

**Desarrollo de un Modelo de Presentación y Costeo del Ciclo de Vida de Buses Eléctricos
para la Industria de Transporte Masivo de Pasajeros**

Edwin Leonardo Reyes Martínez

Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, Cali

Nota del autor

Edwin Leonardo Reyes; Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, Cali.

Este documento cuenta con la dirección de trabajo de profundización del Profesor PhD. Alberto Mora y Codirección del Profesor M.Sc. Adolfo Gómez.

Trabajo de profundización para optar por el título de Magister en Gestión de Activos y Mantenimiento.

Cualquier mensaje con respecto a este trabajo debe ser enviado a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.

E-mail: reyes.edwin@correounivalle.edu.co

Febrero, 2026

Resumen

El presente trabajo desarrolla un modelo de análisis del costo del ciclo de vida (LCC) con aplicación en buses eléctricos y diésel de sistemas de transporte masivo en Colombia. Para ello, se construye una herramienta en hoja de cálculo que permite estimar, comparar y proyectar los costos asociados a la adquisición, operación, mantenimiento y disposición final de cada alternativa tecnológica. El proceso metodológico integra información técnica de fabricantes, parámetros operativos de sistemas de transporte y criterios financieros utilizados comúnmente por los operadores (Abbas & Haider, 2025).

El modelo se estructura de manera que el usuario pueda modificar los supuestos de entrada y observar de inmediato el efecto de dichas variaciones en los costos totales, el valor presente neto (VPN) y el costo anual equivalente (CAE). En el desarrollo del trabajo, se identifican particularidades operativas de las dos tecnologías propuestas y se examinan los impactos económicos en un horizonte típico de 15 años. Los resultados muestran diferencias significativas en los costos de operación y mantenimiento, así como la sensibilidad del modelo frente a variaciones en tasas de descuento, costos energéticos y eventos de mantenimiento mayor (Sheth & Sarkar, 2019).

El estudio demuestra que el modelo propuesto constituye una herramienta útil para respaldar decisiones de inversión en el contexto del transporte público masivo, al ofrecer una visión financiera integral del ciclo de vida de los vehículos. Además, la estructura de la plantilla facilita su adaptación a distintos sistemas, condiciones operativas y estrategias de licitación del sector.

Palabras clave: costo del ciclo de vida, buses eléctricos, gestión de activos, transporte masivo, modelación financiera.

Abstract

This work develops a life-cycle cost (LCC) analysis model applied to electric and diesel buses operating in mass transportation systems in Colombia. An Excel-based tool is designed to estimate, compare, and project the costs related to vehicle acquisition, operation, maintenance, and end-of-life disposal. The methodological approach integrates manufacturer technical data, operational parameters from local transportation systems, and financial criteria commonly used by operators (Abbas & Haider, 2025).

The model is structured to allow users to modify key assumptions and immediately observe their impact on total costs, net present value (NPV), and equivalent annual cost (EAC). Throughout the study, specific operational features of both technologies are examined, along with their economic implications over a typical 15-year horizon. The results highlight significant differences in operational and maintenance costs, as well as the model's sensitivity to discount rates, energy prices, and major overhaul events (Sheth & Sarkar, 2019).

The findings indicate that the proposed model is a practical tool to support investment decisions in mass transportation, providing a comprehensive financial perspective of the vehicle life cycle. Additionally, the structure of the spreadsheet allows for easy adaptation to different systems, operational conditions, and bidding strategies within the sector.

Keywords: life cycle cost, electric buses, asset management, mass transportation, financial modeling.

Contenido

Resumen	2
Abstract	3
Contenido	4
Tablas	7
Imágenes	8
Ecuaciones	9
Introducción y Contexto Operacional	11
Planteamiento de la Oportunidad.....	14
Límites de la Oportunidad	15
Justificación	17
Objetivos.....	18
General	18
Específicos	18
Objetivo Uno – Fundamentos.....	18
Objetivo Dos – Costo del Ciclo de Vida.....	18
Objetivo Tres – Variables Asociadas.....	18
Objetivo Cuatro - Comparación	19
Objetivo Cinco - Modelo	19
Objetivo Seis – Conclusiones	19
Marco Teórico	20
Antecedentes del Proyecto	22
Estado del Arte.....	23
Marco Metodológico	26
Enfoque de la Investigación	26
Tipo de Investigación.....	26
Diseño de la Investigación	27
Población y Muestra.....	27
Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	27
Procedimiento Metodológico	28
Normas y Metodologías de Apoyo	28
Etapas del Desarrollo.....	29

Desarrollo	32
Objetivo Uno. Fundamentos	32
Principales Definiciones.....	32
UNE EN 60300-3-3:2017.....	32
ISO 15663:2021.....	33
ISO 55001:2024.....	33
ISO 55010: 2019.....	34
NTC ISO 15686-5:2022.....	34
AS/NZS 4536:1999.....	34
Fases del Ciclo de Vida.....	35
Objetivo Dos. Costo del Ciclo de Vida.....	43
Elementos de Costo.....	44
Costos Asociados a las Etapas del Modelo LCC	46
Objetivo Tres. Variables Asociadas.....	52
Costo de Adquisición del Vehículo	52
Costo de Operación/ Mantenimiento del Vehículo.....	54
Mantenimiento Preventivo	57
Mantenimiento No Planificado	57
Mantenimiento Mayor	57
Operación.....	58
Costo de Disposición.....	58
Consideraciones Principales	58
Objetivo Cuatro. Comparación.....	64
Variación de los Costos.....	64
Comparativo de las Alternativas.....	67
Objetivo Cinco. Modelo	74
Descripción del Modelo.....	74
Objetivo Seis. Conclusiones	80
Conclusión del Objetivo Uno. Fundamentos	80
Conclusión del Objetivo Dos. Costos del Ciclo de Vida.....	80
Conclusión del Objetivo Tres. Variables Asociadas	81
Conclusión del Objetivo Cuatro. Comparación.....	82
Conclusión del Objetivo Cinco. Modelo.....	83
Conclusión General del Proyecto.....	84

Descripción de Cómo se Alcanza el Logro de los Objetivos	86
Logro del Objetivo Uno – Fundamentos.....	86
Logro del Objetivo Dos – Costos del Ciclo de Vida	86
Logro del Objetivo Tres – Variables Asociadas	86
Logro del Objetivo Cuatro – Comparación	87
Logro del Objetivo Cinco – Modelo	87
Referencias	88
Anexos	94
Anexo A. Plantilla de Costeo del Ciclo de Vida (LCC) para Vehículos de Transporte Masivo .	94

Tablas

Tabla 1 Características típicas de operación de un autobús urbano	47
Tabla 2 Etapas y costos del LCC previstos para el modelo	49
Tabla 3 Tasa de depreciación por tecnología del vehículo	53
Tabla 4 Intervalos de mantenimiento generales del Bus eO500U	59
Tabla 5 Intervalos de mantenimiento generales del Bus O500U Euro 6	60
Tabla 6 Cambio/Reparación promedio de los componentes mayores de un bus	62
Tabla 7 Incentivos para el uso de vehículos eléctricos en Colombia	63
Tabla 8 Datos de ingreso para el modelo LCC	68

Imágenes

Imagen 1 Asignaturas de la maestría que guardan relación con el trabajo de profundización.....	21
Imagen 2 Soluciones de movilidad del Grupo Kaufmann	23
Imagen 3 Etapas de desarrollo del trabajo de profundización	31
Imagen 4 Análisis típico a través del ciclo de vida	36
Imagen 5 Fases y procesos típicos del ciclo de vida.....	38
Imagen 6 Elementos de costos de toda la vida y del ciclo de vida	39
Imagen 7 Análisis en diferentes etapas del ciclo de vida	40
Imagen 8 Costos y fases del ciclo de vida	41
Imagen 9 Fases del ciclo de vida y sus costos.....	42
Imagen 10 Fases del ciclo de vida para la provisión de flota de un contrato de concesión	47
Imagen 11 Tipos de mantenimiento que provocan o no cambios en las características del activo	55
Imagen 12 Tipos de mantenimiento según la posibilidad de programación.....	56
Imagen 13 Inflación en Colombia en los últimos 10 años.....	65
Imagen 14 Precios del combustible diésel en Colombia en los últimos 10 años	66
Imagen 15 Costo de la energía (kW/h) en los últimos 5 años en Colombia.....	67
Imagen 16 Bus eléctrico Mercedes Benz y Bus diésel Mercedes Benz.....	70
Imagen 17 Resultados de simulación para un período de operación del bus eléctrico de 15 años.....	71
Imagen 18 Resultados de simulación para un período de operación del bus diésel de 15 años.....	72
Imagen 19 Comparativo de la fase de operar/mantener de los dos modelos de LCC de buses	73
Imagen 20 Hoja de datos de ingreso del modelo en Excel.....	76
Imagen 21 Hoja de datos de alternativa 1 del modelo en Excel	77
Imagen 22 Hoja de datos de alternativa 2 del modelo en Excel	78
Imagen 23 Hoja de datos de resultados del modelo en Excel	79
Imagen 24 Ahorro acumulado estimado en el horizonte de 15 años	83
Imagen 25 Flujo general del modelo de costeo de ciclo de vida.....	84

Ecuaciones

Ecuación 1 LCC Total	45
Ecuación 2 Valor actual.....	45
Ecuación 3 Valor actual con costos recurrentes	46
Ecuación 4 Cálculo del LCC de las alternativas a evaluar en el modelo de presentación	50
Ecuación 5 Estimación de la vida útil de una batería de alto voltaje	63

Introducción y Contexto Operacional

La movilidad ambientalmente sostenible se define como un enfoque que busca minimizar el impacto negativo sobre el medio ambiente, al tiempo que satisface las necesidades de desplazamiento de las personas y las comunidades. Este enfoque adopta prácticas y tecnologías que buscan reducir la contaminación, la huella de carbono y otros efectos adversos sobre el entorno natural (*Movilidad ambientalmente sostenible*, s. f.).

El sector transporte en Colombia representa un desafío relevante en materia de sostenibilidad. Según el Balance Energético Colombiano (BECO) en su informe de 2023, este sector concentra aproximadamente el 42,3 % del consumo final de energía, compuesto en su mayoría por combustibles fósiles. Aunque se evidencia una ligera disminución del 0,5 % en la demanda energética en ese año, la participación de fuentes más limpias, como el gas natural y la energía eléctrica, continúa con una participación secundaria.

La Ley 2294 de 2023, en su artículo 253, establece el Fondo de Ascenso Tecnológico como una herramienta destinada a incentivar la adquisición de vehículos automotores nuevos con estándares de bajas y, preferiblemente, cero emisiones. Este fondo tiene como propósito reducir de manera significativa la huella de carbono del sector transporte, sin comprometer la eficacia, la pertinencia ni la rentabilidad del servicio.

El transporte público colombiano, especialmente los sistemas de transporte masivo de pasajeros en las principales ciudades del país, desempeña un papel central en la incorporación de nuevas tecnologías. Durante las dos últimas décadas, estos sistemas actúan como escenarios de prueba para nuevos actores del sector y se consolidan como agentes determinantes en la adopción y fortalecimiento de modelos de negocio con miras al desarrollo sostenible. Este proceso permite no solo la generación de retornos para los inversionistas, sino también la

protección del patrimonio social y ambiental, particularmente del medio ambiente (Transmilenio S.A, 2024).

La empresa Divemotor Colombia S.A.S. asume, desde el año 2023, la representación del portafolio Daimler en el país, tras la adquisición de operaciones a la empresa Daimler Colombia S.A. que cuenta con más de dos décadas de presencia local. Divemotor Colombia S.A.S. forma parte del Grupo Kaufmann, una asociación empresarial automotriz con liderazgo regional y presencia en países como Chile, Costa Rica, Nicaragua, Panamá y Perú. Este grupo, con más de 40 años de trayectoria es el principal licenciatario de Mercedes Benz en América Latina y se reconoce como el distribuidor más antiguo de Daimler Mercedes Benz a nivel mundial (*Divemotor Colombia*, s. f.).

La misión fundamental del Grupo Kaufmann consiste en acompañar al cliente en la optimización de sus operaciones y actividades económicas, mediante un portafolio robusto de vehículos comerciales. Esta propuesta de valor no solo busca posicionar la calidad de las marcas que representa, sino también destacar la importancia del servicio posventa, elemento clave para la fidelización y el éxito de sus clientes.

La transición hacia tecnologías limpias en el sector transporte plantea desafíos significativos relacionados con los costos de adquisición, operación y mantenimiento de los activos. Esta realidad exige la formulación de modelos de análisis económico y técnico que permitan estimar el costo total de propiedad durante el ciclo de vida de los vehículos (Szumska et al., 2020).

En este escenario, la comparación entre buses eléctricos y buses de combustión interna se configura como un elemento clave para la toma de decisiones estratégicas en materia de inversión, sostenibilidad y gestión de activos. Por consiguiente, surge la necesidad de desarrollar un modelo de presentación y costeo del ciclo de vida que facilite la evaluación objetiva de las

alternativas tecnológicas disponibles y contribuya a una movilidad ambientalmente sostenible (Regulski, 2023).

La actualidad es el escenario de debate frecuente sobre el tema de la movilidad eléctrica, la adquisición de automóviles ecológicos o autobuses eléctricos tiene el potencial de mejorar el medio ambiente y la situación de la producción de gases de efecto invernadero (Barraza & Estrada, 2021).

Sin embargo, el costo de adquisición y los costos operativos de los vehículos eléctricos generan una estructura de costos particular que difiere de la de los vehículos diésel. La cuantía de las ayudas estatales, así como la posibilidad de obtener dichas ayudas para la compra de autobuses eléctricos, no son claras (Potkány et al., 2018).

Planteamiento de la Oportunidad

El sector del transporte público urbano en Colombia experimenta en los últimos años un aumento significativo en la incorporación de autobuses que utilizan combustibles alternativos y sistemas de propulsión no convencionales. Este proceso responde a la necesidad de adoptar soluciones tecnológicas más sostenibles, capaces de reducir el impacto ambiental y los costos operativos a largo plazo (Transmilenio S.A, 2024).

Además de los factores económicos, los operadores de transporte deben considerar los aspectos medioambientales al momento de adquirir nuevos vehículos. En este contexto, el costo del ciclo de vida (*LCC*, por sus siglas en inglés) constituye un criterio fundamental para la selección de autobuses, al incluir no solo el costo de adquisición, sino también los gastos que se asocian al mantenimiento, la operación, el desmantelamiento y las emisiones contaminantes generadas a lo largo de la vida útil del vehículo (Szumska et al., 2020).

La empresa Divemotor Colombia S.A.S. identifica en este escenario una oportunidad estratégica para introducir y mantener en el sector del transporte público, especialmente en los sistemas de transporte masivo, marcas representativas de vehículos comerciales que ofrezcan altos niveles de confiabilidad y reduzcan los costos operativos. Este propósito se logra mediante una mantenibilidad eficiente, con enfoque en el cumplimiento de las exigencias técnicas y contractuales propias de cada operación.

El cumplimiento de estos objetivos depende de una pertinente selección tecnológica, que contemple variantes de propulsión alineadas con los requerimientos de eficiencia y sostenibilidad propuestas en las licitaciones. En consecuencia, los sistemas de transporte masivo de pasajeros se configuran como escenarios estratégicos para que la empresa se posicione como un actor relevante que contribuye activamente a la movilidad ambientalmente sostenible en Colombia (Ajanovic et al., 2021).

Límites de la Oportunidad

La literatura demuestra que, a pesar del mayor costo inicial de adquisición, la inversión en vehículos con sistemas de propulsión alternativos consigue generar menores costos totales de propiedad, así como una reducción significativa de las emisiones contaminantes al medioambiente. Este hallazgo sustenta la necesidad de emplear herramientas financieras y técnicas que permitan evaluar de manera integral el desempeño económico y ambiental de los activos durante todo su ciclo de vida (Szumska et al., 2020).

El modelo de análisis del presente estudio basa su fundamento en el costo del ciclo de vida (LCC), con un horizonte de proyección de 15 años, periodo que corresponde al estándar de vida útil definido en las licitaciones de los sistemas de transporte masivo en Colombia, con un promedio de recorrido de 260 km diarios en un tiempo de operación de 14.5 horas promedio. El modelo considera las categorías de costos de adquisición, costos operativos y costos de reparación y mantenimiento, excluyendo los costos de infraestructura, dado que estos no hacen parte del objeto económico actual de la empresa Divemotor Colombia S.A.S (Cooney et al., 2013).

El producto del análisis establece una herramienta estratégica de presentación y argumentación técnica ante los operadores de transporte público licitantes en los diferentes sistemas de transporte masivo del país. Su propósito consiste en respaldar la toma de decisiones correspondiente con la adquisición de vehículos, mediante la oferta de un modelo de proyección del comportamiento económico que incorpore variables clave de los costos totales de propiedad (Australian National Audit Office [ANAO], 2001; Belloni et al., 2025).

Este modelo aporta un valor diferenciador en términos de sostenibilidad, eficiencia operativa y gestión de activos que contribuye a la consolidación de estrategias de movilidad sostenible y responsable.

El modelo cuenta con un periodo de revisión y aprobación posterior a su entrega, la cual está a cargo de la gerencia de buses y camiones de Divemotor Colombia S.A.S y la división de electromovilidad del Grupo Kaufmann, se estima que este tiempo ronde alrededor de 8 a 12 semanas, tiempo después del cual, la organización decide su adopción o no para el mercado colombiano.

Justificación

La adopción acelerada de vehículos con tecnologías de propulsión alternativas en las flotas del transporte público urbano presenta uno de sus mayores obstáculos en el alto costo de adquisición de estos vehículos, así como el costo emergente de las infraestructuras necesarias para su operación. No obstante, la decisión de reemplazar autobuses convencionales por aquellos que utilizan combustibles alternativos o tecnologías de propulsión innovadoras se respalda por la reducción en las emisiones contaminantes y los menores costos operativos adjuntos a estas tecnologías (Szumska et al., 2020).

El análisis del costo del ciclo de vida (*LCC*, por sus siglas en inglés) se consolida como una herramienta fundamental para comparar alternativas tecnológicas en términos económicos. Este enfoque permite evaluar no solo los costos de adquisición, sino también los gastos de operación, mantenimiento, y desmantelamiento a lo largo de toda la vida útil del vehículo. De esta manera, el *LCC* facilita la toma de decisiones informadas al momento de seleccionar una variante específica de propulsión para nuevas adquisiciones (Kara et al., 2017).

El *LCC* se posiciona como una herramienta de gestión estratégica, ya que contribuye a estimar el impacto económico de diferentes alternativas de inversión. Este proceso de análisis económico responde al esfuerzo de los gestores por optimizar los costos totales en el proceso de transformación tecnológica. Al distribuir los costos a lo largo del ciclo de vida del producto, el *LCC* brinda soporte técnico y económico en la toma de decisiones, lo que permite favorecer una visión integral de sostenibilidad y rentabilidad (Potkány et al., 2018).

Objetivos

General

El presente estudio tiene como objetivo determinar el costo del ciclo de vida comparativo de los vehículos de transporte masivo que incorporan tecnologías de propulsión convencionales y de energías limpias, mediante la aplicación de un modelo financiero y matemático que permita establecer el costo total de propiedad y mantenimiento a lo largo de su ciclo de vida.

Específicos

Se describen de forma secuencial, con el fin de comprender mejor la dimensión del alcance del proyecto.

Objetivo Uno – Fundamentos

Definir los conceptos, criterios y parámetros involucrados en la metodología de análisis de costo de ciclo de vida, con base en las normas ISO 55000:2024, UNE EN 15663:2021 y UNE EN 60300-3:2017, para su aplicación en los activos del sector de transporte masivo de pasajeros, tanto en vehículos a combustión como vehículos eléctricos. **Nivel 1 – Conocimiento - Escala de Benjamín Bloom y Robert Gagné.**

Objetivo Dos – Costo del Ciclo de Vida

Reconocer los criterios y los costos asociados a cada una de las etapas del modelo de ciclo de vida aplicado a los vehículos de transporte mediante una metodología documental de recolección y tratamiento de datos. **Nivel 2 - Comprensión - Escala de Benjamín Bloom y Robert Gagné.**

Objetivo Tres – Variables Asociadas

Interpretar las variables relevantes de operación y mantenimiento, asociadas a los vehículos de transporte masivo, de combustión y eléctricos, que impactan el ciclo de vida y la

gestión de los activos, con base en el modelo de análisis de costo del ciclo de vida. **Nivel 3 - Aplicación - Escala de Benjamín Bloom y Robert Gagné.**

Objetivo Cuatro - Comparación

Comparar los modelos económicos de los vehículos de transporte masivo nuevos, uno a combustión y uno eléctrico, bajo un mismo horizonte temporal, con el fin de presentar el costeo integral a lo largo de la vida útil de cada activo. **Nivel 4 - Análisis - Escala de Benjamín Bloom y Robert Gagné.**

Objetivo Cinco - Modelo

Proponer un modelo de presentación y costeo del ciclo de vida, que sirva como herramienta de apoyo para la toma de decisiones, orientada a los clientes potenciales interesados en la adquisición de vehículos eléctricos para el transporte masivo de pasajeros.

Nivel 5 - Sintetizar - Escala de Bloom & Gagné

Objetivo Seis – Conclusiones

La investigación presenta los resultados y conclusiones del análisis comparativo, con el propósito de ofrecer una visión integral sobre la viabilidad técnica, económica y ambiental de las tecnologías evaluadas. **Nivel 6 - Evaluación - Escala de Benjamín Bloom y Robert Gagné.**

Marco Teórico

La Maestría en Gestión de Activos y Mantenimiento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, a través de su programa de formación busca generar en los profesionales una consciencia de optimización del rendimiento de los activos en las organizaciones, mediante la implementación de una alta mantenibilidad y confiabilidad, con el enfoque de generar valor para el sector económico al cual se pertenece en cada organización.

Las materias que integran el programa de formación muestran la normatividad y legislación vigente con relación a la gestión de activos al incorporarla con la sección del mantenimiento que, como un todo, hacen posible el alcance de los objetivos propuestos en el plan estratégico de gestión de activos (PEGA) con la finalidad de generar valor y rentabilidad a través de la actividad profesional de la gestión de activos (Organ et al., 1997).

Las asignaturas que influyen en el desarrollo del presente trabajo de profundización se presentan a continuación al igual que en la Imagen 1.

La asignatura Mantenimiento Dentro de la Gestión de Activos presenta el alcance que tiene el sistema de gestión de mantenimiento dentro de la organización como un eje vertical para garantizar el ciclo de vida de los activos, conforme se establece desde su concepción y/o diseño, de forma que la función de mantenimiento asuma una perspectiva global que considere los factores humanos, técnicos y económicos.

La asignatura Gestión de Activos Alineado a la ISO 55001 muestra el valor que adquiere esta actividad al involucrarse en varias funciones cruciales para el desenvolvimiento de la organización y la creación de valor de esta, a partir de la estandarización de procesos que permitan clasificar el sistema dentro de un marco que coordine las prácticas para rentabilizar el valor de los activos y cumplir con los objetivos propuestos.

La asignatura Gestión de la Información y Medición del Desempeño e Indicadores del Sistema de Gestión de Activos aborda el concepto de información como un activo que requiere gestión, al considerarla como un elemento de valor que merece un tratamiento estratégico, de manera que se plantee su uso para aprovechar al máximo su utilidad a la vez que se minimiza el riesgo en su tratamiento.

La asignatura Análisis de Ciclo de Vida del Activo desarrolla un enfoque en ingeniería económica que introduce el concepto de dinero en las decisiones tomadas, de manera que se tenga en cuenta el formular, estimar y evaluar los resultados obtenidos antes, durante y después de la adopción de las medidas propuestas.

Imagen 1

Asignaturas de la maestría que guardan relación con el trabajo de profundización



Nota: La imagen presenta las asignaturas de la Maestría en Gestión de Activos y Mantenimiento de la Universidad del Valle que hacen parte del desarrollo de la base teórica del presente trabajo de profundización. Elaboración Propia.

Antecedentes del Proyecto

El Grupo Kaufmann, subsidiaria de Divemotor Colombia S.A.S, cuenta con una división de electromovilidad encargada, en Chile, de promover las nuevas tecnologías para el sector de transporte público y privado, al superar desafíos tecnológicos, económicos y medioambientales hasta el día de hoy. Pero, como eje principal, al superar las propias barreras de la industria automotriz para abrir la mente y el negocio a un futuro diferente. Asume la responsabilidad, interna con los colaboradores, y externa con los clientes, para tener a la mano las tecnologías necesarias para sumarse a una forma más limpia y ecológica de moverse.

La división de electromovilidad genera un lema que se alza como principio rector de su filosofía, a saber, *Charge & Ready*, sello de avance para que los productos eléctricos, dentro del portafolio, estén siempre listos para su funcionamiento (*Charge*) con la responsabilidad de mantener a disposición de los clientes todas las soluciones vigentes del portafolio eléctrico, desde la asesoría inicial, determinación de necesidades de infraestructura de carga, posventa, financiamiento, seguros, telemetría y capacitaciones (*Ready*), todo esto queda como resumen en la Imagen 2 (Electromovilidad Kaufmann S.A, s. f.).

La viabilidad técnica de los activos tangibles e intangibles puede determinar la mejor manera de financiar los componentes necesarios para su implementación. Además, es fundamental garantizar recursos no reembolsables para respaldar el proyecto, así como productos financieros de terceros que puedan ayudar con la amortización.

Por último, deben establecerse relaciones contractuales, legales y comerciales para distribuir la responsabilidad, gestionar el riesgo y armonizar los intereses de todas las partes que hacen parte del proyecto. Con un modelo de negocio bien diseñado, la implementación de autobuses eléctricos puede ser más fácil de hacer financieramente viable y, por lo tanto, beneficiosa para todas las partes (Batista & Bastos, 2023).

Imagen 2

Soluciones de movilidad del Grupo Kaufmann



Nota: La imagen muestra las soluciones de movilidad propuestas por el Grupo Kaufmann en Chile al incorporar los productos eléctricos en el mercado (Electromovilidad Kaufmann S.A, s. f.).

Estado del Arte

La mayoría de las regiones y ciudades del mundo implementan autobuses eléctricos (*BEB*, autobuses eléctricos con batería) y de hidrógeno (*FCB*, autobuses con pila de combustible) en lugar de los tradicionales buses diésel (*Diésel*) y de gas natural (*GNC*, gas natural comprimido). Muchos artículos e informes comparan el costo total de propiedad de estos autobuses, pero no siempre aclaran los datos relativos a la misión, el sistema de propulsión y el contexto (Cooney et al., 2013).

Un estudio en Italia parte del análisis de la bibliografía y relata una misión típica específica de autobús urbano (velocidad media de 17 km/h por 12 h de servicio diario), el estudio cita datos tecno económicos y medioambientales de los autobuses (costos de compra, mantenimiento,

consumo de energía y emisiones de CO₂), sistemas de propulsión (motor de combustión, batería, pilas de combustible, almacenamiento de hidrógeno) y contexto (costos del diésel, el GNC, la electricidad y el hidrógeno) (Zuccari et al., 2024).

Optimizar el costo medio anual de una flota de autobuses es una preocupación cada vez mayor para las empresas de transporte de todo el mundo. Hoy en día, existen muchas herramientas disponibles para ayudar en la toma de decisiones gerenciales, y una de las más utilizadas es el análisis de costo del ciclo de vida de un activo. El cual realiza un análisis determinista de la situación, permite a la administración evaluar el proceso de renovación de la flota, pero tiene la limitación de no contemplar ciertas variaciones intrínsecas y de estrecha relación con los vehículos y de descartar variables acordes con las exigencias de uso de la flota.

Las investigaciones internacionales evidencian el interés creciente por el análisis del costo del ciclo de vida con aplicación en sistemas de transporte urbano sostenible, de esta manera, España recrea un estudio con el objetivo principal de desarrollar un modelo en combinación de apoyo a la gestión de activos con énfasis en la asociación de la herramienta de costo del ciclo de vida y el modelo matemático de simulación de Monte Carlo para una flota de transporte urbano española (Riechi et al., 2017).

Un estudio en Corea observa la viabilidad económica de los autobuses eléctricos en una ciudad de tamaño medio, cuyo sistema de transporte público opera únicamente con autobuses, calcula la diferencia en el costo total de los autobuses eléctricos y los autobuses diésel con los parámetros necesarios tras un minucioso análisis de antecedentes, incluye en el estudio diferentes estrategias de recarga conductiva, en pro de analizar la mejor combinación de inversión (Vilppo & Markkula, 2015).

En la Unión Europea el estudio con aplicación del análisis de costo de ciclo de vida deja ver que la adquisición de vehículos ecológicos o autobuses eléctricos tiene el potencial de

mejorar el medio ambiente y la situación de la producción de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el costo de adquisición y los costos de funcionamiento de los vehículos eléctricos generan una estructura de costos particular que es diferente en comparación con los vehículos diésel (Potkány et al., 2018) .

El escenario habitual en la mayoría de las ciudades de la India implica el uso de combustibles fósiles (diésel y GNC) para el transporte en autobús. La movilidad eléctrica es una posible solución para reducir la huella de carbono del transporte público urbano. El estudio analiza la viabilidad de esta opción y calcula el costo del ciclo de vida (LCC) de la adquisición y el funcionamiento de autobuses eléctricos en comparación con los buses a diésel, al basarse en una unidad funcional de un autobús que recorre 100 km al día (Sheth & Sarkar, 2019).

Marco Metodológico

El artículo 3 del Decreto 3109 de 1997 establece que el transporte masivo de pasajeros es un servicio que ofrece, mediante una combinación sistemática de infraestructura y equipos, un sistema que cubre un alto volumen de usuarios y satisface un porcentaje significativo de sus necesidades de movilización. En este contexto, la tipología de vehículos comerciales que se conoce como bus constituye el principal actor, gracias a su versatilidad de adaptación en uso y tamaño, lo que le permite ajustarse a las demandas del sistema de movilidad y a las actualizaciones que este experimenta con el paso del tiempo.

Enfoque de la Investigación

El enfoque metodológico que se adopta es mixto, dado que combina elementos cuantitativos y cualitativos para la comprensión integral del fenómeno de estudio. El enfoque cuantitativo permite realizar el análisis comparativo de los costos asociados al ciclo de vida de los vehículos de transporte masivo con tecnologías alternativas y eléctricas, mientras que el enfoque cualitativo facilita la interpretación de los factores de operación y mantenimiento que inciden en dichos costos.

Este enfoque integra los resultados financieros y técnicos con criterios de gestión de activos al permitir una visión holística del costo total de propiedad y de desempeño durante la vida útil de los vehículos.

Tipo de Investigación

El tipo de investigación es descriptiva, en tanto que se orienta a detallar y caracterizar los costos, parámetros y variables que conforman el ciclo de vida de los vehículos de transporte masivo. Este tipo de investigación permite analizar las particularidades de los activos móviles que emplean tecnologías de combustión interna y eléctrica, identifica sus diferencias en términos de inversión, operación, mantenimiento y disposición final. Asimismo, la investigación descriptiva

posibilita establecer relaciones entre las etapas del ciclo de vida y los costos asociados, sin intervenir ni modificar las condiciones del objeto de estudio (Fernando et al., 2024).

Diseño de la Investigación

El diseño de investigación es documental, ya que se fundamenta en la revisión, análisis e interpretación de información proveniente de fuentes secundarias, tales como normas técnicas, documentos institucionales, informes de fabricantes y publicaciones científicas. Este diseño permite estructurar un modelo de análisis con énfasis en evidencia en documentos, conforme con los lineamientos de las normas ISO 55001:2024, UNE EN 60300-3-3:2017 y UNE EN 15663:2021. De este modo, la información se sistematiza para determinar los costos del ciclo de vida de los vehículos que hacen parte del análisis.

Población y Muestra

La población objeto de estudio corresponde a los vehículos de transporte masivo de pasajeros que operan bajo dos tecnologías de propulsión: motores de combustión interna y motores eléctricos. La muestra está compuesta de dos unidades representativas, un bus con motor de combustión y un bus eléctrico, ambos de la marca Mercedes Benz, los cuales se comparan en términos de costo total de propiedad y mantenimiento a lo largo de su ciclo de vida. Esta selección permite desarrollar un análisis práctico del comportamiento económico de cada tecnología bajo condiciones similares de operación.

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Las técnicas de recolección de datos son la observación documental y la disponibilidad de fuentes de información confiables. La observación documental examina informes técnicos, fichas de costos, manuales de mantenimiento y literatura disponible, mientras que la selección de fuentes se realiza en función de su actualidad, relevancia y validez técnica. Los datos se estructuran conforme a las etapas del ciclo de vida propuestas en la norma UNE EN 15663:2021,

que permiten la identificación de costos asociados a adquisición, operación, mantenimiento y disposición final.

Procedimiento Metodológico

El procedimiento metodológico se desarrolla en varias etapas que se enlazan con los objetivos específicos del estudio.

1. Definición de fundamentos: Reconocer los conceptos, criterios y parámetros asociados al análisis de costo del ciclo de vida, con base en las normas ISO y UNE pertinentes.
2. Identificación de costos: Distinguir los costos directos e indirectos en cada etapa del ciclo de vida de los vehículos.
3. Análisis de variables: Entender las variables operativas y de mantenimiento que influyen en el costo total.
4. Comparación de modelos: Fijar un contraste entre los modelos económicos de un bus a combustión y uno eléctrico, con un mismo horizonte temporal.
5. Propuesta de modelo: Desarrollar una herramienta de presentación y costeo que facilite la toma de decisiones sobre adquisición y gestión de activos eléctricos.
6. Conclusiones: Exponer los resultados del análisis y las recomendaciones del estudio.

Normas y Metodologías de Apoyo

El estudio apoya el análisis en las normas ISO 55001:2024, UNE EN 60300-3-3:2017 y UNE EN 15663:2021, las cuales proporcionan lineamientos para la gestión de activos, el análisis de confiabilidad y el cálculo del costo del ciclo de vida. Estas normas sirven como marco metodológico y técnico para garantizar la consistencia y validez del modelo propuesto, aseguran la trazabilidad y replicabilidad del análisis en diferentes contextos de la industria de transporte masivo.

Etapas del Desarrollo

El análisis del costo del ciclo de vida es una técnica de cálculo económico que optimiza la toma de decisiones para los activos que hacen parte de un sistema de gestión de activos. El objetivo principal del trabajo es generar una herramienta comparativa que permita establecer los costos de propiedad para una u otra alternativa de propulsión, en cuanto a vehículos de transporte masivo de pasajeros se refiere. De acuerdo con esto, el desarrollo del trabajo se estructura en las siguientes seis fases, dispuestas también en la Imagen 3.

La primera fase define los conceptos, criterios y parámetros que sustentan la metodología de análisis del costo del ciclo de vida. Esta fase integra los lineamientos propuestos por las normas ISO 55001:2024, UNE EN 60300-3-3:2017 y UNE EN 15663:2021, que orientan la gestión de activos físicos, la evaluación de costos y la confiabilidad operativa.

El propósito de esta etapa es establecer el marco conceptual que sirve de base para la aplicación del modelo financiero y matemático, así como garantizar la alineación con los principios de sostenibilidad y eficiencia energética en el sector transporte.

La segunda fase reconoce los criterios y costos asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida del activo, desde la adquisición hasta el retiro del servicio. En esta etapa, el modelo propuesto clasifica los costos en categorías de inversión inicial, operación, mantenimiento y disposición final. Asimismo, el proceso metodológico utiliza la información resultante de la observación directa y la consulta de fuentes documentales, con el fin de garantizar la validez y consistencia de los datos a utilizar para la comparación de alternativas tecnológicas.

La tercera fase interpreta las variables relevantes que impactan el ciclo de vida de los vehículos de transporte masivo, tanto eléctricos como de combustión interna. Estas variables incluyen parámetros de consumo energético, intervalos de mantenimiento, costos de repuestos, tiempo de disponibilidad y desempeño operativo. El modelo de análisis evalúa la influencia de

cada variable en el costo total de propiedad, con el fin de determinar su incidencia en la rentabilidad y sostenibilidad de la operación.

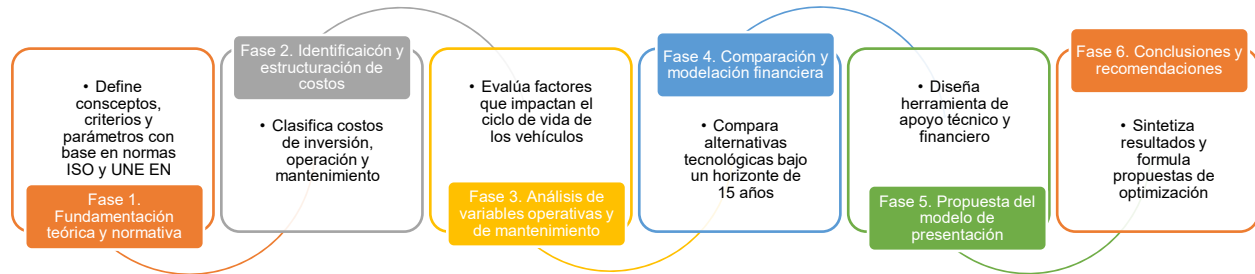
La cuarta fase compara los modelos económicos de ambas tecnologías de propulsión bajo un mismo horizonte temporal, quince años, correspondiente al ciclo de vida promedio de los vehículos de transporte masivo. En esta etapa, el modelo financiero aplica técnicas de análisis de flujo de caja descontado y de simulación para proyectar los costos totales de propiedad. El producto identifica el comportamiento económico de cada alternativa y evalúa su viabilidad financiera dentro del contexto operativo colombiano.

La quinta fase propone un modelo de presentación que sirve como herramienta de soporte técnico y financiero en los procesos de toma de decisiones. Este modelo presenta los resultados de manera comprensible, de modo que facilita la argumentación técnica ante entidades públicas y operadores de transporte. El propósito de esta fase es consolidar un esquema visual y analítico que permita exponer los beneficios económicos, operativos y ambientales de la implementación de buses eléctricos en los sistemas de transporte masivo.

La sexta fase es un resumen de los hallazgos objeto del desarrollo del estudio y presenta las conclusiones principales del análisis comparativo. Esta fase proporciona recomendaciones técnicas en pro de la optimización de la gestión de activos en el sector transporte, con base en los principios de sostenibilidad, eficiencia y rentabilidad. El resultado final contribuye a la toma de decisiones estratégicas para la adquisición, operación y mantenimiento de flotas de transporte masivo más sostenibles y eficientes.

Imagen 3

Etapas de desarrollo del trabajo de profundización



Nota: El diagrama representa la secuencia metodológica aplicada en el desarrollo del presente trabajo de profundización, desde la definición conceptual hasta la formulación del modelo de presentación y la síntesis de resultados. Escala de Benjamín Bloom y Robert Gagné. Elaboración Propia.

Desarrollo

Objetivo Uno. Fundamentos

Definir los conceptos, criterios y parámetros involucrados en la metodología de análisis de costo de ciclo de vida, con base en las normas ISO 55000:2024, UNE EN 15663:2021 y UNE EN 60300-3:2017, para su aplicación en los activos del sector de transporte masivo de pasajeros, tanto en vehículos a combustión como vehículos eléctricos.

Una herramienta de gestión eficaz para ayudar a determinar la estimación de apoyo a la inversión es el cálculo del costo del ciclo de vida (*LCC*). El cálculo del costo del ciclo de vida, o proceso de análisis económico, es el resultado del esfuerzo de los gestores por minimizar los costos en el proceso de toma de decisiones sobre los aspectos técnicos y económicos del futuro proceso de transformación. La herramienta de gestión del *LCC* ayuda a los gestores en la toma de decisiones al distribuir los costos a lo largo del ciclo de vida del producto. Un aspecto significativo del *LCC* es que opera con la tasa de inflación, el valor temporal del dinero y los cambios en la previsión del precio de compra (Potkány et al., 2018).

El costo del ciclo de vida significa a menudo la suma de todos los costos durante la vida útil de un activo y facilita un análisis costo beneficio más conveniente. La *evaluación realista* hecha mediante el análisis del *LCC* cobra más relevancia al tener en cuenta el valor temporal del dinero. Este método ayuda a reducir el costo total de un producto, a identificar los componentes de alto costo en el ciclo de vida de un producto y a comparar productos competidores (Kara et al., 2017).

Principales Definiciones

UNE EN 60300-3-3:2017. El uso principal del análisis de costo de ciclo de vida emplea la comparación de una solución alternativa con otra cuando el costo futuro de propiedad, que incluye el mantenimiento, las operaciones, las mejoras y las acciones de eliminación, es

significativo y requiere un equilibrio alcanzable mediante evaluaciones técnicas y monetarias que tienen en cuenta los distintos efectos de variabilidad, confiabilidad, mantenibilidad y capacidad de soporte. El cálculo del costo del ciclo de vida también puede proporcionar datos esenciales para elaborar estimaciones presupuestarias (Asociación Española de Normalización [AENOR], 2017).

ISO 15663:2021. El cálculo del costo del ciclo de vida es la consideración sistemática de los costos e ingresos inmersos a las alternativas necesarias para cumplir los objetivos de la empresa. Emplea un proceso iterativo de planificación, estimación y supervisión de las diferencias de costos e ingresos a lo largo de la vida útil de un activo. Respalda el proceso de toma de decisiones mediante la evaluación de alternativas y la realización de estudios de compensación. Si bien los mayores beneficios se obtienen normalmente en las primeras fases del ciclo de vida, es igualmente aplicable a todas las fases del ciclo de vida y a muchos niveles de detalle (International Organization of Standardization [ISO], 2021).

La serie de normas ISO 55000 no realiza un examen preciso ni profundiza sobre el análisis del costo del ciclo de vida, pero sí establece la relación necesaria entre la alineación de las decisiones financieras, técnicas y operativas con los objetivos de la organización, para promover la coordinación vertical y horizontal. La alineación vertical vincula el propósito de la organización, los objetivos de gestión de activos, las estrategias, los planes y las actividades, mientras que la alineación horizontal representa la colaboración entre departamentos, funciones y responsabilidades para las diferentes etapas del ciclo de vida de los activos (International Organization of Standardization [ISO], 2024).

ISO 55001:2024. La organización establece las cuestiones externas e internas que son relevantes para su propósito y que afectan su capacidad para lograr los resultados previstos de su sistema de gestión de activos. La organización decide si el cambio climático es un tema relevante (British Standards Institution [BSI], 2024).

ISO 55010: 2019. El concepto de valor en la gestión de activos es más amplio que la definición específica y más corta en términos contables, en la cual las diferentes normas contables tratan el valor como parte del proceso de valoración de activos. El valor en la gestión de activos puede expresarse tanto en términos monetarios como no monetarios y requiere una comprensión uniforme del valor financiero y no financiero para determinar los criterios de toma de decisiones (International Organization of Standardization [ISO], 2019).

La serie de normas ISO 15686 enfoca su estudio en la industria de la construcción, edificaciones y obras de ingeniería civil, sin embargo, aporta un complemento interesante que sirve para identificar los conceptos de análisis de costo de ciclo de vida en las áreas de interés que se requieran según la descripción y apropiación de cada proyecto.

NTC ISO 15686-5:2022. El propósito del costo de ciclo de vida cuantifica la entrada en un proceso de toma de decisiones o la evaluación de ésta y por lo general debe incluir también entradas de otras evaluaciones (por ejemplo, evaluación ambiental, evaluación del diseño, evaluación de la seguridad, evaluación de la funcionalidad y la evaluación del cumplimiento regulatorio). La cuantificación necesita el nivel de detalle obligatorio para las etapas calve del proyecto. El alcance de los costos competentes del análisis de costo de ciclo de vida requiere una definición y acuerdo previos con el cliente desde el principio (Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC], 2022).

AS/NZS 4536:1999. El costo del ciclo de vida (LCC) describe la suma total del costo de adquisición y el costo de propiedad de un activo a lo largo de todo su ciclo de vida, desde el diseño, la fabricación y el uso, hasta el mantenimiento y la eliminación. Esta metodología implica un proceso dispuesto para evaluar y comparar costos, con el fin de tomar decisiones informadas mediante la evaluación de diferentes opciones a lo largo del tiempo (Australian/New Zealand Standard [AS/NZS], 1999).

Fases del Ciclo de Vida

La norma UNE EN 60300-3-3:2017 plantea 6 estados para el ciclo de vida, en los cuales los 3 primeros hacen referencia al costo de adquisición (*CAPEX*, por sus siglas en inglés) y los últimos 3 al costo de propiedad (*OPEX*, por sus siglas en inglés), estos se pueden observar a continuación y en la Imagen 4.

- a. Concepto;
- b. Desarrollo, incluye todos los aspectos de diseño;
- c. Realización, incluye la compra, manufactura, inspección y prueba, envío e instalación.
- d. Utilización; incluye la operación y el mantenimiento;
- e. Mejora, de ser necesario, incluye todos los aspectos de diseño y adquisición asociados con la mejora;
- f. Retiro.

Los costos de adquisición generalmente son visibles y de fácil clasificación antes de tomar la decisión de adquisición, en los cuales se incluye, o no, los costos de instalación. Algunas veces la transición entre las actividades de adquisición y de propiedad son borrosos y resultan en una atribución de costos difícil, dando lugar a costos doblemente contabilizados. Por lo tanto, hay que tener cuidado para asegurar la exactitud.

Los costos de propiedad, que suelen ser un componente importante del costo de ciclo de vida, en muchas ocasiones excede los costos de adquisición y no son fácilmente visibles. Estos costos son difíciles de predecir y pueden incluir en ocasiones los costos de la instalación (Asociación Española de Normalización [AENOR], 2017).

Imagen 4

Análisis típico a través del ciclo de vida



Nota: La imagen muestra el proceso típico de 6 fases del LCC de un artículo o producto, junto con los temas a abordar en el estudio, no existe una correlación directa entre los grupos de análisis y las etapas específicas, sin embargo, reflejan el cambio general con énfasis en el análisis a medida que avanza el ciclo de vida, propuesta por la norma UNE EN 60300-3-3:2017 Anexo A (Asociación Española de Normalización [AENOR], 2017).

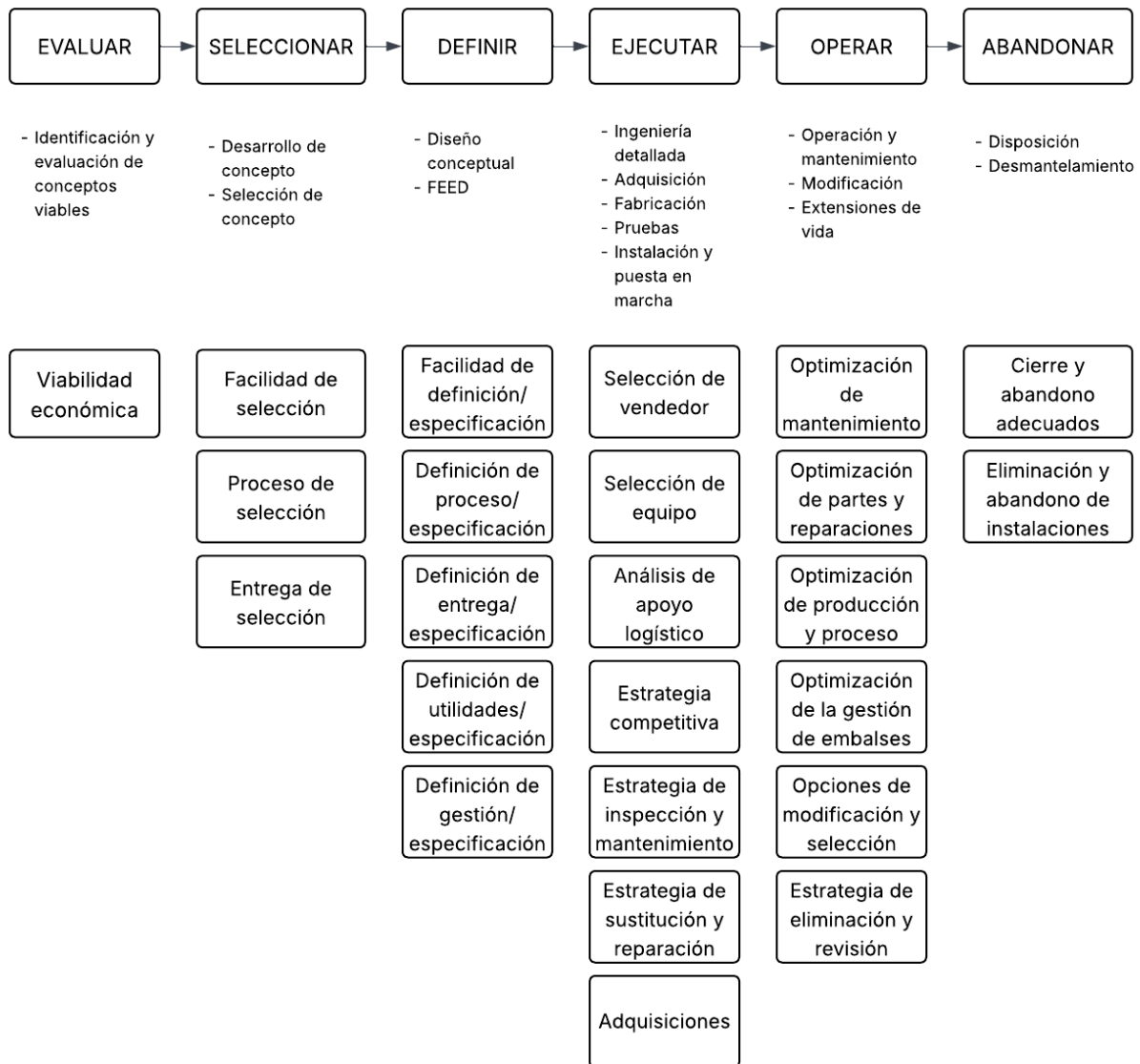
La ISO 15663:2021, norma para las industrias del gas y del petróleo, permite su incorporación para el desarrollo de proyectos en otras áreas de interés e indica que cuando el cálculo del costo del ciclo de vida forma parte de todo el ciclo de vida del proyecto cada fase

requiere los estudios previsibles y el área de interés de la fase siguiente (International Organization of Standardization [ISO], 2021), esta norma plantea 7 fases para considerar en el análisis del costo del ciclo de vida, descritos a continuación y en la Imagen 5.

- a. Exploración, incluye la identificación de oportunidades de negocio;
- b. Evaluación, incluye los conceptos de instalaciones posibles;
- c. Selección, incluye el concepto de instalación preferida seleccionada;
- d. Definición, incluye el concepto maduro de instalación para la decisión final de inversión;
- e. Ejecución, incluye la instalación lista para inicio de producción/operación;
- f. Operación, incluye el concepto de fin de la vida de operación de la instalación;
- g. Abandono, incluye el concepto de instalación removida y eliminada.

Imagen 5

Fases y procesos típicos del ciclo de vida



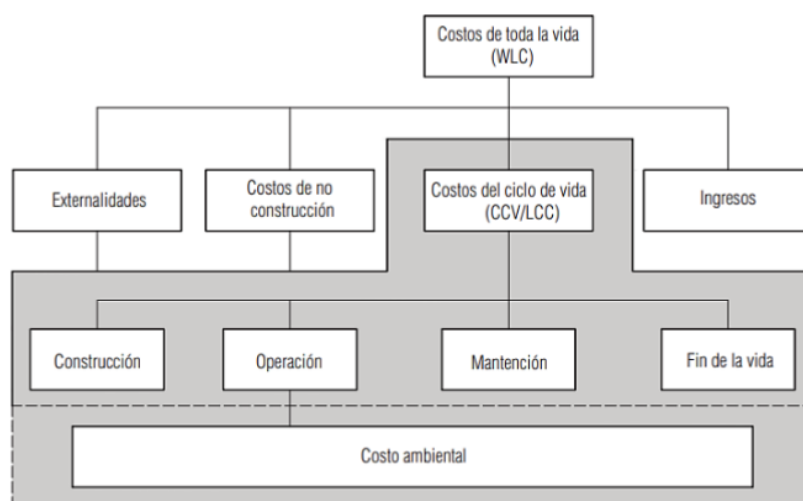
Nota: La imagen muestra las fases del ciclo de vida de un proyecto de desarrollo de un yacimiento, junto con algunos de los procesos y decisiones relevantes para cada fase, estos hacen parte de las actividades de cálculo de costos del ciclo de vida. Los procesos aplican tanto al desarrollo original del yacimiento como a los cambios posteriores en el diseño, propuesta por la norma ISO 15663:2021 Anexo B (International Organization of Standardization [ISO], 2021).

La norma NTC ISO 15686-5:2022 presenta 4 fases para el costo del ciclo de vida, los cuales, hacen parte de una proyección para el sector de la construcción, se presentan a continuación y en la Imagen 6 e Imagen 7.

- a. Inversión y Planificación, es un análisis del cálculo de costo total de la vida útil o análisis estratégico;
- b. Diseño y Construcción, es un análisis del cálculo del ciclo de vida durante la construcción, en el esquema funcional o análisis de sistema;
- c. Durante la Ocupación, es un análisis del cálculo del costo del ciclo de vida durante la ocupación o costo en uso;
- d. Disposición, es un cálculo del costo del ciclo de vida en el fin de vida o cambio de estado.

Imagen 6

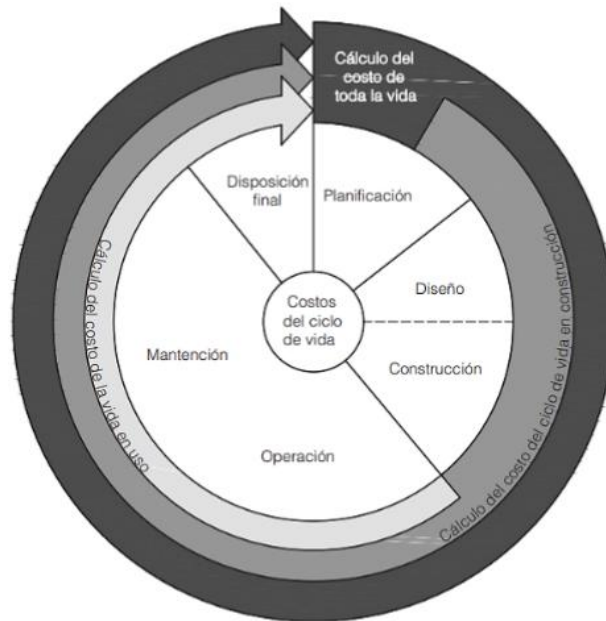
Elementos de costos de toda la vida y del ciclo de vida



Nota: La imagen gráfica los costos a incluir en el cálculo del costo del ciclo de vida y los costos más amplios e ingresos concernientes a los costos de toda la vida, propuesta en la norma NTC ISO 15686-5:2022 Sección 4.2.1 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC], 2022).

Imagen 7

Análisis en diferentes etapas del ciclo de vida



Nota: La imagen indica el uso típico del costo del ciclo de vida en etapas distintas durante el ciclo de toda la vida y los elementos de costo a incluir en cada etapa, propuesta en la norma NTC ISO 15686-5:2022 Sección 4.3 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC], 2022).

Las 4 fases del ciclo de vida propuestas en la norma AS/NZS 4536:1999 comprenden la vida útil del producto, desde la identificación de la necesidad hasta su eliminación, las distintas fases del ciclo de vida se designan de la siguiente manera, de la misma forma se muestran en la Imagen 8.

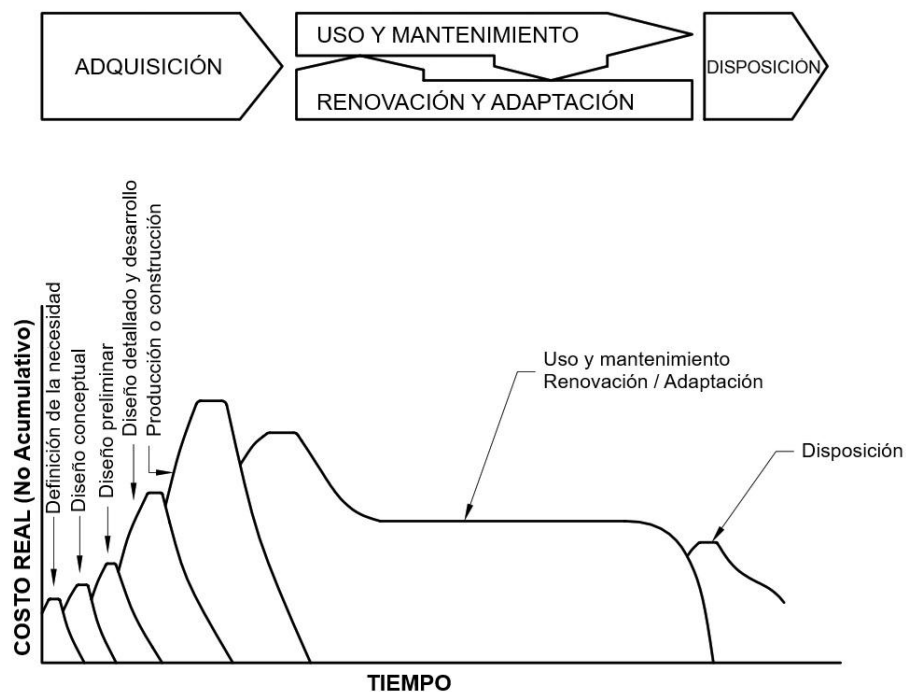
a. Adquisición, la cual debe incluir:

- I) Definición de la necesidad;
- II) Diseño conceptual;
- III) Diseño preliminar;
- IV) Diseño detallado y desarrollo;

- V) Producción o construcción;
- b. Asistencia para el uso y mantenimiento;
- c. Renovación y adaptación;
- d. Eliminación.

Imagen 8

Costos y fases del ciclo de vida



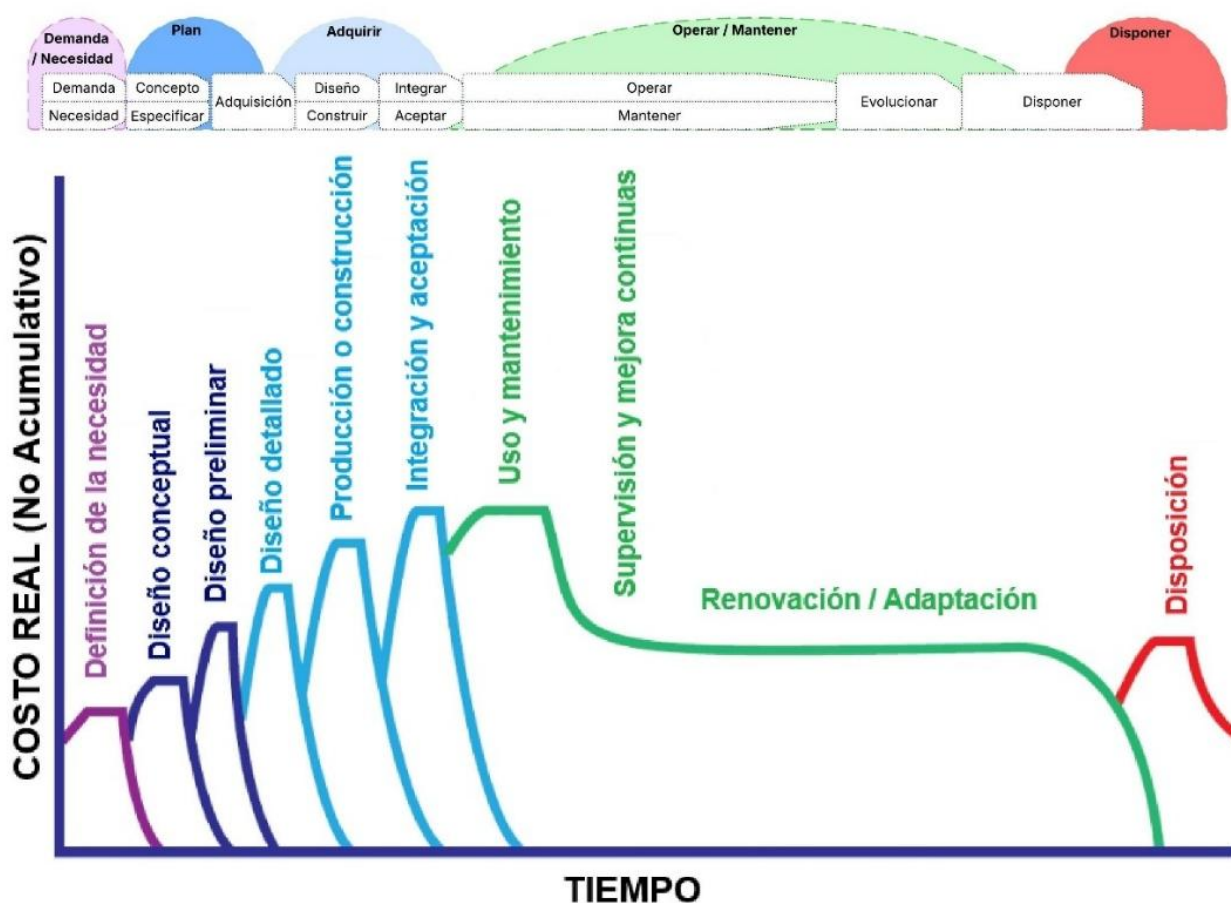
Nota: La imagen muestra la distribución típica de los costos reales sobre las fases del ciclo de vida, propuesta en la norma AS/NZS 4536:1999 Sección 2.2 (Australian/New Zealand Standard [AS/NZS], 1999).

El proceso del LCC se aplica a todas las etapas de la vida útil de los activos, es decir, el período desde la creación del activo hasta el final de su vida útil. Estas etapas se definen desde la demanda o necesidad hasta la eliminación. El LCC se aplica con mayor eficacia en la fase inicial de diseño del proyecto para optimizar los costos totales de desarrollo y mantenimiento. Sin

embargo, tiene que utilizarse durante las fases de mantenimiento y operativas del ciclo de vida para optimizar las estrategias de mantenimiento y así, facilitar una asignación eficiente de los recursos, en la Imagen 9 se puede apreciar de mejor manera la integración propuesta (Asset Standards Authority [ASA], 2018).

Imagen 9

Fases del ciclo de vida y sus costos



Nota: La imagen describe los costos y etapas del ciclo de vida de manera que su uso permita optimizar las estrategias de mantenimiento y facilitar la asignación correcta de recursos, propuesta en la norma T MU AM 01001 ST de 2018 Sección 5 (Asset Standards Authority [ASA], 2018).

Objetivo Dos. Costo del Ciclo de Vida

Reconocer los criterios y los costos asociados a cada una de las etapas del modelo de ciclo de vida aplicado a los vehículos de transporte mediante una metodología documental de recolección y tratamiento de datos.

Un modelo LCC, como cualquier otro modelo, es una representación simplificada del mundo real. Extrae las características y aspectos más importantes del producto y los traduce en cifras de costos. Para que el modelo sea realista, debe:

- a) Representar las características del producto que se analiza, incluye su entorno de uso previsto, el concepto de mantenimiento, los escenarios de apoyo operativo y de mantenimiento, y cualquier restricción o limitación;
- b) Ser lo suficientemente completo como para incluir y destacar todos los factores relevantes para el LCC;
- c) Ser lo suficientemente sencillo como para que sea fácil de entender y permita su uso oportuno en la toma de decisiones, así como su futura actualización y modificación;
- d) Estar diseñado de tal manera que permita la evaluación de elementos específicos del LCC independientemente de otros elementos.

Un modelo LCC simple es básicamente una estructura contable que contiene términos y factores que permiten la estimación de los costos asociados a cada uno de los elementos de costo que constituyen el LCC (Australian/New Zealand Standard [AS/NZS], 1999).

El análisis del costo del ciclo de vida (LCC) se determina al sumar todos los costos potenciales que se vinculan con el equipo a lo largo de su vida útil, y debe limitarse a los costos que se pueden controlar. En este método, se estiman los costos de operación, mantenimiento y compra del activo, así como su valor de reventa.

A continuación, todos los valores se organizan como flujos de efectivo. Una vez hecho esto, todas las entradas y salidas de efectivo durante la vida útil del activo se convierten a valores actuales con las tasas de interés y la inflación aplicables al período que se evalúa. Estas tasas permiten comparar los costos actuales con los futuros. En otras palabras, las consecuencias financieras de algo que se hace hoy pueden compararse con el costo en que se ha de incurrir en un mañana (Riechi et al., 2017).

Elementos de Costo

La estimación de los costos totales del ciclo de vida de un activo requiere la identificación de los elementos clave de costos. La elección del conjunto correcto de elementos permite reflejar tres cuestiones específicas:

1. El elemento tiene que ser una actividad concreta que genere costos, en el mayor grado posible los elementos de costo requieren independencia;
2. El calendario de los costos del elemento tiene que estar claro, la importancia de un costo depende generalmente de su posición en el tiempo dentro de la vida útil del activo;
3. La relación entre los recursos a utilizar por el elemento y el costo resultante es de pleno conocimiento, los cambios en las condiciones del mercado y las fluctuaciones de los precios se reflejan más fácilmente a través de los cambios en los costos del tipo específicos de recursos (Australian National Audit Office [ANAO], 2001).

El LCC de cualquier vehículo se puede calcular mediante el costo total de propiedad (*TCO* por sus siglas en inglés) con respecto al valor temporal del dinero, el precio de compra inicial del vehículo, más los gastos de transporte, los costos de depreciación del vehículo a lo largo de su vida útil, los costos de modificación y sustitución, los costos de funcionamiento, los costos de mantenimiento, los costos de financiación, incluso los intereses, los costos de los impuestos y los costos de los seguros (Sheth & Sarkar, 2019).

Para un vehículo típico el LCC integra los conceptos expuestos en la Ecuación 1.

Ecuación 1

LCC Total

$$\begin{aligned}
 LCC_T = & \text{Costo de Adquisición} \\
 & + \sum_{i=1}^n (\text{Costo de Operación para un Año Específico}_i \\
 & + \text{Costo de Mantenimiento Planificado para un Año Específico}_i \\
 & + \text{Costo de Mantenimiento No Planificado para un Año Específico}_i) \\
 & + \text{Costo de Disposición}
 \end{aligned}$$

Nota: La ecuación muestra los costos necesarios para cuantificar el LCC de un vehículo (Dhillon, 2011).

Elaborar un análisis del costo total de propiedad implica diferentes costos en distintos momentos. Por lo tanto, el cálculo de los costos futuros supone la aplicación de una fórmula de descuento que aproxime el valor del dinero futuro al tiempo presente, es decir, la fórmula del valor actual, como se muestra en la Ecuación 2.

Ecuación 2

Valor actual

$$PV = A_t * \frac{1}{(1 + r)^t}$$

Donde:

- PV es el Valor presente;
- A_t es un costo único en el momento t;
- r es la tasa de descuento real que se presenta en el año 1;
- t es el tiempo en años.

Nota: La ecuación muestra el valor del dinero futuro en el presente del cálculo (De Clerck et al., 2016).

Para el caso de costos recurrentes rige la Ecuación 3 en su lugar.

Ecuación 3

Valor actual con costos recurrentes

$$PV = A_0 * \frac{(1 + r)^t - 1}{r * (1 + r)^t}$$

Donde:

- PV es el Valor presente;
- A_0 es costo recurrente;
- r es la tasa de descuento real que se presenta en el año 1;
- t es el tiempo en años.

Nota: La ecuación muestra el valor del dinero futuro en el presente al tener en cuenta costos recurrentes (De Clerck et al., 2016).

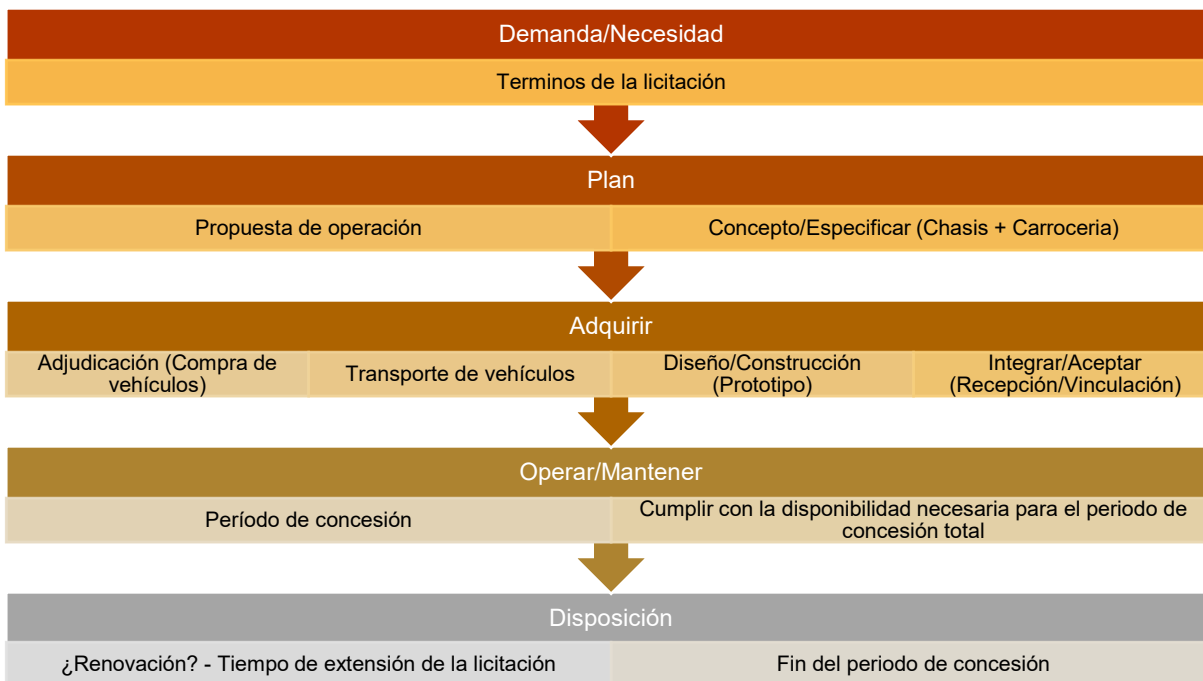
Costos Asociados a las Etapas del Modelo LCC

Para crear un modelo de negocio sostenible y rentable, es fundamental evaluar cuidadosamente todos los gastos y factores relativos a la propiedad y el funcionamiento de los vehículos (Batista & Bastos, 2023).

Los sistemas de transporte masivo en Colombia, en las ciudades principales, operan bajo un modelo de licitación que ofrece el ente gubernamental local mediante un proceso de selección para la adjudicación de un contrato de concesión para la provisión de flota de los vehículos a utilizar según los términos dispuestos para la operación en cada ciudad. El concesionario operador genera un plan de trabajo, el cual, al combinar la información que contiene la norma T MU AM 01001 ST de 2018 como esta en la Imagen 9 de Fases del ciclo de vida y sus costos, puede desarrollar un modelo integrador como el dispuesto en la Imagen 10.

Imagen 10

Fases del ciclo de vida para la provisión de flota de un contrato de concesión



Nota: La imagen muestra la integración del modelo propuesto en la norma T MU AM 01001 ST de 2018 Sección 5 con el proyecto de concesión de los principales sistemas de transporte masivo de pasajeros en Colombia para elaborar el costo total de propiedad de los vehículos. Elaboración Propia.

Los costos relativos a las etapas del modelo LCC, exigen como primera medida la definición de las características típicas de operación de un autobús urbano, las cuales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Características típicas de operación de un autobús urbano

Concepto	Descripción
Velocidad media de operación	18 km/h

Horas diarias de servicio	14.5 horas
Autonomía mínima para la operación	260 km
Días de servicio al año	312 días, 81.120 km/año
Tiempo de la licitación	15 años, 1'216.800 km/15 años

Nota: La tabla muestra las características de operación típicas para un autobús del servicio de transporte masivo de pasajeros en una de las principales ciudades de Colombia (Transmilenio S.A, 2024).

El cálculo de las etapas del LCC alberga los siguientes costos representativos, un resumen se muestra en la Tabla 2:

- Costo de adquisición del bus, chasis más carrocería y matrícula.
- Costos de mantenimiento preventivo, de acuerdo con las rutinas que estipula el manual de mantenimiento del fabricante, engrase regular, inspecciones nocturnas, alineación, balanceo, rotación de llantas.
- Costos de mantenimientos no planificados, propios de la operación, en los cuales se incluyen: pinchazos de llantas, ruptura de vidrios, golpes de carrocería y/o reemplazo de señalética de la carrocería.
- Costos de mantenimientos mayores, los cuales hacen parte de la operación de manera que se cumpla con la disponibilidad necesaria para el contrato de licitación, entre los cuales se encuentran: reparación/cambio de motor de combustión, reparación/cambio de transmisión mecánica/automática, cambio/reparación de diferencial, sustitución de baterías de alto voltaje.
- Costos de operación, en los cuales se incluyen: seguros de operación contractual y extracontractual, seguro obligatorio de accidentes de tránsito (SOAT), revisión tecnomecánica (RTM), póliza de seguro del vehículo, combustible y/o carga del vehículo.

- Costo de disposición, valor de salvamento, toda vez que el fin y/o desvinculación del vehículo del sistema de transporte masivo de la ciudad no constituye el fin de la vida útil del vehículo, por lo cual la venta a otra ciudad y/o sistema de operación para su uso es viable.

Tabla 2

Etapas y costos del LCC previstos para el modelo

Etapas del LCC	Costo	Descripción
Adquirir	Adquisición del Vehículo	Chasis, carrocería, matrícula
		Rutinas de mantenimiento del fabricante
Operar/Mantener		Inspecciones nocturnas de alistamiento
	Mantenimiento Preventivo	Engrase regular
		Alineación, balanceo, rotación de llantas
		Reemplazo de llantas
		Pinchazos de llantas
	Mantenimiento No Planificado	Ruptura de vidrios
		Golpes de carrocería
		Reemplazo de señalética
		Reparación/ Cambio del motor de combustión interna
		Reparación/ Cambio de la caja de velocidades mecánica o automática
	Mantenimiento Mayor	Reparación/ Cambio de la diferencial
		Cambio de las baterías de alto voltaje
		Reparación de carrocería
	Operación	Seguros de operación contractual y extracontractual

		Seguro obligatorio de accidentes de tránsito (SOAT)
		Revisión tecnomecánica (RTM)
		Impuesto anual
		Repostaje de combustible (Diésel + Urea)
		Suministro de carga eléctrica
		Lavado externo y limpieza interna
Disponer	Disposición	Valor de salvamento

Nota: La tabla resume las etapas y costos previstos en la adquisición, mantenimiento y operación de un vehículo de transporte público de acuerdo con la normativa colombiana de operación y tránsito, así mismo, las licitaciones contemplan unos requerimientos mínimos de imagen, mantenimiento y operación de los buses en los diferentes sistemas de transporte masivo, estas características son la base para el desarrollo del modelo de presentación del presente trabajo de profundización (Nova et al., 2020).

La ecuación para calcular el valor actual del costo total del ciclo de vida, de las dos alternativas a evaluar, se determina a través de la Ecuación 4.

Ecuación 4

Cálculo del LCC de las alternativas a evaluar en el modelo de presentación

$$LCC = C_A + \sum_{t=1}^{LC} C_t * \frac{(1+r)^t - 1}{r * (1+r)^t} \pm \left(A_t * \frac{1}{(1+r)^t} \right)$$

Donde:

- LCC es el valor actual del coto total del ciclo de vida;
- C_A es el costo de adquisición;
- r es la tasa de descuento real que se presenta en el año 1;
- LC es el ciclo de vida;

- C_t es la suma de costos relevantes del LCC de propiedad después de la deducción de flujo de caja positivo;
- A_0 es costo recurrente;
- t el tiempo en años.

Nota: La ecuación muestra el valor actual del costo total del ciclo de vida, de las dos alternativas a evaluar al tener en cuenta los diferentes costos necesarios para el cumplimiento de la operación de los vehículos de transporte masivo de pasajeros (Potkány et al., 2018).

Objetivo Tres. Variables Asociadas

Interpretar las variables relevantes de operación y mantenimiento, asociadas a los vehículos de transporte masivo, de combustión y eléctricos, que impactan el ciclo de vida y la gestión de los activos, con base en el modelo de análisis de costo del ciclo de vida.

No es necesario incluir todos los costos concernientes con el proyecto en un LCC con alternativas de proyecto. Solo los costos que son relevantes para la decisión y significativos en cuanto a su cuantía son necesarios para tomar una decisión de inversión válida. Los costos son relevantes para la decisión cuando varían de una alternativa a otra. Los costos que son aproximadamente los mismos para cada alternativa no representan un factor determinante en la elección entre las alternativas y, por lo tanto, pueden omitirse del cálculo del LCC.

La inclusión de dichos costos no produce resultados erróneos, pero puede incurrir en costos de recopilación y análisis de datos que pueden evitarse. Los costos son significativos cuando son lo suficientemente consistentes como para marcar una diferencia creíble en el LCC de una alternativa del proyecto (Kneifel & Webb, 2020).

Las categorías de costos a tratar en el presente análisis del LCC para el modelo de presentación se detallan a continuación.

Costo de Adquisición del Vehículo

El modelo regular de comercialización de vehículos de transporte masivo de pasajeros en Colombia distingue claramente la compra independiente del chasis o tren motriz de la compra de la carrocería, de forma tal que el cliente final es quien decide qué marca de chasis y carrocería quiere tener, de esta manera, la composición del costo de adquisición (C_A) del vehículo se rige por dos rubros, el costo del chasis o tren motriz y el costo de la carrocería, adicional al costo de matrícula del vehículo, requisitos expuestos en la Resolución 4775 de 2009 artículos 6 y 12, con

soberanía al organismo de tránsito departamental o municipal para establecer la cuantía de este rubro.

El precio inicial de compra incluye el impuesto de valor agregado (IVA) que para Colombia, en el año 2025, es del 19% y excluye los posibles descuentos o promociones que el concesionario y/o representante pueda generar al momento de la venta, así mismo, tiene en cuenta regulaciones vigentes como la Ley 1964 de 2019 en la cual no se indica un descuento adicional a vehículos con alternativas de propulsión que no impacten el medio ambiente, es decir, rige el mismo porcentaje de IVA para vehículos a combustión o de energías limpias.

Los precios de venta actuales de los vehículos eléctricos son más altos que los de los vehículos convencionales similares. Esto se debe principalmente al mayor costo de las baterías de alto voltaje, pero también a la ausencia de economías de escala (Lebeau et al., 2013).

Es importante tener en cuenta que los vehículos se deprecian con el tiempo, esta pérdida de valor, como consecuencia de la depreciación, es mayor durante los primeros años de vida útil del vehículo. Las tasas de depreciación no solo varían según el combustible o el tipo de propulsión, sino que también varían según la imagen de marca, el kilometraje, la clase del vehículo, modelo, entre otras, una tasa representativa de depreciación de acuerdo con la tecnología de propulsión se indica en la Tabla 3, en la cual se incluyen los valores en porcentaje después de un año.

Tabla 3

Tasa de depreciación por tecnología del vehículo

Tecnología	Tasa de Depreciación (%)
Diésel	82,7
Híbrido	83,4

Gas Natural Comprimido	78,1
Eléctrico	78,6

Nota: La tabla muestra el valor de depreciación anual de los vehículos en general, al tener en cuenta el tipo de tecnología de propulsión, información útil para el desarrollo del modelo de presentación del presente trabajo de profundización, la información se recolecta con base en la literatura disponible (De Clerck et al., 2016).

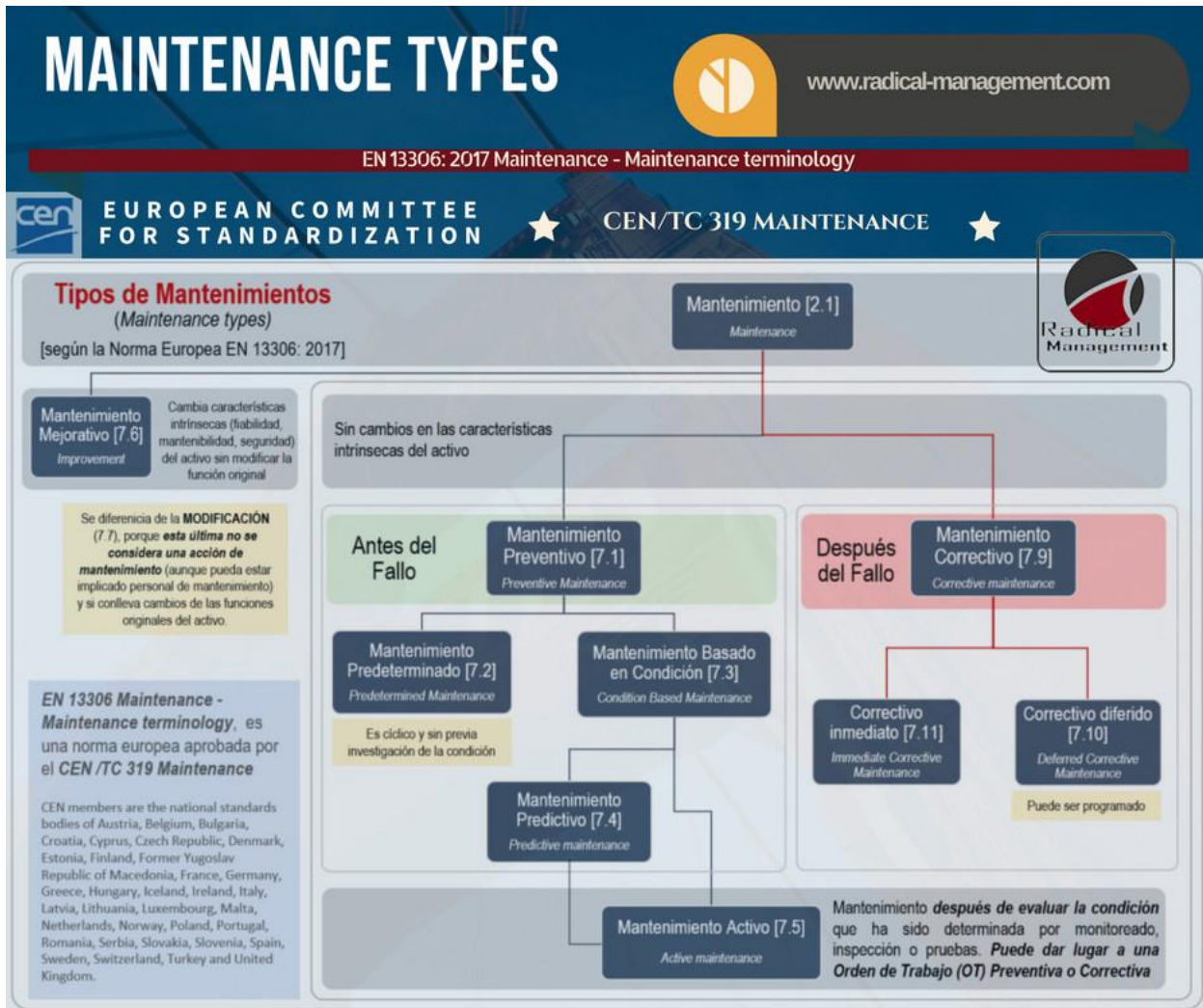
Costo de Operación/ Mantenimiento del Vehículo

La norma europea UNE EN 13306 define los tipos de mantenimiento en dos escenarios diferentes:

- Si con las actividades de mantenimiento que se implementan se intenta provocar, o no, cambios intrínsecos en las características de diseño relativas a confiabilidad, mantenibilidad y seguridad de los activos objeto de mantenimiento, se trata de mantenimiento preventivo, correctivo y/o mejorativo, este escenario se describe de manera más amplía en la Imagen 11.
- Si existen actividades de mantenimiento del activo que pueden ser programadas, se trata de mantenimiento programado y mantenimiento no programado, este escenario se describe de manera más amplía en la Imagen 12.

Imagen 11

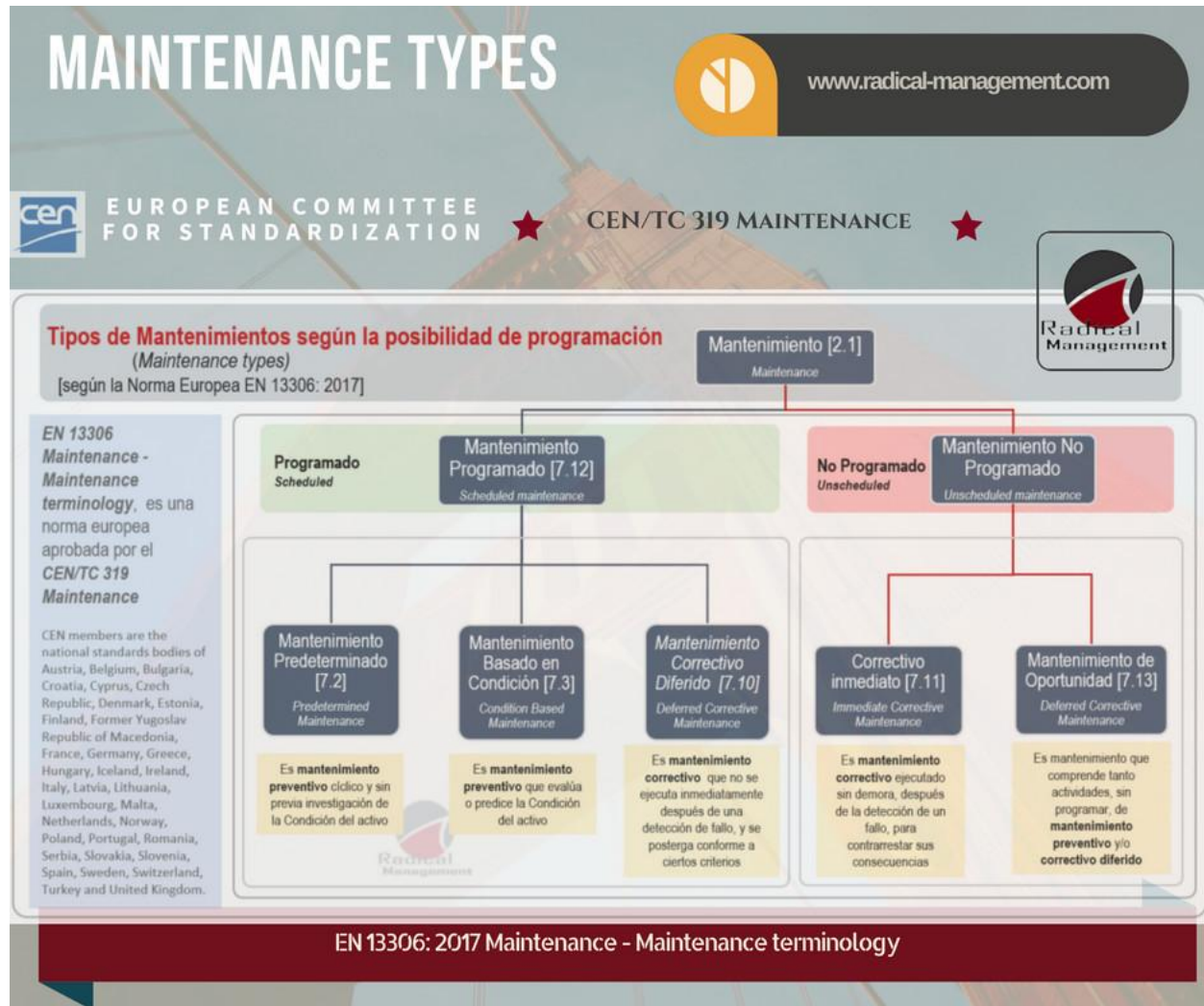
Tipos de mantenimiento que provocan o no cambios en las características del activo



Nota: La imagen sintetiza el primer escenario de clasificación de los tipos de mantenimiento aplicables a los activos físicos objeto de mantenimiento. Entre corchetes el número de referencia del término estandarizado UNE EN 13306:2017. También se incluye el término original en inglés (Sexto, 2017).

Imagen 12

Tipos de mantenimiento según la posibilidad de programación



Nota: La imagen sintetiza el segundo escenario de clasificación de los tipos de mantenimiento aplicables a los activos físicos objeto de mantenimiento. Entre corchetes el número de referencia del término estandarizado UNE EN 13306:2017. También se incluye el término original en inglés (Sexto, 2017).

La operación y el mantenimiento es un conjunto de componentes que contienen los costos en los que debe incurrir el operador al prestar los servicios de transporte público urbano. Estos costos cuentan con una división que como un todo integran el costo total de operación y de

mantenimiento durante el ciclo de vida del activo, estas categorías se identifican a continuación (Nova et al., 2020).

Mantenimiento Preventivo. Contempla las actividades que los fabricantes, tanto del chasis como de la carrocería, establecen para la preservación de los buses a lo largo del tiempo, su particularidad es que tiene frecuencias concretas en tiempo y/o kilometraje, lo primero que ocurra, para su ejecución. Adicional se adoptan inspecciones nocturnas, cuya función principal radica en alistar los vehículos para la operación del día siguiente, de manera que se cubran los ítems básicos de funcionamiento de los vehículos, por otro lado, sirve como insumo para el mantenimiento correctivo con programación.

Este rubro es cuantificable a partir de los insumos, en repuestos y mano de obra, que los fabricantes estimen para cada una de las rutinas de mantenimiento, así como aquellas actividades que se lleven a cabo de forma programada, de manera que su costo se conozca con antelación, a este tipo de mantenimiento se le conoce como proactivo (Contreras, 2023).

Mantenimiento No Planificado. Incluye aquellas actividades que son inesperadas y no cuentan con una frecuencia de ocurrencia que permita determinar su aparición, es el caso tal de acciones como pinchazos de llantas, golpes de carrocería, ruptura de vidrios, entre otras.

Este costo de mantenimiento, por lo general, está determinado por la cuantificación de los imprevistos que puedan surgir durante el transcurso de la operación, de manera que la planificación del gasto se realiza con antelación, este tipo de mantenimiento corresponde al tipo reactivo (Contreras, 2023).

Mantenimiento Mayor. Adopta aquellas actividades que por su naturaleza incurren en el uso de una cantidad mayor de recursos y cuyo tiempo de ejecución excede los tiempos de reparación comunes, como es el caso de las acciones de reparación y/o cambio de motores, transmisiones, diferenciales, baterías de alto voltaje (para el caso de los vehículos eléctricos) e incluso adecuaciones de restitución de la carrocería.

Este rubro cuenta con una planificación previa puesto que tiene en cuenta elementos de la operación que están sometidos al desgaste y que hacen parte principal del ecosistema de funcionamiento de los vehículos (Contreras, 2021).

Operación. Esta categoría alberga los conceptos que hacen posible que los vehículos circulen por las vías en cumplimiento de la normatividad vigente, tanto a nivel país, local/municipal como de los requerimientos del sistema de transporte del cual sea integrante, es así como rubros del orden de seguros, pólizas, repostaje de combustible/energía y limpieza hacen parte de su constitución.

Este tipo de costos son cuantificables en cuanto las condiciones de operación como desplazamientos y horarios sean de pleno conocimiento, de manera que al tener en cuenta las características de los vehículos se pueda generar una estimación de costo de la operación del vehículo en una ruta específica (Contreras, 2023).

Costo de Disposición

Es la fase final y clave en la vida del activo, incluye actividades del tipo desmantelamiento, retiro, es decir, eliminación o reciclaje del activo (o sus componentes) de la operación, reutilización, venta y/o enajenación y, si se requiere, abordar la planificación para el reemplazo del activo, según corresponda, este periodo puede ser muy extenso y crítico (Contreras, 2023).

Para el caso de los vehículos pertenecientes a los sistemas de transporte masivo, es común ver que a pesar de la culminación de actividades en la ciudad y operación de adquisición se disponga de una segunda vida útil en otra ciudad, sistema y/u operación, de manera que se logre un valor de salvamento para el primer propietario.

Consideraciones Principales

Los vehículos eléctricos en comparación con los vehículos de motor de combustión convencionales, en cuanto a estructura, cuentan con baterías y motores en sus componentes de

control y propulsión. De acuerdo con esto, se hace necesario incurrir en las diferencias principales que abarcan el LCC de un vehículo frente al otro (Fang, 2015).

Los mantenimientos preventivos cuentan con una frecuencia de aplicación conforme a las indicaciones del fabricante, lo que incluye recursos como repuestos, aceites y mano de obra que deben contar con una planificación para su ejecución; este es uno de los principales diferenciadores de costos en el LCC, puesto que, al contar con menores componentes móviles sujetos al desgaste en los vehículos eléctricos, el mantenimiento proactivo se reduce de manera drástica. En la Tabla 4 y Tabla 5 se presentan los intervalos de mantenimiento para dos buses Mercedes Benz, uno con propulsión eléctrica y el otro con propulsión convencional a diésel con normativa Euro 6.

Tabla 4

Intervalos de mantenimiento generales del Bus eO500U

Servicio	1^{er} Servicio	2^{do} Servicio	Servicios Cada
Servicio de Mantenimiento M	30.000 Km	60.000 Km	30.000 Km
Servicio de Mantenimiento Complementario Z2	60.000 Km	120.000 Km	60.000 Km
Servicio de Mantenimiento Complementario Z4	120.000 Km	240.000 Km	120.000 Km
Servicio de Mantenimiento Complementario Z16	480.000 Km	960.000 Km	480.000 Km
Cambio del Filtro Secador de Aire del Sistema Neumático	90.000 Km	180.000 Km	90.000 Km
Servicio Adicional de Mantenimiento J1	60.000 Km	120.000 Km	60.000 Km
Servicio Adicional de Mantenimiento J2	120.000 Km	240.000 Km	120.000 Km
Servicio Adicional de Mantenimiento J3	180.000 Km	360.000 Km	180.000 Km

Cambio de Aceite del Eje Trasero ZA	60.000 Km	120.000 Km	60.000 Km
-------------------------------------	-----------	------------	-----------

Nota: La tabla muestra la frecuencia de ejecución de las rutinas de mantenimiento propuestas por el fabricante Mercedes Benz para el bus eO500U, se puede identificar que cuenta con actividades adicionales a las generales M como son J y Z, este es un plan general de mantenimiento que no especifica las actividades a ejecutar según frecuencia (Mercedes Benz, s. f.).

Tabla 5

Intervalos de mantenimiento generales del Bus O500U Euro 6

Servicio	1^{er} Servicio	2^{do} Servicio	Servicios Cada
Servicio de Mantenimiento M	20.000 Km	40.000 Km	20.000 Km
Servicio de Mantenimiento Complementario Z2	40.000 Km	80.000 Km	40.000 Km
Ajuste de Válvulas de Motor V3	20.000 Km	80.000 Km	60.000 Km
Cambio de Filtro de Partículas Diésel ZX	120.000 Km	240.000 Km	120.000 Km
Mantenimiento al Sistema de Urea	120.000 Km	240.000 Km	120.000 Km
Servicio Adicional de Mantenimiento J1	60.000 Km	120.000 Km	60.000 Km
Servicio Adicional de Mantenimiento J2	120.000 Km	240.000 Km	120.000 Km
Servicio Adicional de Mantenimiento J3	180.000 Km	360.000 Km	180.000 Km
Cambio de Aceite de Motor M	20.000 Km	40.000 Km	20.000 Km
Cambio de Aceite de Transmisión ZG	60.000 Km	120.000 Km	60.000 Km
Cambio de Aceite del Eje Trasero ZA	40.000 Km	80.000 Km	40.000 Km

Nota: La tabla muestra la frecuencia de ejecución de las rutinas de mantenimiento propuestas por el fabricante Mercedes Benz para el bus O500U Euro 6, se puede identificar que cuenta con un mayor número de actividades adicionales a las generales M como son J, V y Z adicional a contar con un período de ejecución menor en kilómetros para la misma operación, este es un plan general de mantenimiento que no especifica las actividades a ejecutar según frecuencia (Mercedes Benz, s. f.).

La vida útil del motor se conoce comúnmente como el Tiempo Entre Reparaciones (*TBO*, por sus siglas en inglés), que indica la duración operativa antes de que sea necesario un mantenimiento mayor. Aunque los fabricantes suelen determinar una vida útil prevista para cada motor, esta especificación no siempre se divulga al público en general. Se puede esperar que un motor específico, por ejemplo, funcione 50.000 galones de combustible, 10.000 horas o 20 años. La vida útil de los motores no tiene una regla fija, en el pasado era de unos 8 años o 150.000 millas. En la actualidad, debido a los nuevos diseños, la tecnología y los estándares de servicio, ronda alrededor de 200.000 millas o una década (Ohwojero & Wordu, 2025).

Las baterías son el componente fundamental que alimenta al vehículo eléctrico, sin embargo, con el tiempo, el rendimiento de las baterías se deteriora y su capacidad para mantener la carga disminuye. Esto se debe a que la vida útil de la batería con el paso del tiempo se acerca a su límite. El ciclo de vida de la batería es una medida crucial que determina cuánto tiempo puede funcionar de forma óptima una batería recargable antes de experimentar una disminución notable de su rendimiento. El ciclo de vida de la batería se define normalmente como el número de ciclos completos de carga y descarga que puede soportar antes de que su capacidad caiga por debajo de un umbral predeterminado (Li, 2023).

En la Tabla 6 se presentan los valores de reparación/cambio, con base en los datos bibliográficos, para los componentes mayores de un bus:

Tabla 6

Cambio/Reparación promedio de los componentes mayores de un bus

Componente	Cambio/Reparación
Motor Diésel	320.000 Km
Transmisión Automática	200.000 Km
Diferencial	200.000 Km
Batería de Alto Voltaje de Fosfato de Hierro de Litio (LiFePO ₄)	3.000 Ciclos
Batería de Alto Voltaje de Óxido de Litio, Níquel, Cobalto y Manganeso (LiNiCoMnO ₂)	1.400 Ciclos
Batería de Alto Voltaje de Titanato de Litio (Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)	10.000 Ciclos
Batería de Alto Voltaje de Níquel Cromo (NiCr)	1.500 Ciclos

Nota: La tabla muestra los valores promedio para el cambio/reparación de los componentes mayores de un bus a combustión y/o eléctrico con expresión en kilómetros de distancia de operación, con base en datos bibliográficos, la tecnología de la batería de alto voltaje depende de la aplicación del fabricante del chasis (Li, 2023; Zuccari et al., 2024).

El fabricante de la batería de alto voltaje del vehículo eléctrico define su vida útil en ciclos de carga, sin embargo, al contar con la autonomía de duración de un ciclo de carga en kilómetros, es decir desde el 100% hasta el 0%, se puede estimar una duración promedio al aplicar la Ecuación 5, se indica como promedio puesto que los hábitos de conducción, condiciones topográficas de la ciudad y el peso de lastre pueden generar alteraciones en el desempeño de la batería, en cuyo caso, es necesario el asesoramiento para establecer la estrategia de carga y capacitación pertinentes para optimizar el rendimiento en la operación u operaciones.

Ecuación 5

Estimación de la vida útil de una batería de alto voltaje

$$\text{Vida Útil de la Batería de Alto Voltaje (Km)} = \text{Vida Útil (Ciclos)} * \text{Autonomía (Km/Ciclo)}$$

Nota: La ecuación muestra la forma de convertir los ciclos de carga de una batería de alto voltaje a kilómetros de distancia, para determinar la vida útil de esta, lo que permite cuantificar el tiempo de reemplazo óptimo según sea la operación (Battery University, s. f.).

Los términos de operación también tienen en cuenta unas diferencias que de acuerdo con la Ley 1964 de 2019 benefician a los vehículos eléctricos, en la Tabla 7 se presentan los beneficios más representativos para los vehículos de transporte masivo.

Tabla 7

Incentivos para el uso de vehículos eléctricos en Colombia

Ítem	Eléctrico	Diésel
Impuesto	No puede superar el 1% del valor comercial	3.5 – 3.7 % del valor comercial
SOAT	10% de descuento sobre el valor	Sin descuento
RTM	30% de descuento sobre el valor	Sin descuento

Nota: La tabla muestra los valores de descuento vigentes en el año 2025 de acuerdo con la Ley 1964 y sus artículos, los valores de impuesto para los vehículos diésel están sujetos a la ciudad de la matrícula, los descuentos a aplicar sobre la RTM y el SOAT se hacen efectivos en el momento de la compra de cada uno de estos. Elaboración Propia.

Objetivo Cuatro. Comparación

Comparar los modelos económicos de los vehículos de transporte masivo nuevos, uno a combustión y uno eléctrico, bajo un mismo horizonte temporal, con el fin de presentar el costeo integral a lo largo de la vida útil de cada activo.

Los vehículos de nueva energía, como importante desarrollo de productos de la industria automotriz, se convierten en una alternativa a los vehículos convencionales con motor de combustión, en esta categoría los vehículos eléctricos son el tipo más popular en cuanto a grado de industrialización. Los vehículos eléctricos cuentan con las condiciones necesarias para el desarrollo del mercado, como el nivel técnico y el nivel de política macroeconómica. Sin embargo, el alto costo es el problema más crítico que hay que resolver para lograr un desarrollo a escala industrial (Fang, 2015).

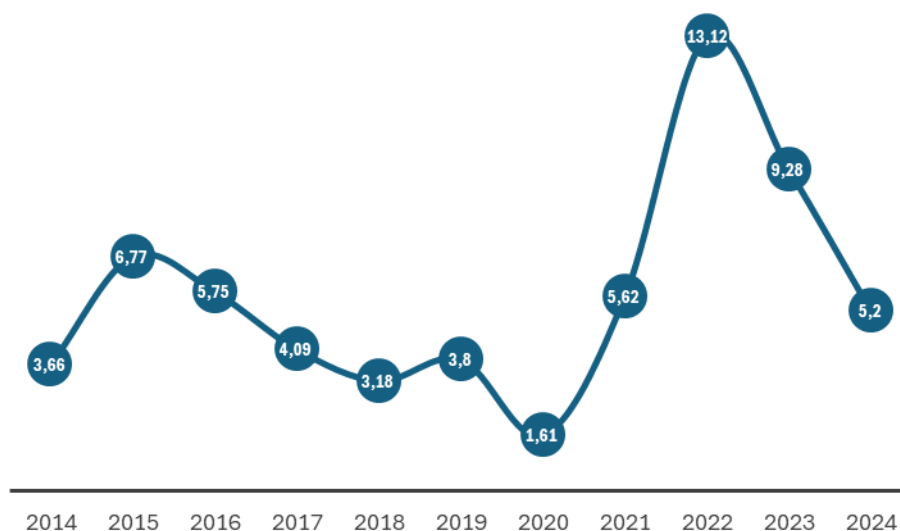
Variación de los Costos

La depreciación es un gasto en que incurre una compañía por el desgaste o deterioro normal por el uso de los activos fijos tangibles en actividades productoras de renta. La depreciación atiende a la necesidad de reconocer racionalmente y en forma sistemática el costo del activo y con ella se logra distribuir el costo del bien durante el tiempo de vida útil con un valor proporcional en el cual se reconoce su desgaste. El artículo 2 del Decreto 3019 de 1989 establece que la vida útil de los activos fijos depreciables como la maquinaria, equipo y bienes muebles es de 10 años (Consejo de Estado, s. f.).

El índice de precios al consumidor (IPC) mide los cambios de precios de los bienes y servicios que conforman la canasta y con esto de los periodos de inflación, en la Imagen 13 se presenta el comportamiento de esta variable.

Imagen 13

Inflación en Colombia en los últimos 10 años



Nota: La imagen presenta la evolución de la situación económica del país con un promedio de 5.64% en los últimos 10 años, para el mes de octubre del año 2025 el valor se sitúa en una media del 4.6% (DANE, s. f.).

El precio del combustible diésel en Colombia en los últimos 10 años cuenta con un incremento constante con fluctuaciones significativas, a pesar de las políticas de subsidios que intentan mantenerlo por debajo de los precios internacionales. Se observa una tendencia ascendente, especialmente en los últimos años, con mayor impulso gracias a la eliminación gradual de subsidios y el aumento en la mezcla de biocombustibles, en la Imagen 14 se muestra una gráfica de aumento del valor del combustible.

Imagen 14

Precios del combustible diésel en Colombia en los últimos 10 años



Nota: La imagen muestra la tendencia de incremento del valor del combustible diésel en la última década, se destaca un valor promedio de COP \$8.665; a partir del año 2017 se implementa el Impuesto Verde como estrategia para desincentivar su uso y mitigar los efectos ambientales (La República, 2024).

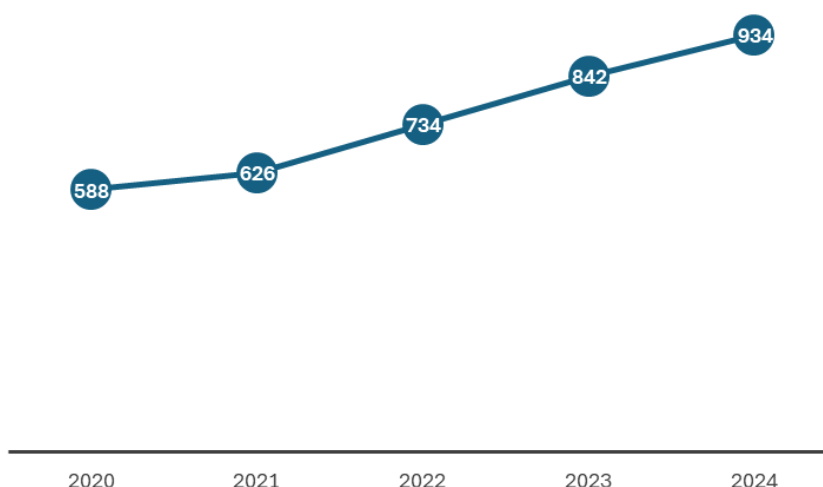
La urea automotriz es una solución al 32,5 % de urea de alta pureza en agua desmineralizada. Se utiliza en vehículos diésel con tecnología de Reducción Catalítica Selectiva (SCR, por sus siglas en inglés) para descomponer los óxidos de nitrógeno (NOx) en nitrógeno (N) y vapor de agua. Este sistema no solo reduce hasta un 90 % los NOx, sino que también contribuye a la reducción de partículas finas y del consumo de combustible en un 2 – 6 % real, según estudios técnicos de Total Energies y la ICCT (PIXEL, 2025).

No existe un registro público del histórico de precios de urea automotriz en Colombia, para el mes de noviembre de 2025 el promedio de costo de 1 Litro de urea automotriz oscila entre los COP \$3.200 a COP \$3.900, según la marca y el distribuidor.

En Colombia el precio de la energía en los últimos cuatro años experimenta un incremento promedio nacional del orden del 12.4%, entre otras como consecuencia del mayor costo de generación, al resistir el fenómeno natural de El Niño, el alza en los precios de los combustibles y la devaluación del peso colombiano frente al dólar, en la Imagen 15 se presenta la variación en el precio del kilovatio (kW) desde el 2020 hasta el 2024 (Ruiz, 2025).

Imagen 15

Costo de la energía (kW/h) en los últimos 5 años en Colombia



Nota: La imagen presenta la variación promedio nacional del precio del kilovatio hora con particular tendencia al alza, como consecuencia de una crisis energética, que impacta de mayor manera a los consumidores finales (Ruiz, 2025).

Comparativo de las Alternativas

La Tabla 8 muestra los parámetros que se vinculan a cada vehículo de forma individual durante el período de proyección de los 15 años propuestos para el análisis. Esta información sirve como punto de inicio para estructurar los principales costos para tener en cuenta en los años posteriores del modelo de presentación, en la Imagen 16 se muestran los vehículos objeto de comparación.

Tabla 8

Datos de ingreso para el modelo LCC

Concepto	Unidad	Valor Alternativa 1	Valor Alternativa 2
Año		2026	2026
Marca		Mercedes Benz	Mercedes Benz
Modelo		eO500U	O500U
Potencia total batería de alto voltaje/motor de combustión	[Kwh - HP]	588	281
Tipo		Eléctrico	Combustión
Costo Chasis	[COP \$]	1.200.000.000	340.000.000
Costo Carrocería	[COP \$]	600.000.000	500.000.000
Costo Matrícula	[COP \$]	800.000	800.000
Autonomía	[Km/kWh - Km/g]	0,8	15
Kilometraje Promedio 1er año	[Km]	81.120	81.120
Costo Mantenimiento Preventivo 1er año	[COP \$]	9.000.000	21.000.000
Costo de Reemplazo de Llantas	[COP \$]	7.200.000	9.000.000
Kilometraje de Reemplazo de Llantas	[Km]	65.000	80.000
Tiempo de Reemplazo Llantas	[Año]	0,8	1,0
Provisión Mantenimiento No Planificado 1er año	[COP \$]	3.000.000	7.000.000
Costo Cambio Motor de Combustión Interna	[COP \$]		100.000.000
Kilometraje de Intervención Motor	[Km]		324.40
Tiempo de Reemplazo Motor de Combustión Interna	[Año]		4
Costo Cambio Caja de Velocidades	[COP \$]		80.000.000
Kilometraje de Intervención Caja de Velocidades	[Km]		243.360
Tiempo de Reemplazo Caja de Velocidades	[Año]		3
Costo Cambio Diferencial	[COP \$]	50.000.000	50.000.000
Kilometraje de Intervención Diferencial	[Km]	243.360	243.360
Tiempo de Reemplazo Diferencial	[Año]	3	3
Costo Cambio Baterías de Alto Voltaje	[COP \$]	396.000.000	
Kilometraje de Intervención Baterías de Alto Voltaje	[Km]	648.960	
Tiempo de Reemplazo Baterías de Alto Voltaje	[Año]	8	

Costo Reparación de carrocería	[COP \$]	15.000.000	15.000.000
Kilometraje de Intervención Carrocería	[Km]	405.600	405.600
Tiempo de Intervención Carrocería	[Año]	5	5
Costo SOAT 1er año	[COP \$]	576.270	640.300
Costo RTM a partir de 2do año	[COP \$]	210.700	301.000
Costo Seguros Contractual y Extracontractual	[COP \$]	20.000.000	20.000.000
Costo Galón de Combustible	[COP \$]		10.800
Costo kW/h de Energía	[COP \$]	958	
Costo Mensual de Combustible/Energía 1er año	[COP \$]	8.787.542	4.212.000
Costo combustible/Energía 1er Año	[COP \$]	105.450.509	50.544.000
Costo Lavado y Limpieza 1er año	[COP \$]	6.240.000	6.240.000
Costo de Salvamento al Final de la Licitación	[COP \$]	120.000.000	56.000.000

Nota: La tabla muestra los parámetros iniciales que configuran el punto de inicio del modelo de proyección para hallar el LCC de cada modelo de vehículo, los valores que tienen vigencia a noviembre 2025 hacen parte de la información disponible en las páginas de internet según la categoría del rubro que corresponde, los costos de seguros dependen en gran medida de la negociación que genere la empresa operadora con la empresa aseguradora, entre las variables que se tiene en cuenta para configurar el valor están: cantidad de vehículos a asegurar, cantidad de pasajeros de los vehículos, tasa de siniestralidad de la empresa y el tipo de operación, entre otras (Raustad & Fairey, 2014).

Imagen 16

Bus eléctrico Mercedes Benz y Bus diésel Mercedes Benz



Nota: La imagen muestra a la izquierda un vehículo eO500U en operación en las calles de Brasil, a la derecha un vehículo O500U en operación en las calles de México, ambos de la marca Mercedes Benz modelos 2025 (FAN BUS, 2024).

La herramienta de cálculo del LCC consta de una plantilla para realizar todos los cálculos necesarios. La información descrita en la Tabla 8 se copia en una hoja de cálculo, donde se realizan los cálculos específicos para cada una de las alternativas. A continuación, los resultados de la simulación se copian en una hoja de cálculo de resultados donde se pueden comparar los datos de los distintos modelos. En la Imagen 17 e Imagen 18 se presentan los resultados de simulación para cada uno de los vehículos vistos en el presente capítulo (Raustad & Fairey, 2014).

La Imagen 19 presenta un comparativo final de la fase de operar/mantener de los dos vehículos propuestos en el presente trabajo de profundización, de manera que se pueda apreciar un comparativo de la tendencia de los costos para los dos vehículos a través de un periodo de tiempo de 15 años.

Imagen 17

Resultados de simulación para un período de operación del bus eléctrico de 15 años

Año	Costo Chasis	Costo Carrocería	Costo Matricula	Costo Mantenimiento Preventivo	Costo Reemplazo de Llantas	Costo Mantenimiento No Planificado	Costo Mantenimiento Mayor	Costo Operación	Valor de Salvamento	Total por Año Escalado a la Inflación	Total por Año en Valor Presente
2025	1.200.000.000	600.000.000	800.000	9.000.000	7.200.000	3.000.000	-	132.266.779	-	151.466.779	151.466.779
2026				9.468.000	7.574.400	3.156.000	-	141.042.760	-	161.241.160	149.021.405
2027				9.960.336	7.968.269	3.320.112	55.335.200	150.641.143	-	227.225.060	194.089.350
2028				10.478.273	8.382.619	3.492.758	-	160.647.628	-	183.001.278	144.468.226
2029				11.023.144	8.818.515	3.674.381	18.371.906	171.326.570	-	213.214.516	155.563.507
2030				11.596.347	9.277.078	3.865.449	64.424.151	182.723.586	-	271.886.610	183.337.589
2031				12.199.357	9.759.486	4.066.452	-	194.887.408	-	220.912.704	137.675.647
2032				12.833.724	10.266.979	4.277.908	564.683.847	207.870.103	-	799.932.561	460.747.036
2033				13.501.077	10.800.862	4.500.359	75.005.986	221.727.297	-	325.535.582	173.292.744
2034				14.203.133	11.362.507	4.734.378	23.671.889	236.518.422	-	290.490.329	142.917.803
2035				14.941.696	11.953.357	4.980.565	-	252.306.976	-	284.182.595	129.218.551
2036				15.718.665	12.574.932	5.239.555	87.325.914	269.160.807	-	390.019.872	163.902.987
2037				16.536.035	13.228.828	5.512.012	-	287.152.407	-	322.429.282	125.229.702
2038				17.395.909	13.916.727	5.798.636	-	306.359.238	-	343.470.511	123.292.048
2039				18.300.496	14.640.397	6.100.165	132.170.251	326.864.067	120.000.000	498.075.377	165.239.329

Nota: La imagen muestra el periodo de simulación propuesto inicialmente para 15 años de licitación, toma como datos de ingreso los propuestos en la Tabla 8, asume un valor promedio de inflación de 5,2%, un valor promedio de descuento de 8,2%, un valor promedio de variación de la energía del 7%, los resultados del Total por Año no contemplan los costos de adquisición ni el valor de salvamento, los resultados del Total por Año en Valor Presente muestran los valores futuros en el presente (Raustad & Fairey, 2014).

Imagen 18

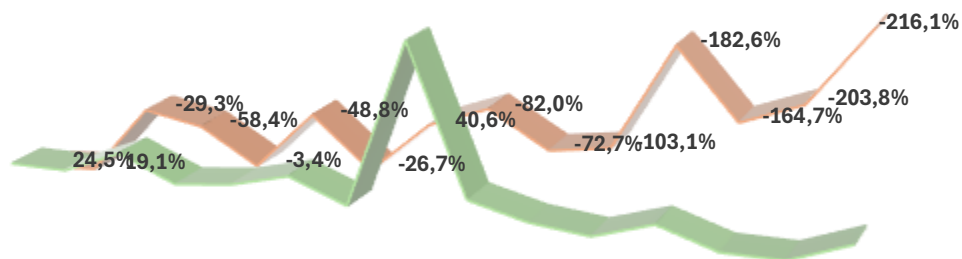
Resultados de simulación para un período de operación del bus diésel de 15 años

Año	Costo Chasis	Costo Carrocería	Costo Matricula	Costo Mantenimiento Preventivo	Costo Reemplazo de Lantas	Costo Mantenimiento No Planificado	Costo Mantenimiento Mayor	Costo Operación	Valor de Salvamento	Total por Año Escalado a la Inflación	Total por Año en Valor Presente
2025	340.000.000	500.000.000	800.000	21.000.000	9.000.000	7.000.000	-	77.424.300	-	114.424.300	114.424.300
2026				22.092.000	9.468.000	7.364.000	-	91.458.076	-	130.382.076	120.500.994
2027				23.240.784	9.960.336	7.746.928	143.871.520	109.056.653	-	293.876.221	251.020.925
2028				24.449.305	10.478.273	8.149.768	116.425.261	130.364.649	-	289.867.257	228.832.328
2029				25.720.669	11.023.144	8.573.556	18.371.906	156.689.924	-	220.379.198	160.790.933
2030				27.058.143	11.596.347	9.019.381	167.502.792	189.270.690	-	404.447.354	272.725.468
2031				28.465.167	12.199.357	9.488.389	-	229.653.880	-	279.806.793	174.379.203
2032				29.945.356	12.833.724	9.981.785	142.596.931	279.772.273	-	475.130.068	273.666.533
2033				31.502.514	13.501.077	10.500.838	195.015.563	342.040.921	-	592.560.913	315.438.657
2034				33.140.645	14.203.133	11.046.882	23.671.889	419.477.660	-	501.540.209	246.751.846
2035				34.863.958	14.941.696	11.621.319	-	515.853.763	-	577.280.738	262.491.025
2036				36.676.884	15.718.665	12.225.628	401.699.207	635.882.240	-	1.102.202.624	463.192.557
2037				38.584.082	16.536.035	12.861.361	-	785.453.218	-	853.434.696	331.469.189
2038				40.590.454	17.395.909	13.530.151	-	971.928.162	-	1.043.444.677	374.554.516
2039				42.701.158	18.300.496	14.233.719	294.841.329	1.204.507.647	56.000.000	1.574.584.350	522.377.280

Nota: La imagen muestra el periodo de simulación propuesto inicialmente para 15 años de licitación, toma como datos de ingreso los propuestos en la Tabla 8, asume un valor promedio de inflación de 5,2%, un valor promedio de descuento de 8,2%, un valor promedio de variación de combustible diésel del 25%, los resultados del Total por Año no contemplan los costos de adquisición ni el valor de salvamento, los resultados del Total por Año en Valor Presente muestran los valores futuros en el presente (Raustad & Fairey, 2014).

Imagen 19

Comparativo de la fase de operar/mantener de los dos modelos de LCC de buses



Nota: La imagen muestra el comportamiento de los costos en la fase de operar/mantener de cada uno de los vehículos propuestos para el análisis del presente trabajo de profundización año a año; se puede apreciar una tendencia al alza en el comportamiento de los costos del vehículo diésel, en color naranja, mientras que en el vehículo eléctrico se observa una tendencia más constante en el comportamiento de los costos, en color verde en la imagen, el pico más alto para el caso del vehículo eléctrico se ve en el año de reposición de las baterías de alto voltaje, con proyección sobre el año 8 (Regulski, 2023).

Objetivo Cinco. Modelo

Proponer un modelo de presentación y costeo del ciclo de vida, que sirva como herramienta de apoyo para la toma de decisiones, orientada a los clientes potenciales interesados en la adquisición de vehículos eléctricos para el transporte masivo de pasajeros.

El modelo de presentación de LCC para la evaluación de viabilidad de las alternativas de inversión, se construye a partir de las variables que se muestran en la Tabla 8 Datos de ingreso para el modelo LCC, el modelo se desarrolla en un documento en Excel y su concepción es principalmente como una herramienta práctica de apoyo para la toma de decisiones estratégicas en procesos de adquisición de vehículos eléctricos para el transporte masivo de pasajeros.

El modelo integra los elementos financieros, técnicos y operativos que se identificaron en los objetivos anteriores y los estructura en una plataforma de cálculo que consolida la información relevante del costo total de propiedad (TCO por sus siglas en inglés) durante los quince años de horizonte de análisis (Lebeau et al., 2013).

Descripción del Modelo

El modelo organiza su funcionamiento a través de tres componentes principales:

- Una hoja de Datos de Ingreso, donde se introducen los parámetros operativos, técnicos y económicos de cada alternativa, se presenta en la Imagen 20;
- Dos hojas de cálculo del LCC para las Alternativas evaluadas, que incorpora el desarrollo de los costos de las rutinas de mantenimiento, los costos de operación, los costos de reparaciones mayores y el valor de salvamento mediante estructuras de flujos descontados, se presentan en la Imagen 21 e Imagen 22;
- Una hoja de Resultados, que consolida los indicadores financieros clave como el Valor Presente Neto (VPN) del ciclo de vida, el Costo Anual Equivalente (CAE), y la distribución de costos por categorías, adicional a un comparativo, donde el modelo presenta gráficas

y tablas de contraste entre ambas tecnologías, entre las que se incluyen el ahorro acumulado, la estructura porcentual de costos y la variación del costo de operación que se proyecta para el período a evaluar, se presenta en la Imagen 23.

El modelo incorpora fórmulas que permiten actualizar automáticamente los cálculos al modificar las variables de ingreso, tales como la tasa de descuento, los precios de combustible y energía, los costos de los mantenimientos preventivos, los costos de reemplazo de las llantas, el valor del chasis y la carrocería y la depreciación anual. Esta flexibilidad permite adaptar el análisis a las condiciones reales de operación de cada cliente, de manera que se garantice la pertinencia de los cálculos finales (Kneifel & Webb, 2020).

El modelo final se presenta como una herramienta estándar y replicable, con dirección a facilitar la argumentación técnica y financiera durante los procesos comerciales y de licitación. La estructura visual y analítica de la plantilla permite exponer de manera clara el comportamiento del costo del ciclo de vida para cada tecnología al mostrar la incidencia de los costos de adquisición, mantenimiento y operación, así como las ventajas económicas que se asocian a la adopción de buses eléctricos. En consecuencia, el modelo constituye un insumo estratégico para la gestión de activos, al fortalecer la toma de decisiones basadas en evidencia económica, sostenibilidad técnica y criterios de valor a largo plazo (Riechi et al., 2017).

Imagen 20

Hoja de datos de ingreso del modelo en Excel

Concepto	Unidad	Datos de Ingreso
Año de simulación		2025
Empresa Operadora		123 S.A.S
Ciudad de Operación		Bogotá
Tiempo de Simulación	[Año]	15
Tasa Promedio de Inflación	[%]	5,2%
Tasa Promedio de Variación del Diésel	[%]	25,0%
Tasa Promedio de Variación de la Energía	[%]	7,0%
Tasa Promedio de Descuento	[%]	8,2%

Concepto	Valor	Unidad
Velocidad media de operación	18	[Km/h]
Horas diarias de servicio	14,5	[Horas]
Autonomía mínima para la operación	260	[Km]
Días de servicio al año	312	[Días]
Tiempo de la licitación	15	[Año]
Kilometraje promedio anual	81.120	[Km]
Kilometraje promedio de a licitación	1.216.800	[Km]

Concepto	Unidad	Eléctrico	Combustión
		Valor Alternativa 1	Valor Alternativa 2
Año		2026	2026
Marca		Mercedes Benz	Mercedes Benz
Modelo		eO500U	O500U
Potencia total batería de alto voltaje/motor de combustión	[Kwh - HP]	588	281
Tipo		Eléctrico	Combustión
Costo Chasis	[COP \$]	1.200.000.000	340.000.000
Costo Carrocería	[COP \$]	600.000.000	500.000.000
Costo Matrícula	[COP \$]	800.000	800.000
Autonomía	[Km/kWh - Km/g]	0,8	15
Kilometraje Promedio 1er año	[Km]	81.120	81.120
Costo Mantenimiento Preventivo 1er año	[COP \$]	9.000.000	21.000.000
Costo de Reemplazo de Llantas	[COP \$]	7.200.000	9.000.000
Kilometraje de Reemplazo de Llantas	[Km]	65.000	80.000
Tiempo de Reemplazo Llantas	[Año]	0,8	1,0
Provisión Mantenimiento No Planificado 1er año	[COP \$]	3.000.000	7.000.000
Costo Cambio Motor de Combustión Interna	[COP \$]		100.000.000
Kilometraje de Intervención Motor	[Km]		324.480
Tiempo de Reemplazo Motor de Combustión Interna	[Año]		4,0
Costo Cambio Caja de Velocidades	[COP \$]		80.000.000
Kilometraje de Intervención Caja de Velocidades	[Km]		243.360
Tiempo de Reemplazo Caja de Velocidades	[Año]		3,0
Costo Cambio Diferencial	[COP \$]	50.000.000	50.000.000
Kilometraje de Intervención Diferencial	[Km]	243.360	243.360
Tiempo de Reemplazo Diferencial	[Año]	3,0	3,0
Costo Cambio Baterías de Alto Voltaje	[COP \$]	396.000.000	
Kilometraje de Intervención Baterías de Alto Voltaje	[Km]	648.960	
Tiempo de Reemplazo Baterías de Alto Voltaje	[Año]	8,0	
Costo Reparación de carrocería	[COP \$]	15.000.000	15.000.000
Kilometraje de Intervención Carrocería	[Km]	405.600	405.600
Tiempo de Intervención Carrocería	[Año]	5,0	5,0
Costo SOAT 1er año	[COP \$]	576.270	640.300
Costo RTM a partir de 2do año	[COP \$]	210.700	301.000
Costo Seguros Contractual y Extracontractual	[COP \$]	20.000.000	20.000.000
Costo Galón de Combustible	[COP \$]		10.800
Costo KW/h de Energía	[COP \$]	958	
Costo Mensual de Combustible/Energía 1er año	[COP \$]	8.787.542	4.212.000
Costo combustible/Energía 1er Año	[COP \$]	105.450.509	50.544.000
Costo Lavado y Limpieza 1er año	[COP \$]	6.240.000	6.240.000
Valor de Salvamento al Final de la Licitación	[COP \$]	120.000.000	56.000.000

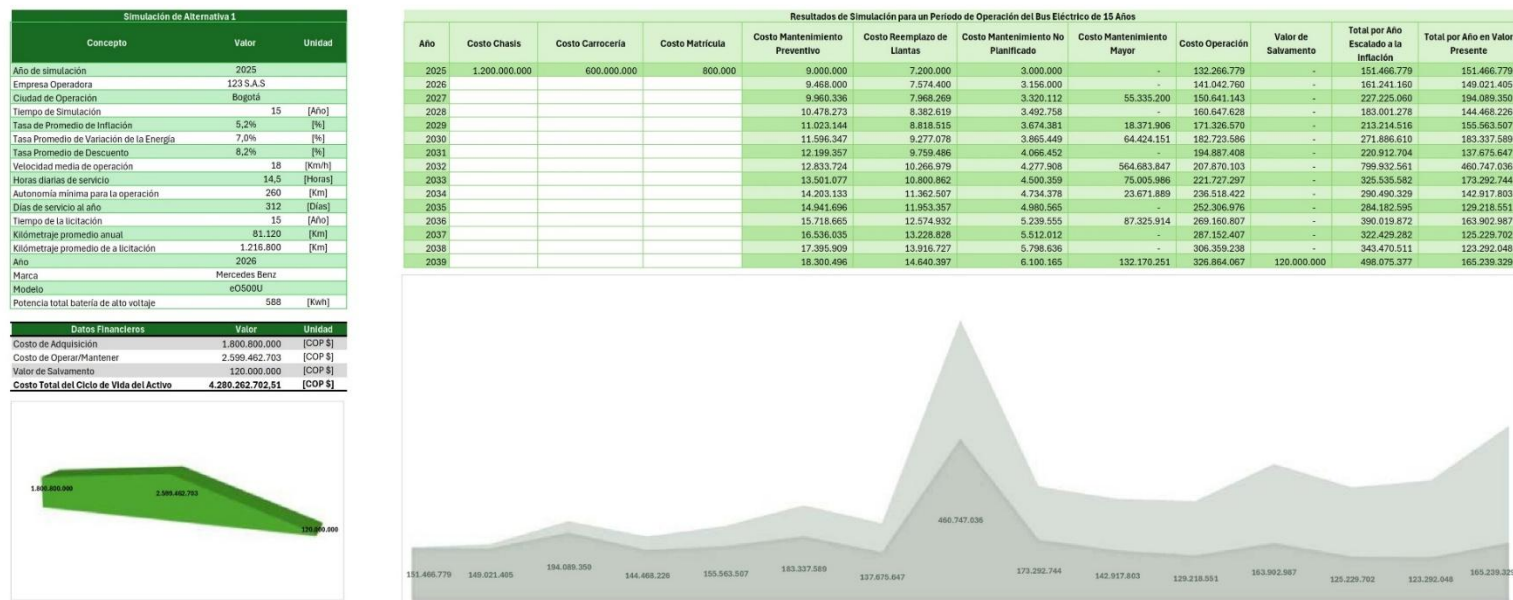
Nota: La imagen muestra el formato inicial de introducción de la información principal para configurar los parámetros de proyección del modelo, en cuanto a costos, tiempo y tasas a usar.

Anexo A. Plantilla de Costeo del Ciclo de Vida (LCC) para Vehículos de Transporte Masivo.

Elaboración Propia.

Imagen 21

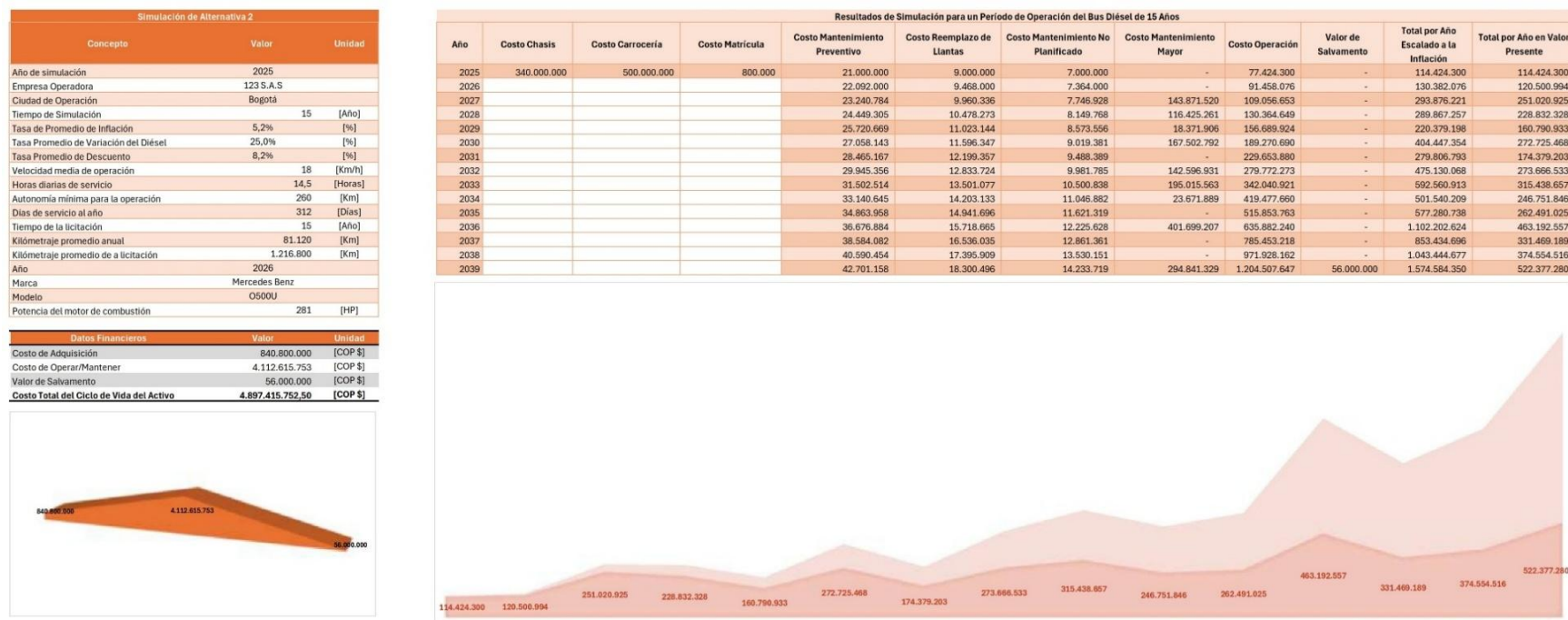
Hoja de datos de alternativa 1 del modelo en Excel



Nota: La imagen muestra el desarrollo del modelo económico para el ciclo de vida de la opción del bus eléctrico, la tabla de datos financieros indica los costos de las tres etapas del ciclo de vida y en la parte inferior el gráfico que corresponde a la tabla, a la derecha se muestra la tabla de datos que se indica en la Imagen 17 Resultados de simulación para un periodo de operación del bus eléctrico de 15 años, en la parte inferior la gráfica comparativa entre el costo del valor presente neto del ciclo de vida y el valor futuro en escala conforme a la tasa de inflación. Anexo A. Plantilla de Costeo del Ciclo de Vida (LCC) para Vehículos de Transporte Masivo. Elaboración Propia.

Imagen 22

Hoja de datos de alternativa 2 del modelo en Excel



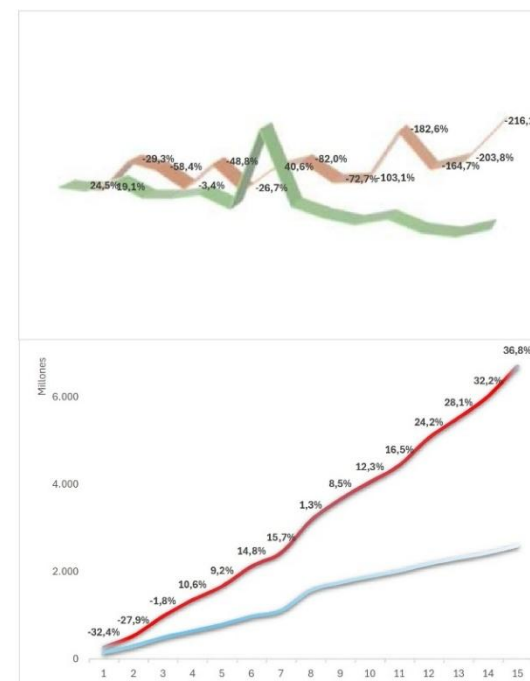
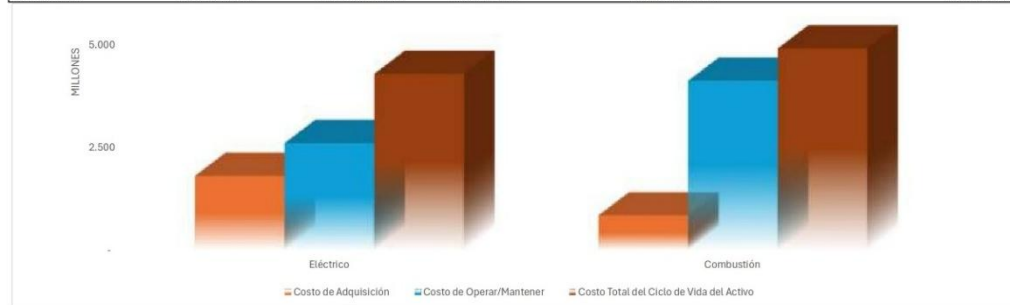
Nota: La imagen muestra el desarrollo del modelo económico para el ciclo de vida de la opción del bus a combustión, la tabla de datos financieros indica los costos de las tres etapas del ciclo de vida y en la parte inferior el gráfico que corresponde a la tabla, a la derecha se muestra la tabla de datos que se indica en la Imagen 18 Resultados de simulación para un periodo de operación del bus diésel de 15 años, en la parte inferior la gráfica comparativa entre el costo del valor presente neto del ciclo de vida y el valor futuro en escala conforme a la tasa de inflación. Elaboración Propia.

Imagen 23

Hoja de datos de resultados del modelo en Excel

Año	Total por Año Bus Eléctrico	Total por Año Bus Diésel	Diésel Vs Eléctrico	Acumulado Bus Eléctrico	Acumulado Bus Diésel	Eléctrico Vs Diésel
2025	151.466.779	114.424.300	24,5%	151.466.779	114.424.300	-32,4%
2026	149.021.405	120.500.994	19,1%	300.488.184	234.925.294	-27,9%
2027	194.089.350	251.020.925	-29,3%	494.577.534	485.946.219	-1,8%
2028	144.468.226	228.832.328	-58,4%	639.045.760	714.778.547	10,6%
2029	155.563.507	160.790.933	-3,4%	794.609.267	875.569.480	9,2%
2030	183.337.589	272.725.468	-48,8%	977.946.857	1.148.294.948	14,8%
2031	137.675.647	174.379.203	-26,7%	1.115.622.504	1.322.674.151	15,7%
2032	460.747.036	273.666.533	40,6%	1.576.369.539	1.596.340.683	1,3%
2033	173.292.744	315.438.657	-82,0%	1.749.662.283	1.911.779.340	8,5%
2034	142.917.803	246.751.846	-72,7%	1.892.580.086	2.158.531.186	12,3%
2035	129.218.551	262.491.025	-103,1%	2.021.798.637	2.421.022.211	16,5%
2036	163.902.987	463.192.557	-182,6%	2.185.701.624	2.884.214.767	24,2%
2037	125.229.702	331.469.189	-164,7%	2.310.931.326	3.215.683.956	28,1%
2038	123.292.048	374.554.516	-203,8%	2.434.223.374	3.590.238.473	32,2%
2039	165.239.329	522.377.280	-216,1%	2.599.462.703	4.112.615.753	36,8%

Alternativa	Costo de Adquisición	Costo de Operar/Mantener	Valor de Salvamento	Costo Total del Ciclo de Vida del Activo	Factor de Anualidad	CAE
Eléctrico	1.800.800.000	2.599.462.703	120.000.000	4.280.262.703	0.12	506.184.467
Combustión	840.800.000	4.112.615.753	56.000.000	4.897.415.753		579.169.073



Nota: La imagen muestra el formato de comparación entre los costos totales y acumulados por año, a la derecha las imágenes que muestran la diferencia de ahorro entre la opción eléctrica y diésel, en la parte inferior una tabla con el TCO, el factor de anualidad y el CAE de cada opción junto con la gráfica que acompaña cada etapa del LCC. Anexo A. Plantilla de Costeo del Ciclo de Vida (LCC) para Vehículos de Transporte Masivo. Elaboración Propia.

Objetivo Seis. Conclusiones

La investigación presenta los resultados y conclusiones del análisis comparativo, con el propósito de ofrecer una visión integral sobre la viabilidad técnica, económica y ambiental de las tecnologías evaluadas.

Conclusión del Objetivo Uno. Fundamentos

El marco conceptual establece los lineamientos teóricos y normativos necesarios para comprender el análisis de costo del ciclo de vida (LCC) como herramienta para la gestión de activos en el transporte masivo de pasajeros.

El estudio demuestra que la integración de las normas ISO 55000:2024, UNE EN 15663:2021 y UNE EN 60300-3-3:2017 proporciona un soporte técnico que permite estructurar los criterios de valor, desempeño, riesgo y costo, de manera coherente con el enfoque de administración del ciclo de vida de los activos.

El análisis evidencia que estas normas no solo definen los principios económicos envueltos, sino que también orientan la forma en que los sistemas de transporte masivo deben evaluar alternativas tecnológicas bajo criterios de sostenibilidad y eficiencia operativa.

El marco teórico confirma que la adopción del LCC en el contexto de buses eléctricos constituye una herramienta estratégica para la toma de decisiones, al ofrecer una visión completa del costo total de propiedad (TCO) y su impacto en el desarrollo de flotas modernas, confiables y en alineación con los objetivos de movilidad sostenible de cada ciudad.

Conclusión del Objetivo Dos. Costos del Ciclo de Vida

La identificación en detalle de los costos establece la estructura económica necesaria para cuantificar el comportamiento financiero de cada alternativa tecnológica a lo largo de su ciclo de vida.

El trabajo reconoce que los sistemas de transporte masivo requieren modelos robustos que integren costos de mantenimiento preventivo, no planificado, reemplazos mayores y operación diaria, además del valor de salvamento al final de la vida útil. El análisis confirma que la precisión en la definición de cada rubro es determinante para obtener resultados coherentes con la realidad operativa de los sistemas integrados de transporte.

El objetivo evidencia que el uso de un horizonte de evaluación de 15 años es consistente con los períodos contractuales de los sistemas de transporte masivo en Colombia, lo cual refuerza la aplicabilidad del modelo y su utilidad para operadores y distribuidores. La estructura de costos demuestra que el LCC es una herramienta fundamental para evaluar tecnologías emergentes, en especial cuando existe interés en determinar la conveniencia económica de soluciones basadas en energías limpias.

Conclusión del Objetivo Tres. Variables Asociadas

El análisis de variables operativas y de mantenimiento demuestra que el comportamiento económico de un bus de transporte masivo depende de manera significativa de las condiciones de operación, la intensidad del servicio, la calidad del mantenimiento y la disponibilidad de infraestructura.

El estudio interpreta que variables como el consumo energético, la degradación de baterías, la frecuencia de reemplazos de componentes mayores y los patrones de desgaste afectan de manera directa el costo total de propiedad y, por tanto, la selección tecnológica.

El objetivo confirma que los vehículos eléctricos presentan ventajas en términos de reducción de costos operativos y menores requerimientos de mantenimiento mecánico, mientras que los vehículos diésel mantienen una mayor dependencia de actividades correctivas y de reemplazos mayores más costosos.

La evaluación concluye que la incorporación de estas variables en el modelo Excel permite obtener proyecciones más realistas y conformes al comportamiento real de los activos, lo que fortalece la precisión del análisis financiero.

Conclusión del Objetivo Cuatro. Comparación

La comparación financiera establece que el modelo de LCC permite evaluar de forma objetiva la conveniencia económica entre un bus diésel y un bus eléctrico bajo un horizonte de 15 años.

El análisis confirma que los vehículos eléctricos, aunque presentan un mayor costo inicial de adquisición, compensan dicha inversión mediante reducciones significativas en los costos de operación y mantenimiento, especialmente en actividades que guardan relación con los sistemas mecánicos tradicionales.

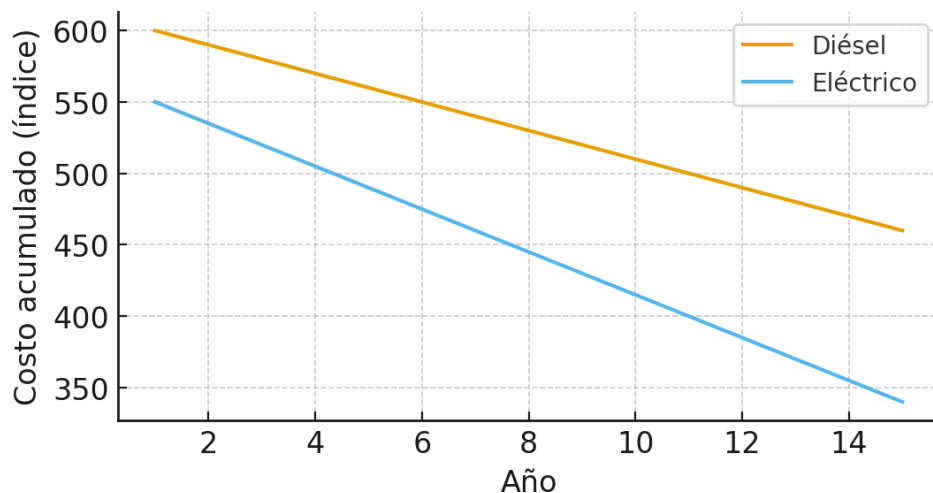
Los resultados del VPN y del CAE indican que el bus eléctrico presenta un costo anual equivalente inferior, lo cual evidencia su mayor competitividad financiera cuando se evalúan los costos totales de propiedad.

La comparación revela que el ahorro acumulado a lo largo del horizonte de evaluación favorece progresivamente la alternativa eléctrica, especialmente debido al menor gasto energético y a la eliminación de componentes de alto desgaste como motor, transmisión o diferencial, la Imagen 24 presenta esta información.

El objetivo concluye que la alternativa eléctrica constituye una opción económicamente viable y estratégica para los sistemas de transporte masivo que buscan reducir costos y mejorar indicadores de sostenibilidad.

Imagen 24

Ahorro acumulado estimado en el horizonte de 15 años



Nota: La imagen muestra un comparativo entre las alternativas que se indican en el modelo de Excel, un bus eléctrico y un bus diésel, deja ver la diferencia que aumenta con el paso del tiempo, lo cual justifica en gran medida la inversión inicial en el bus eléctrico. Elaboración Propia.

Conclusión del Objetivo Cinco. Modelo

El modelo demuestra que la plantilla Excel constituye una herramienta práctica, reproducible y adaptable para la evaluación financiera de alternativas de transporte masivo, la Imagen 25 muestra el proceso general que usa el modelo.

La estructura modular del archivo permite que operadores, distribuidores y autoridades contratantes puedan ajustar parámetros técnicos, operativos y financieros sin alterar la integridad del modelo.

La plantilla integra flujos de caja actualizados, cálculo automático del factor de anualidad, determinación del CAE y del VPN, gráficas comparativas y tablas consolidadas para facilitar la interpretación de los resultados.

Imagen 25*Flujo general del modelo de costeo de ciclo de vida*

Nota: La imagen muestra el proceso general que sigue el modelo en Excel, en el cual, primero se ingresan los datos relevantes para el cálculo, luego el modelo genera el cálculo con proyección de los 15 años y muestra su comportamiento año a año, para finalmente entregar un resultado comparativo entre las alternativas de elección. Elaboración Propia.

El análisis concluye que la herramienta es conveniente para procesos de licitación y toma de decisiones técnicas, ya que permite demostrar de manera cuantitativa el costo total de propiedad de cada alternativa.

El modelo facilita la alineación de decisiones con los principios de la gestión de activos bajo la norma ISO 55000:2024, al garantizar trazabilidad, reproducibilidad y enfoque en el valor para los usuarios finales y para los sistemas de transporte masivo.

Conclusión General del Proyecto

El proyecto confirma que el análisis del costo del ciclo de vida es una metodología robusta y necesaria para evaluar tecnologías de transporte masivo en entornos urbanos que buscan transitar hacia la movilidad sostenible.

El desarrollo del modelo financiero demuestra que los buses eléctricos presentan ventajas competitivas en términos de costos totales, sostenibilidad ambiental y mantenimiento, lo que fortalece su posición como alternativa prioritaria para nuevas flotas.

El estudio establece que el modelo es escalable y que su aplicación vincula a diferentes capacidades vehiculares, rutas y ciudades, lo cual amplía su utilidad para distribuidores, operadores y autoridades del transporte. La investigación concluye que la integración de criterios técnicos, normativos, económicos y de gestión de activos garantiza decisiones más informadas, transparentes y alineadas con el propósito de modernizar el transporte masivo en Colombia.

Descripción de Cómo se Alcanza el Logro de los Objetivos

Logro del Objetivo Uno – Fundamentos

El desarrollo conceptual permite establecer los fundamentos teóricos y normativos necesarios para estructurar el análisis de costo del ciclo de vida (LCC). A través de la revisión de las normas UNE EN 15663:2021, UNE EN 60300-3-3:2017, ISO 55000:2024 y AS/NZS 4536:1999, el trabajo logra definir con claridad los criterios, parámetros y conceptos que guardan relación con la gestión de activos y el comportamiento económico de los vehículos de transporte masivo. Este proceso garantiza una comprensión sólida del marco metodológico y habilita la coherencia técnica requerida para la construcción del modelo de costeo del ciclo de vida.

Logro del Objetivo Dos – Costos del Ciclo de Vida

La identificación dispuesta de los costos permite reconocer los rubros económicos que intervienen en cada etapa del ciclo de vida de los buses diésel y eléctricos. Mediante la aplicación de una metodología sistemática de recolección, organización y cálculo de la información, el trabajo define los costos de adquisición, operación, mantenimiento preventivo, mantenimiento no planificado, mantenimientos mayores y disposición final. Este logro asegura que todos los elementos económicos relevantes hagan parte de la evaluación financiera y que el modelo refleje adecuadamente las dinámicas reales del servicio.

Logro del Objetivo Tres – Variables Asociadas

El análisis preciso de las variables técnicas permite interpretar los factores de operación y mantenimiento que influyen en el comportamiento financiero de cada vehículo, según tipo de propulsión. A través de la identificación de variables como el consumo energético, la degradación de componentes, los patrones de desgaste y las necesidades de mantenimiento mayor, el trabajo incorpora elementos que afectan de manera directa la proyección de los flujos de costos. Este

logro garantiza que el modelo refleje condiciones realistas de operación y fortalece la precisión de las estimaciones económicas.

Logro del Objetivo Cuatro – Comparación

La comparación cuantitativa entre las alternativas propuestas permite evaluar el comportamiento económico diferencial entre un bus diésel y un bus eléctrico a lo largo del horizonte de 15 años. Mediante el cálculo del Valor Presente Neto (VPN), el Costo Anual Equivalente (CAE) y los costos anuales actualizados, el análisis determina con objetividad la conveniencia financiera de cada alternativa tecnológica. Este logro evidencia el impacto positivo de la tecnología eléctrica en términos de reducción de costos de operación y mantenimiento, permitiendo una toma de decisiones informada y con base en indicadores financieros robustos.

Logro del Objetivo Cinco – Modelo

La construcción del modelo de Excel permite materializar una herramienta práctica, adaptable y replicable para la evaluación económica de tecnologías de transporte masivo. A través de la integración de hojas de ingreso de datos, cálculos automáticos del LCC, flujos de costos actualizados, gráficos comparativos y tableros de interpretación, el trabajo fortalece un instrumento que facilita el análisis financiero y la sustentación técnica en procesos de toma de decisiones. Este logro transforma la metodología en una herramienta aplicable en licitaciones, procesos internos y estudios técnicos dentro del sector.

Referencias

- Abbas, A., & Haider, N. (2025). *Life Cycle Assessment of Public Bus Fleets: Comparing Diesel, CNG, and Electric Alternatives in Urban Transport*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19822.52809>
- Ajanovic, A., Glatt, A., & Haas, R. (2021). Prospects and impediments for hydrogen fuel cell buses. *Energy*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121340>
- Asociación Española de Normalización [AENOR]. (2017). *UNE EN 60300-3-3:2017 Gestión de la confiabilidad. Parte 3-3: Guía de aplicación. Cálculo del costo del ciclo de vida*.
- Asset Standards Authority [ASA]. (2018). *T MU AM 01001 ST Life Cycle Costing*.
www.asa.transport.nsw.gov.au
- Australian National Audit Office [ANAO]. (2001). *BETTER PRACTICE GUIDE LIFE - CYCLE COSTING*.
- Australian/New Zealand Standard [AS/NZS]. (1999). *AS/NZS 4536:1999 Life cycle costing - An application guide*.
- Barraza, O., & Estrada, M. (2021). Battery electric bus network: Efficient design and cost comparison of different powertrains. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9).
<https://doi.org/10.3390/su13094745>
- Batista, M., & Bastos, P. (2023). *The Bogotá's business model for deploying electric buses*.
www.ebus.transformative-mobility.org
- Battery University. (s. f.). *Learn About Batterie*. Recuperado 8 de noviembre de 2025, de
<https://batteryuniversity.com/articles>
- Belloni, M., Tarsitano, D., & Sabbioni, E. (2025). A Comprehensive Analysis of Energy Consumption in Battery-Electric Buses Using Experimental Data: Impact of Driver Behavior,

- Route Characteristics, and Environmental Conditions. *Electronics (Switzerland)*, 14(4).
<https://doi.org/10.3390/electronics14040735>
- British Standards Institution [BSI]. (2024). *BSI ISO 55001:2024 Asset management - Asset management system - Requirements*.
- Consejo de Estado. (s. f.). *DEPRECIACION - Concepto / VIDA UTIL DE BIENES DEPRECIABLES*. Recuperado 31 de octubre de 2025, de [https://www.consejodeestado.gov.co/documentos/boletines/PDF/25000-23-27-000-2004-01777-01\(16379\).pdf](https://www.consejodeestado.gov.co/documentos/boletines/PDF/25000-23-27-000-2004-01777-01(16379).pdf)
- Contreras, J. N. (2021). *Planificación, programación y costos del mantenimiento*. La Imprenta Ya SRL.
- Contreras, J. N. (2023). *Gestión de Activos y Mantenimiento: Cómo lograr la alineación total entre mantenimiento y los objetivos de la empresa*. La Imprenta Ya SRL.
- Cooney, G., Hawkins, T. R., & Marriott, J. (2013). Life cycle assessment of diesel and electric public transportation buses. *Journal of Industrial Ecology*, 17(5), 689–699.
<https://doi.org/10.1111/JIEC.12024>
- DANE. (s. f.). *IPC información técnica*. Recuperado 8 de noviembre de 2025, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc/ipc-informacion-tecnica>
- De Clerck, Q., Van Lier, T., Lebeau, P., Messagie, M., Vanhaverbeke, L., Macharis, C., & Van Mierlo, J. (2016). How Total is a Total Cost of Ownership? *World Electric Vehicle Journal*.
- Dhillon, B. S. (2011). Life Cycle Costing for Engineers. *Life Cycle Costing for Engineers*, 1–204.
<https://doi.org/10.1201/9781439816899/LIFE-CYCLE-COSTING-ENGINEERS-DHILLON/RIGHTS-AND-PERMISSIONS>

Divemotor Colombia. (s. f.). Recuperado 17 de septiembre de 2025, de <https://divemotor.com.co/nosotros>

Electromovilidad Kaufmann S.A. (s. f.). *Kaufmann S.A.* Recuperado 19 de septiembre de 2025, de <https://www.kaufmann.cl/electromovilidad>

FAN BUS. (2024, septiembre). *Mercedes Benz expande la electromovilidad en São Paulo con 100 nuevos buses eléctricos eO500U.* FAN BUS. <https://www.fanbus.cl/2024/09/mercedes-benz-expande-la.html>

Fang, J. (2015). Modeling and analysis of life cycle cost for (LCC) battery electric vehicles (BEVs) and conventional combustion engine vehicles. *Chemical Engineering Transactions*, 46, 601–606. <https://doi.org/10.3303/CET1546101>

Fernando, A., Sarango, H., Tecnológico, I., España, S., Ricardo, A.-E. E., Pallmay, C., Paul, J., Sarzosa, R., Elizabeth, J., & Pozo, C. (2024). Tipos y Clasificación de las Investigaciones. *Latam: revista latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, ISSN-e 2789-3855, Vol. 5, Nº. 2, 2024 (Ejemplar dedicado a: LATAM XII; 1 – 13), 5(2), 39. <https://doi.org/10.56712/latam.v5i2.1927>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC]. (2022). *NTC ISO 15686-5:2022 Edificaciones y activos construidos. Planificación de la vida útil. Parte 5: Cálculo del costo del ciclo de vida.*

International Organization of Standardization [ISO]. (2021). *ISO 15663:2021 Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Life cycle costing.*

International Organization of Standardization [ISO]. (2019). *PD ISO/TS 55010:2019 Asset management - Guidance on the alignment of financial and non-financial functions in asset management.*

- International Organization of Standardization [ISO]. (2024). *ISO 55000:2024 Asset management - Vocabulary, overview and principles*.
- Kara, S., Li, W., & Sadjiva, N. (2017). Life Cycle Cost Analysis of Electrical Vehicles in Australia. *Procedia CIRP*, 61, 767–772. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.179>
- Kneifel, J., & Webb, D. (2020). *LIFE CYCLE COSTING MANUAL for the Federal Energy Management Program*. <https://doi.org/10.6028/NIST.HB.135-2020>
- La República. (2024, septiembre). *Precio del galón del diésel se encareció solo \$3.107 a lo largo de los últimos 10 años*. <https://www.larepublica.co/economia/el-precio-del-galon-del-diesel-se-encarecio-solo-3-107-en-los-ultimos-10-anos-3942872>
- Lebeau, K., Lebeau, P., Macharis, C., & Van Mierlo, J. (2013). How expensive are electric vehicles? A total cost of ownership analysis. *World Electric Vehicle Journal*, 6(4), 996–1007. <https://doi.org/10.3390/WEVJ6040996>
- Li, A. (2023, septiembre). *The most comprehensive guide to battery life cycle*. <https://www.huntkeyenergystorage.com/battery-life-cycle/>
- Mercedes Benz. (s. f.). *Manuales de Autobuses & Camiones Mercedes Benz*. Recuperado 30 de octubre de 2025, de <https://www.mercedes-benz-trucks.com.br/onibus/manuais>
- Movilidad ambientalmente sostenible*. (s. f.). Recuperado 15 de septiembre de 2025, de <https://especiales.mintransporte.gov.co/SemanaMovilidadCO/movilidad-ambientalmente-sostenible.php>
- Nova, A., Achmad, F., Ambadar, Z., Ichsan, M., Nabila, G., & Rahman, F. (2020). *Owner Estimate for Urban Bus Services*. www.giz.de
- Ohwojero, C., & Wordu, C. (2025). Effects of Good Lubricants on Engine Performance to Eliminate Frictional Force and Prolonging Engine Life Span. *DELSU Journal of Educational*

Research and Development (DJERD), 22(1), 364–379.
<https://doi.org/10.61448/DJERD22132>

Organ, M., Whitehead, T., & Evans, M. (1997). Availability-based maintenance within an asset management programme. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 3(4), 221–232.
<https://doi.org/10.1108/13552519710176854>

PIXEL. (2025, junio). Urea Automotriz: El Insumo Estratégico para Flotas más Limpias, Eficientes y Competitivas. *CHEM FLUID*. <https://chemfluid.com.co/tendencias-2025-en-insumos-para-transporte/>

Potkány, M., Hlatká, M., Debnár, M., & Hanzl, J. (2018). Comparison of the lifecycle cost structure of electric and diesel buses. *Nase More*, 65(4 Special issue).
<https://doi.org/10.17818/NM/2018/4SI.20>

Raustad, R., & Fairey, P. (2014). *Electric Vehicle Life Cycle Cost Assessment*.

Regulski, P. (2023). Assessment of the life cycle of city buses with diesel and electric drive in the operation phase. *Combustion Engines*, 193(2), 117–121. <https://doi.org/10.19206/CE-162108>

Riechi, J., Máclan, V., Tormos, B., & Avila, C. (2017). Optimal fleet replacement: A case study on a Spanish urban transport fleet. *Journal of the Operational Research Society*, 68(8), 886–894. <https://doi.org/10.1057/s41274-017-0236-1>

Ruiz, L. J. (2025, marzo). Así han crecido las tarifas de energía en los últimos años en Colombia. *Portafolio*. <https://www.portafolio.co/energia/asi-han-crecido-las-tarifas-de-energia-en-los-ultimos-anos-en-colombia-625485>

Sexto, L. F. (2017, julio). *TIPOS DE MANTENIMIENTO ¿CUÁNTOS Y CUÁLES SON?*

<https://es.linkedin.com/pulse/tipos-de-mantenimiento-cu%C3%A1ntos-y-cu%C3%A1les-son-luis-felipe-sexto>

Sheth, A., & Sarkar, D. (2019). Life cycle cost analysis for electric vs diesel bus transit in an Indian scenario. *International Journal of Technology*, 10(1).

<https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i1.1958>

Szumska, E. M., Jurecki, R. S., & Pawelczyk, M. (2020). Life Cycle Cost (LCC) Level of an Urban Transport Fleet with Differentiated Share of Buses with Alternative Drive Systems. *Communications - Scientific letters of the University of Zilina*, 22(3).

<https://doi.org/10.26552/com.c.2020.3.68-77>

Transmilenio S.A. (2024). *Presentación Fase VI, La Nueva Era TRANSMILENIO S.A.*

Vilppo, O., & Markkula, J. (2015). Feasibility of electric buses in public transport. *World Electric Vehicle Journal*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/wevj7030357>

Zuccari, F., Santiangeli, A., Rampini, A., Orecchini, F., & Bocci, E. (2024). Techno-economic analysis of diesel, natural gas, electric and hydrogen buses. *Journal of Physics: Conference Series*, 2893(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2893/1/012105>

Anexos

Anexo A. Plantilla de Costeo del Ciclo de Vida (LCC) para Vehículos de Transporte Masivo

El Anexo A presenta la plantilla en Excel objeto del presente trabajo de profundización para la evaluación financiera de buses diésel y eléctricos mediante la metodología del costo del ciclo de vida (LCC). Esta herramienta permite modificar las variables de entrada y obtener automáticamente los costos actualizados, el VPN, el CAE y las comparaciones entre alternativas.