

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

“Estudio de pre-factibilidad para la electro-conversión de un vehículo de combustión interna
basado en el análisis del ciclo de vida útil”

Informe de Práctica Profesional para optar al título de
Ingeniero en Mantenimiento Industrial, con el grado académico
Licenciatura

Asdrúbal Fabián Chacón Chavarría

Cartago, agosto 2020

Profesor Guía

Ing. Carlos Piedra Santamaría

Asesor Industrial

Ing. Sergio Morales Hernández

Tribunal Examinador

Ing. Rosa Matarrita Chaves

Ing. Julio Morera Hidalgo

Datos personales

Nombre completo: Asdrúbal Fabián Chacón Chavarría.

Número de cédula: 3-0474-0251.

Número de carné: 201135991

Edad: 26 años.

Números de teléfono: 8922-6163.

Correos electrónicos: asdru29@gmail.com

Dirección exacta de domicilio: 75 metros oeste del puente sobre el Río Purires, Tobosi de El Guarco, Cartago.

Datos de la Empresa

Nombre: Tecnológico de Costa Rica.

Actividad Principal: Docencia, investigación y extensión.

Dirección: Cartago, Calle 15, Avenida 14, 1 km Sur de la Basílica de los Ángeles.

Contacto: Ing. Sergio Morales Hernández

Teléfono: -2550-9172

Dedicatoria

A mis padres, que siempre me han brindado su apoyo y confianza para seguir adelante, durante toda mi vida, pero en especial, durante mi etapa universitaria.

A mi novia, por su amor, compañía, apoyo y que siempre me impulsa a seguir adelante en los momentos difíciles.

A mi hermana, por su apoyo y cariño.

Agradecimientos

A mis padres, por brindarme siempre su amor y cariño durante toda mi vida, principalmente, por siempre creer en mí, por sus palabras de apoyo cuando el camino se torna difícil. A mi hermana, por apoyarme siempre y preocuparse por mí.

A mi novia Cintya Navarro, por ser un pilar fundamental en mi vida, por apoyarme siempre, darme palabras de aliento y no dejarme caer en los momentos más difíciles, por creer en mis capacidades, gracias por estar siempre a mi lado durante este largo camino universitario, te amo.

A mis grandes amigos Fabián Cerdas, Sergio Badilla, Luis Rojas, primero por su amistad durante todos los años que compartimos en la universidad, por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento, por estar ahí siempre cuando más los he necesitado, los aprecio mucho.

Al profesor Ing. Carlos Piedra Santamaría, por su incondicional apoyo durante esta etapa culminante de mi carrera, por su valioso aporte para el desarrollo del proyecto.

Al profesor Ing. Sebastián Mata Ortega, por su asesoría durante el desarrollo del proyecto y su total disposición de atender mis consultas siempre.

Al profesor Ing. Sergio Morales Hernández, por su interés en el proyecto y su disposición de evacuar las dudas, que me surgieron.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Electromecánica por su valioso aporte a mi formación académica.

Tabla de contenido

Resumen	xiii
Abstract.....	xiv
Acrónimos	1
Capítulo 1: Introducción.....	2
1.2 Antecedentes.....	3
1.2.1 Antecedentes teóricos.....	3
1.3 Reseña de la empresa.....	5
1.3.1 Misión.....	5
1.3.2 Visión	5
1.4 Planteamiento del problema.....	6
1.5 Objetivo General.....	8
1.6 Objetivos específicos	8
1.7 Justificación	9
1.8 Viabilidad.....	11
1.9 Alcance	11
1.10. Limitaciones.....	11
Capítulo 2. Marco teórico.....	12
2.1 Estudio de prefactibilidad	12
2.1.1 Estudio técnico	13
2.1.2 Estudio legal.....	13
2.2 Análisis del ciclo de vida útil.....	13
2.3 Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050	14
2.4 Matriz energética	14
2.5 Descarbonización de la economía.....	15
2.6 Cambio Climático	15
2.7 Gases de efecto invernadero	15
2.8 Emisiones de gases efecto invernadero.....	16
2.9 Derivados del petróleo	17
2.10 Poder calórico de los combustibles	18

2.11 Vehículo automotor	20
2.11.1 Automóvil.....	20
2.12 Motor de combustión interna.....	20
2.12.1 Motor de diésel.....	20
2.12.2 Motor de gasolina.....	21
2.13 Motor eléctrico.....	22
2.14 Vehículo eléctrico (VE)	23
2.15 Electro-conversión de vehículos	24
2.16 Dinámica longitudinal de vehículos	25
2.16.1 Fuerza aerodinámica	25
2.16.3 Fuerza de rodadura.....	26
2.16.4 Fuerza de pendiente.....	26
2.16.5 Fuerza de inercia	27
2.16.6 Fuerza de tracción	27
2.16.7 Potencia requerida para el movimiento del vehículo	28
2.16.8 Par resistente y motriz.....	29
2.17 Ley No. 9078, Tránsito por Vías Públicas Terrestres y Seguridad Vial.....	30
2.17.1 Artículo 13.- Deber de informar el cambio de las características del vehículo.....	30
2.18 Revisión Técnica Vehicular (RTV)	31
2.19 Derecho de circulación	31
2.20. Ley No. 9518, Incentivos y promoción para el transporte eléctrico.....	31
2.20.1 Artículo 8. Incentivo de Ley.	31
2.20.2 Artículo 11. Exoneración de los repuestos de los vehículos eléctricos.....	32
2.20.3 Artículo 13. Exoneración del impuesto a la propiedad de vehículos para los vehículos eléctricos.....	32
2.20.4 Artículo 14. Restricción vehicular.	32
2.21 Decreto No. 41426-H-MINAE-MOPT. Incentivos para vehículos eléctricos usados. ...	32
2.22 Decreto No. 41092-MINAE-H-MOPT. Reglamento de incentivos para el transporte eléctrico.	33
2.23 Decreto No. No. 41580-MJ-MINAE- MOPT. Reglamento de distintivos para vehículos eléctricos.....	33
Capítulo 3. Metodología.....	34
3.1 Cronograma proyectado.....	36

.....	36
Capítulo 4. Resultados y análisis.....	37
4.1 Análisis de la dinámica longitudinal.....	37
4.1.1 Selección del vehículo donador	37
4.1.2 Velocidad constante en carretera llana.....	39
4.1.3 Aceleración en pendiente máxima	41
4.1.4 Aceleración en carretera llana	42
4.2 Elementos electromecánicos.....	45
4.2.1 Sistema de propulsión eléctrica.....	45
4.2.2 Sistema de energía.....	51
4.2.3 Sistema eléctrico	58
4.2.4 Sistema de instrumentación.....	59
4.2.5 Sistema auxiliar	60
4.2.6 Sistema de frenos	61
4.3 Incentivos y trámites legales para el automóvil electro-convertido.....	63
4.3.1 Incentivos para un automóvil electro-convertido.....	63
4.3.2 Tramitología legal para un automóvil electroconvertido	64
4.4 Estructura de costos del automóvil electro-convertido.....	66
4.4.1 Desarrollo del modelo del Costo de Ciclo de Vida.....	66
4.4.2 Resultados del modelo del ciclo de vida	71
4.5 Rentabilidad económica de la electro-conversión	74
4.5.1 Costo del ciclo de vida considerando una distancia anual recorrida de 10.000 km.	74
4.5.2 Costo del ciclo de vida considerando una distancia anual recorrida de 20.000 km.	82
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	89
Conclusiones.....	89
Recomendaciones	90
Capítulo 6. Bibliografía	91
Apéndices	97
Apéndice 1. Memoria de cálculo análisis dinámico del Nissan Tiida 2011	97
Apéndice 2. Memoria de cálculo análisis dinámico del Toyota Corolla 2009	103
Apéndice 3. Fuerza de tracción, potencia y torque a diferentes velocidades para el escenario de	

aceleración para el Nissan Tiida.	109
Apéndice 4. Fuerza de tracción, potencia y torque a diferentes velocidades para el escenario de aceleración para el Toyota Corolla.	110
Apéndice 5. Torque disponible en las ruedas y velocidad en km/h para el Nissan Tiida.....	111
Apéndice 6. Torque disponible en las ruedas y velocidad en km/h para el Toyota Corolla....	112
Apéndice 7. Memoria de cálculo de aranceles de importación de los requerimientos electromecánicos.....	113
Apéndice 8. Memoria de cálculo de aranceles de importación con exoneraciones de la Ley No. 9518	114
Apéndice 9. Proyección de costos del Derecho de Circulación de cada automóvil	115
Anexos	116
Anexo 1. Ficha Técnica Nissan Tiida 2011	116
Anexo 2. Ficha Técnica Toyota Corolla 2009	117
Anexo 3. Requisitos para el trámite “Cambio de características, cambio de motor”	118
Anexo 4. Requisitos para el trámite “Solicitudes de placas o del Documento de Identificación Adicional por Deterioro”	119

Índice de Tablas

Tabla 1. Factores de emisión para el Dióxido de Carbono (CO ₂).....	16
Tabla 2. Factores de emisión para el Metano (CH ₄).....	17
Tabla 3. Factores de emisión para Óxido Nitroso (N ₂ O).....	17
Tabla 4. Poder calórico de algunos combustibles.....	19
Tabla 5. Densidad para las gasolinas y el diésel.....	19
Tabla 6. Poder calórico por litro de combustible.....	19
Tabla 7. Coeficientes de rodadura para diferentes superficies.	26
Tabla 8. Comparación de la eficiencia del tren motriz para tracción delantera y trasera.....	28
Tabla 9. Metodología por seguir para el desarrollo del proyecto.	34
Tabla 10. Automóviles disponibles para analizar.....	38
Tabla 11. Parámetros relacionados con el movimiento del automóvil a convertir.....	39
Tabla 12. Fuerzas longitudinales que actúan sobre el automóvil analizado en el escenario de velocidad constante en carretera llana.	40
Tabla 13. Potencia, torque, velocidad en las ruedas del vehículo; escenario velocidad máxima.	41
Tabla 14. Fuerzas longitudinales, para el escenario de aceleración en pendiente máxima.	42
Tabla 15. Potencia, torque, velocidad en las ruedas del vehículo; escenario aceleración en pendiente máxima.....	42
Tabla 16. Fuerzas longitudinales en cada automóvil para el escenario de aceleración de 0 a 60 km/h.....	43
Tabla 17. Potencia, torque, velocidad en las ruedas; escenario de aceleración de 0 a 60 km/h... ..	43
Tabla 18. Fuerzas longitudinales para el escenario de aceleración de 60 a 100 km/h.	44
Tabla 19. Potencia, torque, velocidad en las ruedas; escenario de aceleración de 60 a 100 km/h.	44
Tabla 20. Potencia de salida del motor para cada automóvil.	46
Tabla 21. Características del motor eléctrico HPEVS AC-51.....	47
Tabla 22. Comparación de diferentes tecnologías de baterías.....	52
Tabla 23. Características de las diferentes celdas marca CALB posibles a utilizar.	52
Tabla 24. Características técnicas de las celdas seleccionadas.	53
Tabla 25. Características técnicas del paquete de baterías.	55

Tabla 26. Potencia eléctrica demandada a la batería por cada escenario.	55
Tabla 27. Características técnicas del cargador de a bordo seleccionado.	57
Tabla 28. Características técnicas de la bomba de vacío seleccionada.	61
Tabla 29. Componentes necesarios para cada sistema para la conversión del automóvil.	62
Tabla 30. Costos involucrados para la conversión del motor del automóvil.	67
Tabla 31. Costos de operación anuales proyectados para los automóviles Nissan Tiida 2011(EC) y Toyota Corolla 2009(EC).	69
Tabla 32. Costos proyectados de mantenimiento preventivo por distancia recorrida para el Nissan Tiida 2009 y Toyota Corolla 2020.	70
Tabla 33. Estructura de Costos Nissan Tiida (EC).	71
Tabla 34. Estructura de costos Toyota Corolla 2009 (EC).	72
Tabla 35. Costo del ciclo de vida en valor presente para el Nissan Tiida 2011 (EC), Toyota Corolla 2009 (EC), considerando exoneración de impuestos en repuestos.	73
Tabla 36. Costo de cada etapa del ciclo de vida, para los automóviles eléctricos convertidos, con una distancia anual de 10.000 km, considerando los repuestos con impuestos.	73
Tabla 37. Precio de adquisición de los automóviles.	74
Tabla 38. Costo anual por concepto de requerimiento de electricidad para los automóviles eléctricos Hyundai Ioniq 2020, Nissan Leaf 2020 y consumo de combustible para el automóvil de Toyota Corolla 2020 y Nissan Versa 2020.	76
Tabla 39. Costos de operación totales para los automóviles, Hyundai Ioniq 2020 (EV), Nissan Leaf 2020 (VE), Toyota Corolla 2020 (CI), Nissan Versa 2020 (CI) para una distancia anual recorrida de 10.000 km.	76
Tabla 40. Costos de mantenimiento preventivo y correctivo para los automóviles Hyundai Ioniq 2020 (VE), Toyota Corolla 2020 (CI).	77
Tabla 41. Costos de mantenimiento preventivo y correctivo para los automóviles Nissan Leaf 2020 (VE), Nissan Versa 2020 (CI).	78
Tabla 42. Precio de venta, disposición final.	78
Tabla 43. Costo de ciclo de vida, para los automóviles Nissan Tiida 2011 (EC), Nissan Leaf 2020 (VE), Nissan Versa 2020 (CI) para una distancia recorrida anual de 10.000 km	79
Tabla 44. Costos totales de operación y mantenimiento en valor presente para los automóviles de	

la marca Nissan, para una distancia recorrida de 10.000 km anuales.	80
Tabla 45. Costo de ciclo de vida, para el Toyota Corolla y del Hyundai Ioniq.	81
Tabla 46. Costos de operación y mantenimiento en valor presente del Toyota Corolla 2009 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (VE) y Toyota Corolla 2020 (CI).	82
Tabla 47. Costo anual por concepto de requerimiento de electricidad para los automóviles eléctricos y consumo de combustible para el automóvil de combustión interna todos de la marca Nissan.	83
Tabla 48. Costo anual por concepto de requerimiento de electricidad para los automóviles eléctricos Toyota Corolla 2020 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (VE) y consumo de combustible para el Toyota Corolla 2020 (CI) para una distancia anual recorrida de 20.000 km.	83
Tabla 49. Costos de operación totales para los automóviles Toyota Corolla 2009 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (EV), Toyota Corolla 2020 (CI) para una distancia anual recorrida de 20.000 km. ...	84
Tabla 50. Costos de operación totales para los automóviles Nissan Tiida 2011 (EC), Nissan Leaf 2020 (EV), Nissan Versa 2020 (CI), para una distancia anual recorrida de 20.000 km.	84
Tabla 51. Costos de mantenimiento correctivo proyectados para los automóviles con una distancia anual recorrida de 20.000 km.	85
Tabla 52. Costos anuales de mantenimiento preventivo y correctivo proyectados para los automóviles Nissan Tiida 2011 (EC), Nissan Leaf 2020 (EV), Nissan Versa 2020 (CI).	86
Tabla 53. Costos anuales de mantenimiento preventivo y correctivo proyectados para los automóviles Toyota Corolla 2009 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (EV), Toyota Corolla 2020 (CI). .	86
Tabla 54. Valor de desecho para los automóviles Nissan Tiida 2011 (EC), Nissan Leaf 2020 (EV), Nissan Versa 2020 (CI).	87
Tabla 55. Valor de desecho para los automóviles Toyota Corolla 2009 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (EV), Toyota Corolla 2020 (CI).	87
Tabla 56. Costo del ciclo de vida para los automóviles Toyota Corolla 2009 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (EV), Toyota Corolla 2020 (CI), con una distancia anual recorrida de 20.000 km.	88
Tabla 57. Costo del ciclo de vida para los automóviles Nissan Tiida 2009 (EC), Nissan Leaf 2020 (EV), Nissan Versa 2020 (CI), con una distancia anual recorrida de 20.000 km.	88

Índice de figuras

Figura 1. Planteamiento del problema, debiera vs realidad.....	6
Figura 3. Tipos de viabilidad de un proyecto.....	12
Figura 4. Fases del ciclo de vida	14
Figura 5. Diagrama p-V para el ciclo Diésel idealizado.	21
Figura 6. Diagrama p-V para el ciclo Diésel idealizado.	21
Figura 7. Clasificación de los diferentes tipos de vehículos eléctricos.	23
Figura 8. Configuración general vehículo eléctrico.	24
Figura 9. Grado de electrificación de vehículos.....	24
Figura 2. Cronograma proyectado para la realización del proyecto.....	36
Figura 10. Curvas características del motor eléctrico.	47
Figura 11. Conexión del motor eléctrico a la transmisión.....	50
Figura 12. Puerto de carga SAE J1772.....	58
Figura 13. Secuencia de trámites para el automóvil a electro-convertir.	65
Figura 14. Estructura de distribución de costos.....	66

Resumen

En este trabajo se realiza un estudio de pre-factibilidad para electro-conversión de un automóvil sedán cuatro puertas de la Unidad de Transportes del Tecnológico de Costa Rica, basado en el análisis del ciclo de vida útil.

Como primer paso se seleccionan los automóviles a estudiar, se realiza su caracterización técnica para proceder a realizar el análisis dinámico con el cual se establece la potencia requerida en el motor, para tener la capacidad de vencer escenarios de circulación como lo son velocidad máxima en carretera plana, aceleración en pendiente máxima además de aceleración en carretera llana.

Una vez realizado el análisis de la dinámica longitudinal de cada automóvil, se procede a establecer los elementos electromecánicos, para cada sistema, de acuerdo con la nueva configuración del vehículo, los sistemas establecidos corresponden al de la propulsión eléctrica, energía, eléctrico, instrumentación, auxiliar y sistema de frenos.

Se precisan los trámites legales, que se deben realizar para que el automóvil que se desea convertir a eléctrico pueda circular por vía pública, además de analizar los incentivos de los cuales gozaría por ser un vehículo impulsado por energía 100% eléctrica.

Luego se establece la estructura de costos del proyecto, para esto se realiza el análisis del ciclo de vida útil, estableciendo como primer paso la inversión inicial relacionada con repuestos y mano de obra, seguidamente se hacen estimaciones del consumo energético anual y sus costos, además de proyecciones del derecho de circulación y la cuantificación de los gastos por revisión técnica esto para conocer los costos totales de operación, además se estiman los gastos relacionados con mantenimiento preventivo y correctivo.

Finalmente, se determina, la rentabilidad económica de electro-conversión, a través de un modelo comparativo del ciclo de vida, donde se analizan tanto automóviles eléctricos como de combustión para así determinar la mejor opción de inversión.

Palabras clave: estudio de pre-factibilidad, ciclo de vida, electro-conversión.

Abstract

In this work, a pre-feasibility study is carried out for the electro-conversion of a four-door sedan car from the Transport Unit of the Tecnológico de Costa Rica, based on the analysis of the life cycle.

As the first step, the cars to be studied are selected, their technical characterization is carried out to proceed to perform the dynamic analysis with which the required power is established in the electric motor, to have the ability to overcome traffic scenarios such as on a flat road, acceleration on maximum slope and acceleration on flat road.

Once the analysis of the longitudinal dynamics of each car has been carried out, the electromechanical requirements are established, for each system according to the new configuration of the vehicle, the established systems correspond to the electric propulsion, energy, electrical, instrumentation, auxiliary and brake system.

The legal procedures are specified, which must be carried out so that the electro-converted car can circulate on public roads, in addition to analyzing the incentives that it would enjoy for being a vehicle powered by 100% electric energy.

Then the cost structure of the project is established, for this the life cycle analysis is carried out, establishing as a first step the initial investment related to spare parts and labor, then estimates of annual energy consumption and its costs are made, in addition of projections of the right of movement and the quantification of the expenses by technical review, this to know the operating costs, also the expenses related to preventive maintenance and tire replacement are estimated.

Finally, the economic profitability of electro-conversion is determined through a comparative life cycle model, where both electric and combustion cars are analyzed to determine the best investment option.

Key words: prefeasibility study, life cycle, electro-conversion.

Acrónimos

AWG: American Wire Gauge

ARESEP: Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos

CO₂: dióxido de carbono

CVU: ciclo de vida útil

EPA: United States Environmental Protection Agency

GEI: gases efecto invernadero

HPEVS: High Performance Electric Vehicles

JASEC: Junta Administrativa del Servicio Eléctrico Municipal de Cartago

kWh: kilowatt hora

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transporte

RECOPE: Refinadora Costarricense de Petróleo

RITEVE: Revisión Técnica Vehicular

SC: Impuesto Selectivo de Consumo

SOA: Seguro Obligatorio Automotor

Vca: voltaje corriente alterna

Vcd: voltaje corriente directa

VE: vehículo eléctrico

EC: electro-convertido

Capítulo 1: Introducción

Costa Rica, se encuentra comprometido con la reducción de emisiones de gases efecto invernadero provenientes de su economía, esencialmente del sector transporte, por lo que se ha estado promoviendo la movilidad eléctrica en el país, ya que esta modalidad de transporte resulta ser un gran contribuyente para alcanzar la des-carbonización de la economía, debido a que las fuentes de energía para su uso son de carácter renovable.

Debido a la relevancia que tiene la movilidad eléctrica en el país, se realizará el presente proyecto que consiste en un estudio de pre-factibilidad para la electro-conversión de un vehículo de combustión, esto con el fin de generar nuevas fuentes de información, que puedan servir de insumos para futuras investigaciones, mediante las cuales, se pueda ampliar el tema en estudio. Desde el punto de vista profesional mediante este proyecto se busca desarrollar un insumo en lo que se refiere la electro-conversión de vehículos, a través del cual se generarán criterios ingenieriles mediante los cuales se puedan tomar decisiones relacionadas con este campo.

En este proyecto se analizará la viabilidad de la electro-conversión de un vehículo de combustión considerando aspectos técnicos, además de factores legales que puedan condicionar la circulación del vehículo, así como los diferentes beneficios con los que este pueda gozar por ser propulsado mediante energía eléctrica, además del análisis del ciclo de vida del automóvil electro-convertido que permita definir la estructura de costos del proyecto, de esta misma forma se llevará a cabo un análisis económico a través de un modelo comparativo del costo de ciclo de vida y mediante la interpretación de los indicadores para cada opción de automóvil determinar si es viable o no la ejecución del proyecto de conversión.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Antecedentes teóricos

En Costa Rica, el Plan Nacional de Desarrollo 2019- 2022, contempla 5 grandes metas nacionales, una de ellas corresponde a la Des-carbonización, en la cual se tiene como objetivo, lograr una disminución en la tasa de emisiones de dióxido de carbono, según MIDEPLAN (2019), para alcanzar una disminución de las emisiones de CO₂, a un mediano y largo plazo es importante poner en práctica el Plan Nacional de Des-carbonización de Costa Rica, 2018 – 2050. El anterior plan, presenta un área clave para revertir el crecimiento de emisiones de gases efecto invernadero, denominada Transporte y Movilidad sostenible, en su eje número dos, denominado “Transformación de la flota de vehículos ligeros a cero emisiones, nutrido de energía renovable, no de origen fósil”.

En la República de Bulgaria, Koeva et al. (2018), propusieron una serie de cálculos de diseño, para la conversión de vehículos convencionales de combustión interna a eléctricos, estos son utilizados para la selección del motor eléctrico, así como la relación de la caja de transmisión necesaria. Como primer paso se establecieron el peso total del vehículo eléctrico, este fue determinado por el número de asientos de pasajeros a través de la ecuación propuesta. La selección del motor eléctrico a utilizar en la conversión se seleccionó de acuerdo con la velocidad máxima establecida, a través de la fórmula propuesta se calculó la potencia requerida para garantizar el movimiento, ya que, según Koeva et al., (2018), el automóvil convertido deberá ser capaz de moverse con la misma o mejor velocidad y aceleración, que en su versión original.

Según, Vražić et al., (2014), en Croacia los vehículos deben someterse a una prueba de cumplimiento de la normativa en la Agencia de Vehículos Croata, para obtener una licencia para poder circular en la vía pública, esto cuando se realizan cambios sustanciales en el tren de transmisión, tal es el caso de la conversión de un vehículo de combustión a eléctrico.

Según, Helmers & Marx (2014), las eficiencias de las diferentes tecnologías de propulsión puede expresarse mediante indicadores, ya sea por emisiones equivalentes por unidad de distancia recorrida o mediante unidades de energía, según Koeva et al., (2018), la eficiencia energética es información de suma importancia sobre el consumo de electricidad desde la red eléctrica hasta el kilómetro recorrido de carretera. En Alemania, se llevó a cabo un estudio que permitió determinar la eficiencia energética de un vehículo convertido a eléctrico, se obtuvo como resultado que la misma es cuatro veces mayor en comparación con la eficiencia del vehículo con motor de combustión interna.

En Australia, Kara et al., (2017), realizaron un análisis de costo de ciclo de vida través de un modelo comparativo, el objetivo del estudio fue determinar la rentabilidad de la adquisición de un automóvil eléctrico frente a uno de combustión. Los automóviles analizados fueron el Nissan Leaf eléctrico, mientras que el de combustión, elegido, fue un Toyota Corolla. Para el análisis consideraron tres fases principales, que fueron la fase de adquisición, operación y disposición final. Para la primera fase consideraron los costos relacionados con la compra de cada automóvil, además de los cargos por registro, seguro obligatorio de terceros y los denominados impuestos de timbre para ambos, en el caso del eléctrico incluyeron la compra de un cargador nivel 2. Para la operación cuantificaron los costos derivados de la recarga de baterías, consumo de combustible, mantenimiento preventivo excluyeron los costos por reparaciones debido a que estos ocurren de manera inesperada, reemplazo de llantas y seguro. Para la disposición final, consideraron la venta de cada vehículo a un valor de chatarra del 0,3% del precio inicial, excluyendo el motor y el reciclaje de la batería del eléctrico con precio de \$5/kg.

1.3 Reseña de la empresa

El Tecnológico de Costa Rica (TEC) es una institución nacional autónoma de educación superior universitaria, dedicada a la docencia, la investigación y la extensión de la tecnología y las ciencias conexas para el desarrollo de Costa Rica.

1.3.1 Misión

"Contribuir al desarrollo integral del país, mediante formación del recurso humano, la investigación y la extensión; manteniendo el liderazgo científico, tecnológico y técnico, la excelencia académica y el estricto apego a las normas éticas, humanísticas y ambientales, desde una perspectiva universitaria estatal de calidad y competitividad a nivel nacional e internacional" (Tecnológico de Costa Rica, 2019).

Es importante rescatar que dicha misión tiene armonía con los artículos 1 y 3 de la Ley Orgánica por lo que "este lineamiento está basado en la definición sin sobrepasarla, sino que la aclara, enriquece y la actualiza".

1.3.2 Visión

"El Instituto Tecnológico de Costa Rica seguirá contribuyendo mediante la sólida formación del talento humano, el desarrollo de la investigación, la extensión, la acción social y la innovación científico-tecnológica pertinente, la iniciativa emprendedora y la estrecha vinculación con los diferentes actores sociales a la edificación de una sociedad más solidaria e inclusiva; comprometida con la búsqueda de la justicia social, el respeto de los derechos humanos y del ambiente" (Tecnológico de Costa Rica, 2019).

1.4 Planteamiento del problema

En el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2022 se encuentra el área estratégica denominada Infraestructura, Movilidad y Ordenamiento Territorial que propone como intervención, la Descarbonización del Transporte. En él se evidencia que del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidos en el país, el sector de transporte genera un 54% de CO₂ del cual el 41% proviene de los vehículos particulares. Según la meta planteada por el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2022, el país debe reducir las emisiones de GEI para contribuir con la descarbonización del transporte.

Los esfuerzos para alcanzar la reducción en las emisiones deben ir dirigidos hacia los vehículos particulares, ya que son los que mayormente producen GEI en el sector de transporte, una posible solución para reducir las emisiones es la electro-conversión de vehículos de combustión interna específicamente automóviles.

Como se muestra en la figura 1, se identifica la problemática de la no existencia de un estudio con criterio Ingenieril, específicamente desde la perspectiva electromecánica, que evidencie la factibilidad de llevar a cabo electro-conversiones de vehículos en el país.

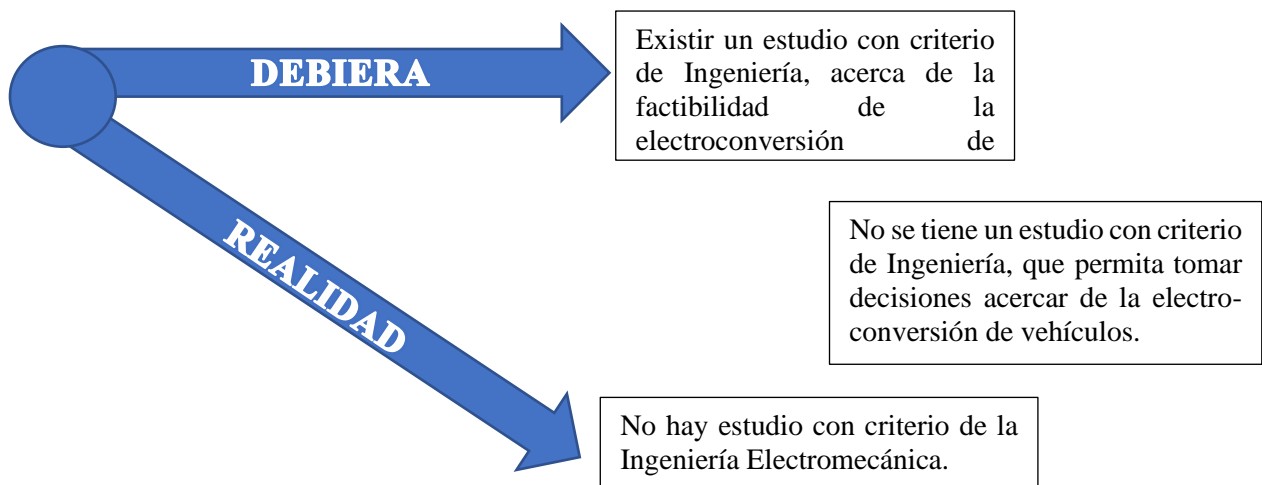


Figura 1. Planteamiento del problema, debiera vs realidad.

Fuente: Elaboración propia, (Word, 2016).

Debido a esto se propone realizar un estudio de pre-factibilidad para la conversión de estos vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos que contribuyan con la des-carbonización del transporte, identificando el impacto que tiene en las siguientes áreas de la sociedad:

- Social: la integración del transporte eléctrico es inclusive un fenómeno social, en el cual se busca concientizar a las personas, acerca de la reducción de emisiones de gases efecto invernadero, que se pueden lograr, emigrando hacia nuevas tecnologías.
- Ambiental: el sector transporte aporta gran cantidad de emisiones, debido a esto resulta conveniente intervenir este sector, para lograr una reducción de emisiones de gases efecto invernadero.
- Financiera: en el ámbito financiero, debido al auge que pueda tomar la movilidad eléctrica en Costa Rica, es importante establecer la estructura de costos de conversión de vehículos convencionales a eléctricos.
- Contemporánea: en esta área la importancia destaca en que se está incursionando en una tecnología emergente, para el cumplimiento de lo establecido tanto en el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2022 como en el Plan Nacional de Des-carbonización 2018-2050.

1.5 Objetivo General

Desarrollar un análisis técnico-económico de la electro-conversión de un vehículo de combustión interna de la Unidad de Transportes del Instituto Tecnológico de Costa Rica de acuerdo al compromiso con el Plan Nacional de Desarrollo y de Des-carbonización utilizando la metodología del Ciclo de Vida Útil (CVU).

1.6 Objetivos específicos

- 1-Definir los elementos electromecánicos para la conversión eléctrica del vehículo de la Unidad de Transportes del Tecnológico de Costa Rica a través de un análisis dinámico con la métrica de kW/kg.
- 2- Precisar la tramitología legal para la conversión eléctrica del vehículo de la Unidad de Transportes del Tecnológico de Costa Rica, basados en los requisitos relacionados con el transporte, establecidos en la Legislación Nacional de Costa Rica.
- 3- Establecer la estructura de costos para electro-conversión del vehículo de la Unidad de Transportes del Tecnológico de Costa Rica, a través de la norma UNE-EN 60300-3-3:2009, utilizando el indicador $\text{€}/\text{km}$.
- 4- Determinar la rentabilidad económica para el proyecto de conversión del vehículo de la Unidad de Transportes del Tecnológico de Costa Rica, a través de un modelo comparativo del costo del ciclo de vida con la métrica de $\text{€}/\text{km}$.

1.7 Justificación

La realización de este proyecto tiene una estrecha relación con el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2022, que dentro del área estratégica de Infraestructura, Movilidad y Ordenamiento Territorial, se propone como una intervención estratégica la Des-carbonización del Transporte, además del Plan Nacional de Des-carbonización 2018-2050, que en su eje número dos denominado “Transformación de la flota de vehículos ligeros a cero emisiones, nutrido de energía renovable, no de origen fósil”, se tiene una visión de transformación que para el año 2035, el 25% de la flota vehicular sea eléctrica.

El sector transporte representa un gran inconveniente para el cumplimiento de los compromisos internacionales asumidos por el país, sobre la reducción de emisiones de gases efecto invernadero, debido a que este sector es el principal emisor de CO₂. Según MINAE (2015), es el responsable del 54% de las emisiones de efecto invernadero del país, con un 41% de la totalidad se tienen a los vehículos particulares como los principales contribuyentes.

Según, Zárate & Ramírez (2016), la matriz energética está basada en los productos derivados del petróleo en alrededor de un 63%, donde su principal uso es en el sector transporte. Menciona MINAE, (2015), que este sector es el responsable del consumo del 66% de hidrocarburos en el país. De acuerdo con Castrillo (2019), las ventas anuales de hidrocarburos por parte de la Refinadora Costarricense de Petróleo para el año 2018, fueron de 3.386.129 m³ con un aumento de un 2% equivalente a 67.655 m³ en comparación con el año anterior, se presenta una tendencia al alza debido al crecimiento del parque automotor costarricense, según Castrillo (2019) la flota vehicular en el año 2018 tuvo un aumento en alrededor de un 5,2%. En ese mismo año, las ventas totales de gasolinas representaron un 38,3%, siendo el producto de más ventas para RECOPE, además se evidencia que el 99% de las ventas de gasolinas se realizaron en estaciones de servicio.

Un factor importante a considerar que conlleva a la realización de este proyecto se debe a que la generación de energía eléctrica en Costa Rica presenta la ventaja de realizarse en un alto porcentaje con fuentes nacionales y renovables, ya que según datos estadísticos del año 2017 el 99,7% de la electricidad se generó a partir de este tipo de fuentes, MINAE (2019), a diferencia de otros países en los cuales la generación eléctrica representa ser otro gran emisor, por lo que en el país se tiene la ventaja, según Utgård (2017) de que no sólo eliminan las emisiones de los tubos de escape, sino que no se producen emisiones indirectas que se producen a lo largo de la cadena de suministro, es por esto que la utilización de tecnología eléctrica en el transporte, tiene un impacto significativo en lo que respecta a esfuerzos por reducir las emisiones de gases efecto invernadero siendo el principal de estos el CO₂.

El análisis por realizar en este proyecto servirá para establecer la viabilidad de la conversión de automóviles convencionales de combustión interna a vehículos eléctricos, considerando aspectos técnicos que establezcan los elementos necesarios para la conversión, desde el punto de vista legal, que permita precisar los requisitos necesarios que determine la Legislación Nacional de Costa Rica para que un auto convertido pueda circular por las vías públicas del país, además de componentes económicos que permitan establecer la rentabilidad de este tipo de conversiones. Los principales beneficiados con este proyecto será el país en general, ya que se contará con un estudio con respaldo ingenieril en este campo, en el cual se pueden generar nuevos modelos de negocio, tal como se menciona en el Plan Nacional de Des-carbonización 2018-2050.

1.8 Viabilidad

La viabilidad del proyecto se puede determinar, considerando la disponibilidad de ciertos recursos, que son de suma importancia para la realización de este, tales como:

- Recursos tecnológicos: se tiene acceso a bases de datos de información, que servirán como insumo teórico para el desarrollo del proyecto, además de herramientas para el desarrollo de tablas, gráficos y cálculos relacionados con el estudio a realizar.
- Recursos humanos: se cuenta con la asesoría del Laboratorio de Investigación en Vehículos Eléctricos del Tecnológico de Costa Rica, que a través de sus conocimientos y recomendaciones pueden contribuir de gran manera en el desarrollo del proyecto.

1.9 Alcance

El alcance del presente proyecto es del tipo exploratorio, ya que se realizará un estudio de pre-factibilidad para la electro-conversión de un automóvil de combustión interna de la Unidad de Transportes del Tecnológico de Costa Rica, con el cual se pretende generar información y a partir de criterios desarrollados desde la perspectiva de la Ingeniería Electromecánica, se pueda establecer un insumo de gran utilidad, que permita determinar la viabilidad de la adopción de estas tecnologías con la cual se puede fomentar la electro-movilidad en el país.

1.10. Limitaciones

Dentro de las limitaciones que se pueden encontrar para el desarrollo del proyecto, es la posible dificultad para la interpretación de las leyes relacionadas con movilidad eléctrica, lo que haría necesario contar con la asesoría de un experto en materia legal. Además, como es una tecnología emergente lo relacionado con conversiones eléctricas de vehículo puede que no se cuenten con empresas distribuidoras de los elementos electromecánicos necesarios para la conversión, lo que dificultaría obtener información.

Capítulo 2. Marco teórico

En el presente capítulo se desarrollan los conceptos teóricos necesarios para comprender el proceso de electro-conversión de un vehículo de combustión interna y su importancia.

2.1 Estudio de pre-factibilidad

Un estudio de pre-factibilidad consiste en un análisis preliminar de una idea de inversión que permite determinar si es viable convertirla en proyecto. El estudio a nivel de pre-factibilidad corresponde a un documento en donde se expone y analiza de manera profunda información relacionada con variables tales como la tecnología, el aspecto legal, el impacto ambiental además de la rentabilidad financiera, cada uno de estos aspectos será evaluado mediante un estudio específico, por lo que de primera entrada se deben plantear las interrogantes que se muestran en la figura 2 para cada una de las variables.

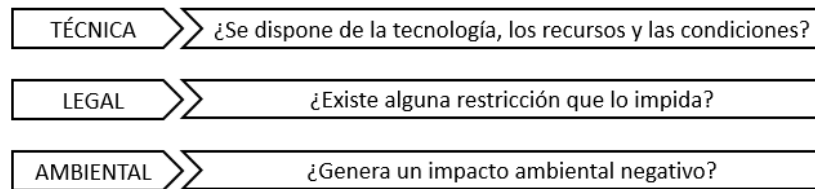


Figura 2. Tipos de viabilidad de un proyecto.

Fuente: Sapag & Sapag (2008).

El estudio de pre-factibilidad presenta mínimos niveles de incertidumbre y facilita la toma de decisiones sobre el proyecto, ya que según Sapag & Sapag (2008), cualquiera de los aspectos que se muestran en la figura 2, llegue a una conclusión negativa determinará que el proyecto no se lleve a cabo.

2.1.1 Estudio técnico

El estudio de viabilidad técnica analiza las posibilidades materiales y físicas para producir el bien que se requiere, además, permite proponer y analizar las diferentes opciones tecnológicas verificando la factibilidad técnica de cada una ellas para lograr la producción del bien requerido. El análisis además identificará los equipos necesarios para el proyecto, y por consiguiente los costos de inversión y capital de trabajo requeridos.

2.1.2 Estudio legal

El estudio de viabilidad legal busca principalmente determinar la existencia de alguna restricción legal a la realización de una inversión en un proyecto como el que se evalúa (Sapag & Sapag, 2008).

Ningún proyecto, por muy rentable que sea, podrá llevarse a cabo sino se encuadra en el marco legal de referencia en el que se encuentran incorporadas las disposiciones particulares que establecen lo que legalmente está aceptado por la sociedad (Sapag & Sapag, 2008).

2.2 Análisis del ciclo de vida útil

El costo de ciclo de vida útil corresponde a la suma de todos los costos de un equipo, desde la adquisición hasta la disposición final del mismo, se calcula con el fin de determinar el costo acumulado del equipo durante su ciclo de vida.

Se puede establecer como objetivo principal del cálculo del costo del ciclo de vida (CCV), el proporcionar criterios para la toma de decisiones en cualquiera o todas las fases de la vida útil del equipo; dentro de las decisiones en las que el CCV, aporta su criterio, es en la valoración de la viabilidad económica de un proyecto, además, menciona Navarro et al., (2015), que el CCV es una herramienta que proporciona la información necesaria para seleccionar los proyectos de inversión más rentables, considerando no solo la inversión inicial.

En la figura 3, se muestran las fases del ciclo de vida, que deben considerarse en el estudio del costo de ciclo de vida.



Figura 3. Fases del ciclo de vida

Fuente: AENOR (2009).

$$LCC = Costo_{adquisición} + Costo_{operación\ y\ mantenimiento} + Costo_{eliminación}$$

2.3 Plan Nacional de Des-carbonización 2018-2050

Mediante el Decreto N° 41561-MP-MINAE dado en la Presidencia de la República de Costa Rica, el 7 de febrero del 2019, se da la Declaratoria de Interés Público y Nacional del Plan de Des-carbonización compromiso del Gobierno del Bicentenario. En este plan se establecen 10 ejes para la des-carbonización, en estos se trazan rutas de cambio en diferentes áreas clave para revertir el crecimiento de emisiones de gases de efecto invernadero. En el área de Transporte y Movilidad Sostenible específicamente en el eje 2 se hace referencia a la Transformación de la flota de vehículos ligeros a cero emisiones, nutrido de energía renovable, no de origen fósil.

2.4 Matriz energética

Según, Zárate & Ramírez (2016), la matriz energética es el conjunto de relaciones cuantitativas que caracterizan la producción, transferencia y consumo de energía en un territorio, en un período determinado. Para el análisis de una matriz energética de un país, región o territorio, se consideran las fuentes de energía, como se consume y los usos que se le dan a esa energía. El consumo total de energía en Costa Rica en el año 2015 fue de 160.181 terajulios, un 16% correspondiente a biomasa, un 21% a electricidad y un 63% asociado a los derivados del petróleo, por esa razón es que la matriz energética se caracteriza por que la principal fuente de energía corresponde a los productos derivados del petróleo y el uso primario corresponde al sector transporte, ya que consumió el 50% de esa energía.

2.5 Des-carbonización de la economía

Según, MINAE, (2019), la des-carbonización de la economía es un esfuerzo por revertir los efectos del cambio climático, mediante la reducción de emisiones de gases efecto invernadero (GEI), a través de la utilización de fuentes de energía limpias y renovables, además de la optimización energética en el uso de estas. La energía eléctrica en Costa Rica es considerada como altamente sostenible, a diferencia del consumo de derivados del petróleo con lo que se tienen altas emisiones de GEI, son finitos y presentan una eficiencia baja.

2.6 Cambio Climático

El cambio climático puede definirse como un cambio en el clima que es atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que ocasiona una alteración en la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad climática natural que ha sido observada durante períodos de tiempo comparables.

El cambio climático, es ocasionado en parte, por la emisión de gases efecto invernadero (GEI), esto se debe a que el clima debe ajustarse al aumento de las concentraciones de GEI, este ajuste generará un cambio en el clima que se verá manifestado como un aumento en la temperatura global, lo que se conoce como calentamiento global.

2.7 Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero son componentes gaseosos de la atmósfera, clasificados en naturales y antropogénicos, es decir, los que son provenientes de la actividad humana. Estos gases son capaces de realizar la absorción de la energía calorífica contenida en las radiaciones de onda larga reflejada por la superficie terrestre.

Dentro de los principales gases de efecto invernadero se encuentran:

- Dióxido de carbono (CO₂), es el segundo gas de mayor relevancia en el calentamiento global después del vapor de agua, se emite principalmente por el consumo de combustibles fósiles.

- Óxido nitroso (N₂O), este gas es emitido durante actividades agrícolas intensivas e industriales, uso de fertilizantes nitrogenados, quema de biomasa y combustibles fósiles.
- Clorofluorocarbonos (CFC), este tipo de compuestos son utilizados como refrigerantes e impulsores en aerosoles.

2.8 Emisiones de gases efecto invernadero

En el sector de la energía se comprenden dos actividades principales con la quema de combustibles: combustión en fuentes estacionarias y en móviles, esta categoría es de interés en este estudio, específicamente a lo que corresponde al transporte terrestre que incluye a los automóviles, en esta actividad se emite óxido nitroso (N₂O), dióxido de carbono (CO₂) que es producto de la oxidación del carbono del combustible durante la combustión, además debido una combustión incompleta se generan pequeñas cantidades de metano (CH₄).

En la siguiente tabla, se muestran los factores de emisión de gases efecto invernadero para los diferentes combustibles.

Tabla 1. Factores de emisión para el Dióxido de Carbono (CO₂).

Combustible	Factor de emisión kg CO ₂ /L combustible	Incertidumbre (%)	
		Límite inferior	Límite superior
Gasolina	2,231	4,59	5,89
Diesel	2,613	3,12	3,19
Bunker	3,101	3,57	3,65
Queroseno	2,541	3,83	4,10
LPG	1,611	8,41	9,16
Gasolina de avión	2,227	7,94	23,50
Jet fuel	2,505	4,68	5,32

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2019).

En la tabla 2, se muestran los factores de emisión del gas metano (CH₄) en el transporte terrestre.

Tabla 2. Factores de emisión para el Metano (CH₄).

Fuente / Combustible	Factor de emisión kg CH ₄ /L combustible	Incertidumbre (%)	
		Límite inferior	Límite superior
Transporte terrestre/gasolina sin catalizador	1,176	74	201
Transporte terrestre/gasolina con catalizador	0,907	74	204
Transporte terrestre/diésel sin catalizador	0,149	62	126

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2019).

En la siguiente tabla 3 se exponen los factores de emisión que corresponden al Óxido Nitroso (N₂O);

Tabla 3. Factores de emisión para Óxido Nitroso (N₂O).

Fuente / Combustible	Factor de emisión kg N ₂ O/L combustible	Incertidumbre (%)	
		Límite inferior	Límite superior
Transporte terrestre/gasolina sin catalizador	0,116	48	204
Transporte terrestre/gasolina con catalizador	0,283	71	173
Transporte terrestre/diésel sin catalizador	0,154	70	175

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2019).

2.9 Derivados del petróleo

En una refinería el petróleo es tratado mediante el proceso de destilación, que es del tipo físico, además de procesos químicos; el mismo es separado en fracciones, que luego de un proceso adicional se tendrán los productos finales para uso cotidiano que son denominados como derivados del petróleo, estos comúnmente son considerados como combustibles fósiles.

A continuación, se muestran los derivados de petróleo que son utilizados como combustibles para uso en el transporte:

- Gasolinas: mezcla volátil de hidrocarburos líquidos, utilizadas en los motores de combustión interna de ignición por chispa. (RECOPE, 2019). En Costa Rica se distribuyen dos tipos de gasolina, la superior que tiene un número de octanos mínimo de 95 RON y es de color rojo; la Plus 91 conocida popularmente como Regular es utilizada en motores de baja a mediana relación de compresión, ya que cumple con número de octanos mínimo de 91.
- Diésel 50: es una mezcla de hidrocarburos líquidos que se obtiene mediante destilación atmosférica fraccionada del petróleo, a una temperatura entre 250°C y 350°C y que se utiliza en los motores de combustión interna de ignición por compresión. Su composición química le confiere un 18% más de energía por unidad de volumen que la gasolina, lo cual, sumado a la mayor eficiencia de los motores Diesel, contribuye a que su rendimiento sea mejor (RECOPE, 2019).

2.10 Poder calórico de los combustibles

El poder calórico de un combustible es la cantidad de energía que se produce en la reacción de combustión. Se expresa en unidades de energía (kJ) por unidades de masa (kg) y varía dependiendo del tipo de combustible.

Según, RECOPE (2017), los valores de calor de combustión no son fijos ya que se hallan en función de diversas variables, tales como el peso molecular, las proporciones en que se encuentran las diversas especies químicas como los alcanos, alquenos, aromáticos, iso-derivados; asimismo, la estereometría tiene su influencia sobre los valores.

En la tabla 4, se muestran los rangos de poder calórico, para diferentes combustibles.

Tabla 4. Poder calórico de algunos combustibles.

Productos	Calor de combustión inferior kilo Joules/kilogramo
Gasolina	43.500 - 47.700
Keroseno	43.100 - 43.200
Diésel	42.600 - 43.200
Búnker	41.282 - 41.900
Gas Licuado de Petróleo (LPG)	46.000 - 50.000

Fuente: RECOPE (2017).

A continuación, se tabulan los datos de densidad tanto para las gasolinas y el diésel, obtenidos por RECOPE (2019), mediante el método ASTM-D4052, que son necesarios para determinar el poder calórico en un litro de combustible.

Tabla 5. Densidad para las gasolinas y el diésel.

Producto	Densidad a 15°C kg/m³		
	Mínimo	Promedio	Máximo
Gasolina Superior (Súper)	731,1	744,4	754,0
Gasolina Plus 91 (Regular)	722,1	736,5	748,9
Diésel 50	802,5	826,2	844,1

Fuente: Elaboración propia, con datos de RECOPE (2019), (Word, 2016).

A continuación, se muestra el poder calórico, tanto para las gasolinas como para el diésel, estos factores, serán utilizados posteriormente, en aspectos energéticos.

Tabla 6. Poder calórico por litro de combustible.

Producto	Poder calórico (kJ/L)
Gasolina Superior (Súper)	33.944,64
Gasolina Plus 91 (Regular)	33.584,40
Diésel 50	35.443,98

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

2.11 Vehículo auto-motor

Vehículo de transporte terrestre con propulsión propia, sobre dos o más ruedas, con la característica que no transite sobre rieles.

2.11.1 Auto-móvil

En el manual de procedimientos para la revisión técnica de vehículos automotores en las estaciones de RTV, se establecen diferentes clasificaciones de vehículos basados en su naturaleza constructiva, en este se define el automóvil, como un vehículo concebido y construido para el transporte de personas y con capacidad hasta nueve plazas, incluido el conductor (Consejo de Seguridad Vial, 2019).

Para los automóviles existe una clasificación que se basa en el tipo de carrocería, una de estas corresponde al tipo sedán 4 puertas, que se define como, vehículo automóvil con acceso a la parte interior por cuatro puertas laterales y con un espacio para portaequipaje, ubicado en la parte trasera o delantera con la característica que desde el interior no se tiene acceso a ese espacio.

2.12 Motor de combustión interna

En los motores de combustión interna, se produce trabajo o energía a partir de la energía química contenida en el combustible, la cual es liberada por la oxidación de este dentro del motor, de ahí el origen de su nombre, existen tanto de diésel como de gasolina.

2.12.1 Motor de diésel

El motor de diésel es denominado como de encendido por compresión, ya que el combustible se enciende cuando es inyectado a una cámara que contiene aire comprimido a una alta presión y temperatura. A continuación, se muestra el ciclo de trabajo de estos motores conocido como el Ciclo de Diésel idealizado.

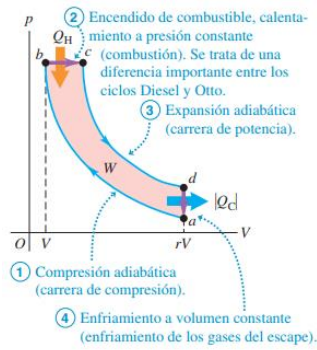


Figura 4. Diagrama p-V para el ciclo Diésel idealizado.

Fuente: Young & Freeman (2009).

En la figura 4, se observan las etapas del Ciclo Diésel, las cuales son las siguientes:

1. a-b, compresión adiabática.
2. b-c, calentamiento a presión constante.
3. c-d, expansión adiabática.
4. d-a, enfriamiento volumen constante.

2.12.2 Motor de gasolina

El motor de gasolina es denominado como de encendido por chispa, ya que al final de la fase de compresión se introduce una chispa por medio de las bujías con el fin de iniciar la combustión. A continuación, se muestra el ciclo de trabajo de estos motores conocido como el Ciclo de Otto.

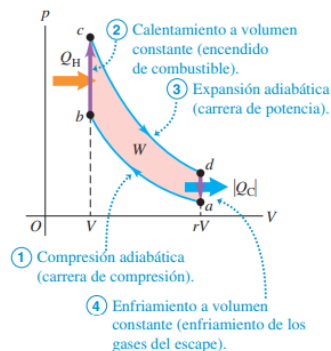


Figura 5. Diagrama p-V para el ciclo Diésel idealizado.

Fuente: Young & Freeman (2009).

En la figura 5, se observan las etapas del Ciclo Otto, en el punto “a”, la mezcla aire-gasolina ya entró en el cilindro, a continuación, se menciona cada una de las etapas:

1. a-b, compresión adiabática.
2. b-c, calentamiento a volumen constante.
3. c-d, expansión adiabática.
4. d-a, enfriamiento a volumen constante.

2.13 Motor eléctrico

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotatorias capaces de transformar la energía eléctrica en energía mecánica.

Los motores eléctricos sin conmutador de corriente alterna, ofrecen una serie de ventajas sobre los motores con conmutador de corriente continua, convencionales para la propulsión eléctrica de vehículos. Actualmente, de acuerdo con Ehsani, et al., (2004) los motores de inducción son una tecnología madura entre las unidades de motor sin conmutador.

En comparación con las unidades de motor de corriente continua, el de motor de inducción de corriente alterna tiene ventajas adicionales como naturaleza liviana, pequeño volumen, bajo costo y alta eficiencia, estas ventajas son particularmente importantes para aplicaciones en vehículos eléctricos.

Existen dos tipos de motores de inducción, de rotor devanado y de jaula de ardilla. Debido al alto costo, la necesidad de mantenimiento y la falta de robustez, los motores de inducción de rotor devanado son menos atractivos que sus contrapartes de jaula de ardilla, especialmente para la propulsión eléctrica en vehículos eléctricos. Por lo tanto, los motores de inducción de jaula de ardilla se denominan libremente como motores de inducción.

2.14 Vehículo eléctrico (VE)

El vehículo eléctrico es aquel basado en uno o varios motores, es decir ya no se basa únicamente en un motor de combustión interna (CI) como el único mecanismo de propulsión, sino que se utiliza un sistema de accionamiento eléctrico como reemplazo o en conjunto para mejorar el rendimiento del vehículo. En la figura 7, se observa la clasificación los diferentes tipos de vehículos eléctricos; es de interés en este trabajo los del tipo enchufable, específicamente, los que son a baterías (BEVs).

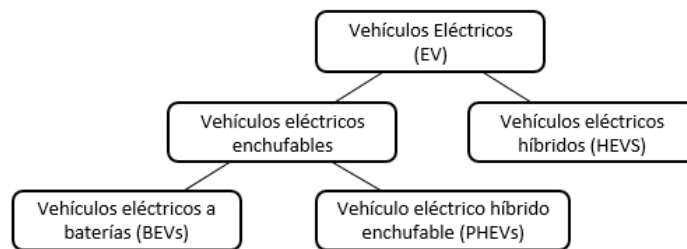


Figura 6. Clasificación de los diferentes tipos de vehículos eléctricos.

Fuente: Elaboración propia, (PowerPoint, 2016).

De acuerdo con Mahmoudi et al., (2014), los vehículos eléctricos a baterías (BEVs) utilizan un motor eléctrico para la propulsión y no tienen motor de combustión, cuentan con un conjunto de baterías que se encargan de suministrar la energía para mover el motor eléctrico de tracción, las baterías se recargan conectando el vehículo a la red de energía eléctrica, a través de un punto de carga. A continuación, se muestra la configuración general de un vehículo eléctrico.

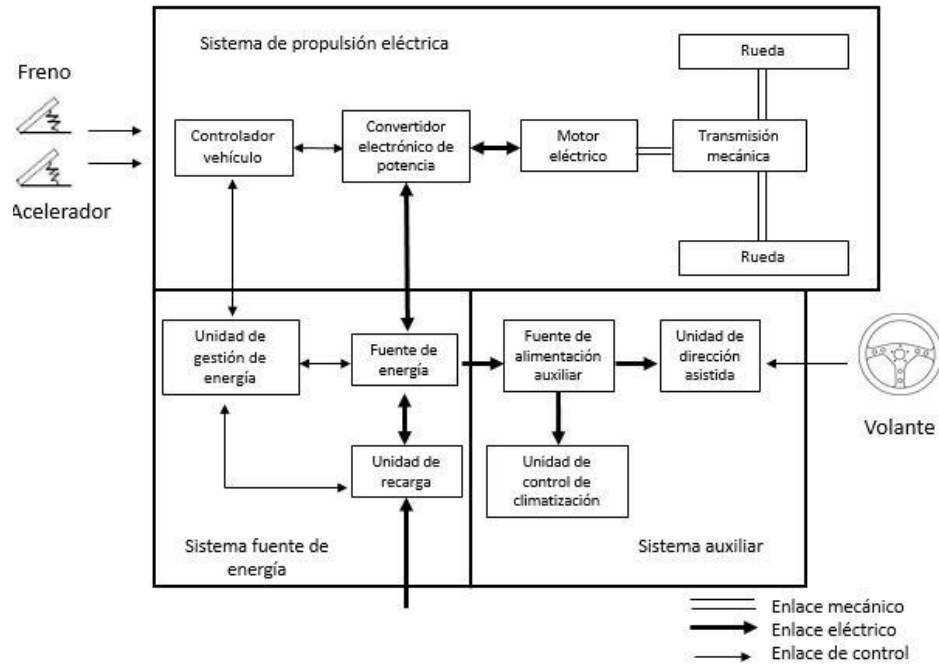


Figura 7. Configuración general vehículo eléctrico.

Fuente: Ehsani et al., (2004).

2.15 Electro-conversión de vehículos

La electro-conversión consiste en la modificación de un vehículo convencional de combustión interna (CI), que según Koeva et al., (2018), es denominado donador, para lograr un vehículo con un grado de electrificación correspondiente a 1, es decir, completamente eléctrico, como se muestra en la figura 8. Para esto se deben eliminar los componentes inherentes al funcionamiento del sistema de combustión interna y adoptar una configuración del vehículo como se muestra en la figura 7.

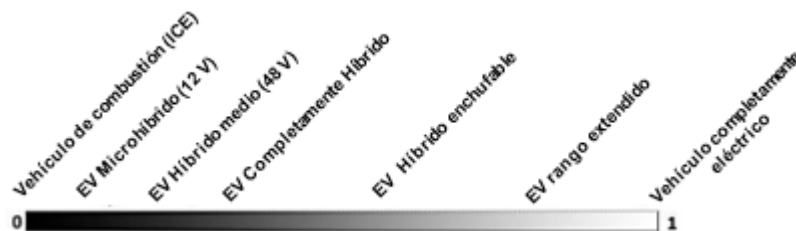


Figura 8. Grado de electrificación de vehículos.

Fuente: Mahmoudi et al., (2014).

2.16 Dinámica longitudinal de vehículos

El modelo de análisis de la dinámica longitudinal del vehículo presenta dos elementos principales que corresponden a la dinámica del vehículo como tal además de la dinámica del sistema de propulsión. La dinámica del vehículo está influenciada por las fuerzas aerodinámicas de arrastre, resistencia a la rodadura y las fuerzas gravitacionales o de pendiente (Rajamani, 2006). Con el análisis este análisis se tiene por objetivo encontrar las características del nuevo sistema motriz.

2.16.1 Fuerza aerodinámica

Es la fuerza que se opone al movimiento de un vehículo, cuando este entra en contacto con el aire. El valor de esta es una función de ciertas características del vehículo, tales como, velocidad (V_a), área frontal (S) y su forma, además de la densidad del aire (ρ), se puede representar como:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot (V_a + V_{aire})^2 \cdot S \quad [N]$$

Se tiene que:

ρ : Densidad del aire [kg/m^3].

C_x : Coeficiente de penetración aerodinámico.

V_a : Velocidad longitudinal del vehículo [m/s].

V_{aire} : Velocidad del aire [m/s].

S : Área frontal efectiva del vehículo [m^2].

Según, Rajamani, (2006) el área frontal efectiva (S) corresponde al 79-84% del área calculada a partir de las dimensiones ancho y alto que presenta el automóvil, por lo que se tiene;

$$S = 0,8 \cdot H_T \cdot A_T \quad [m^2]$$

Se tiene que:

H_T : Alto total del vehículo [m].

A_T : Ancho del vehículo [m].

2.16.3 Fuerza de rodadura

La fuerza de rodadura está relacionada con el efecto resistivo que se genera con la deformación del elemento rodante, es decir, de las llantas del vehículo al estar en contacto con la superficie de apoyo, la carretera.

$$F_r = C_r \cdot m \cdot g \cdot \cos\theta \quad [N]$$

Se tiene que:

C_r : Coeficiente de rodadura.

m : Masa del vehículo [kg].

g : Aceleración de la gravedad [m/s^2].

θ : Ángulo de pendiente [grados].

Tabla 7. Coeficientes de rodadura para diferentes superficies.

Condiciones	Coeficiente de rodadura C_r
Neumáticos de automóvil sobre concreto o asfalto	0,013
Neumáticos de automóvil sobre grava	0,020
Alquitrán	0,025
Carretera sin asfaltar	0,050
Neumáticos sobre hierba	0,10-0,35
Neumáticos de camión sobre hormigón o asfalto	0,006-0,01
Ruedas sobre riel	0,001-0,002

Fuente: Ehsani et al., (2004).

2.16.4 Fuerza de pendiente

Es la fuerza resistiva que se opone al movimiento cuando un vehículo circula por una pendiente, la componente longitudinal del peso es la fuerza que origina la resistencia al movimiento, depende del ángulo de inclinación máximo que se quiera vencer.

$$F_p = m \cdot g \cdot \sen\theta \quad [N]$$

Se tiene que:

m : Masa del vehículo [kg]; g : aceleración de la gravedad [m/s^2]; θ : valor del ángulo de la pendiente [grados].

2.16.5 Fuerza de inercia

La fuerza de inercia se origina cuando se da un cambio en la velocidad del vehículo y es directamente proporcional a la masa de este. Esta fuerza se presentará tanto para cuando se generen aceleraciones como para desaceleraciones.

$$F_{ac} = m \cdot a \quad [N]$$

Se tiene que:

m : Masa del vehículo [kg].

a : Aceleración del automóvil [m/s^2].

Para determinar la aceleración, se toma como referencia el tiempo que tarda el vehículo en alcanzar una velocidad determinada partiendo del reposo.

$$a = \frac{V_f - V_i}{t} \quad [m/s^2]$$

Se tiene que:

V_i : Velocidad inicial [m/s].

V_f : Velocidad final [m/s].

t : Tiempo transcurrido [s].

2.16.6 Fuerza de tracción

La fuerza de tracción se define como la fuerza externa necesaria que debe ser aplicada para alcanzar el movimiento del vehículo, esta proviene de la unidad motriz. La fuerza de tracción considera los efectos de pendiente, rodadura, aerodinámica y los efectos inerciales unidireccionales debidos a la presencia de aceleración.

A partir de la segunda Ley de Newton se relacionan las fuerzas externas que actúan sobre el vehículo;

$$\Sigma F = m \cdot a \quad [N]$$

De la ecuación anterior de obtiene,

$$F_T - F_a - F_r - F_p = m \cdot a \quad [N]$$

Por lo que se determina que la fuerza de tracción corresponde a;

$$F_T = F_a + F_r + F_p + m \cdot a \quad [N]$$

2.16.7 Potencia requerida para el movimiento del vehículo

Las fuerzas resistivas presentes en un vehículo demandarán una potencia total en las ruedas que será función de la velocidad. Una vez calculada la fuerza de tracción la potencia en las ruedas está determinada por:

$$P_{ruedas} = \frac{F_T \cdot V}{1000} \quad [kW]$$

Se tiene que:

F_T : Fuerza de tracción [N].

V : Velocidad del vehículo [m/s].

Para determinar la potencia de la unidad motriz, debe considerarse la eficiencia general del tren motriz de acuerdo con la configuración automotriz del vehículo. En la tabla 8, se muestran las eficiencias generales para cada tipo. La potencia del motor está determinada por:

$$P_{motor} = \frac{P_{ruedas}}{n_T} \quad [kW]$$

Se tiene que:

P_{ruedas} : Potencia a las ruedas [kW]

n_T : Eficiencia de la transmisión.

Tabla 8. Comparación de la eficiencia del tren motriz para tracción delantera y trasera.

Tipo de tren motriz	Transmisión Manual	Árbol de transmisión	Diferencial	Eje diferencial	Eficiencia general
Tracción delantera	0,96	No requerido	0,97	0,98	0,91
Tracción trasera	0,96	0,99	0,97	0,98	0,90

Fuente: Leitman & Bob (2009).

2.16.8 Par resistente y motriz

- Par resistente: el par resistente en las ruedas es generado por la acción de las fuerzas resistivas cuando el vehículo se encuentre en movimiento está determinado por:

$$T_{resistente\ ruedas} = F_T \cdot R_{rueda} \quad [\text{Nm}]$$

Se tiene que:

F_T : Fuerza de tracción total [N].

R_{rueda} : Radio de la rueda del vehículo [m].

El radio de la rueda que como se muestra en la ecuación anterior es necesario para calcular el torque resistente que debe ser vencido para lograr el movimiento del vehículo, para su cálculo es necesario considerar el código de identificación de las llantas.

Por ejemplo, se tienen las ruedas 185/65/R15, el primer término hace referencia al ancho de la llanta y está dada en milímetros, el segundo muestra la relación altura-anchura y la última medida corresponde al diámetro del aro dado en pulgadas. El determina mediante la siguiente ecuación:

$$R_{rueda} = \frac{1}{2} \cdot d_{aro} + h/w \cdot w \quad [m]$$

Se tiene que:

R_{rueda} : Radio de la rueda [m].

d_{aro} : Diámetro del aro [m].

h/w : Relación altura-anchura [%].

w : Ancho de la llanta [m].

- Par motriz: para determinar el par entregado del motor a las ruedas del vehículo, a través del sistema de transmisión, se realiza mediante de la siguiente ecuación:

$$Torque_{ruedas} = Torque_{motor} \cdot i_{fn} \quad [Nm]$$

Se tiene que:

i_{fn} : Relación de transmisión final para cada marcha.

La relación de transmisión final se determina mediante el producto de la relación de transmisión para cada marcha y la relación del diferencial, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$i_{fn} = i_{cm} \cdot i_{dif}$$

2.17 Ley No. 9078, Tránsito por Vías Públicas Terrestres y Seguridad Vial.

Esta ley regula la circulación, por las vías públicas terrestres, de los vehículos y de las personas que intervengan en el sistema de tránsito. Además, regula todo lo relacionado con la seguridad vial, a su financiamiento, al pago de impuestos, multas, derechos de tránsito y lo referente al régimen de la propiedad de los vehículos automotores, tutelado por el Registro Nacional.

2.17.1 Artículo 13.- Deber de informar el cambio de las características del vehículo.

Este artículo establece que cuando se realicen cambios de las características del vehículo, el propietario debe presentarlo ante la entidad que realice la Inspección Técnica Vehicular, esto debe realizarse un plazo no mayor de treinta días hábiles desde el momento en que se ejecuten los cambios, para que estos sean cotejados y se emita la documentación respectiva correspondiente a un Informe de Características, una vez obtenido dicho informe, se debe solicitar ante el Registro Nacional en un plazo no mayor a los veinte días hábiles la inscripción del cambio efectuado en el vehículo.

2.18 Revisión Técnica Vehicular (RTV)

Las revisiones técnicas vehiculares periódicas son requisito obligatorio para la circulación de los vehículos automotores en Costa Rica, consiste en una inspección donde se verifican las condiciones técnico-mecánicas y el control de emisiones de estos. Las revisiones se realizan en las estaciones de RTV a lo largo del país, con una periodicidad de al menos una vez al año para vehículos automotores, en los cuales su año modelo sea superior a 5 años.

Según el decreto No. 30184-MOPT, la revisión técnica de vehículos puede tener diferentes resultados, con base en los defectos detectados durante el proceso de inspección, se tienen los siguientes: favorable cuando no se detecta algún defecto, favorable con defecto leve cuando se detectan solo defectos leves en este caso el vehículo es apto para circular por las vías públicas, desfavorable cuando se detecta algún defecto grave el vehículo no es apto para circular y negativo cuando se detecte algún defecto peligroso.

2.19 Derecho de circulación

El derecho de circulación corresponde al derecho que se obtiene luego de pagar anualmente los rubros fijados por ley para la circulación de vehículos. Estos rubros corresponden a los siguientes: Seguro obligatorio automotor (SOA), impuesto de ventas sobre el SOA, aporte al Consejo de Seguridad Vial, Impuesto a la propiedad de vehículos, aporte al Instituto de Fomento y Ayuda Municipal, timbre de fauna silvestre, Ley 7088 y referencias.

2.20. Ley No. 9518, Incentivos y promoción para el transporte eléctrico

La Ley No. 9518 tiene por objeto crear el marco normativo para regular la promoción del transporte eléctrico en el país y fortalecer las políticas públicas para incentivar su uso dentro del sector público y en la ciudadanía en general.

2.20.1 Artículo 8. Incentivo de Ley.

Con la finalidad de promover el uso del transporte eléctrico, la presente ley establece incentivos de carácter económico y facilidades de uso en circulación, para cada vehículo eléctrico se podrá aplicar la exoneración una única vez, a persona física o jurídica que lo soliciten.

2.20.2 Artículo 11. Exoneración de los repuestos de los vehículos eléctricos.

Este artículo establece que se exoneran del impuesto sobre las ventas y del impuesto selectivo de consumo los repuestos relacionados con el funcionamiento del motor eléctrico y las baterías de los vehículos eléctricos. El Ministerio de Ambiente y Energía en conjunto con el Ministerio de Hacienda, emitirá un reglamento para regular la exoneración de los repuestos.

2.20.3 Artículo 13. Exoneración del impuesto a la propiedad de vehículos para los vehículos eléctricos.

Los vehículos eléctricos estarán exentos del pago del impuesto a la propiedad de vehículos, por un plazo de 5 años desde el momento de su nacionalización o al momento de su producción, para aquellos que sean ensamblados o producidos en el país. La exoneración aplica de la siguiente forma: Año 1: 100%, Año 2: 80%, Año 3: 60%, Año 4: 40%, Año 5: 20%

2.20.4 Artículo 14. Restricción vehicular.

Los vehículos eléctricos que porten el distintivo emitido por el Ministerio de Ambiente y Energía no estarán sujetos a la restricción vehicular de circulación en el área metropolitana definida por el Ministerio de Obras Pública y Transportes.

2.21 Decreto No. 41426-H-MINAE-MOPT. Incentivos para vehículos eléctricos usados.

La Ley No. 9518 del 25 de enero del 2018, estimula y fortalece el uso del transporte eléctrico en Costa Rica como medida para reducir el consumo de combustible fósil del país, la contaminación ambiental, los daños en la salud pública y el gasto en movilidad a los vehículos nuevos, de ahí la necesidad de ampliar algunos de los incentivos a los vehículos usados, mediante el presente decreto.

2.22 Decreto No. 41092-MINAE-H-MOPT. Reglamento de incentivos para el transporte eléctrico.

El presente reglamento tiene por objetivo regular la promoción del transporte eléctrico, e incentivar su uso en el sector público y privado, dentro del territorio nacional, este reglamento hace referencia tanto a los incentivos económicos, entendidos como aquellos que implican la exoneración de impuestos, así mismo se establecen los incentivos no económicos.

2.23 Decreto No. 41580-MJ-MINAE- MOPT. Reglamento de distintivos para vehículos eléctricos.

El presente reglamento tiene por objetivo regular la emisión del distintivo para la identificación de vehículos eléctricos o con tecnologías cero emisiones los que hace referencia la Ley de Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico, para efectos de este reglamento se establece como distintivo de vehículos eléctricos, la matrícula de identificación o placa otorgada por el Registro Nacional.

Capítulo 3. Metodología

A continuación, se muestran las etapas que se ejecutaron para la realización del proyecto, así como sus actividades y objetivos asociados.

Tabla 9. Metodología por seguir para el desarrollo del proyecto.

Objetivo	Actividad	Fuente de Información	Forma de análisis de datos
<p>General</p> <p>Desarrollar un análisis de electro-conversión de un vehículo de combustión interna de la Unidad de Transportes del Instituto Tecnológico de Costa Rica de acuerdo al compromiso con el Plan Nacional de Desarrollo y de Descarbonización utilizando la metodología del Ciclo de Vida Útil (CVU).</p>	<ol style="list-style-type: none"> Determinar aspectos técnicos de la conversión de un vehículo de combustión. Analizar la rentabilidad económica del proyecto mediante indicadores de C/km. 	<ol style="list-style-type: none"> Fuentes bibliográficas. Análisis del ciclo de vida. 	<ol style="list-style-type: none"> Procesamiento analítico de los datos obtenidos.
<p>Específico 1</p> <p>Definir los elementos electromecánicos para electro-conversión del vehículo de la Unidad de Transportes del Instituto Tecnológico de Costa Rica a través de un análisis dinámico con la métrica de kW/kg.</p>	<ol style="list-style-type: none"> Determinar los parámetros constructivos del vehículo. Definir los parámetros de rendimiento del vehículo. Cálculo de la potencia requerida del motor. Selección del motor eléctrico y demás componentes. 	<ol style="list-style-type: none"> Ficha técnica del vehículo. Fuentes Bibliográficas. Catálogos de fabricantes. 	<ol style="list-style-type: none"> Uso de tablas para organizar y analizar los datos.

Objetivo	Actividad	Fuente de Información	Forma de análisis de datos
<p>Específico 2</p> <p>Precisar la tramitología legal de la conversión eléctrica de un automóvil tipo sedán, basado en los requisitos relacionados con el transporte establecido en la Legislación Nacional de Costa Rica.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Determinar los requerimientos mínimos para aprobar la Revisión Técnica Vehicular. 2. Determinar los requerimientos legales para que el vehículo circule legalmente. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. RITEVE. 2. Registro Nacional 4. Ley N°9518. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Análisis de los criterios obtenidos.
<p>Específico 3</p> <p>Establecer la estructura de costos para la electro-conversión del vehículo de la Unidad de Transportes del Tecnológico de Costa Rica, a través de la norma UNE-EN 60300-3-3:2009, utilizando el indicador ₡/km</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Definir los costos relacionados con repuestos. 2. Determinar los costos para cada etapa del ciclo de vida útil. 2. Definir la estructura de costos del proyecto. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Información de proveedores. 2. Norma UNE-EN 60300-3-3:2009. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Uso de tablas para organizar y analizar los datos.
<p>Específico 4</p> <p>Determinar la rentabilidad económica para el proyecto de conversión del vehículo de la Unidad de Transportes del Tecnológico de Costa Rica, a través de un modelo comparativo del costo del ciclo de vida con la métrica de ₡/km.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conocer los precios de venta de automóviles eléctricos y de combustión. 2. Conocer los costos relacionados con mantenimiento preventivo. 3. Conocer los costos de operación. 4. Realizar el modelo comparativo. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Agencias de automóviles. 2. Fuentes bibliográficas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Análisis de indicadores ₡/km obtenidos.

Fuente: Elaboración propia, (Word, 2016).

3.1 Cronograma proyectado

A continuación, se presenta el plan de trabajo con las actividades que serán ejecutadas para la realización del proyecto.

Fecha	10-2-2020	17-2-2020	24-2-2020	2-3-2020	9-3-2020	16-3-2020	23-3-2020	30-3-2020	6-4-2020	20-4-2020	27-4-2020	4-5-2020	11-5-2020	18-5-2020	25-5-2020	1-6-2020
Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Nombre de tarea																
Elaboración de informe escrito	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Objetivo 1																
Parámetros constructivos del vehículo	■	■														
Definir parámetros de rendimiento		■	■													
Cálculo de requerimientos de potencia			■													
Selección del tren de potencia			■	■	■											
Objetivo 2																
Determinar los incentivos						■										
Requerimientos legales para circular						■										
Determinar requerimientos de aprobación RTV							■									
Objetivo 3																
Establecer los costos relacionados con repuestos								■								
Determinar los costos de cada etapa									■	■	■					
Definir la estructura de costos											■	■				
Objetivo 4																
Modelo comparativo													■			

Figura 9. Cronograma proyectado para la realización del proyecto.

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Capítulo 4. Resultados y análisis

En este capítulo se muestran los resultados y análisis para cada uno de los objetivos específicos planteados, a continuación, se explica la estructura de este. En las secciones 4.1 y 4.2 se exponen los resultados y análisis del objetivo específico 1, en cuanto al objetivo 2 se muestran en la sección 4.3, mientras que para los objetivos 3 y 4 los resultados son mostrados y analizados en las secciones 4.4 y 4.5 respectivamente.

4.1 Análisis de la dinámica longitudinal

En esta sección se muestran los resultados del análisis realizado considerando la dinámica longitudinal del automóvil donador seleccionado, se abarcaron tres escenarios posibles, los cuales el vehículo debe ser capaz de superar cuando se enfrente a cada uno de ellos, los cuales corresponden:

- Velocidad constante en carretera llana.
- Aceleración en pendiente máxima.
- Aceleración en carretera llana.

Se establecieron diferentes características de desempeño para cada uno de estos, que serán explicadas más adelante, permitiendo cuantificar tanto los requerimientos de potencia como de torque a las ruedas del automóvil que será suplido a través del motor eléctrico, en la tabla se muestran los parámetros relacionados con el movimiento del vehículo, utilizados en el análisis dinámico.

4.1.1 Selección del vehículo donador

La selección del vehículo se realizó a partir de la lista de vehículos que componen la flotilla vehicular institucional del Campus Tecnológico Central Cartago, proporcionada por Quesada (2020), coordinador de la Unidad de Transportes.

Se realizó la clasificación de los vehículos de acuerdo con su categoría, a partir de esto se determinó que los automóviles componen la mayor parte de la flota, representando un 37,27% del total de vehículos, dentro de esta categoría se tiene que la carrocería predominante dentro de los automóviles corresponde al sedán 4 puertas específicamente un 43,90% de estos, por lo que los vehículos posibles a seleccionar corresponden al tipo antes descrito, además es de importancia mencionar que según Castrillo (2019), el parque automotor costarricense para el año 2018 ascendió a un total de 1.582.667 de vehículos, de estos 976.684 corresponden a automóviles.

Para la selección del automóvil a analizar, primero se realizó una clasificación basada en los años de vida útil, como plantea Contabilidad Nacional (2009), la vida útil de automóviles para uso en empresas corresponde a 10 años. A continuación, se tabulan los automóviles candidatos a analizar.

Tabla 10. Automóviles disponibles para analizar.

Automóviles sedán 4 puertas fuera del ciclo de vida útil					
Marca	Estilo	Combustible	Transmisión	Masa Bruta (kg)	Año
Toyota	Corolla Xli	Gasolina	Manual	1630	2003
Toyota	Corolla Xli	Diésel	Manual	1630	2006
Toyota	Corolla Xli	Diésel	Manual	1630	2008
Mitsubishi	Lancer GLX	Gasolina	Manual	1705	2009
Toyota	Corolla Xli	Diésel	Manual	1695	2009
Automóviles sedán 4 puertas dentro del ciclo de vida útil					
Nissan	Tiida	Gasolina	Manual	1715	2011
Nissan	Sentra	Gasolina	Automática	1716	2014

Fuente: Elaboración propia, (Word 2016).

Para la selección del automóvil es de suma importancia considerar ciertos aspectos, entre ellos el que menciona Koeva et al., (2018), acerca de la caja de cambios original, debido a que esta juega un papel importante en el rendimiento del sistema, por lo que es necesario conservarla, además el autor plantea que las cajas de cambios automáticas no son particularmente adecuadas para las conversiones de electro-movilidad.

Como se observa, en los automóviles clasificados dentro del ciclo de vida útil se tiene el Nissan Sentra con caja de cambios automática, debido a la no conveniencia de ese tipo de transmisión para una conversión, se descartó y se seleccionó el Nissan Tiida con transmisión del tipo manual resultando la más adecuada para este tipo de conversiones.

Por otro lado, los automóviles categorizados fuera del ciclo de vida útil, se tiene que todos cuentan con transmisión manual, para este selecciona el Toyota Corolla Xli, correspondiente al año de fabricación 2009, este vehículo presenta la favorable característica de presentar mayores dimensiones tanto en el maletero como en el compartimiento del motor lo que representa una ventaja para la instalación de los componentes de conversión. En la tabla 11, se muestran los parámetros relacionados con el movimiento de los automóviles seleccionados, considerados en el análisis de la dinámica longitudinal, las características técnicas del Nissan Tiida y Toyota Corolla se exponen en los Anexos 1 y 2, respectivamente.

Tabla 11. Parámetros relacionados con el movimiento del automóvil a convertir.

Parámetro	Automóvil	
	Nissan Tiida	Toyota Corolla
Masa estimada con baterías (kg)	1715	1695
Área Frontal (m ²)	2,11	2,06
Coefficiente aerodinámico Cx	0,31	0,29
Radio de las ruedas (m)	0,31075	0,31725
Aceleración gravedad (m/s ²)	9,81	
Densidad del aire (kg/m ³)	1,225	
Coefficiente de rodadura	0,013	

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

4.1.2 Velocidad constante en carretera llana

Para este escenario se proyectó la circulación del automóvil a una velocidad máxima de 145 km/h, además es importante considerar que dicha velocidad se alcanzará con la máxima ocupación en el vehículo, por lo tanto, se moverá la masa bruta máxima establecida por el fabricante.

Es importante destacar que para este escenario solo tendrán presencia los efectos relacionados con las fuerzas de resistencia a la rodadura y a la aerodinámica, debido a que se considera la circulación sobre carretera llana, lo que indica que el porcentaje de inclinación es del 0% generando cero resistencia a la pendiente, además como la velocidad es constante no se tienen efectos inerciales unidireccionales.

En la tabla 12, se encuentran tabuladas las fuerzas longitudinales que se oponen al movimiento del vehículo, se observa que la fuerza predominante corresponde a la aerodinámica, esto se debe a que según Baranda (2012), este efecto es sumamente preponderante a velocidades superiores a 70 km/h.

Tabla 12. Fuerzas longitudinales que actúan sobre el automóvil analizado en el escenario de velocidad constante en carretera llana.

Fuerza (N)	Símbolo	Automóvil	
		Nissan Tiida 2011	Toyota Corolla 2009
Rodadura	F_r	218,08	207,87
Aerodinámica	F_a	649,93	641,52
Pendiente	F_p	0,00	0,00
Inercial	F_{ac}	0,00	0,00
Tracción	F_T	868,01	849,39

Fuente: Elaboración propia, (Excel 2016).

En la tabla 13, se tabularon los datos de potencia y torque en las ruedas del vehículo, que deben ser vencidos para asegurar el movimiento bajo las condiciones del escenario, como se observa, la exigencia de potencia es mayor para el Nissan Tiida esto se debe principal al efecto de la fuerza aerodinámica, ya que el área frontal es mayor con comparación con la del Toyota Corolla.

Tabla 13. Potencia, torque, velocidad en las ruedas del vehículo; escenario velocidad máxima.

Parámetro	Símbolo	Automóvil	
		Nissan Tiida 2011	Toyota Corolla 2009
Potencia (kW)	P_r	34,96 (46,86 HP)	32,65 (43,77 HP)
Velocidad rueda (R.P.M)	W_r	1237,73	1212,37
Torque (Nm)	T_r	269,73	257,15

Fuente: Elaboración propia, (Excel 2016).

4.1.3 Aceleración en pendiente máxima

Para este escenario, se estableció que el automóvil tenga la capacidad de superar pendientes con una inclinación del 16%, de acuerdo con (Medina, 2020). La velocidad máxima definida que el vehículo pueda alcanzar corresponde a 40 km/h, esto para tener capacidad de adelantamiento, en zonas permitidas, ya que de acuerdo con Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA) (2011), la velocidad de diseño de carreteras con una máxima pendiente del 16% corresponde a 30 km/h, se espera que alcance la velocidad máxima en un tiempo no mayor a 13,5s.

En la tabla 14, se observan las fuerzas longitudinales, que se oponen al movimiento del automóvil cuando este avanza sobre la pendiente, se determinó que el esfuerzo predominante corresponde a la fuerza de pendiente, ya que la componente longitudinal originada por el peso del auto afecta significativamente el avance de este. El menor esfuerzo que tiene efecto sobre al vehículo corresponde a la fuerza aerodinámica, ya que la velocidad a la que avanza es baja.

Tabla 14. Fuerzas longitudinales, para el escenario de aceleración en pendiente máxima.

Fuerza (N)	Símbolo	Automóvil	
		Nissan Tiida 2011	Toyota Corolla 2009
Rodadura	F_r	215,34	213,45
Aerodinámica	F_a	49,46	45,23
Pendiente	F_p	2650,31	2627,06
Inercial	F_{ac}	1407,41	1395,06
Tracción	F_T	4322,51	4280,80

Fuente: Elaboración propia, (Excel 2016).

En la siguiente tabla 15, se muestra la potencia necesaria en las ruedas del automóvil, además del momento resistente que debe ser vencido para superar el presente escenario, como se observa la diferencia de potencias entre cada auto es prácticamente despreciable.

Tabla 15. Potencia, torque, velocidad en las ruedas del vehículo; escenario aceleración en pendiente máxima.

Parámetro	Símbolo	Automóvil	
		Nissan Tiida 2011	Toyota Corolla 2009
Potencia (kW)	P_r	48,03 (64,38 HP)	47,56 (63,76 HP)
Velocidad rueda (R.P.M)	W_r	341,44	334,45
Torque (Nm)	T_r	1343,22	1358,08

Fuente: Elaboración propia, (Excel 2016).

4.1.4 Aceleración en carretera llana

Para este escenario se establecieron ciertas características de desempeño, que el automóvil debe ser capaz de entregar, se pretende alcanzar una velocidad de 0 km/h a 60 km/h en 7,49 s y de 60 km/h a 100 km/h en 9,57 s, además de acuerdo con Baranda (2012), para este escenario el vehículo debe ir lo más ligero posible, por lo que se estableció la masa en vacío del auto convertido más la masa del conductor que se estima en alrededor de 80 kg.

- Aceleración de 0 km/h a 60 km/h; en la tabla 16, se muestran las fuerzas longitudinales que proporcionan resistencia al movimiento del vehículo, como se observa la mayor fuerza resistiva presente en esta condición es debida a la inercia, ocasionada por el cambio de velocidad.

Tabla 16. Fuerzas longitudinales en cada automóvil para el escenario de aceleración de 0 a 60 km/h

Fuerza (N)	Símbolo	Automóvil	
		Nissan Tiida 2011	Toyota Corolla 2009
Rodadura	F_r	164,53	176,75
Aerodinámica	F_a	111,28	101,78
Pendiente	F_p	0,00	0,00
Inercial	F_{ac}	2870,84	3084,07
Tracción	F_T	3146,66	3362,60

Fuente: Elaboración propia, (Excel 2016).

En la tabla 17, se muestra la potencia necesaria en las ruedas del automóvil, además del momento resistente que debe ser vencido para superar el presente escenario, de los datos mostrados se observa que la potencia es mayor para el Toyota esto se debe a que su masa en vacío es mayor que para el Nissan.

Tabla 17. Potencia, torque, velocidad en las ruedas; escenario de aceleración de 0 a 60 km/h.

Parámetro	Símbolo	Automóvil	
		Nissan Tiida 2011	Toyota Corolla 2009
Potencia (kW)	P_r	52,44 (70,30 HP)	56,04 (75,13 HP)
Velocidad rueda (R.P.M)	W_r	512,16	501,67
Torque (Nm)	T_r	977,82	1066,78

Fuente: Elaboración propia, (Excel 2016).

- Aceleración de 60 a 100 km/h; en la siguiente tabla se muestran las fuerzas longitudinales, que proporcionan resistencia al movimiento del vehículo, como se observa la mayor fuerza resistiva presente en esta condición es debida a la inercia, ocasionada por el cambio de velocidad.

Tabla 18. Fuerzas longitudinales para el escenario de aceleración de 60 a 100 km/h.

Fuerza (N)	Símbolo	Automóvil	
		Nissan Tiida 2011	Toyota Corolla 2009
Rodadura	F_r	164,53	176,75
Aerodinámica	F_a	309,12	282,71
Pendiente	F_p	0,00	0,00
Inercial	F_{ac}	1497,92	1609,17
Tracción	F_T	1971,57	2068,64

Fuente: Elaboración propia, (Excel 2016).

En la tabla 19, se muestra la potencia, torque y velocidad en las ruedas del automóvil, se observa la misma característica que la determinada para el escenario de 60 a 100 km/h.

Tabla 19. Potencia, torque, velocidad en las ruedas; escenario de aceleración de 60 a 100 km/h.

Parámetro	Símbolo	Automóvil	
		Nissan Tiida 2011	Toyota Corolla 2009
Potencia (kW)	P_r	54,77 (73,41 HP)	57,46 (77,03 HP)
Velocidad rueda (R.P.M)	W_r	853,61	836,12
Torque (Nm)	T_r	612,67	656,27

Fuente: Elaboración propia, (Excel 2016).

De los resultados obtenidos para cada escenario, se muestra que el de aceleración de 60 a 100 km/h, presenta la mayor demanda de potencia a las ruedas, además de considerar la eficiencia de la transmisión de 0,91, se tiene una métrica de 0,0352 kW/kg para el Nissan Tiida y 0,0373 kW/kg para el Toyota Corolla en cuanto a requerimientos de potencia para las condiciones de desempeño establecidas.

4.2 Elementos electromecánicos

En esta sección se establecieron los requerimientos electromecánicos necesarios para llevar a cabo electro-conversión del automóvil, basado en la figura 7, se consideraron los sistemas de propulsión eléctrica, fuente de energía y el sistema auxiliar. Además, se definieron los elementos necesarios para el sistema de instrumentación y el sistema eléctrico de alta tensión esto con el fin de alcanzar un adecuado funcionamiento del automóvil.

4.2.1 Sistema de propulsión eléctrica

El sistema de propulsión del automóvil electro-convertido, se constituye por diferentes elementos tales como; la unidad motriz que en este caso se refiere al motor eléctrico, el controlador de velocidad, la transmisión mecánica, las ruedas motrices entre otros elementos.

- **Motor eléctrico:** principal componente del sistema de propulsión, a continuación, se explica el proceso seguido para el dimensionamiento y selección de la nueva unidad motriz del automóvil. El primer paso llevado a cabo fue determinar de los escenarios analizados en la sección anterior, cuál de ellos es el que demanda la mayor potencia a las ruedas del vehículo, de estos se pudo determinar que el escenario de aceleración de 60 a 100 km/h, es el que demanda la mayor potencia a las ruedas, esta exigencia debe ser suplida por la unidad motriz o motor eléctrico.

Seguidamente, para precisar la potencia de salida, que debe entregar el motor, se consideró la eficiencia del sistema de transmisión, ya que de acuerdo con Baranda (2012), la transmisión de potencia del motor hacia las ruedas no es perfecta, el rozamiento que existe entre las diferentes partes móviles que componen la cadena cinemática, cargas vibratorias entre otros factores, generan pérdidas de potencia que se traducen en generación de calor, razón por la cual estas deben ser cuantificadas mediante el parámetro definido como la eficiencia del sistema de transmisión. Este factor depende del tipo de tren motriz, en la tabla 8, se muestra que la eficiencia general para un automóvil con tracción delantera es de 0,91. Aclarado lo anterior, se tiene que la potencia mecánica de salida requerida del motor se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$P_{motor} = \frac{P_{ruedas}}{n_T}$$

En la tabla 20, se muestra la potencia mecánica que se requiere sea entregada por el motor eléctrico, para satisfacer la demanda de potencia según las prestaciones de cada automóvil anteriormente establecidas, considerando la potencia se selecciona el motor eléctrico como la nueva unidad motriz de estos.

Tabla 20. Potencia de salida del motor para cada automóvil.

Parámetro	Nissan Tiida 2011	Toyota Corolla 2009
Potencia máx en las ruedas (kW)	54,77 (73,41 HP)	57,46 (77, 03 HP)
Potencia motor (kW)	60,18 (80,67 HP)	63,15 (84,64 HP)

Fuente: Elaboración propia, (Excel 2016).

Los motores seleccionados para la conversión pertenecen a la casa High Performance Electric Vehicle Systems (HPEVS), la gama de motores estudiados corresponde al modelo HPEVS AC-51, este motor es de inducción con alimentación trifásica, a continuación, se muestran las principales características de este.

Tabla 21. Características del motor eléctrico HPEVS AC-51.

Parámetro	Magnitud
Potencia máxima (kW)	65, 65 (88 HP)
Torque máximo (Nm)	146,42 (108 lb ft)
Revoluciones máximas (RPM)	8000
Tensión Nominal (Vca)	144
Corriente Nominal (A)	500

Fuente: HPEVS (2020).

En la siguiente figura 10, se muestran las curvas características del motor eléctrico AC-51, de la curva torque versus velocidad, es importante establecer que la curva par-régimen, se da desde 0 RPM hasta las 4500 RPM, en este rango de revoluciones de giro del motor el torque es máximo, además de ser prácticamente constante, a partir de esas revoluciones el torque entregado por el motor disminuye.

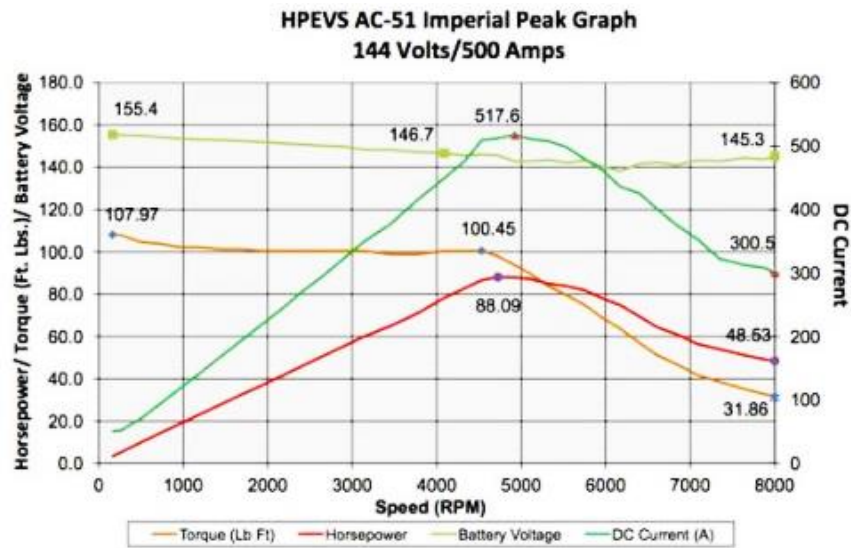


Figura 10. Curvas características del motor eléctrico.

Fuente: HPEVS (2020).

Para el escenario de velocidad constante en carretera llana, se propuso como característica de diseño que el automóvil alcance una velocidad máxima de 145 km/h, de acuerdo con Baranda (2012), esta velocidad se alcanza al máximo de revoluciones del motor.

Es importante destacar que según Koeva et al., (2018), es esencial limitar las revoluciones del motor eléctrico a 6500 RPM, esto porque la mayoría de los motores de combustión operan a ese rango máximo de revoluciones, si este es excedido puede generar daños en la transmisión. Considerando lo anterior y la relación de transmisión requerida, los automóviles pueden alcanzar dicha velocidad en 4ta marcha de acuerdo con la relación de transmisión de esta.

$$i \leq \frac{RPM_{\max_motor}}{RPM_{ruedas}}$$

$$i \leq \frac{6500}{1237,73}$$

$$i \leq 5,25$$

Mediante el Apéndice 3, se comprobó que el Nissan Tiida puede alcanzar una velocidad de 153,70 km/h en 4ta marcha con el torque requerido, en cuanto al Toyota Corolla en el Apéndice 2 se estableció que este puede alcanzar una velocidad de 145,40 km/h con el torque necesario para vencer el escenario, de acuerdo con Toyota Motor Corporation (2008) la velocidad máxima permitida para 4ta marcha es de 145 km/h y 166 km/h según Nissan (2010), respectivamente por lo que no representa ningún riesgo para la transmisión.

Para el escenario de aceleración en pendiente máxima, se estableció una velocidad máxima de ascensión de 40 km/h, en este escenario se demanda el mayor torque al motor, de acuerdo con Baranda (2012) este punto de la característica de esfuerzos debe pertenecer a la recta de la curva par-régimen, característica anteriormente explicada. Considerando lo anterior y el rango de relación de transmisión que se muestran a continuación, los automóviles pueden alcanzar dicha velocidad con el torque requerido en 1ra marcha, de acuerdo con la relación de transmisión correspondiente para la misma.

$$\frac{T_r}{T_{motor}} \leq i \leq \frac{\omega_{base_{motor}}}{\omega_{ruedas}}$$

$$\frac{1343,22}{136,21} \leq i \leq \frac{4500}{341,44}$$

$$9,86 \leq i \leq 13,18$$

Mediante los Apéndices 3 y 4 respectivamente para cada auto, se comprobó que en 1era marcha, el Nissan Tiida alcanza una velocidad de 42,44 km/h con un torque de 1646,85 Nm lo que permite superar el escenario sin inconveniente; por otro lado el Toyota Corolla puede alcanzar una velocidad de 43,83 km/h con un torque de 1628 Nm, superando también el escenario, además de acuerdo con Toyota Motor Corporation (2008) la velocidad máxima permitida para primera es de 39 km/h para el Corolla, mientras que de acuerdo con Nissan (2010) corresponden a 46 km/h, por lo que no representa ningún riesgo para la transmisión.

En el escenario de aceleración en carretera 0 a 60 km/h, se requiere un torque en las ruedas de 977,82 Nm y 1066,78 Nm para el Nissan y Toyota respectivamente, del Apéndice 3, para el Tiida se observó que la velocidad máxima de 60 km/h se puede alcanzar en 2da marcha con un torque de 1034,19 Nm, por otra parte para el Corolla, del Apéndice 4, se muestra que de igual forma se puede alcanzar la velocidad máxima en 2da marcha con un torque de 1077,38 Nm. Considerando la aceleración de 60 a 100 km/h, el torque requerido en las ruedas se muestra en la tabla 21 que al ser comparado con el torque disponible mostrado en los apéndices 2 y 3, se determinó que en 3ra marcha se alcanza la velocidad máxima para ambos autos.

Considerando la circulación de los automóviles en carretera llana, partiendo desde 0 km/h y pretendiendo alcanzar una velocidad máxima de 60 km/h, en el apéndice 3 y 4 para el Nissan y Corolla respectivamente se muestra el torque requerido a diferentes velocidades tomando en cuenta la aceleración, por lo que para iniciar el movimiento se requiere un torque de 943, 25 Nm y 1034, 50 Nm para el Nissan y Toyota de manera respectiva.

Comparando dichos valores con los de torque disponible, se determinó que los automóviles pueden ser manejados en 2da marcha sin necesidad de utilizar la 1era marcha como si lo es en un automóvil de combustión debido a su bajo torque a bajas revoluciones; si se quiere circular a velocidades mayores como máximo a 100 km/h si se requiere hacer el cambio gradual a 3ra marcha.

- Acople motor-transmisión

La conexión mecánica entre el motor eléctrico y la caja de transmisión del automóvil, es un punto de suma importancia, Association for the Promotion of Electric Vehicles (2011), establece que esta conexión se debe realizar a través de una placa metálica con la precisión y resistencia adecuada, el proceso de conexión debe realizarse como se muestra en la figura 11.

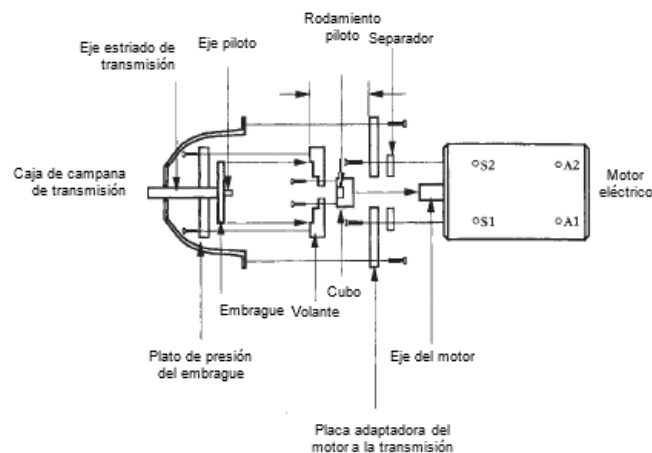


Figura 11. Conexión del motor eléctrico a la transmisión

Fuente: Leitman & Bob (2009).

- Controlador-Inversor

HPEVS recomienda el uso del controlador Curtis 1239E- 8521, para el suministro y control de tensión al motor HPEVS AC-51, unidad motriz que se ha elegido para la conversión. El rango de operación del controlador es de 72-144 Vcd nominales y 170 Vcd de tensión máxima, la tensión suministrada por la batería es de 144 Vcd que se encuentran dentro del intervalo de operación del controlador.

El controlador Curtis 1239E-8521, requiere de un circuito de precarga para su correcto funcionamiento, esto se debe a que según ZEVA (2020), los controladores de motor para vehículos eléctricos tienen un banco de capacitores en su entrada con una muy baja resistencia equivalente, por lo que requieren protección cuando se cierran los contactos del contactor principal. El circuito compuesto por un resistor y un relé de precarga evita el pico de corriente generado que puede dañar los componentes.

- **Acelerador**

La selección del pedal del acelerador se realizó basado en los tipos de configuraciones disponibles para el controlador del motor Curtis 1239, se seleccionó la tercera configuración, que corresponde a un acelerador de tres hilos con un interruptor de 0-5 k Ω , específicamente es el pedal Curtis FP-Style con el que estará equipado el automóvil.

4.2.2 Sistema de energía

El sistema de energía del automóvil eléctrico se conforma de diferentes elementos, tales como la batería principal o de tracción, la unidad de gestión de energía, además de la unidad de recarga, seguidamente se explicará cada uno de ellos.

- **Batería principal o de tracción**

De acuerdo con Vidyanandan (2019), los paquetes de baterías de tracción para un VE se conforman de celdas de pequeña capacidad. Las celdas se combinan para formar un módulo y varios de estos son agrupados para formar el paquete acumulador de energía. Tradicionalmente el paquete de baterías es conformado por celdas prismáticas y de bolsa, la razón de esto se debe a la gran área de superficie de estas lo que favorece a la disipación de calor.

La opción más conveniente para conformar el paquete de baterías corresponde a las que tienen la mayor capacidad de almacenaje de energía por unidad de masa (kWh/kg), es decir el tipo de baterías que disponga de la mayor energía específica. A continuación, se muestra la tabla comparativa de diferentes parámetros de las tecnologías de baterías.

Tabla 22. Comparación de diferentes tecnologías de baterías.

Tipo de batería	Voltaje nominal (V)	Energía específica (Wh/kg)	Ciclo de vida
Ácido-plomo	2,1	30-40	500
Ni-Cd	1,2	50-80	2000
Ni-MH	1,2	60-120	<3000
ZEBRA	2,6	90-120	>1200
Li-Ion	3,6	120-250	2000

Fuente: Vidyandandan (2019).

Considerando la información expuesta en la tabla anterior, se determina que las baterías más adecuadas a utilizar en el proceso de electro-conversión corresponde a las de Ion-Litio, esto se debe a que presenta la mayor energía específica, otro aspecto de suma importancia corresponde al ciclo de vida que asciende a 2000 ciclos siendo el mayor de las demás tecnologías de baterías.

Tabla 23. Características de las diferentes celdas marca CALB posibles a utilizar.

Tipo de celda	Modelo	Capacidad Nominal (Ah)	Energía específica (Wh/kg)
LiFePO ₄	CAM 72 F	72	121
LiFePO ₄	CA 100	100	94
LiFePO ₄	SE 100 AHA	100	100
LiFePO ₄	CA 180 F	180	101

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

En la tabla 23, se muestran características de los diferentes modelos de celdas a seleccionar para conformar el paquete de baterías. Considerando que la celda CAM 72 F presenta la mayor energía específica de 121 (Wh/kg), es seleccionada para la composición de la batería, a continuación, se muestran los principales parámetros de estas celdas.

Tabla 24. Características técnicas de las celdas seleccionadas CALB CAM 72F.

Parámetro	Magnitud
Capacidad	72 Ah
Tensión Nominal	3,2 V
Tensión de operación	2,5 - 3,65 V
Corriente continua máxima de descarga	144 A
Pulso de descarga	576 A (máx 10s)
	288 A (máx 30 s)
Ciclo de vida	≥ 2000 ciclos
Masa	1,9 kg

Fuente: Elaboración propia, (Word, 2016).

La cantidad de celdas en serie y la cantidad de módulos en paralelo que se requieren para satisfacer los requerimientos de tensión del motor, autonomía establecida, además de la potencia demandada por cada escenario antes definido, se determinan continuación.

Tensión de alimentación del motor: para determinar el número de celdas requeridas en serie, se realiza mediante la ecuación mostrada, donde V_{motor} es la tensión de alimentación del motor, V_{celda} es la tensión nominal de la celda ambos en V.

$$N_{s1} = \frac{V_{motor}}{V_{celda}} = \frac{144 V}{3,20 V}$$

$$N_{s1} = 45$$

Autonomía; considerando este aspecto, primero se debe calcular la energía requerida por la batería, este se realiza mediante la ecuación mostrada, donde L_{dis} es la máxima distancia por recorrer en km con solo una recarga, E_{km} es el consumo energético en kWh/km y D_{soc} es la profundidad de descarga de la batería en %.

$$E_{bat} = \frac{L_{dis} \cdot E_{km}}{D_{soc}}$$

Para determinar la energía requerida por el paquete de baterías, se establece una distancia máxima a recorrer por el vehículo con una carga completa de 130 km. El consumo energético por kilómetro recorrido, de acuerdo con Vidyanandan (2019) varía entre 160 y 200 Wh/km para este caso se utiliza el mayor valor, considerando la condición más crítica.

$$E_{bat} = \frac{130 \text{ km} \cdot 0,20 \text{ kWh/km}}{0,80} = 32,5 \text{ kWh}$$

Una vez determinada la energía requerida por el paquete en baterías (E_{bat}), se calcularon la cantidad de celdas en paralelo necesarias para conformar el paquete de baterías, mediante la siguiente ecuación, donde V_{nom} es el voltaje nominal del módulo y C_{nom} es la capacidad nominal de las celdas en Ah.

$$N_m = \frac{E_{bat}}{V_{nom} \cdot C_{nom}}$$

$$N_m = \frac{32,5 \text{ kWh}}{144 \text{ V} \cdot 72 \text{ Ah}} = 3,13$$

De lo anterior se estableció que el paquete de baterías tendrá la siguiente configuración (45S3P), el “3P” indica que hay 3 celdas con conexión en paralelo, se tiene que el “45S” muestra que hay 45 tríos de celdas conectadas en serie, en la siguiente tabla se muestran las características de la batería.

Tabla 25. Características técnicas del paquete de baterías.

Parámetro	Magnitud
Capacidad	31 kWh
Tensión Nominal	144 V
Tensión de operación	112,5 – 164,3 V
Corriente continua máxima de descarga	432 A
Pulso de descarga	1728 A (máx 10 s)
	864 A (máx 30 s)
Masa	256,5 kg

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Por último, es necesario comprobar que el paquete de baterías tiene la capacidad de satisfacer las demandas de potencia para cada uno de los escenarios de diseño, para esto es necesario calcular la potencia eléctrica que puede entregar la batería.

- Potencia máxima continua= 62,21 kW.
- Potencia máxima (30s)=72,00 kW.

Considerando la potencia máxima continua y la demandada tanto para el escenario de velocidad y pendiente máxima que se muestran en la tabla 26, se determinó que la batería tiene la capacidad de suplir dicha demanda; de la misma forma se observó que para los escenarios de aceleración, la potencia máxima (30s) satisface dicha exigencia, por lo que se comprobó que el paquete de baterías es adecuado para todos los automóviles.

Tabla 26. Potencia eléctrica demandada a la batería por cada escenario.

Escenario		Potencia (kW)	
		Nissan Tiida 2011	Toyota Corolla 2009
Velocidad máxima		43,66	40,77
Pendiente máxima		59,97	59,40
Aceleración	0-60 km/h	65,49	69,98
	60-100 km/h	68,39	71,76

Fuente: Elaboración propia, (Word, 2016).

- **Unidad de gestión de energía**

La gestión de la batería es obligatoria para las baterías de iones de litio con el objetivo de garantizar la disponibilidad de energía, la vida útil y la seguridad del sistema de almacenamiento de energía, por lo que se requiere la implementación de un Sistema de Gestión de Batería (BMS) adecuado para mantener cada celda de la batería dentro de su rango operativo seguro y confiable.

Además de la función principal de protección, un BMS cumple con otras funciones importantes tales como estimar el estado de carga de la batería para predecir la cantidad real de energía que puede entregar, también extender la vida útil de la batería al enfrentar el problema de desequilibrio de carga que puede surgir en las celdas conectadas en serie.

De acuerdo con Orion BMS (2019), en el caso de celdas conectadas en paralelo entre sí y luego ensambladas en serie en un solo paquete de baterías, el BMS verá las celdas conectadas en paralelo como una sola celda singular, por ejemplo, para dos celdas paralelas, el BMS verá una sola con el doble de capacidad y la mitad de la resistencia interna.

Considerando lo anterior, además de la configuración de la batería que corresponde a (45S3P), se tiene que las celdas conectadas en serie corresponden a un total de 45, por lo que se requiere una unidad de BMS que tenga la capacidad de medición para una cantidad igual o mayor al número de celdas en serie de la batería, también debe existir compatibilidad entre el BMS y la tecnología de las celdas utilizadas.

Por lo que el Sistema de Gestión de Batería seleccionado corresponde al Orion BMS 2, con una configuración correspondiente a 48 celdas, es decir el número total de celdas en serie que puede medir, además de acuerdo con Orion BMS (2019) esta unidad tiene un amplio rango de detección de tensión (0,5Vcd–5Vcd), por celda para monitoreo y balanceo, es compatible con prácticamente todas las baterías de iones de litio del mercado, por lo que resulta apto para la aplicación en estudio.

- **Unidad de recarga**

El cargador de a bordo, es el dispositivo que absorbe el suministro de energía de corriente alterna proveniente de la red eléctrica y lo convierte en corriente directa para cargar la batería principal del vehículo.

Para la selección del cargador, un aspecto de suma importancia que debe ser considerado, corresponde a la compatibilidad entre el cargador de a bordo y el Sistema de Gestión de Batería, de acuerdo con Orion BMS (2019) para la unidad Orion BMS 2 los cargadores compatibles corresponden a los siguientes: Eltek Valeo, Elcon / TC charger, Current Ways, Zivan. De los anteriores, se selecciona el cargador de a bordo Elcon PFC5000, debido a que tiene mayor potencia eléctrica de salida, lo que permite una carga de la batería en un menor tiempo, en la siguiente tabla 27 se muestran las características técnicas de este cargador.

Tabla 27. Características técnicas del cargador de a bordo seleccionado.

Entrada CA		Salida CD	
Tensión operación (V)	96-260	Tensión nominal (V)	144
Tensión nominal (V)	115 / 230	Tensión máxima (V)	204
Corriente máxima (A)	30	Corriente nominal (A)	30@230 Vca
Corriente nominal (A)	20@115 Vca		13@115 Vca
		23@230 Vca	Potencia Nominal (W)
Potencia nominal (W)	2400@ 115 Vca	1872@115 Vca	
		5290@230 Vca	4320@230 Vca

Fuente: EV West (2020).

El puerto de carga seleccionado para los automóviles a convertir a eléctricos corresponde al estándar SAE J1772, este se debe instalar en el puerto original del automóvil donde se recarga el combustible. En la siguiente figura 12, se muestra la configuración de los pines de conexión del puerto.

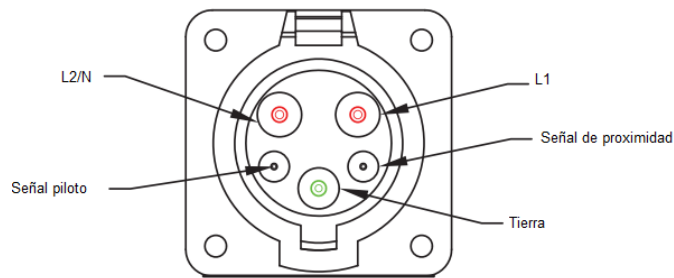


Figura 12. Puerto de carga SAE J1772.

Fuente: EV West (2020).

Debido a que la unidad de BMS seleccionada puede interactuar directamente con la entrada J1772 para habilitar la carga de CA de nivel 1 y 2, no se requiere de un módulo de control activo del vehículo (ACV).

4.2.3 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico se conforma principalmente por los conductores de alta tensión y dispositivos de protección. Tanto Leitman & Bob (2009) como Association for the Promotion of Electric Vehicles (2011), establecen ciertos dispositivos de seguridad con los que debe contar el automóvil eléctrico convertido, para garantizar y salvaguardar la integridad tanto del vehículo como el de las personas, a continuación, se explican los mismos.

- **Conductores:** el calibre de los conductores de alta tensión se dimensionó a partir de la corriente máxima que puede circular a través del controlador del motor, por lo que se estableció que el calibre mínimo de los conductores requerido es de 4/0 AWG, estos deben tener una chaqueta color naranja, debido a que la tensión es mayor a 50 V. Vražić et al., (2014).
- **Interruptor principal:** su función es interrumpir instantáneamente la energía de la batería principal en caso de un mal funcionamiento del sistema. Para la selección de este elemento se debe considerar la tensión del sistema 144 Vcd, así como la corriente máxima 500 A, se seleccionó un protector airpax hidráulico magnético, con la siguiente denominación JRE-1-IREC4-51-3-F1-500-A.

- Fusible: este interrumpe el flujo de corriente en caso de un cortocircuito inadvertido a través de la batería. Para la selección del dispositivo se considera una tensión de 144 Vca, además de acuerdo con HPEVS (2020), para el controlador Curtis 1239 se debe utilizar un fusible con un valor nominal de 400 A. Por lo anterior se seleccionó de la marca Ferraz Shawmut modelo A15QS400, con su respectivo porta fusible EV West calibre uno.
- Contactor principal: realiza la conexión y desconexión del sistema, se debe instalar entre la batería de tracción y el controlador de velocidad, debe soportar por completo la conmutación frecuente en condiciones severas. Para la selección del dispositivo se consideró la tensión 144 Vca, corriente máxima 500 A y la tensión del sistema auxiliar 12 Vcd, a partir de lo anterior se seleccionó el contactor Gigavac GV200.
- Relé de inercia: brinda protección contra descargas eléctricas, desconectando el circuito de alto voltaje en caso de colisión. Para la selección se debe tomar en cuenta la tensión del sistema auxiliar 12 Vcd y la corriente del contactor 2A, por lo que se seleccionó el relé de la marca First Technology 360°.
- Interruptor de emergencia: desconecta el contactor principal, interrumpiendo el flujo de corriente, desconectando las baterías de tracción, para la selección de este interruptor se hicieron las mismas consideraciones del anterior, el dispositivo seleccionado es el ED250.
- Interruptor de mantenimiento: desconecta el circuito de alta tensión para proteger a los trabajadores de descargas eléctricas cuando se ejecuten tareas de mantenimiento, se seleccionó el Gigavac HBD41, satisfaciendo las condiciones de tensión 144 Vcd y corriente 500 A.

4.2.4 Sistema de instrumentación

Association for the Promotion of Electric Vehicles (2011), establece que el automóvil debe estar equipado con un indicador que le permita al conductor estimar la carga útil restante de la batería o la distancia de viaje restante.

Considerando lo anterior, cada automóvil contará con un medidor del estado de carga de la batería, para esto se seleccionó un medidor básico marca Orion compatible con la unidad de BMS seleccionada, este proporciona información esencial del paquete de baterías, tales como el estado de carga, además tiene indicadores que advierten al conductor cuando se tiene potencia limitada, también muestra un estado de error si una falla ocurre.

4.2.5 Sistema auxiliar

El sistema auxiliar, se compone principalmente de la fuente de alimentación auxiliar, el convertor DC/DC, la unidad de dirección asistida y el aire acondicionado, a continuación, se explica cada uno de ellos.

- Unidad de dirección asistida

Los automóviles en estudio se encuentran equipados con el Sistema de Dirección electroasistida (EPS), con este tipo de dirección no se tiene ningún elemento acoplado al motor de combustión, por lo tanto, esta unidad no requiere de ningún tipo de modificación.

- Aire acondicionado

Los automóviles estudiados cuentan con aire acondicionado, para este sistema el compresor del sistema es accionado mediante el giro del motor a través de faja y polea, debido a esto se debe acoplar un motor eléctrico de 12 Vcd de al menos 1 hp de potencia, para su adecuado funcionamiento, por lo que se seleccionó el motor eléctrico de la marca JIN modelo ZDY113.

- Fuente de alimentación auxiliar

La fuente de alimentación auxiliar corresponde a la batería auxiliar de 12 Vcd esta suministra energía a todos los aparatos electrónicos estándar del vehículo, como la radio, luces, panel de instrumentos entre otros. También alimenta al controlador del motor, la unidad BMS, la bomba de vacío utilizada en el sistema de frenos, etc.

La batería auxiliar, debe ser cargada por un conversor DC-DC, este dispositivo viene a sustituir la función realizada por el comúnmente denominado alternador con el que cuentan los autos de combustión. El conversor reduce la tensión de la batería principal de 144 Vcd a 12 Vcd, para el correcto funcionamiento del sistema auxiliar; para la selección de este elemento se consideró la corriente máxima que entrega el alternador, esta es de 110 A según ISeeCars (2020), por lo que se seleccionó el conversor HWZ6 de 1200 W para ambos autos, este tiene la capacidad su suplir las exigencias de potencia de la carga instalada.

4.2.6 Sistema de frenos

Los automóviles en estudio cuentan con frenos asistidos por vacío, este sistema es denominado servofrenos, el cual ayuda a frenar utilizando el vacío generado por el motor de combustión, sino se cuenta con la presión negativa generada por el motor el vehículo puede ser detenido, sin embargo, se requerirá mayor presión del pie en el pedal del freno para detener el automóvil y la distancia de frenado será mayor.

Association for the Promotion of Electric Vehicles (2011), establece que si un vehículo eléctrico se convierte de un vehículo base que está equipado con un sistema de servofreno con presión negativa del motor, el vehículo eléctrico estará equipado con una bomba eléctrica de vacío o similar para garantizar una asistencia equivalente a los frenos originales del vehículo base.

Considerando lo anterior, cada automóvil debe ser equipado con una bomba de vacío para el correcto funcionamiento de los frenos a continuación, se muestran las características técnicas de la bomba seleccionada.

Tabla 28. Características técnicas de la bomba de vacío seleccionada.

Parámetro	Magnitud
Presión máxima de vacío (kPa)	137,90 (20 psi)
Tensión de alimentación (Vcd)	12
Masa (kg)	4

Fuente: EV West (2020).

Es importante destacar que la bomba de vacío debe funcionar, solamente cuando es necesario, por lo que el interruptor de vacío se encarga de mantener la bomba funcionando entre un rango de presión de [117,21 (17 psi) – 137,90 (20 psi)] kPa, que es el vacío de funcionamiento común para todos los frenos de asistencia de vacío estándar. Cuando la presión es inferior a 110,32 kPa (16 psi) el interruptor emite una señal para activar la bomba, la misma se desactiva cuando la presión que se alcanza es de 137,90 kPa (20 psi).

En la tabla 29, se muestra un resumen de los elementos requeridos para cada sistema del automóvil.

Tabla 29. Componentes necesarios para cada sistema para la conversión del automóvil.

Sistema	Componentes	Sistema	Componentes
Propulsión eléctrica	Motor eléctrico HPEVS AC-51	Energía	Batería de tracción, 31 kWh
	Controlador Curtis 1239 E-8521		Unidad de gestión de energía BMS Orion 2
	Acelerador Curtis FP-Style		Cargador de a bordo Elcon PFC 5000
	Puerto de carga SAE J1772, 32A		
Auxiliar	Motor aire acondicionado JIN LE ZDY113 1 HP, 12 Vcd	Instrumentación	Medidor básico del estado de carga Orion
	Convertor DC/DC HWZ6 1200W		
Eléctrico	Conductores 4/0 AWG	Frenos	Bomba de vacío, SSBC 12 Vcd
	Interruptor principal Airpax	Eléctrico	Relé de inercia, First Technology 360°
	Fusible A15QS400		Interruptor de emergencia ED250
	Contacto principal Gigavac GV200		Interruptor de mantenimiento Gigavac HBD41
Fusible A15QS400			

Fuente: Elaboración propia, (Word, 2016).

4.3 Incentivos y trámites legales para el automóvil electro-convertido

En esta sección, se explican los incentivos de los que gozaría un automóvil electro-convertido basado en la Ley 9518, además de la tramitología legal que se debe realizar para que el vehículo cuente con las calidades de ley para circular por la vía pública.

4.3.1 Incentivos para un automóvil electro-convertido

Como se ha mencionado anteriormente la Ley No. 9518, estimula el transporte eléctrico a través de incentivos económicos y facilidades en la circulación o incentivos no económicos. Dada la naturaleza de un automóvil sometido a electro-conversión, este corresponde a un vehículo automotor impulsado por energía cien por ciento eléctrica y no cuenta con motor de combustión para su propulsión, se analizaron los incentivos con los que este automóvil contaría.

El automóvil electro-convertido, no gozaría de la exoneración al impuesto de la propiedad de vehículos, esto debido a que, de acuerdo con el Reglamento de Incentivos para el Transporte Eléctrico, estos aplican para los vehículos eléctricos nuevos importados después de entrar en vigor la ley o antes, pero en la gradualidad correspondiente para los primeros cinco años.

De acuerdo con el Reglamento de Distintivos para Vehículos Eléctricos, se entiende el término distintivo como la matrícula de identificación o placa otorgada por el Registro Nacional. En cuanto al otorgamiento del distintivo, el reglamento establece que la entidad mencionada, realizará la sustitución de las placas a los usuarios que hayan nacionalizado los vehículos eléctricos o cero emisiones.

Interpretando lo expuesto se determinó que el automóvil electro-convertido puede contar con el distintivo debido a que es un vehículo nacionalizado y a su vez eléctrico, por ende, no estaría sujeto a la restricción vehicular en el área metropolitana, exoneración del pago de parquímetros además puede parquear en espacios de parqueo especiales.

Un incentivo económico de suma importancia, para la electro-conversión corresponde a la exoneración de los repuestos de vehículos eléctricos, relacionados con el funcionamiento del motor eléctrico y la batería, esta exoneración será regulada mediante un reglamento que será emitido por el Ministerio de Ambiente y Energía en conjunto con el Ministerio de Hacienda, sin embargo este no ha sido publicado, lo que dificulta o imposibilita conocer los requisitos que deben cumplir los repuestos para que sean exonerados.

4.3.2 Tramitología legal para un automóvil electro-convertido

Considerando que las revisiones técnicas vehiculares periódicas corresponden a un requisito obligatorio para la circulación de los vehículos automotores por las vías públicas del territorio nacional, aunado a esto se consideró, que de la inspección técnica se pueden derivar diferentes resultados que autoricen o impidan la circulación del automóvil, tanto el resultado favorable como favorable con defecto leve catalogan al vehículo como apto para circular por vía pública.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó la consulta al Jefe de Estación de RTV de la provincia de Cartago, sobre la existencia de alguna limitación o restricción, para que un automóvil que haya sido sometido a electro-conversión, se le realice la inspección y el resultado de esta sea favorable permitiéndole circular. De acuerdo con Astúa (2020), no existe limitación para este tipo de automóvil, durante el proceso de inspección se realizan las mismas pruebas a las que es sometido un vehículo de combustión exceptuando la de emisiones contaminantes, además menciona que no es un requisito presentar una carta de certificación emitida por un Ingeniero Mecánico, como si es solicitada para otro tipo de modificaciones.

Debido a que la RTV corresponde a un requisito obligatorio para realizar trámites administrativos tales como cambio de características, entre otros. Cuando se asiste a la inspección del automóvil se debe solicitar el informe de cambio de características, que haga constar el cambio de motor realizado. De acuerdo con Astúa (2020), se debe aportar documentación respectiva donde se indique la potencia, así como el tipo de combustible del motor, mediante esta información se emite el informe de cambio de características.

Una vez obtenido el informe de cambio de características, el propietario registral del vehículo debe solicitar ante el Registro Nacional la inscripción de cambio de motor efectuado, el trámite debe realizarse a través de un Notario Público, ya que la solicitud a de realizarse en papel de seguridad debidamente autenticado, indicando las calidades de ley y características del automotor, los requisitos específicos para realizar el trámite se muestran en el Anexo 3.

De la sección anterior se determinó que el automóvil a convertir puede ser identificado mediante el distintivo para vehículos eléctricos. Para efectos de la sustitución de las placas se debe realizar el trámite denominado “Solicitud de placas o del Documento adicional por deterioro” ante el Registro Nacional, los requisitos específicos para realizar el trámite se muestran en el Anexo 4.



Figura 13. Secuencia de trámites para el automóvil a electro-convertir.

Fuente: Elaboración propia, (PowerPoint, 2016).

4.4 Estructura de costos del automóvil electro-convertido

Para establecer la estructura de costos correspondiente a electro-conversión del automóvil, se realizó el análisis del costo de ciclo de vida del vehículo.

4.4.1 Desarrollo del modelo del Costo de Ciclo de Vida

Para establecer la estructura de costos correspondiente a electro-conversión del automóvil, se realizó el análisis del costo de ciclo de vida del vehículo. El período de análisis corresponde a 10 años, este fue definido a través de la vida útil de la batería de tracción con la que contará el automóvil, ya que según información suministrada por el fabricante corresponde a dicha cantidad de años.

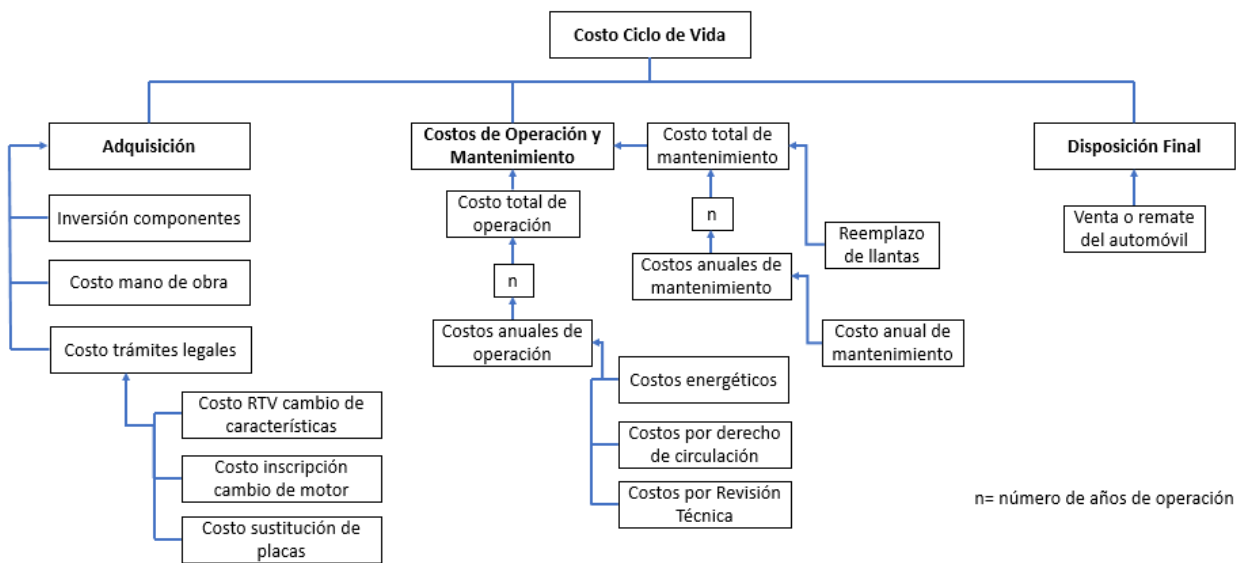


Figura 14. Estructura de distribución de costos.

Fuente: Elaboración propia, (PowerPoint, 2016).

Fase de adquisición

Para la fase de adquisición se consideraron tres rubros principales que componen los costos de esta etapa, estos corresponden a la inversión relacionada con los elementos electromecánicos establecidos en la primera sección, el costo de mano de obra para llevar a cabo la conversión del vehículo, además de los gastos relacionados con los trámites legales ligados con el cambio de características.

Es importante acotar que la exoneración de impuestos a los repuestos de vehículos eléctricos representaría una ventaja en cuanto al costo de la inversión, por ende, se tendría un impacto positivo en el costo del ciclo de vida, por lo que se consideraron dos escenarios posibles, que los componentes importados se encuentran exentos del impuesto selectivo de consumo (SC) y el de ventas, el otro considerando que los repuestos son afectados por todos los aranceles de importación. El cálculo de dichos aranceles se realizó basado en el “Instructivo del cálculo de la obligación tributaria para la importación y exportación de mercancías”, ver Apéndice 7 y 8.

De acuerdo con el Arancel de Honorarios por Servicios Profesionales de Abogacía y Notariado, en su Artículo 83-Trámites varios sobre vehículos, aeronaves y embarcaciones, las gestiones referentes a vehículos tales como cambio o permuta de motor, devengará honorarios conforme a la Tarifa General con un mínimo de sesenta mil quinientos colones. Los costos de mano obra fueron consultados a un taller especializado en vehículos eléctricos en Costa Rica. En la tabla 30 se muestra un resumen de los costos para la electro-conversión, en cuanto a los elementos electromecánicos se exponen el precio con impuestos y exonerado, el detalle de cálculo se muestra en los apéndices 7 y 8, el tipo de cambio del dólar corresponde a ₡ 576,93 del 1/06/2020.

Tabla 30. Costos involucrados para la conversión del motor del automóvil.

Rubro	Costo (repuestos con impuestos) (₡)	Costo (repuestos exonerados)(₡)
Componentes electromecánicos (repuestos)	15.419.541	12.299.361
Mano de Obra	1.730.790	1.730.790
Cambio de características	60.500	60.500
Sustitución de placas	17.500	17.500
Total	17.228.331	14.108.151

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016)

Fase de operación y mantenimiento

Costos de operación

El requerimiento anual de energía se calculó utilizando en primer lugar el consumo de energía promedio por kilómetro recorrido mediante el indicador de kWh/km, además de la eficiencia del proceso de recarga de las baterías. Para los automóviles en estudio se propuso desde la etapa de diseño del paquete de baterías un rendimiento energético teórico de 0,200 kWh/km, además de acuerdo con Kara et al., (2017), se contempló una ineficiencia en el proceso de carga del 20%. De acuerdo con el registro de consumo de combustible proporcionado por la Unidad de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral (GASEL) del Tecnológico de Costa Rica, se determinó que los automóviles estudiados recorren una distancia promedio anual de 10.000 km, por lo que el requerimiento energético corresponde a 2400 kWh por año.

La tarifa eléctrica utilizada corresponde a la T-CS de la JASEC, para determinar el monto correspondiente a cada bloque se calculó el promedio interanual, con base en las tarifas publicadas por ARESEP (2020) entre los meses de febrero del año 2019 al 2020. El consumo de energía para el bloque de los primeros 3000 kWh tiene un costo 126.516 colones, cada kWh adicional 41,77 colones; para la demanda se tiene que el precio de los primeros 8 kW es de 50.675,06 y cada kW adicional 6324.87 colones, para el cálculo de los costos por energía se toma el precio de cada kWh adicional esto considerando que la recarga consiste en una carga adicional al sistema eléctrico existente.

Revisión técnica vehicular, considerando que la antigüedad de estos automóviles es mayor a cinco años desde su fabricación, la inspección técnica integral se realizará cada año, las tarifas vigentes para el año 2020, son las siguientes para la inspección es de 15.927,35 colones y 7.963,68 colones para re-inspección, sin embargo, para efectos del estudio se tomó, solamente el monto correspondiente a la inspección asumiendo que el vehículo obtendrá el resultado favorable. De acuerdo con el histórico de tarifas para el servicio de revisión técnica por parte ARESEP (2020), se estimó un aumento anual del 5%.

Tabla 31. Costos de operación anuales proyectados para los automóviles Nissan Tiida 2011(EC) y Toyota Corolla 2009(EC).

Año	Nissan Tiida 2011 (EC)			Toyota Corolla 2009 (EC)		
	Energía (₡)	Derecho de circulación (₡)	Revisión Técnica (₡)	Energía (₡)	Derecho de circulación (₡)	Revisión Técnica (₡)
1	100.252,80	129.158,30	15.927,35	100.252,80	136.304,49	15.927,35
2	101.255,33	124.664,74	16.723,72	101.255,33	131.025,60	16.723,72
3	102.267,88	120.440,76	17.559,90	102.267,88	126.251,48	17.559,90
4	103.290,56	117.599,57	18.437,90	103.290,56	122.137,81	18.437,90
5	104.323,47	115.085,19	19.359,79	104.323,47	119.376,19	19.359,79
6	105.366,70	112.875,27	20.327,78	105.366,70	116.942,79	20.327,78
7	106.420,37	110.949,06	21.344,17	106.420,37	114.815,36	21.344,17
8	107.484,57	109.287,34	22.411,38	107.484,57	112.973,26	22.411,38
9	108.559,42	108.240,36	23.531,95	108.559,42	110.847,16	23.531,95
10	109.645,01	107.769,21	24.708,55	109.645,01	109.893,97	24.708,55
Total	2.405.578,26			2.466.074,01		

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Costos de mantenimiento

Los costos de mantenimiento preventivo se definieron considerando el promedio entre las tarifas de establecidas por las Agencias Datsun (Nissan) y Grupo Q (Hyundai), para los automóviles eléctricos que cada una ofrece al mercado, específicamente el Nissan Leaf 2020 y Hyundai Ioniq 2020. La tarifa de mantenimiento corresponde a un de 77.000 colones para el Nissan Leaf mientras que para Hyundai Ioniq es de ₡57.116,07 (\$99), por lo que el costo de mantenimiento preventivo proyectado de los automóviles electro-convertidos para cada 10.000 km asciende a ₡70.000. En la tabla 32, se muestra la comparación de los costos de mantenimiento preventivo entre la versión convertida (EC) y con motor de combustión (CI).

Tabla 32. Costos proyectados de mantenimiento preventivo por distancia recorrida para el Nissan Tiida 2009 y Toyota Corolla 2020.

Año	Kilometraje del automóvil	Costos de mantenimiento preventivo (₡)			
		Nissan Tiida 2011 (EC)	Nissan Tiida 2011 (CI)	Toyota Corolla 2009 (EC)	Toyota Corolla 2009 (CI)
1	10.000	70.000	161.549,40	70.000	119.173
2	20.000	70.000	161.540,40	70.000	202.038
3	30.000	70.000	161.540,40	70.000	175.350
4	40.000	70.000	347.311,86	70.000	221.430
5	50.000	70.000	161.540,40	70.000	82.336
6	60.000	70.000	290.772,72	70.000	202.038
7	70.000	70.000	161.540,40	70.000	175.350
8	80.000	70.000	347.311,86	70.000	221.430
9	90.000	70.000	161.540,40	70.000	82.336
10	100.000	70.000	161.540,40	70.000	202.038
Total		700.000	2.116.179,24	700.000	1.683.519

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Los costos asociados con mantenimiento correctivo, en este caso relacionados con suspensión y frenos fueron consultados a un taller de mecánica automotriz, en el caso de los frenos su cambio tiene un precio de ₡100.000 cada 40.000 km, el cambio de suspensión un costo de ₡420.00 cada 80.000 km. De acuerdo con Kara et al., (2017) se estableció que la vida útil promedio de las llantas es de 30.000 km, lo que equivale a 3 años para este modelo, por lo tanto, se determinó que se incurrirá en un costo total por juego de llantas nuevas cada 3 años, de ₡178.600 para el Nissan Tiida y Toyota Corolla respectivamente.

Fase de disposición final

Para esta etapa se considera la venta o remate del automóvil, la definición del precio base en que será vendido el vehículo, se realizó aplicando los factores de depreciación establecidos en el Decreto No. 41997-H “Actualización de la lista de valores de vehículos, aeronaves y embarcaciones, así como los montos de valor y tasa mínima”. Tomando en consideración que el análisis se realizó para un período de 10 años el factor aplicado es de 0,457478 a la inversión de componentes y mano de obra, por lo que el precio de venta sería de 7.845.899 colones para ambos automóviles.

4.4.2 Resultados del modelo del ciclo de vida

A continuación, muestran los resultados del análisis del ciclo vida realizado para establecer la estructura de costos del proyecto de conversión eléctrica de cada automóvil, es importante destacar que la tasa de descuento utilizada para actualizar los flujos es del 2,16% correspondiente a la tasa de variación interanual de la inflación promedio entre los años 2018 y 2019 en Costa Rica, (Banco Central de Costa Rica, 2020).

Tabla 33. Estructura de Costos Nissan Tiida (EC).

Alternativa: Nissan Tiida 2011 electro-convertido											
Rubro	2020 Año 0	2021 Año 1	2022 Año 2	2023 Año 3	2024 Año 4	2025 Año 5	2026 Año 6	2027 Año 7	2028 Año 8	2029 Año 9	2030 Año 10
Costos iniciales (€)											
Componentes	15.419.541,17										
Mano de Obra	1.730.790										
Insc. Cambio de Características	60.500										
Cambio de placas	17.500										
Costos de operación y mantenimiento (€)											
Costos anuales de operación											
Costos energéticos		100.248	101.250,48	102.262,98	103.285,62	104.318,47	105.361,66	106.415,27	107.479,42	108.554,22	109.639,76
Costos por derecho de circulación		129.518,38	124.664,745	120.440,762	117.599,57	115.085,19	112.75,26	110.949,06	109.287,344	108.240,3567	107.769,21
Costos por Revisión Técnica		15.927	16.723,35	17.559,51	18.437,49	19.359,36	20.273,36	21.343,70	22.410,88	23.531,43	24.708,00
Costos anuales de mantenimiento											
Mantenimiento preventivo		70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000
Mant. Correctivo		0	0	178.600	100.000	0	178.600	0	520.000	178.600	0
Disposición Final (€)											
Venta o remate del automóvil		0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.845.899,20
FNE	-17.228.331,17	-315.693,38	-312.638,57	-488.863,26	-409.322,68	-308.763,03	-487.164,25	-308.708,03	-829.177,65	-488.926,01	7.533.782,23
FNE (actualizado)	-17.228.331,17	-309.018,58	-299.557,91	-458.505,71	-375.787,45	-277.473,09	-428.538,76	-265.816,38	-698.876,63	-403.380,76	6.084.219,34
VAN (Costo del ciclo de vida)		€14.661.076,10									

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016)

Tabla 34. Estructura de costos Toyota Corolla 2009 (EC).

Alternativa: Toyota Corolla 2009 electro-convertido											
Rubro	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Costos iniciales											
Componentes	15.419.541,17										
Mano de Obra	1.730.790										
Insc. Cambio de Características	60.500										
Cambio de placas	17.500										
Costos de operación y mantenimiento											
Costos anuales de operación											
Costos energéticos		100.248	101.250,48	102.262,98	103.285,62	104.318,47	105.361,66	106.415,27	107.479,42	108.554,22	109.639,76
Costos por derecho de circulación		136.304,49	131.025,59	126.251,47	122.137,81	119.376,19	116.942,79	114.815,36	112.973,26	110.847,16	109.893,96
Costos por Revisión Técnica		15.927	16.723,35	17.559,51	18.437,49	19.359,36	20.327,33	21.343,70	22.410,88	23.531,43	24.708,00
Costos anuales de mantenimiento											
Mantenimiento preventivo		70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	70.000
Mant. Correctivo		0	0	178.600	100.000	0	178.600	0	520.000	178.600	0
Disposición Final											
Venta o remate del automóvil		0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.845.899,20
FNE	-17.228.331,17	-322.479,50	-318.999,43	-494.673,98	-413.860,92	-313.054,03	-491.231,78	-312.574,34	-832.863,58	-491.532,82	7.531.657,469
FNE (actualizado)	-17.228.333,17	-315.661,21	-305.652,65	-463.955,59	-379.953,88	-281.329,24	-432.116,80	-269.145,50	-701.983,33	-405.531,47	6.082.494,40
VAN (Costo de ciclo de vida)		₡ 14.701.166,42									

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

A continuación, se muestra el resultado del análisis del costo de ciclo de vida, obtenido para cada automóvil a convertir, considerando dos posibles escenarios en adquisición o compra de los componentes para la conversión, los cuales corresponden a los repuestos afectados por todos los aranceles de importación, o con exoneración del Impuesto Selectivo de Consumo y el de Ventas, como plantea la Ley. 9518. En los apéndices 7 y 8, se muestra el costo considerando cada escenario. Se observa a partir de la tabla 35 la ventaja que se tendría con la exoneración de los repuestos, siendo, aproximadamente, 20 colones más barato el kilómetro recorrido.

Tabla 35. Costo del ciclo de vida en valor presente para el Nissan Tiida 2011 (EC), Toyota Corolla 2009 (EC), considerando exoneración de impuestos en repuestos.

Automóvil	Repuestos con impuestos		Repuestos exonerados	
	Costo Ciclo de Vida (€)	Costo por km recorrido (€)	Costo Ciclo de vida (€)	Costo por km recorrido (€)
Nissan Tiida 2011 (EC)	14.661.076	146,61	12.226.194	122,26
Toyota Corolla 2009 (EC)	14.701.166	147,01	12.693.661	126,94

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

En la tabla 36 se muestran los costos relacionados con la inversión inicial (adquisición), operación y mantenimiento totales, obtenidos del análisis de ciclo de vida, como se planteó en la figura 14 de la estructura de distribución de costos, en cuanto a los costos por inversión inicial se muestran los datos con los impuestos, esto considerando que el Reglamento que regula esta exoneración no ha sido publicado.

Tabla 36. Costo de cada etapa del ciclo de vida, para los automóviles eléctricos convertidos, con una distancia anual de 10.000 km, considerando los repuestos con impuestos.

Automóvil	Adquisición (€)	Operación (€)	Mantenimiento (€)	Disposición Final (€)	Costo Ciclo de Vida (€)	Costo por km recorrido (€)
Nissan Tiida 2011 (EC)	17.228.331	2.143.408	1.625.608	6.336.273	14.661.076	146,61
Toyota Corolla 2009 (EC)	17.228.331	2.183.499	1.625.608	6.336.273	14.701.166	147,01

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

De la tabla 36 se logró determinar que los costos de inversión son iguales para ambos automóviles, esto debido a las características de desempeño planteadas en el análisis de la dinámica longitudinal y elementos electromecánicos. En cuanto a los costos de operación se observó que estos son más elevados para el Toyota Corolla; la diferencia es de, aproximadamente € 40.090, esto se debe al pago del derecho de circulación, ya que para este vehículo a pesar de tener una mayor antigüedad que el Nissan Tiida, su valor fiscal es mayor.

4.5 Rentabilidad económica de electro-conversión

Para determinar la rentabilidad de electro-conversión de cada automóvil, se abarcó desde la perspectiva del análisis del ciclo de vida, a través de un modelo comparativo. Se desarrollaron dos casos de análisis, uno de ellos considera una distancia anual recorrida de 10.000 km determinado a partir del Registro de Consumo de Combustible para los automóviles en estudio proporcionado por GASEL (2020) y el otro la posibilidad de recorrer 20.000 km, el período de estudio establecido para ambos casos es de 10 años basado en la vida útil con la que cuentan las baterías de los automóviles eléctricos.

Para llevar a cabo el modelo de comparación, para el Nissan Tiida se seleccionó el modelo eléctrico ofrecido por la marca Nissan que corresponde al Leaf año 2020, en cuanto al de combustión se analizó el Versa Advance 2020 de la misma marca. Por otra parte, debido a que Toyota no ofrece al mercado opciones de automóviles eléctricos, se decidió contrastar con un Hyundai Ioniq 2020, además para continuar con el mismo modelo de automóvil se comparó con un Toyota Corolla modelo 2020.

4.5.1 Costo del ciclo de vida considerando una distancia anual recorrida de 10.000 km.

Fase de adquisición

Para esta etapa del análisis, se consideran los precios de venta establecidos por las agencias para cada automóvil. En la siguiente tabla se muestran los precios de cada uno. El tipo de cambio del dólar corresponde a ₡ 576,93 del 1/06/2020.

Tabla 37. Precio de adquisición de los automóviles, según agencia.

Automóvil	Tipo de motor	Precio (\$)	Precio (₡)
Nissan Leaf 2020	100% eléctrico	42.900	24.750.297
Hyundai Ioniq 2020	100% eléctrico	38.900	22.442.577
Nissan Versa 2020	Combustión interna	26.900	15.519.417
Toyota Corolla 2020	Combustión interna	26.900	15.519.417

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Fase de operación y mantenimiento

Para esta fase como su nombre lo indica, se cuantificaron los costos en los que se incurrirá por concepto de operación y mantenimiento a lo largo del ciclo de vida. En cuanto a los costos de operación, para los automóviles impulsados por energía eléctrica, se estableció el costo producto del requerimiento anual de electricidad para la recarga de las baterías, por otra parte, para los de combustión se estimó el gasto anual por consumo de combustible, además de los gastos por derecho de circulación y revisión técnica para ambos.

A lo que se refiere a costos de mantenimiento, estos se establecieron a través de las tarifas de mantenimiento de agencia, para cada automóvil, es importante destacar que de igual manera que para el análisis de ciclo de vida desarrollado para la electro-conversión, se tomaron en cuenta además costos relacionados con mantenimiento correctivo, tales como cambio de frenos cada 40.000 km con un costo aproximado de ¢100.000, cambio de compensadores cada 80.000 km con un precio que ronda los ¢420.000 esto es común ya sea para los automóviles eléctricos y de combustión, para estos últimos se consideraron también sustitución de la faja de distribución cada 60.000 km con un precio de ¢80.000 y limpieza del sistema de inyección cada 20.000 km con un costo de ¢100.000. Además, se incluyeron los costos derivados de la sustitución de llantas. Seguidamente, se explica a detalle los gastos calculados para la operación y el mantenimiento los automóviles.

Costos de operación

Los costos considerados para esta etapa del ciclo de vida corresponden al gasto por concepto de requerimiento energético anual para los automóviles eléctricos, para esto se utilizaron las tasas de rendimiento energético definidas por (EPA, 2020). Además, del consumo de combustible anual para los vehículos de combustión, para determinar el gasto en combustible se calculó una tarifa promedio desde el mes de enero 2019 a febrero 2020, de ¢634,79 para la gasolina superior y las tasas de rendimiento de combustible definidas por (EPA, 2020). También se incluyeron los gastos anuales correspondientes a la cancelación anual del derecho de circulación y revisión técnica.

Tabla 38. Costo anual por concepto de requerimiento de electricidad para los automóviles eléctricos Hyundai Ioniq 2020, Nissan Leaf 2020 y consumo de combustible para el automóvil de Toyota Corolla 2020 y Nissan Versa 2020.

Parámetro	Hyundai Ioniq 2020 (EC)	Nissan Leaf 2020 (VE)	Parámetro	Toyota Corolla 2020 (CI)	Nissan Versa 2020 (CI)
kWh/km	0,155	0,186	L/km	0,0729	0,0776
Km recorridos	10000	10000	km recorridos	10000	10000
kWh/año	1860	2232	Litros/año	729	776
Costo kWh	41,77	41,77	Costo litro	634,79	634,79
Costo total/año	Ⱶ77.692,20	Ⱶ93 230,64	Costo total/año	462.761,91	Ⱶ492 597,04

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Es importante destacar que la revisión técnica vehicular, se realizará con una periodicidad de cada 2 años, siempre y cuando la antigüedad del vehículo desde el año de fabricación sea igual o inferior a 5 años. Por lo tanto, para estos automóviles tanto de combustión como eléctricos, se someterán a revisión en el segundo, cuarto y sexto año de operación, a partir de este será anualmente.

Tabla 39. Costos de operación totales durante el ciclo de vida para los automóviles, Hyundai Ioniq 2020 (EV), Nissan Leaf 2020 (VE), Toyota Corolla 2020 (CI), Nissan Versa 2020 (CI) para una distancia anual recorrida de 10.000 km.

Parámetro	Hyundai Ioniq 2020 (VE)	Nissan Leaf 2020 (VE)	Toyota Corolla 2020 (CI)	Nissan Versa 2020 (CI)
Energía (Ⱶ)	812.832,31	975.398,77	5.305.046	5.647.073
Derecho de circulación (Ⱶ)	4.041.402,34	4.451.534,01	3.365.068	3.398.396
Revisión técnica (Ⱶ)	166.845,24	166.845,24	166.845,24	166.845,24
Costo Total (Ⱶ)	5.021.079	5.883.912	8.836.960	9.212.315

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Costos de mantenimiento

Las tareas de mantenimiento preventivo para los automóviles eléctricos mencionados se realizan cada 10.000 km de distancia recorrida, es importante destacar que los costos para cada período de mantenimiento se mantienen a una cuota fija, correspondiente a 77.000 colones para el Nissan Leaf, mientras que para el Hyundai Ioniq corresponde a Ⱶ57.116,07 (\$99), según Agencia Datsun (2020) y Grupo Q (2020) respectivamente.

Para el Nissan Versa, el mantenimiento preventivo se clasifica en dos tipos de revisiones, cada 5000 km corresponde a una revisión menor, en la cual se realiza el cambio de aceite al motor y filtro; cada 10000 km se ejecuta una revisión mayor.

Para el Toyota Corolla, en el momento de su compra se puede adquirir con un plan de mantenimiento de 4 años o 40.000 km (lo que suceda primero), el vehículo recibirá el servicio a los 1000, 10.000, 20.000, 30.000 y 40.000 km, este plan tiene un costo de ₡ 576.930 (\$1000). A partir de los 50.000 km, el plan de mantenimiento adquirido ya no tiene validez.

Tabla 40. Costos de mantenimiento preventivo según Agencia y correctivo para los automóviles Hyundai Ioniq 2020 (VE), Toyota Corolla 2020 (CI).

Distancia recorrida km	Año	Hyundai Ioniq 2020 (EV)		Toyota Corolla 2020 (CI)	
		Preventivo(₡)	Correctivo(₡)	Preventivo(₡)	Correctivo(₡)
100000	1	57.116,07		576.930	
	2	57.116,07			100.000
	3	57.116,07	179.948		179.948
	4	57.116,07	100.000		100.000
	5	57.116,07		64.763	
	6	57.116,07	179.948	158.832	180.000
	7	57.116,07		166.326	100.000
	8	57.116,07	520.000	174.563	520.000
	9	57.116,07	179.948	64.763	179.948
	10	57.116,07		158.832	100.000
Total		₡1 731 004,70		₡2 824 905,00	

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Tabla 41. Costos de mantenimiento preventivo según Agencia y correctivo para los automóviles Nissan Leaf 2020 (VE), Nissan Versa 2020 (CI).

Distancia recorrida km	Año	Nissan Leaf 2020 (EV)		Nissan Versa 2020 (CI)	
		Preventivo (€)	Correctivo (€)	Preventivo (€)	Correctivo (€)
100000	1	77.000		163.848,12	
	2	77.000		163.848,12	100.000
	3	77.000	179.948	163.848,12	179.948
	4	77.000	100.000	273.464,82	100.000
	5	77.000		163.848,12	
	6	77.000	179.948	293.080,44	180.000
	7	77.000		163.848,12	100.000
	8	77.000	520 000	273.464,82	520.000
	9	77.000	179 948	163.848,12	179.948
	10	77.000		163.848,12	100.000
Total		€1 929 844,00		€3 446 842,92	

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Disposición Final

Para esta fase final del ciclo de vida útil, se considera la venta o remate del automóvil, la definición del precio base en que será vendido el vehículo, se realizó aplicando los factores de depreciación establecidos en el Decreto No. 41997-H “Actualización de la lista de valores de vehículos, aeronaves y embarcaciones, así como los montos de valor y tasa mínima”. Tomando en consideración que el análisis se realizó para un período de 10 años el factor aplicado es de 0,457478; en la tabla, se muestran el precio de venta de cada vehículo considerado en el análisis que corresponde a un ingreso al final de la vida útil.

Tabla 42. Precio de venta, disposición final.

Automóvil	Precio Venta (€)
Nissan Leaf	11.322.720
Hyundai Ioniq	10.266,985
Nissan Versa	7.099.790
Toyota Corolla	7.099.790

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Resultados del análisis del ciclo de vida para una distancia recorrida anual de 10.000 km

En esta sección se muestran los resultados del modelo comparativo del costo de ciclo de vida realizado.

Como se había explicado, se realizó la comparación considerando automóviles de la marca Nissan en sus versiones eléctrico a convertir, eléctrico original y de combustión, en la siguiente tabla 43 se muestran el costo de ciclo de vida para cada uno de ellos.

Tabla 43. Costo de ciclo de vida, para los automóviles Nissan Tiida 2011 (EC), Nissan Leaf 2020 (VE), Nissan Versa 2020 (CI) para una distancia recorrida anual de 10.000 km.

Automóvil	Adquisición (₡)	Operación (₡)	Mantenimiento (₡)	Disposición Final (₡)	Costo Ciclo de Vida (₡)	Costo por km recorrido (₡)	Emisiones GEI (TON/CO ₂)
Nissan Tiida 2011 (EC)	17.228.331	2.143.408	1.625.608	6.336.273	14.661.076	146,61	0
Nissan Leaf 2020 (VE)	24.750.297	4.946.820	1.691.526	9.144.117	22.244.526	222,45	0
Nissan Versa 2020 (CI)	15.519.417	8.212.585	3.034.590	5.733.723	21.032.869	210,33	17,31

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

De los datos mostrados, se observa que la opción más rentable consiste en realizar la conversión eléctrica del automóvil, ya que presenta el menor costo de ciclo de vida útil con relación a las demás opciones. Es importante destacar que a pesar de que la inversión para llevar a cabo la conversión es bastante alta, inclusive superior en ₡ 1.708.914 al precio de compra del Nissan Versa 2020, los costos de operación y mantenimiento marcan la ventaja para el Nissan Tiida, estos se muestran en la tabla 42.

Tabla 44. Costos totales de operación y mantenimiento en valor presente para los automóviles de la marca Nissan, para una distancia recorrida de 10.000 km anuales.

Tipo de Costo	Nissan Tiida 2011 (EC) (€)	Nissan Leaf 2020 (VE) (€)	Nissan Versa 2020 (CI) (€)
Operación			
Energéticos	932.632,69	867.34840	5.004.198,95
Derecho de Circulación	1.033.852,16	3.934.607,56	3.063.521,82
Revisión técnica	176.924,12	144.864,77	144.864,77
Total	2.143.408,97	4.946.820,73	8.212.585,54
Mantenimiento			
Mant. Preventivo	623.549,57	685.904,53	1.766.242,06
Mant. Correctivo	1.002.059,41	1.005.621,63	1.268.348,54
Total	1.625.608,98	1.691.526,16	3.034.590,60
Costos totales operación y mantenimiento	3.769.017,95	6.638.346,89	11.247.176,13

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Como se puede determinar de la tabla 44, los costos totales de operación y mantenimiento del Nissan Tiida convertido son los más bajos. A lo que se refiere a los costos de operación, a pesar de que los gastos por consumo energético son mayores para el convertido con respecto al eléctrico, el primero tiene la ventaja de que el monto por concepto de Derecho de Circulación es mucho menor, debido al inferior valor fiscal que tiene por razón de antigüedad, lo que representa una ventaja.

En la tabla 44, se observa que el monto pagado por derecho de circulación es más elevado para el eléctrico comparado con el de gasolina, a pesar de contar con la exoneración gradual del impuesto a la propiedad, esto se debe al mayor valor fiscal.

De la misma manera, se realizó la comparación para el Toyota Corolla, este se comparó con un Hyundai Ioniq 2020 eléctrico y un Toyota Corolla 2020 de combustión, en la tabla 45, se muestran los resultados obtenidos del análisis de ciclo de vida realizado con el objetivo de determinar la mejor opción de inversión.

Tabla 45. Costo de ciclo de vida, en valor presente para el Toyota Corolla 2009 (EC) y del Hyundai Ioniq 2020 (VE), Toyota Corolla 2020 (CI), para una distancia recorrida de 10.000 km anuales.

Automóvil	Adquisición (₡)	Operación (₡)	Mantenimiento (₡)	Disposición Final (₡)	Costo Ciclo de Vida (₡)	Costo por km recorrido (₡)	Emisiones GEI (TON/CO ₂)
Toyota Corolla 2009 (EC)	17.228.331	2.183.499	1.625.608	6.336.273	14.701.166	147,01	0
Hyundai Ioniq 2020 (VE)	22.442.577	4.440.218	1.514.403	8.291.518	20.105.679	201,06	0
Toyota Corolla 2020 (CI)	16.096.347	8.096.013	1.938.317	5.733.723	20.396.954	203,97	16,26

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

De la tabla anterior, se determinó que la opción más rentable consiste en realizar la conversión eléctrica del Toyota Corolla 2009, ya que tiene el menos costo de ciclo de vida útil, con una diferencia de 5.404.513 colones con respecto al eléctrico, lo que demuestra que la conversión resulta ser una opción más económica.

Además, de la tabla 45, en cuanto a la comparación entre el eléctrico original y el de gasolina, se observa que resulta más rentable adquirir el Ioniq 2020 (VE) que el Corolla 2020 (CI), el costo varía en ₡ 291.275,00 siendo más barato el eléctrico, aunado a esto se suma el beneficio ambiental obtenido de las cero emisiones por parte del auto eléctrico.

De igual forma que para los vehículos Nissan, se determinó que la inversión inicial para la conversión es superior al precio de compra del Toyota Corolla 2020, sin embargo, la ventaja del automóvil a convertir se refleja a través de sus costos de operación y mantenimiento, como se muestra en la tabla 46.

Tabla 46.Costos de operación y mantenimiento en valor presente del Toyota Corolla 2009 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (VE) y Toyota Corolla 2020 (CI).

Tipo de Costo	Toyota Corolla (EC) 2009 (₡)	Hyundai Ioniq (VE) 2020 (₡)	Toyota Corolla (CI) 2020 (₡)
Operación			
Energéticos	932.632,69	722.790,33	4.701.109,58
Derecho de Circulación	1.073.942,47	3.572.563,52	3.250.039,54
Revisión técnica	176.924,12	144.864,77	144.864,77
Total	2.183.499,28	4.440.218,63	8.096.013,89
Mantenimiento			
Mant. Preventivo	623.549,57	508.781,44	669.969,06
Mant. Correctivo	1.002.059,41	1.005.621,63	1.268.348,54
Total	1.625.608,98	1.514.403,07	1.938.317,60
Costos totales operación y mantenimiento	3.809.108,26	5.954.621,70	10.034.331,49

Fuente: Elaboración propia, (Excel,2016).

De los resultados obtenidos del modelo comparativo del ciclo de vida, se logró determinar que la opción más rentable, consiste en realizar la electro-conversión de los automóviles estudiados, ya que presenta el menor costo a lo largo del ciclo de vida.

4.5.2 Costo del ciclo de vida considerando una distancia anual recorrida de 20.000 km.

Fase de adquisición

Para esta etapa del análisis, se consideran los precios de venta establecidos por las agencias para cada automóvil, estos son mostrados en la Tabla 37. “Precio de adquisición de los automóviles”.

Fase de operación y mantenimiento

Costos de operación

Los costos considerados para esta etapa del ciclo de vida corresponden al gasto por concepto de requerimiento energético anual para los automóviles eléctricos, ya sea original o convertido, además del consumo de combustible anual para los vehículos de combustión. También se incluyeron los gastos anuales correspondientes a la cancelación anual del derecho de circulación y revisión técnica.

En la tabla 47, se muestra el costo total anual referente al consumo energético para los automóviles eléctricos y consumo de combustible para el auto con motor de combustión interna, todos de la marca Nissan.

Tabla 47. Costo anual por concepto de requerimiento de electricidad para los automóviles eléctricos y consumo de combustible para el automóvil de combustión interna todos de la marca Nissan.

Parámetro	Nissan Tiida. 2009 (EC)	Nissan Leaf 2020 (VE)	Parámetro	Nissan Versa. 2020 (CI)
kWh/km	0,200	0,186	L/km	0,0776
Km recorridos	20000	20000	km recorridos	20000
kWh/año	4800	4464	Litros/año	1552
Costo kWh	41,77	41,77	Costo litro	634,79
Costo total/año	€200 496,00	€186 461,28	Costo total/año	€985 194,08

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

En la tabla 48, se muestra el costo total anual referente al consumo energético para los automóviles eléctricos Toyota Corolla 2009 (EC) y Hyundai Ioniq 2020 (VE) y consumo de combustible para el auto con motor de combustión interna Toyota Corolla 2020 (CI).

Tabla 48. Costo anual por concepto de requerimiento de electricidad para los automóviles eléctricos Toyota Corolla 2020 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (VE) y consumo de combustible para el Toyota Corolla 2020 (CI) para una distancia anual recorrida de 20.000 km.

Parámetro	Toyota Corolla 2009 (EC)	Hyundai Ioniq 2020 (VE)	Parámetro	Toyota Corolla 2020 (CI)
kWh/km	0,200	0,155	L/km	0,0729
Km recorridos	20000	20000	km recorridos	20000
kWh/año	4800	3720	Litros/año	1458
Costo kWh	41,77	41,77	Costo litro	634,79
Costo total/año	€200 496,00	€155 384,40	Costo total	€925 523,82

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

En la tabla 49, se muestran los costos totales de operación para los automóviles Toyota Corolla 2009 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (EV), Toyota Corolla 2020 (CI).

Tabla 49. Costos de operación totales durante el ciclo de vida para los automóviles Toyota Corolla 2009 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (EV), Toyota Corolla 2020 (CI) para una distancia anual recorrida de 20.000 km.

Parámetro	Toyota Corolla 2009 (EC)	Hyundai Ioniq 2020 (VE)	Toyota Corolla 2020 (CI)
Energía (€)	2.097.631,77	1.625.664	10.610.093
Derecho de circulación (€)	1.216.925	4.041.402	3.365.068
Revisión técnica (€)	200.332,50	166.845,24	166.845,24
Costo Total (€)	3.514.889	5.883.912	14.142.007

Fuente: Elaboración propia, (Excel,2016).

Tabla 50. Costos de operación totales durante el ciclo de vida para los automóviles Nissan Tiida 2011 (EC), Nissan Leaf 2020 (EV), Nissan Versa 2020 (CI), para una distancia anual recorrida de 20.000 km.

Parámetro	Nissan Tiida 2011 (EC)	Nissan Leaf 2020 (VE)	Nissan Versa 2020 (CI)
Energía (€)	2.097.631,77	1.950.797	11.294.146
Derecho de circulación (€)	1.156.429	4.451.534	3.398.396
Revisión técnica (€)	200.332,50	166.845,24	166.845,24
Costo Total (€)	3.454.394	6.569.176	14.859.338

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Costos de mantenimiento

Los costos de mantenimiento preventivo de igual manera se establecieron a partir de las tarifas fijadas por las Agencias Datsun (Nissan), Toyota, Grupo Q (Hyundai); para las tareas de mantenimiento correctivo estas fueron consultadas a un taller mecánico automotriz, para conocer al kilometraje que se realizan y su costo esto se muestra en la tabla 51.

Tabla 51. Costos de mantenimiento correctivo proyectados para los automóviles con una distancia anual recorrida de 20.000 km.

Año	Distancia recorrida (km)	Tarea de mantenimiento correctivo	Precio (€)
1	20.000	-	-
2	40.000	Limpieza de inyectores	100.000
		Cambio de frenos	100.000
3	60.000	Cambio de faja distribución	80.000
4	80.000	Cambio de suspensión	420.000
		Limpieza de inyectores	100.000
5	100.000	Cambio de frenos	100.000
6	120.000	Limpieza de inyectores	100.000
		Cambio de faja distribución	80.000
7	140.000	Cambio de frenos	100.000
8	160.000	Reconstrucción completa del motor (Overhaul)	1.500.000
		Cambio del sistema de inyección	430.000
		Suspensión	420.000
9	180.000	Cambio de frenos	100.000
10	200.000	Limpieza de inyectores	100.000
		Cambio de faja de distribución	80.000
Total			3.810.000

Fuente: Elaboración propia, con datos de (Quirós, 2020).

En la tabla 52, se muestran los gastos anuales proyectados por concepto de mantenimiento preventivo y correctivo para los automóviles de la marca Nissan.

Tabla 52. Costos anuales de mantenimiento preventivo según agencias y correctivo proyectados para los automóviles Nissan Tiida 2011 (EC), Nissan Leaf 2020 (EV), Nissan Versa 2020 (CI).

Distancia recorrida (km)	Año	Nissan Tiida 2011 (EC) (€)		Nissan Leaf 2020 (EV) (€)		Nissan Versa 2020 (CI) (€)	
		Preventivo	Correctivo	Preventivo	Correctivo	Preventivo	Correctivo
100000	1	134.116,07		154.000		327.696,24	
	2	134.116,07	100.000	154.000	100.000	437.312,94	200.000
	3	134.116,07	178.600	154.000	179.948	456.928,56	259.948
	4	134.116,07	420.000	154.000	420.000	437.312,94	520.000
	5	134.116,07	278.600	154.000	279.948	327.696,24	279.948
200000	6	134.116,07		154.000		437.312,94	180.000
	7	134.116,07	278.600	154.000	279.948	456.928,56	279.948
	8	134.116,07	420.000	154.000	420.000	437.312,94	2.350.000
	9	134.116,07	278.600	154.000	279.948	327.696,24	279.948
	10	134.116,07		154.000		437.312,94	180.000
Total		€3 295 560,70		€3 499 792,00		€8 613 302,54	

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

En la tabla 53, se muestran los gastos anuales proyectados por concepto de mantenimiento preventivo y correctivo para los automóviles Toyota Corolla 2009 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (EV), Toyota Corolla 2020 (CI).

Tabla 53. Costos anuales de mantenimiento preventivo según agencias y correctivo proyectados para los automóviles Toyota Corolla 2009 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (EV), Toyota Corolla 2020 (CI).

Distancia recorrida (km)	Año	Toyota Corolla 2009 (EC) (€)		Hyundai Ioniq 2020 (EV) (€)		Toyota Corolla 2020 (CI) (€)	
		Preventivo	Correctivo	Preventivo	Correctivo	Preventivo	Correctivo
100000	1	134.116		114.232,14		576.930	
	2	134.116	100.000	114.232,14	100.000		200.000
	3	134.116	178.600	114.232,14	179.948	223.595	259.948
	4	134.116	420.000	114.232,14	420.000	340.889	520.000
	5	134.116	278.600	114.232,14	279.948	223.595	279.948
200000	6	134.116		114.232,14		340.889	180.000
	7	134.116	278.600	114.232,14	279.948	223.595	279.948
	8	134.116	420.000	114.232,14	420.000	340.889	2.350.000
	9	134.116	278.600	114.232,14	279.948	223.595	279.948
	10	134.116		114.232,14		340.889	180.000
Total		€3 295 560,70		€3 102 113,40		€7 364 658,00	

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Disposición Final

Para esta etapa del ciclo de vida, se consideró el desecho de los automóviles y la venta de la batería de tracción para un segundo uso. De acuerdo con Kara et al., (2017) el valor de desecho de un automóvil corresponde a un 0,3% del monto en que fue adquirido, para el precio de la batería se toma como referencia el mismo autor que indica un precio de \$5/kg. En las tablas 54 y 55 se muestran los ingresos proyectados producto del desecho de los automóviles y venta de la batería.

Tabla 54. Valor de desecho para los automóviles Nissan Tiida 2011 (EC), Nissan Leaf 2020 (EV), Nissan Versa 2020 (CI).

Rubro	Nissan Tiida 2011 (EC)	Nissan Leaf 2020 (VE)	Nissan Versa 2020 (CI)
Valor de chatarra (€)	51.450,99	74.250,891	465.58,251
Valor segundo uso baterías (€)	739.912,73	848.087,1	-
Total (€)	791.363,72	922.337,991	465.58,25

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Tabla 55. Valor de desecho para los automóviles Toyota Corolla 2009 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (EV), Toyota Corolla 2020 (CI).

Rubro	Toyota Corolla 2009 (EC)	Hyundai Ioniq 2020 (VE)	Toyota Corolla 2020 (CI)
Valor de chatarra (€)	51.450,99	67.327,73	46.558,25
Valor segundo uso baterías (€)	739.912,73	848.087,10	-
Total (€)	791.363,72	915.414,83	46.558,25

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Resultados del análisis del ciclo de vida para una distancia recorrida anual de 20.000 km

En las siguientes tablas 56 y 57 se exponen los resultados del análisis del ciclo de vida, para una distancia anual de 20.000 km, de ellas se concluye que la mejor opción de inversión corresponde a la conversión de los automóviles, además se determinó que resulta más rentable adquirir un automóvil eléctrico original que uno de combustión, esto se debe a los costos inferiores en mantenimiento y operación.

Tabla 56. Costo del ciclo de vida en valor presente para los automóviles Toyota Corolla 2009 (EC), Hyundai Ioniq 2020 (EV), Toyota Corolla 2020 (CI), con una distancia anual recorrida de 20.000 km.

Automóvil	Adquisición (€)	Operación (€)	Mantenimiento (€)	Disposición Final (€)	Costo Ciclo de Vida (€)	Costo por km recorrido (€)	Emisiones GEI (TON/CO ₂)
Toyota Corolla 2009 (EC)	17.228.331	3.116.131	2.917.713	639.097	22.623.078	113,12	0
Hyundai Ioniq 2020 (VE)	22.442.577	5.163.008	2.745.338	739.280	29.611.644	148,06	0
Toyota Corolla 2020 (CI)	16.096.347	12.797.123	5.883.940	37.600	34.739.811	173,70	32,53

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Tabla 57. Costo del ciclo de vida en valor presente para los automóviles Nissan Tiida 2009 (EC), Nissan Leaf 2020 (EV), Nissan Versa 2020 (CI), con una distancia anual recorrida de 20.000 km.

Automóvil	Adquisición (€)	Operación (€)	Mantenimiento (€)	Disposición Final (€)	Costo Ciclo de Vida (€)	Costo por km recorrido (€)	Emisiones GEI (TON/CO ₂)
Nissan Tiida 2011 (EC)	17.228.331	3.076.041	2.917.713	639.097.	22.582.988	112,91	0
Nissan Leaf 2020 (VE)	24.750.297	5.814.169	2.413.680	744.871	32.233.275	161,17	0
Nissan Versa 2020 (CI)	15.519.417	13.216.784	7.555.408	37.600	36.254.009	181,27	34,63

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- 1- Se definieron los elementos electromecánicos para la conversión eléctrica de los automóviles Nissan Tiida 2011 y Toyota Corolla 2009 de la Unidad de Transportes del Tecnológico de Costa Rica, a través de un análisis dinámico con la métrica de 0,0352 kW/kg para el Tiida y 0,0373 kW/kg para el Corolla.
- 2- Se precisó la tramitología legal para la conversión eléctrica de los automóviles Nissan Tiida 2011 y Toyota Corolla 2009 de la Unidad de Transportes del Tecnológico de Costa Rica, correspondientes a RTV cambio de características, Inscripción de cambio de motor y sustitución de placas en el Registro Nacional.
- 3- Se estableció la estructura de costos para la electro-conversión de los automóviles Nissan Tiida 2011 y Toyota Corolla 2009 de la Unidad de Transportes del Tecnológico de Costa Rica a través de la norma UNE-EN 60300-3-3:2009, con los indicadores de 146,61 ¢/km y 147,01 ¢/km, respectivamente.
- 4- Se determinó la rentabilidad económica de electro-conversión de los automóviles de la Unidad de Transportes del Tecnológico de Costa Rica. El Nissan Tiida presenta el mejor indicador de 146,61 ¢/km frente al Nissan Leaf con 222,45 ¢/km y Versa con 210,33 ¢/km; en cuanto al Toyota Corolla presenta un mejor indicador de 147,01 ¢/km frente al Hyundai Ioniq con 201,06 ¢/km y Corolla 2020 con 203,97 ¢/km.

Recomendaciones

- 1- Ejecutar la electro-conversión del automóvil, luego de que el Reglamento que regula la exoneración de los impuestos Selectivo de Consumo (SC) y el de Ventas, sea publicado, ya que esto impacta positivamente en costo del ciclo de vida.
- 2- Seleccionar un motor eléctrico para el automóvil a convertir que no entregue un par mayor al torque máximo del motor de combustión original, si este se excede en pequeña proporción, debe ajustarse mediante el controlador, esto con el fin de evitar daños en los componentes que entregan potencia a las ruedas.
- 3- Evitar descargar la batería más allá del 80% de su capacidad, esto con el fin de alargar su vida útil y garantizar su óptimo funcionamiento, para esto se debe monitorear constantemente el indicador de carga.
- 4- Realizar un chequeo anual de las baterías de tracción mediante escaneo a través del protocolo OBD-2 con el que cuenta la unidad de gestión de energía, esto con el objetivo de verificar el correcto estado del paquete de baterías, ya que este elemento es crítico en el sistema.
- 5- Llevar un registro del consumo energético, derivado de la recarga de baterías, esto para conocer el rendimiento energético real del automóvil electro-convertido y permita la toma de decisiones.

Capítulo 6. Bibliografía

- da Silva, J. E., & Urbanetz, J. (2018). *Converting a Conventional Vehicle into an Electric Vehicle (EV)*.
- Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S., & Emadi, A. (2004). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: fundamentals, theory and design* (Primera ed.). CRC Press. Taylor and Francis group.
- Kaleg, S., Hapid, A., & Redho, M. (2014). *Electric vehicle conversion based on distance, speed and cost requirements*.
- Kara, S., Li, W., & Sadjiva, N. (2017). *Life Cycle Cost Analysis of Electrical Vehicles in Australia*.
- Katić, V., Dumnić, B., Čorba, Z., & Milićević, D. (2014). *Electrification of the vehicle propulsion system an overview*.
- Lairenlakpam, R., & Kumar, P. (s.f.). *Electric Conversion of a Polluting Gasoline Vehicle into an Electric Vehicle and its Performance and Drive Cycle Analysis*.
- Navarro, A., Ortúzar, R., & Alcaraz, F. (2015). *La viabilidad del coste del ciclo de vida para la evaluación económica de inversiones militares*.
- Pedrosa, D., Monteiro, V., Gonçalves, H., Martins, J., & Afonso, J. (2014). *A Case Study on the Conversion of an Internal Combustion Engine Vehicle into an Electric Vehicle*.
- Tabbache, B., Djebbari, S., Kheloui, A., & Benbouzid, M. (2013). *A Power Presizing Methodology for Electric Vehicle Traction Motors*.
- Ukaew, A. (2017). *Model Based System Design for Electric Vehicle Conversion*.
- Vražić, M., Vuljaj, D., Pavasovi, A., & Paukovi, H. (2014). *Study of a Vehicle Conversion from Internal Combustion Engine to Electric Drive*.
- Xin, X., & Chengninga, Z. (2016). *Optimal Design of Electric Vehicle Power System with the Principle of Minimum Curb Mass*.
- Agencia Datsun. (2020). *Tarifas del Servicio*. Obtenido de <https://www.citaservicio.com/tarifas.php>
- ARESEP. (2020). *Tarifas eléctricas 2013 a 2019*. Obtenido de https://aresep-my.sharepoint.com/:x/g/personal/multimedia_aresep_go_cr/ET6L4k-

QyphAgLpEwSYeNegBbLvOGM7mF0n2vZxId_SGeQ

- ARESEP. (2020). *Tarifas para el servicio de la Revisión Técnica Vehicular -RTV-*. Obtenido de <https://aresep.go.cr/transparencia/datos-abiertos/tarifas-historicas-revision-tecnica-vehicular-rtv>
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (4 de octubre de 2012). Ley No. 9078, Tránsito por Vías Públicas Terrestres y Seguridad Vial. San José, Costa Rica.
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (10 de abril de 2018). Decreto No. 41092-MINAE-H-MOPT, Reglamento de incentivos para el transporte eléctrico. San José, Costa Rica.
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (7 de noviembre de 2018). Decreto No. 41426-H-MINAE-MOPT, Incentivos para vehículos eléctricos usados. San José, Costa Rica.
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (25 de enero de 2018). Ley No. 9518, Incentivos y promoción para el transporte eléctrico. San José, Costa Rica.
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (27 de febrero de 2019). Decreto No. 41580-MJ-MINAE- MOPT, Reglamento de distintivos para vehículos eléctricos. San José, Costa Rica.
- Asociación Española de Normalización Comité Técnico AEN/CTN 200. (2009). *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-3 Guía de aplicación. Cálculo del Coste del ciclo de vida. Norma Española UNE-EN-60300-3-3*.
- Association for the Promotion of Electric Vehicles. (2011). *Guidelines for Converted Electric Vehicles*.
- Astúa, M. (31 de 03 de 2020). Requisitos de aprobación Revisión Técnica. (A. Chacón, Entrevistador)
- Banco Central de Costa Rica. (2020). *Índice de precios del consumidor*.
- Baranda, Á. (2012). *Conversión de un vehículo tradicional dotado de motor de combustión a eléctrico puro*.
- Blank, L., & Tarquin, A. (2012). *Ingeniería Económica* (Séptima ed.). México, D.F: McGraw-Hill.
- Castrillo, J. J. (2019). *Informe Anual de Ventas 2018*.
- Consejo de Seguridad Vial. (2019). *Manual de procedimientos para la revisión técnica de*

- vehículos automotores en las estaciones de RTV.*
- Contabilidad Nacional. (2009). *Valoración, Renovación, Depreciación de la Propiedad, Planta y Equipo.*
- EPA. (2020). *EPA Fuel Economy.* Obtenido de <https://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=41215>
- EV West. (2020). *Miscellaneous EV Parts.* Obtenido de https://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=41&products_id=345&osCsid=15i4atu16fugpd9k1nltukomj1
- Gujarathi, P., Shah, V., & Lokhande, M. (2018). *Cost Analysis for Conversion of Conventional Vehicle into Plug-In Hybrid Electric Vehicle.*
- Haritha, M., & Sridhar, P. (2018). *Economic Conversion of Gasoline Cars into Electric Cars with BMS.*
- Helmets, E., & Marx, P. (2014). *Electric cars: technical characteristics and environmental impacts.*
- HPEVS . (2020). *HPEVS AC Electric Motor Drive Systems (AC-50/AC-51).* Obtenido de <https://www.hpevs.com/hpevs-ac-electric-motors-ac50-ac51-for-automotive-mining-utility-ground-support-vehicles.htm>
- Instituto Meteorológico Nacional. (2019). *Factores de emisión de gases efecto invernadero.*
- ISecCars. (2020). *2011 Nissan Versa Specs.* Obtenido de <https://www.iseecars.com/car/2011-nissan-versa-specs>
- Koeva, D., Dimitrov, L., & Rachev , S. (2018). *Features upon converting a conventional car into an electric car.*
- Leitman, S., & Bob, B. (2009). *Build your own electric vehicle* (Segunda ed.). McGraw-Hill. doi:10.1036/0071543732
- Mahmoudi, C., Flah, A., & Sbita, L. (2014). *An overview of electri vehicle concept and power management strategies.*
- Medina, A. (12 de 3 de 2020). Porcentaje de pendiente en las carreteras. (A. Chacón, Entrevistador)
- MIDEPLAN. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo y de Inversión Pública del Bicentenario.*
- MINAE. (2015). *VII Plan Nacional de Energía 2015-2030.*
- MINAE. (2018). *Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050.*

- MINAE. (2019). *Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030*.
- Ministerio de Hacienda. (2008). *Instructivo de cálculo obligación tributaria*. Obtenido de https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https://www.hacienda.go.cr/docs/51cb54ee940fd_INSTRUCTIVOCALCULOBLIGACIONTRIBUTARIA2008.doc
- Ministerio de Hacienda. (8 de octubre de 2019). Decreto No. 41997-H, Actualización de la lista de valores de vehículos, aeronaves y embarcaciones, así como los montos de valor y tasa mínima. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Justicia y Paz. (17 de octubre de 2018). Decreto N° 41457 -JP, Arancel de Honorarios por servicios profesionales de abogacía y notariado. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (6 de marzo de 2002). Decreto No.30184-MOPT, Reglamento para la Revisión Técnica Integral de Vehículos Automotores que circulen por las vías públicas. San José, Costa Rica.
- Nissan. (2010). *Tiida Manual del Conductor*.
- Orion BMS. (2019). *Standard features*. Obtenido de <https://www.orionbms.com/features/basic-features/>
- Orion BMS. (2019). *Strings, Parallel Cells, and Parallel Strings*. Obtenido de https://www.orionbms.com/manuals/pdf/parallel_strings.pdf
- Porselvi, T., Srihariharan , M., Ashok, J., & Ajith, S. (2017). *Selection of Power Rating of an Electric Motor for Electric Vehicles*.
- Purdy Motor. (2020). *Tarifas de Mantenimiento*.
- Quesada, C. (2020). *Vehículos Institucionales*.
- Quirós, A. (23 de Julio de 2020). Costos de mantenimiento para un automóvil de combustión y eléctrico. (A. Chacón , Entrevistador)
- Rajamani, R. (2006). *Vehicle Dynamics and Control*. New York: Springer.
- Ranpariya, A., Shah , B., Salecha, R., Shah, V., & Sharma, P. (2019). *Optimization of Required Power for an Electric Vehicle*.
- RECOPE. (2017). *Poderes Calóricos de algunos Combustibles*. Obtenido de <https://www.recope.go.cr/productos/sistema-de-calidad/poderes-caloricos-de-algunos-combustibles/>
- RECOPE. (2019). *Manual de productos 2019*.

- RECOPE. (2020). *Precio de las gasolinas y el diésel 2011-2020*. Obtenido de <https://www.recope.go.cr/productos/precios-nacionales/historicos/>
- Registro Nacional. (2020). *Cambio de Motor, DIO-014*.
- Registro Nacional. (2020). *Solicitudes de placas o del Documento de Identificación Adicional por Deterioro, DIO-04*.
- Salazar, E., Arroyave, J., & Vásquez, A. (2016). *Diseño y construcción de un vehículo solar híbrido*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Sapag, N., & Sapag, R. (2008). *Preparación y Evaluación de Proyectos* (Quinta ed.). Bogotá: McGraw-Hill.
- Sapundzhiev, M., Evtimov, I., & Ivanov, R. (2017). *Determination of the needed power of an electric motor on the basis of acceleration time of the electric car*.
- Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA). (2011). *Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras con Enfoque de Gestión de Riesgo y Seguridad Vial*.
- Tecnológico de Costa Rica. (2019). *Qué es el TEC*. Obtenido de <https://www.tec.ac.cr/que-es-tec>
- Toyota Motor Corporation. (2008). *Corolla Manual del Producto*.
- Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral (GASEL). (2020). *Registro de consumo de combustible de la flotilla Institucional*.
- Utgård, B. (2017). *Esencialmente eléctrica: Cómo puede abanderar Costa Rica la movilidad eléctrica*.
- Utgård, B., & Bermúdez, E. (2016). *Distributed Energy Innovation, International best practices and four proposals for Costa Rica*.
- Vidyanandan, K. (2019). *Batteries for Electric Vehicles*.
- Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia* (Sexta ed.). México: Pearson Educación.
- Young, H., & Freeman, R. (2009). *Física Universitaria* (Decimosegunda ed., Vol. 1). México: Pearson Educación.
- Zárate, D., & Ramírez, R. (2016). *Matriz energética de Costa Rica, renovabilidad de las fuentes y reversibilidad de los usos de energía*.
- ZEVA. (2020). *Smart Precharger*. Obtenido de <https://evwest.com/support/SmartPrechargerV1->

3.pdf

Apéndices

Apéndice 1. Memoria de cálculo análisis dinámico del Nissan Tiida 2011

Parámetros relacionados con el movimiento del automóvil

Masa estimada con baterías (m): 1710 kg.

Área frontal (s): $0,8 \cdot 1,695 \cdot 1,556 = 2,11 \text{ m}^2$.

Coefficiente aerodinámico: (Cx): 0,31.

Aceleración de la gravedad (g): $9,81 \text{ m/s}^2$.

Densidad del aire (ρ): $1,225 \text{ kg/m}^3$.

Coefficiente de rodadura (Cr): 0,013.

Escenario velocidad máxima

Condiciones:

Masa: 1710 kg

Velocidad máxima: $145 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 40,28 \text{ m/s}$

Inclinación: 0%

Aceleración: 0 m/s^2

Cálculo de las fuerzas resistivas en el movimiento del automóvil

- Fuerza rodadura (Fr)= $0,013 \cdot 1710 \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = 218,08 \text{ N}$.
- Fuerza aerodinámica (Fa)= $\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,31 \cdot 40,28^2 \cdot 2,11 = 649,93 \text{ N}$.
- Fuerza de pendiente (Fp)= 0 N .

- Fuerza inercial: (Fac)= **0 N**.

Cálculo de la fuerza de tracción

- Fuerza tracción (Ft)= $Ft = Fr + Fa + Fp + Fac$

$$Ft = 218,08 + 649,93 + 0 + 0 = \mathbf{868,01 N}$$

Cálculo de potencia y torque a las ruedas del automóvil

- Potencia (P_{ruedas})= $\frac{868,01 \cdot 40,28}{1000} = \mathbf{34,96 kW}$
- Potencia (P_{ruedas})= $34,96 kW \times \frac{1 HP}{0,746 kW} = \mathbf{46,87 HP}$
- Velocidad de las ruedas (RPM $_{ruedas}$)= $\frac{V \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot Rd} = \frac{40,28 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0,31075} = \mathbf{1237,73 RPM}$
- Torque (Torque $_{ruedas}$)= $\frac{P (W)}{\omega_{rueda} \left(\frac{rad}{s}\right)} = \frac{34960 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 1237,73} = \mathbf{269,73 Nm}$

Escenario de aceleración en pendiente máxima

Condiciones:

Masa: 1710 kg.

$$\text{Velocidad máxima: } 40 \frac{km}{h} \times \frac{1000 m}{1 km} \times \frac{1 h}{3600 s} = \mathbf{11,11 m/s}$$

$$\text{Inclinación: } 16\% \rightarrow \tan^{-1} \left(\frac{16}{1000} \right) = \mathbf{0,1587 rad}$$

Tiempo de aceleración: 13,5 s.

$$\text{Aceleración} = \frac{V_f - V_i}{t} = \frac{11,11 - 0}{13,5} = \mathbf{0,8230 m/s^2}$$

Cálculo de las fuerzas resistivas en el movimiento del automóvil

- Fuerza rodadura (F_r)= $0,013 \cdot 1710 \cdot 9,81 \cdot \cos(0,1587) = \mathbf{215,34 N}$.
- Fuerza aerodinámica (F_a)= $\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,31 \cdot 11,11^2 \cdot 2,11 = \mathbf{49,45 N}$.
- Fuerza de pendiente (F_p)= $1710 \cdot 9,81 \cdot \text{sen}(0,1587) = \mathbf{2650,31 N}$.
- Fuerza inercial: (F_{ac})= $1710 \cdot 0,8230 = \mathbf{1407,33 N}$.

Cálculo de la fuerza de tracción

- Fuerza tracción (F_t)= $F_t = F_r + F_a + F_p + F_{ac}$

$$F_t = 215,34 + 49,95 + 2650,31 + 1407,33 = \mathbf{4322,51 N}$$

Cálculo de potencia y torque a las ruedas del automóvil

- Potencia (P_{ruedas})= $\frac{4322,51 \cdot 11,11}{1000} = \mathbf{48,03 kW}$
- Potencia (P_{ruedas})= $48,03 kW \times \frac{1 HP}{0,746 kW} = \mathbf{64,38 HP}$
- Velocidad de las ruedas (RPM_{ruedas})= $\frac{V \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot R_d} = \frac{11,11 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0,31075} = \mathbf{341,44 RPM}$
- Torque ($Torque_{ruedas}$)= $\frac{P (W)}{\omega_{rueda} \left(\frac{rad}{s}\right)} = \frac{48030 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 341,44} = \mathbf{1343,22 Nm}$

Escenario de aceleración en carretera llana

Condiciones:

Masa: Se considera la masa en vacío del automóvil convertido + la masa del conductor. La masa en vacío del auto sin convertir es de 1141 kg, la masa de los elementos desinstalados que corresponde al motor, sistemas de admisión, escape, refrigeración, tanque de combustible es de aproximadamente 253,62 kg, además la masa correspondiente al combustible se determinó a partir de la capacidad del tanque y la densidad de la gasolina, como se muestra a continuación $0,05 \text{ m}^3 \cdot 744,44 \text{ (kg/m}^3\text{)} = 37,22 \text{ kg}$, por lo que la masa total retirada es de aproximadamente 290,84 kg, la masa de los componentes a instalar para la conversión es de 360 kg.

$$Masa_{auto\ convertido} = Masa_{vacío\ original} - (Masa_{Comp.comb} + Masa_{comb}) + Masa_{componentes}$$

$$Masa_{auto\ convertido} = 1141 - (253,62 + 37,22) + 360$$

$$Masa_{auto\ convertido} = 1210 \text{ kg}$$

Por lo que la masa para el análisis del escenario corresponde a: $m = 1210 \text{ kg} + 80 \text{ kg} = \mathbf{1290 \text{ kg}}$.

Aceleración de 0 a 60 km/h

$$\text{Velocidad máxima: } 60 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = \mathbf{16,67 \text{ m/s}}$$

Inclinación: 0%

Tiempo de aceleración: 7,49 s.

$$\text{Aceleración} = \frac{V_f - V_i}{t} = \frac{16,67 - 0}{7,49} = \mathbf{2,2252 \text{ m/s}^2}$$

Cálculo de las fuerzas resistivas en el movimiento del automóvil

- Fuerza rodadura (F_r) = $0,013 \cdot 1290 \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = \mathbf{164,53 \text{ N}}$.
- Fuerza aerodinámica (F_a) = $\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,31 \cdot 16,67^2 \cdot 2,11 = \mathbf{111,28 \text{ N}}$.

- Fuerza de pendiente (Fp)= **0 N**.
- Fuerza inercial: (Fac)= $1290 \cdot 2,2252 = \mathbf{2870,84 N}$.

Cálculo de la fuerza de tracción

- Fuerza tracción (Ft)= $F_t = F_r + F_a + F_p + F_{ac}$

$$F_t = 164,53 + 111,28 + 0 + 2870,84 = \mathbf{3146,66 N}$$

Cálculo de potencia y torque a las ruedas del automóvil

- Potencia (P_{ruedas})= $\frac{3146,66 \cdot 16,67}{1000} = \mathbf{52,44 kW}$
- Potencia (P_{ruedas})= $52,44 kW \times \frac{1 HP}{0,746 kW} = \mathbf{70,30 HP}$
- Velocidad de las ruedas (RPM_{ruedas})= $\frac{V \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot R_d} = \frac{16,67 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0,31075} = \mathbf{512,16 RPM}$
- Torque (Torque_{ruedas})= $\frac{P (W)}{\omega_{rueda} \left(\frac{rad}{s}\right)} = \frac{52440 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 512,16} = \mathbf{977,82 Nm}$

Aceleración de 60 a 100 km/h

$$\text{Velocidad máxima: } 100 \frac{km}{h} \times \frac{1000 m}{1 km} \times \frac{1 h}{3600 s} = \mathbf{27,78 m/s}$$

Inclinación: 0%

Tiempo de aceleración: 9,57 s.

$$\text{Aceleración} = \frac{V_f - V_i}{t} = \frac{27,78 - 16,67}{9,57} = \mathbf{1,1610 m/s^2}$$

Cálculo de las fuerzas resistivas en el movimiento del automóvil

- Fuerza rodadura (Fr)= $0,013 \cdot 1290 \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = \mathbf{164,53 N}$.

- Fuerza aerodinámica (F_a)= $\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,31 \cdot 27,78^2 \cdot 2,11 = \mathbf{309,12 N}$.
- Fuerza de pendiente (F_p)= $\mathbf{0 N}$.
- Fuerza inercial: (F_{ac})= $1290 \cdot 1,1610 = \mathbf{1497,92 N}$.

Cálculo de la fuerza de tracción

- Fuerza tracción (F_t)= $F_t = F_r + F_a + F_p + F_{ac}$

$$F_t = 164,53 + 309,12 + 0 + 1497,92 = \mathbf{1971,57 N}$$

Cálculo de potencia y torque a las ruedas del automóvil

- Potencia (P_{ruedas})= $\frac{1971,57 \cdot 27,78}{1000} = \mathbf{54,77 kW}$
- Potencia (P_{ruedas})= $54,77 kW \times \frac{1 HP}{0,746 kW} = \mathbf{73,41 HP}$
- Velocidad de las ruedas (RPM_{ruedas})= $\frac{V \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot R_d} = \frac{27,78 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0,31075} = \mathbf{853,61 RPM}$
- Torque ($Torque_{ruedas}$)= $\frac{P (W)}{\omega_{rueda} \left(\frac{rad}{s}\right)} = \frac{54770 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 853,61} = \mathbf{612,67 Nm}$

Apéndice 2. Memoria de cálculo análisis dinámico del Toyota Corolla 2009

Parámetros relacionados con el movimiento del automóvil

Masa estimada con baterías (m): 1695kg.

Área frontal (s): $0,8 \cdot 1,760 \cdot 1,465 = 2,06 \text{ m}^2$.

Coefficiente aerodinámico: (Cx): 0,29.

Aceleración de la gravedad (g): $9,81 \text{ m/s}^2$.

Densidad del aire (ρ): $1,225 \text{ kg/m}^3$.

Coefficiente de rodadura (Cr): 0,013.

Escenario velocidad máxima

Condiciones:

Masa: 1695 kg

Velocidad máxima: $145 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 40,28 \text{ m/s}$

Inclinación: 0%

Aceleración: 0 m/s^2

Cálculo de las fuerzas resistivas en el movimiento del automóvil

- Fuerza rodadura (Fr)= $0,013 \cdot 1695 \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = 216,16 \text{ N}$.
- Fuerza aerodinámica (Fa)= $\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,29 \cdot 40,28^2 \cdot 2,06 = 594,40 \text{ N}$.
- Fuerza de pendiente (Fp)= 0 N .

- Fuerza inercial: (Fac)= **0 N**.

Cálculo de la fuerza de tracción

- Fuerza tracción (Ft)= $Ft = Fr + Fa + Fp + Fac$

$$Ft = 216,16 + 594,40 + 0 + 0 = \mathbf{810,56 N}$$

Cálculo de potencia y torque a las ruedas del automóvil

- Potencia (P_{ruedas})= $\frac{810,56 \cdot 40,28}{1000} = \mathbf{32,65 kW}$
- Potencia (P_{ruedas})= $32,56 kW \times \frac{1 HP}{0,746 kW} = \mathbf{43,76 HP}$
- Velocidad de las ruedas (RPM $_{ruedas}$)= $\frac{V \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot Rd} = \frac{40,28 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0,31725} = \mathbf{1212,37 RPM}$
- Torque (Torque $_{ruedas}$)= $\frac{P (W)}{\omega_{rueda} \left(\frac{rad}{s}\right)} = \frac{32650 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 1212,37} = \mathbf{257,15 Nm}$

Escenario de aceleración en pendiente máxima

Condiciones:

Masa: 1695 kg.

$$\text{Velocidad máxima: } 40 \frac{km}{h} \times \frac{1000 m}{1 km} \times \frac{1 h}{3600 s} = \mathbf{11,11 m/s}$$

$$\text{Inclinación: } 16\% \rightarrow \tan^{-1} \left(\frac{16}{1000} \right) = \mathbf{0,1587 rad}$$

Tiempo de aceleración: 13,5 s.

$$\text{Aceleración} = \frac{V_f - V_i}{t} = \frac{11,11 - 0}{13,5} = \mathbf{0,8230 m/s^2}$$

Cálculo de las fuerzas resistivas en el movimiento del automóvil

- Fuerza rodadura (F_r)= $0,013 \cdot 1695 \cdot 9,81 \cdot \cos(0,1587) = \mathbf{213,45 N}$.
- Fuerza aerodinámica (F_a)= $\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,29 \cdot 11,11^2 \cdot 2,06 = \mathbf{45,23 N}$.
- Fuerza de pendiente (F_p)= $1695 \cdot 9,81 \cdot \text{sen}(0,1587) = \mathbf{2627,06 N}$.
- Fuerza inercial: (F_{ac})= $1695 \cdot 0,8230 = \mathbf{1395,06N}$.

Cálculo de la fuerza de tracción

- Fuerza tracción (F_t)= $F_t = F_r + F_a + F_p + F_{ac}$

$$F_t = 213,45 + 45,23 + 2627,06 + 1395,06 = \mathbf{4280,80 N}$$

Cálculo de potencia y torque a las ruedas del automóvil

- Potencia (P_{ruedas})= $\frac{4280,80 \cdot 11,11}{1000} = \mathbf{47,56 kW}$
- Potencia (P_{ruedas})= $47,56 kW \times \frac{1 HP}{0,746 kW} = \mathbf{63,76 HP}$
- Velocidad de las ruedas (RPM_{ruedas})= $\frac{V \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot R_d} = \frac{11,11 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0,31725} = \mathbf{334,45 RPM}$
- Torque ($Torque_{ruedas}$)= $\frac{P (W)}{\omega_{rueda} \left(\frac{rad}{s}\right)} = \frac{47560 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 334,45} = \mathbf{1358,08 Nm}$

Escenario de aceleración en carretera llana

Condiciones:

Masa: Se considera la masa en vacío del automóvil convertido + la masa del conductor. La masa en vacío del auto sin convertir es de 1265 kg, la masa de los elementos desinstalados que corresponde al motor, sistemas de admisión, escape, refrigeración, tanque de combustible es de aproximadamente 277,71 kg, además la masa correspondiente al combustible se determinó a partir de la capacidad del tanque y la densidad del diésel 50, como se muestra a continuación $0,05 \text{ m}^3 \cdot 826,2 \text{ (kg/m}^3\text{)} = 41,31 \text{ kg}$, por lo que la masa total retirada es de aproximadamente 319,2 kg, la masa de los componentes a instalar para la conversión es de 360 kg.

$$Masa_{\text{auto convertido}} = Masa_{\text{vacío original}} - (Masa_{\text{Comp.comb}} + Masa_{\text{comb}}) + Masa_{\text{componentes}}$$

$$Masa_{\text{auto convertido}} = 1265 - (277,71 + 41,31) + 360$$

$$Masa_{\text{auto convertido}} = 1306 \text{ kg}$$

Por lo que la masa para el análisis del escenario corresponde a: $m = 1306 \text{ kg} + 80 \text{ kg} = \mathbf{1386 \text{ kg}}$.

Aceleración de 0 a 60 km/h

$$\text{Velocidad máxima: } 60 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = \mathbf{16,67 \text{ m/s}}$$

Inclinación: 0%

Tiempo de aceleración: 7,49 s.

$$\text{Aceleración} = \frac{V_f - V_i}{t} = \frac{16,67 - 0}{7,49} = \mathbf{2,2252 \text{ m/s}^2}$$

Cálculo de las fuerzas resistivas en el movimiento del automóvil

- Fuerza rodadura (F_r) = $0,013 \cdot 1386 \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = \mathbf{176,75 \text{ N}}$.
- Fuerza aerodinámica (F_a) = $\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,29 \cdot 16,67^2 \cdot 2,06 = \mathbf{101,78 \text{ N}}$.

- Fuerza de pendiente (Fp)= **0 N**.
- Fuerza inercial: (Fac)= $1386 \cdot 2,2252 = \mathbf{3084,07 N}$.

Cálculo de la fuerza de tracción

- Fuerza tracción (Ft)= $F_t = F_r + F_a + F_p + F_{ac}$

$$F_t = 176,75 + 101,78 + 0 + 3084,07 = \mathbf{3362,07 N}$$

Cálculo de potencia y torque a las ruedas del automóvil

- Potencia (P_{ruedas})= $\frac{3362,07 \cdot 16,67}{1000} = \mathbf{56,04 kW}$
- Potencia (P_{ruedas})= $56,04 kW \times \frac{1 HP}{0,746 kW} = \mathbf{75,12 HP}$
- Velocidad de las ruedas (RPM_{ruedas})= $\frac{V \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot R_d} = \frac{16,67 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0,31725} = \mathbf{501,67 RPM}$
- Torque (Torque_{ruedas})= $\frac{P (W)}{\omega_{rueda} \left(\frac{rad}{s}\right)} = \frac{56040 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 501,67} = \mathbf{1066,78 Nm}$

Aceleración de 60 a 100 km/h

$$\text{Velocidad máxima: } 100 \frac{km}{h} \times \frac{1000 m}{1 km} \times \frac{1 h}{3600 s} = \mathbf{27,78 m/s}$$

Inclinación: 0%

Tiempo de aceleración: 9,57 s.

$$\text{Aceleración} = \frac{V_f - V_i}{t} = \frac{27,78 - 16,67}{9,57} = \mathbf{1,1610 m/s^2}$$

Cálculo de las fuerzas resistivas en el movimiento del automóvil

- Fuerza rodadura (Fr)= $0,013 \cdot 1386 \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = \mathbf{176,75 N}$.

- Fuerza aerodinámica (F_a)= $\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,29 \cdot 27,78^2 \cdot 2,06 = \mathbf{282,71 N}$.
- Fuerza de pendiente (F_p)= $\mathbf{0 N}$.
- Fuerza inercial: (F_{ac})= $1386 \cdot 1,1610 = \mathbf{1609,17 N}$.

Cálculo de la fuerza de tracción

- Fuerza tracción (F_t)= $F_t = F_r + F_a + F_p + F_{ac}$

$$F_t = 176,75 + 282,71 + 0 + 1609,17 = \mathbf{2068,64 N}$$

Cálculo de potencia y torque a las ruedas del automóvil

- Potencia (P_{ruedas})= $\frac{2068,64 \cdot 27,78}{1000} = \mathbf{57,46 kW}$
- Potencia (P_{ruedas})= $57,46 kW \times \frac{1 HP}{0,746 kW} = \mathbf{77,03 HP}$
- Velocidad de las ruedas (RPM_{ruedas})= $\frac{V \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot R_d} = \frac{27,78 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0,31725} = \mathbf{836,12 RPM}$
- Torque ($Torque_{ruedas}$)= $\frac{P (W)}{\omega_{rueda} \left(\frac{rad}{s}\right)} = \frac{57460 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 836,12} = \mathbf{656,27 Nm}$

Apéndice 3. Fuerza de tracción, potencia y torque a diferentes velocidades para el escenario de aceleración para el Nissan Tiida.

Aceleración en llano de 0 a 60 km/h						
Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)	Velocidad en ruedas (rpm)	Fuerza Tracción (N)	Potencia (kW)	Potencia (HP)	Torque (Nm)
0	0,00	0,00	3035,37	0,00	0,00	0,00
1	0,28	8,54	3035,41	0,84	1,13	943,25
5	1,39	42,68	3036,15	4,22	5,65	943,48
10	2,78	85,36	3038,47	8,44	11,31	944,20
15	4,17	128,04	3042,33	12,68	16,99	945,40
20	5,56	170,72	3047,74	16,93	22,70	947,09
25	6,94	213,40	3054,69	21,21	28,44	949,25
30	8,33	256,08	3063,20	25,53	34,22	951,89
35	9,72	298,76	3073,24	29,88	40,05	955,01
40	11,11	341,44	3084,83	34,28	45,95	958,61
45	12,50	384,12	3097,97	38,72	51,91	962,69
50	13,89	426,80	3112,66	43,23	57,95	967,26
55	15,28	469,48	3128,88	47,80	64,08	972,30
60	16,67	512,16	3146,66	52,44	70,30	977,82

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Aceleración en llano 60 a 100 km/h						
Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)	Velocidad en ruedas (rpm)	Fuerza Tracción (N)	Potencia (kW)	Potencia (HP)	Torque (Nm)
65	18,06	554,84	1793,06	32,37	43,40	557,19
70	19,44	597,52	1813,92	35,27	47,28	563,68
75	20,83	640,20	1836,33	38,26	51,28	570,64
80	22,22	682,89	1860,29	41,34	55,42	578,09
85	23,61	725,57	1885,79	44,53	59,69	586,01
90	25,00	768,25	1912,84	47,82	64,10	594,42
95	26,39	810,93	1941,43	51,23	68,68	603,30
100	27,78	853,61	1971,57	54,77	73,41	612,67

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Apéndice 4. Fuerza de tracción, potencia y torque a diferentes velocidades para el escenario de aceleración para el Toyota Corolla.

Aceleración en llano de 0 a 60 km/h						
Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)	Velocidad en ruedas (rpm)	Fuerza Tracción (N)	Potencia (kW)	Potencia (HP)	Torque (Nm)
0	0,00	0,00	3260,82	0,00	0,00	0,00
1	0,28	8,36	3260,85	0,91	1,21	1034,50
5	1,39	41,81	3261,53	4,53	6,07	1034,72
10	2,78	83,61	3263,65	9,07	12,15	1035,39
15	4,17	125,42	3267,18	13,61	18,25	1036,51
20	5,56	167,22	3272,13	18,18	24,37	1038,08
25	6,94	209,03	3278,49	22,77	30,52	1040,10
30	8,33	250,84	3286,27	27,39	36,71	1042,57
35	9,72	292,64	3295,45	32,04	42,95	1045,48
40	11,11	334,45	3306,06	36,73	49,24	1048,85
45	12,50	376,25	3318,07	41,48	55,60	1052,66
50	13,89	418,06	3331,50	46,27	62,03	1056,92
55	15,28	459,86	3346,34	51,12	68,53	1061,63
60	16,67	501,67	3362,60	56,04	75,13	1066,78

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Aceleración en llano de 60 a 100 km/h						
Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)	Velocidad en ruedas (rpm)	Fuerza Tracción (N)	Potencia (kW)	Potencia (HP)	Torque (Nm)
65	18,06	543,48	1905,37	34,40	46,12	604,48
70	19,44	585,28	1924,45	37,42	50,16	610,53
75	20,83	627,09	1944,95	40,52	54,32	617,04
80	22,22	668,89	1966,86	43,71	58,59	623,99
85	23,61	710,70	1990,18	46,99	62,99	631,39
90	25,00	752,51	2014,92	50,37	67,52	639,23
95	26,39	794,31	2041,07	53,86	72,20	647,53
100	27,78	836,12	2068,64	57,46	77,03	656,27

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Apéndice 5. Torque disponible en las ruedas y velocidad en km/h para el Nissan Tiida.

Marcha			1era		2da		3ra		4ta		5ta	
Multiplicador RPM			0,0077		0,0140		0,0207		0,0279		0,0323	
Motor torque (lb ft)	Motor torque (Nm)	Motor RPM	Torque ruedas (Nm)	Velocidad vehículo (km/h)	Torque ruedas (Nm)	Velocidad vehículo (km/h)	Torque ruedas (Nm)	Velocidad vehículo (km/h)	Torque ruedas (Nm)	Velocidad vehículo (km/h)	Torque ruedas (Nm)	Velocidad vehículo (km/h)
105,00	142,38	500	1966,95	3,86	1081,03	7,02	723,99	10,35	543,15	13,97	469,33	16,17
102,00	138,31	1000	1910,75	7,72	1050,15	14,04	712,05	20,71	527,63	27,95	455,92	32,34
100,45	136,21	1500	1881,72	11,58	1034,19	21,06	701,23	31,06	519,62	41,92	448,99	48,51
100,45	136,21	2000	1881,72	15,43	1034,19	28,08	701,23	41,42	519,62	55,89	448,99	64,68
100,45	136,21	2500	1881,72	19,29	1034,19	35,10	701,23	51,77	519,62	69,86	448,99	80,85
100,45	136,21	3000	1881,72	23,15	1034,19	42,12	701,23	62,12	519,62	83,84	448,99	97,02
100,45	136,21	3500	1881,72	27,01	1034,19	49,14	701,23	72,48	519,62	97,81	448,99	113,19
100,45	136,21	4000	1881,72	30,87	1034,19	56,16	701,23	82,83	519,62	111,78	448,99	129,37
100,45	136,21	4500	1881,72	34,73	1034,19	63,18	701,23	93,18	519,62	125,75	448,99	145,54
95,00	128,82	5000	1779,62	38,58	978,08	70,20	663,18	103,54	491,42	139,73	424,63	161,71
80,00	108,48	5500	1498,63	42,44	823,64	77,22	558,47	113,89	413,83	153,70	357,58	177,88
70,00	94,920	6000	1311,30	46,30	720,69	84,25	488,66	124,25	362,10	167,67	312,88	194,05
48,63	65,942	6500	910,98	50,16	500,67	91,27	339,48	134,60	251,56	181,65	217,37	210,22

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Apéndice 6. Torque disponible en las ruedas y velocidad en km/h para el Toyota Corolla.

Marcha			1era		2da		3ra		4ta		5ta	
Multiplicador RPM			0,0080		0,0138		0,0212		0,0291		0,0386	
Motor torque (lb ft)	Motor torque (Nm)	Motor RPM	Torque ruedas (Nm)	Velocidad vehículo (km/h)	Torque ruedas (Nm)	Velocidad vehículo (km/h)	Torque ruedas (Nm)	Velocidad vehículo (km/h)	Torque ruedas (Nm)	Velocidad vehículo (km/h)	Torque ruedas (Nm)	Velocidad vehículo (km/h)
105,00	142,38	500	1944,73	3,98	1126,19	6,88	730,65	10,60	532,88	14,54	401,03	19,32
102,00	138,31	1000	1889,17	7,97	1094,01	13,76	709,77	21,21	517,65	29,08	389,57	38,64
100,45	136,21	1500	1860,46	11,95	1077,38	20,64	698,99	31,81	509,79	43,62	383,65	57,96
100,45	136,21	2000	1860,46	15,94	1077,38	27,52	698,99	42,42	509,79	58,16	383,65	77,28
100,45	136,21	2500	1860,46	19,92	1077,38	34,40	698,99	53,02	509,79	72,70	383,65	96,60
100,45	136,21	3000	1860,46	23,90	1077,38	41,28	698,99	63,63	509,79	87,24	383,65	115,92
100,45	136,21	3500	1860,46	27,89	1077,38	48,16	698,99	74,23	509,79	101,78	383,65	135,24
100,45	136,21	4000	1860,46	31,87	1077,38	55,04	698,99	84,84	509,79	116,32	383,65	154,56
100,45	136,21	4500	1860,46	35,86	1077,38	61,92	698,99	95,44	509,79	130,86	383,65	173,88
95,00	128,82	5000	1759,52	39,84	1018,93	68,80	661,06	106,04	482,13	145,40	362,84	193,20
80,00	108,48	5500	1481,70	43,83	858,05	75,68	556,68	116,65	406,00	159,94	305,55	212,52
70,00	94,92	6000	1296,49	47,81	750,79	82,56	487,10	127,25	355,25	174,48	267,35	231,84
48,63	65,94	6500	900,69	51,79	521,58	89,44	338,39	137,86	246,80	189,02	185,74	251,16

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Apéndice 7. Memoria de cálculo de aranceles de importación de los requerimientos electromecánicos

Cant.	Descripción	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Total (€)	DAI (€)	SC (€)	Ley 6946 (€)	I.V (13%) (€)	Total (€)
Sistema de propulsión eléctrica									
1	Motor eléctrico HPEVS AC-51	2.095	2.095	1.208.668,35	170.784,84	206.917,98	12.086,68	207.799,52	1.808.352,37
1	Controlador Curtis 1239E-8521	2.740	2.740	1.580.788,20	223.365,37	270.623,04	15.807,88	271.775,98	2.365.100,47
1	Acelerador Curtis FP-Style	125	125	72.116,25	10.190,03	12.345,94	721,16	12.398,54	107.896,92
Sistema de energía									
135	Batería de tracción, celda 72 Ah CALB CAM	60	8.100	4.673.133	660.313,69	800.017,00	46.731,33	803.425,35	6.991.720,38
1	Unidad de gestión de batería Orion BMS	1.242	1.242	716.547,06	101.248,10	122.669,27	7.165,47	123.191,89	1.072.063,79
1	Cargador de a bordo Elcon PFC 5000	1.585	1.585	914.434,05	129.209,53	156.546,54	9.144,34	157.213,48	1.368.132,94
1	Receptáculo J1772 32 A	89	89	51.346,77	6.675,08	8.703,28	513,47	8.741,02	76.068,61
Sistema eléctrico									
25	Conductor 4/0	8,80	220	126.924,60	16.500,20	21.513,72	1.269,25	21.607,01	188.034,77
1	Interruptor principal	175	175	100.962,75	13.125,16	17.113,19	1.009,63	17.187,39	149.573,11
1	Fusible+portafusible	88	88	50.769,84	7.173,78	8.691,54	507,70	8.728,57	75.959,43
1	Relé de inercia	39	39	22.500,27	3.179,29	3.851,93	225,00	3.868,34	33.663,84
1	Contactador Gigavac GV200	129	129	74.423,97	10.516,11	12.741,01	744,24	12.795,29	111.349,62
1	Interruptor de emergencia ED250	35	35	20.192,55	2.625,03	3.422,64	201,93	3.437,48	29.914,62
1	Interruptor de mantenimiento HBD41	78	78	45.000,54	5.850,07	7.627,59	450,01	7.660,67	66.666,87
Sistema de instrumentación									
1	Display Orion	94	94	54.231,42	7.662,90	9.284,15	542,31	9.323,70	81.138,48
Sistema auxiliar									
1	Motor aire acondicionado, JIN LE ZDY113 1 HP, 12 V	50	50	28.846,50	4.076,01	4.938,38	288,47	4.959,42	43.158,77
1	Convertor DC-DC	795	795	458.659,35	112,33	68.815,75	4.586,59	69.182,62	602.151,65
Sistema de frenos									
1	Bomba de vacío frenos	288	288	166.155,84	23.477,82	28.445,05	1.661,56	28.566,23	248.594,50
TOTAL, INVERSIÓN (€)									15.419.541,17

Apéndice 8. Memoria de cálculo de aranceles de importación con exoneraciones de la Ley No. 9518

Cant.	Descripción	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)	Precio Total (€)	DAI (€)	SC (€)	Ley 6946 (€)	I.V (13%) (€)	Total (€)
Sistema de propulsión eléctrica									
1	Motor eléctrico HPEVS AC-51	2.095	2.095	1.208.668,35	170.784,84	0,00	12.086,68	0,00	1.393.634,87
1	Controlador Curtis 1239E-8521	2.740	2.740	1.580,788,20	223.365,37	0,00	15.807,88	0,00	1.822.701,45
1	Acelerador Curtis FP-Style	125	125	72.116,25	10.190,03	12.345,94	721,16	12.398,54	107.896,92
Sistema de energía									
135	Batería de tracción, celda 72 Ah CALB CAM	60	8.100	4.673.133	660.313,69	0,00	46.731,33	0,00	5.388.278,02
1	Unidad de gestión de batería Orion BMS	1.242	1.242	716.547,06	101.248,10	0,00	7.165,47	0,00	826.202,63
1	Cargador de a bordo Elcon PFC 5000	1.585	1.585	914.434,05	129.209,53	0,00	9.144,34	0,00	1.054.372,92
1	Receptáculo J1772 32 A	89	89	51.346,77	6.675,08	8.703,28	513,47	8.741,02	76.068,61
Sistema eléctrico									
25	Conductor 4/0	8,80	220	126.924,60	16.500,20	21.513,72	1.269,25	21.607,01	188.034,77
1	Interruptor principal	175	175	100.962,75	13.125,16	17.113,19	1.009,63	17.187,39	149.573,11
1	Fusible+portafusible	88	88	50.769,84	7.173,78	8.691,54	507,70	8.728,57	75.959,43
1	Relé de inercia	39	39	22.500,27	3.179,29	3.851,93	225,00	3.868,34	33.663,84
1	Contacto Gigavac GV200	129	129	74.423,97	10.516,11	12.741,01	744,24	12.795,29	111.349,62
1	Interruptor de emergencia ED250	35	35	20.192,55	2.625,03	3.422,64	201,93	3.437,48	29.914,62
1	Interruptor de mantenimiento HBD41	78	78	45.000,54	5.850,07	7.627,59	450,01	7.660,67	66.666,87
Sistema de instrumentación									
1	Display Orion	94	94	54.231,42	7.662,90	9.284,15	542,31	9.323,70	81.138,48
Sistema auxiliar									
1	Motor aire acondicionado, JIN LE ZDY113 1 HP, 12 V	50	50	28.846,50	4.076,01	4.938,38	288,47	4.959,42	43.158,77
1	Convertidor DC-DC	795	795	458.659,35	112,33	68.815,75	4.586,59	69.182,62	602.151,65
Sistema de frenos									
1	Bomba de vacío frenos	288	288	166.155,84	23.477,82	28.445,05	1.661,56	28.566,23	248.594,50
TOTAL, INVERSIÓN (€)									12.299.361,12

Apéndice 9. Proyección de costos del Derecho de Circulación de cada automóvil

Año	Monto derecho de circulación (C)					
	Tiida 2011	Corolla 2009	Leaf 2020	Ioniq 2020	Versa 2020	Corolla 2020
2020	134.865,38	143.415,38	42.905,38	42.905,38	488.715,38	483.815,38
2021	129.518,38	136.304,49	192.930,34	177.916,50	455.055,24	450.505,59
2022	124.664,74	131.025,60	107.018,43	292.489,80	423.918,32	419.693,97
2023	120.440,76	126.251,48	427.658,93	388.828,08	395.135,02	391.212,71
2024	117.599,57	122.137,81	468.914,67	468.914,67	368.538,17	364.896,31
2025	115.085,19	119.376,19	590.336,89	590.336,89	534.542,62	340.591,13
2026	112.875,27	116.942,79	550.043,47	550.043,47	321.294,23	318.154,54
2027	110.949,06	114.815,36	512.763,02	512.763,02	300.369,35	297.454,14
2028	109.287,34	112.973,26	478.281,34	433.619,64	281.073,82	278.367,05
2029	108.240,36	110.847,16	445.849,39	404.381,00	262.742,20	260.228,97
2030	107.769,21	109.893,97	416.312,85	377.809,44	246.297,82	228.992,68
2031	107.511,25	109.434,74	389.018,32	353.267,91	231.159,37	228.992,68

Fuente: Elaboración propia, (Excel, 2016).

Anexos

Anexo 1. Ficha Técnica Nissan Tiida 2011

Información general			Dimensiones					Transmisión				
Marca	Nissan		General	Largo(m)	4,478	Maletero	Altura (m)	0,65	Tipo	(T/M 5 velocidades)		
Modelo	Tiida			Ancho (m)	1,695		Largo (m)	1,40		Relaciones	1era	3,73
Tipo de vehículo	Sedán 4 puertas			Alto (m)	1,556		Ancho (m)	0,80			2da	2,05
Número de pasajeros	5		Distancia entre ejes (m)	2,6	Capacidad tanque de combustible (L)	50	3ra	1,3		4ta	1,03	
Pesos			Motor			Desempeño				5ta	0,89	Relación diferencial
Peso Neto	Frontal (kg)	655	Modelo	HR16DE		Velocidad máxima (km/h)	155	Exterior				
	Trasero (kg)	486	Tipo de motor	4 ciclos, DOHC		Velocidad máxima permitida (km/h)	1era	46	Tamaño de neumáticos	Ancho	185	
	Total (kg)	1141	Número de cilindros	4 en línea			2da	83		Relación alto/ancho	65	
Peso Bruto	Frontal (kg)	985	Cilindrada (cm ³)	1598			3ra	122			Aro	R15
	Trasero (kg)	870	Potencia máxima@ 6000 RPM	80kW (107 HP)			4ta	166				
	Total (kg)	1715	Torque máximo @4600 RPM	150 Nm			5ta	-				

Fuente: Elaboración propia con datos de (Nissan, 2010).

Anexo 2. Ficha Técnica Toyota Corolla 2009

Información general			Dimensiones					Transmisión		
Marca	Toyota	General	Largo(m)	4,540	Maletero	Altura (m)	0,53	Tipo	E341 (T/M 5 velocidades)	
Modelo	Corolla		Ancho (m)	1,760		Largo (m)	0,915	Relaciones	1era	3,538
Tipo de vehículo	Sedán		Alto (m)	1,465		Ancho (m)	1,56		2da	2,045
Grado	Xli	Distancia entre ejes (m)	2,6	Capacidad tanque de combustible (L)	50	3ra	1,333			
Número de pasajeros	5	Coefficiente aerodinámico	0,29			4ta	0,972			
Pesos		Motor			Desempeño		5ta		0,731	Relación diferencial
Peso Neto	Frontal (kg)	800	Tipo de motor	2C	Velocidad máxima (km/h)	155	Exterior			
	Trasero (kg)	465	Mecanismo de válvulas	8 válvulas DOHC	Velocidad máxima permitida (km/h)	1era	39	Tamaño de neumáticos	Ancho	195
	Total (kg)	1265	Número de cilindros	4 en línea		2da	69		Relación alto/ancho	65
Peso Bruto	Frontal (kg)	935	Cilindrada (cm ³)	1975		3ra	105			
	Trasero (kg)	760	Potencia máxima@ 4600 RPM	53kW (71 HP)		4ta	145			
	Total (kg)	1695	Torque máximo @2800 RPM	131 Nm		5ta	193		Aro	R15

Fuente: Elaboración propia con datos de (Toyota Motor Corporation, 2008).

Anexo 3. Requisitos para el trámite “Cambio de características, cambio de motor”.

A continuación, se enumeran los requisitos establecidos por (Registro Nacional, 2020) para realizar el trámite de cambio de características específicamente cambio de motor.

Requisitos

1. Solicitud del propietario, autenticada por un notario público, confeccionada en papel de seguridad, indicando las calidades de ley y las características del automotor.
2. Informe de Cambio de Características Original.
3. Estar al día con el pago del Derecho de Circulación del año fiscal vigente.
4. Presentar copia de la Declaración Única Aduanera (DUA) del motor, certificada por la administración aduanera o por notario público que contenga los datos del importador y la descripción del motor: marca, modelo, número de serie, potencia y combustible.
5. Cancelar el entero de timbres del Registro Nacional.

Anexo 4. Requisitos para el trámite “Solicitudes de placas o del Documento de Identificación Adicional por Deterioro”.

Nombre del trámite: Solicitud de placas o del Documento de Identificación Adicional por Deterioro

Licencia, autorización o permiso que se obtiene en el trámite: Reposición de placas por deterioro.

Requisitos Fundamento Legal: a continuación, se enumeran los requisitos establecidos por (Registro Nacional, 2020) para realizar el trámite de solicitud de placas.

Formulario de solicitud debidamente lleno por el propietario registral o persona legitimada para hacer el trámite.

1. Cancelar los derechos fijados por la Junta Administrativa del Registro Nacional correspondiente al trámite que se está gestionando (Timbres de Registro Nacional).
2. Propietario debe estar al día con el pago de infracciones ante el Consejo de Seguridad Vial, verificándose mediante cualquiera de los medios electrónicos disponibles con los que cuenta el Registro Nacional
3. El vehículo debe estar al día con el pago del derecho de circulación.
4. Cédula de identidad original, legible y vigente de la persona que realiza el trámite.
5. En el caso de Instituciones autónomas, el encargado de realizar los trámites o emitir el poder especial, es el Director General, Director Administrativo, Director Regional, Jefe de Transportes o Jefe de Servicios Generales, dicho Poder Especial debe otorgarse en papel membretado, sellado y firmado.
6. Llevar las dos placas metálicas. Para las placas confeccionadas a partir del 9 de enero del 2012 se debe aportar el documento de identificación del Registro Nacional (calcomanía).