación es Antofagasta y la de menor es Puerto Montt, también se aprecia que en los meses de verano Antofagasta y Talca exhiben magnitudes comparables. Otro tanto, aunque a menor escala ocurre con La Serena, Santiago, Concepción y Temuco en el mismo período. En el lado derecho de la misma figura, se muestra el porcentaje mensual de radiación relativo al máximo anual determinado para cada ciudad. Se aprecia en el gráfico lo siguiente:

- En Antofagasta la relación entre la radiación máxima y la mínima mensual, varía entre 100% y 70% de verano a invierno. Para La Serena la variación es de 100% a 60%.
- En Santiago la variación es entre 100% y 45%.
- Para Talca, Concepción, Temuco y Puerto Montt la variación es de 100% a 30%.

Se concluye con esta información que si se desarrolla un mismo proyecto en todas las ciudades estudiadas, en Antofagasta se requieren menos paneles solares. Otro aspecto y tal vez el más importante, es que el diseño debe ser apto para proveer la energía que se demanda en el mes de menor radiación. Es así como el menor sobre equipamiento ocurriría en Antofagasta y el máximo de Talca al sur.

Figura 2: Radiación Mensual por Metro Cuadrado en Ciudades



Distribución Horaria Mensual de la Radiación en Ciudades:

Para Antofagasta, Santiago y Puerto Montt, en la Figura 3 se muestra la distribución horaria de la radiación total mensual por metro cuadrado. En ella además se ve un rectángulo que representa las horas en que los buses prestan el servicio de transporte de pasajeros (6:30 a 23:30 en este estudio). Así mismo se aprecian dos líneas paralelas, rotuladas como 300 W y 500 W respectivamente, éstas representan la capacidad de captación de un panel fotovoltaico de 600 W y de 1000 W (la superficie de un panel es 2 m²).

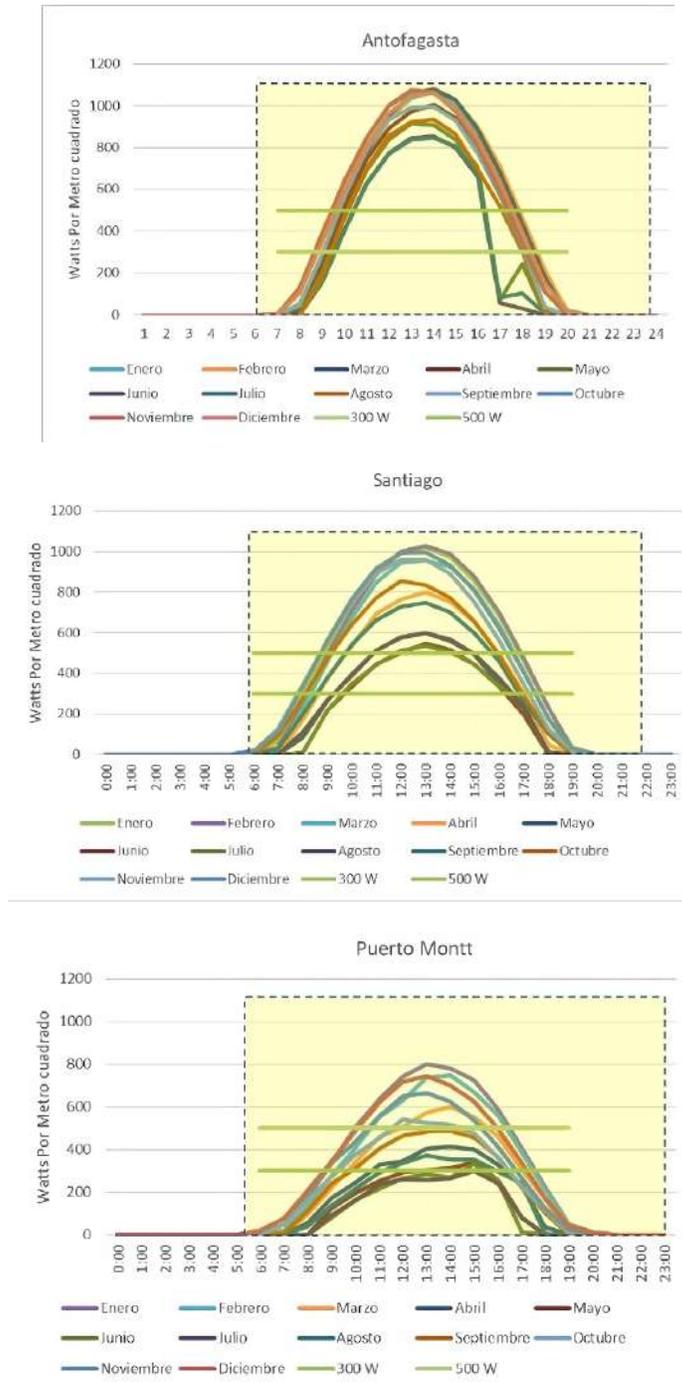
Las principales conclusiones que se pueden extraer de las figuras son las siguientes:

- Las horas de prestación del servicio de transporte público excede al tiempo en que hay radiación disponible. La radiación disponible entre las 6 y las 7 am, es poco densa para hacer una captación importante mediante paneles. Algo similar ocurre después de las 18 y 19 horas en invierno y verano respectivamente.
- Observando el cruce de las rectas 300 W y 500 W con las de distribución horaria, se aprecia que en Antofagasta la dispersión de la forma de la curva entre verano e invierno no es significativa, es importante en Santiago y severa en Puerto Montt. Esto define el número de horas en que se puede captar radiación de magnitud similar.
- El tercer aspecto es comparar verticalmente la forma de la curva de distribución horaria de radiación con las rectas 300 W y 500 W. Se concluye de este ejercicio lo siguiente:
 - En Antofagasta emplear paneles de 600 W o de 1000 W es eficiente durante todos los meses del año por unas 10 y 9 horas respectivamente.
 - En Santiago el panel más eficiente sería el de 600 W que permitiría captar energía entre 10 y 8 horas según se trate de invierno o verano.
 - En Puerto Montt no sería eficiente el uso de paneles solares como los estudiados para carga de oportunidad.

Respecto de diseños aislados de la red con alimentación exclusiva mediante paneles solares, cabe decir dos cosas:

- Cómo no es posible entregar carga de oportunidad en todas las horas de prestación del servicio, es necesario dejar algunos buses detenidos en el terminal sin prestar el servicio de recorrido regular junto con los demás hasta que sean requeridos. Existirá un conjunto cargado el día anterior para iniciar el circuito diario y otro cargado durante el día para concluir el ciclo diario una vez que no haya radiación disponible.
- Comparativamente con un diseño que obtenga energía de la red, el diseño con alimentación mediante paneles solares aislado de la red, este último requiere un mayor número de buses.

Figura 3: Distribución Horaria de Radiación Mensual en Antofagasta Santiago y Puerto Montt



9.4 Redundancia de infraestructura

Para terminales que acogen multiservicios, lo más probable es que el diseño involucre y en ciertos casos contemple una subestación eléctrica de bajada de alta a media tensión, redes de media tensión y transformadores de distribución. En estos casos la componente crítica es el transformador de poder, porque si llegara a fallar, este suceso compromete la operación del terminal durante el tiempo necesario para reemplazar la unidad fallada. Considerando que esos transformadores no son productos de stock y contar con un reemplazo puede tomar hasta un año, la solución pasa por tener un diseño redundante, esto es a lo menos dos transformadores de igual potencia, cada uno capaz de suplir la demanda del terminal para una subestación dedicada. Para una subestación compartida, al menos dos transformadores cada uno de ellos capaz de abastecer la demanda en el caso en que uno fallara.

Respecto de la red de media tensión, para asegurar que puedan alimentarse la red de cargadores, un diseño simple podría ser uno o más anillos en media tensión operados radiales, capaces de suministrar la demanda de todo el anillo desde un extremo. Esto aplicaría para terminales que tienen alimentación en la entrada tanto en alta tensión como en media tensión. Con todo una falla en la red de media tensión, dependiendo de su severidad, es reparable en horas o a lo más en un par de días.

Un último punto a comentar es el de los cargadores necesarios para carga de oportunidad en el terminal. Existen dos situaciones:

- Cuando la potencia del cargador de oportunidad es igual o menor que la de los necesarios para carga de la flota en reposo durante las horas de servicio suspendido. En este caso, son esos cargadores los que también se utilizarán para carga de oportunidad.
- Cuando la potencia del cargador de oportunidad es mayor que la de los necesarios para carga de la flota en reposo durante las horas de servicio suspendido. En este caso, es necesario agregar al diseño un conjunto de cargadores de oportunidad con la capacidad adecuada. Ha de tenerse en consideración que el número mínimo de esos cargadores es uno por cada recorrido, porque cargan secuencialmente los buses que arriban al terminal. Por razones de seguridad, ese número podría duplicarse o tomar un factor de redundancia mayor.

9.5 Seguridad de servicio

El concepto de seguridad de servicio en este estudio se asocia con la disponibilidad de energía eléctrica en los momentos críticos. Tratándose de una flota de buses eléctricos, esto ocurre cuando hay un corte de suministro en las horas en que la flota descansa en el terminal para cargar las baterías. Si no se puede realizar esa carga, la flota no podría prestar el servicio al día siguiente.

Existe más de una solución al problema, por ejemplo, contar con un sistema de almacenamiento de energía para emergencias, también un conjunto adicional de buses stand by con carga plena, o un grupo generador de emergencia. De estas tres, vistos los precios actuales, la más económica será la última a pesar de que la energía suministrada para emergencia no será de fuente limpia.



10

**IMPACTO
SOBRE LA RED
ELÉCTRICA**

10. IMPACTO SOBRE LA RED ELÉCTRICA

Se resume a continuación la demanda agregada de potencia que representarían las flotas de buses eléctricos a lo largo del país, suponiendo que están plenamente desplegados los servicios, manteniendo las cantidades que ha analizado el estudio: 6.452 buses eléctricos en la RM y 11.077 en las demás Regiones. Basándose en los resultados, se hace un análisis sobre el impacto que esa demanda sobre la red eléctrica.

10.1 Región Metropolitana

Tomando en cuenta que el total de buses es de 6.452, la demanda agregada (que es la exigencia sobre la infraestructura eléctrica de la RM), tendría los valores que se indican en la Tabla 12 y la Tabla 13.

Recorridos de 10 KM en un sentido: Fluctuaría entre 483,9 MW y 322,6 MW cuando la estrategia de uso de las baterías es de carga al 100%, registrándose el mayor valor cuando se decide un tiempo de carga igual a 4 horas y el menor si se escoge 3 horas. Si se adopta una estrategia de carga 80%-20% con carga de oportunidad, las cifras fluctúan entre 387,1 MW y 258,1 MW, correspondiendo el mayor valor a un tiempo de carga de 4 horas y el menor si el tiempo de carga es de 3 horas.

Recorridos de 20 Km en un sentido: Fluctuaría entre 725,9 MW y 483,9 MW cuando la estrategia de uso de las baterías es de carga al 100%, el mayor valor se registra cuando la estrategia de uso de las baterías es de carga al 100%, registrándose el mayor valor cuando se decide un tiempo de carga igual a 4 horas y el menor si se escoge 3 horas. Si se adopta una estrategia de carga 80%-20% con carga de oportunidad, las cifras fluctúan entre 580,7 MW y 387,1 MW, correspondiendo el mayor valor a un tiempo de carga de 4 horas y el menor si el tiempo de carga es de 3 horas.

Tabla 12: Demanda agregada para el total de buses eléctricos Región Metropolitana.
Estrategia de Carga plena 100%

Tiempo de carga [Horas]			3			4		
Recorrido en un sentido [Km]	Capacidad de la batería [KWh]	Frec. Pasada bus en parada [Min]	Máximo de cargas diferidas	Potencia del Cargador [KW]	Potencia Nominal Del Terminal [MW]	Máximo de cargas diferidas	Potencia del Cargador [KW]	Potencia Nominal Del Terminal [MW]
10	300	6	2	100,00	322,6	1	75	483,9
		10						
		12						
20	450	6	2	150,00	483,9	1	112,5	725,9
		10						
		12						

Tabla 13: Demanda agregada para el total de buses eléctricos Región Metropolitana.
Estrategia de Carga 80%-20% + Carga de Oportunidad

Tiempo de carga [Horas]			3			4		
Recorrido en un sentido [Km]	Capacidad de la batería [KWh]	Frec. Pasada bus en parada [Min]	Máximo de cargas diferidas	Potencia del Cargador [KW]	Potencia Nominal Del Terminal [MW]	Máximo de cargas diferidas	Potencia del Cargador [KW]	Potencia Nominal Del Terminal [MW]
10	300	6	2	100,00	258,2	1	75	387,1
		10						
		12						
20	450	6	2	150,00	483,9	1	112,5	725,9
		10						
		12						

Impacto en la Demanda de Potencia: Considerando que la demanda máxima bruta anual del SEN en 2023 fue de 11.500 MW y la de Enel Distribución de unos 3.500 MW, la proporción de la demanda agregada de los buses eléctricos fluctúa entre un 7% y un 21% de la demanda máxima actual de la Región Metropolitana. Si las demandas mencionadas se suman o no a la máxima regional depende de si coinciden o no con ella. Los procesos de carga nocturna no son coincidentes con la demanda máxima regional de modo que no contribuyen a la máxima. Distinto es el caso de la carga de oportunidad que si es sumable. En el extremo, si los buses sólo recibieran cargas de oportunidad durante las horas de recorrido, la coincidencia entre la demanda regional y la de los terminales podría ser máxima.

10.2 Estimación de la demanda para flota de 1200 buses

En el informe detallado¹¹ se analizan las exigencias que imponen 1200 buses, número que corresponde al indicado en la licitación MTT 2023.

Los datos que se emplean en los cálculos son los determinados para un recorrido de 10 Km y 20 Km en un sentido, considerando frecuencias de pasada de buses en las paradas cada 6, 10 y 12 minutos. Cabe recordar que las baterías del bus tendrían una capacidad de 300 KWh y 450 KWh para recorridos de 10 y 20 kilómetros en un sentido respectivamente.

Demanda agregada de la flota de buses: Tomando en cuenta el total de buses, la demanda agregada, que corresponde a la exigencia sobre la infraestructura eléctrica de la RM, sería:

- **Para recorridos de 10 Km en un sentido:** La demanda fluctuaría entre 60 MW y 90 MW cuando la estrategia de uso de las baterías es de carga al 100%, registrándose el mayor valor cuando se decide un tiempo de carga igual a 4 horas y el menor si se escoge 3 horas. Si se adopta una estrategia de carga 80%-20% con carga de oportunidad, las cifras fluctúan entre 48 MW y 72 MW, correspondiendo el mayor valor a un tiempo de carga de 4 horas y el menor si el tiempo de carga es de 3 horas.

¹¹ Detalles en la sección 12.2.3 del Capítulo 12 del Informe de Impacto del Desarrollo del Transporte Público Eléctrico sobre el Sistema Eléctrico Chileno.

- **Para recorridos de 20 Km en un sentido:** La demanda fluctuaría entre 90 MW y 135 MW cuando la estrategia de uso de las baterías es de carga al 100%, el mayor valor se registra cuando la estrategia de uso de las baterías es de carga al 100%, registrándose el mayor valor cuando se decide un tiempo de carga igual a 4 horas y el menor si se escoge 3 horas. Si se adopta una estrategia de carga 80%-20% con carga de oportunidad, las cifras fluctúan entre 72 MW y 108 MW, correspondiendo el mayor valor a un tiempo de carga de 4 horas y el menor si el tiempo de carga es de 3 horas.
- **Impacto en la Demanda de Potencia:** Tomando como base una demanda máxima de 3,500 MW para la RM y que la potencia que requerirán los terminales podría fluctuar entre 48 y 135 MW, según sea el caso, la proporción de la demanda agregada de los buses eléctricos fluctúa entre un 1,3% y un 3,9% de la demanda máxima actual de la RM, magnitudes que son comparables con la tasa anual de crecimiento de la demanda agregada regional. Si las demandas mencionadas se suman o no a la máxima regional depende de si coinciden o no con ella. Los procesos de carga nocturna no son coincidentes con la demanda máxima regional de modo que no contribuyen a la máxima. Distinto es el caso de la carga de oportunidad que si es sumable. En el extremo, si los buses sólo recibieran cargas de oportunidad durante las horas de recorrido, la coincidencia entre la demanda regional y la de los terminales podría ser máxima.

Exigencias de terminales de carga multiservicio: Considerando agrupaciones de 150, 200 y 250 buses por terminal. Se aprecia en ella lo siguiente:

- **Para recorridos de 10 Km en un sentido:** El número de terminales que disminuye conforme se concentran más buses, fluctúa entre 8 y 5. Para carga plena 100% y tiempo de carga de 3 horas, la potencia del terminal se mueve en el rango de 8 a 13 MW. Si se ocupa un tiempo de carga de 4 horas, la potencia del terminal se mueve entre 11 y 19 MW. Para carga 80%-20% con carga de oportunidad y tiempo de carga de 3 horas, la potencia del terminal se mueve en el rango de 6 a 10 MW. Si se ocupa un tiempo de carga de 4 horas, la potencia del terminal se mueve entre 9 y 15 MW.
- **Para recorridos de 20 Km en un sentido:** El número de terminales que disminuye conforme se concentran más buses, fluctúa entre 8 y 5. Para carga plena 100% y tiempo de carga de 3 horas, la potencia del terminal se mueve en el rango de 11 a 19 MW. Si se ocupa un tiempo de carga de 4 horas, la potencia del terminal se mueve entre 17 y 28 MW. Para carga 80%-20% con carga de oportunidad y tiempo de carga de 3 horas, la potencia del terminal se mueve en el rango de 9 a 15 MW. Si se ocupa un tiempo de carga de 4 horas, la potencia del terminal se mueve entre 14 y 23 MW.

Tomando como base que la potencia instalada de las subestaciones AT/MT de la RM se sitúa entre 50 MW y 200 MW y que la potencia que requerirán los terminales podría fluctuar entre 6 y 28 MW, según sea el caso, la proporción de la demanda agregada de los buses eléctricos significa entre un 12% a un 56% de la capacidad instalada para subestaciones de 50 MW y entre un 3% a un 14% de la capacidad instalada para subestaciones de 200 MW. Si las demandas mencionadas se suman o no a la máxima de la subestación depende de si coinciden o no con ella. Los procesos de carga nocturna no son coincidentes con la demanda máxima de la subestación de modo que no contribuyen a la máxima de la instalación. Distinto es el caso de la carga de oportunidad que si es sumable. En el extremo, si los buses sólo recibieran cargas de oportunidad durante las horas de recorrido, la coincidencia entre la demanda de la subestación y la de los terminales podría ser máxima. Se concluye de este análisis que:

- El impacto de la demanda de los terminales de carga multiservicio, sobre la máxima de la subestación, está fuertemente ligado a si el proceso de carga es coincidente o no con esa demanda.
- En el caso de las subestaciones de menor capacidad (50 MW), la proporción de la demanda del terminal sobre la capacidad de la subestación es importante y podría haber problemas, aunque no existiera coincidencia.

Para la red MT, vistos los resultados, es claro que en la mayoría de los casos la solución puede establecerse con alimentadores dedicados. Amén del número de alimentadores destinados a abastecer la demanda, se debe contemplar un diseño redundante por un problema de confiabilidad.

10.3 Regiones

La estimación de la demanda agregada por regiones, se desarrolló mediante una versión ad hoc del Modelo de Dimensionamiento de Flotas¹², considerando como dato de entrada el número de buses por ciudades y regiones obtenidos de la Consultoría para Catastro de Terminales y/o Depósitos de Buses para el Transporte Público Urbano, preparado para la Agencia de Sostenibilidad Energética. (18.06.2021)¹³, un bus eléctrico de 8,5 m de largo y 15-30 asientos y un recorrido típico de 10 Km en un sentido. El servicio estaría activo por 17 horas al día y 7 horas de no servicio. La velocidad de media de los buses en marca sería de 20 Km/hora, habría 4 paradas de 1 minuto por kilómetro y le tiempo de detención en el terminal sería de 10 minutos.

Los resultados del total de demanda en regiones se muestra en la Tabla 14, en donde se aprecia claramente la importancia de escoger tiempos de carga de 3 horas y emplear la estrategia de Carga 80%-20% + Carga de Oportunidad.

La apertura de las demandas por Regiones se muestra en la Tabla 15. Los resultados muestran grandes concentraciones de demanda en Valparaíso y Bio Bio, que son importantes en relación con la demanda máxima de esas zonas. De algún modo eso evidencia la relevancia de desarrollar una adecuada planificación de la red eléctrica coordinada con la estrategia de reemplazo de los buses actuales por eléctricos.

El ámbito de estudio de la red eléctrica abarcaría a líneas de alta tensión, ampliación de la capacidad de las subestaciones AT/MT existentes o bien nuevas subestaciones.

Tabla 14: Demanda agregada para el total de buses eléctricos en Regiones.
Estrategias de Carga plena 100% y Carga 80%-20% + carga de Oportunidad

Total Regiones	Carga Plena 100%		Carga 80%-20% + Carga de oportunidad	
Número de buses	11.077			
Tiempo de carga [horas]	3	4	3	4
Demanda Agregada Región [MW]	554	826	440	660

¹² Detallado en el capítulo 8 del Informe de Impacto del Desarrollo del Transporte Público Eléctrico sobre el Sistema Eléctrico Chileno.

¹³ Nuria Hartmann, In-Data SpA: Consultoría para Catastro de Terminales y/o Depósitos de Buses para el Transporte Público Urbano, preparado para la Agencia de Sostenibilidad Energética. (18.06.2021)

Tabla 15: Demanda agregada para el total de buses eléctricos en cada Región.
Estrategias de Carga plena 100% y Carga 80%-20% + carga de Oportunidad

Región	N° de Buses	Demanda agregada de potencia por Regiones [MW]			
		Carga Plena 100%		Carga 80%-20% + Carga de oportunidad	
Arica y Parinacota	248	12,4	18,6	9,9	14,9
Tarapacá	355	17,8	26,6	14,2	21,3
Antofagasta	972	48,6	72,9	38,9	58,3
Atacama	97	4,9	7,3	3,9	5,8
Coquimbo	567	28,4	42,5	22,7	34,0
Valparaíso	2182	109,1	163,7	87,3	130,9
O'Higgins	328	16,4	24,6	13,1	19,7
Maule	672	33,6	50,4	26,9	40,3
Ñuble	368	18,4	27,6	14,7	22,1
Bío Bío	3046	152,3	228,5	121,8	182,8
Araucanía	947	47,4	71,0	37,9	56,8
Los Lagos	908	45,4	68,1	36,3	54,5
Los Ríos	317	15,9	18,6	9,9	14,9
Magallanes	70	3,5	5,3	2,8	4,2
Tiempo de carga [horas]		3	4	3	4



WW.CIGRE.CL