



Introducción al Retrofit para Autos de Combustión

Informe de la aplicación del Retrofit a vehículo con mas de 10 años

Ismael Cervantes de Anda,
Emma Verde Velázquez,
Alberto Jesús Alcántara Méndez,
Raúl Santillán Luna,
Felipe de Jesús Figueroa del Prado
Editores

Red de Expertos en Innovación Automotriz

INTRODUCCIÓN AL RETROFIT PARA AUTOS DE COMBUSTIÓN

Informe de la aplicación del Retrofit a vehículo con mas de 10 años





Índice general

Prólogo	i
1. Introducción	2
2. Antecedentes	6
2.1. Objetivo del Documento	10
3. Pasos previos al proceso de conversión	12
3.1. Conjunto Mecánico/Eléctrico	12
3.2. Conjunto Electromotriz	14
3.3. Conjunto Electrónico	14
4. Parámetros y criterios de selección y de Diseño Replicables	19
4.1. Parámetros Generales de Diseño	19
4.2. Criterios de Selección del Motor Eléctrico	21
4.3. Criterios de Selección del Banco de Baterías	23
4.4. Criterios de Selección de la Controladora	25
4.5. Criterios de Selección del Cargador de Baterías	26
4.6. Componentes Auxiliares	28
4.7. Resumen de Parámetros Replicables	29
5. Ingeniería del sistema electromotriz	33
5.1. Selección del Motor	33
5.2. Selección del banco de baterías	35
5.3. Selección de la controladora (Inversor)	37
6. Detalle del conjunto electromotriz	43
6.1. Diagrama conjunto electromotriz	43
6.2. Diagrama conexión controladora de motor eléctrico	45
6.2.1. Switch	47
6.2.2. Palanca selectora	50
6.2.3. Pedal acelerador	51
6.2.4. Freno regenerativo	51
6.2.5. Sensor de temperatura	52
6.2.6. Encoder odómetro/velocímetro	53
6.2.7. Terminales CANBUS	54
6.2.8. Arnés de conexiones	58



7. Pasos a seguir en el proceso de conversión	61
7.1. Desmontar sistema de gasolina y componentes asociados	61
7.2. Fabricación de soporte para el motor eléctrico	65
7.3. Fabricación de la base para el banco de baterías	80
7.4. Instalación de elementos eléctricos	85
7.4.1. Controladora	85
7.4.2. Convertidor DC-DC	88
7.4.3. Bomba de vacío	91
7.4.4. Cableado eléctrico	93
8. Protocolos de Prueba y Validación	99
8.1. Protocolo de Validación del Sistema de Frenado	99
8.1.1. Verificación del sistema de vacío	99
8.1.2. Prueba de frenado en condiciones estáticas	100
8.1.3. Prueba de frenado en movimiento	100
8.1.4. Prueba de freno regenerativo (si aplica)	101
8.2. Protocolo de Validación de Estabilidad y Manejo	101
8.2.1. Inspección visual y distribución de peso	101
8.2.2. Prueba de maniobrabilidad en baja velocidad	102
8.2.3. Prueba de estabilidad en curvas	102
8.2.4. Prueba de estabilidad en línea recta a alta velocidad	102
8.3. Protocolo de Validación de Vibraciones y Ruido	103
8.3.1. Inspección de montaje y fijación de componentes	103
8.3.2. Prueba de vibraciones en ralentí (motor encendido, vehículo detenido)	103
8.3.3. Prueba de vibraciones en movimiento	104
8.3.4. Medición de niveles de ruido	104
8.4. Protocolo de Validación de Aislamiento Eléctrico y Seguridad	105
8.4.1. Inspección visual de conexiones y cableado	105
8.4.2. Prueba de aislamiento con megóhmetro	105
8.4.3. Prueba de continuidad de conexión a tierra	106
8.4.4. Prueba de funcionamiento de dispositivos de seguridad	106
8.4.5. Prueba de detección de fugas de corriente	107
8.5. Validación de Ciclos de Carga/Descarga del Banco de Baterías	107
8.5.1. Verificación inicial de voltaje y balanceo de celdas	107
8.5.2. Prueba de capacidad real del banco de baterías	108
8.5.3. Prueba de carga completa	108
8.5.4. Prueba de carga rápida (si el cargador lo permite)	109
8.5.5. Prueba de ciclos repetidos de carga y descarga	109
8.5.6. Monitoreo de temperatura durante ciclos de carga y descarga	110
8.6. Consideraciones Finales	110
9. Viabilidad Económica Técnica del Retrofit	113
9.1. Análisis económico	113
9.2. Análisis técnico	115
10. Impacto del Retrofit	122



11. Conclusiones	127
11.1. Viabilidad económica	127
11.2. Viabilidad técnica	127
11.3. Viabilidad legal	128
11.4. Realidad en México	128
11.5. Créditos	129
11.6. Declaración de conflicto de intereses	129
11.7. ¿Cómo citar este informe?	130



Prólogo

En las últimas décadas, el mundo ha experimentado una transformación acelerada en la manera en que comprendemos la movilidad, el consumo energético y la responsabilidad ambiental. El uso masivo de vehículos con motores de combustión interna, que durante más de un siglo impulsaron el desarrollo económico y social de las naciones, ha derivado también en altos niveles de contaminación atmosférica, degradación ambiental y dependencia de combustibles fósiles. Frente a este panorama, la transición hacia modelos de movilidad más limpios, eficientes y accesibles dejó de ser una opción para convertirse en una necesidad urgente.

En este contexto, el Retrofit —la reconversión de vehículos con motores de combustión interna a sistemas completamente eléctricos— surge como una alternativa innovadora y alcanzable que abre un nuevo horizonte para la electromovilidad en países como México y, en general, en toda América Latina. A diferencia de la adquisición de vehículos eléctricos nuevos, cuyo costo continúa siendo inaccesible para la mayor parte de la población, el Retrofit ofrece la posibilidad de prolongar la vida útil de los automóviles existentes, reducir costos operativos y contribuir significativamente a la disminución de emisiones contaminantes.

Este libro se adentra en un campo que está cobrando una relevancia creciente a nivel internacional. Organismos como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y diversas instituciones académicas —entre ellas la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)— han señalado al Retrofit como una vía estratégica para acelerar la transición hacia la electromovilidad. La creación de prototipos nacionales, la inversión pública en investigación y desarrollo, y la formulación de marcos regulatorios emergentes demuestran que esta tecnología ha dejado de ser una propuesta experimental para convertirse en una opción real y necesaria.

Asimismo, este libro pretende acercar el Retrofit a un público amplio, desde estudiantes, investigadores y profesionales del sector automotriz hasta autoridades, empresas y ciudadanos interesados en comprender esta alternativa tecnológica. La conversión eléctrica de un vehículo no solo es un ejercicio de ingeniería; es también una herramienta social, económica y ambiental que permitirá reducir la dependencia de los combustibles fósiles, mejorar la calidad del aire en las principales ciudades y democratizar el acceso a tecnologías sostenibles.

El contenido de esta obra analiza con claridad los fundamentos técnicos del Retrofit, sus beneficios ambientales y económicos, su marco normativo emergente y los retos que aún deben enfrentarse para consolidar esta práctica a gran escala. La intención de los autores es ofrecer un material riguroso, accesible y profundamente útil en un momento histórico en el que las decisiones sobre movilidad definirán el futuro de nuestras ciudades y de nuestro planeta.

Este libro no solo invita a comprender la conversión vehicular eléctrica; invita a imaginar una movilidad distinta, más justa, más limpia y más humana. A través de sus páginas, el lector descubrirá que la transición hacia un modelo energético sostenible no depende exclusivamente de grandes inversiones, sino también de la creatividad, la innovación y la voluntad colectiva para transformar aquello que ya tenemos.



Con esta visión, el presente texto aporta una pieza fundamental al diálogo contemporáneo sobre el derecho a un ambiente sano, el desarrollo tecnológico nacional y la urgente necesidad de adoptar alternativas de movilidad sustentable. Es un llamado a actuar, a construir y a repensar nuestras ciudades desde la responsabilidad y la esperanza.

"Bienvenido a este recorrido por el mundo del retrofit, una vía accesible, inteligente y transformadora hacia la movilidad del futuro."





CAPÍTULO 1

Introducción

La contaminación atmosférica se ha convertido en una de las amenazas más graves para la salud humana. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en 2019 el 99 % de la población mundial vivía en lugares donde los niveles de calidad del aire superaban los límites recomendados [1](Organización Mundial de la Salud (OMS), 2024). Este es un dato alarmante: prácticamente todos respiramos aire potencialmente dañino, con consecuencias directas sobre la salud. Provocando cerca de 7 millones de muertes prematuras cada año [2] (World Health Organization, 2025). Esta crisis sanitaria no discrimina por fronteras, México es de los países más afectados, debido a la heterogeneidad de su infraestructura, el uso intensivo de transporte basado en combustibles fósiles y la vulnerabilidad social [4](World Health Organization, 2025).

En México, la situación resulta especialmente grave. Las zonas metropolitanas, con altas concentraciones de población y tráfico vehicular intensivo, acumulan niveles mínimos de contaminación permitidos por organismos internacionales. En particular, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME), responsable de monitorear la calidad del aire en la Megalópolis Mexicana —compuesta por la Ciudad de México y varios estados vecinos— reconoce que cientos de miles de personas están expuestas diariamente a contaminantes peligrosos [3](Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

El modelo de movilidad imperante ha generado un parque automotor masivo. Según datos oficiales, en México circulan decenas de millones de vehículos: autos, camionetas, camiones de carga y motos. Muchos de ellos con más de 10 años de uso, lo que implica motores con eficiencia reducida, sistemas de combustión obsoletos y emisiones muy superiores a las normativas actuales. Este envejecimiento de la flota incrementa considerablemente la contaminación. Es fácil observar que el actual modelo de transporte privado basado en combustibles fósiles ya no es sostenible —ni para la salud de las personas, ni para el aire que respiramos, ni para el clima global. Las políticas tradicionales de restricción vehicular, verificaciones o regulaciones han tenido éxito limitado: aunque reducen emisiones en ciertos momentos, no corrigen la raíz del problema.

El sector, transporte, constituye uno de los principales contribuyentes a la emisión de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero a nivel global, particularmente en contextos urbanos caracterizados por una alta densidad vehicular y una flota automotriz envejecida. La persistencia de vehículos equipados con motores de combustión interna, aunada a la dependencia estructural de los combustibles fósiles, ha generado impactos negativos acumulativos sobre la calidad del aire, la salud pública y la estabilidad climática. En este escenario, la transición hacia sistemas de movilidad eléctrica se reconoce como una estrategia prioritaria para mitigar dichos efectos; no obstante, su implementación enfrenta limitaciones económicas, tecnológicas y sociales, especialmente en países de ingresos medios como México.

La reconversión vehicular mediante retrofit, definida como el proceso de sustitución del sistema de propulsión de combustión interna por un sistema electromotriz, emerge como una alternativa tecnológicamente viable



y ambientalmente eficiente para acelerar la electrificación del parque vehicular existente. A diferencia de la sustitución total de unidades mediante la adquisición de vehículos eléctricos nuevos, el retrofit permite aprovechar la infraestructura mecánica funcional de automóviles con más de diez años de antigüedad, reduciendo de manera significativa los costos económicos, energéticos y materiales asociados a la fabricación de nuevos vehículos, al tiempo que disminuye la generación de residuos automotrices.

Desde una perspectiva de ingeniería, el retrofit constituye un problema multidisciplinario que integra conocimientos de mecánica automotriz, ingeniería eléctrica, electrónica de potencia y sistemas de control. Su correcta implementación exige el análisis estructural del conjunto mecánico-eléctrico del vehículo, el diseño e integración del sistema electromotriz —motor eléctrico, banco de baterías, sistema de gestión de energía y convertidores de potencia— así como la validación funcional y de seguridad bajo condiciones reales de operación. En este sentido, el presente informe se orienta al desarrollo y documentación de un modelo técnico de conversión que preserve parámetros críticos de desempeño vehicular, tales como torque, potencia y confiabilidad operativa, garantizando simultáneamente la eliminación de emisiones contaminantes directas.

El enfoque metodológico adoptado en este documento se sustenta en principios de investigación aplicada y desarrollo experimental, priorizando la reproducibilidad del proceso de conversión y la evaluación objetiva de su viabilidad técnica y económica. A través de la sistematización de procedimientos, cálculos de potencia, torque y autonomía, así como la definición de protocolos de prueba y validación, se busca establecer una referencia técnica que permita evaluar el desempeño del sistema electromotriz integrado y su adecuación a las condiciones de uso cotidiano predominantes en el contexto urbano mexicano.

Asimismo, el retrofit se analiza como una estrategia de mitigación ambiental con potencial impacto a corto y mediano plazo, al posibilitar la reducción inmediata de emisiones locales de contaminantes, criterio y gases de efecto invernadero. Este enfoque resulta particularmente relevante en escenarios donde las políticas de renovación vehicular han mostrado alcances limitados y donde la adopción masiva de vehículos eléctricos nuevos permanece restringida por factores económicos. En consecuencia, la conversión de vehículos existentes adquiere relevancia no solo como solución técnica, sino como instrumento complementario de política pública orientado a la sustentabilidad, la equidad tecnológica y la mejora de la calidad del aire.

En síntesis, el presente informe aborda el retrofit vehicular desde una óptica científica y técnica, integrando fundamentos de ingeniería, análisis de viabilidad y criterios de validación experimental. Su propósito es contribuir al cuerpo de conocimiento sobre electromovilidad aplicada, proporcionando evidencia que respalde la reconversión vehicular como una alternativa factible, eficiente y escalable para la transición hacia sistemas de transporte con cero emisiones directas, en concordancia con los retos ambientales y energéticos contemporáneos.

Este informe propone analizar en profundidad la problemática de la contaminación vehicular en México, su impacto en la salud pública, el clima, la economía y la calidad de vida. Pero también busca presentar con rigor técnico —y con un lenguaje accesible— por qué la conversión de vehículos a eléctricos representa hoy una de las alternativas más viables para reducir emisiones, democratizar la movilidad limpia y avanzar hacia un futuro sustentable.

La urgencia del problema exige soluciones realistas, justas y accesibles. No basta con exhortar a la renovación del parque vehicular con autos nuevos; es necesario ofrecer opciones que puedan adoptar la mayoría de la población, sin comprometer su bienestar económico. El retrofit emerge, así como una solución con gran potencial transformador.

Este documento está dirigido a todos aquellos interesados en el futuro de la movilidad en México: ciudadanos comunes, académicos, técnicos, responsables de políticas públicas, organizaciones ambientales, emprendedores y familias. A través de sus páginas podrás conocer los fundamentos técnicos, las implicaciones



ambientales, los beneficios económicos y sociales, así como los retos y condiciones para llevar a cabo la conversión de vehículos a eléctricos.

La meta es clara: contribuir a un México más limpio, saludable y sustentable. Una transformación posible comienza con cambiar la forma en que nos movemos. La movilidad del futuro debe ser accesible, eficiente y respetuosa con el aire que respiramos.

Esta obra invita a dar ese primer paso.





CAPÍTULO 2

Antecedentes

El contexto del retrofit en la actualidad

El avance hacia la electromovilidad se ha convertido en un eje central de las políticas públicas ambientales y energéticas a nivel global. Sin embargo, las dinámicas de adopción en los países de ingresos medios, como México y gran parte de América Latina, han mostrado avances más lentos en comparación con regiones pioneras como Europa, China o Estados Unidos. En este contexto, la reconversión de vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos —conocida como retrofit— ha emergido como una alternativa viable, estratégica y socialmente accesible para acelerar la transición tecnológica, al tiempo que se facilita la reducción de emisiones contaminantes provenientes del sector transporte. Este subcapítulo ofrece un análisis exhaustivo del contexto contemporáneo del retrofit, considerando las bases institucionales, económicas, tecnológicas y políticas que han permitido el desarrollo de esta práctica en México y en América Latina.

1. Evolución del marco internacional y regional para la electromovilidad

Durante las últimas dos décadas, la preocupación mundial por los efectos del cambio climático ha impulsado la creación de acuerdos multilaterales cuyo objetivo es acelerar la transición hacia sistemas energéticos y de movilidad más limpios. Entre estos acuerdos destaca el Acuerdo de París (2015), donde México asumió el compromiso de reducir de manera significativa sus emisiones de gases de efecto invernadero entre 2020 y 2030. Una de las metas más relevantes consiste en disminuir aproximadamente el 60 % de las partículas contaminantes respecto a los niveles promedio actuales. Este compromiso ha servido de catalizador para explorar soluciones tecnológicas que posibiliten su cumplimiento, entre las cuales el retrofit ocupa un lugar relevante debido a su viabilidad para mejorar el desempeño ambiental de vehículos con motores de combustión interna.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) ha sido uno de los organismos internacionales que ha tomado un papel activo en el impulso de la electromovilidad en la región. Reconociendo que América Latina enfrenta barreras económicas considerables para la compra de vehículos eléctricos nuevos, la CEPAL desarrolló un marco regulatorio propuesto para incentivar la inversión en electromovilidad mediante la reconversión de vehículos que emplean combustibles fósiles. Esta propuesta no solo define lineamientos técnicos y normativos, sino que subraya la importancia de la conversión como un mecanismo de democratización tecnológica, capaz de hacer accesibles los beneficios de la movilidad eléctrica en economías donde el ingreso promedio no permite la adquisición de unidades nuevas de alto costo.

En su análisis regional, la CEPAL sostiene que la electromovilidad en América Latina ha avanzado de manera más lenta que en otras regiones, no por falta de interés, sino por la ausencia de políticas regulatorias estables y por la limitante estructural del costo de las tecnologías de punta. Ante este panorama, el retrofit



se presenta como una alternativa estratégica que ofrece menores costos de conversión, reduce la creación de desechos automotrices y permite extender la vida útil de los millones de vehículos existentes en circulación.

2. Impulso institucional en México: antecedentes y primeros esfuerzos

La historia contemporánea del retrofit en México inicia formalmente en el ámbito del transporte público. En mayo de 2003 se estableció un equipo bilateral entre agencias de Estados Unidos y México, cuyo propósito era desarrollar estrategias técnicas y normativas para mejorar el desempeño ambiental de vehículos utilizados en servicios públicos. Este equipo bilateral estuvo conformado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) del entonces Gobierno del Distrito Federal, y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA). Este esfuerzo marcó el primer antecedente documentado de colaboración internacional en la materia para el caso mexicano.

Las primeras experiencias piloto consistieron en estudiar la reconversión de unidades utilizadas en sectores de alta demanda y alto impacto ambiental, como el transporte de pasajeros y el transporte de carga en zonas metropolitanas. Aunque los programas piloto no alcanzaron en ese momento un despliegue escalado, sentaron las bases para la definición de criterios técnicos orientados a la reconversión segura de unidades, así como la evaluación del impacto ambiental derivado de la sustitución de motores de combustión por motores eléctricos.

Posteriormente, durante las décadas siguientes, México consolidó una infraestructura institucional y académica más sólida para la investigación y desarrollo de tecnologías vinculadas con la electromovilidad. Diversas instituciones comenzaron a estudiar los beneficios del retrofit como alternativa ambientalmente favorable, particularmente en ciudades con altos niveles de contaminación atmosférica.

3. Desarrollo científico y tecnológico: participación de universidades y organismos nacionales

Uno de los elementos más relevantes en la consolidación del retrofit en México ha sido la participación activa de instituciones de educación superior, centros de investigación y organismos gubernamentales dedicados al desarrollo tecnológico.

Entre las instituciones que han impulsado estudios, proyectos piloto y desarrollos tecnológicos se encuentran:

- La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), cuyos institutos de ingeniería y facultades especializadas han participado en el diseño de prototipos de conversión y en la evaluación del desempeño energético de vehículos reconvertidos.
- La Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) del Gobierno de la Ciudad de México, que ha destinado recursos y articulado esfuerzos multisectoriales para el desarrollo de prototipos funcionales.
- La empresa mexicana Potencia Industrial, que ha colaborado en el desarrollo de componentes clave como motores eléctricos y sistemas de gestión de energía.
- La Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), que ha registrado centros de investigación enfocados en electromovilidad, automatización y sistemas de energía, promoviendo la formación de talento especializado en tecnologías de movilidad limpia.

Un hito importante ocurrió cuando la Jefa de Gobierno de la Ciudad de México presentó los primeros prototipos de vehículos de combustión interna reconvertidos a eléctricos, desarrollados de manera conjunta por SECTEI, la UNAM y Potencia Industrial, con una inversión aproximada de 6 millones de pesos. Este proyecto piloto demostró que México posee la capacidad tecnológica y el capital humano necesario para impulsar una industria nacional de retro adaptación vehicular.



El éxito de estos prototipos constituye evidencia de que el retrofit no es únicamente una posibilidad teórica, sino una opción técnica real con capacidad para escalar y adaptarse al contexto socioeconómico de la población mexicana.

4. Consideraciones económicas: la accesibilidad como motor del retrofit

La viabilidad del retrofit en México y América Latina se explica, en gran medida, por los costos asociados a la adquisición de vehículos eléctricos nuevos. En mercados desarrollados, los consumidores cuentan con mayores ingresos promedio y con incentivos importantes para la compra de unidades nuevas. Sin embargo, en mercados con ingresos medios o bajos, como los latinoamericanos, el costo inicial de los vehículos eléctricos constituye una barrera prácticamente infranqueable. En este escenario, el retrofit se convierte en una alternativa estratégica que permite:

- Reducir el costo de acceso a la movilidad eléctrica.

La reconversión de un vehículo de combustión interna a eléctrico puede realizarse con una inversión significativamente menor que la compra de un vehículo eléctrico nuevo. Al aprovechar la estructura física del automóvil —carrocería, sistema de suspensión, frenos, chasis y sistemas eléctricos internos— solo requiere reemplazar los componentes asociados al motor de combustión, como el motor, el sistema de escape, tanque de combustible y otros. Esto disminuye los costos de producción y reduce el gasto final para el usuario.

- Aprovechar la infraestructura vehicular existente.

México posee un parque vehicular con decenas de millones de unidades que, aunque envejecidas, mantienen estructuras funcionales. El retrofit permite extender la vida útil de estos vehículos, evitando que se conviertan en residuos contaminantes.

- Evitar costos indirectos y externalidades económicas.

La renovación total del parque vehicular mediante la adquisición de unidades nuevas implicaría una inversión monumental para la cual no existe capacidad económica en la población. La reconversión ofrece una solución escalable y accesible.

- Fomentar el desarrollo industrial nacional.

La producción de kits de reconversión, motores eléctricos y sistemas de gestión energética abre oportunidades para la manufactura nacional y para el fortalecimiento de cadenas productivas internas.

En conjunto, estos factores convierten al retrofit en un mecanismo eficaz para impulsar la electromovilidad con criterios de equidad, eficiencia y sostenibilidad económica.

5. Políticas públicas y regulaciones: avances y desafíos

La implementación del retrofit a gran escala requiere marcos normativos claros que definan:

- requisitos de seguridad vehicular,
- estándares para la certificación de talleres de conversión,
- protocolos para la instalación de baterías y motores,
- lineamientos para la inspección técnica post-conversión,
- políticas fiscales e incentivos económicos.

La CEPAL ha destacado la necesidad de que los gobiernos latinoamericanos implementen políticas de incentivos fiscales que faciliten la adopción de tecnologías de electromovilidad, tales como:

- exención de IVA,
- exención del pago de permisos de circulación,
- eliminación o reducción de aranceles para componentes eléctricos importados,
- tarifas eléctricas diferenciadas para la carga vehicular,



- exención de impuestos ambientales,
- excepción a restricciones vehiculares.

México ha comenzado a explorar algunas de estas medidas, aunque su aplicación aún es limitada y varía significativamente entre estados. No obstante, el marco propuesto por CEPAL ofrece una base sólida para desarrollar regulaciones nacionales que permitan la adopción masiva del retrofit.

6. La industria automotriz mexicana y su papel estratégico

La industria automotriz constituye uno de los sectores económicos más relevantes de México. De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), este sector genera cerca del 3 % del Producto Interno Bruto nacional y más del 20 % del PIB manufacturero. Esta posición estratégica ha impulsado la instalación de fábricas, cadenas de ensamblaje, centros de investigación y formación técnica vinculados con la movilidad automotriz.

Sin embargo, la transición hacia la electromovilidad plantea retos significativos para la industria nacional, ya que la mayor parte de la producción está orientada a motores de combustión interna. En este sentido, el retrofit se convierte en una oportunidad para reconvertir conocimientos, herramientas, mano de obra y plantas productivas hacia la fabricación de componentes eléctricos y kits de conversión.

Las instituciones académicas y centros de investigación, como aquellos registrados por SECIHTI, han comenzado a capacitar profesionales en ingeniería eléctrica, electrónica, robótica y energías renovables, lo cual representa un respaldo fundamental para el desarrollo de talento especializado.

7. Retrofit como respuesta a la contaminación en las ciudades mexicanas

El retrofit se presenta también como una respuesta viable al grave problema de contaminación atmosférica en las ciudades mexicanas, especialmente en las zonas metropolitanas más densas como la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey. La sustitución del motor de combustión por uno eléctrico elimina la emisión directa de contaminantes como dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas finas.

En ciudades donde las contingencias ambientales se han convertido en una problemática recurrente, la conversión vehicular representa un instrumento concreto y de implementación inmediata para reducir emisiones. El Acuerdo de París establece metas claras para disminuir la concentración de partículas suspendidas finas, y la reconversión masiva de vehículos antiguos permitiría alcanzar de manera más rápida los niveles de reducción esperados.

Asimismo, el retrofit representa un complemento a las políticas ambientales existentes, las cuales han sido insuficientes para frenar el deterioro de la calidad del aire. Programas como "Hoy No Circula" han tenido impactos limitados y, en algunos casos, han generado efectos adversos, como la adquisición adicional de vehículos más antiguos para evadir restricciones. Ante esta situación, el retrofit permite renovar vehículos antiguos sin necesidad de adquirir nuevas unidades.

8. Perspectivas de crecimiento y consolidación del retrofit en México

El contexto actual muestra que México se encuentra en un punto de inflexión para desarrollar una industria nacional de retrofit robusta, con la capacidad de servir tanto al mercado interno como al regional. Existen varias razones que explican esta proyección:

- Capacidad institucional consolidada.

Las acciones coordinadas entre SEMARNAT, SECTEI, UNAM, Potencia Industrial, SECIHTI y otros orga-



nismos han demostrado la existencia de un ecosistema científico y tecnológico capaz de producir soluciones de conversión eficientes.

- Demanda potencial elevada.

El envejecido parque vehicular mexicano, con millones de unidades susceptibles de ser reconvertidas, presenta una demanda natural para la adopción de kits de retrofit.

- Impulso internacional y cooperación regional.

El marco regulatorio propuesto por CEPAL facilita la armonización de estándares técnicos y ofrece lineamientos que pueden ser adoptados en México para garantizar la seguridad y eficiencia de las conversiones.

- Tendencias globales hacia la descarbonización.

El avance internacional de la electromovilidad crea oportunidades para la transferencia de tecnología, la capacitación de especialistas y la adopción de mejores prácticas.

- Potencial de desarrollo económico e industrial.

La creación de una industria de retrofit puede generar empleo, fomentar el emprendimiento tecnológico nacional y fortalecer la cadena de suministro de componentes eléctricos.

Colofón

El análisis del contexto actual del retrofit revela que México y América Latina poseen las condiciones técnicas, económicas e institucionales necesarias para impulsar esta alternativa de movilidad eléctrica. Si bien persisten desafíos en materia regulatoria, financiamiento e infraestructura de carga, los avances realizados hasta ahora permiten prever un crecimiento sostenido del sector.

El retrofit no solo contribuye a la reducción inmediata de emisiones contaminantes, sino que además se alinea con los objetivos de equidad social, desarrollo industrial y sostenibilidad económica. La colaboración entre organismos internacionales como CEPAL, instituciones públicas como SEMARNAT y SECTEI, instituciones académicas como la UNAM y centros de investigación registrados en SECIHTI constituye un pilar fundamental para su consolidación.

Con una adecuada implementación de políticas públicas y una articulación eficaz entre los sectores público, privado y académico, el retrofit puede convertirse en una de las estrategias clave para acelerar la electromovilidad en México y para cumplir los compromisos ambientales asumidos a escala internacional.

2.1 OBJETIVO DEL DOCUMENTO

Realizar la reingeniería del sistema de combustión interna del motor de auto a gasolina por un sistema eléctrico de corriente alterna, mediante el desarrollo de un sistema electromotriz que permita conservar el torque del motor y lograr una potencia suficiente para el desarrollo de las actividades cotidianas de la población mayoritaria, impactando positivamente en el medio ambiente al ser un motor de “cero emisiones”.



CAPÍTULO 3

Pasos previos al proceso de conversión

La tecnología necesaria para convertir un vehículo de gasolina en un vehículo eléctrico (EV) se basa en sustituir los elementos indispensables para el funcionamiento del motor de combustión interna por sistemas eléctricos modernos. Históricamente, los automóviles eléctricos y los de gasolina surgieron casi de manera simultánea, hace poco más de cien años; por esta razón, sus principios básicos de operación comparten similitudes que facilitan el proceso de conversión.

Para llevar a cabo esta transformación, es necesario considerar tres áreas fundamentales:

- A) Conjunto mecánico-eléctrico
- B) Conjunto electromotriz
- C) Conjunto electrónico

Cada uno de estos conjuntos debe analizarse y adaptarse minuciosamente para asegurar que la conversión sea exitosa, en la figura 3.1 se muestran de manera ilustrativa estos conjuntos. En las secciones siguientes se describe con detalle la función y las consideraciones técnicas de cada uno.

3.1 CONJUNTO MECÁNICO/ELÉCTRICO

El conjunto mecánico-eléctrico está formado por todos los componentes indispensables para garantizar que el vehículo mantenga una conducción segura, estable y maniobrable, además de incluir los sistemas de señalización luminosa que permiten comunicarse con otros conductores (como las luces de freno y las direccionales). Es importante señalar que este conjunto es independiente del sistema que genera la fuerza motriz del automóvil.

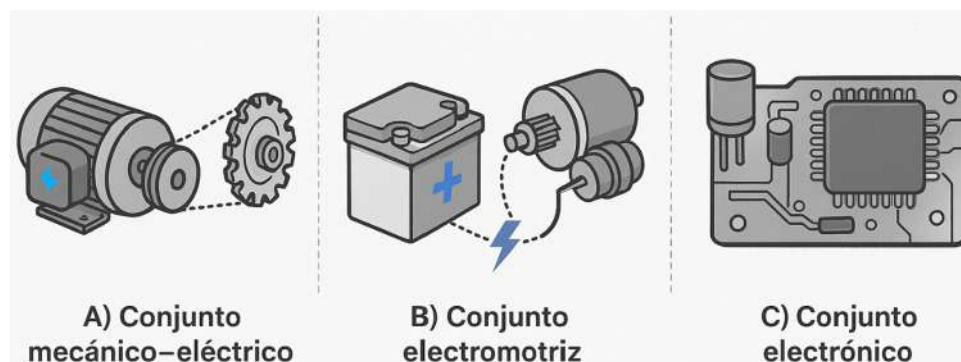


Figura 3.1: Imágenes alusivas a los conjuntos Mecánico-eléctrico, electromotriz y electrónico

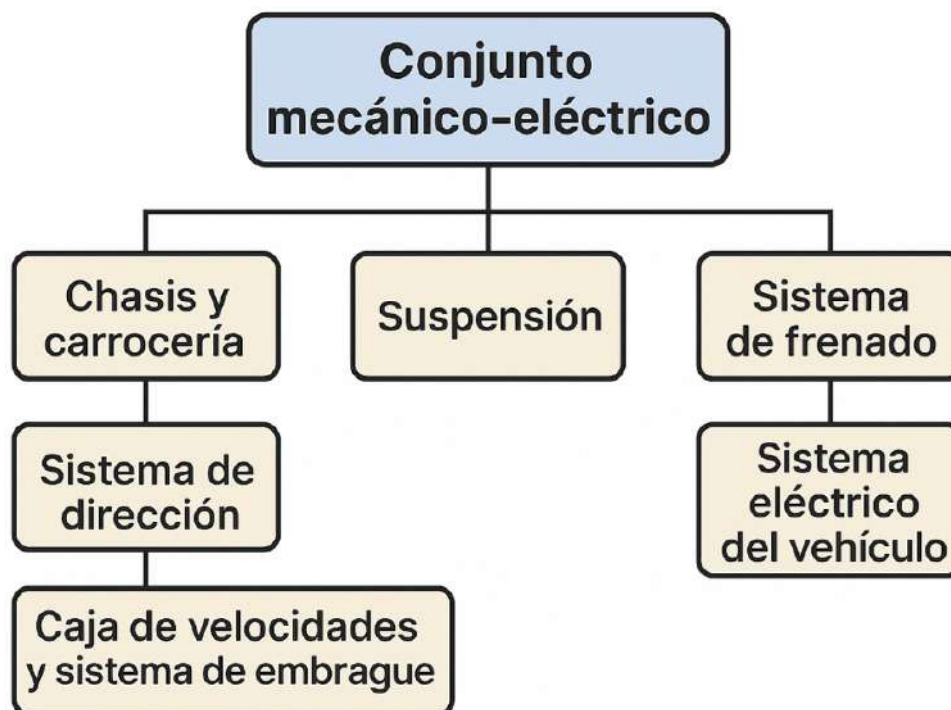


Figura 3.2: Ilustración descriptiva de los componentes del conjunto Mecánico/Eléctrico

En la figura 3.2 se muestran los elementos que integran el conjunto mecánico-eléctrico, además de enlistarlos a continuación:

- 1.- Chasis y carrocería
- 2.- Suspensión
- 3.- Sistema de dirección
- 4.- Sistema de frenado
- 5.- Caja de velocidades y sistema de embrague
- 6.- Sistema eléctrico del vehículo

Cada uno de estos seis aspectos debe evaluarse con detalle antes de iniciar la conversión, con el fin de asegurar que el vehículo se encuentra en condiciones óptimas de funcionamiento. Por esta razón, es indispensable contar con la revisión de especialistas en mecánica y electricidad automotriz.

El punto 5 —la caja de velocidades y el sistema de embrague— es particularmente relevante, ya que en él se realiza la interconexión principal entre el sistema de conversión eléctrica y el conjunto mecánico-eléctrico. En este punto se transmite la fuerza del motor eléctrico hacia el tren motriz del vehículo; por ello, es crucial que el trabajo sea efectuado por personal con experiencia comprobada. Como dato importante, este sistema debe ser manual, lo que simplifica considerablemente el proceso de conversión y evita complicaciones técnicas innecesarias.

El punto 6, correspondiente al sistema eléctrico del vehículo, también requiere una interconexión directa con el sistema de conversión, ya que a través de él se distribuye la energía eléctrica hacia los distintos accesorios del automóvil. Debido a la importancia y la sensibilidad de esta área, se recomienda que la intervención sea realizada por expertos en electricidad automotriz.



3.2 CONJUNTO ELECTROMOTRIZ

El conjunto electromotriz está formado por los elementos fundamentales que permiten llevar a cabo la conversión de un vehículo de combustión interna a un vehículo eléctrico. Estos componentes son los responsables de generar el movimiento del automóvil y de suministrar la energía necesaria para su funcionamiento. Los elementos que integran este conjunto son:

1. Motor eléctrico
2. Controlador del motor eléctrico
3. Banco de baterías
4. Cargador de baterías
5. Sistema de seguridad para el manejo de altos voltajes y corrientes
6. Convertidor DC-DC

El diseño, selección y adaptación de estos seis elementos requiere la participación de personal especializado, ya que implica la adquisición o el desarrollo de componentes que deben integrarse de manera segura y eficiente. Por ello, es indispensable contar con expertos en electricidad, electrónica y sistemas computacionales, capaces de realizar las adecuaciones necesarias para alcanzar un desempeño óptimo del vehículo tras su conversión.

Dado que este conjunto constituye el núcleo del proceso de electrificación, es importante analizar diversos parámetros relacionados con el uso cotidiano del vehículo. Entre ellos se encuentran:

- la distancia promedio que recorrerá diariamente,
- las características del terreno (pendientes, altitudes, caminos irregulares),
- las condiciones climáticas predominantes (lluvia, frío extremo, nieve),
- y la cantidad de pasajeros o carga que deberá transportar.

Es importante señalar que a mayor autonomía, mayor velocidad de operación o mayor capacidad de carga, el costo total de la conversión aumentará de forma proporcional. Por esta razón, se recomienda realizar el proceso de conversión principalmente en vehículos compactos, con capacidad para transportar hasta cinco personas, destinados a trayectos cotidianos como el desplazamiento entre el hogar y el trabajo o la escuela.

No obstante, es posible aplicar la conversión a vehículos de trabajo para transporte de mercancías de hasta 3.5 toneladas, siempre y cuando se considere que el peso, la distancia a recorrer y la topografía de la ruta exigirán componentes diseñados para condiciones de operación más exigentes.

3.3 CONJUNTO ELECTRÓNICO

El tercer conjunto corresponde a los elementos encargados del control, supervisión y gestión del correcto funcionamiento del vehículo eléctrico. Dependiendo del nivel de funcionalidad que se desee alcanzar, este conjunto puede dotar al vehículo de cierto grado de “inteligencia”, permitiéndole generar información en tiempo real y asistir al conductor en la toma de decisiones que favorezcan una conducción segura, eficiente y sin contratiempos, en la figura 3.3 se muestra una descripción de los bloques que lo conforman.

Los elementos que integran este apartado ya fueron mencionados previamente dentro del conjunto B), aunque aquí se presentan nuevamente debido a su doble función:

- 1.- Controlador del motor eléctrico.
- 2.- Cargador de baterías.

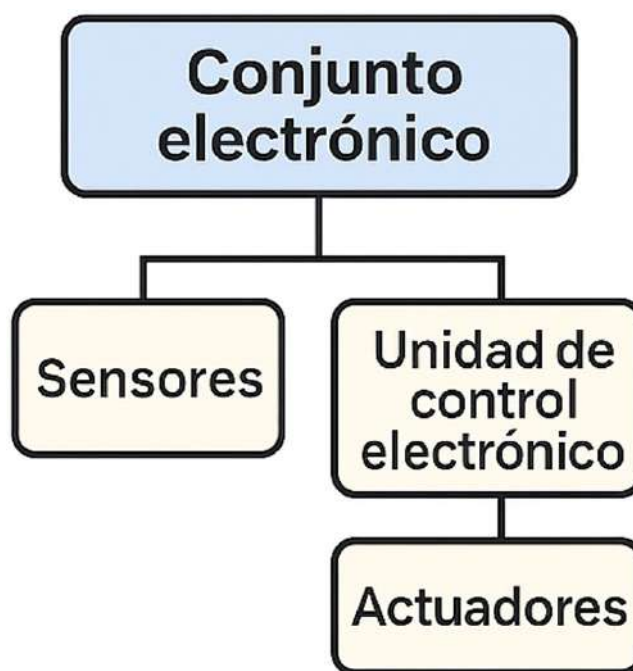


Figura 3.3: Ilustración descriptiva de los componentes del conjunto Electrónico

3.- Sistema inteligente (encargado de leer el estado de los sensores del vehículo y de accionar los actuadores correspondientes)

4.- Interfaz entre el vehículo y el conductor

Los elementos 1 y 2 no solo administran los altos niveles de voltaje y corriente necesarios para alimentar el motor eléctrico y recargar el banco de baterías, sino que también incorporan sistemas electrónicos y de programación capaces de monitorear, mediante sensores, variables críticas para mantener el motor y las baterías en condiciones óptimas de operación.

Por su parte, los elementos 3 y 4 son adicionales y opcionales, y permiten elevar la experiencia de conducción al integrar funciones que aumentan el confort, la seguridad y la interacción del usuario con el vehículo. Es en este apartado donde se define el nivel de “inteligencia” que se desea implementar, independientemente de que el vehículo originalmente haya sido adquirido en una versión austera.

Debido a la complejidad técnica de estos sistemas, el personal encargado de su integración debe contar con experiencia sólida en electrónica y sistemas computacionales.

Finalmente, para complementar este apartado, se presenta en la figura 3.4 un diagrama a bloques que resume la relación entre los conjuntos A, B y C, y muestra la interacción general entre los sistemas involucrados en la conversión a vehículo eléctrico.

El costo asociado a la revisión y posible reparación del conjunto mecánico-eléctrico constituye un gasto adicional al proceso de conversión. Por ello, es importante considerar que no basta con disponer del automóvil: antes de iniciar cualquier modificación, se debe garantizar que el vehículo podrá convertirse en un EV seguro y confiable.

No resulta conveniente adquirir un automóvil averiado o proveniente de un deshuesadero solo por su bajo costo inicial, especialmente si la inversión necesaria para dejarlo en condiciones adecuadas podría representar más de una cuarta parte del costo total de la conversión. En estos casos, lo aparentemente

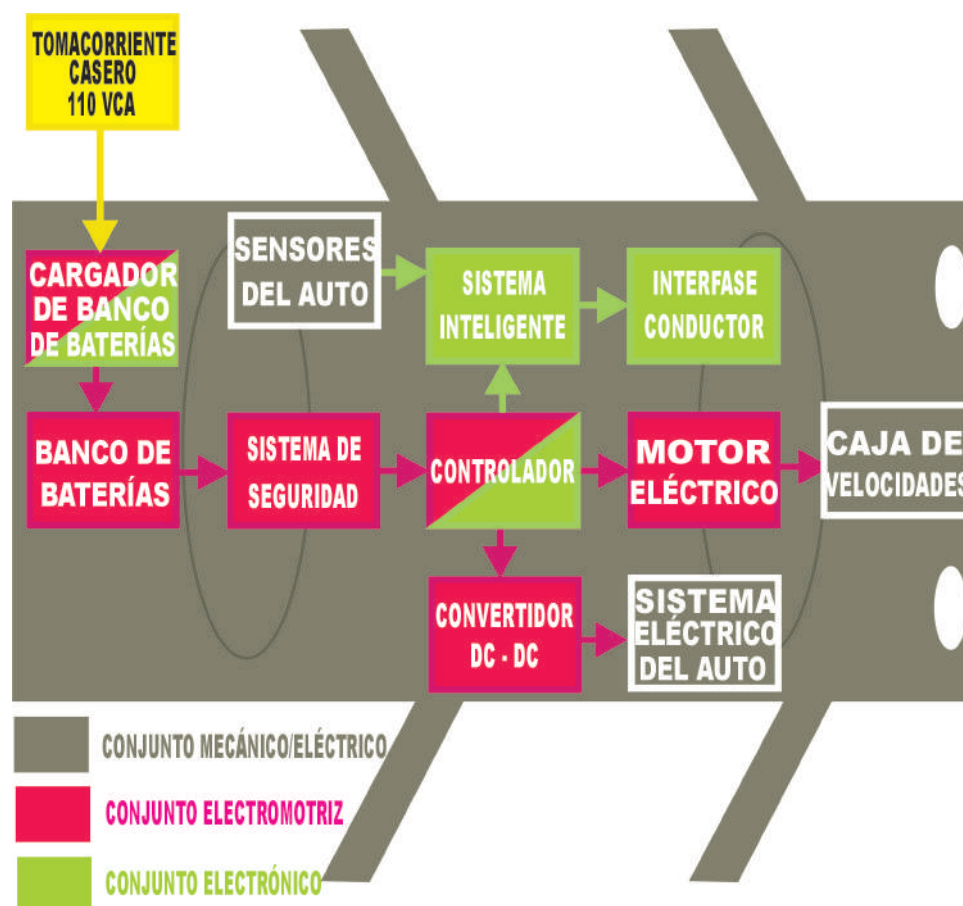


Figura 3.4: Bloques importantes de un EV



económico termina por ser más costoso y retrasa el progreso del proyecto.





CAPÍTULO 4

Parámetros y criterios de selección y de Diseño Replicables

El proceso de conversión de un vehículo de combustión interna a eléctrico requiere establecer una serie de parámetros de diseño que puedan ser replicados en proyectos similares, independientemente del modelo específico de vehículo a intervenir. Estos parámetros sirven como guía fundamental para garantizar que la conversión resulte técnicamente viable, económicamente accesible y operativamente segura.

A continuación se presentan los parámetros de diseño replicables, así como los criterios fundamentales que deben considerarse durante la selección de cada uno de los componentes del sistema electromotriz.

4.1 PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO

Selección del vehículo candidato

No todos los vehículos son igualmente aptos para someterse a un proceso de conversión. Los siguientes criterios deben considerarse al momento de seleccionar el vehículo base:

Peso y dimensiones:

- Se recomienda trabajar con vehículos compactos o sedanes medianos, con peso en vacío inferior a 1,500 kg.
- Vehículos más pesados requieren motores de mayor potencia y bancos de baterías de mayor capacidad, lo que incrementa significativamente el costo de conversión.
- La distancia entre ejes debe ser suficiente para permitir la instalación del banco de baterías sin comprometer la distribución de peso.

Edad y estado mecánico:

- El vehículo debe tener preferentemente entre 10 y 20 años de antigüedad, lo que garantiza que su estructura sea compatible con tecnologías actuales pero suficientemente económico para justificar la inversión en conversión.
- El conjunto mecánico-eléctrico (chasis, carrocería, suspensión, dirección, frenos y transmisión) debe encontrarse en condiciones óptimas de funcionamiento.
- No es recomendable iniciar una conversión en vehículos con daños estructurales, corrosión avanzada o sistemas mecánicos severamente deteriorados.



Tipo de transmisión:

- Se debe dar preferencia a vehículos con transmisión manual, ya que simplifican considerablemente el proceso de acoplamiento entre el motor eléctrico y la caja de velocidades.
- Las transmisiones automáticas requieren adaptaciones adicionales y sistemas de control más complejos, lo que incrementa el costo y la complejidad técnica del proyecto.

Disponibilidad de espacio:

- El vehículo debe contar con espacio suficiente en la cajuela o en el piso del habitáculo para instalar el banco de baterías sin comprometer la capacidad de carga ni la ergonomía del vehículo.
- El compartimento del motor debe tener dimensiones adecuadas para alojar el motor eléctrico, la controladora, el convertidor DC-DC y la bomba de vacío.

Parámetros de uso y operación

Antes de iniciar el diseño del sistema electromotriz, es fundamental definir claramente el perfil de uso del vehículo convertido:

Autonomía requerida:

- Determinar la distancia promedio que el vehículo recorrerá diariamente. Para uso urbano típico (traslados entre hogar, trabajo y escuela), se recomienda una autonomía mínima de 80 km por carga.
- Para vehículos de reparto o flotillas comerciales, la autonomía debe ajustarse según las rutas establecidas, considerando la posibilidad de realizar recargas intermedias.

Velocidad máxima:

- Para uso urbano, una velocidad máxima de 90-100 km/h es suficiente para cumplir con las necesidades cotidianas.
- Si el vehículo circulará frecuentemente en carreteras o autopistas, se debe considerar una velocidad máxima de al menos 110-120 km/h.

Topografía y condiciones de operación:

- Si el vehículo operará en zonas con pendientes pronunciadas, será necesario seleccionar un motor con mayor torque y potencia.
- Las condiciones climáticas extremas (frío intenso, calor excesivo) afectan el rendimiento del banco de baterías y deben considerarse en el dimensionamiento del sistema.

Capacidad de carga:

- Definir el número de pasajeros y la cantidad de carga que el vehículo transportará regularmente.
- El peso adicional incide directamente en el consumo de energía y, por lo tanto, en la autonomía del vehículo.

Distribución de peso y balance

La correcta distribución del peso es fundamental para mantener la estabilidad, el manejo y la seguridad del vehículo:

Principios generales:

- El peso total del sistema electromotriz (motor eléctrico + banco de baterías + componentes auxiliares) debe ser similar o inferior al peso del motor de combustión y sus componentes asociados (motor, tanque de gasolina, sistema de escape, etc.).
- Idealmente, la distribución de peso entre el eje delantero y trasero debe mantenerse en una proporción de 50:50 o 60:40 (delantero:trasero).



- El banco de baterías debe instalarse lo más cerca posible del centro de gravedad del vehículo, preferentemente entre los dos ejes.

Recomendaciones específicas:

- Colocar el banco de baterías en la cajuela, centrado entre las ruedas traseras, permite distribuir el peso de manera uniforme.
- Si el banco de baterías es demasiado pesado para instalarse únicamente en la cajuela, puede dividirse en dos módulos: uno en la cajuela y otro bajo los asientos traseros o en el túnel central.
- Evitar concentraciones de peso en un solo punto, ya que esto puede generar desgaste irregular de neumáticos, afectaciones en la suspensión y comportamiento dinámico inestable.

4.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL MOTOR ELÉCTRICO

El motor eléctrico es el corazón del sistema de propulsión y su correcta selección determina el desempeño, la eficiencia y la confiabilidad del vehículo convertido.

Tipo de motor

Existen principalmente tres tipos de motores eléctricos utilizados en conversiones vehiculares:

Motor de corriente directa (CD) con escobillas:

- Ventajas: Sencillo de controlar, económico, amplia disponibilidad en el mercado.
- Desventajas: Menor eficiencia (75-80 %), requiere mantenimiento periódico (reemplazo de escobillas), genera mayor ruido y vibraciones.
- Aplicación recomendada: Conversiones de bajo presupuesto, proyectos educativos o demostrativos.

Motor de corriente directa (CD) sin escobillas (BLDC):

- Ventajas: Mayor eficiencia (85-90 %), sin mantenimiento mecánico, operación más silenciosa, mayor durabilidad.
- Desventajas: Requiere controladora más sofisticada, costo ligeramente superior.
- Aplicación recomendada: Conversiones de uso regular, vehículos para flotillas comerciales.

Motor de corriente alterna (CA) trifásico de inducción o síncrono:

- Ventajas: Máxima eficiencia (90-95 %), operación extremadamente silenciosa, capacidad de freno regenerativo, sin mantenimiento mecánico, mayor durabilidad.
- Desventajas: Requiere controladora más compleja y costosa, mayor costo inicial.
- Aplicación recomendada: Conversiones de uso intensivo, proyectos de alto desempeño, vehículos comerciales con operación diaria.

Recomendación general: Para conversiones destinadas a uso cotidiano y operación confiable a largo plazo, se recomienda utilizar motores de corriente alterna (CA) trifásicos, ya que ofrecen el mejor balance entre eficiencia, durabilidad y desempeño.

Potencia del motor

La potencia del motor eléctrico debe seleccionarse considerando el peso del vehículo, el tipo de uso y las condiciones de operación:

Criterios de dimensionamiento:

- Para vehículos compactos (800-1,200 kg), se recomienda una potencia mínima de 20-30 kW (27-40 HP).
- Para sedanes medianos (1,200-1,500 kg), se recomienda una potencia de 30-50 kW (40-67 HP).



- Para vehículos de carga ligera (hasta 3.5 toneladas), se requiere una potencia de 50-80 kW (67-107 HP) o superior.

Consideraciones adicionales:

- La potencia del motor debe ser suficiente para mantener una velocidad de cruce cómoda (80-100 km/h) sin forzar el sistema.
- En zonas montañosas o con pendientes pronunciadas, se recomienda incrementar la potencia en un 20-30 % respecto a la calculada para terreno plano.
- Un motor sobredimensionado no necesariamente mejora el desempeño; por el contrario, puede incrementar el peso, el costo y el consumo de energía innecesariamente.

Torque del motor

El torque (o par motor) determina la capacidad de aceleración del vehículo y su habilidad para superar pendientes:

Criterios de selección:

- Para vehículos compactos, se recomienda un torque mínimo de 80-120 Nm.
- Para sedanes medianos, se recomienda un torque de 120-200 Nm.
- Para vehículos de carga, se requiere un torque de 200-400 Nm o superior.

Ventaja de los motores eléctricos:

- A diferencia de los motores de combustión, los motores eléctricos entregan su torque máximo desde el arranque (0 RPM), lo que proporciona aceleraciones vigorosas y respuesta inmediata.
- Esta característica permite que un motor eléctrico de menor potencia nominal pueda igualar o superar el desempeño de un motor de gasolina de mayor cilindrada.

Voltaje de operación

El voltaje de operación del motor debe ser compatible con el banco de baterías y la controladora:

Rangos típicos:

- Sistemas de bajo voltaje: 48-72 VCD (poco comunes en conversiones vehiculares, más utilizados en motocicletas o vehículos ligeros).
- Sistemas de voltaje medio: 96-144 VCD (rango más común para conversiones de vehículos compactos y sedanes).
- Sistemas de alto voltaje: 200-400 VCD (utilizados en vehículos comerciales o de alto desempeño).

Recomendación general: Para conversiones estándar de vehículos compactos, se recomienda trabajar con sistemas de 96-120 VCD, ya que ofrecen un balance adecuado entre desempeño, seguridad y disponibilidad de componentes.

Velocidad máxima (RPM)

La velocidad de rotación máxima del motor debe ser compatible con la caja de velocidades del vehículo:

Consideraciones:

- La mayoría de los motores eléctricos para conversiones vehiculares operan en rangos de 3,000 a 8,000 RPM.
- Si se conserva la caja de velocidades original, el motor debe ser capaz de operar eficientemente en todo el rango de velocidades del vehículo.
- Motores con velocidades de rotación más altas permiten diseños más compactos y livianos, pero pueden



generar mayor ruido y vibraciones.

Sistema de refrigeración

El motor eléctrico genera calor durante su operación, especialmente bajo condiciones de alta demanda:

Opciones disponibles:

- Refrigeración por aire (ventilación natural o forzada): Adecuada para motores de baja a media potencia con uso intermitente.
- Refrigeración líquida: Recomendada para motores de alta potencia o uso continuo, garantiza temperaturas de operación más estables.

Recomendación: Para conversiones destinadas a uso urbano cotidiano, la refrigeración por aire suele ser suficiente. Para uso comercial intensivo o condiciones climáticas extremas, se recomienda refrigeración líquida.

4.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL BANCO DE BATERÍAS

El banco de baterías determina la autonomía del vehículo y representa típicamente el 40-50 % del costo total de conversión. Su correcta selección es fundamental para garantizar un desempeño adecuado y una vida útil prolongada.

Tecnología de las baterías

Existen diversas tecnologías de baterías recargables, cada una con ventajas y desventajas específicas:

Baterías de plomo-ácido:

- Ventajas: Bajo costo inicial, amplia disponibilidad, tecnología madura y confiable.
- Desventajas: Peso elevado (3-4 veces más pesadas que las de litio), baja densidad energética, vida útil limitada (300-500 ciclos), requieren mantenimiento periódico.
- Aplicación recomendada: Proyectos demostrativos, conversiones temporales o de muy bajo presupuesto.
- No recomendadas para conversiones definitivas de uso regular.

Baterías de litio-ferrofosfato (LiFePO_4):

- Ventajas: Excelente seguridad (menor riesgo de incendio), larga vida útil (2,000-3,000 ciclos), peso moderado, buena estabilidad térmica.
- Desventajas: Densidad energética moderada (90-120 Wh/kg), costo medio.
- Aplicación recomendada: Opción ideal para conversiones de uso regular y operación segura.

Baterías de litio-NMC (níquel-manganeso-cobalto):

- Ventajas: Alta densidad energética (150-220 Wh/kg), peso reducido, excelente rendimiento.
- Desventajas: Mayor costo, requieren sistema de gestión (BMS) más sofisticado, menor estabilidad térmica que LiFePO_4 .
- Aplicación recomendada: Conversiones de alto desempeño, cuando la autonomía y el peso son críticos.

Recomendación general: Para conversiones estándar destinadas a uso cotidiano, se recomienda utilizar baterías de litio-ferrofosfato (LiFePO_4), ya que ofrecen el mejor balance entre seguridad, durabilidad, costo y desempeño.

Capacidad del banco de baterías



La capacidad se mide en kilowatts-hora (kWh) y determina la cantidad de energía que el vehículo puede almacenar:

Criterios de dimensionamiento:

- Para autonomía de 80-100 km en uso urbano: 15-20 kWh
- Para autonomía de 120-150 km en uso urbano: 20-30 kWh
- Para autonomía de 180-200 km en uso urbano: 30-40 kWh

Consideraciones importantes:

- El consumo promedio de un vehículo eléctrico compacto en uso urbano es de aproximadamente 15-20 kWh/100 km.
- En carretera, a velocidades constantes de 80-100 km/h, el consumo puede reducirse a 12-15 kWh/100 km.
- Factores como el peso del vehículo, el estilo de conducción, la topografía y las condiciones climáticas afectan significativamente el consumo real.

Recomendación práctica: Es preferible dimensionar el banco de baterías con un margen del 20-30 % superior a la autonomía mínima deseada, para compensar la degradación natural de las baterías con el tiempo y evitar descargas profundas que acorten su vida útil.

Voltaje nominal del banco

El voltaje del banco de baterías debe ser compatible con el motor eléctrico y la controladora:

Configuración típica:

- Las celdas individuales de litio tienen voltajes nominales de 3.2 V (LiFePO₄) o 3.6-3.7 V (NMC).
- Para obtener 96 VCD con celdas LiFePO₄: se requieren 30 celdas en serie (30S).
- Para obtener 120 VCD con celdas LiFePO₄: se requieren 37-38 celdas en serie (37-38S).

Consideraciones de seguridad:

- Voltajes superiores a 60 VCD se consideran de alto voltaje y requieren medidas de seguridad específicas.
- Todos los conductores, conectores y componentes deben estar dimensionados para soportar el voltaje máximo del sistema (generalmente 10-20 % superior al voltaje nominal).

Capacidad de corriente (C-rate)

La capacidad de corriente determina qué tan rápido puede descargarse o cargarse el banco de baterías:

Definición:

- El C-rate expresa la corriente como un múltiplo de la capacidad de la batería.
- Por ejemplo, para un banco de 20 kWh (aproximadamente 167 Ah a 120 V):
 - o 1C = 167 A (descarga completa en 1 hora)
 - o 2C = 334 A (descarga completa en 30 minutos)
 - o 0.5C = 83.5 A (descarga completa en 2 horas)

Criterios de selección:

- Las baterías deben ser capaces de proporcionar al menos 2C de corriente de descarga continua para satisfacer los picos de demanda del motor durante aceleraciones.
- Para carga, se recomienda trabajar con 0.5C a 1C para prolongar la vida útil de las baterías.

Sistema de gestión de baterías (BMS)



El BMS es un componente crítico que protege y optimiza el funcionamiento del banco de baterías:

Funciones principales:

- Monitoreo individual del voltaje de cada celda.
- Balanceo de celdas durante la carga para garantizar que todas alcancen el mismo nivel de carga.
- Protección contra sobrecarga, descarga excesiva, sobrecorriente y sobretemperatura.
- Cálculo del estado de carga (SOC) y estado de salud (SOH) del banco.
- Comunicación con el cargador y la controladora mediante protocolos como CAN bus.

Recomendación: El BMS debe ser específico para la tecnología de baterías utilizada (LiFePO₄, NMC, etc.) y debe ser capaz de gestionar el número de celdas en serie del banco. Nunca se debe omitir el BMS, ya que su ausencia puede resultar en daños irreversibles a las baterías o incluso incendios.

Ubicación e instalación del banco de baterías

La ubicación del banco afecta directamente la seguridad, el balance del vehículo y la capacidad de carga:

Criterios de ubicación:

- Preferentemente en la cajuela, centrado entre las ruedas traseras.
- Debe estar elevado al menos 10 cm sobre el piso para permitir el acceso a la llanta de refacción.
- Debe contar con ventilación adecuada para disipar el calor generado durante la carga y descarga.
- Debe estar firmemente sujeto mediante soportes metálicos atornillados al chasis para evitar desplazamientos durante frenados, aceleraciones o colisiones.

Consideraciones de seguridad:

- El banco debe estar aislado eléctricamente de la carrocería mediante materiales no conductores.
- Los cables de conexión deben estar protegidos contra daños mecánicos y correctamente dimensionados para la corriente máxima.
- Debe instalarse un fusible o interruptor de desconexión rápida cerca del banco, accesible en caso de emergencia.

4.4 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA CONTROLADORA

La controladora es el cerebro del sistema electromotriz y su correcta selección garantiza una operación eficiente, segura y confiable.

Compatibilidad con el motor

La controladora debe ser específica para el tipo de motor seleccionado:

Controladoras para motores de CD:

- Más sencillas y económicas.
- Controlan la velocidad mediante modulación por ancho de pulso (PWM).
- Limitadas en funcionalidad (sin freno regenerativo en la mayoría de los casos).

Controladoras para motores de CA:

- Más sofisticadas y costosas.
- Convierten la corriente directa del banco de baterías en corriente alterna trifásica.
- Permiten control vectorial para máxima eficiencia y torque.
- Incluyen freno regenerativo, protecciones avanzadas y comunicación CAN bus.



Capacidad de voltaje y corriente

La controladora debe soportar el voltaje nominal del banco de baterías y la corriente máxima del motor:

Criterios de selección:

- Voltaje: La controladora debe soportar al menos 120 % del voltaje nominal del banco (por ejemplo, si el banco es de 96 VCD, la controladora debe soportar mínimo 115 VCD).
- Corriente: La controladora debe manejar la corriente máxima continua del motor, más un margen del 20-30 % para picos transitorios.

Funciones de protección

Una controladora de calidad debe incluir múltiples protecciones:

- Protección contra sobrevoltaje y bajo voltaje.
- Protección contra sobrecorriente.
- Protección contra sobret temperatura (con sensores de temperatura en el motor y en la controladora).
- Protección contra fallas en los sensores.
- Modo de operación de emergencia (limp mode) que limita la potencia en caso de detectar anomalías.

Interfaz y programabilidad

La controladora debe permitir ajustes y configuración según las características del vehículo: Parámetros configurables:

- Corriente máxima de operación.
- Límite de velocidad máxima.
- Sensibilidad del pedal del acelerador.
- Intensidad del freno regenerativo.
- Parámetros de protección térmica.

Interfaz de usuario:

- Pantalla LCD o conexión Bluetooth/USB para configuración y diagnóstico.
- Registro de fallas y eventos para facilitar el mantenimiento.

4.5 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL CARGADOR DE BATERÍAS

El cargador determina el tiempo necesario para recargar el banco de baterías y su correcta selección garantiza la longevidad del sistema.

Compatibilidad con el tipo de baterías

El cargador debe estar específicamente diseñado para la tecnología de baterías utilizada:

- Cargadores para LiFePO4: Voltaje de carga típico de 3.6-3.65 V por celda.
- Cargadores para NMC: Voltaje de carga típico de 4.2 V por celda.
- Nunca utilizar un cargador de plomo-ácido para baterías de litio, ya que los perfiles de carga son completamente diferentes.

Potencia de carga

La potencia del cargador determina el tiempo de recarga:



Criterios de selección:

- Para carga nocturna (6-8 horas): Cargador de 2-3 kW (suficiente para la mayoría de conversiones).
- Para carga rápida (2-3 horas): Cargador de 6-10 kW.
- Para carga ultrarrápida (menos de 1 hora): Cargador de 15 kW o superior (requiere instalación eléctrica especial).

Ejemplo práctico:

- Para recargar un banco de 20 kWh completamente descargado:
 - o Con cargador de 2 kW: aproximadamente 10 horas.
 - o Con cargador de 6 kW: aproximadamente 3.5 horas.
 - o Con cargador de 10 kW: aproximadamente 2 horas.

Voltaje de entrada

El cargador debe ser compatible con la instalación eléctrica disponible:

- Cargadores de 120 VCA (1 fase): Potencias típicas de 1.5-3 kW, adecuados para carga nocturna en instalaciones domésticas estándar.
- Cargadores de 220-240 VCA (1 fase): Potencias de 3-7 kW, opción más eficiente para instalaciones domésticas con toma específica.
- Cargadores trifásicos (3 fases, 220-400 VCA): Potencias superiores a 7 kW, requieren instalación industrial o comercial.

Funciones de seguridad

Un cargador de calidad debe incluir:

- Protección contra sobrecarga.
- Detección automática de final de carga.
- Protección contra sobrecalentamiento.
- Protección contra polaridad invertida.
- Aislamiento galvánico entre la entrada de CA y la salida de CD.
- Certificaciones de seguridad (UL, CE, etc.).

Conector de carga

El conector debe ser robusto y compatible con estándares internacionales:

Opciones disponibles:

- Conector SAE J1772 (Tipo 1): Estándar más común en América del Norte, soporta hasta 19.2 kW en configuración monofásica.
- Conector IEC 62196 (Tipo 2): Estándar europeo, soporta carga trifásica hasta 43 kW.
- Conectores propietarios: Pueden ser más económicos pero limitan la interoperabilidad con estaciones de carga públicas.

Recomendación: Para conversiones en México, se recomienda utilizar el estándar SAE J1772, que permite compatibilidad con la infraestructura de carga pública existente.



4.6 COMPONENTES AUXILIARES

Además de los elementos principales, existen componentes auxiliares indispensables para el correcto funcionamiento del vehículo convertido.

Convertidor DC-DC

Reemplaza la función del alternador original:

Especificaciones:

- Entrada: Voltaje del banco de baterías (96-120 VCD típicamente).
- Salida: 13.5-14.5 VCD para mantener cargada la batería auxiliar de 12 V.
- Corriente: Mínimo 30 A para alimentar los accesorios del vehículo (luces, radio, limpiadores, etc.).
- Protecciones: Contra sobrecorriente, sobrecalentamiento y cortocircuito.

Bomba de vacío

Necesaria para operar el sistema de frenos asistidos:

Especificaciones:

- Capacidad: Generar entre 16z 18" Hg (54,000 Pa).
- Voltaje de operación: 12 VCD.
- Incluir sensor de presión para activación/desactivación automática.
- Tanque de almacenamiento: Mínimo 2 litros de capacidad para reducir los ciclos de operación de la bomba.

Contactor principal

Dispositivo de seguridad que conecta/desconecta el banco de baterías:

Especificaciones:

- Voltaje: Superior al voltaje máximo del banco (por ejemplo, 150 VCD para bancos de 120 VCD nominales).
- Corriente: Al menos 300 A continuos, preferentemente 400-500 A.
- Bobina de activación: 12 VCD para integrarse con el sistema eléctrico del vehículo.
- Tipo: Sellado (para protección contra polvo y humedad).

Fusibles y protecciones

Protegen el sistema contra sobrecorrientes:

Ubicación y dimensionamiento:

- Fusible principal: Entre el banco de baterías y la controladora, dimensionado para 400-500 A (debe fundirse antes de que los cables se dañen).
- Fusibles auxiliares: Para el convertidor DC-DC (40-50 A), bomba de vacío (15-20 A) y otros accesorios.
- Tipo: Fusibles de tipo automotriz o industriales (ANL, Mega Fuse, etc.), nunca utilizar fusibles de vidrio.

Cableado

El cableado debe dimensionarse adecuadamente para evitar caídas de voltaje y sobrecalentamiento:

Cables de alto voltaje (banco de baterías a controladora):



- Calibre mínimo: 2/0 AWG (doble cero).
- Material: Cobre flexible de múltiples hilos (nunca aluminio).
- Aislamiento: Mínimo 600 V, resistente a aceite, temperatura y abrasión.
- Color: Rojo para positivo, negro para negativo (estandarización).

Cables de bajo voltaje (12 VCD):

- Dimensionados según la corriente de cada circuito (AWG 18 a AWG 10 típicamente).
- Protegidos con fusibles individuales.
- Identificados mediante código de colores o etiquetas.

4.7 RESUMEN DE PARÁMETROS REPLICABLES

A continuación se presenta un listado consolidado de los parámetros de diseño que pueden aplicarse en proyectos similares de conversión:

Parámetros del vehículo base:

- Peso en vacío: menor a 1,500 kg
- Transmisión: manual
- Estado mecánico: óptimo (chasis, suspensión, frenos, dirección)
- Antigüedad: 10-20 años

Parámetros del motor eléctrico:

- Tipo: CA trifásico (preferentemente)
- Potencia: 20-50 kW según peso del vehículo
- Torque: 80-200 Nm según peso del vehículo
- Voltaje: 96-120 VCD
- Velocidad máxima: 3,000-8,000 RPM
- Refrigeración: aire forzado o líquida

Parámetros del banco de baterías:

- Tecnología: LiFePO4 (recomendado)
- Capacidad: 15-30 kWh para 80-150 km de autonomía
- Voltaje: 96-120 VCD (30-38 celdas en serie)
- C-rate: mínimo 2C de descarga continua
- BMS: obligatorio, con balanceo activo
- Ubicación: cajuela, centrado entre ruedas traseras

Parámetros de la controladora:

- Tipo: para motor CA trifásico
- Voltaje: 120-150 VCD (20% de margen)
- Corriente: 300-400 A continuos
- Freno regenerativo: incluido
- Protecciones: completas (voltaje, corriente, temperatura)
- Interfaz: programable con comunicación CAN bus

Parámetros del cargador:

- Potencia: 2-6 kW (carga en 3-10 horas)
- Entrada: 220 VCA monofásico
- Tecnología: específico para LiFePO4



- Conector: SAE J1772 (Tipo 1)
- Protecciones: completas

Componentes auxiliares:

- Convertidor DC-DC: entrada 96-120 VCD, salida 13.5 VCD, mínimo 30 A
- Bomba de vacío: 16-18" Hg, 12 VCD, con sensor y tanque
- Contactor: 150 VCD, 300-400 A, bobina 12 VCD
- Fusible principal: 400 A
- Cableado alto voltaje: 2/0 AWG mínimo, 600 V

Distribución de peso:

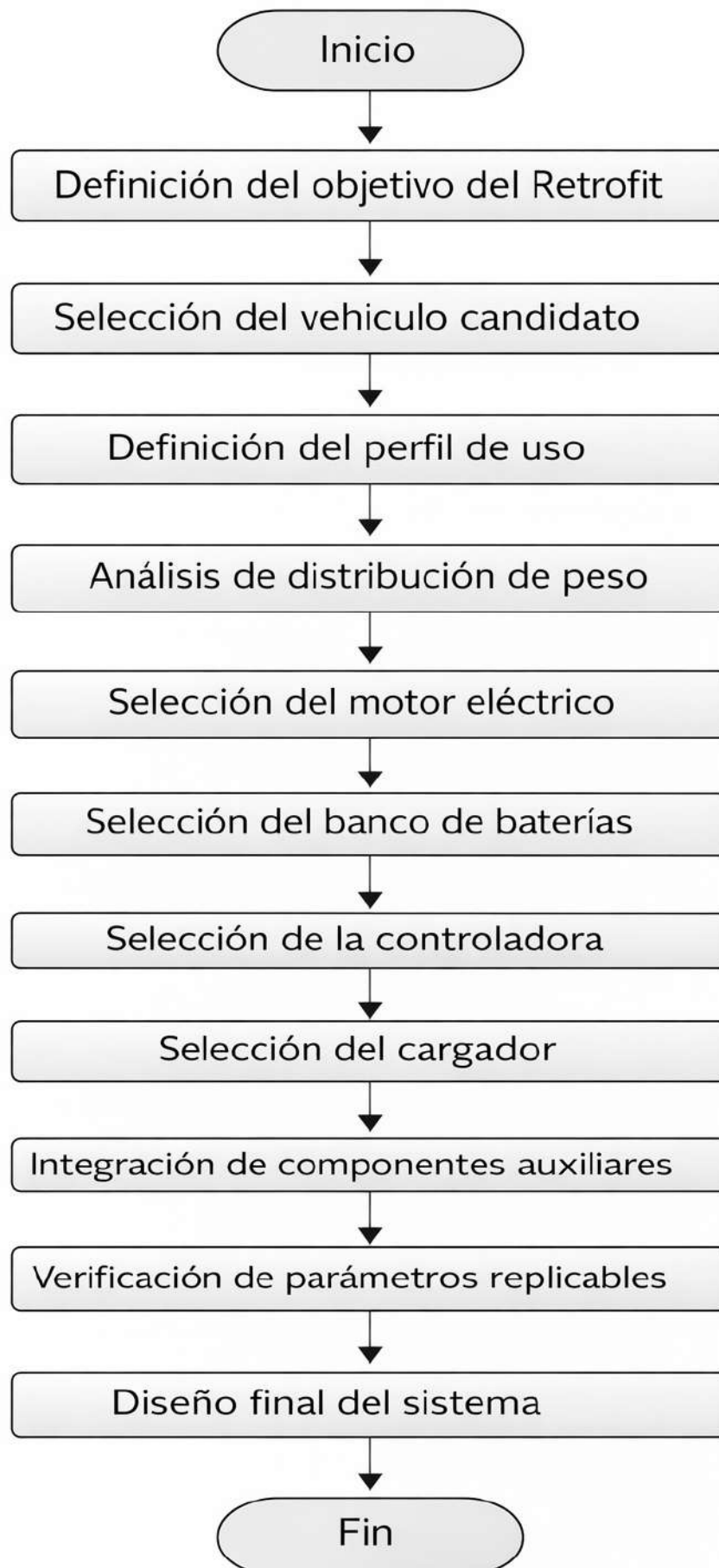
- Balance delantero/trasero: 50:50 o 60:40
- Banco de baterías: centrado entre ejes
- Peso total agregado: similar o inferior al sistema original

Estos parámetros constituyen una guía general que debe adaptarse a las características específicas de cada proyecto, considerando siempre las condiciones locales de operación, la disponibilidad de componentes y el presupuesto disponible. La flexibilidad en la aplicación de estos criterios, manteniendo siempre los estándares de seguridad y calidad, permitirá replicar el proceso de conversión en una amplia variedad de vehículos.

A manera de síntesis, en la Figura 4.41 se presenta un diagrama de flujo que describe de forma clara y secuencial los pasos necesarios para la aplicación del proceso de Retrofit en un vehículo equipado originalmente con un motor de combustión interna. Dicho diagrama permite identificar las actividades que deben ejecutarse en función de las condiciones iniciales del automóvil, considerando tanto el estado mecánico como eléctrico y electrónico del vehículo antes de iniciar la conversión.

El esquema facilita la comprensión del proceso al incorporar puntos de decisión que orientan al técnico o ingeniero sobre la continuidad, corrección o ajuste de cada etapa, asegurando que el procedimiento se realice de manera ordenada, segura y técnicamente viable. Asimismo, el diagrama sirve como una herramienta de referencia para la planificación, ejecución y validación del Retrofit, minimizando riesgos técnicos y garantizando la correcta integración de los nuevos sistemas eléctricos.

Es fundamental destacar que la correcta aplicación de este proceso debe realizarse en estricto apego a las normativas y lineamientos técnicos descritos en el Capítulo 8, las cuales establecen los criterios de seguridad, desempeño y cumplimiento legal necesarios para que el vehículo convertido pueda operar de manera confiable y circular conforme a la legislación vigente. El cumplimiento de dichas normas no solo asegura la integridad del sistema, sino también la protección del usuario y del entorno.







CAPÍTULO 5

Ingeniería del sistema electromotriz

La conversión de un vehículo de combustión interna a uno totalmente eléctrico exige una planificación técnica rigurosa que asegure el funcionamiento óptimo, seguro y eficiente del nuevo sistema de propulsión. Este capítulo aborda los criterios fundamentales para seleccionar cada uno de los componentes principales —motor, banco de baterías, controlador e infraestructura de gestión energética— y desarrolla los cálculos necesarios para estimar potencia, torque y autonomía. A través de un enfoque metodológico, se busca proporcionar una guía clara para la integración de los elementos que conforman el tren motriz eléctrico, garantizando su compatibilidad y desempeño dentro del proyecto de retrofit vehicular.

5.1 SELECCIÓN DEL MOTOR

Para comenzar se realiza la descripción técnica del vehículo seleccionado para la aplicación del proceso de Retrofit que corresponde a un FORD Focus modelo 2002, con las siguientes características relevantes:

- Marca: FORD
- Submarca: Focus
- Tipo: Sedán
- Transmisión: Manual
- Potencia del motor de combustión: 130 HP @ 5300 rpm
- Par máximo del motor de combustión: 135 lb · pie (183.04 Nm) @ 4500 rpm
- Peso total del vehículo: 1,163 kg
- Peso del vehículo sin motor de gasolina y sistemas asociados: 1,000 kg

Estas especificaciones sirven como referencia para definir los requerimientos mínimos de potencia, par y desempeño que debe cumplir el sistema de propulsión eléctrica sustituto.

El motor eléctrico seleccionado para el proceso de Retrofit fue un motor eléctrico trifásico asíncrono de corriente alterna, con capacidad de freno regenerativo, cuyas características técnicas son las siguientes:

- Potencia nominal: 15 kW
- Potencia máxima: 45 kW
- Voltaje de alimentación: 100 V
- Rango de velocidad: 4,000 – 8,000 rpm
- Corriente nominal: 150 A
- Corriente máxima: 450 A
- Par nominal: 43 Nm



- Par máximo: 165 Nm
- Capacidad de freno regenerativo: Sí

La potencia del motor de combustión interna se convierte a unidades del Sistema Internacional para facilitar la comparación:

$$P = 130HP \times 0,7457 = 96,940W = 96,94KW$$

Si bien el motor original presenta una potencia máxima considerablemente mayor, es importante destacar que dicha potencia solo se alcanza a altas revoluciones y rara vez se utiliza de forma continua en conducción urbana.

En contraste, el motor eléctrico seleccionado ofrece:

- 15 kW nominales, adecuados para operación continua.
- 45 kW máximos, disponibles de manera inmediata durante aceleraciones o pendientes.

Este comportamiento es coherente con los requerimientos reales de un vehículo urbano, donde la potencia promedio demandada suele estar entre 10 y 25 kW.

El par del motor de combustión es:

$$T_{ICE} = 183,04Nm$$

El motor eléctrico presenta:

- Par nominal: 43 Nm
- Par máximo: 165 Nm

Aunque el par máximo del motor eléctrico es ligeramente inferior al del motor de gasolina, debe considerarse que:

1. El par eléctrico está disponible desde 0 rpm, a diferencia del motor de combustión que lo alcanza a 4,500 rpm.
2. El uso de la transmisión manual existente permite multiplicar el par en las ruedas, compensando cualquier diferencia.
3. El par máximo del motor eléctrico se encuentra dentro del rango necesario para mover un vehículo de 1,000 kg, especialmente en arranques y pendientes.

La potencia eléctrica máxima del sistema puede verificarse mediante:

$$P = V \times I$$

Para condiciones máximas:

$$P_{m\acute{a}x} = 100V \times 450A = 45,000W = 45kW$$

Este valor coincide con la potencia máxima especificada del motor, confirmando la coherencia entre el motor, el controlador y el banco de baterías.

La incorporación de freno regenerativo representa una ventaja técnica clave, ya que:

- Permite recuperar parte de la energía cinética durante desaceleraciones.



- Reduce el desgaste del sistema de frenos mecánicos.
- Incrementa la eficiencia global del sistema y la autonomía del vehículo.

Con base en el análisis de potencia, par, consumo eléctrico y peso del vehículo, se concluye que el motor eléctrico trifásico asíncrono seleccionado cumple adecuadamente con los requerimientos técnicos del proceso de Retrofit. Su capacidad de entrega de par inmediato, potencia máxima suficiente, compatibilidad con el sistema de transmisión existente y función de freno regenerativo justifican plenamente su elección como sustituto del motor de combustión interna original, garantizando un desempeño seguro, eficiente y acorde al uso previsto del vehículo convertido.

5.2 SELECCIÓN DEL BANCO DE BATERÍAS

Con respecto al banco de baterías, este constituye la fuente primaria de energía del sistema de propulsión eléctrica. Su función es suministrar energía en corriente directa (VCD), la cual será convertida por la controladora/inversor en corriente alterna trifásica (VCA) para alimentar al motor eléctrico.

Dado que el motor seleccionado opera a 100 VCA, el banco de baterías debe proporcionar un voltaje en VCD compatible, considerando las pérdidas y el margen de operación del inversor.

Los requerimientos del banco se definen directamente a partir de las características del motor y del controlador:

- Voltaje nominal del motor: 100 VCA trifásico
- Corriente máxima del motor: hasta 450 A (condiciones pico)
- Corriente continua requerida del banco: ≥ 300 A
- Potencia máxima demandada: 45 kW

Para alimentar un inversor que entregue 100 VCA trifásico, se selecciona un banco con un voltaje nominal en el rango de:

$$V_{\text{banco}} \approx 96 \text{ a } 108 \text{ VCD}$$

Este rango es típico en sistemas automotrices eléctricos y permite una conversión eficiente VCD–VCA.

En cuanto a la química de las baterías, se propone el uso de fosfato de hierro y litio (LiFePO) debido a las siguientes ventajas técnicas:

- Alta estabilidad térmica.
- Menor riesgo de fuga térmica.
- Mayor vida útil (2,000–4,000 ciclos).
- Buena capacidad para altas corrientes de descarga.
- Adecuadas para aplicaciones automotrices.

Cada celda LiFePO_4 presenta un voltaje nominal aproximado de 3.2 V.

Para configurar al banco de baterías se procede al cálculo del número de celdas en serie, para obtener un voltaje nominal cercano a 96 VCD:

$$N = \frac{96, \text{V}}{3,2 \text{ V/celda}} = 30 \text{ celdas en serie}$$



Por lo tanto, el banco estará compuesto por 30 celdas en serie (30S).

Para soportar corrientes pico de hasta 300 A de forma segura, la capacidad de las celdas y la configuración en paralelo deben cumplir:

$$I_{\text{banco}} \geq 300A$$

Si se seleccionan celdas de 100 Ah con capacidad de descarga continua de 1C–3C, la corriente máxima por celda sería:

$$I_{\text{celda}} = 100A \text{ (1C)} \text{ hasta } 300A \text{ (3C)}$$

Esto permite:

- Configuración 30S1P para uso moderado.
- Configuración 30S2P si se desea mayor margen térmico y de vida útil.

La potencia máxima que debe suministrar el banco es:

$$P = V \times I$$

Para condiciones pico:

$$P_{\text{max}} = 100V \times 300A = 30,000W = 30kW$$

Y en condiciones extremas (breves):

$$P_{\text{max}_{\text{ext}}} = 100V \times 450A = 45kW$$

Estos valores coinciden con la potencia máxima del motor eléctrico, validando la selección del banco.

El banco de baterías debe integrar un BMS acorde al voltaje y corriente del sistema, con las siguientes funciones mínimas:

- Monitoreo individual de voltaje por celda.
- Balanceo activo o pasivo para prolongar la vida útil.
- Protección contra:
 - Sobrecorriente.
 - Sobrecarga.
 - Sobredescarga.
 - Cortocircuito.
- Supervisión y control térmico.
- Comunicación con el controlador del motor para estrategias de seguridad.

La autonomía depende de la energía total almacenada y del consumo promedio del sistema.

Energía total del banco, suponiendo:

- Voltaje nominal: 96 V
- Capacidad: 100 Ah



$$E = V \times Ah = 96 \times 100 = 9,600Wh = 9,6kWh$$

Si el consumo promedio del vehículo es de 7 kW en conducción urbana:

$$\text{Autonomía (h)} = \frac{9,6}{7} = 1,37h$$

Con una velocidad promedio de 45 km/h:

$$\text{Autonomía (km)} = 1,37 \times 45 \approx 62km$$

Con base en los requerimientos del motor eléctrico trifásico, se justifica técnicamente la selección de un banco de baterías LiFePO_4 de aproximadamente 96 VCD, capaz de suministrar corrientes superiores a 300 A y potencias de hasta 45 kW en condiciones pico. La configuración propuesta garantiza compatibilidad con el inversor, seguridad eléctrica, autonomía adecuada para uso urbano y una vida útil prolongada, consolidándose como una solución técnicamente viable y segura para el proceso de Retrofit vehicular.

5.3 SELECCIÓN DE LA CONTROLADORA (INVERSOR)

La controladora, también denominada inversor de potencia, es el elemento encargado de convertir la energía eléctrica en corriente directa (VCD) proveniente del banco de baterías en corriente alterna trifásica (VCA), con frecuencia y amplitud variables, necesarias para controlar la velocidad, el par y el sentido de giro del motor eléctrico.

Adicionalmente, la controladora debe permitir el funcionamiento del freno regenerativo, mediante el cual el motor actúa como generador durante desaceleraciones, retornando energía eléctrica al banco de baterías.

En relación con el banco de baterías, seleccionado presenta un voltaje nominal aproximado de 96–100 VCD, con capacidad para suministrar corrientes continuas superiores a 300 A y picos de hasta 450 A. Por lo tanto, la controladora debe ser compatible con este rango de voltaje de entrada y capaz de manejar corrientes elevadas sin comprometer su integridad térmica ni eléctrica.

El requerimiento de voltaje de entrada de la controladora seleccionada debe operar dentro del rango:

$$100 \leq V_{\text{entrada}} \leq 120, \text{VCD}$$

Este margen permite absorber variaciones del voltaje del banco durante:

- Estados de carga completa.
- Descargas profundas.
- Procesos de frenado regenerativo.

En relación con el motor eléctrico, este es trifásico asíncrono, con las siguientes características relevantes:

- Voltaje nominal: 100 VCA trifásico
- Corriente nominal: 150 A
- Corriente máxima: 450 A
- Potencia nominal: 15 kW



- Potencia máxima: 45 kW
- Par máximo: 165 Nm

La controladora debe ser capaz de suministrar estas magnitudes eléctricas de forma segura y controlada.

La corriente máxima de salida que debe entregar la controladora se estima a partir de la potencia máxima del motor:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \eta$$

Despejando la corriente:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \eta}$$

Suponiendo:

- $P = 45 \text{ kW}$
- $V = 100 \text{ V}$
- $\eta = 0,9$

$$I = \frac{45,000}{\sqrt{3} \times 100 \times 0,9} = 288,7 \text{ A}$$

Este resultado justifica que la corriente de salida de la controladora debe ser de al menos:

$$I_{\text{salida}} \geq 300 \text{ A}$$

La potencia eléctrica absorbida desde el banco de baterías puede verificarse mediante:

$$P = V \times I$$

Para condiciones máximas:

$$P = 100 \text{ V} \times 450 \text{ A} = 45 \text{ kW}$$

Este valor coincide con:

- La potencia máxima del motor.
- La capacidad máxima del banco de baterías.

Lo anterior confirma que la controladora actúa como un elemento de acoplamiento adecuado entre la fuente de energía y el actuador mecánico, capacidad de freno regenerativo.

La controladora seleccionada debe integrar:

- Modulación bidireccional de potencia.
- Gestión de corriente inversa hacia el banco de baterías.
- Comunicación con el BMS para evitar sobrecarga durante la regeneración.

Esto permite:

- Recuperar energía cinética.
- Reducir el desgaste del sistema de frenos mecánicos.
- Incrementar la eficiencia energética del sistema.
- Disipación térmica activa o pasiva.



Figura 5.1: Imagen representativa de un motor eléctrico

- Protección contra sobrecorriente y sobretensión.
- Aislamiento eléctrico conforme a normas automotrices (ISO 6469).
- Comunicación bajo protocolo CANBUS para enviar información a un tablero (dashboard).

Con base en los requerimientos eléctricos del motor trifásico y del banco de baterías, se justifica la selección de una controladora con entrada de 100–120 VCD y salida de 100 VCA trifásico capaz de suministrar corrientes superiores a 300 A, con capacidad de freno regenerativo. Esta configuración garantiza compatibilidad eléctrica, seguridad operativa y un desempeño eficiente del sistema electromotriz en el proceso de Retrofit vehicular.

Las figuras adjuntas representan:

- Motor eléctrico trifásico: elemento central del tren motriz, figura 5.1.
- Controladora trifásica: inversor responsable de la conversión VCD–VCA, figura 5.2.
- Banco de baterías con BMS incluido, figura 5.3.
- Tablero/Dashboard con indicadores de velocidad y estado de carga, figura 5.4.

Estos elementos deben instalarse siguiendo principios de seguridad eléctrica, aislamiento adecuado y cálculo preciso de calibres de cableado.



Figura 5.2: Imagen representativa de una controladora



Figura 5.3: Imagen representativa de un banco de baterías y su cargador

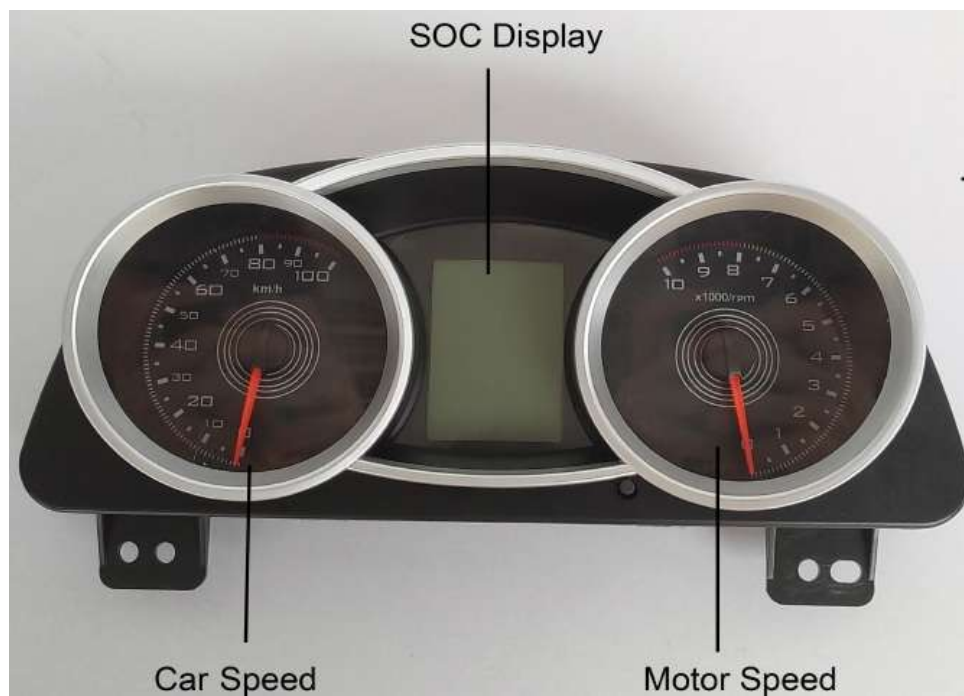


Figura 5.4: Imagen representativa de un tablero





CAPÍTULO 6

Detalle del conjunto electromotriz

El conjunto electromotriz de un vehículo eléctrico constituye el sistema fundamental, pues de su correcta integración depende que el vehículo pueda desplazarse desde un punto de partida hasta su destino. Este conjunto incluye el banco de baterías, encargado de almacenar la energía eléctrica necesaria para la operación. Cuando el vehículo lo requiere, dicha energía es suministrada al controlador, que a su vez regula y entrega la potencia adecuada al motor eléctrico.

Para que este proceso ocurra de manera eficiente, es indispensable contar con diversos componentes adicionales que trabajen de forma coordinada. Solo mediante la integración adecuada de todos estos elementos es posible que el vehículo pueda ponerse en movimiento.

Para la instalación de los distintos componentes eléctricos, fue indispensable apegarse a normativas orientadas a la seguridad y correcta operación del vehículo una vez que ha sido sometido al proceso de Retrofit, las cuales se encuentran debidamente enlistadas y descritas en el Capítulo 8.

Asimismo, para la elaboración de los diagramas eléctricos presentados en este capítulo, se empleó de manera principal la simbología normalizada establecida en la norma IEC 60617, la cual es el referente internacional para la representación gráfica de componentes y sistemas eléctricos, garantizando claridad, estandarización y validez técnica del diseño.

Cabe señalar que, en lo relativo a la representación de los componentes del sistema de frenos, debido a que su funcionamiento se basa en principios neumáticos asociados a la generación de vacío, se utilizó simbología específica correspondiente a este tipo de sistemas, como lo es la norma ISO 1219 asegurando una representación coherente con su principio de operación y una correcta interpretación técnica dentro del conjunto electromotriz del vehículo.

6.1 DIAGRAMA CONJUNTO ELECTROMOTRIZ

Lo primero que debe explicarse es el diagrama parcial correspondiente al banco de baterías, el cual, como ya se mencionó, es el encargado de suministrar la energía eléctrica requerida por el motor. Para que el banco de baterías pueda entregar el voltaje y la corriente necesarios, es indispensable activar el contactor instalado en la terminal positiva (+). Este contactor es capaz de soportar hasta 110 VCD y 300 A, valores que corresponden a la demanda máxima del motor eléctrico durante su operación.

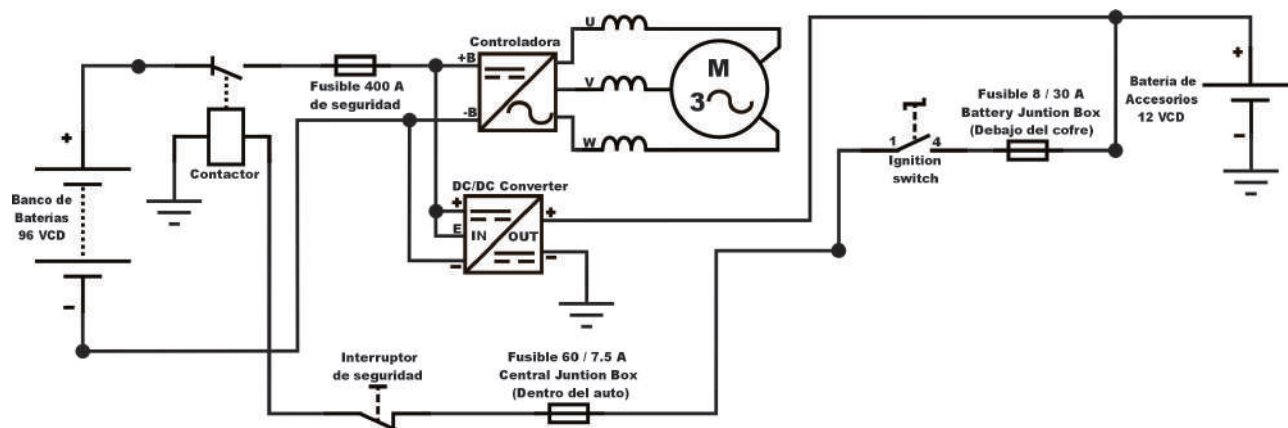


Figura 6.1: Diagrama de conexión del motor eléctrico

La activación del contactor, en este diseño, se realiza mediante el switch original del vehículo cuando se coloca en la posición de “accesorios” o en la posición de “arranque/activación”. Para efectuar la conexión correcta del switch, es necesario consultar el diagrama eléctrico del automóvil, identificar los conectores involucrados y comprobar su ubicación física, a fin de intervenirlos adecuadamente.

Los fusibles asociados con la activación del contactor —identificados como 8 y 60 en el auto intervenido— forman parte del sistema eléctrico original del vehículo. Resulta fundamental conservarlos para no comprometer la seguridad del sistema. Además, mantener su numeración original permite que, al consultar el diagrama eléctrico de fábrica, se identifique con precisión la ubicación de cada fusible. Como medida adicional de seguridad, se añadió un interruptor entre la bobina del contactor y el fusible 60; su función es permitir al conductor cortar manualmente la alimentación de la bobina en caso de detectar una condición de riesgo, evitando así la activación del contactor.

Una vez que el contactor ha sido activado, la energía del banco de baterías se canaliza hacia la controladora del motor eléctrico. A este componente llegan los conductores de alto voltaje positivo (+) y negativo (–). Para proteger el sistema ante sobrecorrientes —que podrían provocar sobrecalentamiento de los cables o incluso un incendio— se instaló, entre el contactor y la controladora, un fusible de 400 A.

La controladora es el componente responsable de convertir el voltaje de corriente directa (VCD) proveniente del banco de baterías en corriente alterna trifásica (VCA), necesaria para operar el motor eléctrico. Por ello, es esencial conectar correctamente las fases U, V y W.

Además de la controladora, se integra un convertidor DC-DC cuya función es reducir el voltaje máximo suministrado por el banco de baterías a un nivel adecuado para mantener cargada la batería de 12 VCD del vehículo. Esta batería —de plomo-ácido— continúa alimentando todos los accesorios originales del automóvil. El convertidor recibe hasta 100 VCD de entrada y entrega 13.7 VCD en su salida, cumpliendo así la función que anteriormente desempeñaba el alternador.

En el esquema ilustrado en la figura 6.1 se presentan las conexiones descritas en este apartado.

Para recargar el banco de baterías es necesario utilizar un cargador específico, cuyas características deben corresponder al tipo de celdas con las que está construido dicho banco. Es fundamental considerar que, mientras el banco de baterías esté conectado al cargador, el contactor principal no debe activarse. Si el banco entrega energía a la controladora mientras, al mismo tiempo, está siendo cargado, el cargador podría dañarse de forma irreversible.

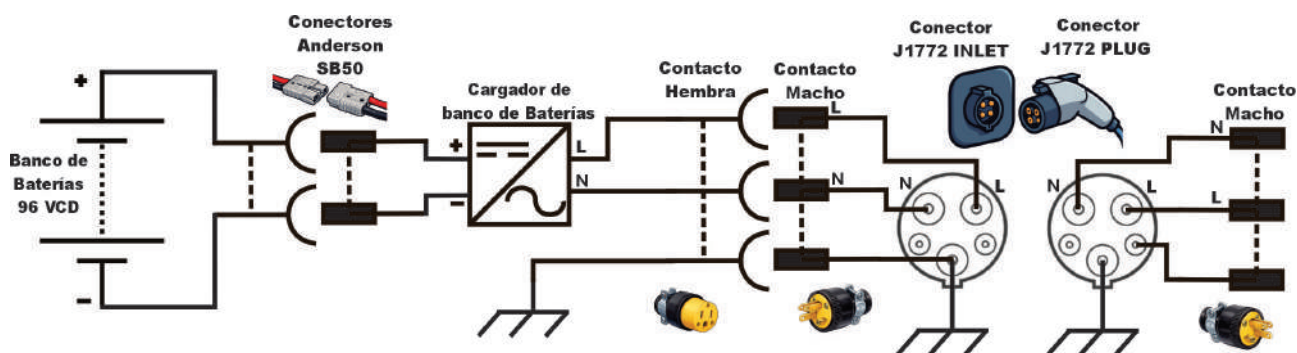


Figura 6.2: Diagrama de conexión del cargador de baterías

Por esta razón, la conexión del cargador debe realizarse antes del contactor, asegurando que durante el proceso de carga el circuito de potencia permanezca aislado del sistema de tracción.

En el diagrama que se muestra en la figura 6.2, se ilustra la forma correcta de conectar el cargador al banco de baterías.

Por último, dentro del conjunto electromotriz también se incluye la instalación de los elementos necesarios para restablecer el funcionamiento del sistema de frenos. Esto se debe a que, al retirar el motor de gasolina, el sistema original de asistencia por vacío queda inhabilitado.

El booster o asistente de frenos requiere un nivel de vacío para accionar los discos y balatas instalados en las ruedas del vehículo. Para ello, es necesario instalar una bomba de vacío eléctrica, capaz de generar entre 16" y 18" Hg (pulgadas de mercurio), lo que equivale aproximadamente a 54,000 Pa. Su funcionamiento es regulado por un sensor de vacío, encargado de activar o desactivar automáticamente la bomba, evitando así su operación continua y posibles daños por sobreuso.

La bomba de vacío debe operar bajo la misma condición de activación que la unidad controladora; es decir, solo entra en funcionamiento cuando el switch original del vehículo se coloca en la posición de "accesorios" o "activación". Para gestionar su operación, se instala un relevador, cuya bobina es controlada por la señal del sensor de vacío. De esta manera, la bomba se enciende o apaga según el nivel de vacío requerido.

En el diagrama mostrado en la figura 6.3 se presenta la conexión de la bomba de vacío y de sus elementos auxiliares.

Las tres partes descritas anteriormente se integran por completo en el diagrama que se muestra en la figura 6.4.

6.2 DIAGRAMA CONEXIÓN CONTROLADORA DE MOTOR ELÉCTRICO

Una de las partes fundamentales del conjunto electromotriz es la controladora del motor eléctrico, ya que este módulo regula la energía —voltaje y corriente— que el banco de baterías suministra al motor.

Como se explicó anteriormente, el banco de baterías proporciona a la controladora un voltaje de corriente directa (VCD), el cual ingresa a través de las terminales B(positivo) y B(negativo). A partir de esta energía, la controladora realiza internamente la conversión de VCD a corriente alterna (VCA) trifásica, mediante su electrónica de potencia.

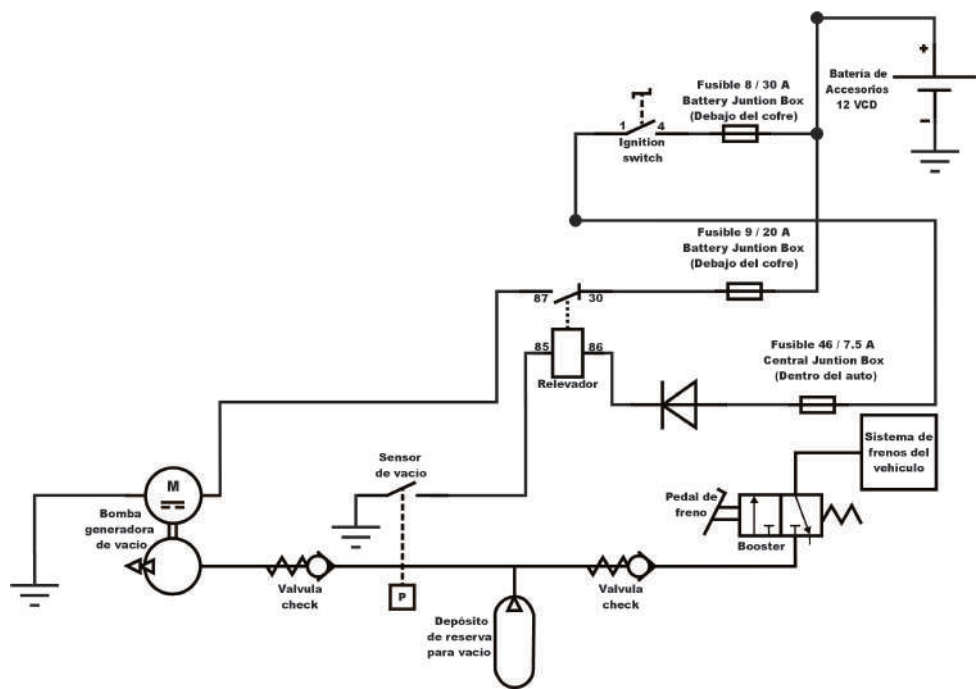


Figura 6.3: Diagrama de conexión de la bomba de vacío para los frenos

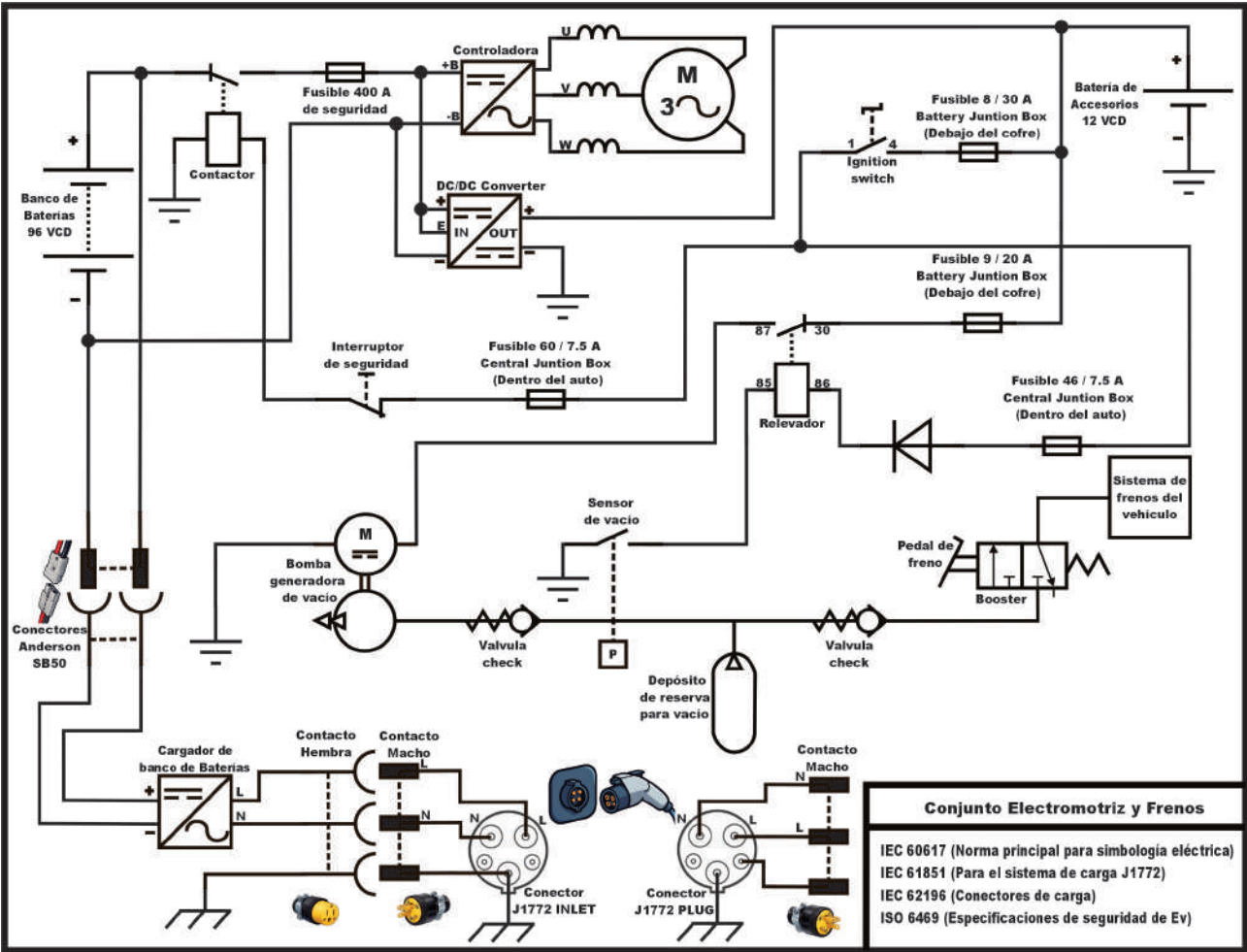


Figura 6.4: Diagrama completo del conjunto electromotriz

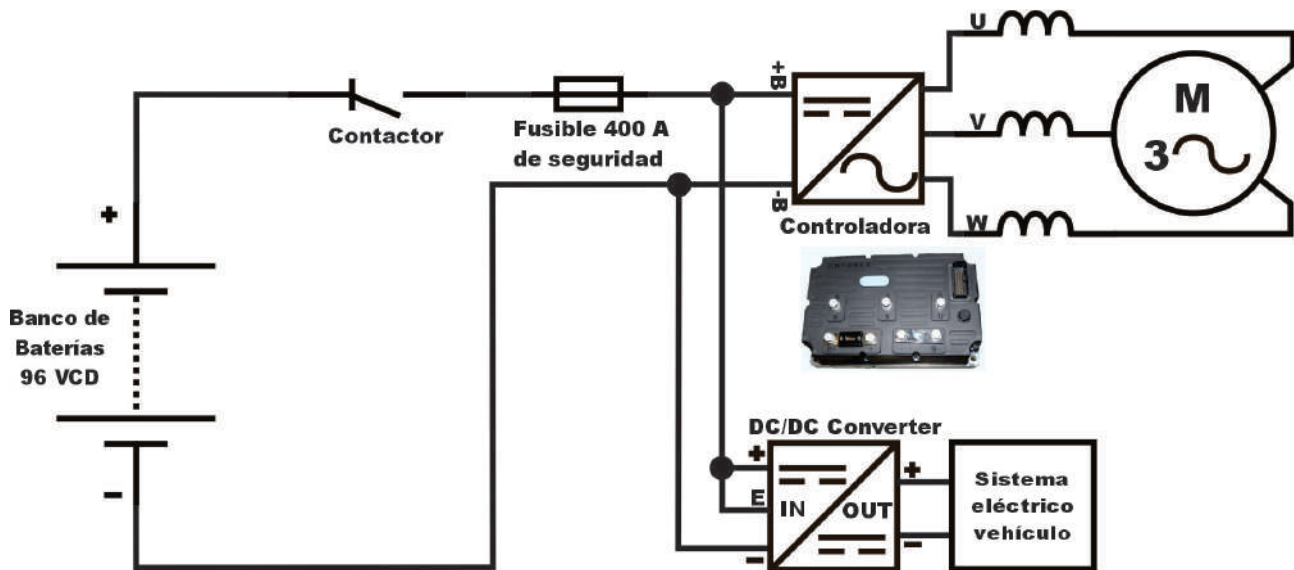


Figura 6.5: Diagrama de conexión de la controladora

Una vez generada la VCA trifásica, esta se conduce hacia el motor eléctrico por medio de las terminales U, V y W, garantizando que el motor —también trifásico— reciba las tres fases necesarias para su operación.

En la imagen de la figura 6.5 se presenta la conexión general entre el banco de baterías, la controladora y el motor eléctrico.

Los elementos mostrados en la imagen anterior, como el contactor y el convertidor DC-DC, fueron descritos detalladamente en el apartado 6.1.

La controladora del motor eléctrico puede encontrarse en diferentes configuraciones, según el fabricante y el tipo de motor para el que esté diseñada. Sin embargo, en términos generales todas cuentan con las terminales ya mencionadas: B(positivo) y B(negativo) como terminales de entrada, y U, V y W como terminales de salida hacia el motor.

Además, la mayoría de las controladoras incorporan un bloque de conexiones destinado a recibir diversas señales de control. A través de estas señales es posible gestionar múltiples funciones del motor eléctrico, permitiendo su operación de acuerdo con las necesidades de desplazamiento del vehículo.

En la imagen de la figura 6.6 se muestra un ejemplo de controladora, así como la terminal donde se conectan los elementos adicionales para el control del motor eléctrico.

A continuación se describe la función de los elementos complementarios que deben conectarse a la controladora del motor eléctrico:

6.2.1. Switch

Por medio de una llave este elemento es el encargado de “activar” la controladora, la llave tiene que ser manipulada por el conductor del vehículo. Como elemento de seguridad puede incorporarse al sistema de activación de la controladora una segunda llave, que en este caso activará al switch que originalmente se encuentra instalado en el vehículo que será convertido a eléctrico.

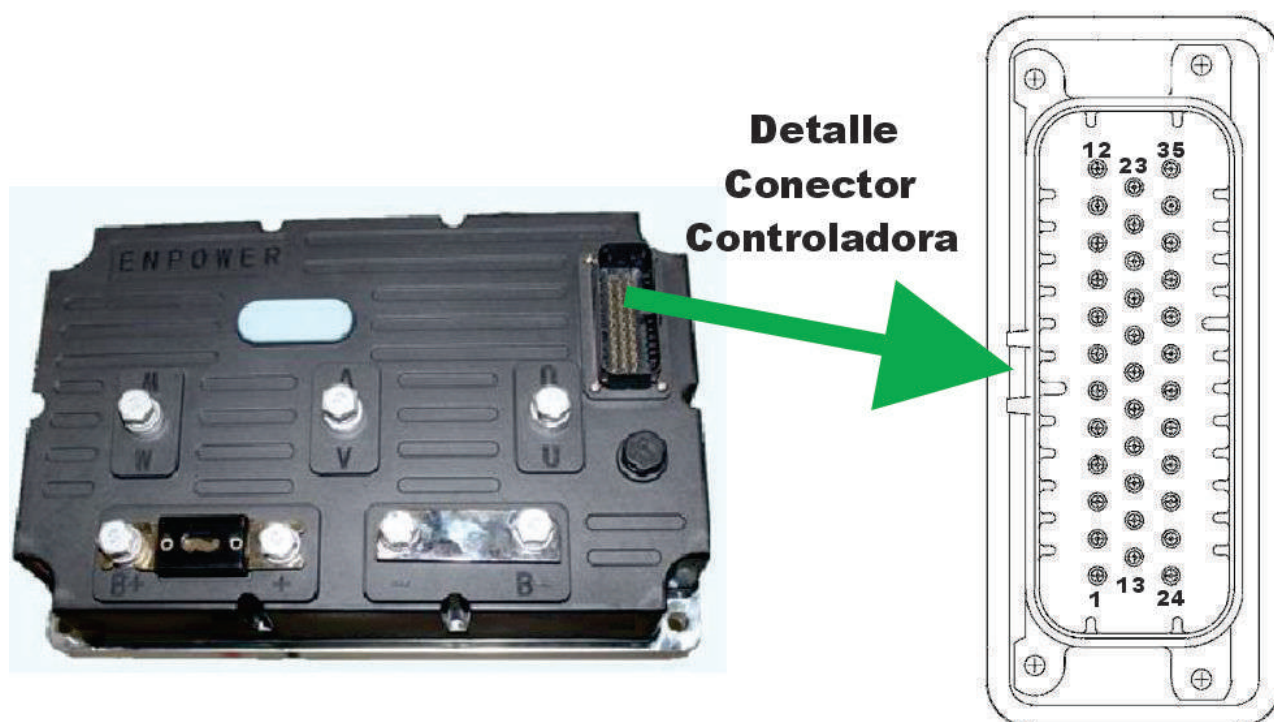


Figura 6.6: Imagen de una controladora

En las imágenes de las figuras 6.7 y 6.8 se muestran ejemplos de llaves y switch que puede incorporar la controladora, como también la que se encuentra originalmente instalado en el vehículo.

Es recomendable instalar dos interruptores como medida básica pero efectiva de seguridad, pues únicamente el conductor sabrá que se requieren dos llaves para activar la controladora y, en consecuencia, poner en marcha el vehículo.

En el presente proyecto de conversión, el interruptor incorporado en la propia controladora se colocó en un sitio discreto, mientras que el interruptor original del vehículo se integró a un circuito adicional denominado "sistema inteligente", el cual tiene como objetivo identificar el accionamiento de la llave original de vehículo.

Del sistema inteligente se obtiene una salida mediante un contacto que se activa cuando la llave del interruptor original se gira a la posición de arranque o activación. Este contacto debe conectarse en serie con el interruptor de la controladora, de modo que la controladora solo pueda activarse cuando ambas llaves se encuentren en posición de arranque.

El voltaje que circula a través del interruptor de la controladora y del contacto del sistema inteligente corresponde al voltaje total del banco de baterías (entre 75 VCD y 140 VCD). Por esta razón, es fundamental seleccionar adecuadamente la terminal del conector de la controladora donde debe recibirse este voltaje. Cuando dicho voltaje está ausente (es decir, cuando ambas llaves están en posición de apagado), la controladora permanece desactivada.

En el diagrama de la figura 6.9 se muestra la conexión de los switches de ambas llaves descritas en el texto.



Figura 6.7: Llaves incorporadas a la controladora



Figura 6.8: Switch y llave original

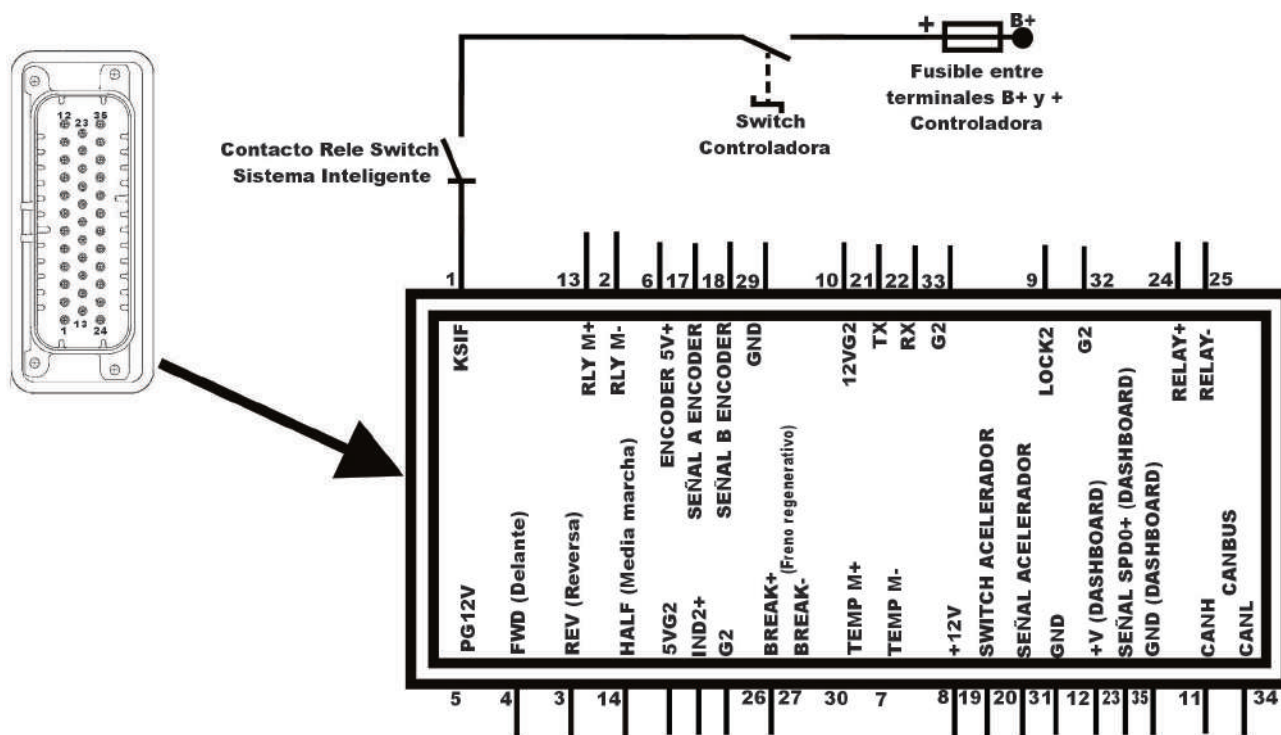


Figura 6.9: Diagrama de conexión de los switches de la controladora y original del auto

6.2.2. Palanca selectora

La palanca selectora cuenta con tres posiciones: D (marcha hacia adelante), N (neutro o sin movimiento) y R (marcha en reversa). Su funcionamiento se basa en un interruptor de un polo y tres tiros, el cual envía a la controladora la orden correspondiente según la posición elegida: avanzar (D), retroceder (R) o permanecer inactivo (N).

El voltaje que opera esta palanca es de 12 VCD, generado internamente por la controladora una vez que ha sido energizada mediante el banco de baterías.

En la siguiente imagen de la figura 6.10 se presenta un ejemplo de palanca selectora.

Es importante destacar que, si durante la conversión se conservó la caja de velocidades original del vehículo, entonces no es necesario manipular la palanca selectora de la controladora. La operación normal mediante la palanca de velocidades del vehículo es suficiente para seleccionar avance, reversa o punto neutro.

Para que el vehículo responda correctamente a la palanca de velocidades original, la palanca selectora de la controladora debe permanecer fija en posición D.

Si se desea incorporar una medida de seguridad adicional contra activaciones no autorizadas —por ejemplo, en caso de intento de robo—, la palanca selectora puede instalarse en un lugar oculto, accesible solo para el conductor. De esta manera, es posible dejarla en posición N cuando el vehículo se estaciona; así, incluso si la controladora llegara a ser activada, el vehículo no podrá moverse.



Figura 6.10: Ejemplo de palanca selectora asociada a la controladora

6.2.3. Pedal acelerador

Existen diferentes tipos de pedal acelerador, por lo que dependiendo de la controladora se tiene que seleccionar el pedal adecuado. Para realizar la “aceleración” del motor eléctrico a través de la controladora, los pedales pueden estar constituidos por un sensor de efecto hall o un potenciómetro o un encoder. La operación de cualquiera de los diferentes tipos de pedal es detectar que tan oprimido se encuentra por el pie del conductor, para enviar la información adecuada a la controladora, y de esta manera se determine la cantidad de voltaje de VCA que tendrá que enviarse al motor eléctrico.

El pedal acelerador es el medio por el que se regula la velocidad a la que tendrá que circular el vehículo, para ello se genera la información de inyectar mayor o menor cantidad de VCA al motor, o también dejar de proveer voltaje al motor eléctrico.

En la imagen de la figura 6.11 se muestra un ejemplo de pedal acelerador.

6.2.4. Freno regenerativo

El freno regenerativo es la función mediante la cual el vehículo aprovecha la desaceleración para recargar parcialmente el banco de baterías. Para que este sistema opere, el conductor debe dejar de presionar el pedal del acelerador y accionar únicamente el pedal del freno.

Cuando el freno es activado, la controladora recibe una señal que interrumpe el suministro de voltaje de corriente alterna (VCA) hacia el motor eléctrico. En ese instante, y gracias a la inercia del vehículo, el motor continúa girando, pero ahora funciona como generador, produciendo energía que la controladora redirige al banco de baterías. En este proceso, el flujo de voltaje y corriente de corriente directa (VCD) circula en sentido inverso, permitiendo recuperar parte de la energía cinética del vehículo.

Es importante mencionar que, aunque el freno regenerativo contribuye a incrementar la autonomía, no es capaz de recargar por completo el banco de baterías. Para lograrlo se requeriría, por ejemplo, un descenso prolongado de varios kilómetros.

La controladora necesita recibir una señal de +12 VCD para activar el modo de frenado regenerati-



Figura 6.11: Ejemplo de pedal acelerador

vo. Existen dos formas de obtener esta señal:

- 1.- A partir del circuito de las luces de freno, aprovechando el voltaje de +12 VCD que se activa cuando el conductor pisa el pedal.
- 2.- Desde el sensor del pedal del freno, lo cual evita tendidos de cableado adicionales y facilita la localización y sustitución de fusibles de protección, en caso de requerirse.

En la imagen de la figura 6.12 se muestra un ejemplo de circuito para generar la señal de +12 VCD utilizando el sensor del pedal del freno.

El freno regenerativo, por sí solo, no puede detener el vehículo en distancias cortas. Si bien contribuye a reducir la velocidad —pues, al operar como generador, el motor crea un campo magnético que ofrece resistencia al movimiento— esta desaceleración es gradual y requiere una distancia considerable para inmovilizar completamente el vehículo.

Por esta razón, el vehículo debe contar con un sistema de frenos convencional plenamente funcional, capaz de detenerlo de manera segura y en espacios reducidos. En el apartado 4.1 se describe el sistema auxiliar que debe instalarse durante el proceso de conversión para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de frenos en su conjunto.

6.2.5. Sensor de temperatura

Se trata de uno de los sensores que usualmente deben incorporarse a la controladora, para tener bajo medición constante la temperatura que se genera en el motor eléctrico cuando este se encuentra en funcionamiento. Es muy importante que la temperatura del motor eléctrico no sobre pase el valor crítico que el correspondiente fabricante indica, para que la controladora “proteja” al motor eléctrico apagándolo el tiempo que sea necesario para que se enfríe y pueda volver a operar.

La protección que realiza la controladora en función de la temperatura debe ser automática, sin que

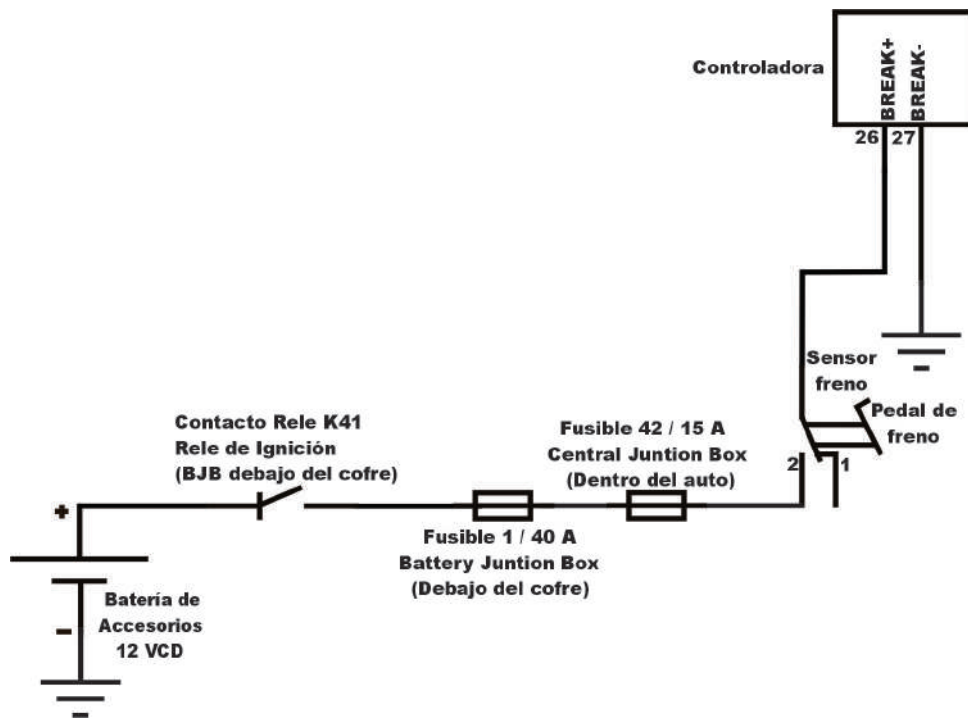


Figura 6.12: Diagrama de conexión a la controladora para activar el freno regenerativo

el conductor intervenga directamente, para ello es necesario colocar el sensor de temperatura en las terminales de la controladora que son destinados para dicho sensor. Normalmente el sensor de temperatura es un termistor.

En la imagen dela figura 6.13 se muestra un ejemplo de termistor.

6.2.6. Encoder odómetro/velocímetro

Mediante este sensor, el conductor puede conocer la velocidad a la que circula el vehículo, así como la distancia recorrida durante cada trayecto.

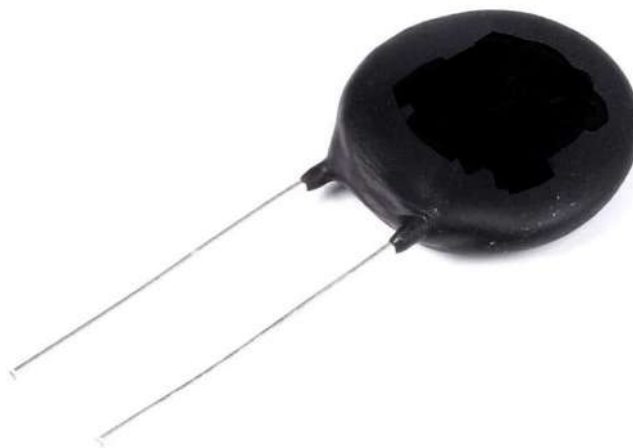


Figura 6.13: Ejemplo de sensor de temperatura (termistor)



El encoder es un dispositivo de operación magnética que utiliza un sensor de efecto Hall. Su funcionamiento se basa en el conteo de los dientes de un disco dentado instalado en el motor eléctrico. A partir de estas lecturas, el encoder envía la información a la controladora, la cual, mediante su circuitería y programación interna, calcula la velocidad y la distancia recorrida cuando el vehículo está en movimiento.

Este componente debe conectarse en las terminales designadas específicamente para ello dentro de la controladora.

En la imagen de la figura 6.14 se muestra un ejemplo de encoder.

En la imagen de la figura 6.15 se muestra el disco dentado junto con el encoder instalado en el motor eléctrico.

En la imagen de la figura 6.16 se aprecia la ubicación del disco dentado y del encoder instalados en el motor eléctrico.

6.2.7. Terminales CANBUS

La mayoría de las controladoras incorporan un puerto de comunicación conocido como CANBUS, a través del cual se envía y recibe información relevante sobre el estado de la propia controladora, del motor eléctrico y del nivel de carga del banco de baterías.

El CANBUS es un protocolo de comunicación desarrollado originalmente para permitir que los sensores y circuitos electrónicos de los vehículos con motor de combustión pudieran intercambiar información de manera eficiente y segura. Debido a su robustez, este mismo protocolo se ha adoptado de forma natural en los vehículos eléctricos, tanto en aquellos convertidos como en los fabricados de manera industrial.

En la actualidad, el CANBUS se utiliza ampliamente en aplicaciones más allá del sector automotriz, gracias a su versatilidad y a la confiabilidad que ofrece en la transmisión de datos, evitando su pérdida o alteración.

En el caso particular de una controladora para motor eléctrico, el CANBUS se emplea principalmente para conectar un tablero de interfaz para el conductor (dashboard), desde el cual se presenta información esencial para la operación del vehículo, como la velocidad de desplazamiento, el nivel de carga del banco de baterías, la distancia recorrida, la temperatura del motor y el estado general del sistema.

En la imagen de la figura 6.17 se muestra un ejemplo de la conexión entre la controladora y un tablero mediante el protocolo CANBUS.

Para la comunicación mediante CANBUS se utilizan únicamente dos terminales, identificadas como CANH y CANL, además de un par de resistencias de 120 Ω , necesarias para garantizar la correcta operación y terminación del bus de datos.

En la imagen de la figura 6.17 se muestra únicamente la conexión de las terminales CANH y CANL; sin embargo, es importante localizar también las terminales de alimentación de los dispositivos que se integran en la red CANBUS, ya que cada uno de ellos requiere energía para su funcionamiento.



Figura 6.14: Encoder instalado en la controladora

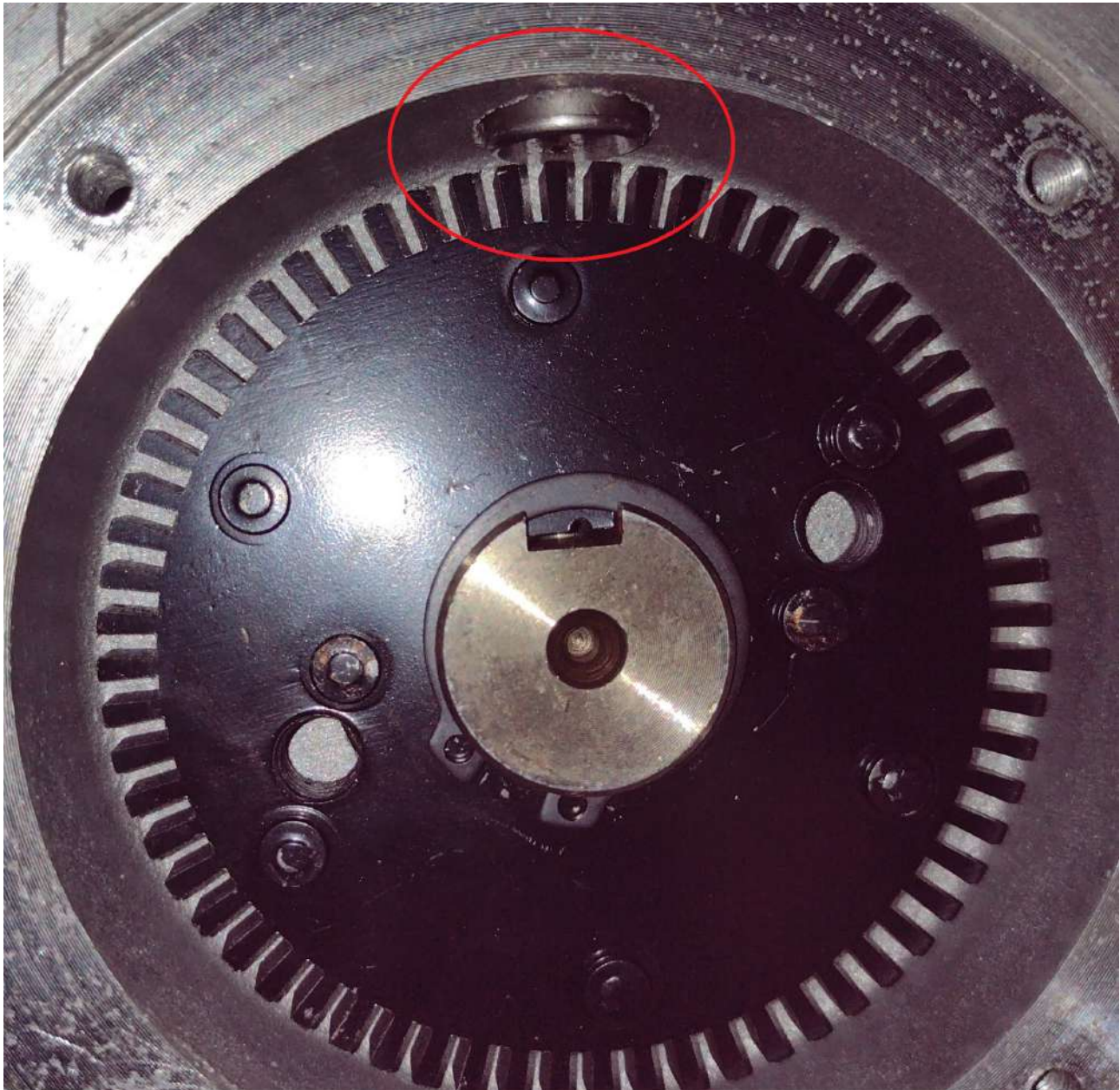


Figura 6.15: Disco dentado instalado en la controladora que interactua con el encoder

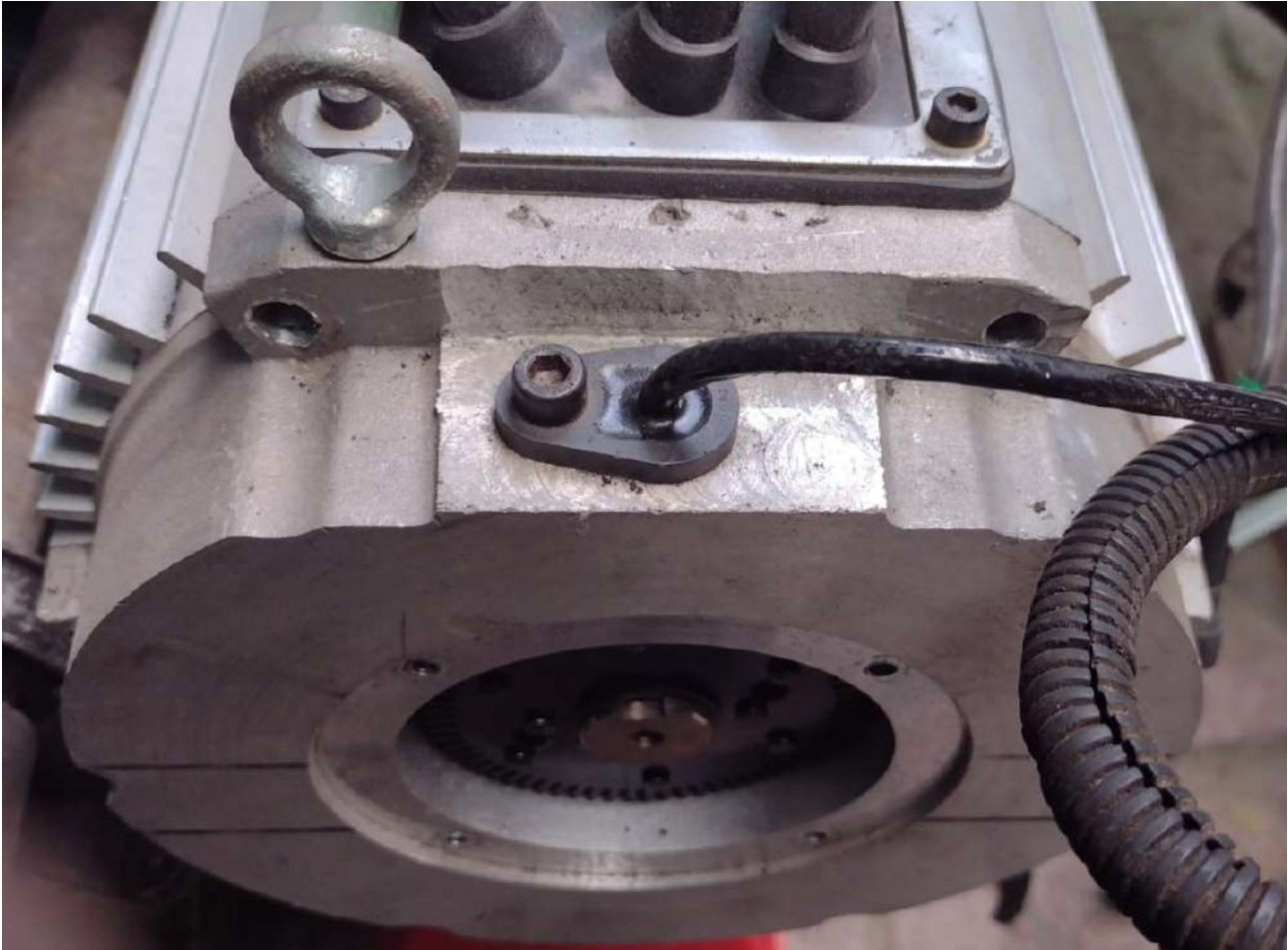


Figura 6.16: Vista del motor eléctrico, con el encoder y disco dentado

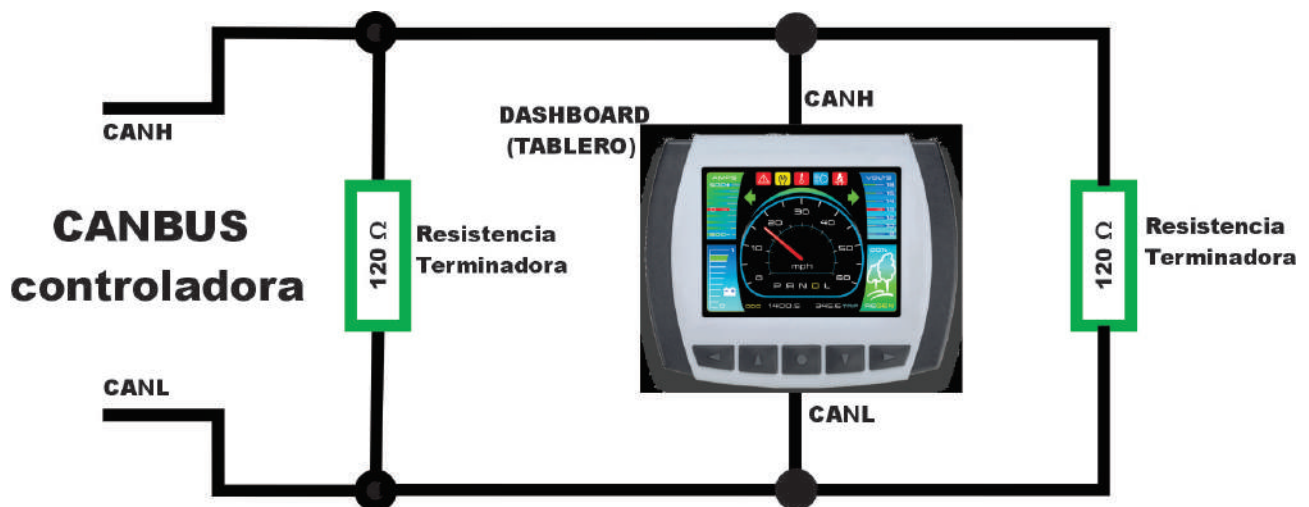


Figura 6.17: Diagram de conexión de un tablero con la controladora



Figura 6.18: Ejemplo de arnes para conexiones de la controladora

6.2.8. Arnés de conexiones

Todos los elementos que deben conectarse a la controladora se organizan mediante un arnés especialmente diseñado para agrupar y distribuir, de manera ordenada, cada uno de los cables y líneas de conexión.

Este arnés debe incluir los conectores compatibles con los diferentes dispositivos que se enlazarán a la controladora; la forma y tipo de estos conectores dependerán del fabricante y del modelo específico de la controladora.

En la imagen de la figura 6.18 se muestra un ejemplo de arnés destinado a conectarse a la controladora.

Por último, en la imagen de la figura 6.19 se presenta un diagrama que muestra la conexión de todos los elementos que se integran a la controladora.

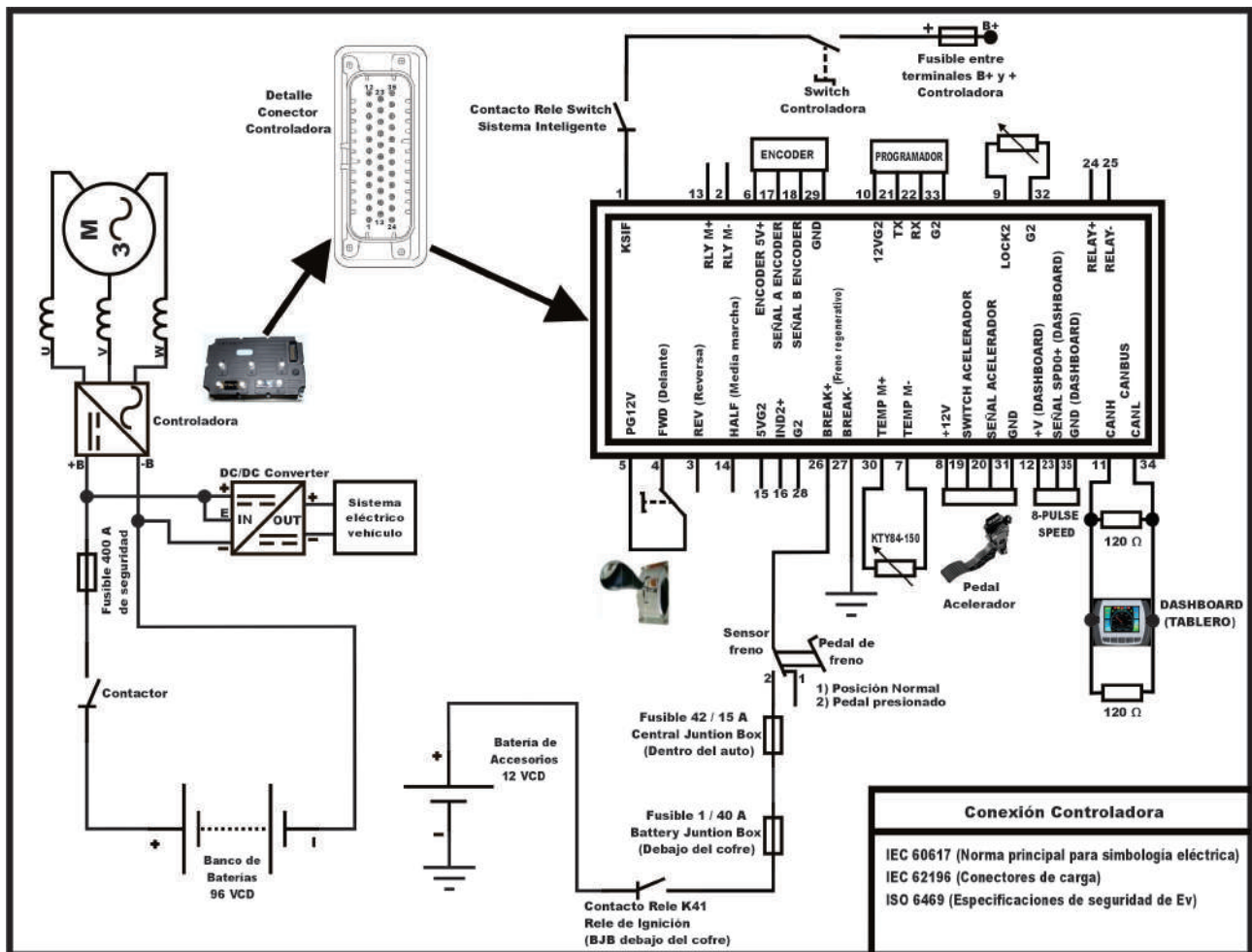


Figura 6.19: Diagrama de conexión de la controladora





CAPÍTULO 7

Pasos a seguir en el proceso de conversión

Una vez realizada la revisión del conjunto mecánico-eléctrico del vehículo y confirmando que cumple con las condiciones necesarias para ser sometido al proceso de conversión, se procederá a seguir la serie de pasos descritos en las secciones siguientes.

Para el ejemplo de aplicación del proceso de Retrofit, se utilizó un vehículo Ford Focus modelo 2002; sin embargo, el procedimiento descrito es replicable en vehículos de cualquier marca y modelo. Como criterio principal, se recomienda que el automóvil cuente con al menos 10 años de antigüedad, ya que este tipo de unidades representa un alto potencial de reconversión. Asimismo, es preferible que el vehículo tenga transmisión manual, debido a la mayor simplicidad mecánica y a la facilidad de integración del sistema de propulsión eléctrica.

7.1 DESMONTAR SISTEMA DE GASOLINA Y COMPONENTES ASOCIADOS

Para llevar a cabo esta actividad es indispensable contar con personal capacitado en mecánica automotriz y sistemas eléctricos. Esto se debe a que será necesario retirar diversos componentes que ya no se utilizarán en el vehículo convertido. El proceso exige conocer las herramientas apropiadas para desmontar cada pieza, procurando que todo se retire de forma limpia, sin dañar la carrocería, el chasis ni ningún sistema que deba conservarse.

El primer elemento que debe retirarse es el motor de gasolina, como se ilustra en la figura 7.1 Para ello es necesario identificar correctamente los puntos de sujeción y utilizar las herramientas adecuadas que permitan liberar el motor y extraerlo con seguridad de su compartimento original.

Alrededor del motor de gasolina se encuentra una gran cantidad de mangueras y cables que deben desconectarse con cuidado. Es fundamental identificar cada uno con una etiqueta para facilitar su clasificación una vez retirados de su posición original.

Generalmente, junto al motor se encuentra instalado el alternador. Antes de desmontarlo, debe evaluarse si es preferible retirarlo por separado o extraerlo junto con el motor. En cualquier caso, es importante identificar y etiquetar también los cables conectados al alternador.

Después, se procede a desmontar el sistema de enfriamiento, compuesto por el radiador, el ventilador, el depósito de anticongelante y sus respectivas mangueras. En la figura 7.2 se muestra un ejemplo del proceso de desmontaje del radiador y el ventilador en un vehículo con motor de gasolina.

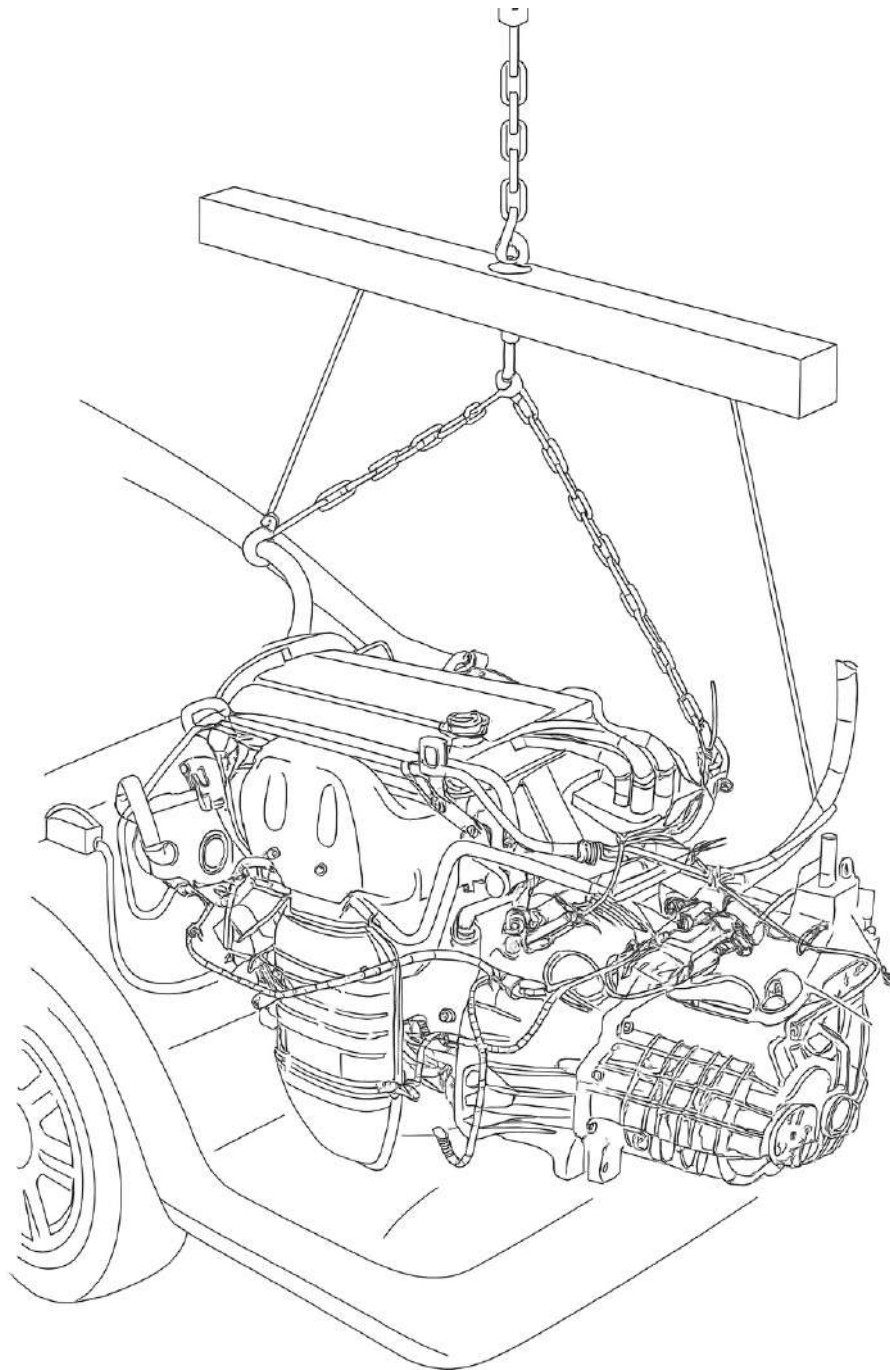


Figura 7.1: Ejemplo para desmontar un motor a gasolina

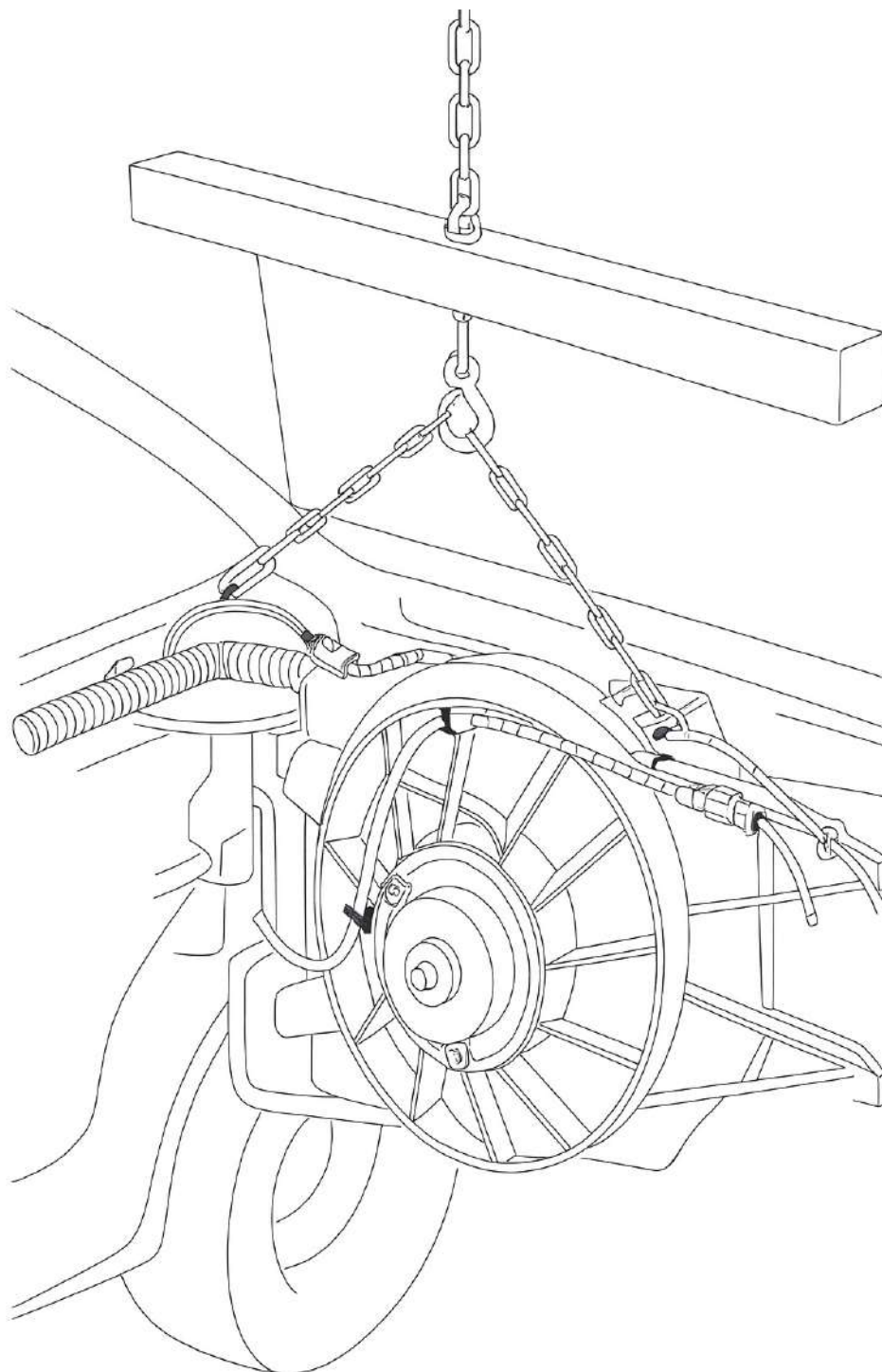


Figura 7.2: Ejemplo para desmontar el radiador y ventilador de un auto

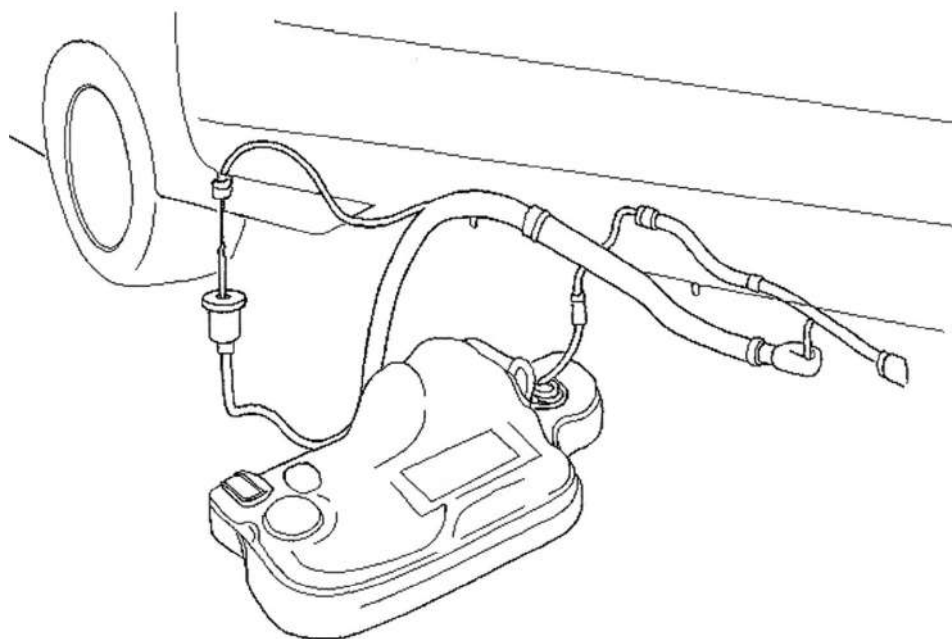


Figura 7.3: Ubicación del tanque de gasolina en el auto

Del mismo modo, cada una de las piezas retiradas debe identificarse mediante etiquetas para facilitar su clasificación una vez que se encuentren fuera del vehículo.

Una vez desmontados por completo el motor de gasolina y el sistema de enfriamiento, quedarán visibles distintos cables, mangueras y ductos. Estos elementos deben analizarse para determinar si es conveniente extraerlos desde su punto de origen. Por ejemplo, la mayoría de los cables conectados al motor provienen de los sensores asociados a este, y suelen dirigirse directamente al arnés principal que llega a la computadora del vehículo. Lo más recomendable es retirar también la computadora original; para ello, primero se identifica el arnés correspondiente a los sensores del motor y se desmonta, con el fin de ir “limpiando” la mayor cantidad de espacio posible.

Posteriormente se procede a retirar todos los componentes del sistema de escape de gases, que típicamente incluyen el múltiple, el convertidor catalítico (generalmente unido al motor), los tubos de escape y el silenciador. Si es posible desmontar el conjunto completo, se debe hacer así; en caso contrario, será necesario realizar cortes, especialmente en los tubos de escape, para liberar las piezas.

Finalmente, se extraen todos los elementos relacionados con el sistema de combustible del vehículo: tanque de gasolina, línea de alimentación, mangueras, bomba de combustible (por lo general ubicada dentro del tanque), filtro y ductos que conducían el combustible hacia el motor. En la figura 7.3 se presenta una imagen representativa del tanque de gasolina.

Una vez retiradas todas las piezas descritas en este capítulo, el vehículo queda listo para iniciar la instalación de los nuevos componentes eléctricos. Mientras tanto, es recomendable analizar las partes desmontadas para evaluar la posibilidad de obtener un recurso económico mediante su venta o reciclaje.

En particular, para la comercialización del motor de gasolina suele requerirse, al menos, una copia simple de la factura original del vehículo que respalde su procedencia.

En la figura 7.4 se presenta un ejemplo de un vehículo al que ya se le ha retirado el motor.



Figura 7.4: Vehículo sin el motor a gasolina

7.2 FABRICACIÓN DE SOPORTE PARA EL MOTOR ELÉCTRICO

Con el vehículo ya libre de los componentes retirados, se puede iniciar la fabricación de los soportes necesarios para fijar el nuevo motor eléctrico a la caja de velocidades. Para esta tarea existen dos alternativas: realizar el acoplamiento conservando el sistema de embrague (clutch) o prescindir de él.

Es importante destacar que estas actividades deben ser ejecutadas por personal con experiencia en mecánica automotriz y con conocimientos en procesos metal-mecánicos, pues será necesario fabricar piezas metálicas utilizando herramientas especializadas, como el torno, entre otras.

En este proyecto se optó por realizar el acoplamiento del motor eléctrico a la caja de velocidades conservando el sistema de embrague, por las siguientes razones:

- a) Reduce el desgaste de la transmisión.
- b) Facilita y agiliza los cambios de velocidad cuando estos sean necesarios.
- c) Permite desconectar el motor de manera segura cuando se realicen trabajos de mantenimiento mayor.

Para lograr el acoplamiento entre el motor eléctrico y la caja de velocidades, se debe fabricar inicialmente una pieza metálica adaptadora que conecte el eje del motor con el sistema de embrague. En la figura 7.5 se muestra dicha pieza con sus diferentes vistas y detalles. Cabe aclarar que esta pieza se tiene que fabricar con las medidas adecuadas, con respecto al vehículo donde será instalado.

Durante el mismo proceso en el que se realizaron las mediciones para fabricar la pieza adaptadora, es recomendable obtener también las dimensiones necesarias para construir la placa que unirá el motor eléctrico con la caja de velocidades. Para asegurar un ajuste preciso y completamente funcional, lo ideal es obtener el molde directamente del contorno de ambos componentes: la caja de velocidades y el motor eléctrico.

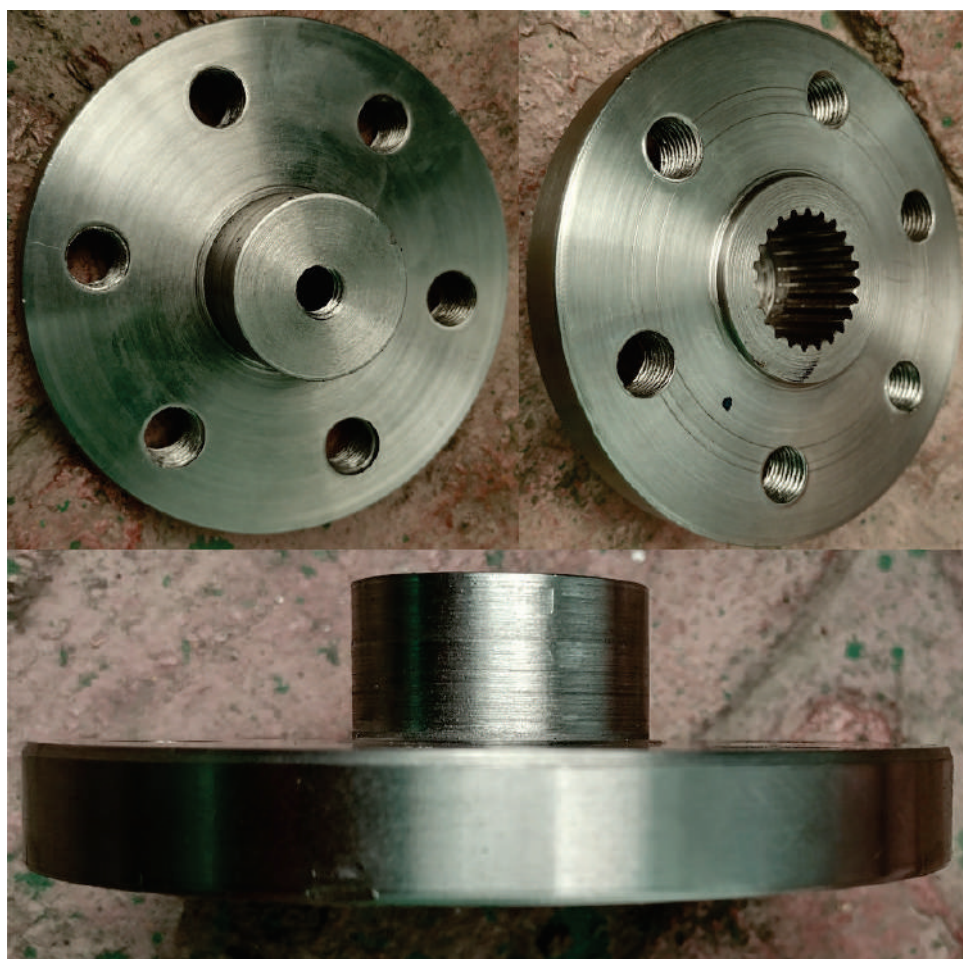


Figura 7.5: Adaptador motor eléctrico con embrague



Figura 7.6: Placa adaptadora entre motor eléctrico y caja de velocidades

En la figura 7.6 que se muestra a continuación puede verse un ejemplo práctico. Se dispuso de una lámina metálica que se destinó exclusivamente a la fabricación de la placa, y sobre ella se trazaron de manera directa los perfiles correspondientes a la caja de velocidades y al motor eléctrico.

Una vez colocada la lámina metálica para obtener el trazo, también se aprovecharon las dimensiones marcadas para señalar la ubicación de los futuros barrenos, como se aprecia en los trazos de la figura 7.7. Con esta información preliminar, la pieza se llevó posteriormente al torno para iniciar su maquinado.

Como resultado del trabajo realizado en el torno, la placa de fijación quedó completamente terminada y lista para su instalación. Para garantizar su durabilidad y protegerla contra la corrosión, se aplicó además una capa de pintura anticorrosiva. En la figura 7.8 se muestra la placa vista desde sus dos caras, lista para instalarse.

Una vez fabricada la pieza adaptadora que enlaza el motor eléctrico con el clutch, así como la placa que fija el motor a la caja de velocidades, se procede al armado previo a la instalación del motor. El primer paso consiste en preparar el eje del motor eléctrico para permitir el montaje adecuado de la pieza adaptadora, tal como se muestra en la figura 7.9.

Con el barreno ya realizado en el eje del motor eléctrico, es necesario generar una cuerda interna utilizando una herramienta denominada tarraja. Este proceso permite fijar firmemente la pieza adaptadora mediante un tornillo. De igual forma, los barrenos practicados en la placa de fijación deben roscarse para asegurar su acoplamiento sólido al motor eléctrico. Esta sujeción es fundamental para evitar cualquier desprendimiento durante la operación del vehículo una vez concluida la conversión.

En la figura 7.10 se muestra este procedimiento con detalle.

Corresponde ahora la instalación del sistema de embrague (clutch). El primer paso consiste en montar el volante, pieza que originalmente permitía el accionamiento de la marcha en el motor de gasolina. Este componente se fija utilizando los barrenos de la pieza adaptadora, asegurando los tornillos con la presión adecuada, ya que en este punto el motor eléctrico transmitirá el torque necesario para mover el vehículo.

En la figura 7.11 se ilustra el procedimiento descrito en el parrafo.



Figura 7.7: Placa con trazos para corte y barrenar

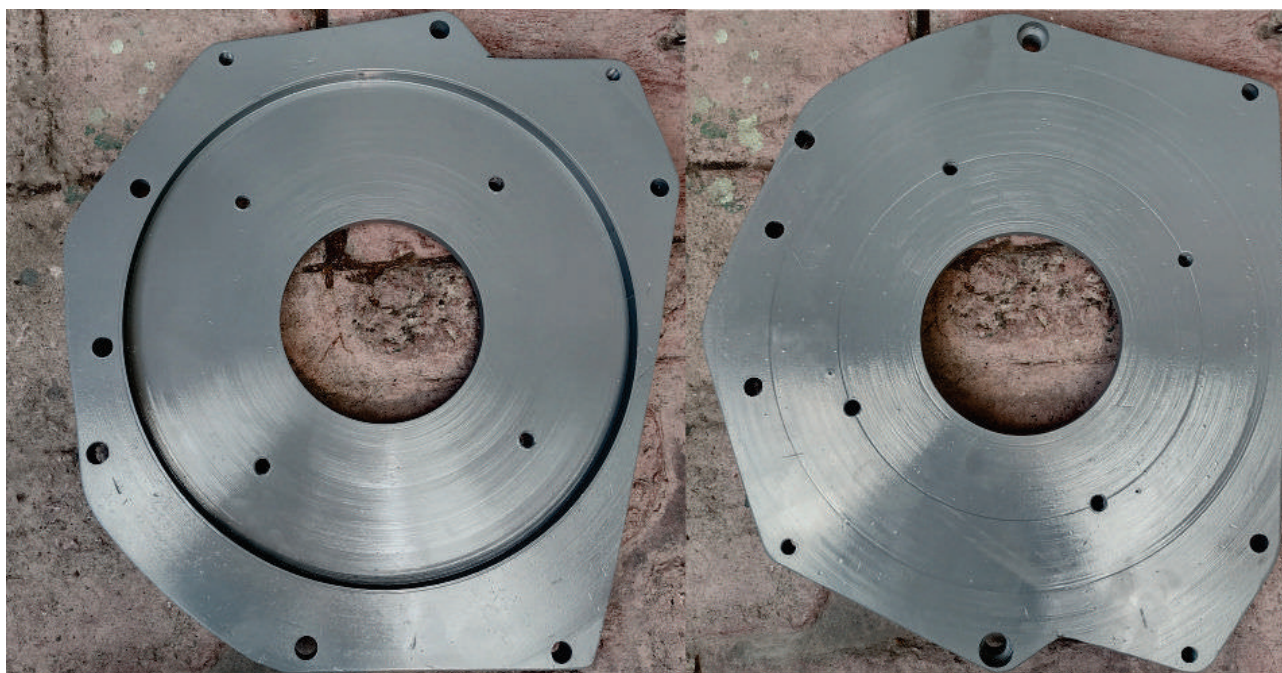


Figura 7.8: Placa lista para instalarse

Para completar la instalación del sistema de embrague sobre el motor eléctrico, el siguiente paso es colocar el clutch. Este se fija utilizando los barrenos del volante, asegurándolo mediante tornillos para garantizar una sujeción firme y segura. En las imágenes mostradas en la figura 7.12, se detalla el proceso.

Para confirmar que el sistema de embrague ha quedado correctamente instalado, es necesario hacer girar el eje del motor eléctrico, ya sea energizándolo o bien de forma manual. El objetivo es verificar que el clutch gire sin producir ondulaciones, pues estas podrían generar vibraciones una vez que el motor eléctrico se instale en el vehículo.

El giro debe ser uniforme y estable, lo que garantiza que el acoplamiento no provocará fatiga en las piezas de adaptación ni en la carrocería del automóvil.

Una vez concluidas las pruebas de giro del eje del motor eléctrico, el conjunto clutch–motor debe lucir como se muestra en el ejemplo de la figura 7.13.

El siguiente paso consiste en instalar el motor —ya equipado con el sistema de embrague— en la caja de velocidades del vehículo. Para ello es necesario sostener el peso del motor eléctrico desde dos puntos: uno superior y otro inferior. Estos apoyos deben considerarse únicamente como provisionales, pues su función es mantener la alineación y estabilidad del conjunto durante el montaje.

En la figura 7.14 se muestra un ejemplo de como se puede realizar este procedimiento.

Al instalar el motor eléctrico en la caja de velocidades, el sistema de embrague debe acoplarse y ajustarse sin dificultad, ya que se utilizan las mismas piezas que originalmente unían el motor de gasolina con la transmisión, ahora adaptadas al motor eléctrico. Es fundamental asegurar toda la tornillería de manera adecuada para evitar cualquier desprendimiento posterior.

Aunque el motor eléctrico aún se encuentra sostenido por los soportes provisionales, debe iniciarse la



Figura 7.9: Preparación del eje del motor eléctrico



Figura 7.10: Pieza adaptadora y placa atornillados al motor eléctrico

fabricación del soporte definitivo. Para ello es necesario realizar mediciones exactas que permitan construir una pieza con las dimensiones correctas, garantizando que el soporte mantenga al motor en su posición adecuada sin afectar su funcionamiento. Este soporte final deberá fijar el motor directamente al chasis del vehículo.

En la figura 7.15 se muestran los primeros pasos en la construcción de dicho soporte.

Una vez definida la geometría del soporte y establecidas sus dimensiones, se procede a su fabricación considerando cada punto de apoyo y los refuerzos necesarios. Esto garantiza que, al momento en que el motor transmita el torque, la estructura no sufra deformaciones y se mantenga la máxima eficiencia del sistema.

En las imágenes que se muestran en la figura 7.16, se presenta el soporte desde distintas vistas, así como el procedimiento de aplicación del recubrimiento de pintura utilizado para protegerlo contra la corrosión.

El siguiente paso consiste en montar el soporte en la superficie correspondiente del motor eléctrico y en el chasis del vehículo. De esta manera, el chasis asume el peso del motor y evita cualquier desplazamiento o vibración indeseada.

Para fijar el soporte al chasis se reutilizó una pieza originalmente destinada a unir el motor de gasolina con la estructura del automóvil. Esta pieza resulta especialmente útil, ya que contribuye a amortiguar las vibraciones que pudieran presentarse durante la operación.

En la figura 7.17 se muestra el soporte ya colocado.

Originalmente, el vehículo estaba equipado con una pieza cuya función era impedir que uno de los ejes que

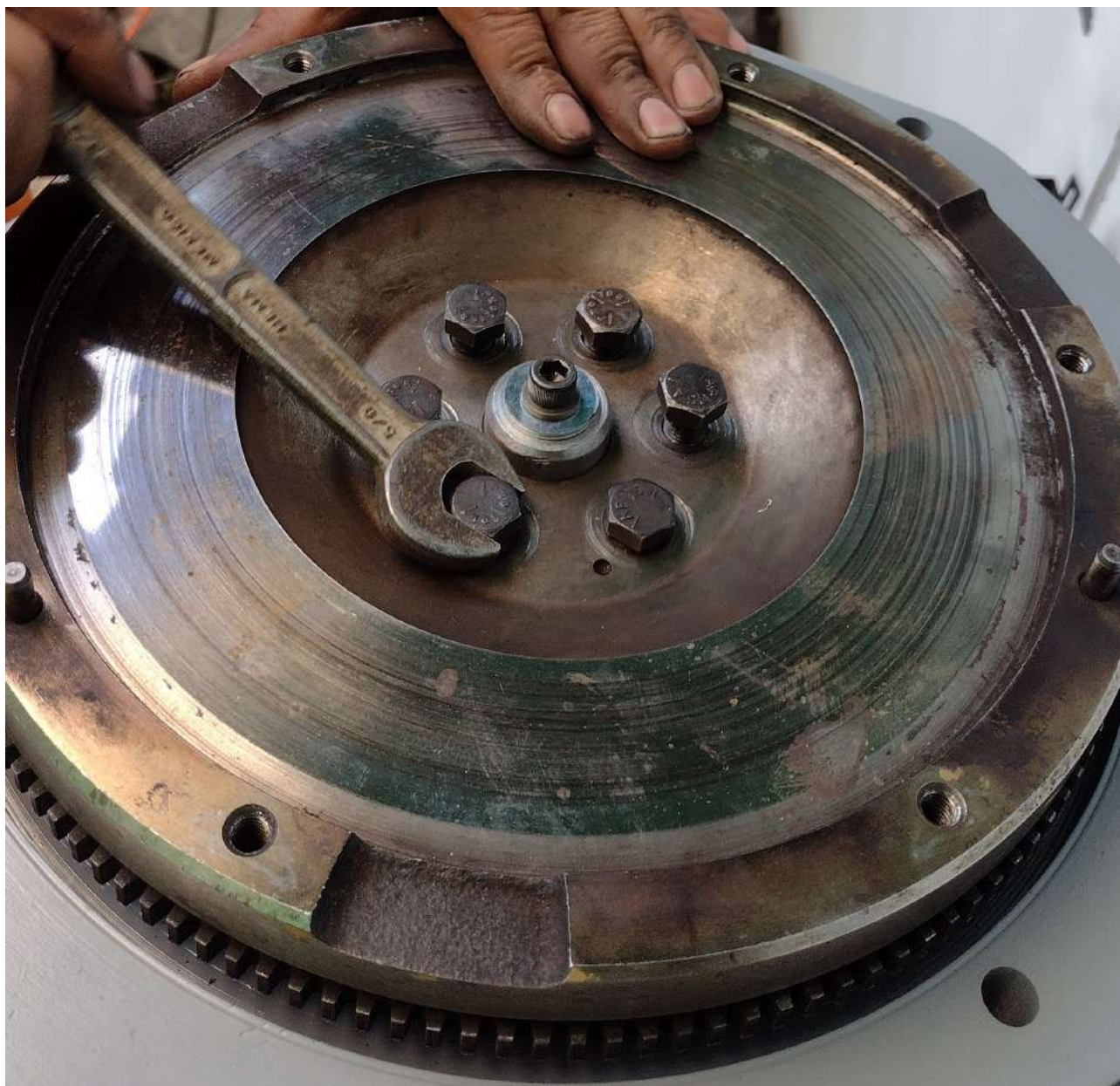


Figura 7.11: Fijando el embrague en el motor eléctrico

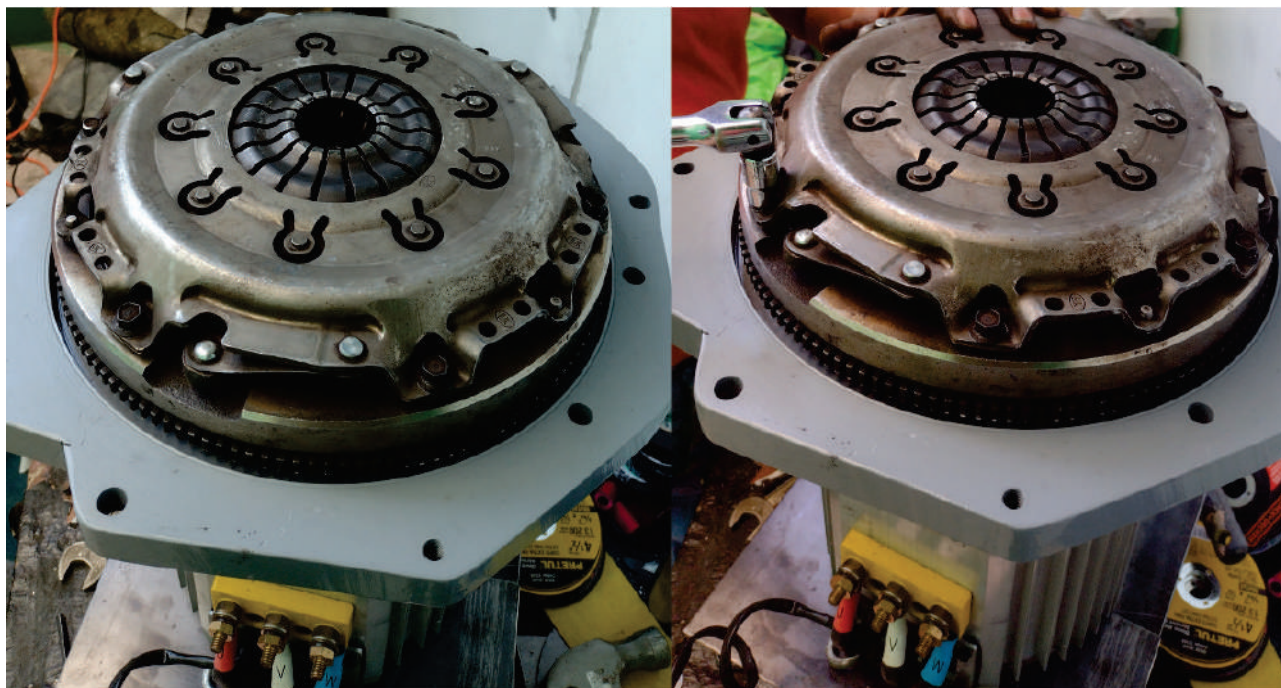


Figura 7.12: Colocación del plato del embrague en el motor eléctrico

transmite el movimiento a la rueda delantera se desplazara de su posición. Esta pieza estaba fijada al motor de gasolina.

Para conservar el diseño original y garantizar la seguridad del sistema de tracción, la pieza se reinstalará, asegurando así que el eje permanezca siempre en su lugar y mantenga el nivel de seguridad previsto por el fabricante.

En la figura 7.18 se muestra la ubicación de esta pieza, situada a un costado del soporte del motor eléctrico, en la parte inferior.

Cuando el soporte ya se encuentra completamente instalado, se pueden retirar los puntos de apoyo provisionales que se habían colocado al motor eléctrico, porque el chasis a través del soporte debe de cargar el peso del motor, por otra parte, se debe revisar también que la caja de velocidades no se encuentre suelta, y que se encuentre debidamente atornillada a su correspondiente soporte.

En la figura 7.19 se muestra al soporte del motor eléctrico completamente instalado y debidamente atornillado.

Como se ha podido observar en este apartado, es fundamental contar con experiencia tanto en mecánica automotriz como en metalmecánica. Esto se debe a que el proceso requiere el manejo de herramientas especializadas, así como conocimiento sobre los tipos de metales adecuados para cada componente y la selección correcta de tornillería, evitando fallas o rupturas durante su funcionamiento.

Es importante señalar que no se especificaron las dimensiones de los barrenos ni las plantillas empleadas para fabricar las distintas piezas metálicas. Esto se debe a que cada una de ellas debe diseñarse de manera particular según el modelo de vehículo al que se le realice la conversión. Por esta razón, el presente apartado se presenta únicamente como una guía descriptiva de los pasos generales que deben seguirse.

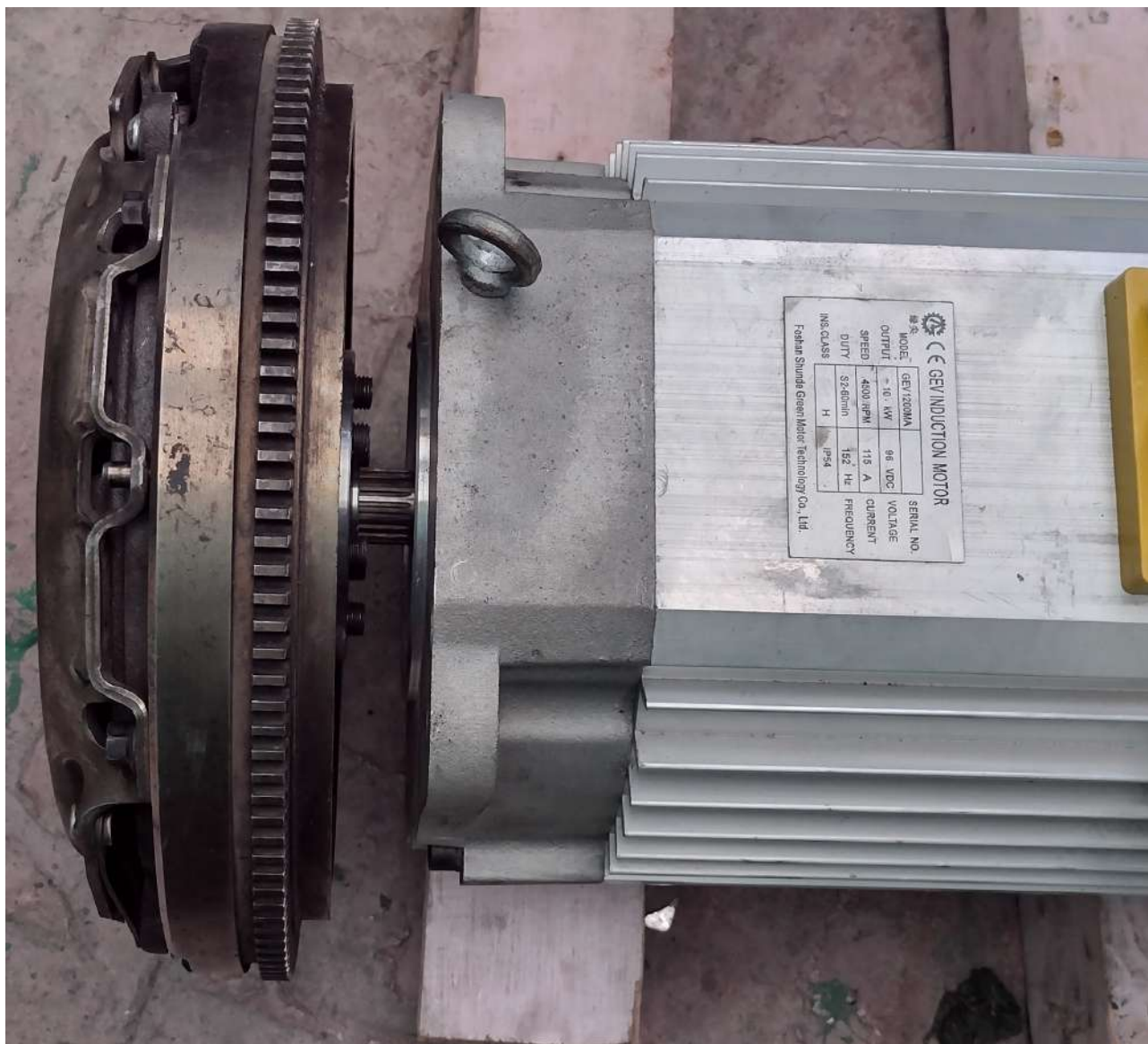


Figura 7.13: Ejemplo para verificar que el embrague gire libremente

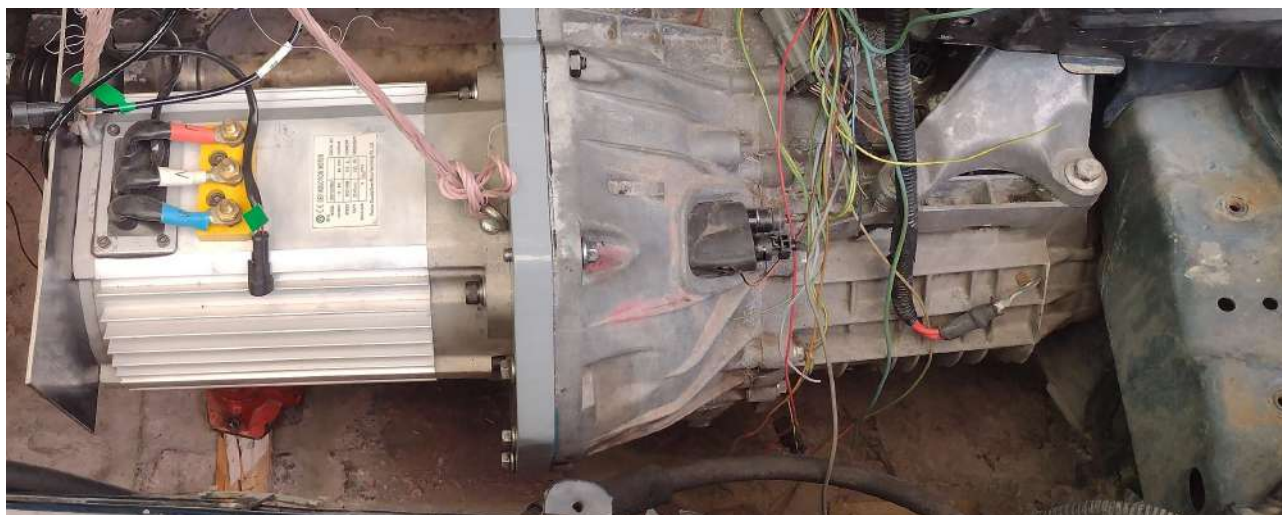


Figura 7.14: Instalación del conjunto embrague motor eléctrico

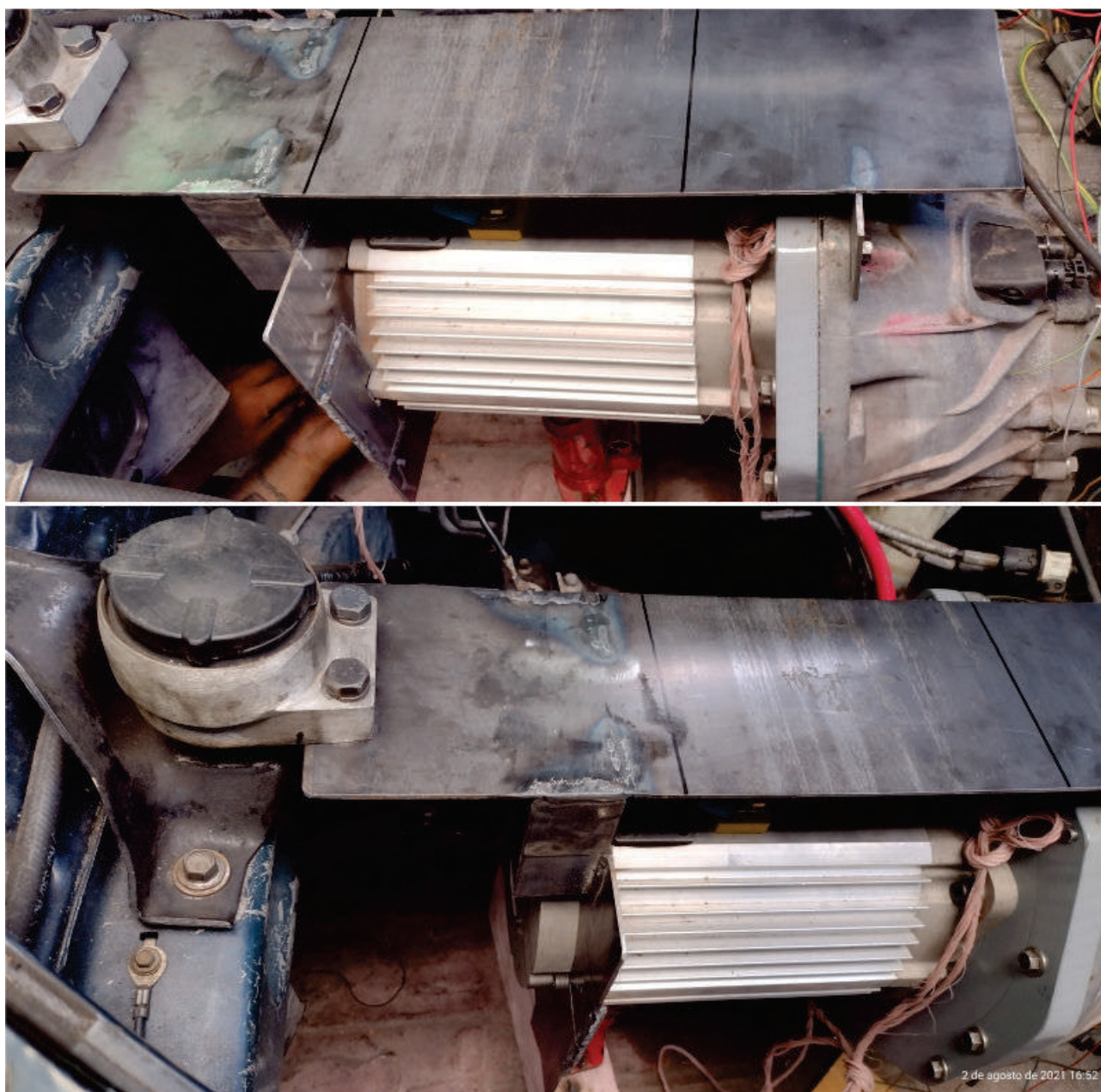


Figura 7.15: Primeros pasos para construir el soporte



Figura 7.16: Soporte listo para instalarse

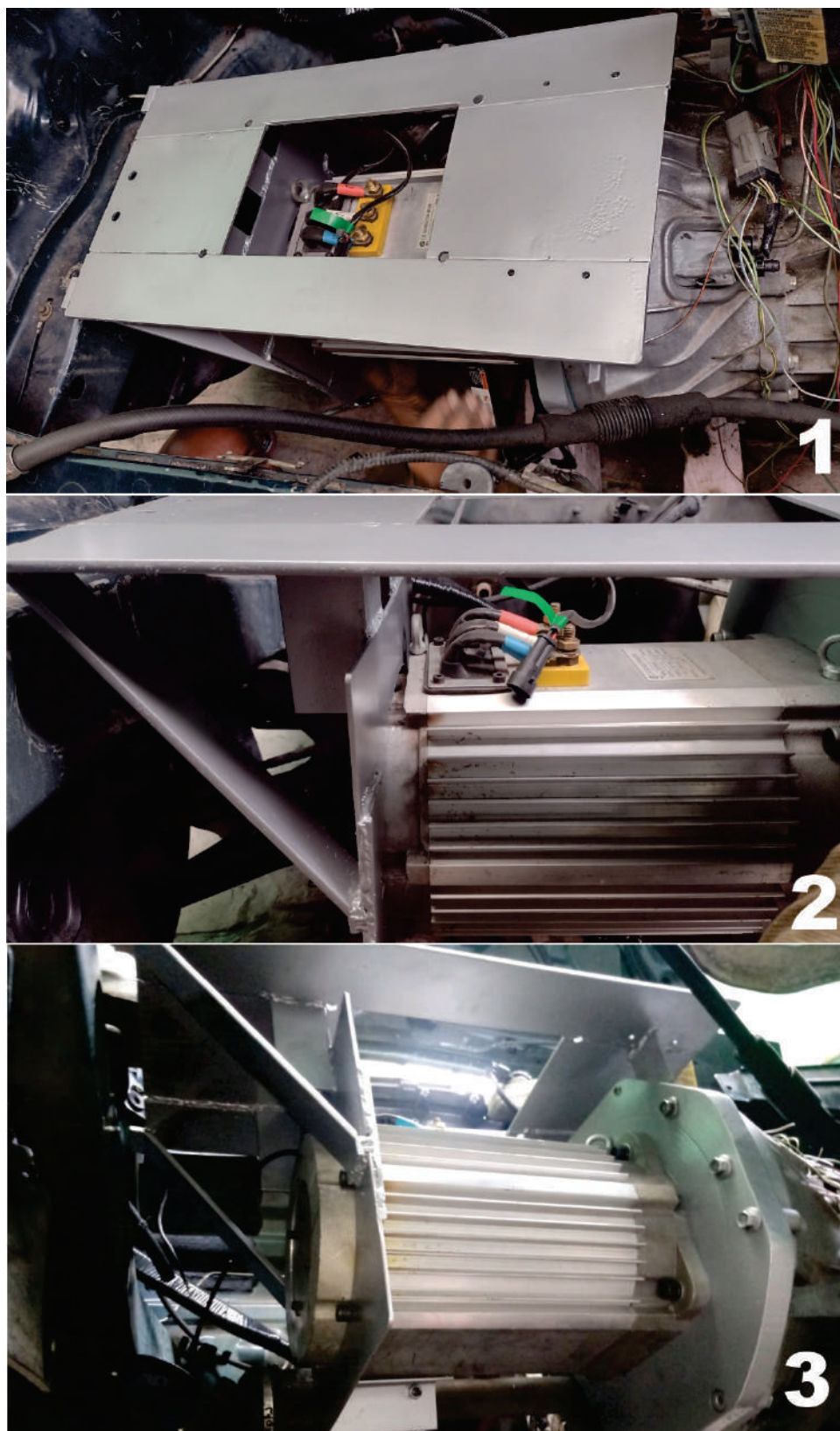


Figura 7.17: Secuencia de imágenes de la instalación del soporte

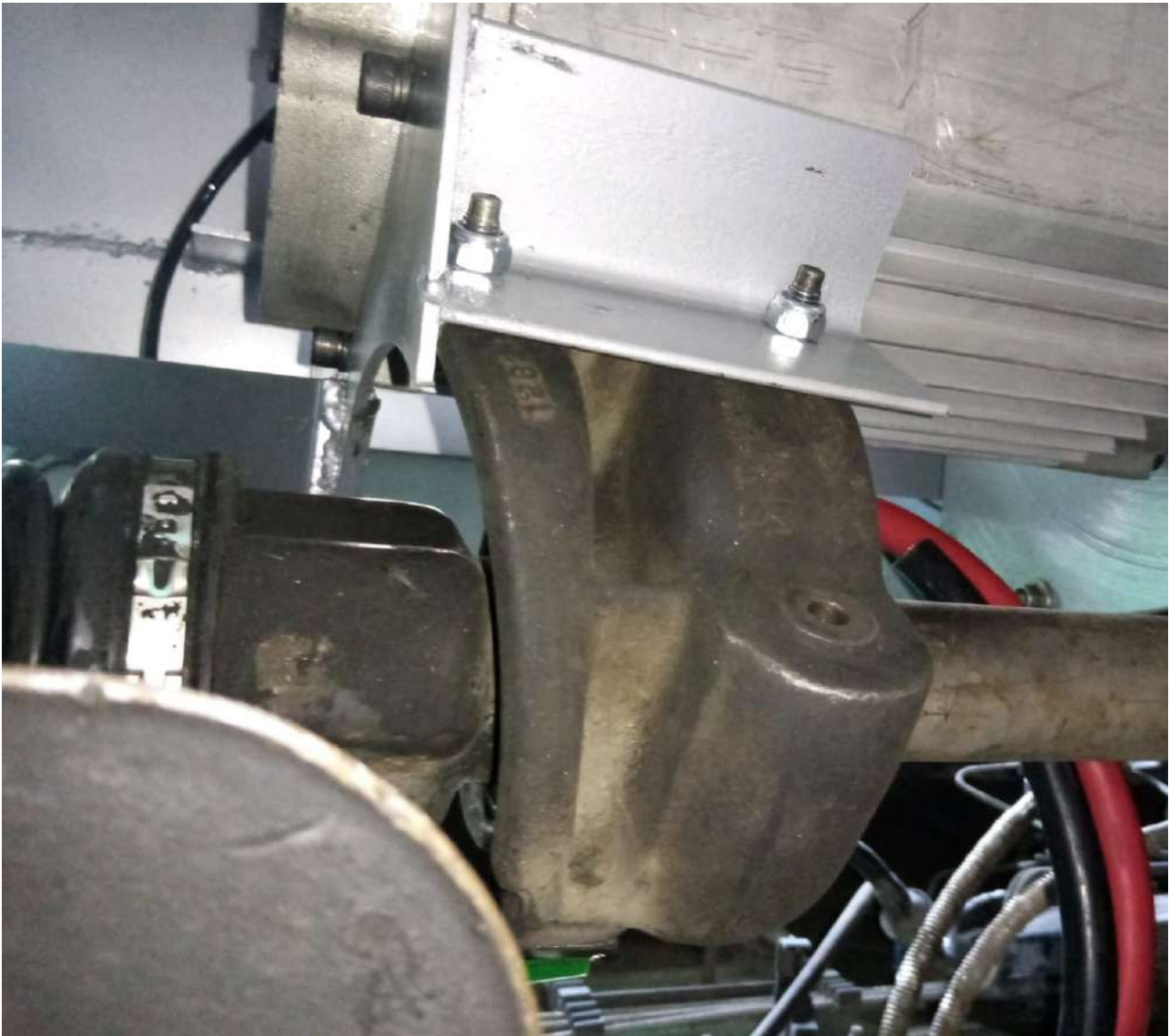


Figura 7.18: Reutilización de soporte del eje de tracción



Figura 7.19: Soportes instalados



Figura 7.20: Cajuela despejada

7.3 FABRICACIÓN DE LA BASE PARA EL BANCO DE BATERÍAS

Una vez instalado el motor eléctrico entre el chasis del vehículo y la caja de velocidades, el siguiente paso consiste en colocar el banco de baterías. Para esta actividad se requiere la participación de personal con experiencia en electricidad o electrónica, así como nuevamente de especialistas en metalmecánica.

Gracias a los avances en la tecnología de almacenamiento energético, hoy en día es posible instalar el banco de baterías en un solo compartimento del vehículo. Sin embargo, es indispensable seleccionar un espacio adecuado que garantice no solo su correcta fijación, sino también una ventilación suficiente. Esto es particularmente importante porque, junto al banco de baterías, debe ubicarse el cargador correspondiente. Durante su operación, el cargador eleva su temperatura y activa un ventilador para disipar el calor; dicho flujo de aire caliente debe ser canalizado hacia el exterior del vehículo para evitar acumulación térmica.

Debido a las dimensiones y la geometría del banco de baterías, se optó por instalarlo en la cajuela, aprovechando su amplio volumen disponible. Para ello, el espacio fue despejado y preparado con el fin de planificar adecuadamente la instalación, tal como se muestra en la figura 7.20.

Para aprovechar de manera óptima el espacio y mantener libre y funcional la cavidad destinada a la llanta de refacción, fue necesario elevar el banco de baterías aproximadamente 10 cm. De lo contrario, no sería posible retirar o colocar la llanta cuando fuera necesario.

Para lograrlo, se fabricó un marco metálico que permite montar el banco de baterías a la altura requerida. En la figura 7.21 se muestra dicho marco junto con la llanta de refacción, con el fin de verificar que pueda manipularse sin dificultad, ya sea para guardarla o extraerla de su compartimento.

El marco donde se colocará el banco de baterías se fija mediante tornillos a la lámina de la cajuela, con el propósito de evitar cualquier desplazamiento mientras el vehículo está en movimiento, especialmente



Figura 7.21: Soporte sobre llanta de refacción

durante frenados o aceleraciones. Además, el marco fue recubierto con pintura para protegerlo contra la corrosión.

Por otro lado, a la alfombra de la cajuela se le practicó un corte que permitirá retirarla fácilmente cuando sea necesario acceder a la llanta de refacción. En la imagen de la figura 7.22 se muestra cómo quedará cubierta dicha llanta una vez instalado el sistema.

Una vez que el marco metálico quedó firmemente asegurado, el siguiente paso fue colocar el banco de baterías en su posición dentro del vehículo. Este se ubicó exactamente entre las dos ruedas traseras, con el propósito de distribuir el peso de manera uniforme y asegurar un desgaste parejo de las llantas. En la imagen de la figura 7.23 se aprecia la disposición final del banco de baterías.

Durante la fabricación del marco destinado a sostener el banco de baterías, se consideró incorporar una ceja metálica. Esta superficie adicional permite instalar los elementos de seguridad necesarios para gestionar adecuadamente el voltaje y la corriente que el banco de baterías suministrará al motor eléctrico. Entre estos dispositivos se encuentran el contactor y el portafusibles, que se muestran en la imagen de la figura 7.24.

A continuación, es necesario fabricar un soporte adicional destinado a alojar el cargador del banco de baterías. Para ello, se deben tomar las medidas exactas y planificar adecuadamente su instalación, de modo que se aproveche al máximo el espacio disponible en la cajuela y esta pueda seguir utilizándose para transportar objetos una vez concluido el proceso de conversión.

El cargador se instaló sobre la parte superior del banco de baterías, tal como se aprecia en las imágenes de la figura 7.25.

Una vez concluida la instalación y fijación del banco de baterías, así como la colocación de su cargador, el siguiente paso consiste en montar los cableados que conducirán la energía eléctrica hacia el motor. Este



Figura 7.22: Arreglo de la vestimenta entre la llanta de refacción y el soporte



Figura 7.23: Colocación del banco de baterías sobre el soporte



Figura 7.24: Ubicación del contactor y portafusible



Figura 7.25: Ubicación del cargador de baterías



Figura 7.26: Instalación completa del banco de baterías y componentes auxiliares

proceso se describirá detalladamente en el capítulo correspondiente. En la imagen de la figura 7.26 se muestra la instalación completa mencionada en este apartado.

Para completar la instalación del banco de baterías y su cargador, es necesario colocar el conector conocido como INLET J1772, mediante el cual se suministrará la energía en corriente alterna (VCA) necesaria para activar el cargador. Se recomienda instalarlo en el mismo lugar donde originalmente se encontraba la boca de llenado del tanque de gasolina, de modo que se conserve el concepto y la ergonomía original del vehículo, aunque a partir de ahora la recarga se realizará con energía eléctrica. En la imagen de la figura 7.27 se ilustra lo descrito en este apartado.

Por último, en este apartado no se detallan las conexiones eléctricas, ya que su descripción completa se presentará en el capítulo correspondiente.

7.4 INSTALACIÓN DE ELEMENTOS ELÉCTRICOS

Después de instalar el motor eléctrico y el banco de baterías, corresponde colocar los componentes encargados de su control y gestión. Estos elementos son: la controladora, el convertidor DC-DC, la bomba de vacío y el cargador de baterías.

Para esta etapa se requiere la participación de personal con experiencia en electricidad o electrónica, así como nuevamente de especialistas en metalmecánica.

7.4.1. Controladora

La controladora es el módulo que recibe el voltaje de corriente directa (VCD) almacenado en el banco de baterías y se encarga de suministrar al motor eléctrico el voltaje y la corriente adecuados para su funcionamiento.



Figura 7.27: Ubicación de la toma para cargar al banco de baterías

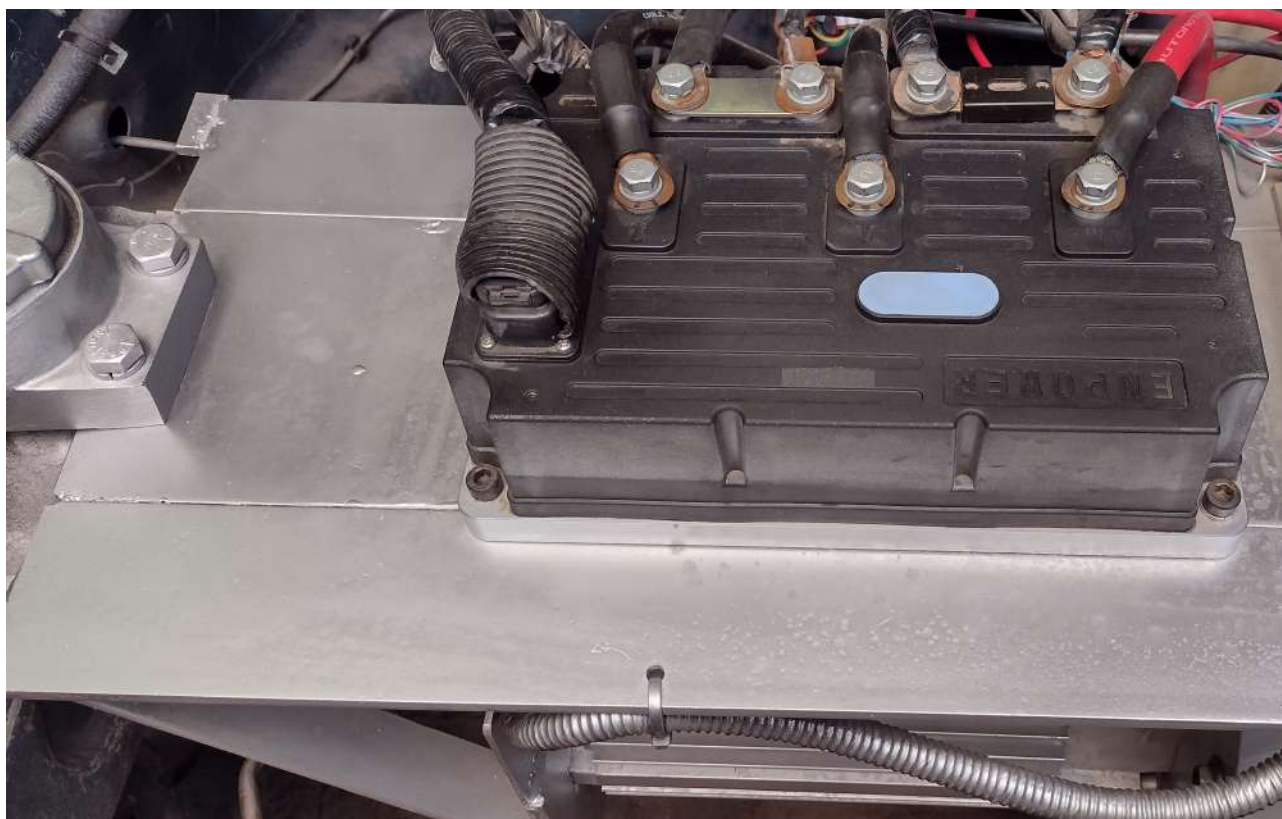


Figura 7.28: Colocación de la controladora

La selección de la controladora depende directamente del tipo de motor instalado: si este opera con corriente directa (VCD) o con corriente alterna (VCA), entonces la controladora debe corresponder al mismo tipo. Asimismo, es fundamental considerar el voltaje máximo de operación del motor; la controladora nunca debe suministrar un voltaje superior al que el motor puede tolerar, ya que podría dañarlo. Por ello, la elección del motor y la de la controladora deben realizarse de manera conjunta.

En cuanto a su instalación, se recomienda ubicar la controladora lo más cerca posible del motor. Durante la fabricación del soporte para el motor eléctrico puede preverse el espacio en el que se colocará este módulo. En la imagen de la figura 7.28 se observa que la cavidad disponible en el soporte del motor fue destinada para alojar la controladora.

Una vez instalada la controladora en su posición final, además de conectar los cables principales que suministran energía al motor, es necesario atender una serie de conectores adicionales presentes en este módulo. Entre ellos se encuentra un conector que también debe vincularse directamente con el motor eléctrico; generalmente corresponde a un par de sensores encargados de proporcionar información sobre las revoluciones y la temperatura del motor.

La mayoría de las controladoras incorporan un sistema de disipación térmica que incluye ventiladores. Para garantizar su funcionamiento adecuado, es recomendable instalar un sensor de temperatura en el chasis de la controladora. Cuando este sensor detecte una temperatura superior a 40 °C, deberá activar los ventiladores a fin de evitar sobrecalentamientos y posibles daños.

Por otra parte, para permitir una gestión completa del motor eléctrico, la controladora debe conectarse a un pedal que indicará la cantidad de voltaje que se suministrará al motor. Este pedal cumple la



función del acelerador, por lo que debe instalarse en el mismo lugar donde se encontraba el pedal original del vehículo. El cableado correspondiente debe llevarse hasta la controladora procurando utilizar los orificios existentes entre la zona de los pedales y el compartimiento del motor, evitando realizar perforaciones innecesarias.

En la imagen de la figura 7.29 se muestra la instalación del pedal acelerador.

Otro elemento que debe conectarse a la controladora es la palanca selectora, mediante la cual se indica si el motor eléctrico desplazará al vehículo hacia adelante o en reversa. Esta palanca cuenta únicamente con tres posiciones: D (avance), N (neutro, sin movimiento) y R (reversa).

Es importante señalar que, cuando el motor eléctrico se acopla a la caja de velocidades original del vehículo, la palanca selectora no requiere un uso constante. En la mayoría de los casos, basta con colocarla en posición D, ya que será la propia caja de velocidades la encargada de permitir el avance o la reversa del automóvil.

En la imagen de la figura 7.30 se muestra la palanca selectora.

De manera opcional, es posible incorporar a la controladora un tablero que muestre al conductor información relevante sobre la operación del motor eléctrico. Existen diversos tipos de tableros, pero, en general, despliegan datos fundamentales como: la velocidad del vehículo, el odómetro, el voltaje suministrado, la corriente consumida por la controladora al presionar el acelerador, el nivel de carga del banco de baterías y la posición actual de la palanca selectora. Es importante señalar que la comunicación entre el tablero y la controladora se realiza mediante CANBUS.

El tablero que se instale debe reemplazar al original, ya que, tras el proceso de conversión, este último deja de ser funcional y no es compatible con el nuevo sistema eléctrico.

En la imagen de la figura 7.31 se muestra el tablero instalado.

Otro elemento importante a considerar es que, si el motor eléctrico opera con voltaje de corriente alterna (VCA), puede funcionar como generador y aportar una carga parcial al banco de baterías mediante la función de freno regenerativo.

En este caso, es necesario conectar el cable correspondiente, proveniente de la controladora, al interruptor ubicado en el pedal del freno. De esta manera, cuando el conductor presione el freno —siempre habiendo liberado el pedal del acelerador—, la controladora recibirá la señal para activar el frenado regenerativo, aprovechando la desaceleración del vehículo para devolver parte de la energía al banco de baterías.

En la imagen de la figura 7.32 se muestra la ubicación del interruptor del pedal del freno.

7.4.2. Convertidor DC-DC

Este módulo cumple la misma función que originalmente realizaba el alternador del vehículo: generar el voltaje necesario para mantener cargada la batería de 12 VCD instalada de fábrica. Esta batería continúa siendo fundamental, ya que permite que los accesorios del automóvil permanezcan operativos incluso cuando el sistema de propulsión eléctrica no ha sido activado.

Para la instalación del convertidor DC-DC fue necesario considerar su colocación dentro del soporte del motor. Con ello se optimiza el espacio disponible para los nuevos módulos incorporados durante la conversión del vehículo a eléctrico.



Figura 7.29: Colocación del pedal acelerador



Figura 7.30: Palanca selectora de marcha, incluida con la controladora



Figura 7.31: Tablero asociado a la controladora

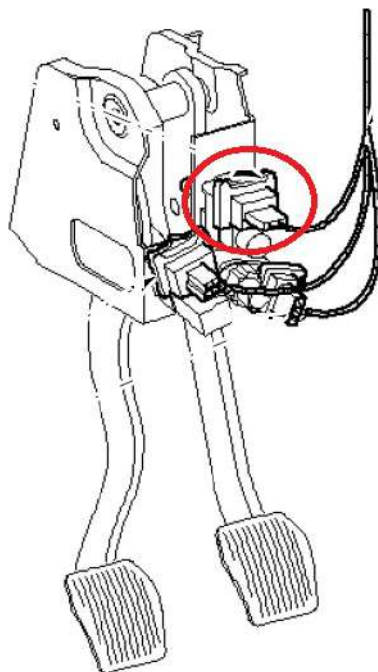


Figura 7.32: Ubicación del interruptor en el pedal del freno

Una vez que el vehículo eléctrico se activa, el voltaje proveniente del banco de baterías alimenta tanto a la unidad de control como al convertidor DC-DC. Este último suministra un voltaje aproximado de 13.4 VCD, similar al que generaba el alternador original. Gracias a ello, la batería de 12 VCD (de plomo-ácido) permanece cargada y en condiciones de operar los diversos accesorios instalados en el vehículo, como el sistema de audio, el motor de los limpiadores, entre otros.

En la imagen de la figura 7.33 se muestra la ubicación del convertidor DC-DC junto a la controladora.

Por último, se recomienda instalar el convertidor DC-DC en una ubicación cercana a la batería de 12 VCD, tal como se muestra en la imagen de la figura 7.34.

7.4.3. Bomba de vacío

Cuando se ha retirado el motor de combustión interna, se requiere de un elemento que genere “vacío” para que el booster de los frenos del vehículo funcione como originalmente lo hacía. El motor de combustión interna aparte de proporcionar movimiento al automóvil también generaba el vacío que se tiene que canalizar al booster.

La solución para que los frenos operen de manera completa y con la totalidad de la seguridad, se tiene que instalar una bomba de vacío, la cual tendrá la misión de producir vacío. Adicional a la bomba de vacío, es conveniente instalar un depósito o tanque donde se almacene la mayor cantidad de vacío posible, para que cuando se requiera de la acción de frenado continuo por ejemplo en una pendiente de descenso, el booster tenga el suficiente vacío para frenar el movimiento del vehículo, además de darle descanso a la bamba de vacío para que esta no llegue a dañarse por un funcionamiento continuo.

Para que la bomba de vacío no trabaje continuamente, se requiere de un sensor el cual se encuentra



Figura 7.33: Convertidor DC - DC a un costado de la controladora

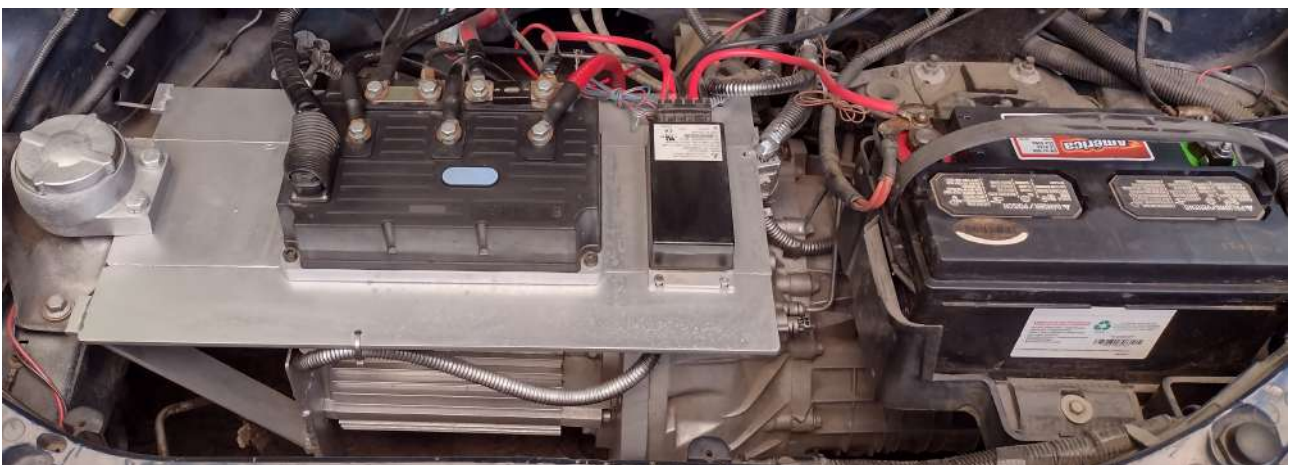


Figura 7.34: Ubicación cerca de la batería de 12VCD



calibrado para que se apague cuando se alcance el nivel de presión de vacío de entre 16" a 18" Hg (pulgadas de mercurio), aproximadamente equivale a unos 54,000 Pa (pascales) o N/m² (Newton/ m²).

En la imagen de la figura 7.35 se muestra al sensor de presión, depósito y bomba de vacío.

Por último, en la imagen de la figura 7.36 se muestra la bomba de vacío instalada en el vehículo, junto con su depósito y el sensor de presión correspondiente.

7.4.4. Cableado eléctrico

Con respecto a la instalación del cableado, se debe considerar que existen 2 diferentes apartados, los cuales se tienen que dividir en apartados que son: electricidad de alto voltaje y electricidad de bajo voltaje.

Los elementos que generan y consumirán la electricidad de alto voltaje son el banco de baterías, la controladora el motor eléctrico y el convertidor DC-DC. Para canalizar la electricidad de alto voltaje se requiere del empleo de cableado denominado doble cero, esto quiere decir que el calibre es 2/0 AWG. El voltaje máximo soportado por este cable es de 600 V y una corriente máxima de 175 A. Dicho calibre es el más delgado que se debe colocar para conectar al banco de baterías con la controladora, ya que se puede colocar un calibre por ejemplo 3/0 o incluso 4/0 AWG, los cuales tienen mayor capacidad de manejar voltaje y corriente de mayor magnitud.

Todos los cableados que sean instalados en el vehículo deben ser fabricados expofesamente para empleo automotriz, ya que entre sus características estos cableados son "flexibles" lo cual impide que se lleguen a fracturar por rigidez.

Para instalar el cableado 2/0 AWG es conveniente que se encuentre protegido porque la magnitud de voltaje y corriente que circularan por estos tendrán valores considerablemente altos, para ello se tiene que analizar cuidadosamente el lugar correcto dentro del vehículo para que no sufra ninguna fisura en el forro del cableado y con ello se pueda generar un corto circuito. La colocación del cableado es recomendable hacerla dentro del habitáculo del vehículo, donde no estorbe al uso continuo del automóvil, para ello será conveniente quita los asientos y levantar la alfombra para poder colocar el cableado sin ningún obstáculo, pudiendo ser acomodado y moldeado a la forma del piso del vehículo. Es conveniente que sean instalados 2 cables 2/0 AWG, uno de color rojo y otro de color negro que serán identificados como los potenciales (+) y (-) del alto voltaje. En las imágenes de las figura 7.37 se muestra por medio de los colores rojo y negro, por donde es recomendable acomodar los cables por debajo de la alfombra, y que estos pasen totalmente desapercibidos, cuando sean colocados tanto la alfombra como los asientos.

El cableado de alto voltaje debe conectar el banco de baterías, ubicado en la cajuela del vehículo, con la controladora situada bajo el cofre. Por ello, la longitud total del cable dependerá directamente del modelo del automóvil. Es recomendable dejar aproximadamente 10 cm adicionales en cada extremo para facilitar la instalación y la soldadura de los conectores correspondientes. En la imagen de la figura 7.38 se muestra un ejemplo de conector para cable calibre 2/0 AWG.

Antes de abordar el cableado de bajo voltaje, es necesario señalar que los sistemas de alto y bajo voltaje deben permanecer completamente aislados entre sí. Como se explicó previamente, el cableado de alto voltaje tiene la función exclusiva de suministrar energía al motor eléctrico desde el banco de baterías, mientras que el cableado de bajo voltaje se encargará de activar todos aquellos componentes que operan a 12 VCD. En este sentido, los nuevos dispositivos incorporados durante el proceso de conversión deberán integrarse al sistema eléctrico original del vehículo, el cual gobierna el funcionamiento de los accesorios.



Figura 7.35: De izquierda a derecha, sensor de presión, tanque de almacenamiento, bomba de vacío



Figura 7.36: Instalación de sensor, tanque de almacenamiento y bomba de vacío



Figura 7.37: Ubicación del cableado de alto voltaje



Figura 7.38: Conector para cableado 2/0 AWG

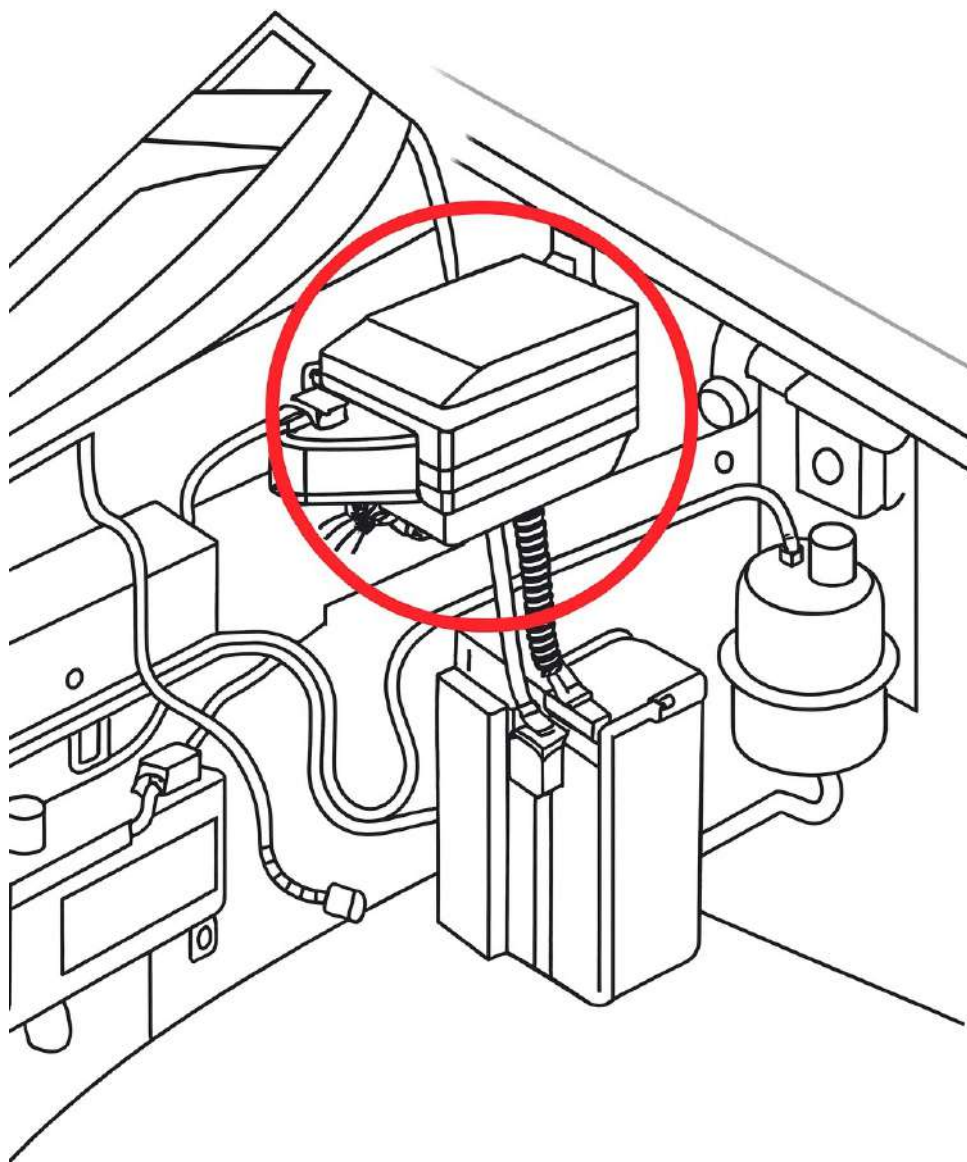


Figura 7.39: Posible ubicación de la caja de fusibles debajo del cofre

Con base en lo anterior, el diseño del cableado de bajo voltaje dependerá de la ubicación de los nuevos elementos instalados. Sin embargo, un principio fundamental es que todos ellos deben contar con protección mediante fusible, tal como ocurre con los accesorios originales. Por esta razón, el nuevo cableado de bajo voltaje debe iniciarse desde las cajas de fusibles del vehículo. En las siguientes imágenes de las figuras 7.39 y 7.40 se muestra la ubicación de dichas cajas, tanto en el compartimento del motor como en el habitáculo.

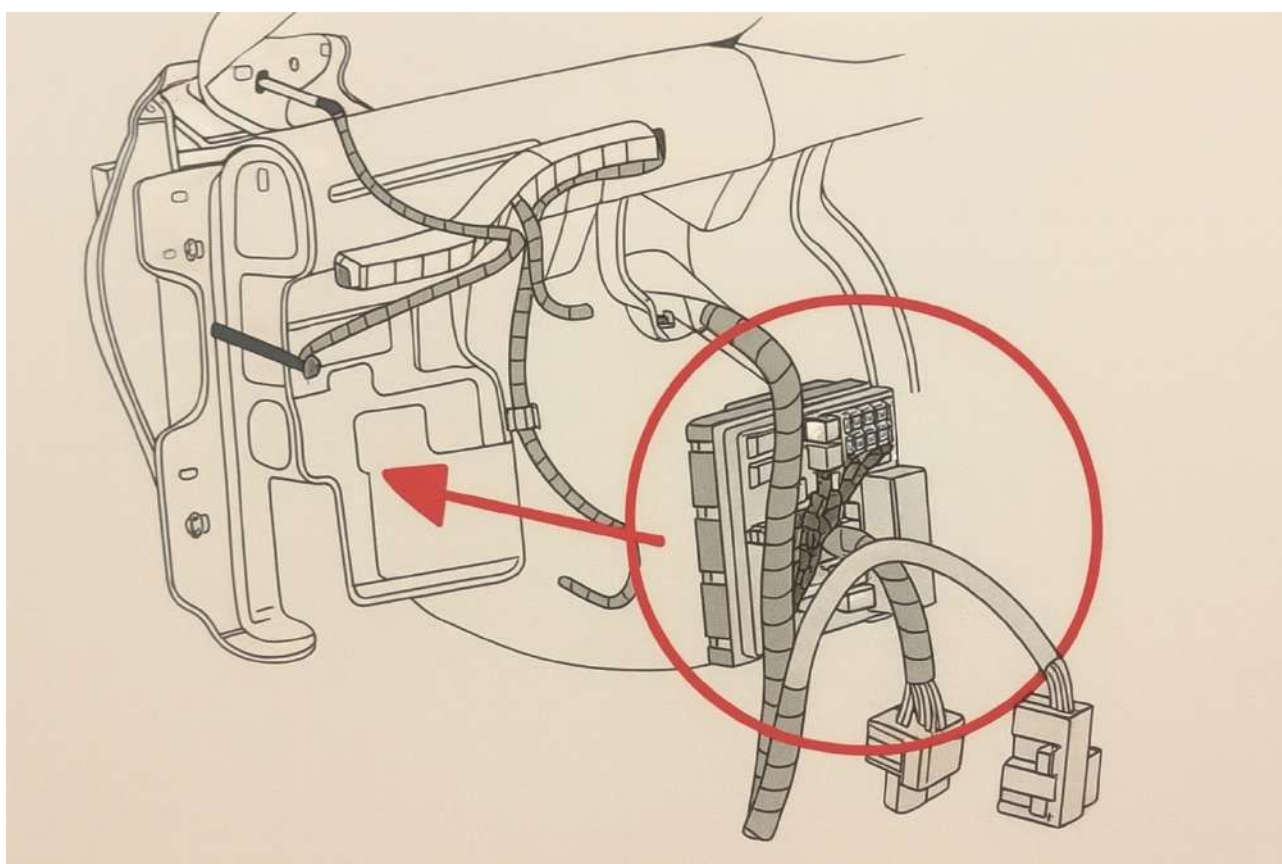


Figura 7.40: Posible ubicación de la caja de fusibles en el habitáculo del auto





CAPÍTULO 8

Protocolos de Prueba y Validación

Una vez concluido el proceso de conversión del vehículo de combustión interna a eléctrico, resulta indispensable verificar que todos los sistemas operen correctamente y cumplan con estándares mínimos de seguridad y desempeño. Para ello, se han establecido una serie de protocolos de prueba y validación que permiten evaluar aspectos críticos como el frenado, la estabilidad, las vibraciones, el aislamiento eléctrico y los ciclos de carga y descarga del banco de baterías.

Estos protocolos deben ejecutarse de manera metódica y documentarse adecuadamente, con el fin de garantizar que el vehículo convertido pueda circular con total seguridad y confiabilidad. A continuación se describen cada uno de los procedimientos de validación recomendados.

8.1 PROTOCOLO DE VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE FRENADO

El sistema de frenado es uno de los elementos más críticos para la seguridad del vehículo. Aunque durante la conversión se conserva el sistema mecánico original de frenos, es necesario validar que la bomba de vacío instalada opere correctamente y que el sistema responda de manera eficiente ante diferentes condiciones de uso.

8.1.1. Verificación del sistema de vacío

Objetivo: Confirmar que la bomba de vacío genera y mantiene el nivel de presión necesario para el correcto funcionamiento del booster de frenos.

Procedimiento:

1. Con el vehículo estacionado y el motor eléctrico apagado, verificar que el sensor de vacío se encuentre correctamente instalado y conectado.
2. Activar el sistema eléctrico del vehículo girando la llave a la posición de "accesorios" o "activación".
3. Observar que la bomba de vacío entre en operación y comience a generar vacío en el depósito.
4. Mediante un manómetro adecuado, medir que el nivel de vacío alcance entre 16z 18"pulgadas de mercurio (aproximadamente 54,000 Pa).
5. Confirmar que, al alcanzar el nivel de vacío establecido, el sensor desactive automáticamente la bomba.
6. Presionar el pedal del freno repetidamente (entre 5 y 10 veces) para consumir el vacío almacenado y verificar que la bomba se reactive cuando la presión descienda por debajo del umbral mínimo.



7. Repetir el ciclo al menos tres veces para asegurar la operación consistente del sistema.

Criterios de aceptación:

- La bomba debe activarse automáticamente cuando el nivel de vacío caiga por debajo de 16" Hg.
- El sistema debe alcanzar entre 16z 18" Hg en un tiempo no mayor a 30 segundos.
- El sensor de presión debe desactivar la bomba de manera confiable al alcanzar el nivel de vacío establecido.

8.1.2. Prueba de frenado en condiciones estáticas

Objetivo: Evaluar la respuesta del sistema de frenos con el vehículo detenido.

Procedimiento:

1. Con el vehículo estacionado en una superficie plana y nivelada, activar el sistema eléctrico.
2. Esperar a que el depósito de vacío alcance su nivel óptimo (indicado por la desactivación de la bomba).
3. Presionar firmemente el pedal del freno y evaluar la resistencia que ofrece. El pedal debe sentirse firme, sin hundirse excesivamente.
4. Mantener presionado el pedal durante al menos 30 segundos y verificar que no presente fugas (el pedal no debe descender gradualmente hacia el piso).
5. Liberar el pedal y verificar que retorne completamente a su posición inicial.

Criterios de aceptación:

- El pedal debe ofrecer resistencia firme y no hundirse completamente hacia el piso.
- No debe presentar fugas de vacío durante la prueba de 30 segundos.
- El retorno del pedal debe ser inmediato y completo.

8.1.3. Prueba de frenado en movimiento

Objetivo: Validar la capacidad de detención del vehículo en condiciones reales de operación.

Procedimiento:

1. Realizar las pruebas en una vía cerrada, segura y libre de tráfico vehicular o peatonal.
2. Acelerar el vehículo hasta alcanzar 20 km/h en primera velocidad.
3. Aplicar el freno de manera progresiva pero firme, sin liberar completamente el pedal del acelerador antes de frenar (para simular una situación real).
4. Medir la distancia de frenado desde el momento en que se acciona el pedal hasta la detención total.
5. Repetir la prueba al menos cinco veces y registrar cada resultado.
6. Incrementar gradualmente la velocidad a 40 km/h, 60 km/h y 80 km/h (si las condiciones de seguridad lo permiten), repitiendo el procedimiento en cada caso.
7. Evaluar que el vehículo mantenga una trayectoria recta durante el frenado, sin desviarse hacia ningún lado.

Criterios de aceptación:

- El vehículo debe detenerse de manera controlada en todas las pruebas.
- No debe presentarse desviación lateral durante el frenado.



- Las distancias de frenado deben ser consistentes entre las repeticiones de cada velocidad.
- El sistema de vacío debe reponerse automáticamente después de cada prueba.

8.1.4. Prueba de freno regenerativo (si aplica)

Objetivo: Verificar la correcta operación del sistema de frenado regenerativo y su contribución a la desaceleración del vehículo.

Procedimiento:

1. Circular en una vía segura y cerrada a una velocidad constante de 50 km/h.
2. Liberar completamente el pedal del acelerador sin accionar el pedal del freno.
3. Observar si el vehículo comienza a desacelerar gradualmente debido al freno regenerativo.
4. Presionar el pedal del freno y verificar que el sistema de freno regenerativo se active (esto puede confirmarse mediante el tablero de la controladora, si este muestra el flujo de corriente hacia el banco de baterías).
5. Medir el tiempo que tarda el vehículo en reducir su velocidad de 50 km/h a 20 km/h utilizando únicamente el freno regenerativo.
6. Repetir la prueba al menos tres veces y registrar los resultados.

Criterios de aceptación:

- El freno regenerativo debe activarse de manera consistente al presionar el pedal del freno.
- El vehículo debe desacelerar de forma controlada y predecible.
- El tablero debe indicar que el banco de baterías está recibiendo carga durante la desaceleración.

8.2 PROTOCOLO DE VALIDACIÓN DE ESTABILIDAD Y MANEJO

La estabilidad del vehículo puede verse afectada por la redistribución de peso derivada de la instalación del banco de baterías y el motor eléctrico. Es fundamental verificar que el vehículo mantenga un comportamiento dinámico seguro y predecible en diversas condiciones de manejo.

8.2.1. Inspección visual y distribución de peso

Objetivo: Confirmar que el peso del vehículo esté distribuido de manera equilibrada entre los ejes delantero y trasero.

Procedimiento:

1. Con el vehículo estacionado en una superficie plana, realizar una inspección visual de la altura de la carrocería en las cuatro esquinas.
2. Medir la distancia desde el suelo hasta la parte inferior de los guardabarros en cada rueda. Las mediciones deben ser similares entre el lado izquierdo y derecho tanto en el eje delantero como en el trasero.
3. Si es posible, utilizar una báscula vehicular para medir el peso en cada eje. Idealmente, la diferencia entre el eje delantero y trasero no debe exceder el 10 % del peso total del vehículo.
4. Verificar que los neumáticos presenten un desgaste uniforme, lo que indica una correcta distribución de carga.

Criterios de aceptación:



- La altura de la carrocería debe ser uniforme entre los lados izquierdo y derecho.
- El peso debe estar distribuido de manera equilibrada entre ambos ejes.
- Los neumáticos no deben presentar desgaste irregular.

8.2.2. Prueba de maniobrabilidad en baja velocidad

Objetivo: Evaluar la respuesta del vehículo en maniobras cotidianas a baja velocidad.

Procedimiento:

1. En un área segura y despejada, realizar maniobras de estacionamiento en paralelo, tanto hacia la derecha como hacia la izquierda.
2. Ejecutar giros cerrados en ambas direcciones (360° completos) a velocidades inferiores a 10 km/h.
3. Evaluar la respuesta de la dirección, confirmando que no presente holguras ni resistencia excesiva.
4. Observar que el vehículo no presente ruidos anormales provenientes de la suspensión o la dirección.

Criterios de aceptación:

- La dirección debe responder de manera suave y predecible.
- El vehículo debe completar las maniobras sin dificultad.
- No deben presentarse ruidos, vibraciones o comportamientos anormales.

8.2.3. Prueba de estabilidad en curvas

Objetivo: Validar el comportamiento dinámico del vehículo al tomar curvas a diferentes velocidades.

Procedimiento:

1. Seleccionar una curva cerrada en una vía segura y cerrada al tráfico.
2. Ingresar a la curva a una velocidad moderada (30 km/h) y evaluar la inclinación del vehículo (rolido).
3. Incrementar gradualmente la velocidad de ingreso a la curva (40 km/h, 50 km/h) y observar si el vehículo mantiene la trayectoria deseada o presenta tendencia a subvirar o sobrevirar.
4. Repetir la prueba en curvas tanto hacia la derecha como hacia la izquierda.
5. Registrar cualquier comportamiento anormal, como pérdida de tracción, chirrido de neumáticos o desplazamiento excesivo de la carga.

Criterios de aceptación:

- El vehículo debe mantener una trayectoria estable y predecible.
- El rolido debe ser moderado y no comprometer la estabilidad.
- No debe presentarse pérdida de tracción en condiciones normales de adherencia.

8.2.4. Prueba de estabilidad en línea recta a alta velocidad

Objetivo: Confirmar que el vehículo mantenga estabilidad direccional en velocidades elevadas.

Procedimiento:



1. En una vía recta, segura y cerrada, acelerar el vehículo hasta alcanzar 80 km/h (o la velocidad máxima permitida por las condiciones de seguridad).
2. Soltar momentáneamente el volante y observar si el vehículo tiende a desviarse hacia algún lado.
3. Realizar correcciones mínimas con el volante y evaluar la respuesta del vehículo.
4. Repetir la prueba al menos tres veces.

Criterios de aceptación:

- El vehículo debe mantener una trayectoria recta sin desviaciones pronunciadas.
- Las correcciones con el volante deben ser mínimas y suaves.
- No deben presentarse vibraciones o movimientos oscilatorios en el volante.

8.3 PROTOCOLO DE VALIDACIÓN DE VIBRACIONES Y RUIDO

Las vibraciones excesivas pueden indicar problemas de balanceo, desalineación o fijación inadecuada de componentes. Es importante identificar y corregir cualquier fuente de vibración para garantizar el confort y la integridad estructural del vehículo.

8.3.1. Inspección de montaje y fijación de componentes

Objetivo: Verificar que todos los componentes nuevos estén correctamente fijados y no presenten holguras.

Procedimiento:

1. Con el vehículo en reposo, realizar una inspección visual y táctil de todos los puntos de montaje del motor eléctrico, el banco de baterías, la controladora y demás componentes instalados.
2. Verificar que todos los tornillos, tuercas y sujetadores estén apretados al torque especificado por el fabricante o, en su defecto, al torque recomendado para el tipo de sujetador utilizado.
3. Intentar mover manualmente cada componente para detectar holguras o movimientos no deseados.
4. Revisar que las gomas o soportes antivibratorios (si fueron instalados) se encuentren en buen estado y correctamente posicionados.

Criterios de aceptación:

- Todos los componentes deben estar firmemente sujetos, sin holguras.
- Los sujetadores deben estar apretados al torque adecuado.
- No deben detectarse movimientos o desplazamientos al aplicar fuerza manual.

8.3.2. Prueba de vibraciones en ralentí (motor encendido, vehículo detenido)

Objetivo: Detectar vibraciones anormales con el motor eléctrico activado y el vehículo en reposo.

Procedimiento:

1. Activar el sistema eléctrico del vehículo y encender el motor eléctrico sin colocar ninguna velocidad (palanca selectora en posición N).
2. Observar y sentir si se presentan vibraciones en el volante, el tablero, los asientos o la carrocería.



3. Incrementar gradualmente el voltaje suministrado al motor (presionando ligeramente el pedal del acelerador) y evaluar si las vibraciones aumentan, disminuyen o se mantienen constantes.
4. Repetir la prueba con diferentes niveles de aceleración.

Criterios de aceptación:

- El motor eléctrico debe operar de manera silenciosa y sin vibraciones perceptibles.
- No deben presentarse ruidos metálicos, chirridos o golpeteos.
- Las vibraciones, si las hay, deben ser mínimas y no deben incrementarse con el aumento de voltaje.

8.3.3. Prueba de vibraciones en movimiento

Objetivo: Identificar vibraciones que se presenten durante la operación normal del vehículo en diferentes velocidades y condiciones.

Procedimiento:

1. Circular en una vía segura y cerrada, acelerando gradualmente desde 0 km/h hasta 80 km/h.
2. Registrar en qué rangos de velocidad se presentan vibraciones (por ejemplo, entre 40-50 km/h, 60-70 km/h, etc.).
3. Evaluar si las vibraciones provienen del motor, la transmisión, las ruedas o la suspensión.
4. Realizar la prueba en diferentes superficies (asfalto liso, empedrado, terracería) para identificar si las vibraciones dependen del tipo de pavimento.
5. Conducir en diferentes marchas (primera, segunda, tercera, cuarta y quinta, si aplica) para determinar si las vibraciones están relacionadas con la transmisión.

Criterios de aceptación:

- El vehículo debe operar de manera suave en todos los rangos de velocidad.
- Las vibraciones, si se presentan, deben ser comparables a las de un vehículo de combustión interna en condiciones normales.
- No deben detectarse resonancias o vibraciones excesivas que comprometan el confort o la seguridad.

8.3.4. Medición de niveles de ruido

Objetivo: Cuantificar los niveles de ruido generados por el motor eléctrico y componentes auxiliares.

Procedimiento:

1. Utilizando un sonómetro calibrado, medir el nivel de ruido en el interior del habitáculo con el motor eléctrico encendido y el vehículo detenido.
2. Registrar el nivel de ruido (en decibeles, dB) en diferentes condiciones:
 - Motor encendido, sin aceleración (ralentí).
 - Motor acelerado al 50 % de su capacidad.
 - Motor acelerado al 100 % de su capacidad.
3. Repetir las mediciones con el vehículo en movimiento a velocidades de 40 km/h, 60 km/h y 80 km/h.
4. Comparar los resultados con los niveles de ruido típicos de vehículos similares.

Criterios de aceptación:



- El nivel de ruido no debe exceder 70 dB en el interior del habitáculo durante la operación normal.
- El ruido generado debe ser principalmente aerodinámico y de rodadura, no proveniente del motor eléctrico o sus componentes auxiliares.

8.4 PROTOCOLO DE VALIDACIÓN DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO Y SEGURIDAD

El manejo de altos voltajes representa uno de los mayores riesgos durante y después de la conversión. Es fundamental garantizar que todas las conexiones eléctricas estén correctamente aisladas y que no existan fugas de corriente que puedan comprometer la seguridad de los ocupantes o del personal de mantenimiento.

8.4.1. Inspección visual de conexiones y cableado

Objetivo: Verificar que todos los cables, conectores y terminales estén en buen estado y correctamente instalados.

Procedimiento:

1. Con el vehículo apagado y el banco de baterías desconectado (contactor abierto), realizar una inspección visual exhaustiva de todo el cableado de alto voltaje.
2. Verificar que no existan cortes, raspaduras, pelado o daños en el aislamiento de los cables.
3. Confirmar que todos los conectores estén correctamente insertados y asegurados.
4. Revisar que los cables no entren en contacto con superficies metálicas, bordes filosos o componentes móviles que puedan dañar el aislamiento.
5. Verificar que el cableado esté correctamente sujeto y no presente movimientos excesivos que puedan generar fatiga o ruptura.

Criterios de aceptación:

- El aislamiento de todos los cables debe estar intacto, sin cortes, raspaduras ni exposición de conductores.
- Todos los conectores deben estar firmemente acoplados.
- El cableado debe estar correctamente fijado y protegido contra daños mecánicos.

8.4.2. Prueba de aislamiento con megóhmetro

Objetivo: Medir la resistencia de aislamiento entre los conductores de alto voltaje y la carrocería del vehículo.

Procedimiento:

1. Desconectar el banco de baterías del sistema (abrir el contactor principal y el interruptor de seguridad).
2. Utilizando un megóhmetro (también conocido como medidor de aislamiento), configurarlo a 500 VCD o 1000 VCD, según la especificación del equipo.
3. Conectar una punta del megóhmetro al conductor positivo (+) del banco de baterías y la otra punta a la carrocería del vehículo (una superficie metálica limpia y sin pintura, que esté conectada al chasis).
4. Realizar la medición y registrar el valor de resistencia de aislamiento obtenido.
5. Repetir el procedimiento conectando el megóhmetro entre el conductor negativo (–) y la carrocería.



6. Realizar mediciones adicionales entre los conductores de alto voltaje (positivo y negativo) y diferentes puntos metálicos del vehículo (chasis, carrocería, componentes metálicos).

Criterios de aceptación:

- La resistencia de aislamiento debe ser superior a $1\text{ M}\Omega$ (megaohm) por cada voltio del sistema. Por ejemplo, para un sistema de 100 VCD, la resistencia mínima debe ser de $100\text{ M}\Omega$.
- No deben detectarse valores de resistencia inferiores a $1\text{ M}\Omega$, ya que esto indicaría una posible fuga de corriente o falla en el aislamiento.

8.4.3. Prueba de continuidad de conexión a tierra

Objetivo: Verificar que todas las partes metálicas del vehículo y los componentes eléctricos estén correctamente conectadas a tierra.

Procedimiento:

1. Utilizando un multímetro en modo de continuidad (o resistencia baja), verificar la conexión entre la terminal negativa (–) del banco de baterías y la carrocería del vehículo.
2. Medir la resistencia entre diferentes puntos metálicos del vehículo (chasis, carrocería, soportes metálicos) y la terminal negativa del banco de baterías.
3. Verificar que la controladora, el convertidor DC-DC, la bomba de vacío y demás componentes eléctricos estén correctamente conectados a tierra.

Criterios de aceptación:

- La resistencia entre la terminal negativa del banco de baterías y cualquier punto metálico del vehículo debe ser inferior a $1\text{ }\Omega$ (ohm).
- Todos los componentes eléctricos deben estar correctamente conectados a tierra.

8.4.4. Prueba de funcionamiento de dispositivos de seguridad

Objetivo: Confirmar que los fusibles, interruptores y el contactor operen correctamente ante condiciones de sobrecorriente o emergencia.

Procedimiento:

1. Verificar que el fusible de 400 A instalado entre el contactor y la controladora esté correctamente dimensionado y en buen estado.
2. Activar el sistema eléctrico del vehículo y confirmar que el contactor se cierre al girar la llave a la posición de "activación".
3. Accionar el interruptor de emergencia (si fue instalado) y verificar que el contactor se abra inmediatamente, interrumpiendo el flujo de corriente hacia la controladora.
4. Simular una condición de sobrecorriente (si es posible, bajo supervisión de personal capacitado) y verificar que el fusible de 400 A se funda y proteja el sistema.
5. Reemplazar el fusible fundido y repetir la prueba de activación para confirmar que el sistema vuelve a operar normalmente.

Criterios de aceptación:



- El contactor debe activarse y desactivarse de manera confiable.
- El interruptor de emergencia debe interrumpir inmediatamente el flujo de corriente.
- El fusible debe fundirse ante corrientes superiores a su capacidad nominal, protegiendo el sistema.

8.4.5. Prueba de detección de fugas de corriente

Objetivo: Identificar posibles fugas de corriente que puedan representar un riesgo de choque eléctrico.

Procedimiento:

1. Con el sistema activado y el motor eléctrico encendido, utilizar una pinza amperimétrica para medir la corriente que circula por el conductor positivo (+) hacia la controladora.
2. Medir simultáneamente la corriente que retorna por el conductor negativo (-) desde la controladora hacia el banco de baterías.
3. Comparar ambas mediciones. En condiciones normales, la corriente de entrada y salida debe ser prácticamente idéntica.
4. Si existe una diferencia significativa (mayor a 0.5 A), esto puede indicar una fuga de corriente hacia la carrocería o hacia tierra.

Criterios de aceptación:

- La diferencia entre la corriente de entrada y salida debe ser inferior a 0.5 A.
- No deben detectarse corrientes circulando hacia la carrocería o hacia tierra.

8.5 VALIDACIÓN DE CICLOS DE CARGA/DESCARGA DEL BANCO DE BATERÍAS

El banco de baterías es el corazón del sistema eléctrico del vehículo. Su correcto funcionamiento, capacidad de carga y autonomía deben ser validados mediante pruebas que simulen condiciones reales de uso.

8.5.1. Verificación inicial de voltaje y balanceo de celdas

Objetivo: Confirmar que todas las celdas del banco de baterías se encuentren correctamente balanceadas y en buen estado.

Procedimiento:

1. Con el banco de baterías completamente cargado, medir el voltaje total en las terminales positiva y negativa utilizando un multímetro.
2. Si el banco de baterías cuenta con un sistema de gestión (BMS), verificar mediante su interfaz que todas las celdas presenten voltajes similares (la diferencia entre la celda con mayor y menor voltaje no debe superar 0.1 V).
3. Registrar el voltaje de cada celda o módulo individual (si es posible acceder a ellos) y comparar con las especificaciones del fabricante.
4. Si se detectan celdas con voltajes significativamente diferentes, realizar un ciclo de balanceo utilizando el cargador o el BMS.

Criterios de aceptación:



- El voltaje total del banco debe corresponder al valor nominal especificado por el fabricante (por ejemplo, 96 VCD, 100 VCD, etc.).
- La diferencia de voltaje entre celdas no debe superar 0.1 V.
- Todas las celdas deben presentar voltajes dentro del rango operativo especificado por el fabricante.

8.5.2. Prueba de capacidad real del banco de baterías

Objetivo: Determinar la capacidad real de almacenamiento de energía del banco de baterías.

Procedimiento:

1. Cargar completamente el banco de baterías utilizando el cargador instalado en el vehículo.
2. Registrar el voltaje final de carga y el tiempo total que tardó el proceso.
3. Circular con el vehículo en condiciones normales de uso (trayectos urbanos, con aceleraciones y frenados moderados) hasta que el banco de baterías se descargue por completo o alcance el voltaje mínimo de corte establecido por la controladora.
4. Registrar la distancia total recorrida, el tiempo de operación y el voltaje final del banco de baterías.
5. Recargar nuevamente el banco de baterías y registrar la cantidad de energía suministrada (en kWh) mediante un medidor de energía conectado al cargador.
6. Comparar la energía suministrada durante la recarga con la capacidad nominal del banco de baterías.

Criterios de aceptación:

- La capacidad real del banco de baterías debe ser al menos el 80 % de su capacidad nominal.
- La autonomía (distancia recorrida) debe ser consistente con la capacidad del banco y el consumo estimado del motor eléctrico.

8.5.3. Prueba de carga completa

Objetivo: Verificar que el cargador de baterías opere correctamente y complete el ciclo de carga de manera segura y eficiente.

Procedimiento:

1. Descargar parcialmente el banco de baterías (por ejemplo, hasta alcanzar el 30 % de su carga total).
2. Conectar el cargador a una toma de corriente alterna (VCA) de 120 V o 220 V, según corresponda.
3. Iniciar el proceso de carga y registrar el tiempo en que comienza.
4. Monitorear el voltaje del banco de baterías cada 30 minutos utilizando un multímetro o la interfaz del BMS (si está disponible).
5. Registrar el voltaje, la corriente de carga y la temperatura del banco de baterías durante todo el proceso.
6. Confirmar que el cargador finalice automáticamente el proceso al alcanzar el voltaje máximo de carga especificado por el fabricante.
7. Registrar el tiempo total de carga y la cantidad de energía suministrada.

Criterios de aceptación:

- El cargador debe completar el ciclo de carga de manera automática, sin intervención manual.



- El voltaje final debe corresponder al voltaje máximo de carga especificado por el fabricante.
- La temperatura del banco de baterías no debe exceder 45°C durante la carga.
- El cargador debe desconectarse automáticamente al finalizar el proceso.

8.5.4. Prueba de carga rápida (si el cargador lo permite)

Objetivo: Evaluar la capacidad del banco de baterías y del cargador para soportar ciclos de carga rápida.

Procedimiento:

1. Descargar el banco de baterías hasta alcanzar el 20 % de su capacidad.
2. Conectar el cargador a una fuente de alimentación de alta corriente (si el cargador lo permite) y activar el modo de carga rápida.
3. Monitorear continuamente el voltaje, la corriente de carga y la temperatura del banco de baterías.
4. Registrar el tiempo necesario para alcanzar el 80 % de la carga total.
5. Confirmar que el cargador reduzca automáticamente la corriente de carga al acercarse al 80 %-90 % de la capacidad, para proteger las baterías.

Criterios de aceptación:

- El banco de baterías debe alcanzar el 80 % de su capacidad en un tiempo razonable (generalmente entre 1 y 3 horas, dependiendo de la potencia del cargador).
- La temperatura no debe exceder 50°C durante la carga rápida.
- El cargador debe ajustar automáticamente la corriente de carga para proteger las baterías.

8.5.5. Prueba de ciclos repetidos de carga y descarga

Objetivo: Evaluar la estabilidad y durabilidad del banco de baterías ante ciclos repetidos de uso.

Procedimiento:

1. Realizar al menos cinco ciclos completos de carga y descarga, siguiendo el siguiente procedimiento:
 - o Cargar completamente el banco de baterías.
 - o Circular con el vehículo hasta descargar el banco al 20 % de su capacidad.
 - o Recargar nuevamente hasta el 100 %.
2. Registrar en cada ciclo:
 - o Distancia recorrida.
 - o Tiempo de operación.
 - o Voltaje inicial y final.
 - o Tiempo de carga.
 - o Energía suministrada durante la recarga.
3. Comparar los resultados entre los cinco ciclos y detectar posibles variaciones en la capacidad o el rendimiento.

Criterios de aceptación:

- El banco de baterías debe mantener una capacidad y autonomía consistentes entre los cinco ciclos.



- La variación en la distancia recorrida no debe superar el 5 % entre ciclos.
- No deben presentarse degradaciones significativas en el rendimiento.

8.5.6. Monitoreo de temperatura durante ciclos de carga y descarga

Objetivo: Confirmar que el banco de baterías mantenga temperaturas seguras durante su operación.

Procedimiento:

1. Instalar sensores de temperatura en diferentes puntos del banco de baterías (en la parte superior, inferior, lateral y central).
2. Registrar la temperatura en intervalos regulares durante:
 - o Un ciclo completo de descarga (operación del vehículo).
 - o Un ciclo completo de carga.
3. Identificar los puntos donde se presentan las temperaturas más altas.
4. Verificar que exista una ventilación adecuada que permita la disipación del calor generado.

Criterios de aceptación:

- La temperatura del banco de baterías no debe exceder 45°C durante la descarga (operación del vehículo).
- Durante la carga, la temperatura no debe superar 50°C.
- La diferencia de temperatura entre diferentes puntos del banco no debe exceder 10°C, lo que indicaría una distribución uniforme del calor.

8.6 CONSIDERACIONES FINALES

Todos los protocolos descritos en este capítulo deben ejecutarse bajo la supervisión de personal capacitado y con experiencia en sistemas eléctricos de alto voltaje. Es fundamental documentar cada prueba realizada, registrando los valores obtenidos, las condiciones en que se efectuaron y cualquier observación relevante.

Es importante resaltar que los protocolos de prueba y validación mencionados, se deben realizar de acuerdo a las siguientes normas mexicanas (NOM) e internacionales, que son las más relevantes y aplicables para un vehículo eléctrico convertido (Retrofit). A continuación se enlistan por área de validación para mayor claridad.

1. Sistema de Frenado

Normas Mexicanas

- **NOM-194-SE-2021** Dispositivos de seguridad esenciales en vehículos nuevos

Aplica como referencia técnica para desempeño mínimo del sistema de frenado, aun en vehículos modificados.

Normas Internacionales

- **UNECE R13** Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to braking
- **UNECE R13-H** Frenado en vehículos ligeros
- **ISO 26865** Road vehicles — Braking systems — Terminology

2. Vibraciones y Ruido



Normas Mexicanas

- **NOM-080-SEMARNAT-1994** Límites máximos permisibles de emisión de ruido de vehículos automotores
- **NOM-081-SEMARNAT-1994** Emisión de ruido de fuentes fijas (aplicable a pruebas estacionarias)

Normas Internacionales

- **ISO 2631-1** Evaluation of human exposure to whole-body vibration
- **ISO 362-1** Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles
- **UNECE R51** Vehicle noise emissions

3. Aislamiento Eléctrico y Seguridad

Normas Mexicanas

- **NOM-001-SEDE-2012** Instalaciones eléctricas (utilización)
- **NOM-029-STPS-2011** Mantenimiento de instalaciones eléctricas – Condiciones de seguridad

Normas Internacionales

- **ISO 6469 (Partes 1–3)** Electrically propelled road vehicles — Safety specifications
- **IEC 60664** Insulation coordination for equipment
- **UNECE R100** Electric power train safety

4. Banco de Baterías y Ciclos de Carga/Descarga

Normas Mexicanas

- **NOM-052-SEMARNAT-2005** Manejo de residuos peligrosos (baterías al final de su vida útil)
- **NOM-161-SEMARNAT-2011** Residuos de manejo especial

Normas Internacionales

- **IEC 62660 (Partes 1–3)** Secondary lithium-ion cells for propulsion
- **ISO 12405** Electrically propelled road vehicles — Test specification for lithium-ion battery packs
- **UN 38.3** Pruebas de seguridad para transporte de baterías

5. Validación General del Vehículo Convertido (Retrofit)

Normas Internacionales Clave

- **ISO 26262** Functional safety of road vehicles
- **UNECE WP.29** Regulaciones técnicas de seguridad vehicular
- **SAE J2344** Guidelines for Electric Vehicle Safety

El cumplimiento de estas normas garantiza que el vehículo retrofit cumpla con criterios mínimos de seguridad, confiabilidad y desempeño, permitiendo su operación segura en vía pública y facilitando procesos de validación técnica, certificación y posible regularización administrativa.

Si durante la ejecución de cualquiera de estas pruebas se detectan resultados que no cumplan con los criterios de aceptación establecidos, será necesario realizar las correcciones pertinentes antes de poner el vehículo en operación regular. La seguridad de los ocupantes y del personal de mantenimiento debe ser siempre la prioridad máxima.

Una vez completados satisfactoriamente todos los protocolos de validación, el vehículo estará listo para circular de manera segura, eficiente y confiable, cumpliendo con los estándares mínimos de calidad esperados en un proceso de conversión a vehículo eléctrico.





CAPÍTULO 9

Viabilidad Económica Técnica del Retrofit

La implementación del retrofit vehicular —la conversión de automóviles con motor de combustión interna a sistemas de propulsión totalmente eléctricos— requiere no solo de una justificación ambiental, sino también de un análisis riguroso que demuestre su factibilidad económica y técnica. Este capítulo examina los costos asociados, la disponibilidad tecnológica, los requerimientos de infraestructura y el rendimiento esperado del sistema convertido. Asimismo, evalúa los beneficios financieros a corto y largo plazo, considerando ahorro en combustible, mantenimiento y vida útil de los componentes eléctricos. El objetivo es determinar si el retrofit constituye una alternativa viable y sostenible para propietarios particulares, empresas y entidades públicas que buscan reducir emisiones y optimizar sus recursos.

9.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

Con el propósito de evaluar la viabilidad económica del proceso de reconversión vehicular (Retrofit), se realizó un desglose detallado de los costos asociados a los principales componentes, insumos, servicios especializados y mano de obra requeridos. Los valores presentados corresponden a precios estimados en moneda nacional (MXN), considerando escenarios de adquisición a menudeo y a mayoreo, lo cual permite analizar distintos contextos de implementación (proyectos individuales, institucionales o de escalamiento industrial) .

Desde una perspectiva de ingeniería aplicada, el proceso de Retrofit implica la integración de componentes electromecánicos, electrónicos y de control, cuya viabilidad no solo depende del desempeño técnico, sino también de su factibilidad económica. En este sentido, el análisis de costos constituye un elemento central para evaluar la escalabilidad del modelo de conversión.

El Retrofit requiere servicios de fabricación y montaje que aseguren la correcta adaptación estructural del vehículo y la integración segura de los sistemas eléctricos de alta tensión. Estos costos, representan una fracción relevante del presupuesto total y reflejan la complejidad técnica inherente al proceso. La tabla 9.1 presenta el desglose de los costos estimados por la actividad técnica.

El análisis económico se complementa con los costos asociados a insumos secundarios, mano de obra especializada y servicios de fabricación e instalación, los cuales resultan indispensables para asegurar la correcta integración del sistema electromotriz y el cumplimiento de condiciones mínimas de seguridad y confiabilidad operativa. Las Tablas 9.2, 9.3 y 9.4 sintetizan los costos de materias primas, mientras que la Tabla 9.1 presenta el requerimiento de capital humano especializado necesario para la ejecución del proceso de conversión.



La consolidación de los rubros anteriores permite estimar el costo total del proceso de retrofit bajo distintos escenarios de adquisición. Como se observa en la Tabla 9.4 y gráficamente en la figura 9.1, el costo total oscila entre \$208,180 MXN en un escenario de menudeo y \$125,700 MXN en un escenario de mayoreo, lo que evidencia el potencial de reducción de costos cuando el modelo se implementa a escala institucional o industrial.

En la tabla 9.2 (costos al menudeo) se muestran además los componentes principales del sistema de conversión, donde se observa que el mayor peso económico corresponde al kit de conversión electromotriz y al banco de baterías de litio, elementos críticos para garantizar el desempeño del vehículo reconvertido; mientras que en la tabla 9.3 se observan los mismos rubros, pero calculados al mayoreo.

Estos resultados confirman que el retrofit vehicular representa una alternativa económicamente competitiva frente a la adquisición de vehículos eléctricos nuevos, particularmente en contextos urbanos donde la renovación total del parque vehicular resulta inviable a corto plazo. En consecuencia, el retrofit se consolida no solo como una solución técnica, sino como una estrategia integral de transición energética con potencial impacto inmediato en la reducción de emisiones, el fortalecimiento de capacidades tecnológicas locales y la democratización del acceso a la electromovilidad.

A continuación se presenta el desglose económico de todo lo que fue empleado en el proceso de Retrofit descrito en el presente informe.

1. Costo del Kit para conversión incluye: Motor eléctrico, controladora, accesorios HV, soportes básicos.

Precio menudeo: \$95,360

Precio mayoreo (50 %): \$47,680

2. Banco de baterías

Precio menudeo: \$63,120

Precio mayoreo (50 %): \$31,560

3. Circuito inteligente + tablero

Precio menudeo: \$6,480

Precio mayoreo (50 %): \$3,240

4. Materias primas adicionales

Cables, terminales, aluminio, soldadura, herramientas, accesorios de montaje, etc.

Totales Materias Primas: \$5,920 MXN

5. Mano de obra

Total Mano de Obra: \$20,500 MXN

6. Servicios de fabricación y soportes

Corte y soldadura: \$4,500

Fabricación de soporte motor; \$3,500

Actividad	Costo
Mecánico especializado	\$8,000
Técnico electricista	\$7,500
Técnico electrónico	\$5,000

Tabla 9.1: Costos estimados por actividad técnica.

Fabricación de soporte batería: \$2,800

Instalación y calibración: \$6,000

Total Servicios: \$16,800 MXN

SUMATORIA TOTAL DEL PRESUPUESTO

A) USANDO COSTOS DE MENUDEO

Rubro	Monto
Kit de conversión	\$95,360
Banco de baterías	\$63,120
Circuito inteligente	\$6,480
Materias primas	\$5,920
Mano de obra	\$20,500
Servicios	\$16,800
TOTAL	\$208,180 MXN

Tabla 9.2: Costos totales estimados del Retrofit al menudeo.

B) USANDO COSTOS DE MAYOREO

Rubro	Monto
Kit de conversión	\$47,680
Banco de baterías	\$31,560
Circuito inteligente	\$3,240
Materias primas	\$5,920
Mano de obra	\$20,500
Servicios	\$16,800
TOTAL	\$125,700 MXN

Tabla 9.3: Costos totales estimados del Retrofit al mayoreo.

Costo estimado del Retrofit (MXN): \$125,000 – \$140,000 MXN

Este rango coincide con valores reales de kits AC trifásicos + baterías de litio en México.

9.2 ANÁLISIS TÉCNICO

Con el objetivo de evaluar el desempeño técnico, energético y funcional del vehículo convertido mediante el proceso de retrofit, se llevaron a cabo pruebas experimentales en condiciones reales de operación en vialidades de la Ciudad de México y el Estado de México. Las pruebas se diseñaron para analizar la autonomía, el consumo energético, el comportamiento dinámico bajo carga y las implicaciones en costos de operación y

Rubro	Costo menudeo (MXN)	Costo mayoreo (MXN)
Kit de conversión	\$95,360.00	\$47,680.00
Banco de baterías	\$63,120.00	\$31,560.00
Circuito inteligente	\$6,480.00	\$3,240.00
Materias primas	\$5,920.00	\$5,920.00
Mano de obra	\$20,500.00	\$20,500.00
Servicios	\$16,800.00	\$16,800.00
Total	\$208,180.00	\$125,700.00

Tabla 9.4: Comparativo de costos en menudeo y mayoreo para el proceso de Retrofit.

Costo_menudeo_MXN y Costo_mayoreo_MXN

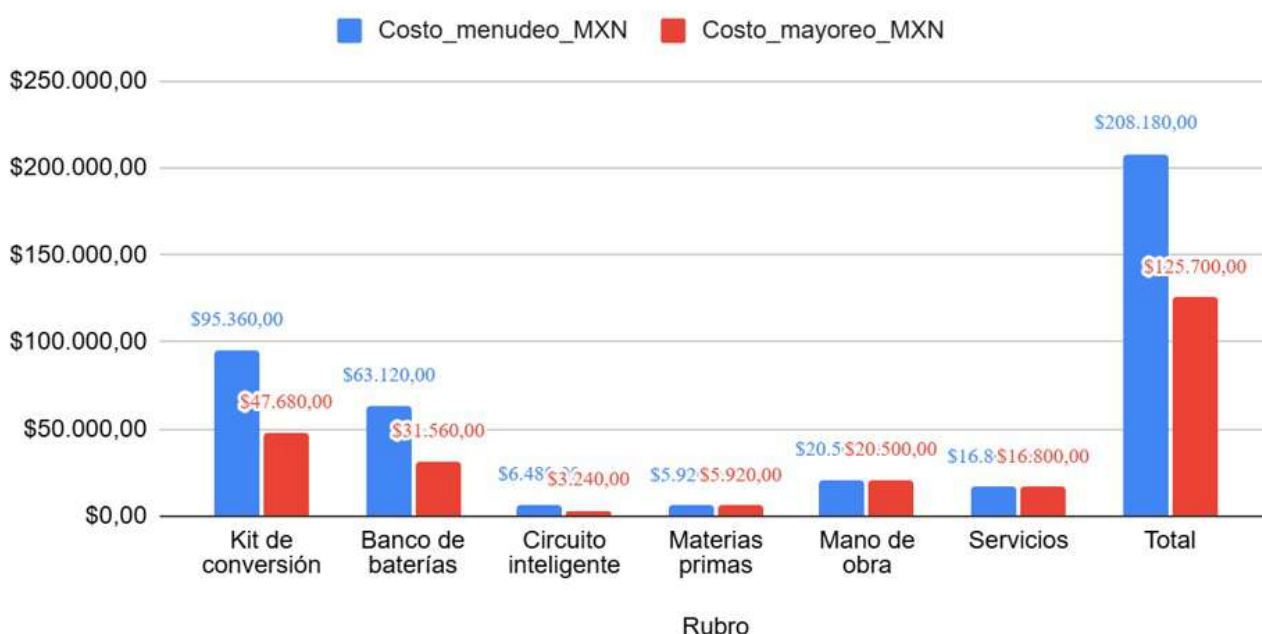


Figura 9.1: Comparación de costos en menudeo y mayoreo

mantenimiento del sistema electromotriz integrado.

Evaluación de autonomía del vehículo eléctrico convertido en vialidad plana

La autonomía se definió como la distancia total recorrida por el vehículo antes de requerir una recarga del banco de baterías. Para su determinación, se realizaron pruebas de conducción considerando la carga máxima permitida, correspondiente a cinco pasajeros con un peso promedio total de 350 kg, incluyendo al conductor. Las pruebas se ejecutaron a una velocidad promedio constante de 50 km/h, representativa de la circulación urbana.

En una primera serie de pruebas, el vehículo se desplazó sobre una vialidad predominantemente plana de 7.8 km de longitud (Avenida Central – Carlos Hank González), en la figura 9.2 se muestra el trazo del recorrido. Se realizaron recorridos de ida y vuelta durante cinco días consecutivos. Bajo estas condiciones y manteniendo el pedal del acelerador presionado de forma continua, se obtuvo una distancia total recorrida promedio de 62.5 km, con un nivel final de carga del banco de baterías entre 10 % y 20 %. Estos resultados permiten establecer una autonomía aproximada de 60 km en conducción urbana constante.

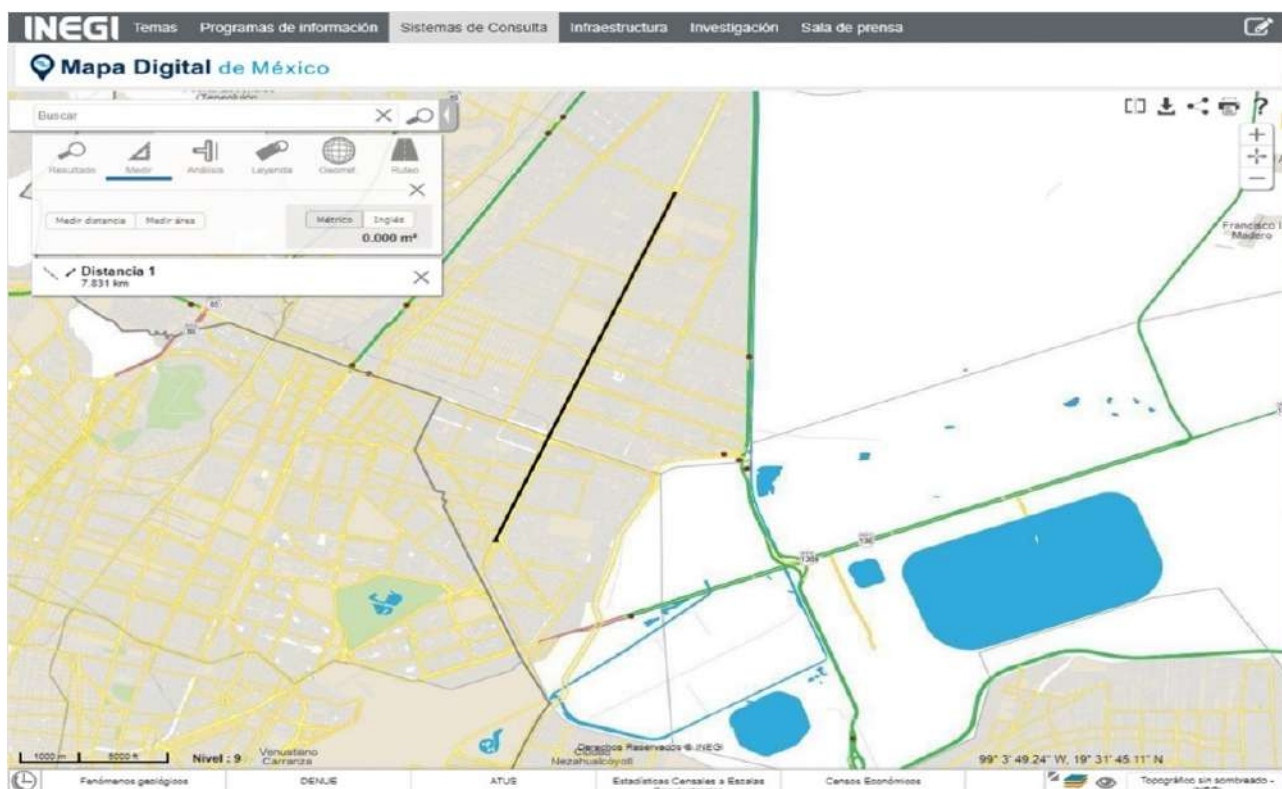


Figura 9.2: Recorrido en vialidad plana

Cuando se aplicó una estrategia de conducción orientada al aprovechamiento de la inercia —limitando el uso del acelerador únicamente para recuperar velocidad— la autonomía se incrementó de manera significativa. En este escenario, el vehículo alcanzó distancias promedio de 70.3 km, lo que representa un incremento de entre 8 y 10 km adicionales, sin comprometer la estabilidad ni el desempeño del sistema electromotriz.

Autonomía en vialidades con orografía mixta

La siguiente serie de pruebas se desarrolló en una ruta de orografía mixta, con una longitud aproximada de 15.78 km, que combina tramos planos, pendientes ascendentes y descensos pronunciados, correspondiente al trayecto entre Ciudad Azteca (Ecatepec de Morelos) y el estacionamiento de la Escuela Superior de Cómputo del IPN. En la figura 9.3 se muestra la vialidad mixta empleada. Estas pruebas se realizaron en días hábiles, bajo condiciones reales de tráfico.

Manteniendo el acelerador de forma constante, el vehículo logró recorrer en promedio 63.1 km, con un nivel final de carga entre 5 % y 10 %, evidenciando un mayor consumo energético debido a las pendientes de subida, las cuales presentan inclinaciones estimadas entre 10° y 15° en tramos de aproximadamente 1 km. Al aplicar nuevamente una conducción basada en la inercia del vehículo, la autonomía se incrementó hasta 71.0 km, aunque con un nivel de carga final más bajo, lo que implica un mayor riesgo operativo si no se planifica la recarga.

.En términos generales, los resultados obtenidos permiten establecer una autonomía promedio operativa de 65 km, suficiente para cubrir desplazamientos cotidianos urbanos, tales como traslados laborales, escolares y actividades básicas de la población usuaria.”

Análisis del consumo energético

El consumo energético del vehículo eléctrico convertido se comparó con el de un automóvil sedán de

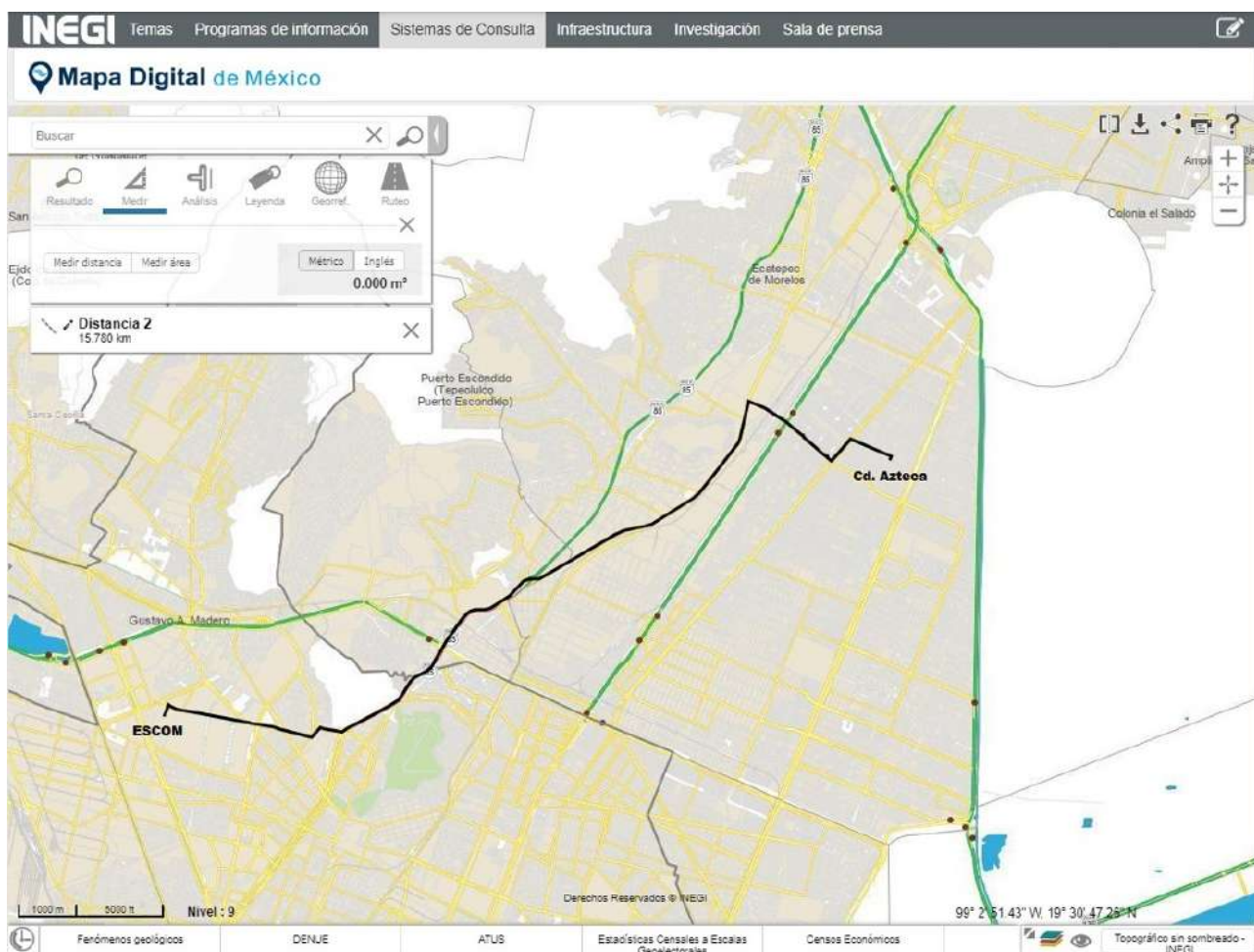


Figura 9.3: Recorrido en vialidad mixta



cuatro cilindros con motor de combustión interna y una motocicleta de 250 cc. Los tres vehículos recorrieron la misma distancia total de 63.12 km, bajo condiciones similares de velocidad promedio y tráfico urbano. En la tabla 9.5 se muestra la comparación realizada.

Los resultados muestran que el vehículo eléctrico consumió 9.90 kWh, con un costo aproximado de

Concepto	Moto 250 CC	Auto 4 CIL	Auto Eléctrico
Rendimiento de gasolina (Km/Lt)	24	14	—
Recorrido diario (Km)	65	65	65
Días de uso a la semana	7	7	7
Distancia recorrida por semana (Km)	455	455	455
Litros de gasolina consumidos por semana	18.96	32.50	—
Precio de gasolina por litro (premium)	\$24.98	\$24.98	—
Gasto semanal de gasolina (\$)	\$473.58	\$811.85	—
Precio kWh CFE (excedente)	—	—	\$3.115
Tiempo para cargar banco de batería (Hrs.)	—	—	10
Cantidad de kWh demandadas en carga	—	—	1.1
Gasto por carga completa del banco de batería (\$)	—	—	\$34.27
Gasto semanal CFE (\$)	—	—	\$239.86
Semanas al año	52	52	52
Gasto anual en gasolina o CFE (\$)	\$24,626.12	\$42,216.20	\$12,472.46

Tabla 9.5: Comparativo de gastos anuales entre distintos medios de transporte

\$30.84 MXN, considerando la tarifa eléctrica excedente de la Comisión Federal de Electricidad. En contraste, el automóvil de combustión interna presentó un gasto de \$105.60 MXN, mientras que la motocicleta registró un gasto de \$72.00 MXN. Estos datos evidencian que el costo energético del vehículo eléctrico representa aproximadamente una tercera parte del gasto del sedán y la mitad del gasto de la motocicleta, confirmando la eficiencia económica del sistema de propulsión eléctrica.

Evaluación del mantenimiento y operación

En lo que respecta al mantenimiento, los resultados indican que el vehículo convertido presenta costos prácticamente nulos en comparación con los automóviles de combustión interna. Mientras que los paquetes básicos de afinación para vehículos sedán oscilan entre \$1,850 y \$2,525 MXN, el sistema eléctrico elimina la necesidad de reemplazo de aceites, lubricantes, filtros y componentes sujetos a desgaste térmico.

Durante un periodo de operación continua desde enero de 2022, el vehículo eléctrico convertido acumuló un ahorro económico aproximado de \$18,000 MXN, sin registrar gastos significativos de mantenimiento correctivo o preventivo asociados al sistema electromotriz. Adicionalmente, el vehículo pudo circular sin restricciones durante contingencias ambientales, lo que constituye un beneficio operativo y social relevante.

Síntesis de resultados



Los resultados de las pruebas confirman que el proceso de retrofit desarrollado permite obtener un vehículo eléctrico funcional, confiable y eficiente desde el punto de vista energético y económico. La autonomía alcanzada, el bajo costo de operación y la reducción prácticamente total de emisiones contaminantes directas validan la viabilidad técnica del modelo propuesto, posicionando al retrofit como una alternativa realista y escalable para la transición hacia una movilidad sustentable en contextos urbanos.

Por último en la tabla 9.6 se muestra a manera de resumen la comparación entre vehículo de combustión y vehículo Retrofit (eléctrico).

Categoría	Vehículo de combustión interna (Gasolina)	Vehículo eléctrico Retrofit (Conversión)
Costo inicial	Compra de vehículo nuevo: \$350,000–\$600,000+	Conversión Retrofit: \$125,000–\$208,000 MXN
Combustible / Energía	Gasolina Premium o regular	Energía eléctrica (baterías)
Costo por km recorrido	Alto (gasto recurrente en gasolina)	Aproximadamente 50 % menos respecto a gasolina
Mantenimiento	Alto: cambios de aceite, filtros, bujías, sistema de escape, etc.	Bajo: no hay aceite, no hay sistema de escape ni piezas sometidas a altas temperaturas
Verificación vehicular	Obligatoria cada semestre (costo económico y trámite)	No requiere verificación al ser eléctrico
Restricciones vehiculares	Sujeto al programa Hoy No Circula	Libre circulación todos los días
Impacto ambiental	Emisiones de CO y NOx, contribuye al smog y calentamiento global	Cero emisiones en operación (motor eléctrico)
Ruido y vibraciones	Alto, depende del motor de combustión	Bajo, operación silenciosa y sin vibraciones
Vida útil del vehículo	Limitada por desgaste del motor	Prolongada al reemplazar el motor por uno eléctrico
Disponibilidad de partes	Alta, mercado convencional	Depende de kits y fabricantes especializados
Ventajas principales	Alto rendimiento en largas distancias, infraestructura existente	Ahorro económico, menor contaminación, mayor vida útil
Desventajas principales	Alto costo de operación y mantenimiento; emisiones	Requiere instalación y personal calificado; autonomía variable según baterías

Tabla 9.6: Comparativo de costos en menudeo y mayoreo para el proceso de Retrofit.

1. El vehículo de combustión tiene un costo operativo significativamente mayor y mayor impacto ambiental.
2. El Retrofit ofrece ahorro energético, reducciones de mantenimiento, cero emisiones y libre circulación, con un costo total inicial mucho menor que comprar un vehículo eléctrico nuevo.





CAPÍTULO 10

Impacto del Retrofit

La orientación de este proyecto, dirigido tanto a la población en general como a organizaciones privadas y públicas que operan flotillas de vehículos utilitarios, busca impulsar la adopción masiva del proceso de conversión a vehículos eléctricos —conocido como Retrofit. Al promover que un mayor número de automóviles utilicen energía eléctrica en lugar de combustibles fósiles, se contribuye directamente al cumplimiento de los compromisos adquiridos por nuestro país en el Acuerdo de París, particularmente en lo referente a la reducción de emisiones contaminantes.

La aplicación del retrofit ofrece beneficios significativos. En primer lugar, genera un impacto económico positivo para la mayoría de la población, ya que el costo de la energía eléctrica necesaria para operar un vehículo convertido es considerablemente menor que el gasto destinado a gasolina o diésel. A ello se suma la eliminación de los pagos asociados a la verificación vehicular semestral, un requisito impuesto exclusivamente a los vehículos de combustión interna.

Además, un vehículo eléctrico —incluidos aquellos convertidos mediante este proceso— goza de la posibilidad de circular todos los días del año, a cualquier hora, al estar exento de las restricciones del programa “Hoy No Circula”. Esto representa no solo un ahorro adicional, sino también una mayor libertad de movilidad para los usuarios.

En conjunto, estos beneficios económicos, ambientales y de operación convierten al retrofit en una alternativa accesible, sostenible y estratégica para acelerar la transición hacia una movilidad más limpia en México.

En las imágenes de las figuras 10.1, 10.2, 10.3 y 10.4 se muestra el vehículo al que le fue practicado el proceso de Retrofit.

En los códigos QR, se puede acceder a 2 vídeos que muestran el funcionamiento del vehículo al que le fue aplicado el proceso de Retrofit, además de impartir en cada uno de ellos una explicación del proceso realizado.

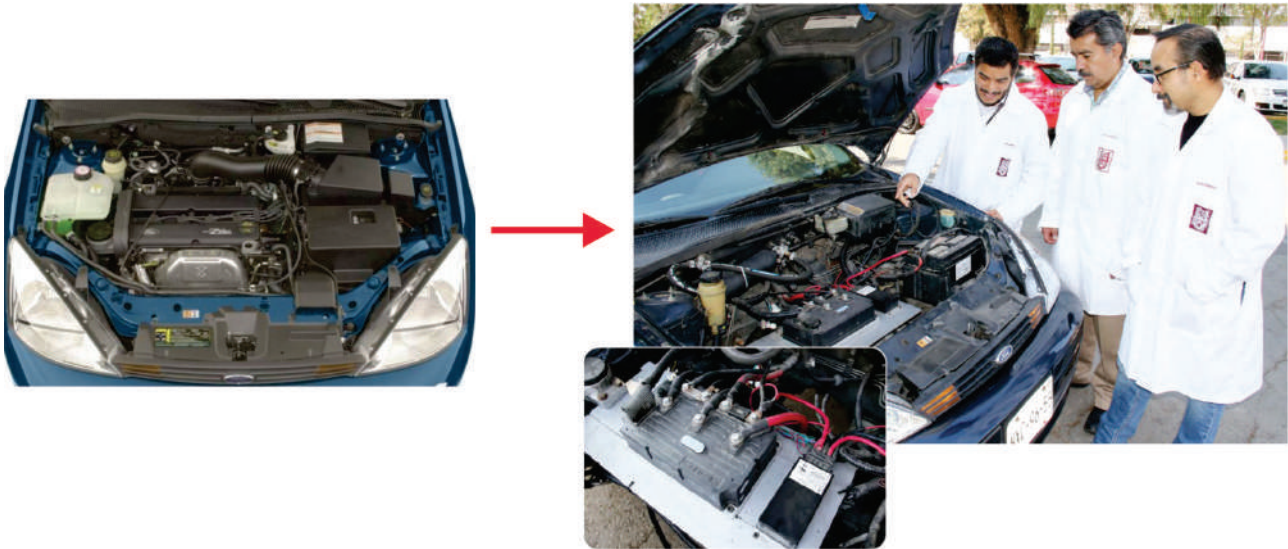


Figura 10.1: Imagen que muestra el motor a gasolina y el motor eléctrico después del Retrofit

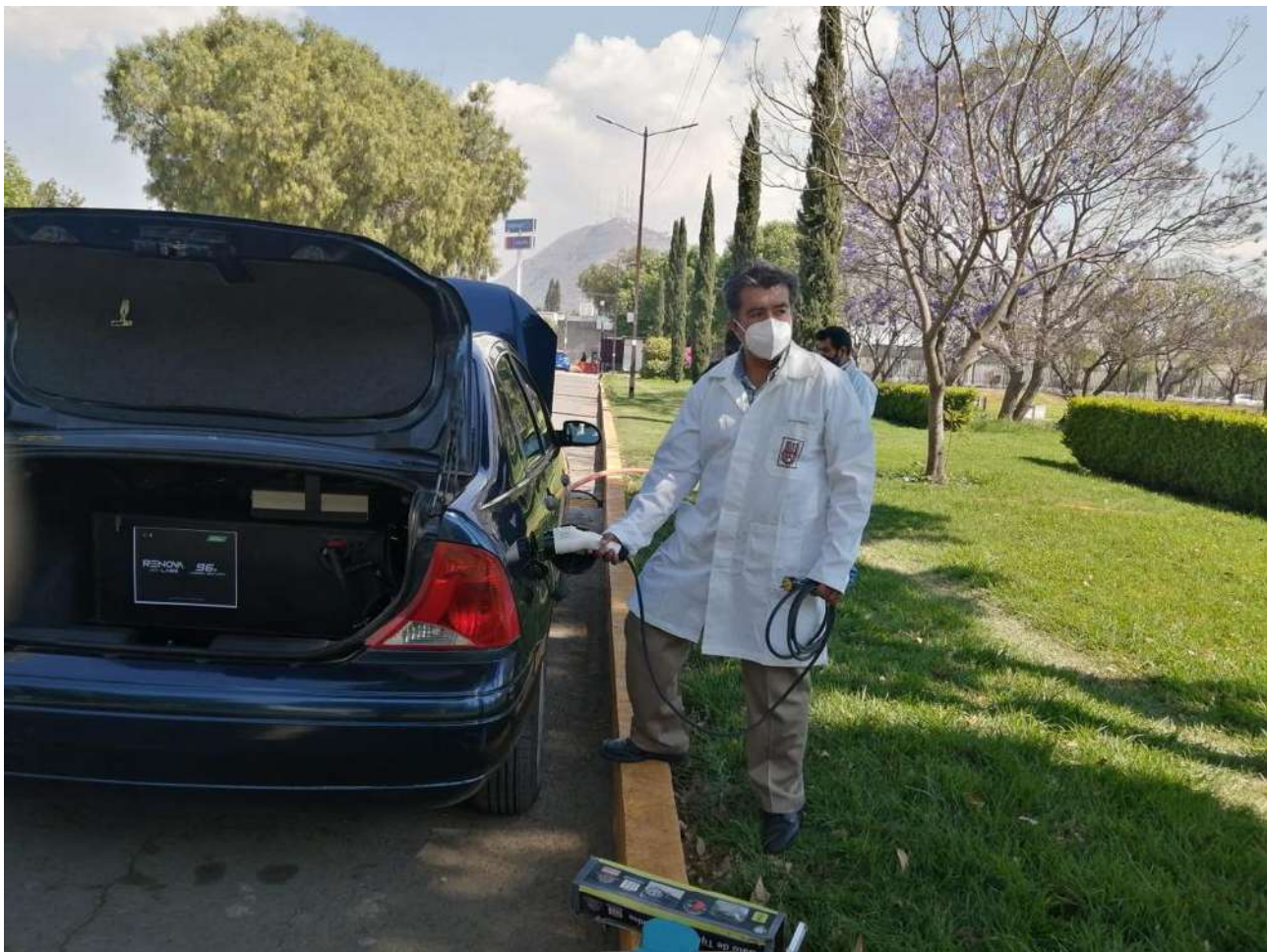


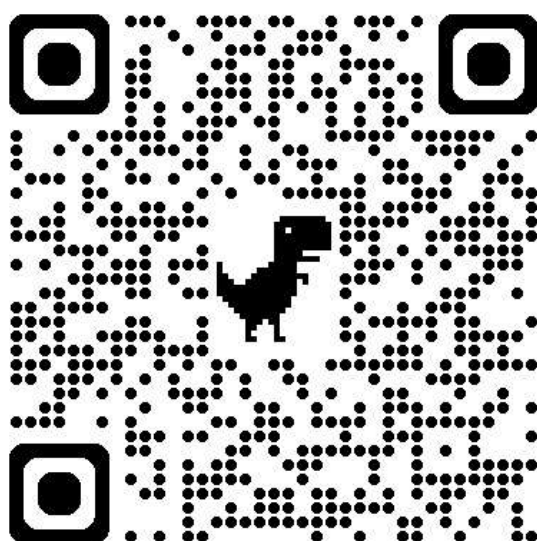
Figura 10.2: Vista del banco de baterías instalado en la cajuela



Figura 10.3: Vista del vehículo en estacionamiento de ESCOM



Figura 10.4: Vista del vehículo en marcha







CAPÍTULO 11

Conclusiones

Para evaluar la factibilidad de convertir un vehículo de gasolina a eléctrico, es necesario analizar tres aspectos fundamentales: la viabilidad económica, técnica y legal. Estos criterios permiten justificar de manera adecuada la inversión de recursos económicos, materiales y humanos involucrados en el proceso de conversión.

11.1 VIABILIDAD ECONÓMICA

Para determinar la viabilidad económica se consideran tres elementos principales. El primero consiste en comparar el suministro de energía que requiere un vehículo con motor de gasolina frente a uno con motor eléctrico. El segundo contempla la diferencia de costos entre adquirir un vehículo eléctrico nuevo y realizar la conversión de un automóvil de gasolina. El tercero se refiere a los gastos de mantenimiento de ambos tipos de vehículos.

En cuanto al consumo energético, se observó que un automóvil convertido a eléctrico, requiere aproximadamente la mitad del presupuesto destinado a combustible en comparación con un sedán de gasolina de características similares.

Respecto a la adquisición de un vehículo eléctrico nuevo, se identificó que el proceso de conversión puede representar un ahorro de al menos la mitad del costo total.

En cuanto al mantenimiento, un vehículo convertido a eléctrico no demanda los servicios exhaustivos asociados a los motores de combustión interna, ya que no es necesario reemplazar líquidos, lubricantes ni piezas sujetas a desgaste por altas temperaturas. El mantenimiento de suspensión, frenos y carrocería permanece igual al de cualquier vehículo, sea eléctrico o no.

11.2 VIABILIDAD TÉCNICA

Para evaluar la viabilidad técnica del proceso, se deben considerar los elementos esenciales que permiten el funcionamiento de un vehículo eléctrico: el motor eléctrico y el banco de baterías.

La selección del motor eléctrico debe hacerse tomando en cuenta el peso y tamaño del vehículo, con el fin de determinar la potencia (kW) necesaria. También es importante considerar la topografía de los



trayectos habituales, ya que no es lo mismo operar en caminos planos que en pendientes ascendentes, donde la demanda de energía es mayor. En descensos, por el contrario, el vehículo se beneficia de la acción de la gravedad, y si el motor cuenta con freno regenerativo, este puede convertir la inercia del movimiento en energía que se devuelve al banco de baterías.

En cuanto al banco de baterías, su elección determinará la autonomía del vehículo, es decir, la distancia que podrá recorrer antes de requerir una recarga. Existen diversos tipos de baterías según su composición química, y cada una presenta variaciones en costo, capacidad y rendimiento. En la actualidad, la tecnología disponible permite seleccionar el tipo de batería según las necesidades de autonomía y la velocidad máxima deseada.

11.3 VIABILIDAD LEGAL

Para evaluar la viabilidad legal del proceso, es necesario revisar los procedimientos que permiten que el vehículo convertido pueda circular de manera regular.

En primer lugar, el proceso de conversión no modifica el diseño original del chasis ni de la carrocería del vehículo, por lo que se preservan sus condiciones estructurales, de estabilidad y aerodinámicas.

Para que el automóvil pueda circular en México, es indispensable contar con la tarjeta de circulación, donde se valida la propiedad y la legalidad del vehículo. En este trámite también se registra que el automóvil funciona con motor eléctrico y no utiliza gasolina.

Respecto al programa “Hoy No Circula”, regulado por la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CA-Me), este establece los niveles máximos de emisiones permitidos para vehículos de combustión interna. En dicho programa se especifica claramente que: “Los hologramas 00 y 0 están exentos de las limitaciones establecidas en el programa, así como los vehículos eléctricos e híbridos.” Esto significa que un vehículo eléctrico, al ser de cero emisiones, está exento de las restricciones y puede circular diariamente, incluso durante contingencias ambientales.

11.4 REALIDAD EN MÉXICO

Cabe señalar que, para la realización del proceso de Retrofit, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de los distintos componentes requeridos dentro del territorio nacional. No obstante, el equipo de trabajo se enfrentó a una limitación significativa: en México, dichos elementos no se encuentran disponibles de manera sencilla. De hecho, aproximadamente el 90 % de los componentes necesarios son de procedencia extranjera.

En consecuencia, fue indispensable recurrir a importadores especializados, procurando en todo momento un equilibrio entre costo y calidad, criterio que se ve reflejado en los resultados expuestos en el Capítulo 7.

Derivado de esta situación, no fue posible realizar una comparación exhaustiva entre múltiples alternativas de componentes y sus características técnicas, ya que algunos costos superaban el presupuesto disponible para el proyecto. Aun así, se logró la selección de elementos con un nivel adecuado de calidad y a un costo competitivo, lo cual permitió llevar a cabo el análisis técnico correspondiente, también presentado en el Capítulo 7.



El presente estudio demuestra que es factible aplicar el proceso de Retrofit a vehículos con una antigüedad mínima de diez años. Al comparar esta alternativa con la adquisición de un vehículo nuevo, se evidencian ventajas relevantes, mismas que se sustentan en los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas y reportadas en este trabajo.

Finalmente, se concluye que el costo total del proceso de Retrofit puede reducirse de manera significativa para hacerlo más accesible a los potenciales interesados, especialmente si este tipo de conversiones se implementa a mayor escala. Lo anterior podría lograrse mediante la importación al mayoreo de los componentes requeridos o, de manera más deseable, **a través del diseño y la fabricación de dichas partes dentro del territorio nacional, lo que impulsaría el desarrollo tecnológico y productivo del país.**

11.5 CRÉDITOS

Este trabajo fue financiado por el Instituto Politécnico Nacional a través del siguiente proyecto de investigación:

- Proyecto extraordinario de la Red de Expertos en Innovación Automotoriz.

11.6 DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los editores declaran que no tienen intereses financieros en competencia ni relaciones personales o políticas que puedan haber influido en el trabajo presentado en este documento.

11.7 ¿CÓMO CITAR ESTE INFORME?

Cervantes de Anda, I., Verde Velázquez, E., Alcántara Méndez, A. J., Santillán Luna, R., Figueroa del Prado, F. de J., Red de Expertos en Innovación Automotriz. (2025). Guía Práctica de Retrofit para Autos de Combustión : Segunda vida útil para vehículos con 10 años o más. LANCEI : Laboratorio Nacional CONAHCYT En Electromovilidad Inteligente, 4(1). Recuperado a partir de <https://cv.cicataqro.ipn.mx/dsm/index.php/biocq/article/view/98>





Bibliografía

- [1] OMS. "Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud. Obtenido de Calidad del aire ambiente". En: *OMS* (2024). URL: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-%5C%28outdoor%5C%29-air-quality-and-health?>.
- [2] OMS. "Contaminación del aire: cómo abordar un factor crítico de la crisis mundial". En: *OMS* (2025). URL: <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/air-pollution--tackling-a-critical-driver-of-the-global-ncd-crisis?>.
- [3] Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). *Calidad del aire, el desafío de las grandes urbes*. Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018. URL: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/calidad-del-aire-el-desafio-de-las-grandes-urbes?>.
- [4] WHO. "Portal de datos sobre contaminación del aire". En: *WHO* (2025). URL: <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution?lang=en>.