EDUARDO ROSERO

SCALING UP RENEWABLE ENERGY II (SURE II) ECUADOR

INFORME II Y FINAL ACTIVIDAD 3

05.06.2024

This publication was produced for review by the United States Agency for International Development. It was prepared by the Scaling Up Renewable Energy II program (Tetra Tech ES, Inc., prime contractor).

(DELETE THIS BLANK PAGE AFTER CREATING PDF. IT'S HERE TO MAKE FACING PAGES AND LEFT/RIGHT PAGE NUMBERS SEQUENCE CORRECTLY IN WORD. BE CAREFUL TO NOT DELETE THIS SECTION BREAK EITHER, UNTIL AFTER YOU HAVE GENERATED A FINAL PDF. IT WILL THROW OFF THE LEFT/RIGHT PAGE LAYOUT.)

SCALING UP RENEWABLE ENERGY II (SURE II) ECUADOR

Informe Avance. Actividad 3. Análisis y definición de especificaciones de un bus eléctrico que pueda operar en las rutas alimentadoras definidas por la EPMTPQ y conectadas con la estación El Labrador

Prepared for:
Energy and Infrastructure Office
U.S. Agency for International Development
1300 Pennsylvania Ave., NW, Washington, DC 20523

Prepared by:
Tetra Tech ES, Inc.
1320 North Courthouse, Suite 600
Arlington, VA 22201
www.tetratech.com

USAID Contract No. 7200AA19D00029/7200AA20F00013

DISCLAIMER
The views expressed in this publication do not necessarily reflect the views of the United States Agency for International Development or the United States Government.

CONTENIDO

ABREVIATURAS 1

RESUMEN EJECUTIVO 3

1 INTRODUCTION 7

2 RUTAS ALIMENTADORES 8
2.1 CARACTERISTICAS OPERACIONALES DE LAS RUTAS ALIMENTADORAS 8
2.2 CARACTERISTICAS DE LAS VIAS DE LAS RUTAS ALIMENTADORAS: 13
2.3 FLOTA DE BUSES ELECTRICOS: 16

3 OPCIONES DE TECNOLOGIA DE BUSES ELECTRICOS A BATERIA 17
3.1 BUSES DE CARGA NOCTURNA O CARGA LENTA 19
3.2 BUSES DE CARGA RÁPIDA 19
3.3 CARGA ULTRA RÁPIDA 20
3.4 CAMBIO DE BATERÍAS 21
3.5 TROLEBUSES 21
3.6 RESUMEN DE BUSES ELECTRICOS 22

4 CARACTERISTICAS PROPUESTAS PARA BUS ELECTRICO Y EL SISTEMA DE CARGA DE LOS BUSES ELECTRICO 23
4.1 CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS 23
4.2 ENFOQUE DEL SISTEMA DE DISEÑO PARA BUSES ELÉCTRICOS 25
4.3 SISTEMA PROPUESTA E-BUS 27

5 SISTEMA DE ALIMENTACION PARA LA INFRAESTRUCTURA DE RECARGA 30
5.1 SISTEMA DE CARGA 30
5.2 CONEXIÓN ELÉCTRICA 33

6 IMPACTO AMBIENTAL Y ENERGIA 37
6.1 IMPACTOS ESTUDIADOS 37
6.2 IMPACTO EN CONTAMINACION LOCAL 37
6.3 IMPACTO DE GASES EFECTO INVERNADERO 39
6.4 EMISIONES DE RUIDO 43
6.5 IMPACTO EN ENERGIA 43
6.6 IMPACTOS AMBIENTALES POTENCIALES DE BATERIAS 44

7 IMPACTO SOCIAL Y TRANSICIÓN JUSTA 45

8 IMPACTO FINANCIERO Y ECONOMICO 46
8.1 BASE METODOLÓGICA 46
8.2 COMPARACION ENTRE BUS A DIESEL Y ELECTRICO 47
8.3 INVERSION DE FLOTA 51
8.4 RIESGOS Y SU MANEJO 52

9 POTENCIAL FINANCIMIENTO CLIMATICO 53
9.1 GCF 53
9.2 MERCADO DE CABONO 54
9.3 RESUMEN DE OPCIONES 56

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 57

11 REFERENCIAS 60

12 ANEXOS 61

12.1 ANEXO I: ANALISIS FINANCIERO Y CALCULO DE EMISIONES DE GEI Y CONTAMINANTES LOCALES 61

12.2 ANEXO II: TERMINOS DE REFERENCIA (VOLUMEN I Y VOLUMEN II) 61

ABREVIATURAS

AC	Ajustes Correspondientes
ADB	Banco Asiático de Desarrollo
AFD	Agencia Francesa de Desarrollo
BC	Carbono negro
BEB	Buses Eléctricos a Batería
BRT	Buses de Tránsito Rápido
CAPEX	Inversión de Capital
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
CEPE	Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas
CH_4	Gas metano
CO_2	Dióxido de carbono
COPERT	Modelo para calcular emisiones de transporte de carretera
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
CSC	Costo social del carbono
EEQ	Empresa Eléctrica Quito
EIA	Administración de Información Energética de Estados Unidos
EPMTPQ	Empresa Pública Metropolitana de Transporte de Pasajeros Quito
ESE	Energía Sostenible para Ecuador
FCEB	Buses Eléctricos de Pila de Combustible
FMI	Fondo Monetario Internacional
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GWP	Potenciales de Calentamiento Global
HVAC	Sistema de Calefacción, Ventilación y Aire acondicionado
ICTT	Consejo Internacional de Transporte Limpio
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
ITMO	Resultados de Mitigación Transferidos Internacionalmente
LFP	Fosfato Ferroso de Litio
LMO	Óxido de Magnesio y Litio
LTO	Óxido de Titanita-Litio
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio

N_2O	Óxido nitroso
NDC	Contribución Nacional Determinada
NMC	Óxido de Cobalto, Magnesio, Níquel y Litio
NO_X	Óxido de nitrógeno
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OPEX	Costo de Operación
PIB	Producto Interno Bruto
$PM_{2.5}$	Material Particulado artes por millón de 2.5 micras
RAP	Responsabilidad Ampliada del Productor
RMU	Unidad principal en anillo
RPC	República Popular de China
SO_2	Dióxido de Azufre
SOH	Estado de salud
SURE	Scaling Up Renewable Energy
TCO	Costo Total de Propiedad
TNM	Transporte No Motorizado
TTW	Tank to Wheel (del tanque a la rueda)
UNFCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
USAID	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo
VCS	Verified Carbon Standard
VCU	Reduciones Verificadas de Emisiones
WTT	Well to Tank (del pozo al tanque)
WTW	Well to Wheel (del pozo a la rueda)

RESUMEN EJECUTIVO

1. La Actividad 3 comprende el análisis y definición de las características técnicas de un bus eléctrico de 12 metros que pueda operar en las rutas alimentadoras conectadas con la Estación El Labrador y definidas por la EPMTPQ. Dentro del alcance de esta actividad se incluye la recolección de información técnica de las rutas alimentadoras y flota necesaria para definir las especificaciones técnicas; un análisis de tecnología disponible de buses a implementar; análisis del sistema de carga; un análisis de la red eléctrica para el sistema de carga; un análisis de emisiones y energía; análisis financiero y económico y un análisis de financiamiento climático. Igualmente, se incluye la elaboración de los términos de referencia para la adquisición de los buses que sean definidos para operar en las rutas alimentadoras, así como el sistema de carga y elementos adicionales que son necesarios para la implementación.

2. El análisis elaborado en el desarrollo de esta actividad de la consultoría no tiene como alcance hacer una revisión de los acuerdos entre los operadores privados de las rutas alimentadoras que tienen con la EPMTPQ, tampoco se hace un análisis financiero si la remuneración que se hace a los operadores privados es adecuada, no se hace un análisis del modelo de negocios utilizado actualmente o de potenciales modelos de negocios a utilizar con la entrada en operación de flota eléctrica. Asimismo, no se hace un análisis si la oferta en operación se ajusta a la demanda de las rutas alimentadoras, ni tampoco tiene un alcance de discutir si la frecuencia de las rutas, el recorrido, las paradas son las adecuadas para una operación óptima. Igualmente, el estudio no tiene como alcance hacer una caracterización socioeconómica de la zona por donde circulan las rutas alimentadoras. El análisis parte de información de la operación actual de las rutas alimentadoras (kilómetros al día, pendiente máxima, horario de operación) que son variables relevantes para la identificación de las especificaciones técnicas de buses de 12 m que puedan operar en las rutas seleccionadas. Asimismo, el análisis toma información de la estructura de costos del pago del servicio de alimentadores calculado por la EPMTPQ.

3. La Empresa Pública Metropolitana de Transporte de Pasajeros de Quito (EPMTPQ) actualmente administra los corredores Trolebús y Ecovía. Ocho rutas[1] operadas por transportadores privados y remuneradas por la EPMTPQ, alimentan la estación intermodal El Labrador donde inicia la línea del metro de Quito (en el sentido norte-sur) y también llegan los servicios operados por la EPMTPQ de los Circuitos 1 y 2 del Trolebús, así como, la ruta de integración entre Rio Coca y El Labrador. Un total de seis empresas privadas operan las ocho rutas que se integran a la Estación El Labrador. La empresa Calderón opera las rutas 1 y 8, la empresa Llano Grande opera la ruta 2, mientras que cuatro empresas (Tranzata, Translatinos, Transplaneta y Compañía de Transportes Vencedores de Pichincha - VEPIEX SA) operan las rutas 3, 4, 5, 6 y 7. Todas estas rutas son operadas por buses tipo, es decir, buses de 12 metros.

4. Las rutas 2 a 8 han sido autorizadas por la Secretaría de Movilidad a través de permisos de operación otorgados a la EPMTPQ. La EPMTPQ opera estas rutas mediante acuerdos de pagos con empresas operadoras privadas. Por otro lado, la ruta 1 (Cisne-Zabala) es operada directamente por la Empresa Calderón a través de permiso de operación otorgado por la Secretaría de Movilidad y la decisión de renovar el permiso de operación de la ruta

[1] Siete de las rutas inician su recorrido en la Estación El Labrador y una ruta denominada “inter-terminales CL” inicia su recorrido en el Terminal Carcelén. Es importante mencionar, que no hay un impacto que la ruta 8 inicie el recorrido en Carcelén y no en El Labrador.

está en cabeza de la Secretaría. Es así como la incorporación en el corto plazo (18 meses) de rutas alimentadoras operadas con buses eléctricos es más factible en aquellas rutas donde la EPMTPQ tenga el permiso de operación otorgado por la autoridad de transporte, como es el caso de las rutas 2 a 8. Sin embargo, la ruta 3 tiene una Acción de Protección judicial que impide hacer modificaciones en el número de unidades que operan en esa ruta.

5. Para determinar el sistema de e-bus propuesto, es importante conocer la distancia máxima diaria recorrida y así determinar el tamaño de la batería o el sistema de carga. La distancia diaria recorrida es 210 km por bus en las rutas alimentadoras 2 a 8. Al excluir la ruta 1 y haciendo un enfoque en las rutas 2 a 8, se necesitan únicamente un set de baterías de 360 kWh[2], siendo un valor usual y común en las ofertas de buses, para realizar únicamente carga nocturna. Con este tamaño de batería, los e-buses de las rutas 2-8, pueden funcionar con un coeficiente de reserva suficiente, por lo que no es necesario realizar carga durante el día.

6. La ciudad tiene rutas con pendientes acentuadas, incluyendo varias rutas con pendientes máximas de 10 a 15%. Esto requerirá autobuses eléctricos con suficiente potencia de motor, lo que aumentará ligeramente los costos del autobús. Sin embargo, el consumo eléctrico no se ve tan afectado por las pendientes debido al sistema de recuperación de energía en los trayectos cuesta abajo. La temperatura tiene poca variación anual y oscila en torno a los 10-15 grados centígrados anuales, lo que significa que se puede operar sin uso del aire acondicionado, por lo cual se espera un rendimiento bastante bueno de los buses eléctricos en Quito

7. Al incluir la ruta 1, diariamente se llega a necesitar un set de baterías de 450 kWh donde los buses operan hasta 260km, una demanda bastante alta[3]. Para la ruta 1 actualmente existen dos opciones: Comprar buses con un tamaño de batería de 450 kWh y hacer cargas nocturnas únicamente, o establecer un sistema con carga diurna de 15-30 minutos diarios junto con un cargador de 300-400kW, haciendo la carga o en patio durante periodo valle o cerca del final de la ruta con un cargador instalado hacia la estación final de la ruta. Con este sistema se podría comprar un bus eléctrico con un set de batería de 320 kWh, donde las baterías tengan la capacidad de recibir al menos 300 kW de potencia.

8. El sistema de carga propuesto para los e-buses de 12m se basa en una carga lenta durante la noche. En promedio se calcula que cada bus utilizará 200 kWh diarios, con un horario de operación desde las 5:00 am hasta las 11:00 pm y periodos de carga fluctuando desde 11:00 pm o 12:00 am hasta las 5:00 am, es decir unas 5-6 horas. Para poder cumplir con una carga completa del bus durante cinco (5-6) horas se requiere de una potencia de 50 kW por bus[4]. En este sentido, se recomienda la carga por enchufe y no por pantógrafo debido a los menores costos y a las menores pérdidas de eficiencia energética de los cargadores por enchufe. La carga nocturna es un sistema sencillo y fiable, con un funcionamiento similar al de un bus diésel, dicho sistema tampoco representa una carga

---

[2] Calculo con base en el consumo promedio de 1kWh por km, distancia diaria incluyendo ida al patio de 210km, 20% de reserva general, 10% de reserva adicional por conductor o tráfico, 20% pérdida de SOH de las baterías hasta el año 8.

[3] Calculo con base el un consumo promedio de 1kWh por km, distancia diaria incluyendo ida al patio de 260km, 20% de reserva general, 10% de reserva adicional por conductor o tráfico, 20% pérdida de SOH de las baterías hasta el año 8.

[4] La eficiencia de un cargador es de mínimo 90%, es decir, se entrega 54 kW por hora con un cargador de 60 kW. Cuando el estado de batería esta encima de los 80% SOH se reduce la velocidad de carga.

adicional de electricidad en horas diurnas por la red eléctrica de Quito. La carga de oportunidad y la carga ultrarrápida pueden ser opciones para los buses de 18 a 24m operando las rutas troncales de Quito.

9. En comparación con un autobús diésel Euro III nuevo, cada autobús eléctrico de batería que funcione en Quito podría reducir 90 toneladas de CO_2 al año y, a lo largo de su vida útil, 1,450 toneladas. En comparación con los autobuses diésel, esto reduce los gases de efecto invernadero en un 80%, basándose en una evaluación del ciclo de vida y teniendo en cuenta el factor de emisión del sistema interconectado de Quito. Las emisiones de CO_2 relacionadas con la batería son recuperadas por el autobús en menos de cinco meses de operación. Los autobuses eléctricos también reducen al año 20 kg de $PM_{2.5}$, 1,165 kilogramos de NOx y 14 kg de SO_2, reducen las emisiones de ruido en un 50% y ahorran anualmente por autobús 960 GJ de energía debido a que la tracción eléctrica es mucho más eficiente energéticamente que los motores de combustión interna.

10. Se ha realizado una evaluación diferencial de los costos de vida útil comparando los buses diésel Euro III y los buses eléctricos basándose en los costos locales válidos en Quito. Los datos para los buses Euro III se obtiene de la EPMTPQ de la actualización de la estructura de costos de pago del servicio de alimentadores. En comparación con un nuevo bus diésel Euro III, el costo de inversión de un bus eléctrico, incluidos los buses, cargadores y conexión a la red, resulta en una inversión 2 veces superior. El costo financiero total de propiedad de un bus eléctrico es casi igual al de un bus diésel, esto al incluir el diésel subsidiado. Sin embargo, al calcularlo con un diésel no subsidiado el TCO del bus eléctrico es 18 % menor que el de un bus diésel. El costo económico total de propiedad (que incluye los costos económicos de los contaminantes, el CO_2 y el ruido) es un 24% inferior al de un autobús diésel. Esto demuestra claramente la rentabilidad de la operación de buses eléctricos en Quito.

11. La EPMTPQ puede adquirir 40 Autobuses Eléctricos a Baterías, que en un día promedio consumen 7.1 MWh. La carga se realizará en la estación de El Labrador entre 11:00 pm y 5:00 am (carga nocturna). La demanda máxima de energía será de 2 MW, que normalmente se produce entre la medianoche y las 5:00 am. El Sistema propuesto es con cargador centralizado en contenedor y cada contenedor tiene 10 pilas con 2 conexiones pudiendo cargar 20 buses. La inversión total sería 12.5 MUSD incluyendo su sistema de carga, contrato de mantenimiento y capacitación, además de grúa y asistencia técnica. Para reducir los riesgos es fundamental tener contratos de mantenimiento y de capacitación con el proveedor de los buses y que la empresa proveedora tenga la solidez, experiencia y capacidad financiera para ofrecer garantías adecuadas.

12. Para llegar a costos más bajos y un sistema más confiable y robusto es necesario empezar con una flota mínima que no debería estar por debajo de 40 unidades. Esto facilita el establecimiento de un sistema de carga eficiente, sólido y de menor inversión por bus. Es importante considerar que, al comprar una flota mayor, los costos de los buses eléctricos se reducen significativamente, pero más importante aún es la posibilidad de establecer con el fabricante un programa de mantenimiento, reparación y capacitación del personal local a un costo razonable. Eso es crítico para asegurar una alta disponibilidad en la flota de buses eléctricos.

13. El impacto del CO_2 podría monetizarse a través de la financiación climática, en este estudio se ha enfocado en dos opciones de financiación climática directa con el Fondo Verde del

Clima (GCF) e indirecta vinculada a la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) con el mercado voluntario y regulado. El enfoque recomendado consiste en buscar un promotor de proyecto que registre el proyecto bajo el esquema de Resultados de Mitigación Transferidos Internacionalmente (ITMOs), un nuevo conjunto de disposiciones basadas en el mercado definidas en el artículo 6 del Acuerdo de París. Ecuador aún no tiene un acuerdo bilateral con ningún país para comercializar este tipo de créditos de carbono, pero tiene un gran interés de entrar en el mercado de ITMOs.

14. Elaboración de las especificaciones técnicas para la adquisición de los buses eléctricos y sistema de carga, incluyendo los requerimientos de mantenimiento y capacitación, entre otros, hacen parte integral de este estudio y se encuentran detallados en el Anexo II.

1 INTRODUCTION

En Ecuador, se han establecido importantes directrices en materia de movilidad sostenible a nivel nacional. Por ejemplo, en la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC), se incluye como una iniciativa incondicional del sector de energía la meta de impulsar el transporte público masivo principalmente mediante energía eléctrica (Ministerio de Energía, 2021). Asimismo, la Ley Orgánica de Competitividad Energética expedida en enero de 2024 modifica la Ley Orgánica de Eficiencia Energética[5], en su artículo 24, establece que a partir del año 2030[6] todos los vehículos destinados al transporte público urbano e interparroquial en el Ecuador continental deberán ser exclusivamente de medio motriz 100% eléctrico o de cero emisiones (Asamblea Nacional de la República de Ecuador, 2019). En este contexto, el Programa Scaling Up Renewable Energy (SURE), una iniciativa de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID, por sus siglas en inglés), se busca apoyar a los diferentes países socios en el cumplimiento de los compromisos establecidos en las Contribuciones Nacionales Determinadas (NDCs) a nivel internacional, así como también acelerar la transición energética y sostenible.

Bajo este programa, Tetra Tech es la entidad implementadora del proyecto Energía Sostenible para Ecuador (ESE). Dicha entidad ha contratado a Grütter Consulting para la ejecución de la presente consultoría con el fin de proveer asistencia técnica la Empresa Pública Metropolitana de Transporte de Pasajeros Quito (EPMTPQ) encargada de la operación de los corredores de Buses de Tránsito Rápido (BRT) en Quito: Trolebús y Ecovía.

Los dos objetivos principales del proyecto son: (i) proveer asistencia técnica a la EPMTPQ de manera que le permita tomar decisiones sobre las inversiones prioritarias y definir sus características técnicas para la exitosa implementación de la estrategia de electromovilidad de la empresa y (ii) proveer asistencia técnica a la EPMTPQ de manera que le permita preparar un 'Plan de Acceso Universal' para los usuarios del corredor Trolebús acorde con los lineamientos de la Secretaría de Inclusión Social.

La consultoría comprende cinco componentes que se detallan a continuación:

Actividad 1. Evaluación de la viabilidad de convertir buses diésel a eléctricos.
Actividad 2. Análisis de la demanda de energía para la operación de los 50 trolebuses.
Actividad 3: Análisis de buses eléctricos de 12 metros para implementar en las rutas alimentadoras.
Actividad 4: Proponer medidas para mejorar la accesibilidad al sistema del corredor Trolebús
Actividad 5: Compartir lecciones aprendidas.

En el marco del desarrollo de esta consultoría, y en desarrollo de la *"Actividad 3 Análisis y definición de especificaciones de un bus eléctrico que puedan operar en las rutas alimentadoras definidas por la EPMTPQ y conectadas con la Estación El Labrador",* este informe es un avance de progreso de esta actividad.

Para el desarrollo de esta actividad se inició con la recolección de la información de las rutas alimentadoras con base en las necesidades indicadas por la EPMTPQ, son rutas que conectan con El Labrador teniendo en cuenta que en su mayoría son rutas en las que la EPMTPQ tiene los permisos de operación expedidos por la Secretaría de Movilidad de Quito y son operadas por operadores privados a través de acuerdos firmados entre la EPMTPQ y los operadores. Dicha identificación de rutas relevantes

[5] https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2022/12/20190319-S_R_O_449_19_MARZO_LEY-ORGANICA-DE-EFICIENCIA-ENERGETICA.pdf
[6]https://www.pudeleco.com/infos/Ley%20Org%C3%A1nica%20de%20Competitividad%20Energ%C3%A9tica.pdf

para la EPMTPQ es el punto de partida para continuar con los análisis posteriores que se realizan respecto la evaluación de alternativas tecnológicas de buses, opciones de sistema de carga de los buses eléctricos, el sistema de alimentación, el análisis del impacto ambiental y energía, las estimaciones del impacto financiero y económico, el potencial de financiamiento climático y finalmente a partir de estos elaborar los respectivos términos de referencia para la adquisición de los buses eléctricos y la infraestructura de recarga partiendo del presupuesto disponible en la presente vigencia de 12 millones de dólares.

2 RUTAS ALIMENTADORES

2.1 CARACTERISTICAS OPERACIONALES DE LAS RUTAS ALIMENTADORAS

La Empresa Pública Metropolitana de Transporte de Pasajeros de Quito (EPMTPQ) creada mediante la Ordenanza Municipal No. 0314 del 13 de julio de 2010; actualmente administra los corredores Trolebús y Ecovía. El Corredor Occidental y 48 rutas alimentadoras son operados por empresas de transportadores privados. La siguiente tabla muestra el listado de puntos de integración de las rutas alimentadoras administradas por la EPMTPQ y el número de rutas por punto de integración. Un total de 11 puntos de integración y 48 rutas alimentadoras en operación.

TABLA 1: Rutas alimentadoras que son administradas por la EPMTPQ

Puntos de Integración de rutas Alimentadoras	Número de Rutas
Capulí	2
Estación El Recreo	6
Estación Guamaní	9
Estación Labrador	7
Estación Magdalena	1
Estación Río Coca	11
Morán Valverde	2
Parada Puente de Guajaló	1
Playón de la Marín	1
Terminal Carcelén	5
Terminal Quitumbe	3
Total	**48**

Fuente: Elaborado con base en información de EPMTPQ, 2024.

Para iniciar la electrificación de la flota alimentadora de buses de 12m, la EPMTPQ da prioridad a las rutas con punto de integración la Estación El Labrador, en particular, porque las rutas alimentadoras que se integran a la estación El Labrador fueron las primeras rutas alimentadoras que se integraron al Corredor Trolebús cuando la última estación era La Y y luego se hizo la expansión hasta El Labrador. Asimismo, es prioridad para la EPMTPQ la operación de la ruta entre los terminales Carcelén - Quitumbe que era operada con buses articulados directamente por la EPMTPQ, pero el servicio fue

suspendido debido a los efectos del Covid-19 y actualmente esta ruta es operada por una empresa privada.

Ocho rutas[7] de las 48 rutas operadas por transportadores privados y remuneradas por la EPMTPQ, alimentan la estación intermodal El Labrador donde inicia la línea del metro de Quito (en el sentido norte) y también llegan los servicios operados por la EPMTPQ de los Circuitos 1 y 2 del Trolebús, así como, la ruta de integración entre Rio Coca y El Labrador.

Un total de seis empresas privadas operan las ocho rutas que se integran a la Estación El Labrador. La empresa Calderón opera las rutas 1 y 8, la empresa Llano Grande opera la ruta 2, mientras que cuatro empresas (Tranzata, Translatinos, Transplaneta y Compañía de Transportes Vencedores de Pichincha - VEPIEX SA) operan las rutas 3, 4, 5, 6 y 7, indicadas en la siguiente tabla. La distancia máxima recorrida por un bus en cada ruta es una variable clave para el diseño de la capacidad de la batería de un bus eléctrico.

TABLA 2: Parámetros operacionales en día ordinario (lunes a viernes, color verde), sábado (color blanco) y domingo (color gris) de las rutas alimentadoras.

No	Ruta	Ruta (km)(1)	Flota (2)	Vueltas día (3)	km/día bus (4)	Intervalo pico (min)	Ciclo pico (min)	Hora Inicio	Hora Final
1	Cisne-Zabala	34.61	10	70	242.27	12	110	05:10	21:40
2	Llano Grande	30.70	10	60	184.20	13	101	05:10	21:40
3	Comité del Pueblo	14.45	12	140	168.58	7	58	05:15	21:40
4	Cotocollao	13.46	10	137	184.40	7	52	05:15	22:40
5	Kennedy	9.71	4	72	174.78	13	45	05:15	22:40
6	Laureles	9.65	3	61	194.61	15	45	05:15	22:40
7	Rumiñahui	11.21	6	107	199.91	8	43	05:15	22:40
8	Inter-terminales CL	14.68	10	122	179.10	7	52	05:10	21:35
1	Cisne-Zabala	34.61	9	54	207.66	15	110	05:30	21:37
2	Llano Grande	30.70	8	48	184.20	16	100	05:30	20:40
3	Comité del Pueblo	14.45	11	116	151.73	6	56	06:05	20:40
4	Cotocollao	13.46	9	104	154.79	7	50	06:05	21:40
5	Kennedy	9.71	3	50	160.22	16	42	06:05	21:40
6	Laureles	9.65	3	53	168.88	16	40	06:05	21:40
7	Rumiñahui	11.21	5	78	173.76	10	44	06:05	21:40
8	Inter-terminales CL	14.68	9	90	146.80	8	48	06:00	20:35
1	Cisne-Zabala	34.61	7	49	242.27	17	110	05:30	20:40
2	Llano Grande	30.70	6	48	245.60	18	96	05:30	20:40
3	Comité del Pueblo	14.45	7	81	166.18	10	56	06:05	20:40
4	Cotocollao	13.46	6	69	154.79	9	48	06:05	20:40

[7] Siete de las rutas inician su recorrido en la Estación El Labrador y una ruta denominada “inter-terminales CL” inicia su recorrido en el Terminal Carcelén.

No	Ruta	Ruta (km)[1]	Flota [2]	Vueltas día [3]	km/día bus [4]	Intervalo pico (min)	Ciclo pico (min)	Hora Inicio	Hora Final
5	Kennedy	9.71	3	50	160.22	17	38	06:05	20:40
6	Laureles	9.65	2	39	188.18	20	38	06:05	20:40
7	Rumiñahui	11.21	4	62	173.76	12	42	06:05	20:40
8	Inter-terminales CL	14.68	6	66	161.48	12	50	06:00	20:18

Fuente: Elaborado con base en información de EPMTPQ, 2024.
Nota: [1] recorrido ida y vuelta; [2] número total de buses que opera la ruta al día; [3] número totales recorridos realizados por día de toda la flota, para calcular las vueltas por bus día (3) / (2); [4] kilómetros por bus por día, para calcular.

La siguiente imagen muestra las ocho (8) rutas alimentadoras identificadas como prioritarias por parte de la EPMTPQ para iniciar el proceso de electrificación con buses de 12 metros.

IMAGEN 1: Rutas alimentadoras priorizadas que llegan a la Estación El Labrador

Fuente: EPMTPQ, 2024.

El sistema no es de recaudo centralizado e integrado; por lo tanto, no es posible conocer la demanda por hora y por ruta, ya que el recaudo se hace de manera manual en cada una de las paradas, estaciones y terminales de la EPMTPQ. El conductor de cada ruta alimentadora compra los tiquetes en una taquilla autorizada de la EPMTPQ y los vende a los pasajeros que abordan las unidades alimentadoras. Con base en la venta de tiquetes se calcula el número de personas que usan las rutas por día basados en el

número de tiquetes vendidos cada día y por el tipo de tarifa (Tarifa Normal (TI), Tarifa Reducida (TR) y Tarifa Preferencia (TP)) [8].

Las rutas 2 a 8 han sido autorizadas por la Secretaría de Movilidad a través de permisos de operación otorgados a la EPMTPQ. La EPMTPQ opera estas rutas mediante acuerdos de pagos con empresas operadoras privadas[9]. La ruta 1 (Cisne-Zabala), es operada directamente por la Empresa Calderón a través de permiso de operación otorgado por la Secretaría de Movilidad. Dicha empresa tiene un acuerdo con la EPMTPQ con el fin de realizar la gestión del recaudo y gestión de caja; no obstante, la decisión de renovar el permiso de operación de la ruta está en cabeza de la Secretaría en mención. Por lo tanto, el incorporar en el corto plazo (18 meses) rutas alimentadoras operadas con buses eléctricos es más factible en aquellas rutas donde la EPMTPQ tenga el permiso de operación otorgado por la autoridad de transporte, como es el caso de las rutas 2 a 8, excluyendo la ruta 3. La ruta Comité del Pueblo se excluye debido a una Acción de Protección judicial que indica que las 12 unidades de transporte deben prestar sus servicios en la ruta asignada; por lo que no es posible hacer ninguna modificación o cambio de las unidades en operación.

Las siguientes tablas presentan la información de las rutas 2 a 8, teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, es decir, rutas donde el permiso de operación está asignado a la EPMTPQ.

La tabla a continuación muestra también los pasajeros promedio por día por ruta para el 2023 y 2024, es decir, día hábil de lunes a viernes. La oferta del día se calcula con base en el número de vueltas de cada ruta y la capacidad de las unidades de 90 pasajeros mientras que la ocupación promedio día se calcula con base a la cantidad de pasajeros por día dividida por la oferta.

Lo que se identifica es que en promedio hay rutas con una ocupación muy baja, menor o igual a 45%[10], como lo son las rutas 4, 5, 6, 7 y 8. Ello puede ser el resultado de un diseño operacional sobreestimado en la necesidad de vueltas al día para cada ruta acompañado con una evasión tarifaria reflejada en el cobro del tiquete por parte del conductor a la entrada del bus. La modificación de las rutas la hace la Secretaría de Movilidad con base en la Ordenanza 017/2020. Se tiene proyectado que dicha Secretaría entregue en el mes de junio de 2024 el plan de reestructuración de rutas y frecuencias para Quito, es decir, las rutas pueden cambiar su trazado y frecuencia. Sin embargo, y con base en lo indicado por la EPMTPQ es posible que la fecha vuelva a ser modificada.

[8] Tarifa Normal o regular: tarifa para mayores de 18 años. Tarifa Reducida: para estudiantes menores de 18 años y adultos mayores y Tarifa Preferencial: personas con discapacidad con la presentación del carnet del CONADIS.

[9] La EPMTPQ hace una actualización de la estructura de costos del pago del servicio alimentador cada año y el pago a los privados se hace con actas mensuales de prestación del servicio. La remuneración incluye: un costo fijo por bus mensual, costo de capital fijo bus mensual y un costo variable por km. Asimismo, y tal como lo indicó la EPMTPQ los cálculos de la tarifa sigue la “metodología para la definición de la tarifa de transporte terrestre público intracantonal urbano en Ecuador”.

[10] El diseño capacidad de la batería está basada en un bus ocupado al 50%

TABLA 3: Pasajeros total año por ruta para 2023 y para 2024 el promedio día hábil[11]

No	Ruta	Ruta (km)	Ida (km)	Vuelta (km)	Pax/día (2023)(1)	Pax/día (2024) (1)	Oferta día (2)	% (3)
2	Llano Grande	30.70	13,87	16.83	4,633	4,668	5,400	86%
3	Comité del Pueblo	14.45	7.38	7.07	6.078	5,905	12,600	47%
4	Cotocollao	13.46	6.69	6.77	5,244	5,426	12,330	44%
5	Kennedy	9.71	4.57	5.14	2,178	2,258	6,480	35%
6	Laureles	9.65	5.03	4.62	994	1,000	5,490	18%
7	Rumiñahui	11.21	5.62	5.59	2,667	2,689	9,630	28%
8	Inter-terminales CL	14.68	7.31	7.37	2,600	2,584	10,980	24%

Fuente: Elaborado con base en información de la EPMTPQ, 2024
Nota: (1) Pax promedio/día hábil febrero 2023 y 2024; (2) Cálculo de la oferta día con base en el número de vueltas; (3) Ocupación promedio calculado (1) / (2).

A continuación, se presenta en la siguiente tabla los modelos (año) de la flota disponible por cada operador para las rutas de la zona norte. Asimismo, con base en el Código Municipal para el Distrito Metropolitano de Quito que incorpora diferentes ordenanzas se indica que la vida útil máxima total del bus o buses intercantonales, urbano y rural es de 20 años. Es así que, de las unidades presentadas en la siguiente tabla, ninguna al año 2024, ha cumplido su vida útil máxima indicada en la regulación[12].

TABLA 4: Flota en operación para las rutas alimentadoras del norte por modelo (año) para el mes de marzo de 2024

Año	Calderón Ruta 8	Llano Grande Ruta 2	Translatino Rutas 4-7	Transplaneta Rutas 4-7	Tranzeta Rutas 4-7	Vepiex Rutas 4-7	Total
2006			1				1
2007		1					1
2012		3		1			4
2013					1	1	2
2014		1	1		2	1	5
2015		1			1	1	3
2016				1		2	3
2017		2	5	1	1		9
2018				1	4	2	7
2019	4	1					5

[11] El impacto en la demanda por entrada del Metro de Quito se reflejó en una reducción de los pasajeros del Corredor Trolebús; sin embargo, las rutas alimentadoras que conectan en El Labrador no se vieron afectadas tal como se muestra en la tabla, al comprar la demanda en un día hábil promedio de los años 2023 y 2024.
[12] Los buses en operación no han cumplido su vida útil y es muy probable que la decisión de operador privado es que sigan operando en otros lugares; sin embargo, no es relevante si siguen operando en otros lugares. En estos otros lugares reemplaza a otros buses más viejos que salen. O si no hay transporte público en otros lugares es positivo por cambio modal.

Año	Calderón Ruta 8	Llano Grande Ruta 2	Translatino Rutas 4-7	Transplaneta Rutas 4-7	Tranzeta Rutas 4-7	Vepiex Rutas 4-7	Total
2020	4	1	1	1		2	9
2021	2			1			3
2023				2			2
2024				1			1
Total	10	10	8	9	9	9	55

Fuente: Información de flota para el mes de marzo de 2024.

Las rutas indicadas en las tablas anteriores son operadas por buses de 12 metros o también identificados como buses tipo. Las empresas privadas que operan estos buses son responsables del mantenimiento y sus costos. En términos GEI y contaminación local, los buses existentes son Euro III y los factores de emisión corresponden a esta tecnología. Estos buses parquean en lugares privados según la decisión de cada empresa operadora.

Estas unidades tienen una puerta de entrada y dos puertas de salida para pasajeros, tal como se muestra a continuación.

FIGURA 1: Imágenes de los buses alimentadores de 12 metros

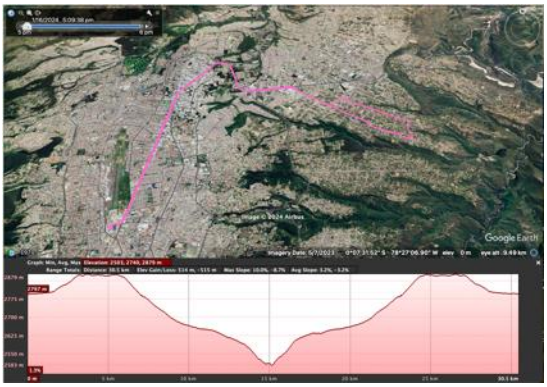
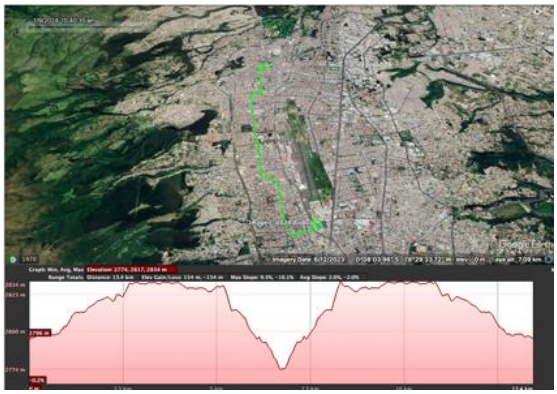
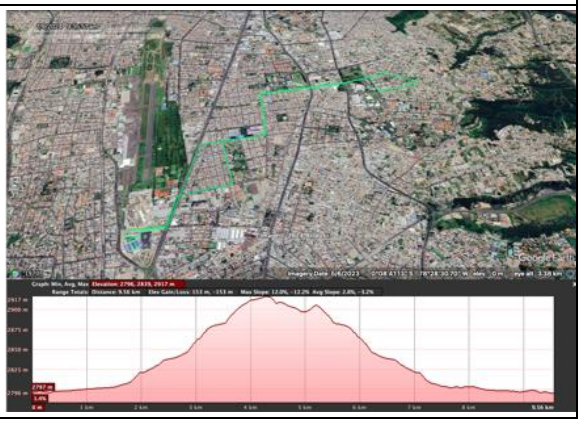
Fuente: fotografías tomadas por EPMTPQ, 2024.

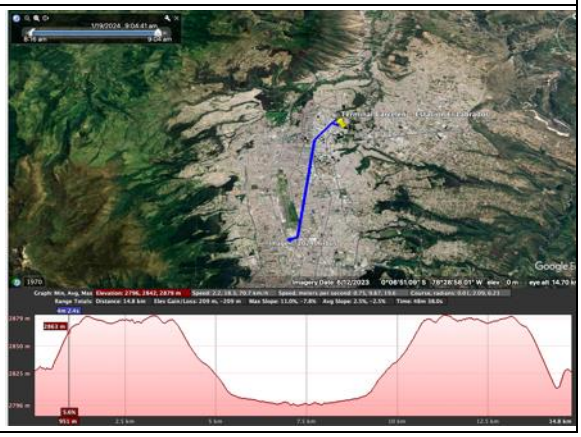
2.2 CARACTERISTICAS DE LAS VIAS DE LAS RUTAS ALIMENTADORAS:

Las vías donde operan las rutas alimentadoras se comparten con el tráfico mixto y son de pavimentos flexible, las rutas transitan en vías principales y secundarias dependiendo de cada ruta y el tramo del recorrido, la distancia promedio entre paradas varía entre 250 - 500 m. En el caso de los paraderos algunos están señalizados con señales de color azul, mientras que en otros los paraderos son cubiertos y con bancas o el paradero no está identificado con ninguna señal. Todos los paraderos de las rutas alimentadoras son a nivel de la vía y ubicados en el costado derecho de vía para operar con buses de puerta derecha. Las rutas alimentadoras transitan por vías de un carril, dos carriles o tres carriles por sentido, dependiendo de la ruta y el tramo de la ruta alimentadora.

La siguiente tabla, presenta la **pendiente máxima** calculada con la herramienta Google Earth, esto con base en el trazado de las rutas entregado por la EPMTPQ. No se cuenta con información de las pendientes de cada ruta medida en campo.

TABLA 5: Pendiente máxima de cada ruta con base en el trazado entregado por EPMTPQ

No	Ruta	Ruta (km) (1)	Número de paradas	Pendiente máxima (2)	Imagen de Google Earth(3)
2	Llano Grande	30.70	74	10.0%	
4	Cotocollao	13.46	38	10.1%	
5	Kennedy	9.71	30	12.2%	

No	Ruta	Ruta (km) [1]	Número de paradas	Pendiente máxima [2]	Imagen de Google Earth[3]
6	Laureles	9.65	24	12.4%	
7	Rumiñahui	11.21	31	13.1%	
8	Inter-terminales CL	14.68	32	11.0%	

Fuente: Elaborado con base en información de EPMTPQ, 2024 y Google Earth
Nota: [1] recorrido ida y vuelta; [2] Pendiente máxima de la ruta; [3] tomada de Google Earth.

El parqueadero[13] El Labrador está ubicado contiguo a la estación multimodal El Labrador. Dicha estación conecta con la Estación Labrador del Metro de Quito, como se muestra en la siguiente figura.

[13] Es importante indicar que existe una diferenciación entre la Estación El Labrador que es contigua al parqueadero de la Estación el Labrador donde se ubicaría la infraestructura de recarga eléctrica, tanto el área asfaltada como el área libre indicada en la imagen. Operacionalmente con la llegada de los 50

En esta área hoy en día se tiene un dispensador de combustible de diésel donde se hace el tanqueo de unidades articuladas y biarticuladas y se parquean los buses que prestan servicio al Circuito 1 y 2 del Corredor Central Trolebús,

FIGURA 2: Parqueadero de la estación El Labrador

Fuente: Tomada de Google Earth. EPMTPQ, 2024.

Actualmente las siguientes unidades parquean en El Labrador:

TABLA 6: Número de vehículos que parquean en El Labrador

Tipo de Bus	Categoría	Modelo (año)	# de unidades
MB0500	Articulado	2015	20
Volvo B340M	Biarticulado	2016	13
VW/2009	12 metros[14]	2009	2
		Total	**35**

Fuente: Área infraestructura de la EPMTPQ, febrero 2024.

2.3 FLOTA DE BUSES ELECTRICOS:

Existen diferentes estrategias como electrificar la flota; hay operadores que electrifican ruta por ruta y hay otros que optan por gradualmente aumentar el porcentaje de buses eléctricos utilizándolos en todas las rutas. Las rutas 2 a 8 se podrían operar todas con el mismo tipo de bus eléctrico (ver siguientes secciones de este documento por sus características), es decir, mismo bus se podría utilizar en cualquier

trolebuses nuevos, salen de operación los buses biarticulados y articulados que actualmente presentan servicio al Corredor Trolebús. Los buses que salen de esta operación van a cubrir otros circuitos troncales, que no son ni el Circuito 1 ni el Circuito 2.

[14] Este bus se utiliza para transporte de empleados de la EPMTPQ.

de estas rutas lo que también aumenta la flexibilidad de su uso. Por ende, se podría optar o por electrificar ruta tras ruta o electrificar un cierto porcentaje de la flota ye utilizarlo en distintas rutas.

Un aspecto importante es electrificar al mismo tiempo una flota mínima que se considere entre 40 a 50 buses. Comprar flotas menores conlleva a varios problemas:

- Varios fabricantes no están interesados en entregar cantidades menores y no participan en licitaciones internacionales por flotas menores reduciendo la competencia y la oferta. También resulta más complicado hacer un acuerdo directo con la empresa matriz fabricante, sino que solo se podría comprar a través de intermediarios o representantes locales aumentando considerablemente el costo;
- Por ser una flota pequeña el fabricante sube el precio un 20-50% comparado con flotas más grandes:
- El sistema de carga y la conexión a la red tiene varios costos fijos y se hace más económico por unidad de bus a partir de al menos 20 unidades, para tener más flexibilidad y una operación más resiliente se requiere de una flota de al menos 40 buses[15].
- El fabricante no pondrá un técnico a tiempo completo y no garantizará el mantenimiento adecuado de los buses por una flota menor o saldrá a un costo muy alto por unidad de bus. El costo más bajo para un mantenimiento y un respaldo completo del fabricante con personal en situ es con flotas mayores de 100 unidades. Sin embargo, se puede trabajar, aunque con un costo menor pero todavía aceptable, con flotas de 40 unidades o más.

Por efectos de costo y de garantizar un mantenimiento adecuado y una disponibilidad alta y garantizada de los buses; por lo tanto, se recomienda no comprar menos de 40 buses eléctricos del mismo tipo.

3 OPCIONES DE TECNOLOGIA DE BUSES ELECTRICOS A BATERIA

Al discutir buses eléctricos se incluyen muchas veces buses híbridos, híbridos enchufables, buses a batería 100% eléctricos y buses con pila de combustible (hidrogeno). Los autobuses híbridos e híbridos enchufables fueron una tecnología intermedia mientras los autobuses eléctricos de batería no estaban aun tecnológicamente maduros. Siguen siendo una tecnología en gran medida fósil y continúan teniendo un impacto medioambiental sólo ligeramente inferior al de un autobús fósil. La mayoría de los fabricantes de autobuses han cesado la producción de buses urbanos híbridos e híbridos enchufables. Los buses híbridos o híbridos enchufables ya no son en general una opción para los operadores de buses urbanos. Las cifras de matriculación de híbridos enchufables en la Unión Europea fueron en el año 2022 doce veces inferiores a las de los buses 100% eléctricos, lo que muestra claramente la tendencia de la tecnología[16]. La mayor flota de buses híbridos de Europa es en Londres, ciudad que comenzó en 2012 con 300 buses híbridos y planes para hibridar la flota por completo. Este plan se abandonó en favor del cambio hacia buses eléctricos. Los operadores de Londres no han comprado más buses híbridos desde 2020 (los buses de un solo piso desde 2018)[17]. El patrón de compra de Transport for London[18] muestra

[15] Eso permite por ejemplo tener varios sitios de carga e equipos independientes que permiten a los buses tener alternativas de carga en caso de problemas en un sitio.
[16] Vehicles and fleet | European Alternative Fuels Observatory (europa.eu)
[17] 3,770 buses híbridos de una flota de 9,100 unidades en marzo del 2020 (Bus fleet data & audits - Transport for London (tfl.gov.uk))
[18] Organismo gubernamental local responsible de la red de transporte de Londres.

que la tecnología de buses híbridos era solo una tecnología intermitente y ha sido sustituida por buses eléctricos a batería. Los buses urbanos eléctricos de pila de combustible (FCEB) propulsados por H2 llevan muchos años en fase de pruebas, incluso antes de los ensayos con buses a batería. Sin embargo, la tecnología no ha logrado un gran avance para los buses urbanos, y las ventas de autobuses de H2 se han estancado en niveles bajos. Mientras que 15,000 buses a batería funcionan en la Unión Europea y países asociados, sólo 330 FCEB están en funcionamiento, y en 2022, las ventas de FCEB fueron un escaso 1% de las ventas de buses a batería[19]. En la República Popular China, el número de FCEB es de 4,000 unidades[20], pero sigue siendo muy inferior a los aproximadamente 570,000 BEB que operan en el país[21]. Siempre que sea posible, el uso directo de la electricidad es, desde el punto de vista energético y medioambiental, una solución mucho mejor que el uso de hidrógeno verde. La producción de hidrógeno verde requiere una gran cantidad de electricidad renovable, que primero debe ser generada. La eficiencia energética global de un vehículo impulsado por baterías es entre 3 y 4 veces superior a la del mismo vehículo impulsado por hidrógeno[22].

En 2023, cerca de 650,000 buses eléctricos a batería circulaban por las carreteras de todo el mundo[23]. Junto a la República Popular de China, países como Alemania, Brasil, Canadá, Chile, Colombia, Estados Unidos, España, Francia, India, Italia, Corea, Países Bajos, Noruega, Polonia, Reino Unido, Rusia, y Suecia tienen en funcionamiento más de 1,000 BEB en 2023[24]. Esto representa en 2023, cerca del 4% del inventario de buses y el 3 % de ventas de buses.

Las proyecciones de la EIA para 2030 indican un aumento de 2.8 a 3.7 millones de BEB, con una tasa de crecimiento anual compuesto de alrededor del 20%. El mayor número de BEB en 2030 se espera estén en la República Popular de China (alrededor del 70% de todos los BEB), seguido por India, donde se espera que 200,000 BEB circulen por las calles en 2030[25].

Para 2030, se espera que los buses eléctricos representen entre el 11% y el 14% del parque mundial de buses y entre el 17% y el 25% de las ventas. En el caso de los buses urbanos, se espera que la cuota relativa de unidades eléctricas sea mucho mayor, mientras que se espera que siga siendo relativamente baja en el caso de los buses interurbanos, siendo más difíciles de electrificar. Igual sucede con los buses utilizados para el transporte de personal, escolar y turístico, que en general tienen un kilometraje inferior y en los que la electrificación es menos rentable que en el contexto urbano.

La República Popular de China también domina el mercado de manufactura de BEB. Sin embargo, empresas fuera de la RPC también se han embarcado firmemente al mercado de los buses eléctricos en los últimos años, fabricantes de Egipto, India, Rusia, Tailandia, Turquía y Vietnam junto a conocidas marcas europeas.

Los tipos básicos de tecnología de buses eléctricos son (i) buses de carga nocturna/lenta o buses cargados en patio (ii) buses de carga rápida; (iii) buses de carga ultrarrápida; (iv) trolebuses, incluidos los trolebuses híbridos y (v) buses de intercambio de baterías.

---

[19] Vehicles and fleet | European Alternative Fuels Observatory (europa.eu)
[20] Fuel Cell Vehicles In Operation In China Reached 8,198 Units (fuelcellsworks.com)
[21] Global EV Data Explorer – Data Tools - IEA
[22] transportenvironment.org
[23] Global EV Data Explorer – Data Tools - IEA
[24] La base de datos de la EIA está incompleta en lo que respecta a las estadísticas de registro de buses, y faltan países como Chile, Colombia y Rusia, con grandes cifras de BEB.
[25] n total, se prevé que en Europa funcionen 300,000 BEB a 2030.

3.1 BUSES DE CARGA NOCTURNA O CARGA LENTA

Estos buses utilizan en general baterías de Fosfato de Litio y Hierro (LFP) que son de bajo costo y resistentes en términos de seguridad y vida útil, pero que tienen una densidad energética inferior en comparación con baterías de Oxido de Magnesio y Litio (LMO) o baterías de Oxido de Cobalto, Magnesio, Níquel y Litio (NMC). Los buses suelen cargarse a menos de 100 kW durante 4-8 horas en la noche. La carga lenta es la tecnología "más antigua" de Bus a Batería (BEB), ya que las baterías anteriormente no eran capaces de recibir cargas de alta potencia. Hay más de 300,000 buses de este tipo en funcionamiento. La mayoría de los BEB de carga lenta son buses de longitudes mediana de 7-9 m y estándar de 10-12 m[26]; sin embargo, operan algunas unidades articuladas de carga lenta de 18 metros.

Las principales ventajas de estos buses son la flexibilidad de la operación en diferentes rutas[27], la sencillez de su operación y la relativa simplicidad de los cargadores, los cuales cargan los buses durante los periodos nocturnos de menor consumo. Las principales desventajas de los BEB de carga lenta son el elevado costo de inversión del bus debido al gran número de baterías, el elevado peso del bus debido a la gran cantidad de baterías que lleva a bordo, el mayor uso de neumáticos de estas unidades (debido al mayor peso del bus) y el riesgo de no poder cumplir con la autonomía requerida y con ello no ser plenamente operativos. Además, el gran número de baterías que requieren estos buses dará lugar a una significante demanda de energía en el patio, ya que muchos buses se cargarán simultáneamente. Muchas ciudades en China que utilizan este tipo de buses han tenido que aumentar su flota de buses en promedio en un 30% en comparación con la flota de buses fósiles debido a problemas de autonomía, especialmente después de algunos años en el que el Estado de Salud (SOH) de las baterías se ha reducido dando como resultado la disminución de la autonomía. Este problema ha impulsado a las ciudades chinas a comprar más buses de carga rápida[28].

3.2 BUSES DE CARGA RÁPIDA

La característica común de los buses de carga rápida es que las baterías son capaces de recibir en poco tiempo una gran carga de energía. Las baterías de los buses suelen ser NMC. Las NMC pueden modificarse para optimizar la energía o la potencia. Los cargadores oscilan entre 150 y 600 kW, con una tendencia a utilizar unidades de mayor potencia, reduciendo así el tiempo de carga y el tamaño de las baterías. Los buses pueden equiparse con baterías de distintos tamaños que difieren en su velocidad de carga (definiendo la potencia potencial por unidad de tiempo). Existen diferentes versiones del sistema de buses de carga rápida:

- La recarga se realiza de una a dos veces al día durante 15-30 minutos en las horas valle de operación. Esto puede hacerse en patio (si este se encuentra cerca de la ruta)

[26] Grütter Consulting para Clean Bus Leasing Program del ADB en China incluyendo el monitoreo de flotas de buses eléctricos en 20 ciudades de China

[27] No se necesitan cargadores a lo largo de la ruta, por lo que se pueden utilizar los buses en cualquier ruta. En el caso de tener un sistema de carga de oportunidad se tienen los cargadores a final de la ruta. Por lo tanto, no se puede utilizar el bus en una ruta que no tenga cargadores.

[28] Grütter Consulting para Clean Bus Leasing Program del ADB en China incluyendo el monitoreo de flotas de buses eléctricos en 20 ciudades de China.

o en estaciones de carga situadas en las proximidades de las rutas. Dicha recarga se hace, principalmente, con cargadores enchufables.

- Carga "Oportunidad" al final de la ruta con pantógrafo, enchufable o inductivo[29] durante 3-10 minutos. El conjunto de baterías a bordo del bus es más pequeño y el bus se recarga con más frecuencia. Esto requiere cargadores al final de las rutas y un intervalo de distancia suficiente entre buses para evitar una acumulación de buses y un aumento del tamaño de la flota de buses.

Los BEB de carga rápida se han hecho muy populares en China (principalmente sistemas de enchufe con 1-2 recargas realizadas principalmente en patio), así como también en Europa (principalmente carga de oportunidad). Los BEB de carga rápida están disponibles en todos los tamaños, incluidas las unidades de 18 metros. Las baterías de los BEB de carga rápida pueden cargarse a una potencia superior a la de los BEB de carga lenta, lo que permite una autonomía de conducción adicional. Esto permite utilizar los buses sin grandes riesgos ni problemas de autonomía, ya que simplemente se pueden realizar cargas adicionales o ligeramente más largas. Los cargadores enchufables suelen tener una eficiencia de conversión del 90-95% a temperatura estándar, mientras que los pantógrafos tienen una eficiencia de carga del 75-80%. Esto se traduce en tiempos de carga ligeramente más largos utilizando pantógrafos y un consumo mayor de electricidad incrementando el costo. En términos de vida útil de las baterías los fabricantes ponen la misma garantía de 8 años 80% SOH independiente de los ciclos de carga y de la potencia de carga. Por ser baterías de otra composición (por ejemplo, baterías LTO) pueden tener hasta garantías mayores. Los cargadores de alta potencia ya no tienen precios muy altos y más bien el sistema de carga rápida puede salir más económico al poder utilizar varios buses en el mismo cargador.

3.3 CARGA ULTRA RÁPIDA

La carga ultrarrápida se realiza en las paradas de bus mientras los pasajeros suben y bajan del bus con 600-1,000 kW durante 10-20 segundos. Esto requiere un enfoque técnico diferente al de los buses estándar de carga rápida o de oportunidad, ya que los de oportunidad necesitan establecer el protocolo de comunicación entre el bus y la unidad de carga, lo que lleva hasta 20 segundos y no permite la carga en una parada de bus. La tecnología de carga ultrarrápida tiene el cargador a bordo del bus y el tiempo de conexión es <1 segundo, es decir, el bus recibe energía prácticamente durante todo el tiempo de parada en la estación. La aplicación típica de la carga ultrarrápida se da para sistemas Bus Rapid Transit (BRT), siendo sistemas que operan con intervalos cortos y con grandes buses, los cuales no tienen tiempo suficiente al final de la ruta ya sea para una recarga y/o donde el espacio para cargar múltiples buses no es suficiente.

Los buses de carga ultra rápida suelen tener un conjunto de baterías muy pequeño de Oxido de Titanita-Litio (LTO) capaz de captar y retener en un periodo de tiempo muy corto una gran cantidad de energía. El LTO es superior en cuanto a velocidad de carga, vida útil y seguridad, pero tiene una baja densidad

[29] La carga inductiva utiliza ondas electromagnéticas para cargar las baterías. Por lo general, la plataforma de carga se instala directamente bajo la calzada. La técnica proporciona grandes cantidades de energía, pero la conexión entre las bobinas puede ser delicada. Si se perturba el sistema, cambia la frecuencia de la vibración magnética, lo que rompe la conexión inalámbrica de este tipo de instalaciones, es decir, si el bus se mueve ligeramente durante la carga, el proceso se interrumpe. Los resultados de la recarga inductiva por bus son disparejos y las ciudades han optado por el pantógrafo o la recarga rápida por enchufe.

energética y un costo elevado. Estos sistemas se han implantado, por ejemplo, en Ginebra, Brisbane o Nantes (con buses biarticulados), así como en varias ciudades chinas, como Ningbo[30].

FIGURA 3: Bus de carga ultra rápida en Ginebra, Suiza

Fuente: Grütter Consulting.

3.4 CAMBIO DE BATERÍAS

En varias ciudades chinas, como Pekín, Jinan, Tianjin y Zhengzhou, se instalaron hace casi 10 años estaciones totalmente automatizadas de intercambio de baterías para buses. En lugar de cargar las baterías del bus, las baterías son extraídas por robots y las sustituyen por otras nuevas en un proceso que dura entre 10 y 15 minutos. Las estaciones de intercambio de baterías son muy costosas. Los sistemas de intercambio de buses y el tipo, ubicación y tamaño de las baterías no están estandarizados. Esto hace que los operadores se vean obligados a utilizar determinados tipos de buses y baterías vinculados a sus respectivos fabricantes, además de necesitar una gran cantidad de baterías[31]. Por ello, los operadores de transporte han abandonado este enfoque en favor de los sistemas de carga rápida, que tienen menores costos de inversión y operación y que son mucho más flexibles, pues el mismo cargador puede ser utilizado por múltiples marcas de buses con diferentes tipos de batería. Por lo tanto, el intercambio de baterías para buses no ha seguido evolucionando.

3.5 TROLEBUSES

En los trolebuses, la carga continua se realiza a través de catenarias. Los trolebuses "híbridos" incluyen una batería que les permite funcionar parcialmente sin catenarias, por ejemplo, hacia el final de las rutas o en zonas donde, debido al costo u otros criterios, no se desea instalar catenarias. Estos sistemas se utilizan básicamente en ciudades que cuentan con una infraestructura de catenarias que aún está en buen estado y que no requiere grandes reacondicionamientos. En otros casos, los sistemas de trolebuses,

[30] El proveedor carga y alimentación ABB trabaja en colaboración con varios fabricantes de buses, como Kinglong.
[31] Tanto el bus como la estación de intercambio de baterías deben tener baterías.

aunque utilicen trolebuses híbridos, carecen de flexibilidad y resultan más costosos que el uso de sistemas de carga rápida o ultrarrápida.

3.6 RESUMEN DE BUSES ELECTRICOS

Para tecnologías de carga específicas, se necesitan baterías específicas. Las baterías para carga lenta no pueden utilizarse para carga rápida o ultra rápida, mientras que lo contrario si es posible. Las densidades energéticas y los costos también varían según la tecnología de las baterías. Por lo tanto, es necesario optimizar el sistema de e-bus teniendo en cuenta: las condiciones operativas, los requisitos técnicos del operador del bus, la situación de la red, los costos de inversión del bus, el sistema de carga, las mejoras del patio y los ajustes de la red. La siguiente tabla resume las principales ventajas e inconvenientes de las tecnologías de e-bus.

TABLA 7: Comparación de los enfoques tecnológicos del e-Bus

Sistema E-bus	Puntos +	Puntos -	Aplicaciones Optimas
BEB de carga lenta	Fácil de usar; tecnología probada; bajo costo de electricidad	Conjunto de baterías de gran tamaño; peso y costo del bus son elevados; limitaciones de rango; riesgos operativos elevados; demanda de potencia potencialmente elevada en el patio.	Buses de hasta 12 m que circulan por rutas cortas; con distancias diarias de 200km o menos también buses de 18m[32]
BEB enchufable de carga rápida	Flexibilidad de autonomía; tamaño moderado de la batería y peso/costo del bus	Requiere recarga durante el día; se necesita espacio adicional para cargadores	Buses de hasta 18 m en cualquier ruta estándar
BEB de carga por oportunidad final de ruta	Flexibilidad de la autonomía; tamaño moderado de la batería y peso/costo del bus.	Requiere tiempo suficiente al final de la ruta; los buses sólo pueden utilizarse en rutas equipadas; los cortes de electricidad pueden afectar al sistema.	Buses de cualquier tamaño en rutas con intervalos >6 minutos para buses de 18 m (>4 minutos para unidades de12 m)
BEB de carga ultra rápida	Flexibilidad de la autonomía; batería pequeña; poco peso del bus; bajo riesgo; alta redundancia del sistema	Los buses sólo pueden utilizarse en rutas equipadas; altos costos de infraestructura; nueva tecnología	Buses de 18-28 m en rutas BRT con trayectos cortos
BEB de cambios de batería	Flexibilidad de la autonomía; tamaño moderado de la batería y peso/costo del bus	Requiere recarga durante el día; costos de sistema muy elevados; dependencia de modelos de bus y fabricantes específicos.	Sistema no recomendado debido a los puntos negativos
Trolebús (híbridos)	Flexibilidad de autonomía, tamaño reducido de la batería y	Costos de infraestructura muy elevados, flexibilidad limitada y costos de electricidad potencialmente	El sistema sólo se recomienda en ciudades con una

[32] Con avances en la tecnología de baterías aumenta el rango donde se pueden utilizar buses de 18m con carga lenta sin tener un conjunto de baterías sumamente grandes, costoso y pesado.

Sistema E-bus	Puntos +	Puntos -	Aplicaciones Optimas
	bajo peso del bus;	elevados; los cortes de electricidad pueden afectar el sistema	infraestructura de trolebuses relativamente nueva.

Fuente: Grütter Consulting AG

4 CARACTERISTICAS PROPUESTAS PARA BUS ELECTRICO Y EL SISTEMA DE CARGA DE LOS BUSES ELECTRICO

4.1 CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS

Como se observa en la tabla 4, la ciudad tiene rutas con pendientes acentuadas, incluyendo varias rutas con pendientes máximas de 10 a 15%. Esto requerirá autobuses con suficiente potencia de motor, lo que aumentará ligeramente los costos del autobús. Sin embargo, el consumo eléctrico no se ve tan afectado por las pendientes debido al sistema de recuperación de energía en los trayectos cuesta abajo.

La siguiente tabla resume las características operativas básicas que debe cumplir el autobús.

TABLA 8: Características operativas básicas de los autobuses eléctricos

Parámetro	Valor	Comentario
Distancia recorrido diario máximo[33]	260 km (ruta 1) 210 km (rutas 2 a 8)[34]	Elaborado con base en información de EPMTPQ, 2024
Distancia recorrido diario promedio	200 km	
Horas de operación	5AM a 11PM	
Pendientes máximas en rutas	10-15%[35]	Tabla 5

Fuente: Grütter Consulting AG.

La distancia máxima diaria recorrida es relevante para determinar la capacidad que debe tener la batería para poder circular con seguridad en todas las rutas. La distancia recorrido promedio es relevante para determinar el uso medio de energía y los costos operativos. El horario de funcionamiento es relevante para determinar la potencia de carga necesario en los depósitos de los buses y el tiempo de carga disponible necesario. La pendiente máxima de las rutas es relevante para determinar la potencia del motor requerida para las especificaciones del bus[36].

[33] Basado en cantidad de vueltas por día por ruta, distancia de la ruta, número de buses operando más 15km para llegar al patio

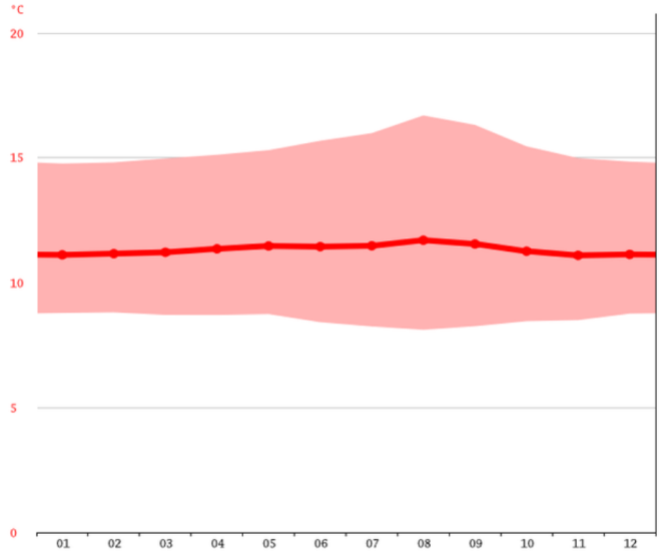
[34] Si bien la ruta 3 se excluye, el kilometraje está en el rango de 210 km. Por lo tanto, aunque no se puedan cambiar los buses de esta ruta por la Acción Judicial, los parámetros de esta ruta están dentro de la distancia de recorrido promedio, a diferencia de la ruta 1 que no es incluida ya que el kilometraje es mayor.

[35] Las especificaciones de los bues incluyen suficiente potencia para que también puedan subir en pendientes menores, simplemente afecta ligeramente la velocidad de arranque y el tiempo hasta que alcance la velocidad máxima.

[36] La pendiente no afecta los ciclos de carga. Simplemente en la subida se consume más energía y en la bajada se recupera energía. En las especificaciones técnicas (Anexo II) se indica el tiempo máximo

El siguiente gráfico muestra las condiciones climáticas de Quito.

FIGURA 4: Datos de temperatura de Quito



Fuente: Quito climate: Weather Quito & temperature by month (climate-data.org); con base en el año 2023[37]

Las temperaturas tienen poca variación anual y oscilan en torno a los 10-15 grados centígrados anuales, lo que significa que se puede operar sin uso del aire acondicionado.

Las baterías no son afectadas por humedad y precipitación. Tampoco por temperaturas excepto si son extremas (básicamente si es muy frio) lo que no es el caso en Quito. Las especificaciones exigen normal operación de baterías entre 5% y 100% humedad, de temperaturas de -10 a 40C.

Por otra parte, es relevante indicar que las prácticas de manejo del conductor tienen menor incidencia en buses eléctricos que en buses fósiles por tener un sistema de recuperación de energía que resulta en una desaceleración más rápida haciendo la previsión del tráfico menos importante; además, no hay caja de cambio en el bus. Las prácticas de manejo no son un factor relevante porque hay conductores con buenas y malas prácticas y este factor está considerado en el porcentaje de reserva de la batería al determinar el tamaño de batería, al igual que las condiciones de tráfico. El diseño de capacidad de batería está basado en un bus ocupado en 50% en promedio durante todo el día. No es realista de asumir que un bus sea cargado todo el tiempo en 100%, ello se puede evidenciar en el cálculo de la ocupación de las

hasta alcanzar velocidades especificadas bajo grados de ángulo definidos. En las especificaciones que debe alcanzar en pendientes de 17%, decir, se tiene un margen de seguridad en las especificaciones. Las especificaciones técnicas de los buses (Anexo II) contienen los elementos de aceleración mínima bajo pendiente y la relación velocidad a pendiente.

[37] No es relevante de hacer un análisis de cambios de temperatura por años porque los promedios mensuales las variaciones son de poca significancia.

rutas presentadas en la tabla 3. Aún si fuera así, la reserva incluida en el diseño de la capacidad de batería son más que suficiente.

El siguiente cuadro resume las principales condiciones de ruta, operativas y climáticas que prevalecen en Quito y que un sistema de e-bus debe tener en cuenta.

Condiciones críticas para el diseño de un sistema de e-bus en Quito
1. Distancias diarias recorridas de 200-210km (excluyendo ruta una)
2. Operaciones diarias entre las 5AM y las 11PM
3. Pendientes de la ruta de hasta el 15%
4. Operaciones con buses urbanos estándar de 12 m para hasta 90 pasajeros
5. Temperaturas similares durante todo el año, en torno a los 15 grados Celsius

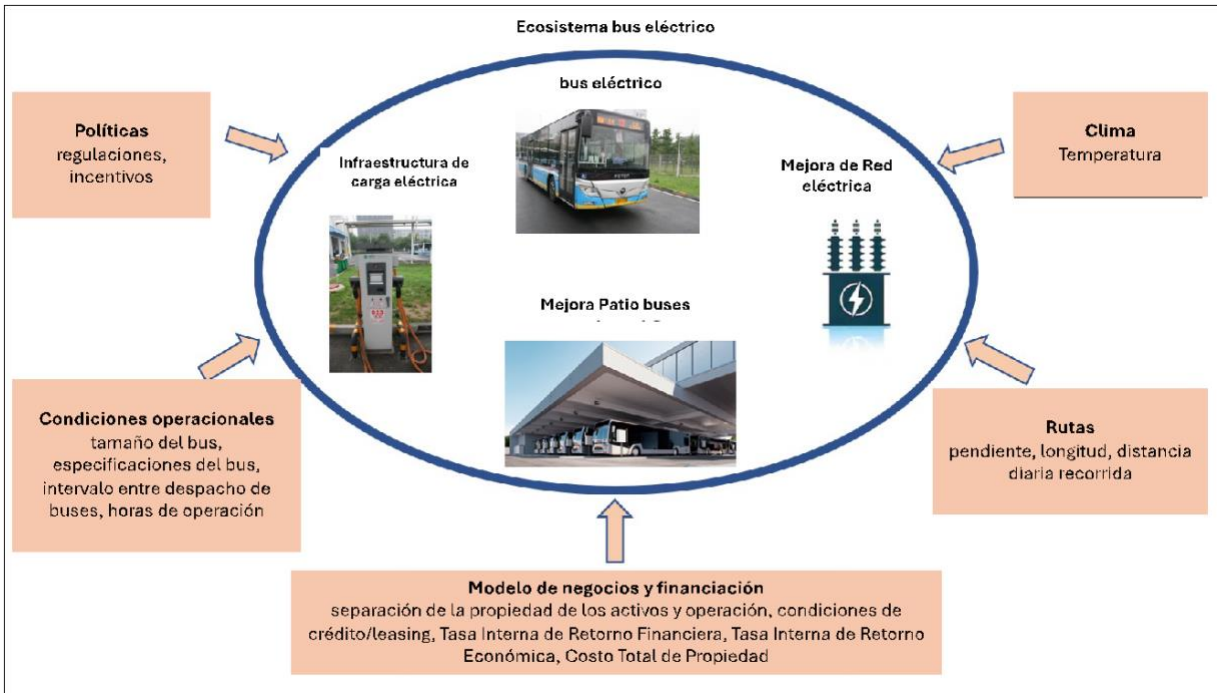
4.2 ENFOQUE DEL SISTEMA DE DISEÑO PARA BUSES ELÉCTRICOS

El diseño del sistema deberá dar como resultado un sistema óptimo desde el punto de vista técnico, financiero, medioambiental y social. Los siguientes criterios se utilizan para evaluar las diferentes opciones, siempre relacionándolas con las condiciones operativas de Quito:

- Criterios tecnológicos: capacidad de baterías, sistema de carga, e impacto en la red
- Criterios financieros: costos de inversión y operación, además de la rentabilidad de las operaciones;
- Impacto medioambiental y social;
- Complejidad operativa: la complejidad deberá ser mínima y, de ser posible, similar a la de los buses diésel. Los e-buses deben poder funcionar en todas las rutas durante todo el año a lo largo de la vida útil del bus sin tener la necesidad de buses adicionales, esto con relación al número de buses diésel.
- Riesgos y resistencia de los diferentes sistemas diseñados, incluida la resistencia al cambio climático, la resistencia a acontecimientos imprevistos y la flexibilidad para operar en circunstancias cambiantes.

Para identificar el tipo óptimo de e-bus, es necesario evaluar el ecosistema en el que operan. Esto requiere la optimización de la tecnología del e-bus junto con la infraestructura de recarga y las mejoras necesarias de la red, además de lo que potencialmente es posible en los patios. El ecosistema del e-bus está influido por varios factores, como las condiciones de operación, las condiciones climáticas, las rutas, las políticas, los modelos de negocio y las estructuras de financiación (véase la figura siguiente).

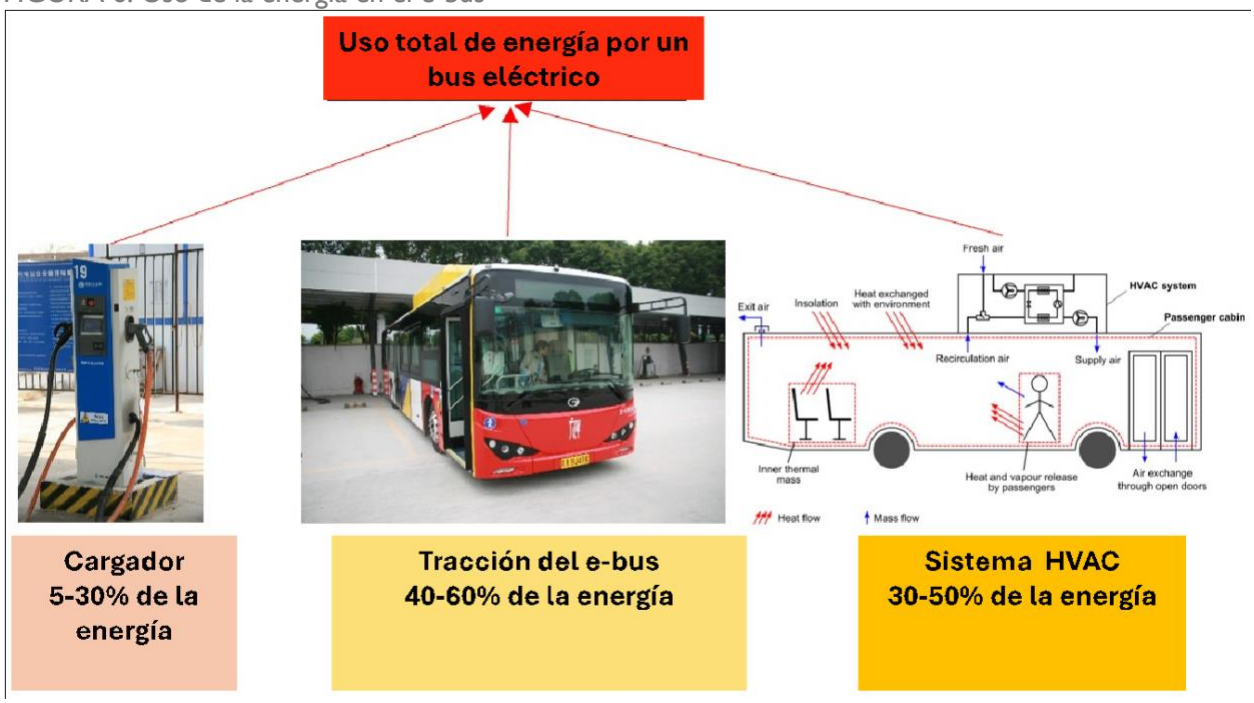
FIGURA 5: Ecosistema del e-bus y factores influyentes



Fuente: Grütter Consulting AG.

El uso de la energía en los e-buses es un factor crítico, ya que determina la autonomía del bus ante la capacidad de la batería, y por lo tanto influye directamente en la configuración del bus y su sistema de carga. La figura siguiente indica las áreas de uso de la energía en los e-buses.

FIGURA 6: Uso de la energía en el e-bus



Fuente: Grütter Consulting AG

Es importante mencionar que las temperaturas muy bajas[38] tienen graves repercusiones en el consumo energético de los e-buses, ya que no sólo el sistema de calefacción requiere mucha energía, sino que además el sistema de frenado regenerativo no funciona en condiciones adversas de la carretera, como nieve o placas de hielo. Igualmente, las altas temperaturas[39] dan lugar a un mayor consumo de energía debido a la refrigeración, especialmente si los autobuses se quedan atascados en el tráfico; esto puede dar lugar a una pérdida significativa de la autonomía de conducción. Sin embargo, para ambos casos, las condiciones climáticas de Quito que aplican, el sistema de aire acondicionado no tiene la relevancia que tiene en otras ciudades, como tampoco el de climas fríos, por lo cual se espera un rendimiento bastante bueno de los buses eléctricos en Quito.

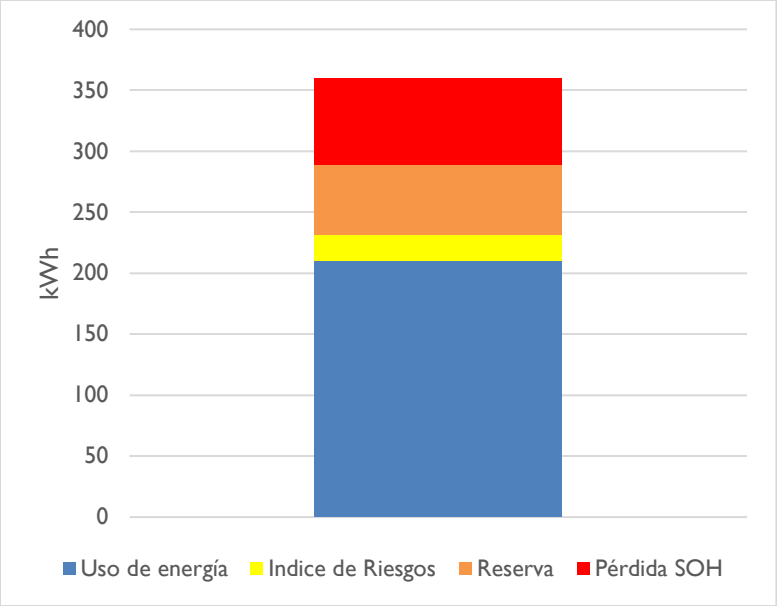
Componentes del diseño de un sistema de e-bus
El diseño de un sistema de un bus eléctrico no sólo incluye el bus, sino también la infraestructura de carga, que a su vez está relacionada con las condiciones de la red eléctrica. Esto requiere decisiones sobre el tipo y tamaño de las baterías y el enfoque del sistema de carga. El proceso de optimización tiene en cuenta criterios como la viabilidad tecnológica, la rentabilidad financiera, el impacto medioambiental y los riesgos de las diferentes opciones.

4.3 SISTEMA PROPUESTA E-BUS

La consultoría no analiza si las rutas, frecuencias, tamaños de buses y cantidad de buses que operan actualmente es óptimo o no. Se toma la operación actual y se compara una operación fósil con una operación eléctrica con los mismos parámetros, es decir, la misma cantidad de buses realizando exactamente los mismos servicios. Para determinar el tamaño de la batería o el sistema de carga es importante conocer la distancia máxima diaria recorrida. Para determinar el tamaño de la batería para un bus con carga nocturno o de carga lenta se entra a considerar: el consumo de energía; una tasa de riesgo anticipado de 10% por mayor consumo debido, por ejemplo, a condiciones de tráfico adversos; una tasa de reserva del 20%; más una pérdida del estado de salud (SOH) de las baterías del 20% durante su vida útil de 8 años. Esto factores permiten que los e-buses funcionen también después de los primeros años en las rutas indicadas con suficientes reservas operativas. Al incluir la ruta 1, diariamente se llega a necesitar un set de baterías de 450 kWh donde los buses operan hasta 260km. Al excluir la ruta 1 y haciendo un enfoque en las rutas 2 a 8[40], se necesitan únicamente un set de baterías de 360 kWh (ver la siguiente gráfica), para poder operar con los recorridos de estas rutas que son entre 100 y 210km/día. Un set de 360 kWh es un valor usual y común en las ofertas de buses.

FIGURA 7: Tamaño de Batería Recomendado para Buses Eléctricos en Quito con Carga Nocturna

[38] Por debajo de -10 grados centígrados
[39] Promedios por encima de 30-40 grados centígrados
[40] Si bien la ruta 3 se excluye, el kilometraje está en el rango de 210 km. Por lo tanto, aunque no se puedan cambiar los buses de esta ruta por la Acción Judicial, los parámetros de esta ruta están dentro de la distancia de recorrido promedio, a diferencia de la ruta 1 que no es incluida ya que el kilometraje es mayor y se analiza de manera separada.

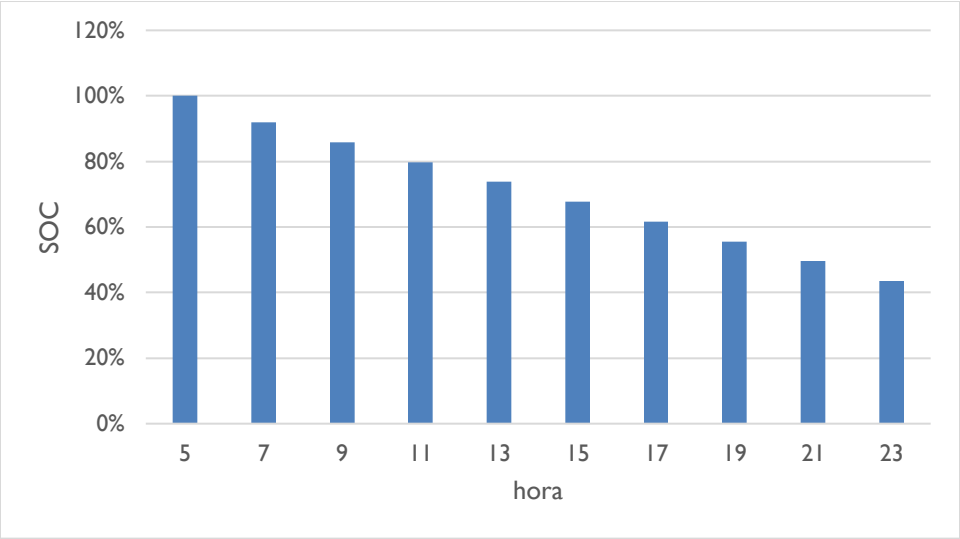


Fuente: Grütter Consulting AG; válido para rutas 2 a 8

En Quito, se necesitan baterías de 360 kWh para las rutas 2-8 [41]y realizar únicamente carga nocturna. Con este tamaño de batería, los e-buses pueden funcionar en las rutas 2-8, con un coeficiente de reserva suficiente, hasta el final de la vida útil de la batería del bus, en el octavo año. No es necesaria la carga durante el día y no se requieren unidades adicionales en comparación con las unidades diésel. El siguiente gráfico muestra cómo disminuiría gradualmente el estado de carga (SOC) de un autobús eléctrico que funcionaría en Quito.

[41] Los parámetros entre rutas fluctúan poco. Por eso se hace el diseño para el max 80%, es decir, dentro de las diferentes rutas se diseña el sistema para que opere en todas las rutas. No es aconsejable de tener un bus ligeramente diferente (20 kWh más o menos) para cada ruta haría complejo el manejo operativo y más costosa la compra. La única ruta que si se recomienda otro diseño es la ruta 1 que está excluida.

FIGURA 8: Nivel de Carga de un Bus Eléctrico Nuevo que Circula por la Ruta 7 (Rumiñahui) en un Día Laboral



Fuente: Grütter Consulting AG

Para la ruta 1[42] que tiene una distancia de recorrido diario más que 20% mayor que la ruta más larga de 2-8 y por ende consumos eléctricos diarios mucho más elevados actualmente existen dos opciones:

- Comprar buses con un tamaño de batería de 450 kWh y hacer carga nocturna únicamente. Hay oferentes de buses eléctricos que suministran buses con baterías de este tamaño, pero no es común y acarrean costos mayores;
- Establecer un sistema con carga diurna de 15-30 minutos diarios junto con un cargador de 300-400kW, haciendo la carga o en patio durante periodo valle o cerca del final de la ruta con un cargador instalado hacia la estación final de la ruta. Con este sistema se podría comprar un bus eléctrico con un set de batería de 320 kWh, donde las baterías tengan la capacidad de recibir al menos 300 kW de potencia. Sale más cara la electricidad diurna; sin embargo, puede salir por costos totales más económica esta alternativa por necesitar un set de baterías menores en el bus lo que lleva a menores costos de inversión.

Por otro lado, existen dos opciones al no querer comprar buses diferentes para esta ruta 1: (i) Solo operar ruta 1 con unidades nuevas (máximo 4 años) mientras que el SOH de las baterías esta todavía alto y después rotar estas unidades a otras rutas (ii) hacer una recarga de las baterías del bus durante el tiempo de menor demanda de al menos una hora.

La opción alterna es comprar todos los buses que sean óptimos para la ruta 1 también es una opción. Sin embargo, no se recomienda esta opción por encarecer significativamente el costo del bus y aumentar la complejidad del sistema, al optar por un sistema con re-carga rápida. Por lo tanto, se recomienda electrificar en una segunda fase la ruta 1, con el desarrollo rápido de la tecnología de baterías la densidad energética aumenta (se reduce el consumo por km) y se aumenta la capacidad de las baterías que resulten en rangos más altos de recorridos.

[42] La carga de pasajeros no influye porque variaciones de carga de pasajeros entre rutas resultan en cambios relativamente pequeños de peso total del vehículo y variaciones muy bajas de consumo eléctrico por lo cual no es un criterio. Las pendientes tienen incidencia en la potencia requerida del bus, pero no en forma muy importante en los consumos. El factor diferencial de la ruta 1 es la distancia diaria recorrida que es 20% mayor a la próxima ruta lo que exige un set de baterías significativamente mayor.

Hacer una carga intermedia aumenta gradualmente la complejidad del sistema. Por ende, se recomienda momentáneamente enfocarse en las rutas 2-8 y, basándose en los resultados reales de consumos de los buses en estas rutas además de efectuar pruebas en la ruta 1, tomar una decisión final para los buses de la ruta 1, esto basado en datos y experiencias reales de Quito y observando también el desarrollo del mercado de los e-buses. El desarrollo rápido de la tecnología de baterías resulta en un aumento en la densidad energética de las baterías disminuyendo el consumo de electricidad por km y también los fabricantes continuamente aumentan el tamaño de set de baterías en los buses para aumentar el rango de circulación posible.

Múltiples proveedores ofrecen autobuses eléctricos urbanos de 12 m con conjuntos de baterías de 350 - 400 kWh. La carga nocturna es un sistema sencillo pero fiable, con un funcionamiento similar al de un bus diésel, dicho sistema tampoco representa una carga adicional de electricidad en horas diurnas por la red eléctrica de Quito. Mientras que otras opciones de carga, como la carga de oportunidad al final de las rutas o la carga ultrarrápida en estaciones, no es recomendado para el caso de buses de alimentación de 12m, dado que el sistema puede funcionar con menores costos y complejidad utilizando la carga nocturna en el patio de buses. La carga de oportunidad y la carga ultrarrápida pueden ser opciones para los buses de 18 a 24m operando las rutas troncales de Quito.

Recomendaciones sobre el E-Bus

1. En la primera fase concentrarse en rutas 2 a 8, y cambiando a buses eléctricos en la ruta 1 en una fase posterior, esto por tener condiciones más exigentes, las cuales quedan mejor evaluadas con resultados prácticos de las otras rutas.
2. Para las rutas 2 a 8 se recomienda utilizar un e-bus con carga nocturna y una capacidad de baterías de al menos 360 kWh. No es necesaria ninguna carga rápida intermedia durante el día. Esto es operativamente simple e idéntico al funcionamiento de los buses diésel.

5 SISTEMA DE ALIMENTACION PARA LA INFRAESTRUCTURA DE RECARGA

5.1 SISTEMA DE CARGA

El sistema de carga propuesto se basa en una carga lenta durante la noche. En promedio se calcula que cada bus utilizará 200 kWh diarios basados en una distancia promedio de las rutas de 200km y un consumo promedio de 1kWh/km[43], con un horario de operación desde las 5:00 am hasta las 11:00 pm y periodos de carga fluctuando desde 11:00 pm o 12:00 am hasta las 5:00 am, es decir unas 5-6 horas. Para poder cumplir con una carga completa del bus durante 5 horas se requiere de una potencia de 50 kW por bus[44].

Se recomienda la carga por enchufe y no por pantógrafo debido a los menores costos y a las menores pérdidas de eficiencia energética de los cargadores por enchufe. La carga por pantógrafo tiene sus

[43] Es basado en el consumo promedio de electricidad del bus. No entra en las especificaciones del bus. El tamaño de las baterías se diseña con base de máximos o upper 80% para que opere en rutas un poco más largas, al igual que en rutas más cortas. El sistema de carga se diseña con base en promedios de consumos porque esto es lo que el sistema debe soportar.

[44] La eficiencia de un cargador es de mínimo 90% o sea se entrega 54 kW por hora con un cargador de 60 kW. Cuando el estado de batería esta encima de los 80% SOH se reduce la velocidad de carga.

ventajas en patios debido al poco espacio requerido (véase la foto inferior de una carga por pantógrafo típica), pero resulta en 20,000 USD adicionales de costos por cada bus, además de costos adicionales para el sistema de carga.

FIGURA 9: Sistemas de carga con pantógrafo

Izquierda: patio en Basilea, Suiza y derecha patio en el aeropuerto de Schiphol, Países Bajos

Los cargadores de enchufe pueden montar su conexión en el suelo o también hacerse de forma elevada, lo que puede ahorrar costos en comparación con el cableado subterráneo. Los cargadores pueden agruparse en uno o varios emplazamientos, con postes de conexión en los aparcamientos de buses (a nivel o aéreos) o con los cargadores instalados en el propio aparcamiento. El montaje aéreo permite apilar los autobuses más cerca y reduce las necesidades de espacio del patio, pero tiene costos de construcción más elevados como inconveniente.

FIGURA 10: Sistemas de carga a nivel o aéreo

Izquierda: sistema aéreo Hitachi ABB; derecha: Tianjin, China cargadores convencionales

El uso de dispensadores o pilas con cargadores situados en un lugar central, por ejemplo, en forma de contenedor, presenta ventajas de mantenimiento y una mejor protección de los equipos. Los contenedores también se pueden mover a otro sitio sin mayores problemas, siendo esto un aspecto crítico si se quiere en un futuro mover de sitio el patio[45]. Los dispensadores pueden agruparse y programarse para permitir cargas más altas para los primeros buses. Por ejemplo, un cargador central de 1,000 kW puede conectarse a 10 pilas con 2 conectores cada uno, proporcionando 50 kW a cada bus si se utiliza al completo, pero desplegando una carga mayor en caso que no todas las pilas y conectores estén ocupados. Esto aumenta la flexibilidad del sistema. Este sistema lo utiliza, por ejemplo, GreenMovil en Bogotá Colombia para su flota de buses eléctricos. Las pilas son también, en general, más pequeñas/delgadas y requieren menos espacio. La ventaja de utilizar cargadores individuales independientes es, en general, un costo menor y la avería de un cargador solo tiene un impacto muy limitado, ya que el cargador solo da servicio a un máximo de 2 buses.

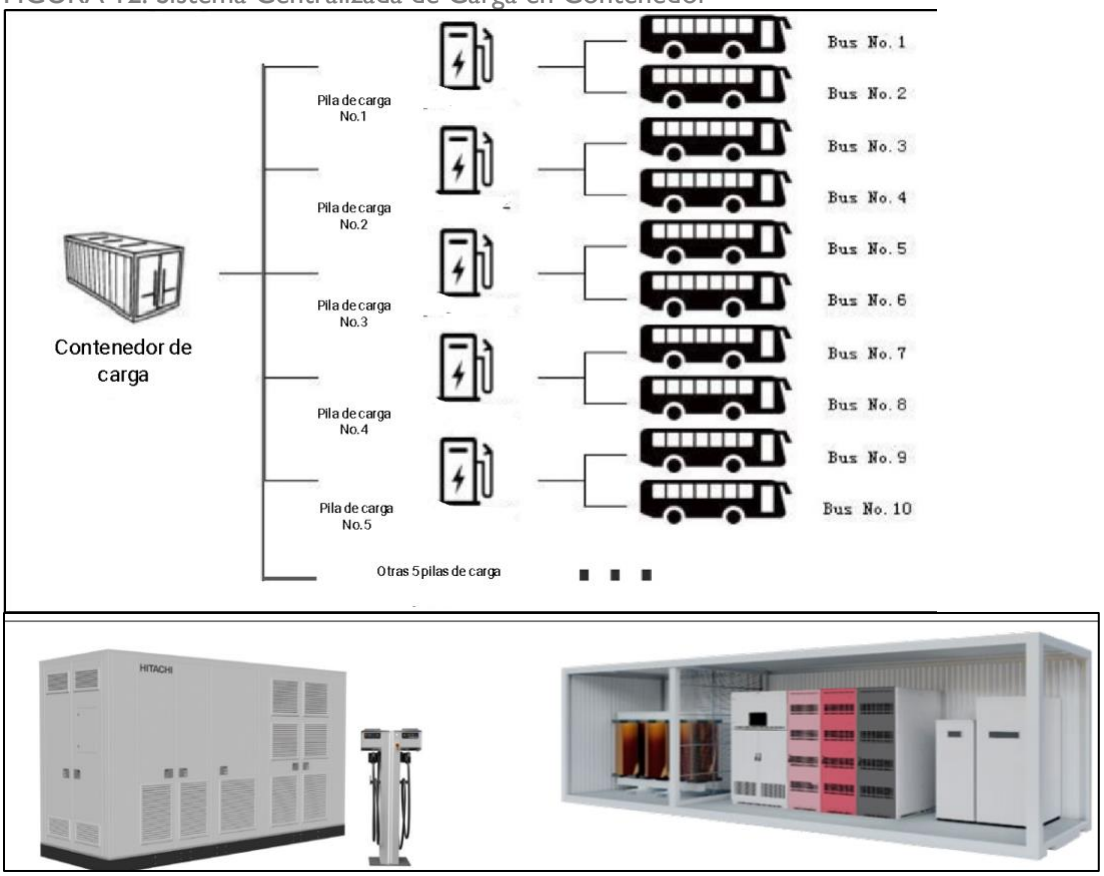
[45] Los cargadores independientes son básicamente activos fijos, ya que la parte recuperable es muy inferior al 50% en caso de cambio de ubicación.

FIGURA 11: Sistemas de Carga con Pilas y Sistema Central y con Cargadores Individuales

Izquierda: pilas con Sistema central Hitachi ABB; derecha Beijing, China con cargadores independientes

La figura siguiente muestra una solución típica de carga de contenedores para hasta 20 buses para carga nocturna utilizando sistema central en un contenedor de 1,000 kW.

FIGURA 12: Sistema Centralizada de Carga en Contenedor



Fuente: Grütter Consulting AG y Hitachi ABB

El contenedor incluye el sistema de distribución de baja tensión, un armario de módulos y pila partida y, opcionalmente, el transformador. Las ventajas de una solución de contenedor en comparación con cargadores individuales son (i) mayor comodidad y menor inversión de construcción civil; (ii) carga flexible con la posibilidad de asignar la potencia automáticamente según la demanda de carga de cada bus, al primer bus se le asigna mayor carga, reduciendo después la carga al llegar más unidades; (iii) distribución inteligente de electricidad ya que los módulos de potencia están controlados por la unidad central que distribuye la electricidad a cada pila; permitiendo manejar mejor la carga máxima y reduciendo costos por carga, mientras que se acarrean menos problemas a la red eléctrica y (iv)

capacidad para cargar buses con una alta potencia si es necesario durante el día. La figura siguiente muestra el principio de funcionamiento de los sistemas centralizadas de carga.

FIGURA 13: Funcionamiento de Sistemas Centralizadas de Carga

Fuente: Xiamen Golden Dragon Bus Co. Ltd

La plataforma de gestión de la carga incluye un centro de supervisión que permite, entre otras cosas, recopilar y analizar datos, además de gestionar jerárquicamente las pilas y estaciones de carga.

Recomendaciones Sistema de Carga
Se recomienda instalar un sistema de carga centralizada en base de contenedores que conectan hasta 10 pilas por contenedor con 2 cables de conexión y una carga enchufable capaz de cargar hasta 20 buses simultáneamente con una potencia de 50 kW por bus.

5.2 CONEXIÓN ELÉCTRICA[46]

EPMTPQ pretende adquirir 40 Autobuses Eléctricos de Baterías, que en un día promedio consumen 7.1 MWh. La carga se realizará en la estación de El Labrador entre 11:00 pm y 5:00 am (carga nocturna). La demanda máxima de energía será de 2 MW (basado en 40 buses y que todos están cargándose con 50kW cada uno en la noche), que normalmente se produce entre la medianoche y las 5:00 am.

En esta sección se presenta un diseño básico inicial para el suministro de energía a los cargadores, incluyendo la conexión a la red de distribución de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ). Se anticipa que los cargadores se distribuyen en dos contenedores, incluyendo transformadores, conmutadores, conversión CA/CC, cargadores, un sistema de control y otros equipos auxiliares. El contenedor se conecta a los cables de CC que proporcionan la conexión de carga al bus eléctrico.

Patio El Labrador

La siguiente figura muestra la ubicación prevista de la subestación de carga en el patio El Labrador [47]① y el recorrido indicativo del cable de conexión a la red EEQ ②. El punto de conexión a la red de

[46] Esta sección se basa en una entrevista con EEQ del 29 de febrero de 2024. (EEQ, 2024).
[47] La conexión a Carcelén no fue discutida con la EEQ por la razón que el predio no está administrado por la EPMTPQ y por lo tanto, desde la viabilidad de implementar un sistema de recarga sería en El

distribución de la EEQ ③ se realizará en una celda de conexión cercana a la Subestación Parque Bicentenario de la EEQ[48]. Esta celda de conexión se alimenta desde la cercana subestación Parque Bicentario ④, siendo una nueva subestación de alta tensión con suficiente capacidad libre.

FIGURA 14: Patio El Labrador con potencial estación de carga para buses eléctricos

Fuente: Google Maps, con adiciones de Grütter Consulting, en base a información de EEQ.

Confiabilidad

En 2025, EEQ planea conectar la subestación Bicentario a la existente subestación de alta tensión El Bosque a través de un alimentador de 22,8 kV. Al hacerlo, EEQ agregará redundancia adicional a esta área, lo que significa que incluso en caso de un corte de energía en la subestación Parque Bicentario, otra opción estará disponible para abastecer la ubicación del cargador. En consecuencia, el riesgo de una interrupción del suministro debido a problemas en las redes de distribución locales de EEQ debería ser pequeño. Sin embargo, como la electricidad se suministra desde fuera de Quito, existe una dependencia del sistema de generación y transmisión de energía que transporta la energía desde la planta de generación hasta la ciudad. Un caso especial es la situación en la que la escasez de energía requiere cortes rotativos de carga en Quito, lo que significa que los clientes de electricidad enfrentan cortes rotativos planificados diariamente para ahorrar energía. Se deberá garantizar que los lugares de carga de los buses eléctricos no estén sujetos a sistemas rotativos de carga.

Labrador. La EPMTPQ no va a lidiar con predios que no son de su administración. Asimismo, sólo una ruta que sale de Carcelén llega a Labrador las demás van a otros puntos.

[48] EEQ no pudo indicar con mayor exactitud la ubicación del punto de conexión, ya que es necesario que la EPMTPQ radique una solicitud a la EEQ.

Calidad de potencia/voltaje

Los cargadores de vehículos eléctricos dependen de la calidad del voltaje. Teniendo en cuenta que la subestación de alto voltaje cercana probablemente proporcione una red "fuerte", no hay preocupaciones inmediatas sobre la calidad del voltaje. Sin embargo, teniendo también en cuenta que el sistema de metro se conecta cerca, puede existir el riesgo que el sistema de metro y el sistema de carga se influyan mutuamente. En consecuencia, se recomienda investigar la calidad del voltaje para esta ubicación específica y tener en cuenta los resultados en el diseño detallado.

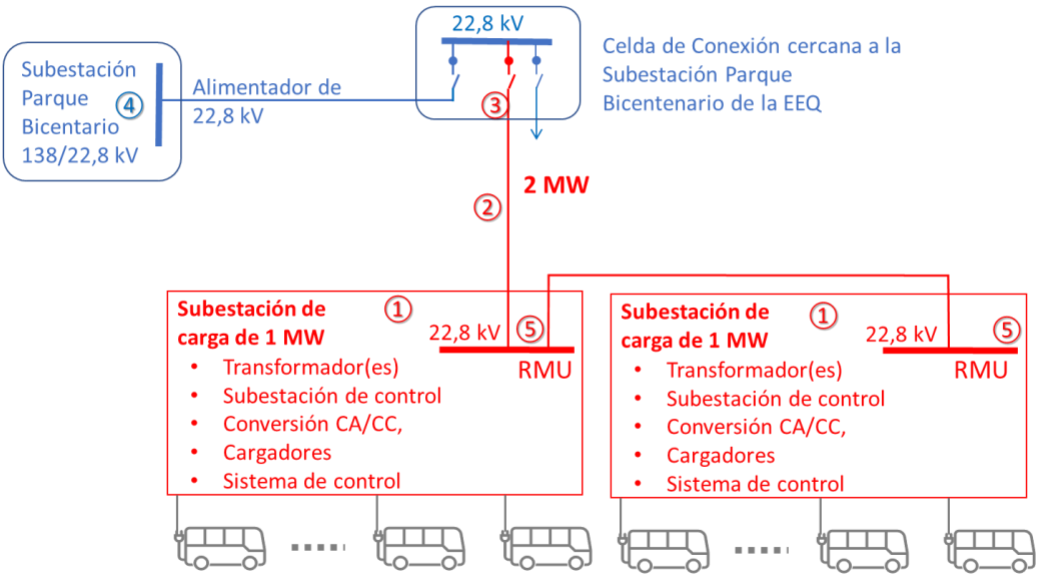
Diseño básico inicial

La siguiente figura muestra el diseño básico inicial de la conexión para la ubicación de cargadores a la red de distribución de 22.8 kV de EEQ en Quito. La figura muestra las siguientes consideraciones de diseño:

- EEQ confirmó en reuniones de febrero y mayo de 2024 que el suministro de 2 MW durante una noche debería ser factible desde la celda de conexión cercana a la Subestación Parque Bicentenario de la EEQ ③.
- Aunque inicialmente se requiere una conexión para 2 MW, se sugiere instalar un cable de 22.8 kV y un conmutador que soporte al menos 7.8 MW[49]. Esto facilitaría la ampliación a 100-150 buses eléctricos en el futuro. EEQ indicó que una conexión de hasta 7.8 MW probablemente requeriría un cable directo conectado a una bahía dedicada de 22,8 kV en la subestación Parque Bicentario. EEQ sólo puede confirmar la viabilidad de una conexión de 7.8 MW después de un estudio de viabilidad.
- En cada contenedor está instalada una unidad principal en anillo (RMU) ⑤ de 22.8 kV. La RMU en el primer contenedor se conecta a la red y proporciona una conexión al segundo contenedor. La RMU también se conecta a los transformadores del contenedor.
- El punto de conexión será en la celda de conexión cercana a la Subestación Parque Bicentenario de la EEQ ③. En consecuencia, todas las partes rojas de la figura siguiente deben incluirse en el alcance de ubicación de carga del proyecto.

[49] EEQ indicó que normalmente cargan sus alimentadores de 22,8 kV hasta 7,8 MW (potencia nominal 12 MW).

FIGURA 15: Posible conexión de la subestación de carga a la red



Fuente: Grütter Consulting AG

La siguiente tabla muestra una estimación del costo de la conexión y el contenedor.

Artículo	número	costo unitario	costo total
Contenedor de carga ①, incluido 1,000 kW con transformador, conversión CA/CC, interruptores, cargadores y sistema de control	2	$800,000	$1,600,000
Conexión a la red y entre los contenedores de carga, incluido el cable subterráneo ② y conexión de 22.8 kV y medición en la celda de conexión cercana a la Subestación Parque Bicentenario de la EEQ ③	1	$100,000	$100,000
Total			**$1,700,000**

Fuente: Grütter Consulting AG, a partir de información del fabricante.

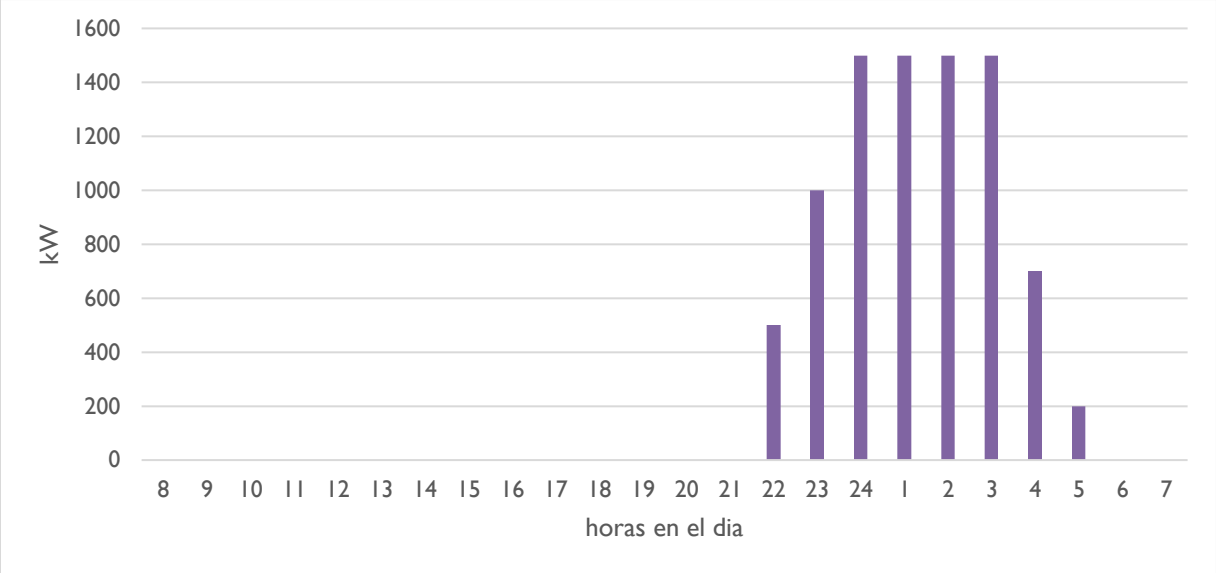
Solicitar una conexión

La conexión de las estaciones de carga deberá ser solicitada por EEQ al menos 1 año antes que se requiera la conexión. La solicitud de conexión irá acompañada de un perfil de carga, es decir, una estimación de la carga esperada de la subestación de carga correspondiente a cada hora del día[50]. La siguiente figura muestra la carga típica para el patio en un día laboral. Puede haber variaciones de hasta 20% dependiendo en que rutas se utilizan los buses, la hora que vuelvan y salen del patio, la cantidad de

[50] El perfil de carga depende un poco de la llegada de los autobuses pero básicamente todos los autobuses empiezan a entrar entre las 11-12 de la noche donde la carga aumenta a 2 MW y luego se mantiene estable hasta las 3 AM aproximadamente y comienza a disminuir con ciertos autobuses ya por completo. Cargados y otros con menos potencia por estar en el último 10% de carga y otros buses ya saliendo antes de las 5AM.

tiempo utilizado para el mantenimiento diario, entre otros. También se puede controlar la entrega de energía a los buses para optimizarlo con la disponibilidad de la red.

FIGURA 15: Carga típica en el patio en un día laboral



Supuestos: 95% de los buses operando con un consumo diario de 200kWh: buses ingresando paulatinamente a la carga en la noche sin arrancar la carga antes de las 10PM; se reduce la entrega de electricidad de los buses debajo del máximo posible para tener una demanda de carga menor
Fuente: Grütter Consulting (Anexo 1)

6 IMPACTO AMBIENTAL Y ENERGIA

6.1 IMPACTOS ESTUDIADOS

Los impactos ambientales y energéticos considerados son:

- Impacto en la contaminación atmosférica local, con especial atención a SO_2, $PM_{2.5}$ y NO_x;
- Impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero;
- Impacto en la contaminación acústica;
- Impacto en el uso de la energía.

Los vehículos eléctricos son mucho más eficientes energéticamente que los motores de combustión interna. Por lo tanto, se produce un importante ahorro de energía cuando se utiliza un bus eléctrico.

6.2 IMPACTO EN CONTAMINACION LOCAL

Los contaminantes atmosféricos más comunes, también conocidos como contaminantes criterio, son el monóxido de carbono (CO), el plomo (Pb), el ozono troposférico (O_3), las partículas (PM), el dióxido de azufre (SO_2) y el dióxido de nitrógeno (NO2)[51]. El ozono troposférico no se emite directamente al aire.

[51] https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants

En el sector del transporte, las emisiones de plomo y SO_2 están relacionadas con el uso de combustibles fósiles en los vehículos. Se controlan mediante el uso de gasolina sin plomo y a través de límites en los niveles de azufre de los combustibles, principalmente el gasóleo. Los demás contaminantes atmosféricos[52] se regulan mediante normas sobre emisiones de gases de escape. La mala calidad del aire perjudica la salud, y las emisiones de los vehículos son una fuente importante de contaminantes. Sin embargo, el calentamiento global ha hecho que las emisiones de CO_2 se tengan en cuenta en las normativas sobre emisiones de vehículos.

La contaminación atmosférica tiene múltiples repercusiones sociales y económicas negativas. La investigación científica demuestra que la contaminación atmosférica tiene un impacto significativo en nuestra salud. Los niños, los ancianos y las personas más pobres son especialmente vulnerables. Entre los efectos nocivos de la contaminación atmosférica figuran la mortalidad prematura, las enfermedades respiratorias y cardiovasculares y las dificultades respiratorias. La mala calidad del aire reduce la calidad de vida y genera importantes costos sanitarios y medioambientales que deben ser asumidos por la sociedad.

Las personas más pobres se ven desproporcionadamente afectadas por la contaminación atmosférica, ya que suelen estar más cerca de sus fuentes (Mitchell, 2003). Al mismo tiempo, contribuyen menos al problema de la contaminación atmosférica, ya que no poseen vehículos privados. Los estudios también han revelado que las mujeres se ven más afectadas por la mala calidad del aire que los hombres (Clougherty, 2010).

En el caso de Quito, y con base en el Perfil Urbano de Salud y Cambio Climático de Quito elaborado por la Organización Mundial de la Salud para el año 2018 el promedio anual de concentración de $PM_{2.5}$ registro 19.8 µg /m³ lo que supera en casi cinco veces los niveles de material particulado, recomendado por la OMS, de máximo de 5 µg /m³. El material particulado es uno de los principales contaminantes del aire en Quito y que proviene especialmente de las fuentes móviles, siendo estas partículas la principal causa de enfermedades respiratorios en la ciudad (WHO, 2022).

En el año 2023, en estudio epidemiológico realizado sobre del impacto en la salud de la contaminación del aire en Quito con base en información de calidad del aire, variables meteorológicas e ingresos hospitalarios de 2014 a 2015, se concluye que existe una asociación significativa entre el aumento de los ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias y las concentraciones de material particulado ($PM_{2,5}$), ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2), (Zhou J, et al., 2023).

La contaminación atmosférica y el cambio climático afectan negativamente la vegetación y fauna, reduciendo la biodiversidad y poniendo en peligro las especies. El cambio climático también plantea graves riesgos para el entorno construido, por ejemplo, debido a la mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos. La contaminación atmosférica aumenta los costos de mantenimiento y limpieza de los edificios afectados por las emisiones de partículas y NO_x, que provocan decoloración y una mayor vulnerabilidad a la intemperie.

La comparación se realiza entre buses diésel nuevos y buses eléctricos nuevos, y no entre los buses diésel operativos existentes y los buses eléctricos nuevos. En esa comparación se indica el impacto de elegir un bus eléctrico frente a uno diésel a la hora de comprar una unidad nueva.

Los niveles de emisión y las posibles reducciones de la contaminación atmosférica se determinan utilizando el modelo de emisiones COPERT de la Agencia Europea de Medio Ambiente, que se basa en

[52] En el caso del ozono troposférico, se regulan los COV y los NO_x.

las emisiones reales de diferentes categorías de vehículos. Sólo se incluyen las emisiones de combustión, ya que no se dispone de datos fiables sobre las emisiones no procedentes de la combustión, por ejemplo, de la abrasión de los frenos y los neumáticos y la resuspensión de partículas. De acuerdo con la Ordenanza Metropolitana No 189 de 2017, los vehículos que ingresan a partir del año 2018 al sistema de trasporte público del Distrito Metropolitano de Quito deben cumplir al menos con los estándares técnicos de la norma Euro III.

La siguiente tabla muestra los niveles de emisiones de un bus urbano estándar de 12 m, Euro III en Quito. Los buses eléctricos no tienen emisiones de combustión.

TABLA 9: Niveles de contaminación de un bus urbano 12 m Euro III

Parámetro	gramos por km	kg por año	kg vida útil bus
$PM_{2.5}$	0.31	20	323
NO_x	17.9	1,165	18,640
SO_2	0.21	14	222

Nota: Datos basados en Modelo de Unión Europea COPERT model Tier 3, Euro III, basado en 50% carga, 2% pendiente promedio, 15km/h velocidad. Para emisiones de SO_2 basado en 250 ppm contenido de sulfuro del diésel (NTE INEN 1489 Enmienda 1, 2022-08). Vida útil 16 años.
Fuente: Anexo I, Grütter Consulting AG.

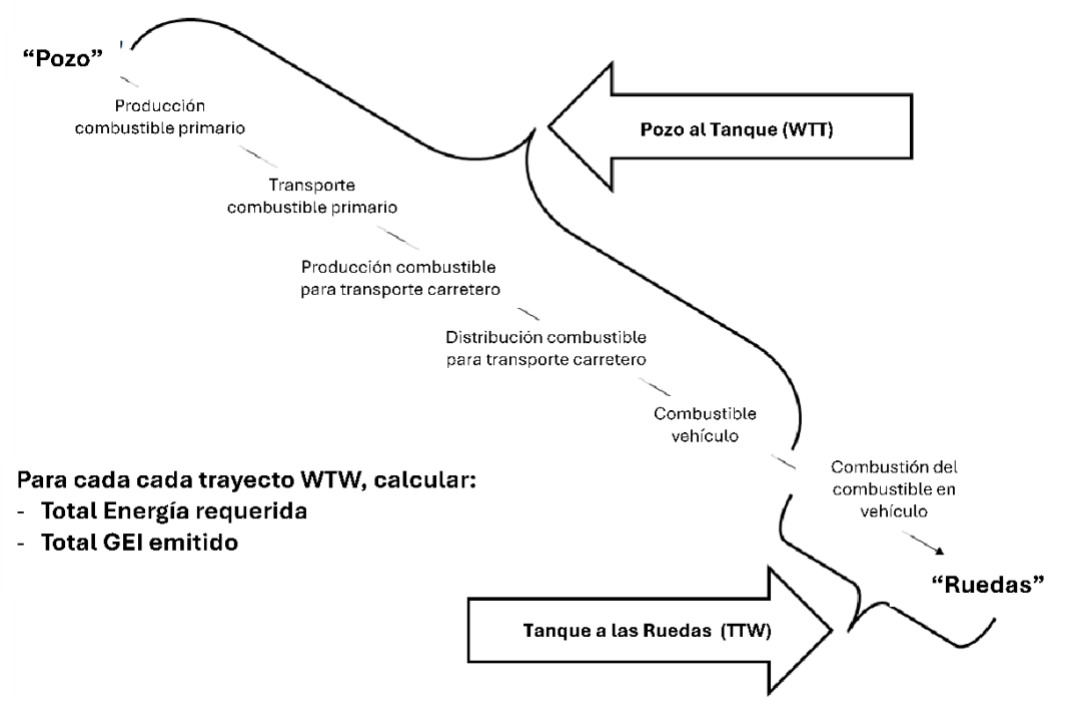
Impacto local de la contaminación
Los buses eléctricos no emiten gases de combustión. Los buses diésel, incluso las unidades modernas, tienen emisiones significativas que provocan una degradación de la calidad del aire y los correspondientes impactos negativos sobre la salud. Cada bus eléctrico de 12m utilizado en Quito reduce, en comparación con las operaciones de un nuevo bus diésel del mismo tamaño, 20 kg de $PM_{2.5}$, 1,165 kg de NO_x y 14 kg de SO_2 anualmente.

6.3 IMPACTO DE GASES EFECTO INVERNADERO

Las emisiones de GEI se diferencian en tres niveles:

- Emisiones directas equivalentes a las de combustión (del tanque a la rueda) o tank-to-wheel (TTW);
- Emisiones directas más indirectas (del pozo a la rueda) o well-to-wheel (WTW);
- Emisiones del ciclo de vida o emisiones desde la fabricación hasta la disposición final (cradle to grave).

FIGURA 16: Alcance de las emisiones Tank-to-Wheel, Well-to-Tank, y Well-to-Wheel



Fuente: (European Commission, 2016); https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/activities/wtw

Los GEIs incluidos bajo la UNFCCC son dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos nitrosos (N_2O), perfluorocarburos (PFCs), hidrofluorocarburos (HFCs), el hexafluoruro de azufre (SF_6) y el trifluoruro de nitrógeno (NF_3). Para el sector del transporte sólo son relevantes el CO_2, el CH_4 y el N_2O. Sin embargo, las emisiones de N_2O son marginales, por lo que sólo se incluyen las de CO_2 y CH_4 (IPCCC, 2006). El carbono negro (BC) es un importante contaminante reconocido por su fuerte impacto climático. Sin embargo, no es contaminante de GEI dentro del acuerdo de París. Todos los Potenciales de Calentamiento Global (GWP) utilizados en el informe corresponden a un periodo de 100 años (GWP_{100}), como es utilizado por la UNFCCC basándose en las últimas versiones del IPCC.

Existe un vínculo entre los contaminantes locales y la mitigación del cambio climático en el caso de las emisiones de partículas. El aumento de las emisiones de partículas empeora la calidad del aire y aumenta las emisiones de carbono negro (BC). Una evaluación científica de las emisiones de BC y sus repercusiones concluyó que estas son las segundas después del CO_2 en cuanto a forzamiento del clima. En términos de masa equivalente, el BC es en promedio 2,700 veces más eficaz que el CO_2 a la hora de provocar impactos climáticos en un plazo de 20 años, y 900 veces más eficaz en un plazo de 100 años (Bond, 2013; Banco Mundial, 2014). La calidad del aire puede mejorar si se reducen las partículas ultrafinas de los gases de escape diésel y el BC, reduciendo así los contaminantes climáticos de corta vida[53].

Las emisiones directas más las indirectas se definen como las emisiones de combustión más las emisiones aguas arriba. Esto equivale al término emisiones del pozo a la rueda (que es la suma de las emisiones TTW más las emisiones WTT). En el caso de los ***vehículos fósiles***, las emisiones WTW se

[53] Esto coincide con la estrategia seguida, por ejemplo, por la Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC)formada por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

basan en las emisiones directas multiplicadas por un factor por defecto aguas arriba por la extracción, refinería y transporte del combustible fósil correspondiente.

Para los ***vehículos eléctricos***, las emisiones WTW incluyen las emisiones causadas por la producción de electricidad, la transmisión y las pérdidas de distribución.

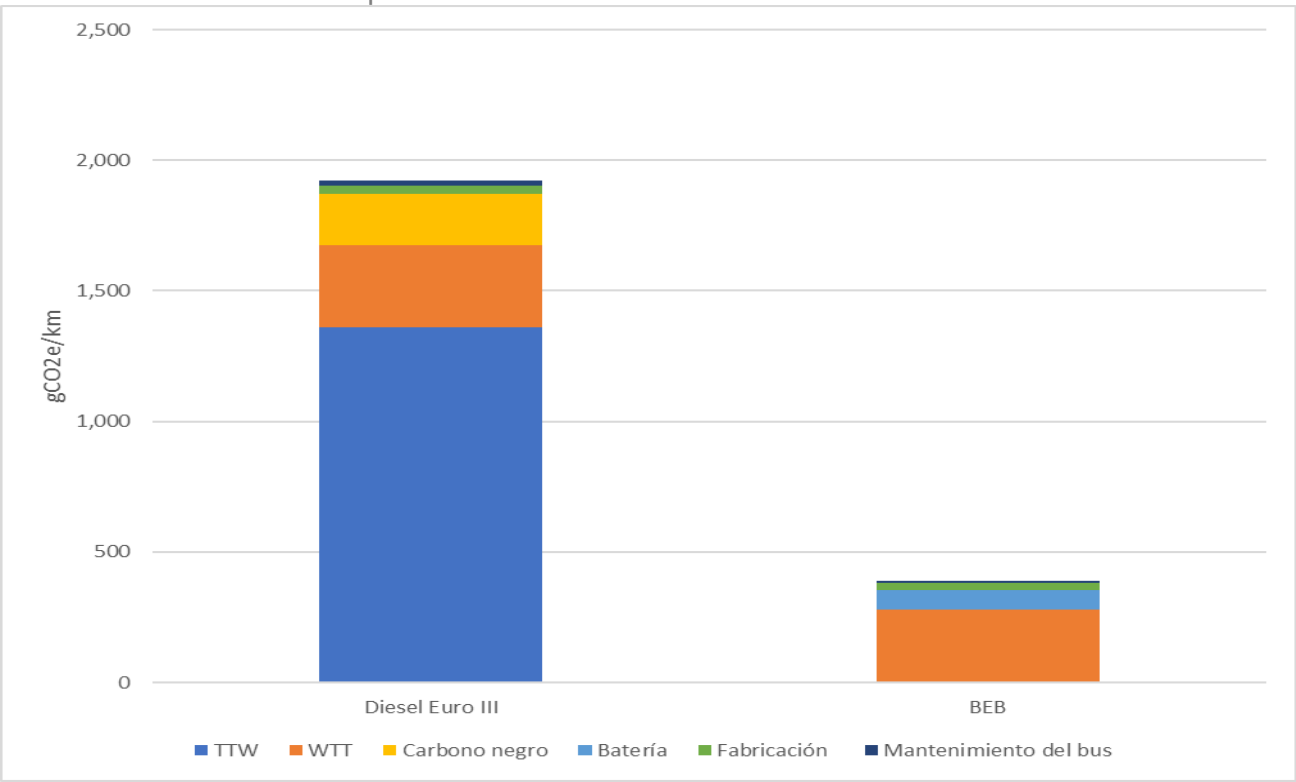
Las emisiones del ciclo de vida (cradle to grave) incluyen la fabricación y disposición final del vehículo. Las emisiones relacionadas con la infraestructura (vías) utilizada por los vehículos no se incluyen porque un VE sustituye a un vehículo fósil de idéntica categoría, lo que se traduce en idénticos requisitos de infraestructura. La determinación de las emisiones del ciclo de vida es mucho menos precisa que la de las emisiones directas e indirectas. Su determinación sirve principalmente a efectos informativos. Las dos fuentes incluidas para las emisiones del ciclo de vida son la fabricación de vehículos y baterías. Para determinar las emisiones por kilómetro, se determina la vida útil y el kilometraje anual del vehículo junto con el de las baterías. La vida útil de los vehículos fósiles y de los VE no son necesariamente la misma: los VE tienen menos vibraciones y piezas móviles y, por tanto, pueden utilizarse durante más tiempo.

En la siguiente figura se comparan las emisiones de gases de efecto invernadero según el ciclo de vida de un bus tipo diésel[54] y uno eléctrico, teniendo en cuenta las condiciones de operación en Quito (ver Anexo I) y usando el factor del sistema interconectado nacional de Ecuador de 280 gCO_2/kWh[55].

[54] (i) Los consumos específicos de diésel de buses en operación o buses nuevos no cambian entre Euro I y Euro V, (ii) el LCA está basado en la vida de 1 millón de km de bus lo que corresponde también a Quito. Puede haber variaciones con km un poco mayor, pero allí se hace reacondicionamiento lo que lleva de nuevo al mismo, (iii) No importa por el ciclo de vida quién y donde se opera el bus, (iv) el cálculo se basa en que se reemplaza un bus de EPMTPQ que se reemplazaría de todas maneras. En este momento se reemplaza o con un bus diésel o un bus eléctrico. Lo que pasa con el bus reemplazado es exactamente lo mismo si se reemplaza con un bus diésel o eléctrico. Opción 1: el operador compra un nuevo bus diésel y reemplaza el bus diésel viejo y Opción 2: el operador compra un bus eléctrico nuevo y reemplaza el viejo bus diésel. En los dos casos se reemplaza el bus diésel entonces no hay un efecto diferencial.

[55] Fuente: UNFCCC, The IFI Dataset of Default Grid Factors, IFI 3.2

FIGURA 17: Emisiones de GEI para un bus de 12 metros



TTW: tank-to-wheel; WTT: well-to-tank
Nota: Con base en Euro III para bus diésel y bus eléctrico: con base en las condiciones operativas en Quito; emisiones de fabricación y mantenimiento basadas en Mobitool versión 2.1; emisiones de batería basados en ICCT; Carbono negro basado en COPERT y IPCC; factor de emisión eléctrica, UNFCCC IFI versión 3.2.
Fuente: Anexo I, Grütter Consulting

Un bus eléctrico en Quito tiene en términos de emisiones WTW un ahorro del 83% en comparación con un bus diésel. Según una evaluación del ciclo de vida, la reducción de GEI es del 80%. Igualmente, el bus eléctrico recupera en menos de 5 meses de operación las emisiones de GEI relacionadas con la batería. Cada bus eléctrico ahorra más de 90 toneladas de CO_2 al año y 1,450 toneladas a lo largo de su vida útil.

Los valores son los mismos si se hace la comparación con un reemplazo de los buses existentes de diésel o si se hace la comparación con la alternativa de comprar un bus diésel nuevo por ser las dos unidades Euro III y por no cambiar el consumo energético de los buses entre Euro I y Euro V de una manera significativa. El impacto ambiental se calcula con base en reemplazar un bus diésel. No es necesario que el bus que se reemplaza sea sacado de servicio para tener este impacto. Si el bus viejo sigue circulando tiene emisiones, pero se usa porque tiene una demanda, es decir, reemplaza una unidad aún más vieja o aumenta la oferta de transporte público, por ejemplo, en rutas no servidas o en otras ciudades secundarias llevando a un cambio modal y por ende menos emisiones respecto otros modos de transporte. También si se compara la compra de un bus diésel nuevo y un bus eléctrico, las emisiones que causa o evite el bus reemplazado viejo es exactamente el mismo, es decir, la compra de un bus eléctrico no tiene ninguna incidencia sobre la continuación de servicio del bus existente y sus emisiones o reducción de emisiones adicionales.

Impacto en GEI
Un bus eléctrico en Quito, en términos de emisiones WTW, reduce las emisiones de GEI en más de 80% en comparación con un bus diésel. El bus recupera las emisiones de GEI relacionadas con la fabricación de la batería en menos de cinco meses de funcionamiento. Al año, cada bus eléctrico ahorra 90 toneladas de CO_2 y a lo largo de su vida útil de 16 años 1,450 toneladas de CO_2.

6.4 EMISIONES DE RUIDO

En términos de emisiones acústicas, los buses eléctricos tienen aproximadamente 10-20 decibelios menos de ruido en comparación con los buses diésel (Laib, 2019). La escala de decibelios es logarítmica, lo que se traduce en una reducción del ruido de un bus eléctrico frente a uno diésel de alrededor del 50%.

Impacto del ruido
En comparación con los autobuses diésel, los autobuses eléctricos reducen en un 50% las emisiones de ruido. La mayor reducción de ruido se produce en las paradas del bus y durante el arranque.

6.5 IMPACTO EN ENERGIA

Los vehículos eléctricos son mucho más eficientes energéticamente que los motores de combustión interna. La electricidad alimenta directamente el sistema de propulsión y no es necesario convertirla de una forma de energía a otra, como ocurre con los motores de combustión interna. Los vehículos eléctricos convierten hasta el 80% de la energía eléctrica de la red en energía para las ruedas, mientras que los vehículos convencionales de combustible fósil sólo convierten entre el 10% y el 30% de la energía almacenada del combustible fósil en energía para las ruedas. Por lo tanto, se produce un importante ahorro de energía cuando se utiliza un bus eléctrico. La siguiente tabla muestra el consumo de energía y el ahorro anual por bus diésel y eléctrico

TABLA 10: Uso de la energía en un bus urbano de 12 metros para Quito (por año)

Parámetro	Bus diésel	Bus eléctrico
Uso de la energía en GJ	1,194	234
Uso del diésel	50.6 l/100 km	--
Uso de electricidad	--	1.0 kWh/km

Nota: Consumo de combustible de diésel se basa en datos de la EPMTPQ a 2024 sobre costos de alimentadores; el consumo de electricidad está basado en cifras promedios monitoreadas de operadores de buses eléctricos en diferentes países (ajustado a no uso de aire acondicionado y pendientes mayores)
Fuente: Anexo I, Grütter Consulting

Impacto de energía
Los buses eléctricos son mucho más eficientes energéticamente que los buses diésel. Cada bus eléctrico en Quito ahorra 960 GJ de energía al año en comparación con un bus diésel. Una flota de 40 buses eléctricos significaría una demanda energética anual de 2.6 GWh mientras que la demanda de electricidad en el Ecuador es mas de 27,000 GWh por año[56].

[56] Energy Statistics Data Browser – Data Tools - IEA

6.6 IMPACTOS AMBIENTALES POTENCIALES DE BATERIAS

El principal reto medioambiental de los vehículos eléctricos son las baterías. Los principales retos en la cadena de valor de las baterías son la huella de GEI de su producción y los riesgos sociales, medioambientales y de integridad a lo largo de la cadena de valor. La huella medioambiental de las baterías puede mejorarse pasando de una cadena de valor lineal a una circular. Una preocupación importante es el uso de las baterías una vez que han llegado al final de la vida útil en el vehículo. Las opciones disponibles son la prolongación de la vida útil de las baterías mediante una segunda aplicación, el reciclado o la eliminación adecuada de la batería.

Para 2030, se calcula que 1.2 millones de baterías llegarán al final de su vida útil en todo el mundo, cifra que aumentará a 14 millones en 2040 y a 50 millones en 2050. La reutilización del 50% de estas baterías para el almacenamiento de energía podría proporcionar una capacidad de almacenamiento de 96 GWh en 2030, 3,000 GWh en 2040 y 12,000 GWh en 2050 (ICCT, 2023). Sin embargo, para aprovechar plenamente este potencial hay que superar ciertos retos. Para que las baterías puedan utilizarse de forma estacionaria, primero hay que adaptarlas. Se necesitarán distintos procedimientos para adaptarlas a este nuevo funcionamiento en lugar de uno normalizado.

Las baterías pueden ser (i) "reutilizadas", lo que requiere la recolección de baterías, la selección de aquellas con suficiente capacidad restante o estado de salud (SOH) y la combinación de baterías similares; no se garantiza el rendimiento, sino sólo la capacidad residual esperada; (ii) "reacondicionadas", lo que significa que las baterías recolectadas son desmontadas, extraídas de los módulos para ser medidas, clasificadas y sometidas a pruebas, para luego ser reacondicionadas o eliminadas, las celdas se reacondicionan o reciclan y los módulos se vuelven a embalar en nuevas baterías, además de necesitar una nueva certificación; o (iii) "refabricación", en la que las baterías de los VE se restauran y se reutilizan en vehículos similares (SPG, 2021). Un reto será seguir siendo competitivos con las baterías nuevas, cuyo precio está bajando rápidamente. La falta de normas y reglamentos para el uso de baterías estacionarias representa uno de los obstáculos más importantes. No hay garantías de calidad, seguridad, eficiencia, etc. Sin embargo, los fabricantes ya están estableciendo alianzas con empresas energéticas para asegurarse un lugar en el mercado emergente del almacenamiento de energía (McKinsey, 2019).

El reciclaje eficiente de las baterías podría reducir la demanda anual de nuevas extracciones de litio, cobalto, níquel y manganeso en un 3% en 2030, un 11% en 2040 y un 28% en 2050, por lo que es fundamental crear políticas de apoyo al reciclaje (ICCT, 2023). Las baterías de iones de litio se componen de diferentes materiales cuyo valor es elevado. Sin embargo, la rentabilidad del reciclaje dependerá de los costos de recolección, transporte, almacenamiento, clasificación, desmontaje, etc. Algunos recicladores de litio que operan en la actualidad en China lo hacen con un atractivo margen de beneficios y se espera que crezcan sustancialmente. El material de baterías disponible para reciclar está aumentando de 200,000 toneladas en 2020 a 1.4 millones de toneladas en 2030 y a 7.3 millones de toneladas en 2040 (McKinsey, 2023). Para 2030, se calcula que el reciclaje de baterías será rentable, con un valor material de 5,200 USD por tonelada de batería y un costo de extracción de 4,000 USD, lo que deja un margen de beneficio de 1,600 USD por tonelada de batería (McKinsey, 2023).

La República Popular China y la Unión Europea lideran el establecimiento de políticas y marcos para la gestión responsable de las baterías al final de su vida útil. Entre ellas se incluye la responsabilidad ampliada del productor (RAP), que responsabiliza a los fabricantes la recolección y transporte de las baterías al final de su vida útil y establece plataformas de rastreo para garantizar una recolección adecuada. La Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE) ha establecido normas sobre la durabilidad de las baterías de los vehículos eléctricos. El Reglamento Técnico Global de la ONU

exige que las baterías de los VE conserven al menos el 80% de su energía nominal utilizable después de cinco años, o 100,000 km, y al menos el 70% después de ocho años, o 160,000 km. La notificación normalizada de los datos de SOH de las baterías es esencial para informar sobre la idoneidad de las aplicaciones de segunda vida de las baterías de vehículos eléctricos, y la CEPE lo contempla en sus normas de durabilidad de las baterías (ICCT, 2023).

En la actualidad, existe muy poca información sobre los costos tanto del reciclado como del enfoque de segunda vida. Esto depende en gran medida de los costos de recolección, transporte, almacenamiento, clasificación, desmontaje, reutilización y, finalmente, reciclaje de las baterías. Por lo tanto, todavía no se puede determinar la viabilidad financiera universal de estas propuestas para las baterías de iones de litio.

Las dos alternativas medioambientalmente sostenibles del reciclado y la segunda vida, debido a muchos elementos compartidos de la cadena de suministro, presentan retos técnicos, normativos y financieros similares. Aunque los beneficios añadidos de una segunda vida son significativos y, por tanto, la oportunidad más atractiva hasta la fecha. Prolongar la vida útil de una batería de vehículo eléctrico resulta aún más atractivo cuando se revisa la definición de baterías "gastadas" de vehículos eléctricos. Éstas se clasifican como baterías "gastadas" cuanto dejan de cumplir los elevados requisitos de suministro de energía y carga útil de los vehículos eléctricos. Pero estas baterías aún podrían conservar hasta un 70-80% de la capacidad original, por lo que sin duda pueden utilizarse para aplicaciones con requisitos reducidos (Rößiger, 2018). A partir de estas baterías "gastadas" de vehículos eléctricos surgirán nuevos mercados.

Recomendaciones de políticas de baterías y segunda vida útil
Para que las baterías de los vehículos eléctricos puedan llegar al final de su vida útil de forma segura y adecuada, se recomienda adoptar una normativa al respecto en Ecuador, preferiblemente basada en la responsabilidad ampliada del productor (RAP), en la que los sujetos de acuerdo con la RAP deban cumplir diversos requisitos y obligaciones de reciclado. Las normativas de la UE, la India, la República Popular China y otros países pueden servir de modelo.

Los posibles usos de la segunda vida útil de las baterías de los vehículos eléctricos dependen en gran medida de su estado, pero estas baterías pueden conservar hasta un 70-80% de la capacidad original e ir a otras aplicaciones como usos semi-estacionarios como baterías para iluminación en áreas remotas, o completamente estacionarios, como amortiguadores de picos de demanda o producción para la red eléctrica.

7 IMPACTO SOCIAL Y TRANSICIÓN JUSTA

En comparación con los buses de operación a diésel, los buses eléctricos requieren menos mantenimiento además de otros conocimientos o destrezas a desarrollar. Aunque el mantenimiento diario y las rutinas de control son los mismos para los buses eléctricos que para los de diésel, los e-buses no tienen cambios periódicos de aceite y menos piezas móviles; por tanto, conllevan menos reparaciones. Las nuevas destrezas para desarrollar se encuentran en el área electrónica; sin embargo, la EPMTPQ ya ha desarrollado destrezas en esta área con la operación de los trolebuses desde el año 1995.

El inicio de una operación con nuevos buses eléctricos es una oportunidad de transición de la EPMTPQ, dado que se puede iniciar la formación del propio personal de la EPMTPQ que hacen el mantenimiento a unidades diésel articuladas y biarticuladas y de unidades de trolebuses hacia las unidades de BEB.

8 IMPACTO FINANCIERO Y ECONOMICO

8.1 BASE METODOLÓGICA

Se hace una comparación de los costos de operación de un bus diésel con los de uno eléctrico. Esta evaluación examina los costos relativos o diferenciales entre las tecnologías de buses para determinar si los e-buses son competitivos en comparación con los buses diésel. Este análisis no determina si los servicios de transporte público en sí mismos son rentables o no.

La inversión en buses eléctricos y su operación generan externalidades positivas, concretamente bienes públicos, donde los bienes no son excluyentes ni rivales. En este sentido, no se puede excluir a nadie del uso, y el uso por parte de un individuo no reduce la disponibilidad para los demás. Los siguientes bienes públicos son producidos por los e-buses, para los cuales los valores económicos se han cuantificado: (i) mejora de la calidad del aire gracias a la reducción de las emisiones de contaminantes locales; (ii) reducción del calentamiento global debido a la reducción de emisiones de GEI; (iii) reducción de niveles de ruido.

El costo económico de las emisiones se calcula asignando un costo monetario a las emisiones de SO_2, $PM_{2.5}$, NO_x y CO_2. El costo económico de los contaminantes atmosféricos aplicados en Ecuador procede de una publicación del Fondo Monetario Internacional (FMI) y su base de datos (IMF, 2014). Todos los valores se actualizan a USD de 2023 utilizando un deflactor del PIB y actualizando el PIB per cápita de Ecuador utilizando un enfoque de paridad de precios de compra basado en los últimos datos disponibles del Banco Mundial. El costo de los contaminantes calculado por el FMI se basa en los niveles locales de contaminación a nivel del suelo, el impacto sobre la salud y los costos causados por este tipo de contaminación en Ecuador. Esto se basa en la exposición de la población a la contaminación y en cómo el aumento de la contaminación incrementa los riesgos de mortalidad utilizando las funciones de dosis-respuesta a la concentración formuladas por la Organización Mundial de la Salud. El mayor riesgo de mortalidad o, más exactamente, el valor de la muerte prematura se valora económicamente a partir de estudios de preferencias declaradas realizados por la OCDE.

El costo de la contaminación acústica procede de un estudio-meta del Victorian Transport Institute, el cual se ha ajustado a los costos en Ecuador. Los costos económicos de la contaminación se incrementan un 2% anual en términos reales. La siguiente tabla muestra los valores utilizados para este informe.

TABLA 11: Valores económicos utilizados para los diferentes contaminantes

Parámetro	Costo económico en USD 2023	Costo económico promedio durante la vida útil[57]
$PM_{2.5}$ por ton	29,921	35,057
NO_x por ton	227	267
SO_2 por ton	1,105	1,294

[57] Este valor toma en consideración un aumento del costo real de 2% por año durante la vida útil del bus de 16 años

Parámetro	Costo económico en USD 2023	Costo económico promedio durante la vida útil[57]
Ruido por km	0.005	0.005

Fuente: Anexo I, Grütter Consulting AG

En el caso del CO_2, el costo económico se basa en el costo externo del calentamiento global expresado a través del costo social del carbono (CSC). Este último es una estimación de los daños económicos asociados al aumento de las emisiones de CO_2. La siguiente tabla muestra diversas estimaciones de los Bancos Multilaterales de Desarrollo sobre el CSC y su incremento anual. A efectos de cálculo, este informe asume el valor promedio de las diferentes fuentes para el año 2023 o sea 66 USD por tCO_2, que se incrementa con un 2% anual en términos reales, resultando en 79 USD por tCO_2 como media durante la vida útil de los buses.

TABLA 12: Costos Social del Carbono

Fuente	Valor en 2020 (USD)	Incremento anual	Valor en 2023 (USD)
Banco de Desarrollo Asiático	40	2%	49
Banco Europeo para el Desarrollo y Reconstrucción	46	2%	56
Banco Europeo de Inversiones (EIB)	48	2.70%	61
Banco Mundial	80	2.25%	99
Promedio		**2.2%**	**66**

Fuentes: (Germanwatch & NewClimate Institute, 2018) cálculos por Grütter Consulting: EIB expresados en Euro y convertidos a USD en base de la tasa promedio de cambio en 2020 (Oanda currency converter); USD 2022 en base de https://stats.areppim.com/calc/calc_usdlrxdeflator.php

Un importante factor económico es también que los buses operan actualmente con diésel subsidiado. El valor del mercado es 2.5 veces más alto que el valor pagado actualmente. Los cálculos son realizados con los valores subsidiados y del mercado del diésel.

8.2 COMPARACION ENTRE BUS A DIESEL Y ELECTRICO

Este análisis muestra el costo relativo de los buses diésel frente a los eléctricos. El criterio utilizado es el costo total de propiedad (TCO) por kilómetro. El análisis financiero se basa en un enfoque de costos diferenciales. Se incluyen todos los costos del sistema para los buses eléctricos, es decir, buses, los cargadores correspondientes y las conexiones a la red. La siguiente tabla muestra los principales supuestos y datos utilizados para los cálculos financieros.

TABLA 13: Principales Supuestos y Datos

Parámetro	Valor	Fuente
Precio diésel no-subsidiado	1.08 USD/l	Factura Petroecuador a EPMTPQ del 24.2.2024; incluye IVA
Precio diésel subsidiado	0.43 USD/l	
Costo consumo electricidad 8AM -6PM	0.084 USD/kWh	Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables; pliego tarifario 2024; precios según pliego por
Costo consumo electricidad 6PM -10PM	0.096 USD/kWh	
Costo consumo electricidad 10PM -8AM	0.073 USD/kWh	
Costo potencia	4.05 USD/kW/mes	

Parámetro	Valor	Fuente
		industriales alto voltaje aplicados a EPMTPQ
Costo total electricidad al cargar únicamente entre 10PM y 8AM	0.11 USD/kWh	Cálculo de Grütter Consulting basado en una flota de 40 buses
Costo total electricidad al cargar 15 minutos en el día y entre 10PM y 8AM	0.13 USD/kWh	Cálculo de Grütter Consulting basado en una flota de 40 buses
Distancia recorrido anual	65,000 km	Con base en rutas 2-8; 330 días de operación por año
Consumo de diésel bus diésel	60.6 l/100km	EPMTPQ 2024 actualización de la estructura de costos del pago del servicio de alimentación
Consumo electricidad bus eléctrico	1.0 kWh/km	Promedios internacionales sin AC
Vida útil bus	16 años	Igual diésel y eléctrico; 1 millón de km. Para bus eléctrico se incluye un cambio de batería en el año 8.
Vida útil batería	8 años	Garantías fabricante 8 años con 80% SOH
Vida útil sistema de carga	16 años	Valores de la industria
Vida útil componentes de la red eléctrica	40 años	
Cantidad de buses eléctricos a comprar	40 buses	Con base en presupuesto de 12MUSD
CAPEX bus diésel	150,000 USD	Bus nuevo Euro III; cotización MIRAL, 2024
CAPEX bus eléctrico	230,000 USD	Batería de al menos 360 kWh; con base en diferentes contratos de compra; MIRAL ofrece actualmente por 260,000 USD
CAPEX sistema de carga	1,600,000 USD	Para 40 buses eléctricos con 2 contenedores cada uno de 1,200kW, transformador, conversión CA/CC, interruptores, cargadores y sistema de control
CAPEX conexión a la red	100,000 USD	Conexión a la red y entre contenedores de carga, incluido el cable subterráneo y conexión de 22.8 kV y medición en lal celda de conexión cercana a la Subestación Parque Bicentenario de la EEQ
CAPEX pilas	10,000 USD por pila	Pilas con 2 conectores (para 2 buses), su base y cableado al contenedor
Costo por kWh de batería en 8 años	100 USD/kWh	Costo en 2018: 300 USD/kWh; proyecciones US DOE, 2017 estiman hasta 2025 una reducción de12% por año[58]

[58]https://energy.gov/sites/prod/files/2017/02/f34/67089%20EERE%20LIB%20cost%20vs%20price%20metrics%20r9.pdf

Parámetro	Valor	Fuente
Costos llantas bus diésel	0.07 USD/km	EPMTPQ 2024 actualización de la estructura de costos del pago del servicio de alimentación
Costos llantas bus eléctrico	0.08 USD/km	Buses eléctricos en promedio costos 20% más altos en llantas por mayor peso y frenado/aceleración más fuerte
Costos mantenimiento buses diésel	0.24 USD/km	EPMTPQ 2024 actualización de la estructura de costos del pago del servicio de alimentación preventivo y planificado
Costos mantenimiento buses diésel	0.14 USD/km	Buses eléctricos en promedio costos 40% menores (ADB, 2018)
Costos mantenimiento sistema de carga y de la red eléctrica	2% CAPEX	Estándar industrial
Costo personal	3,115 USD/mes/bus	EPMTPQ 2024 actualización de la estructura de costos del pago del servicio de alimentación; igual valor bus diésel y bus eléctrico
Costos seguros	0.4% CAPEX	Area Administrativa y Financiera de la EPMTPQ, 2024
Tasa de interés anual	9.6%	EPMTPQ 2024 actualización de la estructura de costos del pago del servicio de alimentación; crédito de 10 años, pagos constantes mensuales, 80% del CAPEX
WACC	10.2%	Calculado Grütter Consulting[59]

De la siguiente tabla se muestra que los buses eléctricos demandan un costo de capital (CAPEX) dos veces superior al de los buses diésel, incluyendo las inversiones en infraestructura de carga y conexión a la red. Además, los buses eléctricos también tendrán que sustituir sus baterías al cabo de 8 a10 años. Sin embargo, esta reinversión tiene un costo relativamente moderado, de 36,000 dólares por bus, gracias al descenso de los costos de las baterías. Por lo tanto, no es necesario hacer provisiones especiales para este costo de reinversión.

Los gastos operativos (OPEX) son mucho más bajos para los buses eléctricos que para los buses diésel. Esto se debe principalmente a costos de energía mucho más bajos. Los costos energéticos más bajos también significan una menor exposición a los precios internacionales altamente fluctuantes de la energía y una mayor sostenibilidad financiera de las operaciones de transporte público, ya que los costos operativos son mucho más bajos y están menos expuestos a las fluctuaciones.

TABLA 14: Comparación de costos entre diésel y BEB en Quito (USD de 2023)

[59] Con base a la tasa de interés comercial 9.6%; 80% crédito; tasa capital propio 22% (UNFCCC, CDM Methodological Tool 27: Investment Analysis Version 13.0, 2023; valor para el sector de transporte de Ecuador); tasa de impuesto corporativo 25% (https://taxsummaries.pwc.com/ecuador/corporate/taxes-on-corporate-income)

Parámetro	Bus diésel	Bus eléctrico
CAPEX bus	150,000	230,000
CAPEX sistema de carga incluyendo conexión a la red	0	47,500
CAPEX Total Año 0	**150,000**	**277,500**
Costo reemplazo de la batería año 9	0	36,000
Costo energía por año subsidiado	14,114	
Costo energía por año no subsidiado	35,441	7,175
Costo mantenimiento bus por año	20,150	14,820
Costo de mantenimiento cargador, red, patio de buses por año.	0	950
Costo promedio de seguros por año	600	920
Administración, staff y otros costos por año	37,380	37,380
Costo financiero promedio por año	4,195	7,761
OPEX anual promedio combustible subsidiado	**76,439**	**69,006**
OPEX anual promedio combustible no subsidiado	**97,766**	**69,006**
TCO por km combustible subsidiado USD/km	**1.31**	**1.34**
TCO por km combustible no subsidiado USD/km	**1.64**	**1.34**
Costo ambiental de contaminación (USD/km)	**0.15**	**0.02**
TCO económico por (USD/km)	**1.79**	**1.37**

Fuente: Anexo I, Grütter Consulting AG

El CAPEX de un e-bus incluyendo la parte de carga, es casi el doble de un bus diésel; sin embargo, el bus diésel tiene costos operativos más altos que el bus eléctrico. Con base al diésel subsidiado, los TCO del bus eléctrico y del bus diésel son casi iguales. Al hacer cálculos con un diésel no subsidiado el TCO del bus eléctrico es 18% menor que del bus diésel. Los buses eléctricos tienen un TCO 24% más bajo, tomando los costos económicos que se basan en un diésel no-subsidiado y en donde también se incluyen costos ambientales.

Detallando la inversión diferencial entre el bus eléctrico y el bus diésel se observa que es más rentable en términos financieros y más aún en términos económicos el hacer esta inversión adicional la cual deriva en una tasa interna de retorno financiero de 23% (con base en diésel no subsidiado; 1% con base en diésel subsidiado) y una tasa económica interna de retorno de 31%.

Análisis de sensibilidad

Se hace un análisis de sensibilidad variando ±20% el precio del diésel y de la electricidad además de ±10% la inversión en los buses eléctricos más su sistema de carga. El resultado arroja datos robustos que indican: (i) buses eléctricos tienen TCOs financieros comparables a buses diésel en caso de diésel subsidiado; (ii) buses eléctricos tienen TCOs financieros más bajos que buses diésel en caso de diésel no-subsidiado y (iii) buses eléctricos tienen TCOs económicos mucho más bajos que buses diésel (vea Anexo I para detalles).

TABLA 15: Análisis de Sensibilidad de TCO financiero y económico

Parámetro	TCO financiero			TCO económico	
	Bus diésel con subsidio (USD/km)	Bus diésel sin subsidio (USD/km)	BEB (USD/km)	Bus diésel sin subsidio (USD/km)	BEB (USD/km)
Caso base	**1.31**	**1.64**	**1.34**	**1.79**	**1.37**
Aumento del 20% del costo del diésel	1.35	1.75	1.34	1.90	1.37
Disminución del 20% del costo del diésel	1.27	1.53	1.34	1.68	1.37
Aumento del 20% del costo de electricidad	1.31	1.64	1.37	1.79	1.39
Disminución del 20% del costo de electricidad	1.31	1.64	1.32	1.79	1.34
Aumento del 10% CAPEX sistema e-bus	1.31	1.64	1.38	1.79	1.40
Disminución del 10% CAPEX sistema e-bus	1.31	1.64	1.31	1.79	1.33

Fuente: Anexo 1, Grütter Consulting AG

8.3 INVERSION DE FLOTA

Un proyecto de compra de buses eléctricos contempla además de los buses y su sistema de carga, los componentes de; (i) un contrato de mantenimiento, servicio y capacitación; (ii) una grúa y (iii) asistencia técnica para el diseño final del sistema eléctrico y del patio, además la supervisión y manejo de la licitación. La siguiente tabla muestra los costos de inversión total de un proyecto.

TABLA 16: Inversión Proyecto

Concepto	Valor en USD	Comentario
40 buses eléctricos	9,200,000	Una flota menor no resulta en una reducción proporcional de costos
Sistema de carga con conexión a la red para 40 buses eléctricos y 22 pilas con 2 conectores	1,920,000	
Contrato de mantenimiento, servicio y capacitación de un (1) año	700,000	Cifra en base de contratos similares en otros países
1 grúa pesada para buses	300,000	Valor del mercado
Asistencia técnica	400,000	Diseño en detalle del patio y de la conexión eléctrica; supervisión de la licitación
Inversión total	**12,520,000**	

La inversión total para 40 buses eléctricos de 12m es de 12.5 millones de USD.
La siguiente tabla nos da el impacto ambiental y económico de una flota de 40 buses eléctricos (comparado con 40 buses diésel).

TABLA 17: Impacto Ambiental de una Flota de 40 Buses Eléctricos de 12m

Parámetro	Valor
Reducción de GEI de la flota por año / vida útil	3,600 / 58,000 t
Reducción de $PM_{2.5}$ de la flota por año / vida útil	0.8 / 13 t
Reducción de NO_x de la flota por año / vida útil	47 / 746 t
Reducción de SO_2 de la flota por año / vida útil	0.6 / 9 t
Ahorro económico por impacto ambiental de la flota por año / vida útil	5.5 millones de USD
Ahorro económico por impacto ambiental más ahorro de subsidios de diésel de la flota por año / vida útil	19 millones de USD

Es notable que el ahorro económico por menores impactos ambientales y por un menor subsidio de diésel, deriva en un ahorro 50% mayor que la inversión completa del proyecto.

8.4 RIESGOS Y SU MANEJO

Buses eléctricos a batería son una novedad en Quito. No obstante, conllevan ciertos riesgos que hay que gestionar. En el siguiente cuadro se enumeran los principales riesgos identificados, así como las medidas para gestionarlos.

TABLA 18: Potenciales Riesgos

Riesgo	Medidas de mitigación
Buses de baja calidad	Los buses eléctricos son fabricados principalmente por empresas chinas. Varios proveedores chinos ofrecen buses eléctricos de buena calidad, pero las unidades más baratas suelen ser de mala calidad. Por lo tanto, es fundamental tener documentos de licitación con las especificaciones adecuadas y sistemas de garantía que aseguren productos de alta calidad.
Falta de capacidad de mantenimiento puede resultar en bajos índices de disponibilidad de los buses	En el contrato de compra se recomienda incluir un contrato de servicio, mantenimiento y capacitación de al menos un (1) año de duración que incluya la presencia in situ de un experto del fabricante a tiempo completo. Durante este periodo, el fabricante es responsable del mantenimiento y garantiza las tasas de disponibilidad de los autobuses. El fabricante también debe formar y capacitar al personal local en el mantenimiento y reparación de los buses eléctricos.
Los buses no pueden operar en todas las rutas	Inicialmente se recomienda excluir la ruta 1 hasta ganar experiencia en la operación con las otras rutas que son menos exigentes. El diseño del bus debe incluir una capacidad de batería suficiente teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento de Quito (especialmente distancias diarias y pendientes) junto con reservas suficientes para que los buses puedan funcionar también en el año 8 con baterías degradadas además del caso de necesitar ampliar rutas o frecuencias. Con un conjunto de baterías de 360 kWh se garantiza esto para las rutas 2 a 8.
Los buses no pueden circular por dificultades de suministro eléctrico	EPMTPQ siempre recibe suministro de energía eléctrica aún en los tiempos de escasez. Esto se debe mantener. El tamaño de la batería de los buses permite, reduciendo la frecuencia un poco, una operación casi de dos días completos sin recargar. Se podría aumentar la resiliencia al pedir baterías que tengan una capacidad de recibir una carga alta es decir poder cargar las baterías de nuevo en un tiempo relativamente corto. Al mismo tiempo se diseña el sistema de carga para que pueda dar altos niveles de potencia en las pilas (entendiendo que no a todos

Riesgo	Medidas de mitigación
	en el mismo tiempo) y así facilitando que los buses puedan cargarse en menor tiempo en caso de apagones.

Impacto financiero y económico
Los buses eléctricos suponen un costo de inversión del doble que un bus diésel, esto incluyendo la inversión en infraestructura de carga y conexión a la red. Sin embargo, esta inversión se recupera gracias a los costos energéticos mucho más bajos, lo cual se traduce en gastos operativos de los buses eléctricos de 10% (con diésel subsidiado) a 30% (con diésel sin subsidio) más bajos que los buses diésel. El costo total de propiedad de los buses eléctricos es igual (con diésel subsidiado) o 18% inferior al de los buses diésel (sin subsidio). En términos económicos los buses eléctricos tienen un TCO 24% menor que los buses diésel. Este resultado tras un análisis de sensibilidad es robusto, indica claramente que en Quito la explotación de buses eléctricos es más rentable en términos económicos que la de buses diésel. La sostenibilidad y la resistencia de las operaciones de transporte público también se ven reforzadas al tener costos operativos más bajos y al estar menos expuestos a los precios internacionales de la energía, en el caso de diésel altamente fluctuantes. Para una flota de 40 buses eléctricos se requiere de una inversión de 12.5 MUSD incluyendo su sistema de carga, contrato de mantenimiento y capacitación, además de grúa y asistencia técnica. Para reducir los riesgos es fundamental tener contratos de mantenimiento y de capacitación con el proveedor de los buses y que la empresa proveedora tenga la solidez, experiencia y capacidad financiera para ofrecer garantías adecuadas.

9 POTENCIAL FINANCIMIENTO CLIMATICO

Las opciones de financiación climática están directa o indirectamente vinculadas a la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de la actividad. En este estudio, se ha enfocado en dos opciones de financiación climática directa con el Fondo Verde del Clima (GCF) e indirecta vinculada con el mercado voluntario y regulado.

9.1 GCF

El Fondo Verde para el Clima (GCF) ha financiado directamente seis proyectos de transporte hasta ahora, entre ellos el Bus Rapid Transit (BRT) en Karachi/Pakistán, este clasificado en el área del uso de buses de biogás y conectividad de última milla, un sistema ferroviario ligero en Costa Rica y cuatro fondos para la movilidad eléctrica. Los dos fondos de movilidad eléctrica de América Latina aprobados (de la CAF y del BID) no incluyen al Ecuador y en el tercero (de la AFD por aprobarse en julio de este año) Ecuador no quiso participar.

Un área central para el GCF es el transporte público de bajas emisiones combinado con la movilidad eléctrica. El GCF no financiará buses eléctricos sin un aspecto innovador que pueda impulsar un cambio de paradigma, es decir, aspectos como la integración con el transporte no motorizado, los vehículos eléctricos y el aumento de la resiliencia de la infraestructura de transporte son componentes básicos.

Cualquier proyecto debe ser remitido al GCF a través de una Entidad Acreditada que también debe participar, por ejemplo: Banco Mundial, BID, CAF, AFD, entre otros. El GCF cofinancia, en general, un proyecto con niveles de cofinanciación estándar definidos por el mismo en el orden del 50% o menos. Aunque el tamaño del proyecto es pequeño, no podría utilizarse el Proceso de Aprobación Simplificado (SAP), ya que este está reservado a proyectos con un impacto social y medioambiental previsto mínimo.

En ese caso, la alternativa sería formular una Propuesta de Financiación completa; sin embargo, el proyecto para dicha propuesta se considera demasiado pequeño teniendo en cuenta la complejidad de evaluar la financiación del GCF. En este sentido, el proceso de obtención de fondos es bastante complejo y la decisión de Ecuador de no participar en el programa de la AFD debilita el apoyo para gestionar un proyecto de movilidad eléctrica para Ecuador. Por ende, esta ruta no se contempla como un camino factible.

9.2 MERCADO DE CABONO

Mercado Voluntario

Existen diferentes tipos de mercados para el comercio de reducciones de GEI. El sistema del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), gestionado por la UNFCCC, es uno de ellos el cual está actualmente en proceso de redefinición y no está operativo para nuevos proyectos, para el cual el segundo periodo de compromiso finalizó el 31 de diciembre de 2020. Dentro del comercio existen un gran número de mercados nacionales o regionales. Asimismo, existe un mercado internacional de reducciones voluntarias que se ajusta a diferentes estándares, siendo los más reconocidos el Verified Carbon Standard VCS (https://verra.org/), el Gold Standard (https://www.goldstandard.org/) y el Global Carbon Council (https://projects.globalcarboncouncil.com/pages/submitted_projects). Una nueva norma con procedimientos menos estrictos, pero también aceptada, es el régimen de compensación del sector aéreo CORSIA (https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx), como un ejemplo.

Las reducciones voluntarias de emisiones o reducciones verificadas de emisiones (VCU) son reducciones de emisiones generadas en el mercado voluntario del carbono. Las VCU no tienen que incluirse en un inventario nacional porque no se crean para cumplir un requisito legal. Un país anfitrión puede, si lo desea, aplicar un ajuste correspondiente a las VCU que salgan de su frontera, pero esto no es obligatorio, lo cual es una diferencia importante con las ITMOS. Sin embargo, algunos países, algunas normas y algunos compradores también solicitan o están estudiando solicitar ajustes correspondientes para las VCUs.

En el mercado existen distintos tipos de créditos o compensaciones voluntarias, con variaciones considerables en cuanto a precios, tipos de contrato y normas. Todos los estándares involucran el procedimiento de validación externa y registro del documento del proyecto o programa, sobre la base de una plantilla estándar prescrita por la norma de registro que utiliza una metodología de contabilidad de GEI aceptada por: el Mecanismo de Desarrollo Limpio de la UNFCCC, o metodologías aprobadas por el VCS; como ejemplos. El posterior monitoreo de los resultados del proyecto sobre la base de la metodología de seguimiento definida en el documento del proyecto, además de la verificación externa del informe de monitoreo y la posterior emisión de unidades de reducción de emisiones que pueden transferirse al comprador se incluyen también; una empresa privada que desee neutralizar parte de sus emisiones, puede ser un ejemplo de esto. Este proceso requiere mucho tiempo y conlleva elevados costos de transacción. Por tanto, es recomendable formular un programa de buses eléctricos en donde exista una metodología MDL aprobada y sencilla.

El proyecto puede registrarse por un periodo de 10 años, es decir, puede generar VCU durante una década. En general el pago del proyecto se basa a futuro y en los resultados obtenibles, bajo condiciones donde los precios fluctúen, el riesgo de incumplimiento de contratos es considerable, especialmente si bajan los precios de mercado de las compensaciones. Los pagos por VCU son pagos basados en resultados, es decir, son una fuente de ingresos para el proyecto por su servicio medioambiental y, por

tanto, pueden ser utilizados para cualquier fin por la empresa. En la actualidad, el precio medio internacional de los créditos VCS es de 4-10 USD/tCO_2, con un precio promedio para 2023 de 7 USD/tCO_2 (Ecosystem Marketplace, 2023). Se pagan precios más altos por proyectos especiales, pero un proyecto de bus eléctrico no podrá obtener un sobreprecio significativo. La siguiente tabla relaciona los ingresos y costos potenciales de un proyecto VCS.

TABLA 19: Costos y beneficios par aun proyecto de VCS

Parámetro	Valor
Cantidad de reducciones de GEI a diez años de 40 buses eléctricos	36,000 tCO_2
Gastos de inscripción del proyecto	100,000 USD
Costos de monitoreo, verificación y emisión durante diez años	150,000 USD
Ingresos totales diez años	250,000 USD
Ganancias acumuladas diez años	0 USD

Principales hipótesis: seguimiento y verificación realizados cada 3 años para reducir costos; precio de venta de 7 USD/tCO2
Nota: Basado únicamente en el impacto de los autobuses eléctricos (excluye el impacto del cambio de modo de transporte).

De acuerdo con las cifras presentadas en la tabla anterior es claro que formular un proyecto de VCS solo para los 40 buses eléctricos no es justificables.

Mercado ITMOs

Los resultados de mitigación transferidos internacionalmente (ITMOs, por sus siglas en inglés) son un nuevo conjunto de disposiciones basadas para el mercado de créditos de carbono, las cuales están definidas en el artículo 6 del Acuerdo de París. Los ITMOs son creados por actividades que reducen los GEI con la transferencia de los derechos de emisión al país comprador. Las normas del artículo 6 acordadas en la COP26 de Glasgow exigen "ajustes correspondientes" (AC) cuando se transfiere un ITMO. Un AC significa que el país "anfitrión", o el país en el que se ubica el proyecto, debe autorizar primero la transferencia y después ajustar su inventario de GEI para reflejar que las reducciones de emisiones logradas dentro de sus fronteras se acreditan a otro país.

El país comprador ajustará entonces su inventario de GEI en la misma cantidad. Los ITMOs pueden generarse a partir de 2021 y sustituir a los antiguos mecanismos de mercado utilizados a efectos de cumplimiento, como el MDL. Los acuerdos ITMOs pueden estructurarse de forma bilateral o multilateral a través de la ONU. El primero es posible hoy en día con algunos países compradores como Suecia, Suiza, Singapur, Japón o Corea del Sur. El canal multilateral aún requiere decisiones de la próxima COP y no estará operativo antes de 2025.

En enero de 2024 se produjo la primera transferencia internacional de ITMO entre Tailandia y Suiza, basada en un programa de buses eléctricos gestionado por Energy Absolute[60].

A la fecha, Ecuador no ha firmado ningún acuerdo bilateral, pero con base en lo indicado por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica en reuniones sostenidas, el gobierno tiene gran

[60] https://www.klik.ch/en/news/news-article/first-ever-itmos-for-ndc-use

interés de entrar a este mercado de ITMOs por los altos costos que implica la electromovilidad[61]. Asimismo, no se tiene una fecha estimada del desarrollo regulatorio al interior de este Ministerio respecto al artículo 6 del acuerdo de París; sin embargo, la fecha máxima por reglas del acuerdo en mención no debe superar el 31 de diciembre de 2025.

Los costos de transacción para un desarrollador de proyectos dedicado a e-bus son del orden del 20-30%, lo anterior, reduciéndose si pudiera formularse en el país un programa agregador para la e-movilidad que incluyera todos los tipos de inversiones en electromovilidad. Más importante aún, los ITMOs se pueden comercializar a valores más altos, entre 25 y 40 USD/tCO_2, haciendo financieramente factible el proyecto. Sin embargo, habría que formular dicho proyecto de una manera abierta para poder no solo incluir los 40 buses eléctricos, pero también la compra de otros buses u otros elementos de movilidad eléctrica dentro del Ecuador.

9.3 RESUMEN DE OPCIONES

La siguiente tabla resume unas opciones disponibles para financiamiento climático sobre el proyecto de adquisición de buses eléctricos. Existen también otros fondos e entidades que dan condiciones favorables si las inversiones son ligadas con una reducción de emisiones de GEI como el Climate Technology Fund, fondos del BID o bilaterales como de la AFD.

TABLA 20: Opciones de financiamiento climático

Instrumento	Principales Características	Ventajas	Desventajas	Aplicación
GCF	Asistencia técnica y financiación concesionada; cofinanciación de inversiones	Reduce los costos de financiación y permite la concesión de subvenciones para componentes complementarios como transporte no-motorizado (TNM)	Procedimientos muy complejos y largos. Costos de transacción elevados	No recomendado debido a el pequeño tamaño del proyecto y alta complejidad
VCUs	Pago en función de los resultados (pago por la reducción de GEI) con uso ilimitado por parte del vendedor; pago en el momento de la entrega.	Mejora el flujo de caja y la rentabilidad del proyecto	Costos de transacción significativos; precios volátiles; garantía de rendimiento del comprador limitada.	Factible, pero con muy bajo potencial de ingresos
ITMOs	Pago en función de los resultados (pago por reducción de GEI); en general pago en función de la entrega	Mejora el flujo de caja y la rentabilidad del proyecto; precio muy superior al de las VCU.	Costos de transacción considerables.	Factible y puede ser incorporado dentro de un programa de electromovilidad de país.

Recomendaciones Financiación Climática

[61] El interés fue expresado en reuniones sostenidas con el Director de Mitigación del Cambio Climático y el Especialista en Mitigación del Cambio Climático que revisa los avances del artículo 6 del Acuerdo de París.

Se recomienda formular el proyecto como un programa ITMO, ya sea en el marco de un programa de agregación para la e-movilidad o como proyecto independiente.

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los buses eléctricos son una opción factible para Quito en términos técnicos y financieros. En términos económicos y ambientales tienen ventajas significativas con relación a los buses diésel, en el objetivo que pueden reducir la contaminación ambiental, mientras que al mismo tiempo se pueden reducir los costos económicos del sistema de transporte. Se recomienda empezar la electrificación con las rutas 2 hasta 8 y ganar experiencias en estas rutas antes de electrificar la ruta 1 que ofrece condiciones de operación más demandantes y el permiso de operación está en cabeza de la empresa privada que lo ópera.

Para llegar a costos más bajos y un sistema más confiable y robusto es necesario empezar con una flota mínima que no debería estar por debajo de 40 unidades. Esto facilita el establecimiento de un sistema de carga eficiente, sólido y de menor inversión por bus. Es importante también, considerar que al comprar una flota mayor los costos de los buses eléctricos se reducen significativamente, pero más importante aún es la posibilidad de establecer con el fabricante un programa de mantenimiento, reparación y capacitación del personal local a un costo razonable. Eso es crítico para asegurar una alta disponibilidad en la flota de buses eléctricos.

El inicio de una operación con nuevos buses eléctricos es una oportunidad de transición de la EPMTPQ, dado que se puede iniciar la formación del propio personal de la EPMTPQ que hacen el mantenimiento a unidades diésel articuladas y biarticuladas y de unidades de trolebuses hacia el mantenimiento de las unidades de BEB.

Las siguientes son condiciones críticas necesarias para tomar en cuenta al momento de diseñar un sistema de e-bus para Quito:

1. Parámetros que afectan condiciones de autonomía de los buses y definen especificaciones basados en tiempo y distancia:
   a) Las distancias diarias recorridas oscilan entre 200-210km, eso aplicado a las rutas 2-8 mientras que para la ruta 1 aplica una distancia de 260km.
   b) La operación diaria funciona en un horario de 5:00AM hasta 11:00PM, totalizando 18 horas de operación.
2. Parámetros que afectan condiciones de desempeño de los buses y definen especificaciones basados en potencia y consumo:
   a) Los trazados de las rutas marcan pendientes de hasta el 15%, pero no se ve tan afectado por las pendientes debido al sistema de recuperación de energía en los trayectos cuesta abajo.
   b) Temperaturas similares durante todo el año, en torno a los 15 grados Celsius, derivan en que la demanda de energía sea baja en comparación con otras condiciones climáticas en otras regiones, lo cual es ventajoso para el sistema.
3. Parámetros que afectan condiciones de capacidad de los buses y definen especificaciones basados en ocupación y frecuencia:
   a) Operaciones con buses urbanos estándar de 12 m para 80 pasajeros

En este sentido, se hacen las siguientes recomendaciones técnicas sobre especificaciones y estructuración del sistema:

1. En una primera fase realizar la implementación para rutas 2 a 8, donde se recomienda utilizar e-buses con carga nocturna y una capacidad de baterías de al menos 360 kWh. No es necesaria carga rápida intermedia durante el día.
2. En una fase posterior se recomienda electrificar la ruta 1, esto por tener condiciones más exigentes, las cuales quedan mejor evaluadas con resultados prácticos de las otras rutas implementadas en la primera fase. Para esta ruta hay dos opciones, utilizar e-buses con carga nocturna y capacidad de baterías de al menos 450 kWh, realizando una carga nocturna únicamente o e-buses con capacidad de baterías de 320 kWh, necesitando hacer una carga diurna de 15-30 minutos diarios con un cargador de 300-400kW en algún punto de la ruta.

Hacer una carga intermedia aumenta gradualmente la complejidad del sistema. Por ende, se recomienda momentáneamente enfocarse en las rutas 2-8 y, basándose en los resultados reales de consumos de los buses en estas rutas además de las pruebas disponibles de la ruta 1, tomar una decisión final para los buses de la ruta 1, esto basado en datos y experiencia reales de Quito y observando también el desarrollo del mercado de los e-buses.

De igual modo dentro de las recomendaciones para el sistema de carga, se recomienda la instalación de un sistema de carga centralizada con base a contenedores que conecten hasta 10 pilas por contenedor, estos con 2 cables de conexión y una carga enchufable capaz de cargar hasta 20 buses simultáneamente, y además adecuados con una potencia de 50 kW por bus. Ello en función de realizar recargas nocturnas durante los periodos de parqueo en patio.

A partir del ejercicio de comparación entre un sistema de buses diésel y uno de buses eléctricos a batería (BEB) se desprenden las siguientes conclusiones sobre los diferentes tipos de impactos con relación a eficiencia y sostenibilidad dentro del contexto ambiental:

1. Impacto local de la contaminación: los buses eléctricos no emiten gases de combustión. Los buses diésel, incluso las unidades modernas, tienen emisiones significativas que provocan una degradación de la calidad del aire y los correspondientes impactos negativos sobre la salud. Cada bus eléctrico de 12m utilizado en Quito reduce, en comparación con las operaciones de un nuevo bus diésel del mismo tamaño, 20 kg de $PM_{2.5}$, 1,165 kg de NO_x y 14 kg de SO_2 anualmente.
2. Impacto en GEI: un bus eléctrico en Quito, en términos de emisiones WTW, reduce las emisiones de GEI en más de 80% en comparación con un bus diésel. El bus recupera las emisiones de GEI relacionadas con la fabricación de la batería en menos de cinco meses de funcionamiento. Al año, cada bus eléctrico ahorra 90 toneladas de CO_2 y a lo largo de su vida útil de 16 años 1,450 toneladas de CO_2.
3. Impacto del ruido: en comparación con los autobuses diésel, los autobuses eléctricos reducen en un 50%. las emisiones de ruido La mayor reducción de ruido se produce en las paradas del bus y durante el arranque.
4. Impacto de energía: Los buses eléctricos son mucho más eficientes energéticamente que los buses diésel. Cada bus eléctrico en Quito ahorra 960 GJ de energía al año en comparación con un bus diésel.

Por otro lado, se derivan las siguientes conclusiones sobre el impacto financiero y económico de dicha comparación:

1. Los buses eléctricos suponen un costo de inversión del doble que un bus diésel, esto incluyendo la inversión en infraestructura de carga y conexión a la red. Sin embargo, esta inversión se recupera gracias a los costos energéticos mucho más bajos, lo cual se traduce

en gastos operativos de los buses eléctricos de 10% (con diésel subsidiado) a 30% (con diésel sin subsidio) más bajos que los buses diésel.

2. El costo total de propiedad de los buses eléctricos es igual (con diésel subsidiado) o 18% inferior al de los buses diésel (sin subsidio). En términos económicos los buses eléctricos tienen un TCO 24% menor que los buses diésel. Este resultado tras un análisis de sensibilidad es robusto. Indica claramente que en Quito la operación de buses eléctricos es más rentable en términos económicos que la de buses diésel.
3. La sostenibilidad de las operaciones de transporte público también se ven reforzadas al tener costos operativos más bajos y al estar menos expuestos a los precios internacionales de la energía, en el caso de diésel altamente fluctuantes. Para una flota de 40 buses eléctricos se requiere de una inversión de 12.5 MUSD incluyendo su sistema de carga, contrato de mantenimiento y capacitación, además de grúa y asistencia técnica.

Desde el financiamiento climático se recomienda formular un programa de ITMO ya sea en el marco de un programa agregado para electromovilidad o como un proyecto independiente dadas las condiciones de rentabilidad que las utilidades de dichos programas ofrecen. Además de la ventaja que ofrece la flexibilidad de participación en dichos programas gracias a las condiciones de agregación.

Dentro de los riesgos que se pueden anticipar sobre la implementación del sistema se hacen las siguientes recomendaciones:

1. Formulación de políticas de baterías: para que las baterías de los vehículos eléctricos puedan llegar al final de su vida útil de forma segura y adecuada, se recomienda adoptar una normativa al respecto en Ecuador, preferiblemente basada en la responsabilidad ampliada del productor (RAP), en la que los sujetos de acuerdo con la RAP deban cumplir diversos requisitos y obligaciones de reciclado. Las normativas de la UE, la India, la República Popular China y otros países pueden servir de modelo.
2. Los posibles usos de la segunda vida útil de las baterías de los vehículos eléctricos dependen en gran medida de su estado, pero estas baterías pueden conservar hasta un 70-80% de la capacidad original e ir a otras aplicaciones como usos semi-estacionarios y estacionarios.
3. Políticas de mantenimiento: para reducir los riesgos es fundamental tener contratos de mantenimiento y de capacitación con el proveedor de los buses y que la empresa proveedora tenga la solidez, experiencia y capacidad financiera para ofrecer garantías adecuadas.

11 REFERENCIAS

Asamblea Nacional de la República de Ecuador. (2019). *Ley Orgánica de Eficiencia Energética.*

Asamblea Nacional de la República de Ecuador. (2024). *Ley Orgántica de Competitividad Energética.*

Consejo Metropolitano. (2021). Código Municipal para el Distrito Metropolitano de Quito. Ordenanza Municipal No 1.

Consejo Metropolitano. (2017). Ordenanza Metropolitana No 189.

Clougherty, J. (2010). A Growing Role for Gender Analysis in Air Pollution Epidemiology. Environmental Health Perspectives, 2010 Feb., 118(2), 167-176.

BAFU. (2009). PM-10 Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART).

EEA. (2019). Air pollutant emission inventory guidebook update December 2109.

EPMTPQ. (2024). Actualización en la estructura de costos del pago del servicio de alimentadores,

European Commission. (2016). Well-to-Wheels Analyses.

ICCT. (2023). Scaling up, reuse and recycling of Electric Vehicle Batteries: Assessing Challenges and Policy Approaches.

IPCC. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

Mitchell, G. D. (2003). An environmental justice analysis of British air quality. Environment and Planning A 2003, vol. 35, 909-929.

Laib, F. B. (2019). Modelling noise reductions using electric buses in urban traffic. A case study from Stuttgart, Germany. Transportation Research Procedia 37 (2019) 377-384; 21st EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2018, 17th-19th September 2018, Braunschweig, Germany, 377-384.

McKinsey. (2019). Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage.

McKinsey. (2023). Battery 2030: Resilient, sustainable and circular.

Rößiger, M, (2018), Stromspeicher: Vattenfall baut mehr BMW-Batterien ein, bizz energy Mediengesellschaft GmbH.
Retrieved from bizz energy,com/stromspeicher_vattenfall_baut_mehr_bmw_batterien_ein

World Health Organization. (2022). Health and Climate Change Urban Profile Quito. health-and-climate-change-urban-profiles_quito.pdf (who.int)

Zhou J, Gladson L, Díaz Suárez V, Cromar K. (2023). Respiratory Health Impacts of Outdoor Air Pollution and the Efficacy of Local Risk Communication in Quito, Ecuador. Int J Environ Res Public Health. 2023 Jul 8;20(14):6326. doi: 10.3390/ijerph20146326. PMID: 37510559; PMCID: PMC10379231.

https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10379231/

12 ANEXOS

12.1 ANEXO I: ANALISIS FINANCIERO Y CALCULO DE EMISIONES DE GEI Y CONTAMINANTES LOCALES

Archivo en Excel.

12.2 ANEXO II: TERMINOS DE REFERENCIA (VOLUMEN I Y VOLUMEN II)

Archivo Word.