



MINISTERIO DE
EDUCACIÓN



LED SERVICIO DE
LIECHTENSTEIN
PARA EL DESARROLLO

swisscontact



GUÍA TEMÁTICA MOVILIDAD ELÉCTRICA

Versión preliminar de trabajo



Formación en
competencias
verdes

Créditos

Esta publicación se realizó con el apoyo financiero del Servicio de Liechtenstein para el Desarrollo (LED), en el marco del proyecto **“Formación en competencias verdes”**, ejecutado por Swisscontact.

La guía temática es el resultado de un proceso colaborativo de construcción colectiva y validación técnico-pedagógica, que contó con la participación de:

- Directores Departamentales de Educación y Subdirectores de Educación Superior de Formación Profesional de Potosí, La Paz y Santa Cruz.
- Directivos y docentes de los Institutos Tecnológicos Nuevo Amanecer, Potosí, Santa Cruz, INFOCAL Santa Cruz, Ayacucho y Mejillones.
- Representantes de empresas verdes y enverdecidas del sector productivo nacional.
- Profesionales especialistas de cada área temática.

Su contribución garantizó que los contenidos respondan a los estándares pedagógicos de la formación técnica superior y a las demandas del mercado laboral en las áreas estratégicas de Movilidad Eléctrica, Energías Renovables y Gestión de Residuos Sólidos.

El contenido de esta publicación refleja las voces de los actores y destinatarios del proyecto y no compromete la opinión de LED.

Swisscontact

Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico

Calle 15 de Achumani, esquina Iriarte casa # 5

Tel. +591 (2) 2775566

La Paz - Bolivia

www.formaciontecnicabolivia.org

www.swisscontact.org

Facebook: Formación Técnica Profesional Bolivia

Año: 2026

Documento de trabajo del proyecto FCV, sujeto a actualizaciones durante su implementación. Su distribución y uso está restringida a docentes de los Institutos Técnicos, autoridades y técnicos participantes del proyecto, hasta la aprobación de su versión final

Versión preliminar



Versión preliminar de trabajo

CONTENIDO

1. Presentación	3
2. Contextualización - Movilidad eléctrica	4
2.1 Orientación al cumplimiento de los ODS Y PDES	4
2.2 Marco normativo e incentivos	7
2.3 Industrialización y el litio	9
2.4 Diagnóstico del sector	9
2.5 Brecha de servicio técnico (el “cuello de botella”)	12
3. Lineamientos para el uso de la guía temática	13
4. Competencias verdes en la formación técnica-tecnológica para la movilidad eléctrica	16
4.1 Matriz base de competencias del área estratégica de movilidad eléctrica	16
4.2 Matriz competencias específicas por carrera	21
5. Unidades temáticas y resultados de aprendizaje	24
6. Contenidos	31
Unidad temática 1. Industria, empleo y medio ambiente	31
Unidad temática 2. Introducción a los vehículos híbridos y eléctricos	39
Unidad temática 3. Equipos de protección personal en vehículos eléctricos	59
Unidad temática 4. Verificación de fallas de aislamiento	73
Unidad temática 5. Baterías de litio	83
Unidad temática 6. Motores de imanes permanentes	93
Unidad temática 7. Transmisiones en vehículos híbridos	105
Unidad temática 8. Refrigerantes para vehículos híbridos y eléctricos	121
Unidad temática 9. Introducción al ciclo Atkinson	127
Unidad temática 10. Componentes de la electrónica de potencia	139
Unidad temática 11. Inversores para vehículos HEV y EV	193
Unidad temática 12. Estaciones de carga para vehículos eléctricos	203
Unidad temática 13. Estudio conector IEC 62196	213
Unidad temática 14. Puesta a tierra de estaciones de carga para vehículos eléctricos	221
Unidad temática 15. Mantenimiento de estaciones de carga	233
7. Estrategias metodológicas generales	243
7.1 Aprendizaje basado en problemas (ABP)	243
7.2 Estudio de caso	244

7.3 Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) -----	245
7.4 Aprendizaje colaborativo -----	246
7.5 Registro técnico (bitácora) -----	247
8. Criterios de evaluación -----	249
9. Infraestructura y equipamiento -----	252
10. Plan de clase -----	254
11. Bibliografía -----	256
12. Anexos-----	259
Anexo 1. Unidad temática 2 -----	259
Anexo 2. Unidad temática 3-----	261
Anexo 3. Unidad temática 4 -----	263
Anexo 4. Unidad temática 5 -----	265
Anexo 5. Unidad temática 6 -----	267
Anexo 6. Unidad temática 7 -----	269
Anexo 7. Unidad temática 8 -----	270
Anexo 8. Unidad temática 9 -----	272
Anexo 9. Unidad temática 10 -----	274
Anexo 10. Unidad temática 11 -----	276
Anexo 11. Unidad temática 12 -----	279
Anexo 12. Unidad temática 13-----	282
Anexo 13. Unidad temática 14 -----	284
Anexo 14. Unidad temática 15 -----	286

Los desafíos ambientales de hoy exigen una sociedad responsable del consumismo, conscientes del daño ambiental que genera y su incidencia en el cambio climático, y por lo tanto comprometidos en el desarrollo de actividades dirigidas a reducir el impacto ambiental y el uso eficiente de recursos, así como ser partícipes del diseño e implementación de soluciones sostenibles.

El desarrollo industrial trajo consigo una mejora en la calidad de vida, a través del crecimiento económico, la diversificación del empleo y la innovación e investigación tecnológica, brindando también bienestar y confortabilidad en la sociedad. No obstante, también trajo consigo efectos negativos, como la pérdida de la biodiversidad por la deforestación y destrucción de hábitats naturales, la contaminación del aire y del agua y el agotamiento de los recursos naturales, entre otros. Estos efectos negativos, como los del efecto invernadero por CO₂, fueron previstos desde mediados del siglo pasado, generando una necesidad urgente de revertir o disminuir este daño ambiental. Es una demanda actual cada día más creciente por parte de la sociedad civil, llevando así al compromiso de los diferentes Estados a desarrollar e implementar políticas efectivas para incentivar las industrias limpias, los negocios verdes, la transición energética a fuentes de energía renovable y su uso eficiente, la gestión de residuos, la economía circular y otros.

El resguardo del medio ambiente, sin interrumpir el desarrollo industrial y crecimiento económico, implica, como se expuso desde un inicio, un cambio conductual de toda la sociedad para la disminución de sus efectos y el deterioro ambiental. La formación de competencias verdes tiene como finalidad integrar la sostenibilidad en cada actividad profesional, para actuar con responsabilidad ecológica. Las competencias verdes son transversales a todos los sectores profesionales, por lo que dichos conocimientos, habilidades y actitudes son contempladas en el perfil profesional que las empresas e industrias de todo rubro requieren, poco a poco, con mayor interés y preferencia.

La formación técnica y tecnológica, en el marco del Proyecto FCV, integra competencias verdes con base en tres áreas estratégicas priorizadas: movilidad eléctrica, energías renovables y residuos sólidos, para lo cual se actualizaron los planes y programas bajo un enfoque de competencias verdes. La presente Guía Temática de Movilidad Eléctrica es una herramienta para las y los docentes del área tecnológica de los institutos técnicos y tecnológicos, que tiene como propósito principal guiar en el proceso de formación y desarrollo de competencias verdes a partir de temáticas priorizadas en el área estratégica, articulando los diferentes elementos curriculares.

Contextualización - Movilidad eléctrica

2.1 Orientación al cumplimiento de los ODS Y PDES

Contextualizar la creciente demanda de movilidades eléctricas en nuestro país requiere tener claridad respecto a los lineamientos de desarrollo que se están aplicando en nuestro planeta. Para ello partimos de lo establecido en los convenios y normas internacionales que son asumidas por Bolivia, al ser miembro de pleno derecho de las Naciones Unidas. El año 2015 la ONU estableció un programa amplio para mejorar la situación socioeconómica, cultural y política de los pueblos, estrategia planteada a través de la delimitación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la Agenda 2030, que incluye una estrategia conjunta entre el sector empresarial y productivo, las políticas públicas, la legislación y el enfoque cultural y educativo, para garantizar su cumplimiento.

De los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos a continuación, identificamos aquellos vinculados al área estratégica de movilidad eléctrica:

4. Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos.

5. Lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y las niñas.

7. Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.

8. Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.

9. Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.

11. Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.

13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos

Las metas específicas por ODS relacionadas al área estratégica de movilidad eléctrica son las siguientes:

Cuadro: Objetivos de Desarrollo Sostenible vinculados al área de movilidad eléctrica

N° ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible	Metas específicas vinculadas a residuos sólidos
	Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades	4.7. Al año 2030, asegurar que todos los estudiantes adquieran los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover el desarrollo sostenible, entre otras cosas mediante la educación para el desarrollo sostenible y los estilos de vida sostenibles, los derechos humanos, la igualdad de género, la promoción de una cultura de paz y no violencia, la ciudadanía mundial y la valoración de la diversidad cultural y la contribución de la cultura al desarrollo sostenible.
	Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos	5.5 Asegurar la participación plena y efectiva de las mujeres y la igualdad de oportunidades de liderazgo a todos los niveles decisorios en la vida política, económica y pública. 5.c Aprobar y fortalecer políticas acertadas y leyes aplicables para promover la igualdad de género y el empoderamiento de todas las mujeres y las niñas a todos los niveles.
	Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos	7.1. De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.
	Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos	8.3 Promover políticas orientadas al desarrollo que apoyen las actividades productivas, la creación de puestos de trabajo decentes, el emprendimiento, la creatividad y la innovación, y fomentar la formalización y el crecimiento de las microempresas y las pequeñas y medianas empresas, incluso mediante el acceso a servicios financieros.
	Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación	9.4. De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas.
	Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles	11.2 De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad.
	Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos	13.3 Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático.

Fuente: Extraído de la página web de las Naciones Unidas y de la Resolución 70/1 de la Asamblea General titulada "Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible".

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible-ODS se plasman también en el Plan de Desarrollo Económico y Social- PDES 2021-2025, denominado *"Reconstruyendo la economía para Vivir Bien, hacia la industrialización con sustitución de importaciones"*, planificación a mediano plazo, el cual será modificado y ajustado por el órgano rector conforme las metas alcanzadas, en la presente gestión. En el siguiente cuadro se muestran las metas planteadas por cada eje estratégico, relacionadas al área estratégica de movilidad eléctrica:

Cuadro: Ejes estratégicos del PDES vinculados al área de movilidad eléctrica

N° Eje	Eje estratégico	Lineamientos de política (metas)	Resultados	Acciones
1	Reconstruyendo la economía, retomando la estabilidad macroeconómica y social	1.4. Implementar programas de empleo y diseñar mecanismos que promuevan el empleo formal y reduzcan las brechas de género en el empleo.	1.4.1. Se han promovido programas para mejorar las condiciones de los hogares a través de la generación de empleo digno, priorizando sectores en situación de vulnerabilidad.	1.4.1.3. Implementar políticas públicas que fomenten y promuevan la generación de empleo y autoempleo, a través del fortalecimiento económico y técnico de las cooperativas.
4	Profundización del proceso de industrialización de los recursos naturales	4.3. Diversificar la matriz energética hacia la consolidación de fuentes de energía renovables y sustentables, generando excedentes para las exportaciones.	4.3.1. Se cuenta con una mayor participación de energías renovables en la demanda de energía eléctrica.	4.3.1.1. Desarrollar infraestructura de generación de energía eléctrica de fuentes alternativas y renovables para disminuir el uso de combustibles fósiles.
5	Eje educación, investigación, ciencia y tecnología para el fortalecimiento y desarrollo de capacidades y potencialidades productivas	5.2. Articular y promover la educación especializada, la investigación y la innovación tecnológica, para fortalecer las capacidades y potencialidades productivas, con enfoque de identidad y promoción del consumo de la producción nacional.	5.2.1 Se ha desarrollado una educación técnica, tecnológica, productiva y científica, articulada al desarrollo productivo y tecnológico, para la sustitución de importaciones y el respeto a la madre tierra.	5.2.1.1 Integrar la educación y formación técnica, tecnológica y científica con el sector productivo y la industrialización con sustitución de importaciones.

Fuente: Extraído del Plan de Desarrollo Económico Social 2021-2025, Ministerio de Planificación del Desarrollo

De acuerdo al cuadro precedente, la vinculación con el área de movilidad eléctrica no es directa. No obstante, a través de las diferentes metas que responden a las problemáticas y necesidades del país, se evidencian lineamientos para la incorporación de la innovación tecnológica, la mejora de la empleabilidad y una transición energética a fuentes de energía renovables, las cuales deben implementarse en el ámbito educativo y en adelante en el perfil profesional de los egresados de la formación superior técnica y tecnológica, como competencias profesionales.

La movilidad eléctrica en Bolivia ha dejado de ser una proyección a futuro para convertirse en una prioridad estratégica del Estado y una necesidad del mercado automotriz actual. Los puntos considerados a continuación, parte de la contextualización de la movilidad eléctrica en nuestro país, nos mostrarán cómo la política pública, la inversión privada y la legislación actual se alinean para dar paso a la incorporación de nuevas formas de transporte asequible y sostenible, con protección del medio ambiente.

2.2 MARCO NORMATIVO E INCENTIVOS

El Estado Plurinacional de Bolivia ha establecido un ecosistema legal diseñado para acelerar la transición energética. Los pilares normativos que sustentan esta actualización son:

A. Decreto Supremo No 4539 (07 de julio de 2021)

Es la norma matriz de la electromovilidad en el país. Su objetivo es incentivar el uso de energía eléctrica para mejorar el medio ambiente y la eficiencia energética. Sus puntos clave para la educación técnica son:

- **Incentivos arancelarios:** establece una alícuota del 0% para el Gravamen Arancelario (GA) y del 0% para el Impuesto a los Consumos Específicos (ICE) en la importación de vehículos eléctricos (vigente inicialmente hasta 2026).
- **Incentivos financieros:** obliga a las entidades financieras a crear productos de crédito con tasas preferenciales para la adquisición y comercialización de vehículos eléctricos e híbridos, así como para maquinaria agrícola eléctrica.
- **Infraestructura de carga (electrolíneas):** permite que empresas públicas y privadas instalen sistemas de recarga, lo que genera una nueva veta laboral para los técnicos en instalación y mantenimiento de puntos de carga rápida y semirápida.

Figura 1. Incentivos tributarios (AETN, 2022)

Mercaderías	Incentivo	GA	ICE
Motores eléctricos, sistemas telemáticos y controladores telemáticos que son aparatos de emisión, transmisión, recepción y almacenamiento de datos.	Las alícuotas del GA son modificadas para incentivar el ensamblaje de vehículos eléctricos.	El GA es 0%.	
Vehículos automotores eléctricos e híbridos como: tractores, motocicletas, bicicletas, automóviles para transporte de personas, de mercancías y de usos especiales como, por ejemplo, coches para reparaciones, grúas, camiones de bomberos, coches de limpieza, entre otros.	Las alícuotas del GA y del ICE son modificadas para incentivar su importación, excepto las similares a los autos Quantum, que deben pagar el 10% del GA.	El GA es 0% para la mayoría de los vehículos eléctricos e híbridos.	El ICE para vehículos eléctricos es 0% en la mayoría de los casos. Si se trata de vehículos híbridos puede variar, dependiendo de los años de antigüedad, entre el 0% hasta el 35%.
La maquinaria agrícola eléctrica, entre ellas: máquinas y aparatos de cosechar, máquinas y aparatos de trillar, máquinas para ordeñar y máquinas y aparatos para la industria lechera, entre otros.	Las alícuotas del GA son modificadas.	El GA es 0%.	

B. Decreto Supremo N° 5142 (10 de abril de 2024)

Esta normativa reciente profundiza los incentivos para la diversificación de la matriz energética:

- Vehículos híbridos y Flex Fuel, introduce incentivos para vehículos con tecnología Flex Fuel y mejora el tratamiento tributario para híbridos autorrecargables (HEV) y enchufables (PHEV), reduciendo el GA (del 10% al 5%) y el ICE (del 5% al 3%). Esto obliga a que el técnico boliviano deba conocer no solo motores eléctricos puros, sino también sistemas complejos de gestión combinada (combustión + electricidad).

C. Regulaciones de la AETN (Autoridad de Electricidad y Tecnología Nuclear)

A través de resoluciones como la AETN N° 479/2021 se han aprobado reglamentos técnicos y de seguridad para las instalaciones de recarga.

Impacto curricular: los institutos técnicos deben ahora formar a sus estudiantes bajo estas normas de seguridad, que incluyen protocolos para evitar riesgos eléctricos de alta tensión, fundamentales para obtener certificaciones laborales en el sector.

Figura 2. Normas vigentes en Bolivia (AETN, 2022)

Resolución	Objeto y ámbito de aplicación
AETN N° 473/2021 6 de septiembre de 2021	Tiene por objeto establecer los requisitos y el procedimiento para el Otorgamiento de Autorizaciones de Comercialización de energía eléctrica en electrolinerías, establecer los derechos y obligaciones, así como el régimen sancionatorio. Se aplica a empresas distribuidoras de electricidad, empresas privadas legalmente constituidas en el país interesadas en desarrollar y realizar actividades de comercialización en electrolinerías y usuarios finales del servicio de recarga eléctrica.
AETN N° 479/2021 6 de septiembre de 2021	El objeto de esta resolución es establecer los requisitos técnicos y de seguridad mínimos que deben cumplir las instalaciones de consumo de energía eléctrica destinadas a la recarga de vehículos eléctricos, ubicadas en lugares públicos y privados. Se aplica a la infraestructura de las instalaciones destinadas a la recarga de vehículos eléctricos en los siguientes tipos: a) Individuales o Particulares (viviendas, oficinas, talleres). b) Edificios o Multifamiliares. c) Autoservicio con Acceso al Público. d) Instalaciones en Electrolinerías. e) Instalaciones en Electroterminales y centros de carga para transporte público.
AETN N° 480/2021 6 de septiembre de 2021	Tiene por objeto establecer las Tarifas Transitorias para los usuarios que implementen electrolinerías de servicio público y los Precios Máximos de Comercialización aplicables por las Electrolinerías de servicio público a los vehículos eléctricos identificados como usuarios finales. Se aplica a todas las empresas distribuidoras de energía eléctrica, operadores eléctricos y los usuarios regulados que instalen electrolinerías de servicio público y estaciones de carga para autoservicio con acceso al público.

2.3 INDUSTRIALIZACIÓN Y EL LITIO

El diagnóstico identifica que Bolivia posee las mayores reservas de litio certificadas del mundo (23 millones de toneladas métricas). Sin embargo, el desafío actual ha pasado de la simple extracción a la industrialización soberana, lo que genera una demanda sin precedentes de perfiles técnicos especializados.

A. De la extracción a la fabricación (YLB y plantas piloto)

El Estado, a través de Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB), ha consolidado el Centro de Investigación, Desarrollo y Pilotaje (CIDYP) en La Palca, Potosí. En este centro ya se fabrican prototipos de baterías de ion-litio con tecnología boliviana para:

- Vehículos eléctricos (como los autos solares y turísticos de la UPEA).
- Bicicletas eléctricas y sistemas de almacenamiento estacionario.

B. Implementación de tecnología EDL (Extracción Directa de Litio)

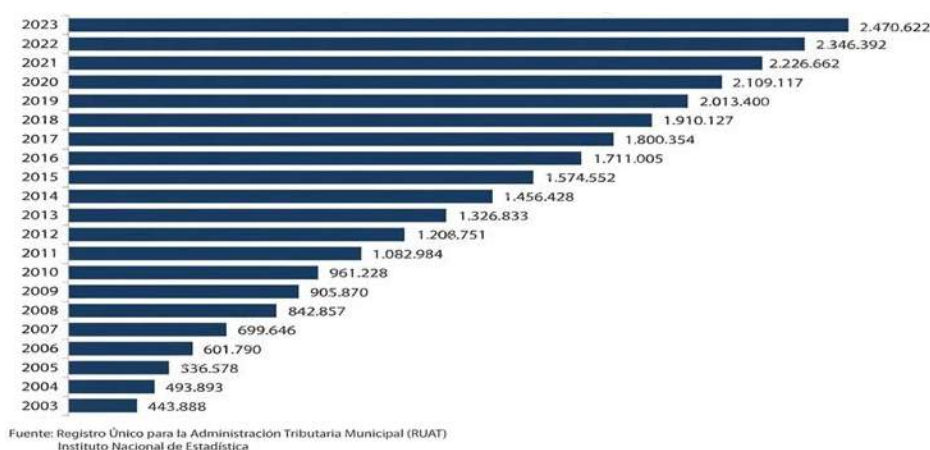
Con la reciente firma de convenios para implementar tecnología EDL se proyecta una producción a escala industrial para el periodo 2025-2026. Esto implica:

- La construcción de plantas industriales que requerirán miles de operarios y técnicos en automatización, control de procesos químicos y mantenimiento de equipos de alta precisión.
- La necesidad de currículos que integren la seguridad química y ambiental, ya que la industrialización del litio exige estándares de sostenibilidad hídrica y manejo de residuos.

2.4 DIAGNÓSTICO DEL SECTOR

El diagnóstico del sector automotriz en Bolivia revela un cambio de paradigma acelerado. Mientras que el parque automotor general crece a un ritmo promedio del 4.5% anual, el segmento de vehículos eléctricos ha experimentado un crecimiento disruptivo en el último trienio.

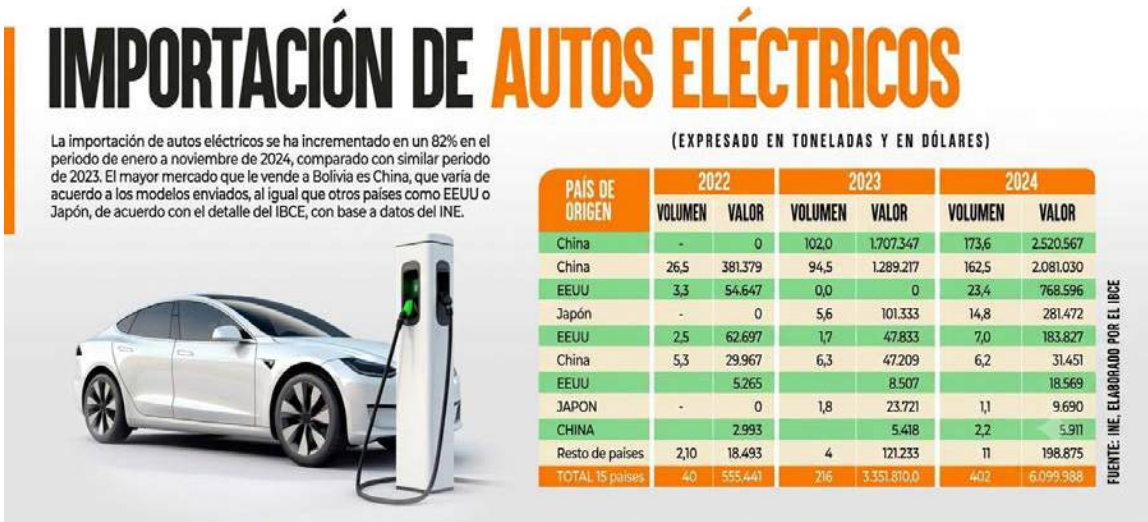
Figura 3. Crecimiento del parque automotor (GDS, 2024)



A. Estadísticas de importación y mercado (Datos 2023-2025)

Según datos procesados por el Instituto Boliviano de Comercio Exterior (IBCE) y el INE, la adopción de tecnología eléctrica muestra cifras récord:

Figura 4. Importación de autos eléctricos (Mamani, 2025).



- **Crecimiento en valor:** Entre 2022 y finales de 2025, el valor de las importaciones de vehículos eléctricos en Bolivia creció un 806%.
- **Volumen de unidades:** De apenas unos pocos cientos de unidades en 2020, se estima que para el inicio de 2026 circulan en el país más de 7,500 vehículos eléctricos e híbridos. Solo entre junio de 2024 y junio de 2025, el parque eléctrico saltó de 250 a cerca de 7,000 unidades, impulsado por la escasez de combustibles tradicionales y la guerra de precios en el mercado asiático.
- **Dominio del mercado:** China se ha consolidado como el principal proveedor, con marcas como BYD, que aumentó sus ventas en un 160% recientemente.

B. Factores críticos del diagnóstico actual

- **Crisis de hidrocarburos como catalizador:** la irregularidad en la oferta de gasolina y diésel ha desplazado la preferencia del consumidor hacia la movilidad eléctrica. Un vehículo eléctrico representa un ahorro operativo de hasta el 80% en comparación con uno de combustión en el contexto boliviano.
- **Concentración urbana:** el 80% del parque automotor se concentra en el eje troncal (36% en Santa Cruz, 22% en La Paz y 21% en Cochabamba). Es en estas ciudades donde la demanda de centros de servicio técnico especializado es más crítica y donde los institutos técnicos y tecnológicos deben responder con mayor rapidez.

C. Principales importadoras de vehículos en Bolivia

Bolivia cuenta con diversas empresas importadoras de vehículos encargadas de comercializar en el mercado nacional las marcas más reconocidas del sector automotriz.

Tabla 1. Principales empresas importadoras de vehículos en Bolivia (Alvatronics, 2026)

IMPORTADORA	MARCAS
A. HANSA	Volkswagen Audi Man Facchinn
B. SACI	En 1947 adoptó su actual nombre SACI. Importa y comercializa múltiples marcas para vehículos de pasajeros, así como camiones pesados y livianos, y vehículos utilitarios.
C. ASTARA – OVANDO	Mercedes Benz Dodge Fuso Ram Jeep Mitsubishi Motors Fiat
D. TOYOSA	Toyota Hino Lexus Volvo Kubota Yamaha Grúas Unic Bridgestone (neumáticos) Lubricantes Repsol
E. IMCRUZ	Suzuki Chevrolet Joylong Mazda Changan Renault Jac
F. NIBOL	Nissan Volvo John Deere (maquinaria agrícola) Mack (camiones) UD Tracks (camiones)
G. CHRISTIAN AUTOMOTORS	Ford
H. AUTOSUD	Kia Motors Morris Garages Zotye ZX Auto Kenbo Yuejin Waw KYC Hyundai (camiones & buses)

2.5 BRECHA DE SERVICIO TÉCNICO (EL “CUELLO DE BOTELLA”)

El diagnóstico identifica que la velocidad de adopción tecnológica ha superado la capacidad de respuesta de los centros de formación actuales. Esta brecha se manifiesta en cuatro dimensiones críticas:

A. Déficit de especialistas en Sistemas de Alta Tensión (HV)

La mecánica tradicional en Bolivia opera mayoritariamente con sistemas de 12V o 24V. Los vehículos eléctricos e híbridos operan con rangos que van desde los 300V hasta los 800V.

- El problema: el personal técnico actual carece de certificación en seguridad eléctrica y manejo de Equipos de Protección Personal (EPP) específicos para Clase 0 (hasta 1000V).
- Consecuencia: un alto riesgo de arco eléctrico y electrocución en los talleres informales, además del peligro de incendios por manipulación incorrecta de conectores de potencia.

B. Inexistencia de infraestructura de diagnóstico electrónico

El mecánico de herramientas básicas es insuficiente para la electromovilidad. El diagnóstico revela que:

- Escáneres y software: menos del 2% de los talleres independientes poseen escáneres con protocolos de comunicación para vehículos eléctricos (como el protocolo CAN BUS específico para EV o DoIP).
- Herramientas aisladas: existe una carencia de herramientas manuales con aislamiento certificado (VDE) en los laboratorios de los institutos, lo que impide la enseñanza práctica real.

C. Gestión del ciclo de vida de las baterías (BMS y reciclaje)

El diagnóstico muestra que el técnico boliviano promedio no sabe diagnosticar una batería a nivel de celda.

- El “cuello de botella”: ante una falla en el paquete de baterías, la solución actual en Bolivia suele ser el cambio total (extremadamente caro) o el abandono del vehículo.
- La necesidad: se requieren técnicos que dominen el BMS (Battery Management System) para balancear celdas, realizar pruebas de estado de salud (SOH) y, eventualmente, dar una “segunda vida” a las baterías para almacenamiento solar, algo vital para la economía circular en Bolivia.

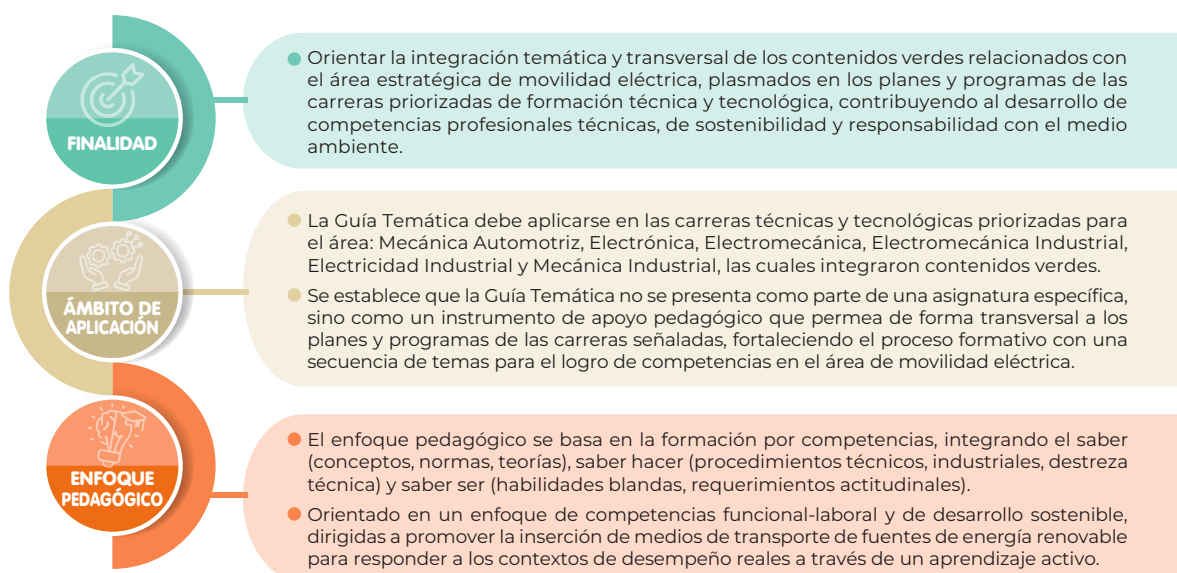
Lineamientos para el uso de la guía temática

La incorporación de competencias verdes en la formación técnica y tecnológica en Bolivia responde a la necesidad de formar profesionales capaces de coadyuvar activamente en la transición hacia una economía sostenible a través de una educación que desarrolle una sensibilización climática y habilidades pertinentes, planteada en:

- La Agenda 2030 y Objetivos de Desarrollo Sostenible-ODS; el ODS 4.7 requiere que los Estados fomenten y garanticen que los estudiantes adquieran conocimientos y habilidades de desarrollo sostenible, entre otros, el ODS y 13.3. Educación dirigida a la mitigación del cambio climático, la adaptación al mismo y la reducción de sus efectos. Son expuestos a detalle en el acápite de contextualización.
- EL Acuerdo de París (Art. 12), en cuanto a la Acción para el Empoderamiento Climático, ACE.
- Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), referido a la integración de educación ambiental.

Dichos acuerdos internacionales y otros, en los que Bolivia asume compromiso, promueven que los Estados parte asuman acciones para la promoción e integración de conocimientos teóricos y prácticos en los planes de estudio de educación superior para la educación ambiental.

En ese marco, Swisscontact propone la integración de contenidos verdes en los 12 planes y programas de formación superior técnica y tecnológica. Asimismo, se elabora la presente Guía Temática como herramienta de consulta académica por el personal docente de los institutos técnicos y tecnológicos, documento que tiene las siguientes características:



En ese marco, a continuación se establecen algunos criterios para la incorporación de las unidades temáticas y contenidos propuestos en la presente Guía Temática del área de movilidad eléctrica:

- Se establece que las unidades temáticas presentes en la Guía se encuentran desarrolladas como contenidos (programáticos y analíticos) en los planes y programas de las carreras priorizadas para el área de movilidad eléctrica, seleccionados conforme la naturaleza de la carrera; no obstante, en este documento se presenta un orden lógico conforme a las competencias profesionales que se desean alcanzar.
- La selección de las unidades temáticas que componen la Guía, que se elegirán para el desarrollo en el aula, taller o laboratorio, deberá realizarse de acuerdo a la naturaleza de la asignatura en la que se aplicará y conforme a los contenidos mínimos de la misma, demostrando pertinencia técnica y académica.
- Los contenidos descritos deben adecuarse a la profundidad requerida por el año o semestre de formación de la carrera respectiva, siendo que el aprendizaje es gradual y progresivo.
- Las unidades temáticas presentes deben tener un nivel de vinculación directa o indirecta con la asignatura priorizada. Asimismo, deberán ser contextualizadas a las características institucionales del instituto técnico y tecnológico, en cuanto a equipamiento, infraestructura y otros aspectos requeridos para una enseñanza de calidad; así como a las normativas locales y políticas de sostenibilidad planteadas por el ITT.
- Los contenidos de la Guía Temática deben ser actualizados de forma periódica en base a los cambios normativos, avances tecnológicos y las buenas prácticas del instituto técnico y tecnológico.
- La evaluación de los aprendizajes debe basarse en evidencias de desempeño (informes, prácticas, proyectos y otros) considerando el manejo del procedimiento técnico, cumplimiento de especificaciones técnicas, principios de sostenibilidad y otros.
- Las asignaturas de **Emprendimiento Productivo** y **Taller de Modalidad de Graduación**, presentes en todas las carreras, no tienen un contenido específico propuesto en la presente Guía; no obstante, es el espacio articulador de conocimientos, habilidades y actitudes desarrollados, por lo que las mismas deben orientar en su práctica la temática de movilidad eléctrica, gestión de residuos sólidos y energías renovables, como elementos básicos para un desarrollo sostenible y protección ambiental.

En ese entendido, la Guía Temática debe ser utilizada como un referente para la ampliación de contenidos mínimos, no siendo su uso limitativo o exclusivo; asimismo, se la presenta para su uso con un criterio transversal aplicado en aulas teóricas, talleres, laboratorios u otros, constituyéndose así en un insumo base para el diseño o planificación de la clase.

Con la finalidad de un uso adecuado del mismo, se presenta a continuación un cuadro en detalle de los roles y responsabilidades que deben asumir los actores educativos para el desarrollo del área estratégica de movilidad eléctrica a partir de la presente Guía Temática:

Roles y responsabilidades para el uso de la guía temática	
Actores educativos	Roles y responsabilidades
Instituto técnico tecnológico	Realizar seguimiento a la incorporación de los planes y programas que integran los contenidos verdes. Promover el uso de la Guía Temática como una herramienta de mejora curricular para el personal docente. Facilitar y gestionar condiciones adecuadas para la aplicación plena de los contenidos verdes.
Docentes	Seleccionar, adaptar y contextualizar los contenidos de la Guía Temática según la naturaleza de la asignatura. Integrar actividades prácticas relacionadas al área estratégica. Evaluar los aprendizajes tomando en cuenta los criterios técnicos, normativos y ambientales.
Estudiantes*	Aplicar los conocimientos y habilidades en los contextos académicos y productivos, demostrando una actitud crítica y comprometida con el cuidado ambiental. Realizar el uso de adecuado de las EPP´s en resguardo de la integridad personal y del entorno, desarrollando los procesos conforme a normativa específica.

**Estudiantes: Si bien la Guía Temática es una herramienta para el uso docente, los mismos, deben promover el cumplimiento de los roles y responsabilidades señaladas por parte de sus estudiantes.*

Competencias verdes en la formación técnica-tecnológica para la movilidad eléctrica

La creciente demanda de recursos naturales dirigida a mantener el estilo de vida actual en la población y la capacidad del planeta tierra para asimilar los desechos que ésta genera, han provocado una crisis ambiental a escala global, lo que ha llevado a que la movilidad eléctrica sea un eje central para el desarrollo sostenible, una transición justa y una oportunidad real de la generación de empleos verdes, a través de un esquema de economía circular. En Bolivia, la demanda de autos híbridos y eléctricos crece día a día, por lo que los profesionales técnicos deben desarrollar competencias acordes a la necesidad laboral actual.

Un aspecto central existente al analizar el sector del transporte es el enfoque de género, considerando que se trata de un ámbito altamente masculinizado en nuestro país. En el marco de la Agenda 2030, se plantea la necesidad de promover soluciones que impulsen la inclusión, la regulación y la innovación en los sistemas de movilidad, incorporando de manera transversal la igualdad de oportunidades. En este contexto, el sector educativo cumple un rol fundamental en la formación y sensibilización de la comunidad educativa, así como en la implementación de acciones concretas orientadas a la igualdad de género. A través de la educación técnica y tecnológica se debe contribuir a la generación de oportunidades educativas inclusivas, promoviendo la capacitación de las mujeres para su inserción efectiva en las empresas, emprendimientos e iniciativas vinculadas a la industria, la operación y los servicios del transporte terrestre, favoreciendo así un desarrollo más equitativo y sostenible del sector.

En cuanto al enfoque educativo, la educación superior en América Latina hoy asume la formación basada en competencias como un enfoque de enseñanza acorde a las necesidades laborales emergentes. La formación basada en competencias permite que el estudiante se constituya en el verdadero motor de su aprendizaje, desarrollando estrategias cognitivas que le ayuden a reflexionar sobre su propio aprendizaje, respondiendo a las problemáticas y necesidades de su contexto, contribuyendo al desarrollo social, cultural y económico, conforme las demandas laborales, y con conocimientos, habilidades y actitudes acordes al campo ocupacional. En ese marco, las competencias verdes, de acuerdo al área estratégica de movilidad eléctrica, deben ser transversales, permeando los diferentes planes y programas de las carreras vinculadas a dicha área.

4.1 Matriz base de competencias del área estratégica de movilidad eléctrica

La matriz de competencias del área constituye un referente sectorial de formación técnica, equivalente a un estándar ocupacional del sector productivo, orientado a fortalecer la pertinencia del perfil de egreso frente a las demandas actuales del mercado laboral y los

desafíos de la transición energética y sostenibilidad ambiental. En consecuencia, dicha matriz no corresponde a una carrera o asignatura específica ni debe ser desarrollada de manera independiente por un solo docente.

A partir de la matriz de competencia del área, se delimitó una matriz de competencias por carrera, rescatando las unidades de competencia definidas en la matriz-base, acordes al desempeño profesional de cada carrera. Estas competencias integrales estarán presentes en los planes y programas de las carreras respectivas, y el estudiante las alcanzará progresivamente a lo largo del proceso formativo, mediante la articulación de varias asignaturas y espacios de práctica.

En ese entendido y para efectos curriculares, se establecen tres niveles de aplicación de la matriz de competencia:

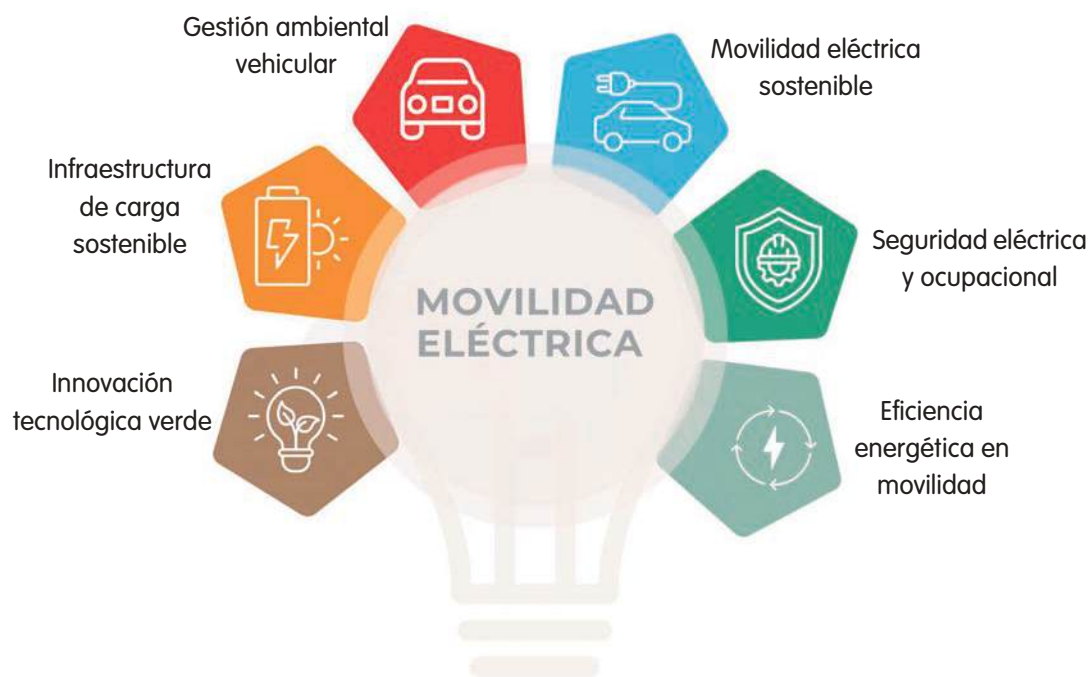
- **Nivel institucional (referencial):** la matriz-base de competencias del área de movilidad eléctrica cumple una función orientadora y justificativa, vinculando la formación técnica con el sector productivo, los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la transición energética. Este nivel define el marco de desempeño profesional esperado del egresado.
- **Nivel de carrera (perfil profesional):** cada carrera incorpora únicamente las competencias específicas que le corresponden según su ámbito de desempeño ocupacional. Estas competencias constituyen la adaptación profesional de la matriz sectorial y forman parte del perfil de egreso ampliado de la carrera. En este nivel no se incluyen todas las unidades de competencia sectoriales, sino únicamente aquellas coherentes con el campo ocupacional del técnico, las cuales estarán presentes en los planes y programas de las carreras respectivas.
- **Nivel de asignatura (programa analítico):** las asignaturas no desarrollan por sí solas una unidad de competencia completa. Cada asignatura aporta al logro de las competencias del perfil mediante resultados de aprendizaje específicos, acordes a su naturaleza formativa. Por tanto, el docente debe identificar y desarrollar los contenidos, prácticas y actividades que contribuyan parcialmente al logro de dichas competencias; para ello se realizó la integración de contenidos verdes en las asignaturas pertinentes, los cuales están ampliamente desarrollados en la presente Guía Temática.

En consecuencia, la integración de contenidos verdes se concibe como un proceso transversal, progresivo y articulado, donde el estudiante construye la competencia profesional a partir de la integración de conocimientos teóricos, prácticas de laboratorio, experiencias de taller y actividades de aplicación en diferentes asignaturas, evitando la duplicidad de contenidos y la sobrecarga curricular. El éxito de este proceso requiere que el docente desarrolle los contenidos disciplinares de su área y los contextualice mediante ejemplos, prácticas o aplicaciones relacionadas con la sostenibilidad, la eficiencia energética y la seguridad ambiental, de acuerdo con el aporte formativo que su asignatura puede realizar al perfil profesional del estudiante.

Conforme a lo descrito en el párrafo precedente, se establecen las unidades de competencia del área de movilidad eléctrica, entendiéndose a las mismas como espacios/bloques que describen los componentes del saber (conocimientos), saber hacer (habilidades) y saber ser (actitudes profesionales), para el desarrollo de tareas específicas en un ámbito de desempeño específico, estructuradas a partir de la problemática del sector de transporte, las necesidades de formación alineadas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible -ODS y las demandas del mercado laboral, orientando la formación técnica hacia el diagnóstico, mantenimiento, seguridad eléctrica, gestión ambiental, investigación aplicada e innovación tecnológica para una transición energética.

El siguiente gráfico delimita los ámbitos de desempeño del área estratégica de Movilidad Eléctrica:

Gráfico: Enfoque técnico verde de acuerdo al ámbito de desempeño



Matriz base de competencias - movilidad eléctrica						
Problemática del sector	Necesidades macro de formación (ods)	Necesidades del mercado laboral	Ámbito de desempeño	UCB	Unidad de competencia (funcional-laboral)	Enfoque técnico verde
La alta dependencia de combustibles fósiles en el transporte y el elevado consumo de diésel y gasolina importados llevan a la creciente demanda de uso de vehículos híbridos y eléctricos, requiriendo capacidades para su atención adecuada.	Transición energética y transporte sostenible (ODS 7, 11, 13)	Técnicos capaces de intervenir en vehículos eléctricos e híbridos.	Talleres automotrices especializados y centros de mantenimiento de flotas eléctricas.	UCB-1	Diagnosticar, mantener y reparar sistemas eléctricos y electrónicos de vehículos híbridos y eléctricos, interpretando manuales técnicos del fabricante y aplicando protocolos de seguridad de alto voltaje, utilizando herramientas e instrumentos especializados, actuando con responsabilidad técnica, orden en el trabajo y compromiso con la protección ambiental.	Gestión de la Movilidad eléctrica
El desconocimiento de riesgos invisibles y la manipulación incorrecta de sistemas de alto voltaje en vehículos híbridos y eléctricos pueden provocar electrocución, incendios y daños materiales.	Trabajo seguro y reducción de riesgos laborales (ODS 8, 5)	Técnicos especialistas en seguridad eléctrica y prevención de riesgos.	Centros de servicio automotriz y laboratorios técnicos.	UCB-2	Aplicar con rigurosidad los protocolos de seguridad eléctrica en sistemas de alto voltaje de vehículos híbridos y eléctricos, identificando fallas de aislamiento y zonas de riesgo, utilizando EPP especializado y herramientas aisladas conforme a normas técnicas y de seguridad industrial, garantizando la integridad personal y colectiva, actuando con disciplina preventiva, ética laboral y respeto por la vida y el entorno.	Seguridad eléctrica y ocupacional
La falta de diagnóstico técnico especializado provoca que se replacen innecesariamente los componentes costosos, incrementando costos de mantenimiento y generando residuos tecnológicos con daño al medio ambiente.	Educación técnica de calidad e innovación (ODS 4, 9)	Técnicos en diagnóstico eléctrico automotriz avanzado	Laboratorios de diagnóstico automotriz y servicios técnicos.	UCB-3	Realizar diagnóstico técnico de fallas eléctricas, electrónicas y de aislamiento en vehículos híbridos y eléctricos, mediante el uso de herramientas de medición de precisión y procedimientos de verificación, interpretando parámetros eléctricos, actuando con rigurosidad técnica y responsabilidad ambiental.	Optimización del diagnóstico
El uso ineficiente de la energía en sistemas de propulsión eléctrica, por falta de mantenimiento especializado en AC/DC, y el desconocimiento del funcionamiento de la electrónica de potencia que no permite la reparación por módulos, reducen la autonomía del vehículo y su desempeño energético, así como la alta emisión de gases por motores híbridos mal calibrados.	Eficiencia energética y reducción de emisiones (ODS 7, 13)	Técnicos en propulsión eléctrica	Empresas de mantenimiento de transporte eléctrico.	UCB-4	Diagnosticar y optimizar el funcionamiento de sistemas de propulsión eléctrica, electrónica de potencia y tren motriz térmico, evaluando parámetros de operación y consumo energético bajo condiciones de funcionamiento real, aplicando criterios de eficiencia energética y asegurando la reducción de emisiones contaminantes, actuando con compromiso climático y responsabilidad profesional técnica.	Eficiencia energética en movilidad

Matriz base de competencias - movilidad eléctrica						
Problemática del sector	Necesidades macro de formación (ods)	Necesidades del mercado laboral	Ámbito de desempeño	UCB	Unidad de competencia (funcional-laboral)	Enfoque técnico verde
La ausencia de protocolos y el manejo inadecuado, balanceo y disposición de baterías de litio y componentes electrónicos pueden generar riesgos ambientales, incendios y contaminación por residuos tecnológicos peligrosos.	Producción y consumo responsables (ODS 12, 13, 5)	Técnicos en gestión de baterías	Centros de mantenimiento especializado y reciclaje.	UCB-5	Gestionar bancos de baterías de litio de vehículos eléctricos mediante sistemas de gestión BMS, aplicando protocolos de carga y descarga para extender su vida útil, actuando con criterios de seguridad y conciencia ambiental.	Manejo técnico de las baterías
La escasa infraestructura de carga eléctrica, así como la instalación de carga improvisada, saturan la red eléctrica local, acciones que limitan el crecimiento de vehículos híbridos y eléctricos en el país.	Infraestructura sostenible e innovación (ODS 9, 11)	Instaladores certificados en estaciones de carga bajo normativa específica.	Empresas instaladoras y operadores de puntos de carga.	UCB-6	Instalar, verificar y mantener estaciones de carga y puestas a tierra para vehículos eléctricos, conforme a la normativa eléctrica vigente, garantizando seguridad operativa y eficiente conectada a redes eléctricas renovables, actuando con responsabilidad técnica y orientación a un servicio de calidad y eficiente.	Infraestructura de carga adecuada
La limitada innovación tecnológica local en movilidad eléctrica reduce la adaptación tecnológica nacional y la generación de emprendimientos técnicos especializados.	Innovación y emprendimiento tecnológico (ODS 4, 9, 13)	Técnicos con capacidad de innovación aplicada	Centros de investigación aplicada y emprendimientos tecnológicos.	UCB-7	Proponer mejoras técnicas e innovaciones aplicadas a sistemas de movilidad eléctrica, mediante procesos de investigación tecnológica y criterios de emprendimiento, demostrando iniciativa, creatividad, equidad de género y compromiso con la transición energética sostenible	Innovación tecnológica verde

4.2 Matriz de competencias específicas por carrera

En concordancia con lo establecido en el acápite 4.1, referido a la matriz base de competencias del Área Estratégica de Movilidad Eléctrica, se establece la necesidad de delimitar competencias específicas por carrera, con la finalidad de asegurar la pertinencia técnica de la formación y su coherencia con el perfil profesional y el ámbito de desempeño de cada especialidad. En este sentido, las competencias específicas descritas en la siguiente matriz se incorporan de manera transversal al proceso formativo de las carreras tecnológicas priorizadas para el área: Mecánica Automotriz, Electromecánica, Electromecánica Industrial, Electrónica, Mecánica Industrial y Electricidad Industrial, conforme a lo establecido en la RM N° 350/2023. Su inclusión tiene por propósito garantizar que las y los estudiantes desarrollen competencias vinculadas a las funciones y actividades propias de su campo ocupacional, en respuesta a las demandas emergentes del sector de la movilidad eléctrica.

Asimismo, resulta necesario definir el nivel de competencias que puede alcanzar un técnico superior de las carreras señaladas en relación con el área de movilidad eléctrica. Para ello, se establece una estructura de categorías de calificación que nos permite delimitar el tipo de funciones que pueden desempeñar los espacios de aplicación y el grado de complejidad de las intervenciones técnicas.

Esta estructura contempla tres niveles de intervención en movilidad eléctrica:

- **Nivel 1**, corresponde al conocimiento de los principios, fundamentos y bases tecnológicas de los vehículos híbridos y eléctricos;
- **Nivel 2**, se orienta a la intervención técnica directa en movibilidades híbridas y eléctricas, incluyendo actividades de diagnóstico, mantenimiento y reparación de sus componentes;
- **Nivel 3**, se relaciona con funciones de mayor complejidad asociadas al diseño de arquitecturas de vehículos eléctricos y al desarrollo de soluciones tecnológicas, competencias que generalmente corresponden a niveles profesionales de ingeniería.

En función a los parámetros señalados en el párrafo anterior, a continuación, se presenta la información estándar de competencia, estableciendo los niveles de competencia, el campo ocupacional, la clase ocupacional y el rango de aplicación en los que se desarrollarán las unidades de competencia por carrera dentro del área de movilidad eléctrica. Esta estructura permitirá orientar el proceso formativo hacia el desarrollo progresivo de competencias técnicas pertinentes, en correspondencia con las demandas del sector productivo y los ámbitos reales de desempeño profesional.

Estructura de las categorías de calificación – Movilidad eléctrica			
Nivel de competencia	Campo ocupacional	Clase ocupacional	Rango de aplicación
Nivel 1 X Nivel 2 ✓ Nivel 3 X	Mecánica Automotriz ✓	• Diagnóstico automotriz ✓	Talleres automotrices ✓
	Electromecánica ✓	• Mantenimiento automotriz ✓	Infraestructuras de carga X
	Electromecánica Industrial ✓	• Diseño de arquitecturas de vehículos eléctricos X	Sector comercial ✓
	Electrónica ✓	• Operación de sistemas de carga eléctrica ✓	Flotas eléctricas ✓
	Mecánica Industrial ✓	• Desarrollo de prototipos de vehículos eléctricos X	Industria automotriz ✓
	Electricidad Industrial ✓	• Dimensionamiento de sistemas de potencia X	Empresas de diseño automotriz eléctrico X

En el marco de lo descrito previamente, a continuación, se presenta la Matriz de Competencias por Carrera. La delimitación de competencias específicas por carrera permite establecer con mayor precisión el alcance de la intervención formativa en cada especialidad, considerando la naturaleza de sus perfiles profesionales y los distintos ámbitos de desempeño en los que podrán desenvolverse las y los técnicos superiores. De esta manera se evita la generalización de contenidos y se asegura que cada carrera incorpore aquellos conocimientos, habilidades y actitudes que resulten pertinentes para su campo de acción dentro del área de movilidad eléctrica. Las competencias descritas a continuación se encontrarán presentes en los planes y programas de las carreras, según corresponda.

Matriz de competencias específicas por carrera					
UCB*	Ámbito de desempeño	Enfoque técnico verde	Carrera	UC**	Unidades de competencia específica por carrera
UCB-1	Talleres automotrices especializados y centros de mantenimiento de flotas eléctricas	Movilidad eléctrica sostenible	1. Mecánica Automotriz	UC-6	Realizar mantenimiento preventivo y correctivo de sistemas electromecánicos de vehículos híbridos y eléctricos, verificando sistemas de tracción, refrigeración, cableado HV y componentes auxiliares, conforme a las especificaciones técnicas y normas de seguridad, con criterios de eficiencia energética, actuando con ética, responsabilidad y compromiso con la seguridad personal y del medio ambiente
UCB-2	Centros de servicio automotriz y laboratorios técnicos	Seguridad eléctrica y ocupacional	1. Mecánica Automotriz 2. Electromecánica Industrial 3. Electricidad Industrial 4. Electrónica 5. Mecánica Industrial	UC-2	Intervenir vehículos híbridos y eléctricos aplicando protocolos de seguridad de alto voltaje, bloqueo eléctrico, descarga de capacitores y uso de EPP especializado, demostrando actitud preventiva, disciplina y respeto por la igualdad de condiciones en el entorno laboral.
UCB-3	Laboratorios de diagnóstico automotriz y servicios técnicos especializados	Diagnóstico de sistemas electrónicos	1. Mecánica Automotriz	UC-3	Evaluar fallas en sistemas electrónicos automotrices, sensores, actuadores, redes y sistemas de control mediante escáner automotriz, osciloscopio y multímetro automotriz, actuando con rigurosidad técnica, pensamiento analítico, equidad de género y responsabilidad ambiental.

UCB-4	Empresas de mantenimiento de transporte eléctrico	Eficiencia energética en movilidad	1.Mecánica Automotriz 2.Electromecánica 3.Mecánica Industrial	UC-5	Verificar parámetros eléctricos y mecánicos del sistema de propulsión eléctrica (motor, inversor y transmisión), evaluando motores de imanes permanentes bajo especificaciones del fabricante, garantizando el rendimiento energético y condiciones operativas, demostrando responsabilidad profesional, compromiso con la sostenibilidad y responsabilidad ambiental.
UCB-4	Empresas de mantenimiento de transporte eléctrico	Eficiencia energética en movilidad	1.Mecánica Automotriz	UC-8	Diagnosticar componentes de potencia e inversores empleando diagramas técnicos para asegurar una conversión de energía eficiente con el menor calor residual posible, actuando con conciencia ambiental, ética profesional y responsabilidad social.
UCB-4	Empresas de mantenimiento de transporte eléctrico	Eficiencia energética en movilidad	1. Electromecánica	UC-7	Optimizar el funcionamiento del Ciclo Atkinson y uso de aditivos, asegurando la reducción de emisiones contaminantes y maximizando la vida útil de los fluidos lubricantes, actuando con conciencia ambiental, ética profesional y responsabilidad social.
UCB-5	Centros de mantenimiento especializado y gestión de baterías	Gestión ambiental vehicular	1. Electrónica	UC-4	Gestionar bancos de baterías de litio de vehículos eléctricos, mediante la medición de celdas, balanceo, monitoreo térmico y verificación de carga y descarga segura, aplicando protocolos técnicos, para extender su vida útil y planificando su disposición final, actuando con liderazgo técnico y compromiso con la sostenibilidad.
UCB-6	Empresas instaladoras y operadores de puntos de carga	Infraestructura de carga sostenible	1.Electricidad Industrial 2.Electromecánica 3.Electromecánica Industrial 4. Electrónica	UC-9	Instalar cargadores para vehículos eléctricos realizando protecciones, puesta a tierra, dimensionamiento de conductores y pruebas de funcionamiento conforme a la normativa eléctrica, demostrando rigurosidad técnica, compromiso ambiental y servicios de calidad.
UCB-7	Centros de investigación aplicada y emprendimientos tecnológicos	Innovación tecnológica verde	1.Electrónica 2. Electromecánica Industrial	UC-1	Desarrollar soluciones técnicas aplicadas a la vehículos híbridos y eléctricos, integrando sistemas electrónicos de control, monitoreo energético y automatización de procesos de carga, demostrando creatividad, disciplina técnica y compromiso ambiental.

* Las unidades de competencia base responden a la Matriz Base de Competencias del área de Movilidad Eléctrica; a partir de ellas se plantean unidades de competencia por carrera, ajustados al perfil profesional y campo de acción de cada carrera priorizada.

** Las unidades de competencia de carrera y la numeración se presentan en un orden relacionado a las unidades temáticas.

Unidades temáticas y resultados de aprendizaje

Los resultados de aprendizaje son el conjunto de conocimientos, actitudes, destrezas y habilidades específicas aplicadas a una amplia gama de situaciones, que el estudiante adquiere como efecto o resultado del proceso de enseñanza y aprendizaje. Según Coll (1992), en base a un enfoque pedagógico constructivista, los resultados de aprendizaje o efectos deseables de la formación no se refieren tanto a las adquisiciones de ítems específicos de conocimiento, es decir, no se definen como productos finales, sino al desarrollo de destrezas cognitivas y motrices como parte de una memorización comprensiva y el almacenamiento de nuevos significados en una red de conocimientos previos. Esa construcción de significados adquiridos a partir de los contenidos y experiencias educativas permite que el estudiante las aplique o ejecute en una amplia gama de situaciones y en contextos que lo requieran.

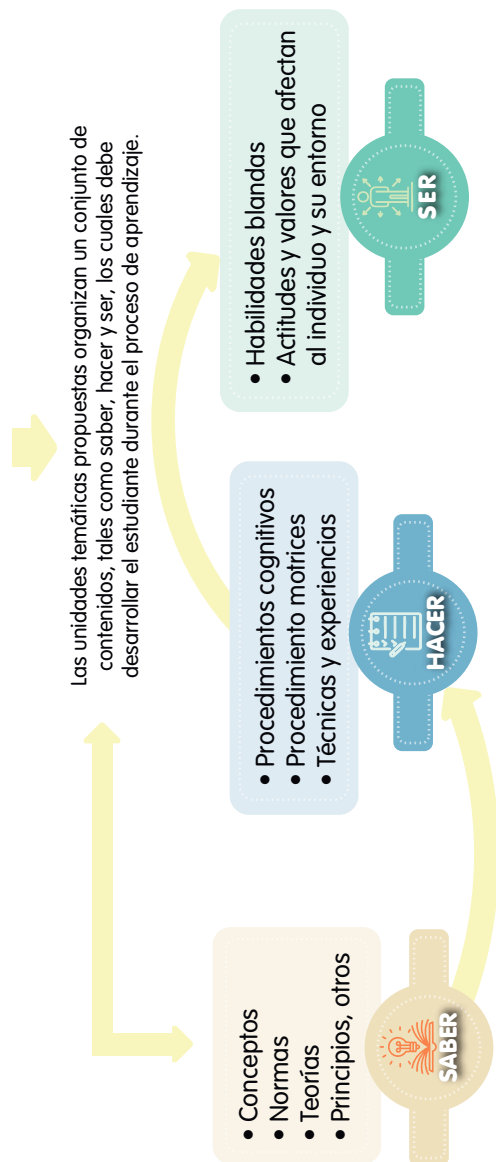
La delimitación de los resultados de aprendizaje, parte de las unidades de competencias determinadas en el acápite precedente, como también de las unidades temáticas o unidades de aprendizaje, las cuales a lo largo del documento las denominaremos unidades temáticas, al ser el denominativo asumido en los lineamientos curriculares y los planes y programas de la formación superior técnica y tecnológica.

En adelante se detallan las unidades temáticas definidas para el área estratégica de movilidad eléctrica; son contenidos transversales que se presentan de forma selectiva, conforme a las competencias, el perfil profesional, la naturaleza de las carreras, y de forma indistinta en los planes y programas de las carreras priorizadas; las unidades temáticas, son las siguientes:

Cuadro: Unidades temáticas del área de movilidad eléctrica

Ámbitos de desempeño	Enfoque verde	UC	Carrera	Unidades de competencia		N° UT	Unidad temática
Centros de investigación aplicada y emprendimientos tecnológicos	Innovación tecnológica verde	UC-1	Electrónica Electromecánica Industrial		Desarrollar soluciones técnicas aplicadas a vehículos híbridos y eléctricos, integrando sistemas electrónicos de control, monitoreo energético y automatización de procesos de carga, demostrando creatividad, disciplina técnica y compromiso ambiental.	1	Industria, empleo y medio ambiente
						2	Introducción a los vehículos híbridos y eléctricos
Centros de servicio de automotriz y laboratorios técnicos	Seguridad eléctrica y ocupacional	UC-2	Mecánica Automotriz Electromecánica Electricidad Industrial Electrónica Mecánica Industrial		Intervenir vehículos híbridos y eléctricos aplicando protocolos de seguridad de alto voltaje, bloqueo eléctrico, descarga de capacitores y uso de EPP especializado, demostrando actitud preventiva, disciplina y respeto por la igualdad de condiciones en el entorno laboral.	3	Equipos de protección personal en vehículos eléctricos
Laboratorios de diagnóstico de automotriz y servicios técnicos especializados	Diagnóstico de sistemas electrónicos	UC-3	Mecánica Automotriz		Evaluar fallas en sistemas de vehículos híbridos y eléctricos, sensores, actuadores, protocolos de comunicación y sistemas de control mediante multímetro, osciloscopio y escáner automotriz, actuando con rigurosidad técnica, pensamiento analítico, equidad de género y responsabilidad ambiental.	4	Verificación de fallas de aislamiento
Centros de mantenimiento especializado y gestión de baterías	Gestión ambiental vehicular	UC-4	Electrónica		Gestionar bancos de baterías de litio de vehículos eléctricos, mediante la medición de celdas, balanceo, monitoreo térmico y verificación de carga y descarga segura, aplicando protocolos técnicos, para extender su vida útil y planificando su disposición final, actuando con liderazgo técnico y compromiso con la sostenibilidad.	5	Baterías de litio
Empresas de mantenimiento de transporte eléctrico	Eficiencia energética en movilidad	UC-5	Mecánica Automotriz Electromecánica Mecánica Industrial		Verificar parámetros eléctricos y mecánicos del sistema de propulsión eléctrica (motor, inversor y transmisión), evaluando motores de imanes permanentes bajo especificaciones del fabricante, garantizando el rendimiento energético y condiciones operativas, demostrando responsabilidad profesional, compromiso con la sostenibilidad y responsabilidad ambiental.	6	Motores de imanes permanentes
						7	Transmisiones en vehículos híbridos
Talleres automotrices especializados y centros de mantenimiento de flotas eléctricas	Gestión de la movilidad eléctrica	UC-6	Mecánica Automotriz		Realizar mantenimiento preventivo y correctivo de sistemas de refrigeración de vehículos híbridos y eléctricos, verificando sistemas de tracción y componentes auxiliares conforme a las especificaciones técnicas y normas de seguridad, con criterios de eficiencia energética, actuando con ética, responsabilidad y compromiso con la seguridad personal y del medio ambiente.	8	Refrigerantes para vehículos híbridos y eléctricos

Ámbitos de desempeño	Enfoque verde	UC	Carrera	Unidades de competencia		Nº UT	Unidad temática
Empresas de mantenimiento de transporte eléctrico	Eficiencia energética en movilidad	UC-7	Mecánica Automotriz Electromecánica	Describir el funcionamiento del Ciclo Atkinson y el uso de aditivos, asegurando la reducción de emisiones contaminantes y maximizando la vida útil de los fluidos lubricantes, actuando con conciencia ambiental, ética profesional y responsabilidad social.		9	Introducción al Ciclo Atkinson
Empresas de mantenimiento de transporte eléctrico	Eficiencia energética en movilidad	UC-8	Mecánica Automotriz			10	Componentes de la electrónica de potencia
Empresas instaladoras y operadores de puntos de carga	Infraestructura de carga sostenible	UC-9	Electricidad Industrial Electromecánica Industrial Electrónica	Diagnosticar componentes de potencia e inversores empleando instrumentos de uso automotriz y diagramas técnicos para asegurar una conversión de energía eficiente con el menor calor residual posible, actuando con conciencia ambiental, ética profesional y responsabilidad social.		11	Inversores para vehículos HEV y EV
						12	Estaciones de carga para vehículos eléctricos
						13	Estudio del conector IEC 62196
						14	Puesta a tierra de estaciones de carga
				Instalar estaciones de carga para vehículos eléctricos realizando protecciones, puesta a tierra, dimensionamiento de conductores y pruebas de funcionamiento conforme a la normativa eléctrica, demostrando rigurosidad técnica, compromiso ambiental y servicios de calidad.		15	Mantenimiento de estaciones de carga



A continuación se describen el saber, hacer y ser de cada unidad de competencia, así como los resultados de aprendizaje, los cuales permitirán una adecuada planificación del docente, así como el establecimiento de criterios de evaluación. Se establece que los resultados de aprendizaje aquí demostrados serán incorporados en los planes y programas, con el ajuste de redacción correspondiente, conforme a las unidades de competencia vinculadas y pertinentes a la carrera.

Contenidos y resultados de aprendizaje del área de movilidad eléctrica					
Enfoque técnico verde	Contenidos por unidad temática				Resultados de aprendizaje
	UC	Saber	Hacer	Ser	
Innovación tecnológica verde	UC-1	Industria y tecnologías limpias Conceptos de energía y medio ambiente Arquitectura de vehículos híbridos y eléctricos Componentes: batería HV, inversor, ECU, transmisión Modos de operación del sistema híbrido	Identifica componentes del sistema híbrido Interpreta diagramas funcionales Analiza los modos de operación del vehículo Monitorea parámetros de funcionamiento Diagnostica el funcionamiento básico del sistema	Pensamiento innovador Disciplina técnica Responsabilidad en el uso de tecnología limpia	1. Propone mejoras técnicas en sistemas de carga o monitoreo energético del vehículo. 2. Diseña soluciones básicas de automatización para la gestión de carga. 3. Elabora propuesta técnica debidamente sustentada para la mejora de eficiencia energética o reducción de emisiones. 4. Propone soluciones innovadoras de electromovilidad que favorezcan la accesibilidad universal, la inclusión laboral y la reducción del impacto ambiental en el transporte.
Seguridad eléctrica y ocupacional	UC-2	Fundamentos de alta tensión en automoción Riesgos eléctricos en DC Normativa de seguridad Tipos de EPP especializado	Aplica protocolos de seguridad HV Realiza un uso correcto de EPP Identifica riesgos eléctricos Ejecuta procedimientos de bloqueo y descarga	Actitud preventiva Responsabilidad colectiva Respeto a normas y trabajo seguro	1. Reconoce zonas de riesgo eléctrico en vehículos híbridos y eléctricos, identificando puntos de alto voltaje. 2. Aplica procedimiento de bloqueo y señalización antes de intervenir un vehículo híbrido y/o eléctrico. 3. Verifica ausencia de tensión en sistemas HV utilizando multimetro u otro adecuado, aplicando procedimientos seguros de desconexión. 4. Aplica protocolos de seguridad y protección personal EPP específico durante la intervención en vehículos híbridos y/o eléctricos, minimizando riesgos eléctricos y ambientales. 5. Aplica normas de convivencia laboral igualitaria en el aula-taller y espacios de práctica laboral, promoviendo participación equitativa, respeto y prevención de prácticas discriminatorias.

Diagnóstico de sistemas electrónicos	UC-3	Fundamentos de aislamiento eléctrico Sistemas de monitoreo de aislamiento (PIM) Equipos de diagnóstico (megger, multímetro) Categorías de seguridad eléctrica	Mide la resistencia de aislamiento Utiliza instrumentos de diagnóstico Verifica la ausencia de tensión Detecta fallas eléctricas	Rigurosidad técnica Pensamiento analítico Precisión Responsabilidad técnica y de seguridad	1. Realiza lectura de códigos de falla mediante la utilización del escáner EV/HEV en vehículos híbridos y/o eléctricos y otros instrumentos adecuados. 2. Evalúa el estado de aislamiento en sistemas de alto voltaje mediante el uso del medidor de aislamiento de alto voltaje megóhmometro (megger). 3. Determina causa probable de falla que comprometan la seguridad y eficiencia del sistema, evitando el reemplazo innecesario de componentes.
Gestión ambiental vehicular	UC-4	Parámetros eléctricos (voltaje, capacidad, energía) Funcionamiento de baterías de litio Ciclos de carga/descarga Estructura de celdas de baterías de litio Criterios de almacenamiento y disposición de baterías	Mide parámetros de capacidad y potencia de la batería Realiza balanceo de celdas Monitorea la temperatura Gestiona la carga y descarga segura	Responsabilidad ambiental Eficiencia en el uso de recursos. Orden y control técnico Liderazgo técnico	1. Identifica celdas, módulos y arquitectura del paquete de baterías de tracción, así como refrigerantes compatibles con sistemas eléctricos. 2. Aplica protocolos de almacenamiento y manipulación segura de baterías de litio. 3. Aplica criterios ambientales en la selección, uso y manejo de refrigerantes y materiales técnicos en vehículos híbridos y eléctricos. 4. Clasifica residuos tecnológicos provenientes de baterías y componentes electrónicos para su reciclaje o disposición controlada.
Eficiencia energética en movilidad	UC-5	Motores de imanes permanentes Tipos de motores eléctricos Principios de funcionamiento de motores de imanes permanentes Transmisión híbrida	Evalúa el funcionamiento del motor Analiza curvas de operación Verifica el rendimiento energético Interpreta las configuraciones de transmisión	Responsabilidad Compromiso con la eficiencia energética Ética técnica	1. Evalúa el desempeño del sistema de propulsión eléctrica a través de la medición y análisis de parámetros operativos. 2. Analiza el funcionamiento de motores de imanes permanentes y sistemas de transmisión híbrida. 3. Verifica parámetros operativos y eficiencia energética conforme a especificaciones técnicas del fabricante.
Gestión de la movilidad eléctrica	UC-6	Gestión térmica en movilidad eléctrica Tipos de refrigerantes Sistemas de enfriamiento Normas de mantenimiento	Realiza mantenimiento preventivo Verifica sistemas de refrigeración Manipula fluidos correctamente Aplica protocolos de seguridad	Responsabilidad ambiental Orden y limpieza Compromiso con la seguridad Ética laboral	1. Realiza mantenimiento preventivo y correctivo de sistemas de refrigeración en vehículos híbridos y/o eléctricos. 2. Verifica los sistemas de refrigeración y componentes auxiliares. 3. Aplica protocolos técnicos y normas de seguridad con criterios de eficiencia energética y responsabilidad ambiental.

Eficiencia energética en movilidad	UC-7	Ciclo Atkinson Principios termodinámicos Relación de compresión real vs geométrica Eficiencia térmica Integración con sistemas híbridos	Describe el funcionamiento del ciclo Atkinson Compara con otros ciclos Evalúa la eficiencia energética Interpreta el comportamiento del motor	Conciencia ambiental Pensamiento crítico Responsabilidad social Ética profesional	- Describe el funcionamiento del ciclo Atkinson, considerando los principios termodinámicos. - Evalúa el desempeño del sistema de propulsión en función de la interacción entre motor térmico y eléctrico. - Explica la contribución del ciclo Atkinson a la reducción de consumo energético y emisiones contaminantes.
Eficiencia energética en movilidad (electrónica de potencia e inversores)	UC-8	Diodos, BJT, MOSFET, IGBT Características I-V Conmutación electrónica Funcionamiento de inversores PWM	Interpreta circuitos electrónicos Diagnostica los componentes de potencia Analiza las señales PWM Verifica el funcionamiento del inversor	Rigurosidad técnica Pensamiento lógico Precisión Responsabilidad profesional	- Diagnostica el funcionamiento de componentes de electrónica de potencia e inversores en vehículos híbridos y/o eléctricos. - Analiza el funcionamiento del inversor y su proceso de conversión de energía (DC/AC) mediante la interpretación de señales de control (PWM). - Verifica las condiciones de operación del sistema, asegurando eficiencia en la conversión energética.
Infraestructura de carga sostenible	UC-9	Tipos de estaciones de carga (EVSE) Normativa IEC 61851 y 62196 Sistemas de puesta a tierra Protocolos de carga y conectores Criterios de mantenimiento	Instala estaciones de carga Realiza puesta a tierra Dimensiona conductores Ejecuta mantenimiento y diagnóstico Interpreta la señal PWM	Compromiso con la calidad del servicio Responsabilidad ambiental Seguridad técnica	- Instala estaciones de carga (cargadores) para vehículos eléctricos conforme a la normativa técnica vigente, realizando pruebas de funcionamiento y seguridad. - Aplica estándares de conectores (IEC 62196-2) en sistemas de carga. - Ejecuta sistemas de puesta a tierra y protecciones eléctricas en infraestructura de carga, garantizando la seguridad operativa. - Dimensiona conductores eléctricos para instalaciones de carga según requerimientos de potencia.

A continuación, se presenta la matriz de competencia por ámbito de desempeño, carrera y asignatura, en base al cual las unidades temáticas se integrarán en los planes y programas de las carreras priorizadas:

Centralizador de contenidos verdes incorporados				
Carrera	Unidad de competencia	Año de formación	Sigla	Asignatura
Electrónica	UC-2	Primer Semestre	SIM-100	Seguridad industrial y medio ambiente I
	UC-9	Primer Semestre	INE-100	Instalaciones eléctricas
	UC-1	Tercer Semestre	MII-300	Máquinas e instalaciones industriales
	UC-8	Cuarto Semestre	ELI-400	Electrónica industrial
	UC-4	Cuarto Semestre	SIT-400	Sistemas de telecomunicaciones
	UC-9	Cuarto Semestre	MAE-400	Mantenimiento de equipos electrónicos
Electromecánica	UC-2	Primer Semestre	HSI-100	Higiene, seguridad industrial y medio ambiente
	UC-8	Segundo Semestre	CIE-200	Circuitos eléctricos I
	UC-8	Tercer Semestre	ELT-300	Electrónica I
	UC-7	Cuarto Semestre	MQT-400	Máquinas térmicas
	UC-1/UC-5	Cuarto Semestre	MAE-400	Máquinas eléctricas II
	UC-9	Quinto Semestre	INE-500	Instalaciones eléctricas industriales
Electricidad Industrial	UC-2	Primer Año	SIM-101	Seguridad ocupacional y medio ambiente
	UC-9	Primer Año	IET-104	Instalaciones eléctricas y taller
	UC-8	Segundo Año	EAD-203	Electrónica analógica y digital
	UC-8	Tercer Año	ELP-304	Electrónica de potencia
	UC-2	Primer Semestre	SIM-100	Seguridad ocupacional y medio ambiente
	UC-9	Primer Semestre	IET-100	Instalaciones eléctricas y taller I
	UC-8	Tercer Semestre	ELA-300	Electrónica analógica
	UC-8	Quinto Semestre	ELP-500	Electrónica de potencia
Mecánica Industrial	UC-2	Primer Semestre	SMA-100	Seguridad ocupacional y medio ambiente
	UC-8	Segundo Semestre	ELE-200	Electrotecnia y electrónica básica
	UC-5/UC-8	Tercer Semestre	AEC-300	Automatismos eléctricos y control
	UC-9	Sexto Semestre	MEI-600	Mantenimiento de equipo industrial
Mecánica Automotriz	UC-2	Primer Año	SOM-101	Seguridad ocupacional y medio ambiente
	UC-6	Primer Año	QFA-108	Fisicoquímica automotriz
	UC-8	Segundo Año	ETA-205	Electrónica automotriz I
	UC-8/UC-9	Segundo Año	ELA-202	Electricidad automotriz II
	UC-7	Segundo Año	TER-207	Termodinámica
	UC-5	Tercer Año	TRA-306	Transmisiones II
	UC-3	Tercer Año	DAU-302	Diagnóstico del automóvil
	UC-2	Primer Semestre	SOM-100	Seguridad ocupacional y medio ambiente
	UC-6	Primer Semestre	QUA-100	Química automotriz
	UC-8/UC-9	Tercer Semestre	ELA-300	Electricidad automotriz III
	UC-7	Tercer Semestre	TER-300	Termodinámica
	UC-8	Cuarto Semestre	ETA-400	Electrónica automotriz II
	UC-5	Quinto Semestre	TRA-500	Transmisiones III
	UC-3	Sexto Semestre	DAU-600	Diagnóstico del automóvil
Electromecánica Industrial	UC-9	Tercer Semestre	IEI-103	Instalaciones eléctricas industriales
	UC-1	Cuarto Semestre	ASC-104	Automatismos y sistemas de control
	UC-8	Cuarto Semestre	ASC-104	Automatismos y sistemas de control
	UC-9	Quinto Semestre	MAE-105	Mantenimiento electromecánico

6.

Contenidos

UNIDAD TEMÁTICA 1



**INDUSTRIA, EMPLEO
Y MEDIO AMBIENTE**

1 INDUSTRIAS LIMPIAS

La revolución industrial iniciada en la segunda mitad del siglo XVIII trajo consigo un proceso de transformación social, económica y tecnológica, extendida a lo largo del mundo. Esto desarrolló drásticamente la producción agrícola rural, sustituyendo la mano de obra por equipos industriales que aliviaban el trabajo manual, incrementando la producción. A lo largo de los años, industrias con este factor tecnológico fueron avanzando en beneficio del incremento económico de los países que la implementaban, pero también con severos efectos en el medio ambiente.

A medida que se fue desarrollando el sector industrial, se incrementó también una sensibilidad ambiental, iniciándose así la eco-industria, con tecnología menos contaminante y con criterios de gestión ambiental, basándose en dos criterios, el paliativo y el preventivo. Desde la Declaración de Estocolmo (1972), diversos países toman conciencia del impacto de la contaminación ambiental. Los países pioneros en el desarrollo de la eco-industria fueron Estados Unidos, Japón y Alemania¹. "Fue en Alemania y los Países Bajos donde más se promovieron las eco-industrias durante los años ochenta, luego de la rápida adopción de nuevas normas, un incremento abrupto del gasto público en investigación y desarrollo (I&D) y la puesta en marcha de estrategias empresariales agresivas en el mercado ambiental" (Comisión Europea, 1989)².

La inversión en investigación y desarrollo tiene como finalidad incrementar la rentabilidad a largo plazo, a partir de

que las reglamentaciones y regulaciones ambientales se generalicen y exijan mejores tecnologías y estrategias de gestión ambiental. La demanda de la población y la conciencia por los efectos ambientales de las industrias exigen hoy en día que los Estados asuman políticas de regulación, lo cual ha sido un beneficio para aquellas empresas pioneras en la implementación e inversión en investigación y desarrollo para paliar los efectos ambientales del crecimiento industrial.

La eco-industria centra su actuar en la producción de equipos que reduzcan la contaminación, el tratamiento y eliminación de los desechos generados. La definición de la Comisión Europea (1993), señala: "Se entiende por eco-industrias aquellas empresas productoras de bienes y servicios capaces de medir, prevenir, limitar o corregir el daño ambiental, como la contaminación de agua, el aire, y el suelo, así como los problemas relacionados con los desechos y el ruido. Comprenden las tecnologías menos contaminantes en que se minimiza la contaminación y el uso de materias primas". Otra definición establece: "Se define operativamente a la eco-industria como aquella que es proveedora de tecnología y sus servicios conexos tales como consultoría, mantenimiento y mejoramiento. Es a la vez altamente sofisticada y de baja tecnología y es uno de los sectores en más rápida expansión en la economía mundial" (Barton, 1998).

Barton (1998) señala que en los países latinoamericanos, a medida que las normas regulatorias ambientales se han ido implementando en las industrias,

¹ Barton Jonathan, *La dimensión Norte-Sur de las industrias de limpieza ambiental y la difusión de tecnologías limpias*; Revista CEPAL, Nro. 64, abril de 1998.

² Comisión Europea (1988): *The emerging industries, Panorama of EC Industry*, 1989, Luxemburgo, Office for Official Publications of European Community

principalmente en el sector agrícola por los efectos en la erosión, pérdida de fertilidad, compactación y salinización, la mayor dificultad para su desarrollo, a la par de los países pioneros, se debe a la débil inversión en nuevas tecnologías amigables con el medio ambiente, ya que por las características de las industrias estas inversiones tienen incidencia también en sus rendimientos económicos, en empresas pequeñas. No obstante, para la exportación de sus productos, hoy en día, se constituye en un requisito importante catalogar sus productos como “favorables al medio ambiente”, lo cual incide en la demanda de los mismos, obligando así a su desarrollo en el sector productivo.

La demanda de un enfoque productivo, en base a las eco-industrias, exige la modificación de todo el proceso industrial, desde la optimización de los procesos, la innovación en la materia, el reciclaje o la recuperación de subproductos, la optimización del uso de recursos y la adopción de un criterio de coproductividad entre las empresas (Sutler, 1989 y Rajagopal, 1992).

El desarrollo de las ecoindustrias o industrias limpias depende de los países comprometidos con las políticas globales de cuidado del medio ambiente en sus acciones de desarrollo económico, para lo cual deben implementar acciones de uso óptimo de la energía y de recursos como el agua, el transporte y el consumo a fin de lograr el desarrollo sustentable. Las industrias a implementarse, por lo tanto, deben seguir las normas internacionales y nacionales de regulación ambiental e invertir en investigación-desarrollo-innovación, para hacer que sus procesos productivos logren un producto resultado de un proceso eficiente de uso de los

recursos, para un desarrollo económico sostenible.

2 INDUSTRIA 4.0

La implementación de la industria 4.0 se inicia a partir de la revolución industrial, la cual en su momento tenía como objetivo la sustitución del hombre por las máquinas y equipos industriales. Hoy el enfoque que se implementa a través de la industria 4.0 (cuarta revolución industrial) es la colaboración de las máquinas al trabajo que desarrolla el hombre a través de la inteligencia artificial y los equipos interconectados, con un nivel de precisión y cuidado que elevan la productividad. La industria 4.0, presentada en la Feria de Hannover Alemania, es un concepto que interrelaciona innovaciones tecnológicas como la automatización y la tecnología de la información. Los principales beneficios de esta nueva era industrial, según SAP Concur Team³, son:

- Creación de nuevos modelos de negocio
- Integración de operaciones en tiempo real; a través de tecnología avanzada y de inteligencia artificial se monitorea los procesos de forma remota y en tiempo real optimizando la disponibilidad de la información.
- Reducción de costos; las máquinas operan y programan mantenimientos de forma autónoma.
- Economía de energía; a través de sensores los equipos industriales se mantienen activos en los momentos de trabajo y se desactivan automáticamente, logrando un ahorro de energía.
- Sostenibilidad; a través del ahorro de energía y el uso óptimo de los recursos.
- Disminución de errores en los procesos industriales.

³ SAP Concur Team, 02 de agosto del 2021: <https://www.concur.co/blog/article/beneficios-industria-4.0>

- Aumento de la productividad; la automatización de tareas repetitivas permite el uso de los recursos humanos en tareas más complejas relacionados a los objetivos del negocio.
- Optimización de la eficiencia; promueve la utilización de los recursos de manera más eficiente.

Las necesidades industriales, el avance tecnológico y las políticas públicas, hoy en día y a nivel global, promueven la relevancia de la implementación de la industria 4.0 en sus procesos productivos. Este avance tecnológico no puede ser obviado al hablar de industria y de las perspectivas de crecimiento económico.

3 CONDICIONES DE EMPLEO

Las condiciones de empleo en el mundo no son las adecuadas para una vida digna: “Un total de 700 millones de personas viven en situación de pobreza extrema o moderada pese a tener empleo” señala Damián Grimshaw, Director del Departamento de Investigaciones de la OIT. Asimismo, el informe de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) “Perspectivas sociales y del empleo en el mundo: Tendencias 2019” establece: “En 2018, la mayoría de los 3300 millones de personas empleadas en el mundo no gozaba de un nivel suficiente de seguridad económica, bienestar material e igualdad de oportunidades. Es más, el avance de la reducción del desempleo a nivel mundial no se ve reflejado en una mejora de la calidad del trabajo”⁴

El Objetivo 8 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se propone promover el crecimiento inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todas y todos. Tiene como meta, entre otras, promover políticas orientadas al desarrollo que apoyen las actividades productivas, la creación de empleo decente, el emprendimiento, la creatividad y la innovación, y alentar la oficialización y el crecimiento de las microempresas y las pequeñas y medianas empresas, entre otras cosas mediante el acceso a servicios financieros⁵.

Un concepto relevante para la presente investigación es el empleo digno, para lo cual se debe partir de establecer su diferencia con el trabajo decente que nos plantea la OIT. El trabajo decente se define como el que “sintetiza las aspiraciones de las personas durante su vida laboral. Significa la oportunidad de acceder a un empleo productivo que genere un ingreso justo, la seguridad en el lugar de trabajo y la protección social para todos, mejores perspectivas de desarrollo personal e integración social, libertad para que los individuos expresen sus opiniones, se organicen y participen en las decisiones que afectan sus vidas, y la igualdad de oportunidades y trato para todos, mujeres y hombres”⁶; por lo tanto, se concentra en el derecho al trabajo y la protección social. Por otra parte, el concepto de empleo digno “se centra en una comprensión de la actividad laboral humana como no mercantil y no individual, sino basada en el bienestar de la comunidad. La noción de dignidad aparece aquí como disruptiva y anticapitalista. El empleo (igual a salario) no es lo relevante, sino

⁴ Organización Internacional del Trabajo, Noticias: El gran problema del empleo en el mundo: Las malas condiciones de trabajo, 13 de febrero del 2019.

⁵ Objetivos de Desarrollo Sostenible- Organización de Naciones Unidas.

⁶ Organización Internacional de Trabajo-OIT, Revisión septiembre 2023, TRABAJO DECENTE, Página oficial de la OIT: <https://www.ilo.org/global/topics/decent-work/lang-es/index.htm>

la forma de organización que se da el colectivo, orientada hacia el interés general”⁷. Es decir que el empleo digno, más allá de ofrecer una remuneración justa y estabilidad laboral, garantiza la protección de las familias, la oportunidad para ambos géneros, la libre expresión, pero sobre todo la recuperación de la humanidad y la dignidad. Para Ghiotto y Pascual, la diferencia entre ambos conceptos es un problema político y social, no simplemente económico; el trabajo o empleo digno rompe el esquema de la necesidad laboral para la satisfacción y acúmulo material, así como la relación sujeto-objeto, por la reivindicación de la autodeterminación colectiva, en beneficio de todos.

Los países deben incentivar la generación de emprendimientos propios, con la finalidad de promover el surgimiento de nuevos empleos, y no limitar a los ciudadanos a ser únicamente empleados. Éste es un reto principalmente en los países que cuentan con una población joven, por lo que las políticas públicas deben ir dirigidas a la reforma de normas que permitan el acceso de créditos y otros para impulsar nuevas pequeñas y medianas empresas.

Un empleo digno, que contemple la satisfacción de las necesidades básicas, debe ser satisfecha por los Estados a través de la implementación de normas que regulen la oferta y demanda laboral y las otras condiciones del trabajo. Las industrias deben garantizar que las y los trabajadores cuenten con los beneficios mínimos para un trabajo digno, que resguarde la salud del trabajador y

de su familia. Por ello, el fomento de la creación de nuevas industrias y las políticas que prevean su surgimiento y brinden seguridad jurídica a las mismas deben transformar también las prácticas empresariales en beneficio de los trabajadores.

ONU Mujeres establece que “El índice de participación de las mujeres en el mercado laboral apenas ha aumentado en los últimos 20 años, excepto en América Latina y el Caribe, donde pasó del 57 al 68 por ciento”. La ODS 8 contempla también el desarrollo de políticas públicas para un trabajo inclusivo en razón de género, aspecto que debe ser encarado con integralidad, desde las oportunidades educativas para las mujeres en carreras profesionales no solo tradicionales (vinculadas principalmente a servicios), sino tecnológicas y científicas, así como en diferentes campos empresariales e industriales, que permitan también la reducción de la brecha salarial de género.

4 ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

John P. Holdren, presidente de la American Association for the Advancement of Science, resume la relación del medio ambiente con la energía señalando lo siguiente: “La energía es el centro del problema ambiental, el ambiente está en el centro del problema energético, y resolver el dilema energía-economía-ambiente es el centro del desafío del bienestar sustentable tanto para las naciones

⁷ Ghiotto, Luciana - Pascual, Rodrigo F., 2008, TRABAJO DECENTE VERSUS TRABAJO DIGNO: ACERCA DE UNA NUEVA CONCEPCIÓN DEL TRABAJO, UNAM: <https://biblat.unam.mx/hevila/HerramientaBuenosAires/2010/no44/12.pdf>

industrializadas como en desarrollo”⁸. El desarrollo humano, económico y sostenible de un país requiere que el Estado garantice un acceso equitativo a los servicios energéticos. Cuando este acceso falla, se genera inseguridad energética, la cual se manifiesta bajo dos condiciones: la pobreza energética, que es la demanda insatisfecha de energía doméstica necesaria para garantizar la salud, el bienestar y los derechos fundamentales con criterios de calidad y cantidad; y el riesgo energético, que se refiere a la vulnerabilidad en el acceso equitativo debido a amenazas climáticas u otros factores ⁹.

Los instrumentos de políticas públicas implementadas para la gobernanza energética establecidos por la CEPAL (2020), previo diagnóstico y características de cada país y su población, incluyen:

- Infraestructura y tecnología; esto va más allá de la transferencia de tecnología, pues contempla las estrategias de seguridad energética bajo principios de eficiencia, economía y sostenibilidad.
- Mecanismos de participación y coordinación, que incluyen la participación activa de todos los actores, como representantes de la población.
- Acceso a la información, monitoreo y control público; la fiscalización de los servicios para atender a toda la población y principalmente a la más vulnerable, es fundamental al momento de garantizar energía.

- Educación y cultura como una estrategia de concientización y de rescate de las buenas prácticas en la comunidad.

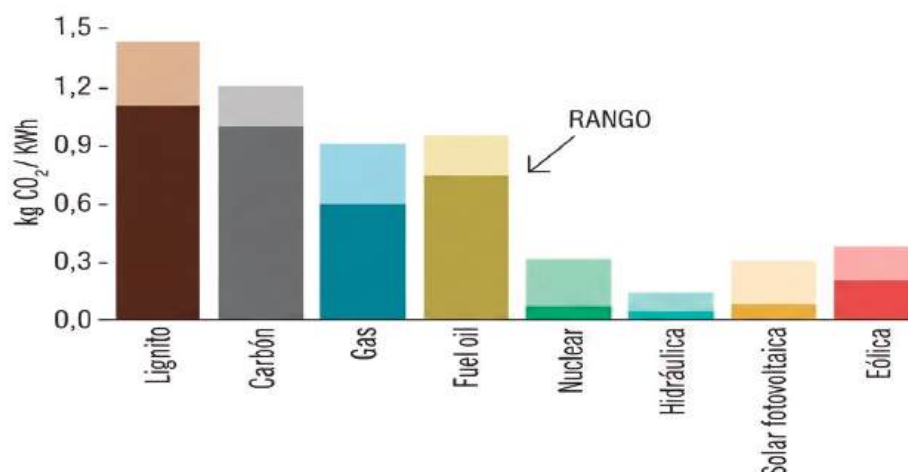
En ese entendido, la seguridad energética como una acción del desarrollo sostenible contempla diferentes lineamientos para la diversificación de fuentes energéticas y abastecimiento. Paralelo a ello, una temática de debate al hablar de energía es cómo la misma se vincula y/o satisface los enfoques medioambientales y climatológicos; en adelante desarrollamos dicha temática con mayor detalle. Zolezzi¹⁰ señala que, en el contexto del cambio climático, un desafío en el tema de la energía es garantizar el suministro, a través de costos competitivos y con protección medioambiental. Para ello, una premisa es contar con una fuente de energía que no contribuya a la emisión de gases de efecto invernadero, requiriéndose políticas que incentiven la eficiencia energética y el uso racional. A continuación, se muestran las emisiones totales de CO₂ en la generación eléctrica:

8 Zanelli, Jorge, *Energía Nuclear ¿Riesgo u oportunidad?; Energía y medio ambiente. Una ecuación difícil para América Latina: los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático*. CLACSSO 2011.

9 A. Urquiza y M. Billi, “Seguridad hídrica y energética en América Latina y el Caribe: definición y aproximación territorial para el análisis de brechas y riesgos de la población”, *Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/138)*, Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2020.

10 Zolezzi, Manuel, *Energía y Medio Ambiente: el desafío de producir energía eléctrica en el contexto del cambio climático; Energía y medio ambiente. Una ecuación difícil para América Latina: los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático*. CLACSSO 2011.

Tabla 2. Emisiones de CO₂ de plantas de generación de electricidad

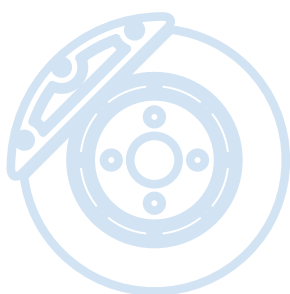


En base al gráfico presentado, Zolezzi establece que las medidas para mitigar el efecto invernadero generado por la energía pasa principalmente por la inversión en investigación y desarrollo, el potenciamiento de las energías renovables y la instauración de instrumentos sólidos para el control y reducción de las

emisiones de GEI, que impliquen el coste impositivo para quienes no lo practican, así como fortalecer la cooperación ambiental internacional, cumpliendo con los compromisos del Protocolo de Kioto respecto a la disminución de emisiones de CO₂.



UNIDAD TEMÁTICA 2

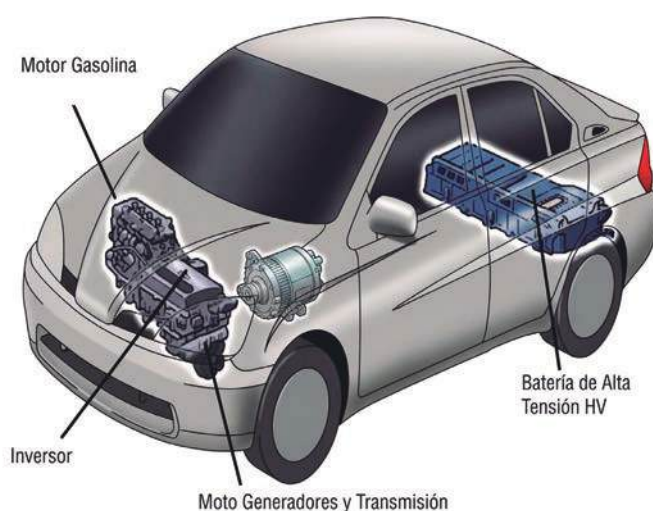


INTRODUCCIÓN A LOS VEHÍCULOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS

1 ESTUDIO DE LOS VEHÍCULOS HÍBRIDOS

Entre los elementos importantes de un vehículo híbrido se encuentra el motor de combustión interna y los motores generadores. Para el sistema de los motores generadores se implementa una batería de alta tensión que permite proveer por momentos potencia eléctrica que permita el movimiento del motor eléctrico. En el esquema inferior se muestra una gráfica de este mecanismo.

Figura 5. Esquema de un vehículo híbrido (Autosoporte, 2014)



litros, con sistema de encendido tipo COP. La distribución del vehículo es variable tipo VVT-i y el sistema de mariposa es motorizado. El régimen máximo de operación de este motor se encuentra alrededor de los 4500 RPM y ofrece una eficiencia muy importante, ya que incorpora un motor de ciclo tipo Atkinson, en el cual la duración de los movimientos de compresión y de expansión se puede fijar independientemente.

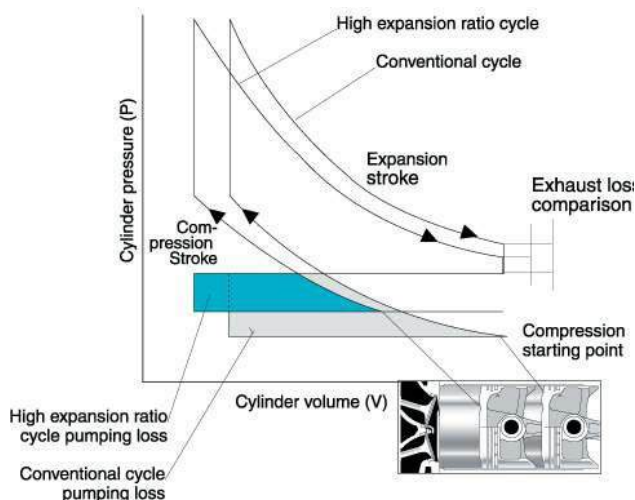
Los controles electrónicos del motor son semejantes a cualquier sistema convencional; incorporan elementos como catalizador, sistema de emisiones evaporativas y la recirculación de gases de escape EGR, que es controlada mediante el sistema de variación de la distribución VVT-i. Algo interesante en el motor es que en este modelo el sistema puede controlar la posición de una válvula que manipula el líquido del refrigerante, lo cual crea aún más eficiencia en el motor. En las siguientes imágenes se puede apreciar la vista del motor 1NZ y la gráfica termodinámica del ciclo del motor respectivamente, evidenciándose la ganancia energética mencionada anteriormente.

1.1 Motor de combustión interna

La puesta a tierra en instalaciones de infraestructura de carga para vehículos eléctricos (EVSE - *Electric Vehicle Supply Equipment*) es el componente de seguridad más crítico. A diferencia de un electrodoméstico común, un cargador de VE maneja potencias elevadas durante tiempos prolongados y está conectado a un vehículo que es, esencialmente, una gran caja metálica con ruedas sobre aislantes (neumáticos). En este modelo está incorporado un motor 1NZ de 1.5

Figura 6. Motor y gráfica termodinámica (Sendyka & Sochaki, 2009)





1.2 Moto generadores

En este sistema se encuentran dos motores generadores trifásicos que trabajan en una tensión aproximada de 500 V CA; cada uno de estos motores cumple con una función específica y son denominados como MG1 y MG2. La corriente alterna es lograda gracias a la electrónica del inversor. En el caso del modelo TOYOTA PRIUS, el motogenerador 1 (MG1) se encarga de generar carga que se distribuye entre la batería y el motogenerador 2 (MG2), y el motogenerador 2 (MG2) se encarga de alternar con el motor de combustión interna, en el movimiento del vehículo en marcha hacia adelante y hacia atrás (reversa). Toda la gestión de funcionamiento es controlada por la unidad de control del sistema Híbrido ECU HV.

Otra función importante del motor MG2 es la de actuar como generador de corriente para reestablecer carga a la batería. En el caso de MG2, solo lo realiza en el frenado, lo que se conoce como sistema de freno regenerativo, es decir, cuando el vehículo comienza a bajar velocidad el motor generador MG2 toma energía cinética de la disminución de velocidad y la transforma en energía eléctrica que luego mediante

el sistema inversor va a la batería de alto voltaje HV. Esto crea gran eficiencia al sistema, puesto que la energía que antes era perdida por fricción en las pastillas de freno ahora es aprovechada como carga para la batería. De todas formas, el vehículo cuenta con un sistema hidráulico de frenado que opera de forma paralela, similar a cualquier vehículo con sistema ABS, solo que en este caso en particular también incorpora control electrónico de la presión de frenado EBD.

Para el arranque del motor de combustión interna existen varias estrategias que incorporan los motogeneradores, puesto que no se cuenta con un motor de arranque convencional. En estado detenido, el arranque lo maneja el motogeneradores 1, y el movimiento del vehículo se logra por una unión de los dos, MG1 y MG2. Todos los movimientos del vehículo son posibles por la acción de un sistema de transmisión continua que incorpora un eficiente sistema de engranajes planetarios que relaciona el movimiento del vehículo con el motor de combustión interna y los motogeneradores MG1 y MG2. En la imagen inferior se puede observar un esquema del conjunto.

Figura 7. Motor térmico y motores generadores eléctricos (Content, 2014)



1.3 Sistema inversor

Este componente es parte fundamental del vehículo híbrido, pues incorpora una gran cantidad de elementos electrónicos y eléctricos. Pero toda la gestión de funcionamiento es controlada por la unidad de control del sistema híbrido ECU HV, que se encarga de controlar al inversor y generar cualquier tipo de diagnóstico del mismo, incluidos los DTC.

Figura 8. Inversor (Toyota, 2003)



El inversor está compuesto por varias etapas o sistemas independientes que cumplen funciones específicas dentro del vehículo:

- **Controlar los motogeneradores MG1 y MG2** mediante un circuito de potencia interno. Este sistema toma la tensión de la batería de alto voltaje (HV) —aproximadamente 220 V DC— y la transforma en corriente alterna trifásica para accionar los motores eléctricos.
- **Alimentar el sistema de aire acondicionado** a partir de la tensión de la batería HV, generando corriente alterna trifásica para alimentar un motor eléc-

trico de frecuencia variable. Esto asegura el funcionamiento del climatizador incluso cuando el motor de combustión interna se apaga temporalmente con el vehículo en movimiento.

- **Convertir la alta tensión de la batería HV a 12 V DC** mediante un convertidor integrado (DC-DC), con el fin de mantener la carga de la batería auxiliar de 12 V que alimenta los accesorios y sistemas convencionales del vehículo.
- **Gestionar la carga de la batería de alta tensión** utilizando la energía generada por los motogeneradores MG1 y MG2, mediante una etapa de potencia basada en transistores IGBT y bajo el control de la unidad de mando del sistema híbrido (ECU HV).
- **Accionar el motogenerador MG1 como motor de arranque** para encender el motor de combustión interna, especialmente cuando el estado de carga de la batería de alta tensión requiere regeneración

En la imagen inferior se puede apreciar parte de la electrónica que se encuentra en el interior de este componente.

Figura 9. Vista interior de un inversor (Alvatronics, 2026)



Dadas las condiciones normales de operación en el vehículo, este elemento requiere evacuar calor, para lo cual cuenta con un sistema independiente de refrigeración por agua con una bomba eléctrica adicional. Esto permite que la electrónica cuente con la seguridad necesaria para su óptimo desempeño. En la imagen inferior se puede observar en desarme el interior de estos conductos en el inversor.

Figura 10. Sistema de refrigeración de un inversor (Alvatronics, 2026)



La conexión de alta tensión en el sistema se efectúa a través de conectores (de color naranja). Su diámetro y conectores son especialmente diferentes a cualquier sistema convencional. Siempre que se trabaje en un sistema de este tipo se recomienda seguir detenidamente las especificaciones del fabricante. En la imagen inferior se puede observar uno de estos conectores, en este caso el que proviene de la batería de alta tensión HV y entra al conjunto del inversor.

Figura 11. Conector de alta tensión de un inversor (Alvatronics, 2026)



1.4 Conjunto de la batería de alta tensión (BATERY HV)

Para el funcionamiento del vehículo es necesario que en determinados momentos los motogeneradores MG1 y MG2 sean accionados con la carga almacenada. Esta carga se encuentra en una batería denominada batería de alta tensión HV, la cual en carga nominal debe contener un mínimo de tensión de 201.6 V. Esta batería se encuentra en la parte posterior del automóvil, debajo de los asientos, y está compuesta por 14 pequeños paquetes de batería de aprox. 14 a 15 V cada uno, conectados en serie. Todo este paquete suministra tensión al conjunto inversor y recibe carga de éste en condiciones específicas, como accionamiento de MG1 o mediante MG2 en el llamado freno regenerativo. El conjunto de la batería está construido a base de níquel-metal; cada uno de los pequeños paquetes no es más que un par de baterías de 7.2 V aproximadamente, colocadas en serie.

Figura 12. Batería de NiMH (Alvatronics, 2026)



Para seguridad del vehículo y procedimientos de reparación y diagnóstico el circuito interno de la batería está dividido en dos, a través de un jumper de seguridad. Si este jumper abre el circuito o se saca, la tensión no llega al inversor y el vehículo no se moverá.

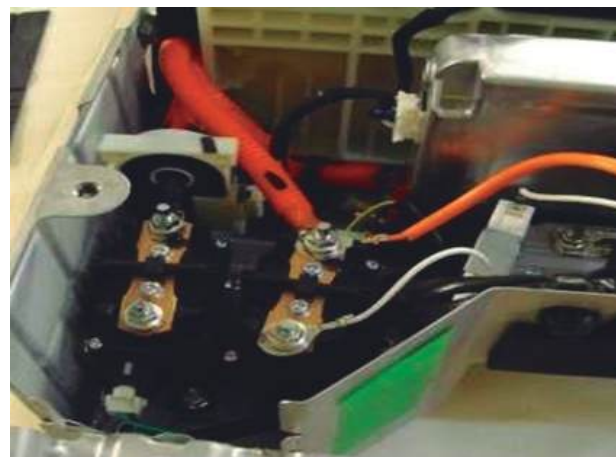
Otros elementos también están colocados en el conjunto de la batería, como los tres *relays* especiales que operan, tanto el positivo como el negativo, de la batería HV, y un circuito especial a través de una resistencia para colocar carga de forma segura antes de colocar la carga directa del inversor sobre la batería.

Figura 13. Conector de servicio (Alvatronics, 2026)



El conjunto de los *relays* está controlado por la ECU HV, la cual se encuentra en la parte delantera del vehículo, pero la batería HV cuenta con su propia unidad de control, que en todo momento evalúa su funcionamiento (carga y descarga), controla un ventilador especial para su refrigeración y mide la temperatura de los paquetes en 4 puntos diferentes. A esta unidad se la denomina ECU BATTERY HV, y funciona con tensión de 12 V tomados de la batería de 12 V.

Figura 14. Relevadores de la batería (Alvatronics, 2026)



1.5 Transmisión (conjunto de engranajes planetarios)

El conjunto de la transmisión de este vehículo cuenta con un sistema de transmisión continua en el cual intervienen de manera alternada tanto el MG2 como el motor de combustión interna. Este proceso es realizado a través de un engranaje planetario que tiene como centro del sistema al MG1 y a su salida al MG2. Para la salida, el movimiento pasa a través de una banda que reduce el ruido generado en el sistema.

Figura 15. Disposición de los motogeneradores (Toyota)



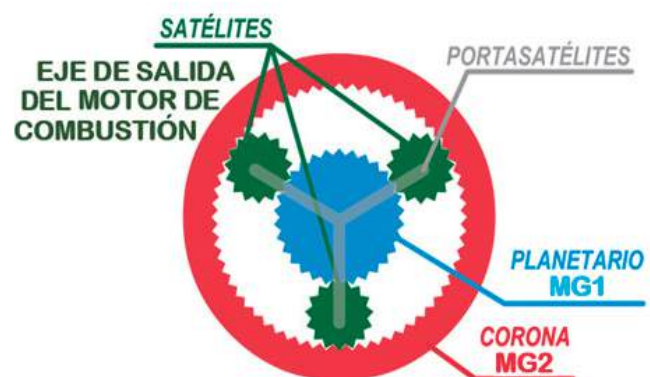
Para el parqueo del vehículo se cuenta con un mecanismo que bloquea y desbloquea de forma directa el eje de salida; esto lo gestiona directamente una unidad de control denominada ECU TRANSMISSION. Este sistema varía un poco de las transmisiones convencionales, puesto que en el interior no existen elementos multiplicadores que cambien de relación en los diferentes cambios. En este conjunto, a medida que el vehículo está aumentando de velocidad, aumenta la rotación RPM del conjunto. Por lo tanto, existe mucha eficiencia, puesto que hay menos componentes en los que se pierda energía, como ocurre con la fricción en otro tipo de motores. En este conjunto, la estrategia de operación del planetario está dada hacia la intervención de MG1 y MG2, y el motor de combustión en el conjunto de engranajes, pero controlada en todo momento por la unidad de control del sistema híbrido ECU HV.

En la salida de potencia del motor de combustión existe un amortiguador de vibraciones que permite un acople muy suave en el normal funcionamiento

del vehículo. El motor de combustión deberá encender y apagar en forma alternada de acuerdo a la conducción del vehículo. Para brindar mayor suavidad en el mecanismo, existe una cadena silenciadora desde el conjunto planetario hasta el eje de salida. Vale aclarar que es muy extraña la conducción puesto que por momentos el vehículo genera movimiento con el motor de combustión detenido, lo cual permite una conducción muy silenciosa.

La gran potencia de salida del sistema debe pasar a través de un complejo sistema planetario, el cual está compuesto por tres partes.

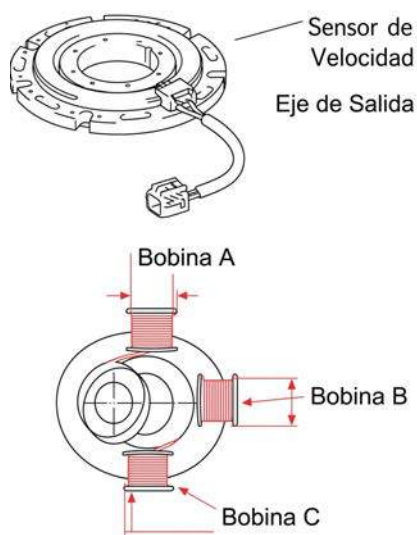
Figura 16. Engranaje planetario (Alvatronics, 2026)



En este caso, el centro de toda la operación es el motogenerador 1. La salida está dada a través del aro exterior directamente colocado al MG2. Este movimiento viaja a través de los engranes intermedios, por la banda silenciadora hacia las ruedas; es decir, si el auto se mueve, MG2 se mueve. El motor de combustión está colocado en los portadores o engranes sueltos, que son el acople entre el sol y el exterior. El funcionamiento propio para cada condición será explicado a detalle más adelante.

Los ejes de salida del sistema mueven otros componentes adicionales, como son la bomba de aceite, la cual se encuentra al final de toda la cadena operativa del conjunto planetario y permite la lubricación del motor. Para poder evaluar y gestionar la operación del conjunto, la ECU HV cuenta con un conjunto de tres sensores que miden la velocidad del eje de salida. Esta información la utiliza para calcular la operación y régimen de cada uno de los motores. El no tener alguno de estos tres sensores en buen estado generará un DTC correspondiente al componente afectado.

Figura 17. Sensor Resolver (Toyota)



1.6 Sistema de información de viaje (display en consola central)

Para el monitoreo por parte del conductor, este sistema cuenta con un menú a través de un *Display Touch Screen* en el cual se puede observar las condiciones de energía del sistema. Es decir, cuenta con un sistema que visualiza desde dónde y hacia dónde va la carga de los motogeneradores, así como el estado de la batería HV. También se puede apreciar si el motor de combustión está generando potencia. Cualquier mal funcionamiento

del sistema será reportado mediante un visual de alerta en la pantalla.

Existen varias posibilidades de gestiones de carga. La visualización es importante, porque ayuda al conductor a tener completo monitoreo del estado de operación del vehículo. Hay que aclarar que algunas conducciones por parte del cliente pueden hacer mucho más ecológico este vehículo.

Aunque no tiene nada que ver con el funcionamiento híbrido, la plataforma del *display* sirve para algunas novedades interesantes, como es la instalación de una cámara que funciona en la marcha atrás. Aunque no hace parte de las estrategias del sistema híbrido, ésta utiliza una señal de la unidad de control de la transmisión para activarse. En la gráfica inferior se puede apreciar esta aplicación.

1.7 Resumen de funciones en elementos importantes de control

Control de la ECU de control HV

La ECU de control HV controla el estado de carga de la batería HV, MG1, MG2, motor eléctrico y control de freno regenerativo. Estos factores se determinan por la posición del cambio, la posición del pedal del acelerador y la velocidad del vehículo. La ECU de control HV también supervisa el estado de carga y la temperatura de la batería de alta tensión HV, MG1 y MG2, para optimizar el control de estos elementos. Cuando la posición de cambio es N (Neutro), la ECU de control HV detiene el control para detener eléctricamente el MG1 y el MG2. Si no hay tracción en las ruedas motrices, la ECU de control HV activa la función de control de la tracción del motor, que limita la rotación del MG2

para proteger la unidad del engranaje planetario y evitar que el MG1 genere demasiada electricidad. Para proteger el circuito de las altas tensiones y asegurar la fiabilidad del cierre, la ECU de control HV realiza un control SMR con 3 relays para conectar y cerrar el circuito de alta tensión.

Control del ECM

El ECM recibe el valor de solicitud de alimentación y las revoluciones deseadas de la ECU de control HV; además, controla el sistema ETCS-i, el volumen de inyección de combustible, el ajuste del encendido y el sistema VVT-i.

Control del inversor

De acuerdo con las señales recibidas de la ECU de control HV, el inversor convierte la corriente continua (batería HV) en corriente alterna (MG1 y MG2) o viceversa. Además, el inversor suministra AC (MG1) y AC (MG2). Sin embargo, cuando el MG1 suministra electricidad al MG2, ésta se convierte en DC dentro del inversor. La ECU de control HV envía la señal al transistor de potencia dentro del inversor para cambiar la fase U, V y W del MG1 y el MG2 y así activarlos. La ECU de control HV se cierra si se produce un recalentamiento, una sobrecarga de corriente o una señal de tensión defectuosa en el inversor.

Control del convertidor elevador

De acuerdo con las señales que emite la ECU de control HV, el convertidor elevador aumenta la tensión nominal de DC en 201.6 V (para batería HV) hasta una tensión máxima de DC de 500 V. El inversor convierte la tensión máxima AC de 500 V generada por MG1 y MG2 en corriente

continua, y el convertidor elevador reduce la corriente continua a 201.6 V DC (para batería HV), según las señales de la ECU de control HV.

Control del convertidor

El convertidor DC/DC reduce la tensión nominal de 201.6 V DC hasta 12 V DC para suministrar electricidad a los componentes eléctricos de la carrocería, así como para recargar la batería auxiliar de 12 V DC. El convertidor mantiene una tensión constante en los terminales de la batería auxiliar.

Control del inversor de A/C

El inversor de A/C convierte la tensión nominal de la batería HV de 201.6 DC a 201.6 V AC y suministra electricidad al compresor eléctrico del sistema de A/C.

Control principal del MG1 y MG2

El MG1 es girado por el motor, genera electricidad de alta tensión (máximo de 500 V AC) para accionar el MG2 y cargar la batería HV. De la misma manera, actúa como motor de arranque para encender el motor. El MG2 proporciona principalmente electricidad adicional al motor para aumentar la fuerza motriz en conjunto. Durante el frenado, o cuando el pedal del acelerador no está pisado, genera electricidad para recargar la batería HV (sistema de freno regenerativo). Los sensores de velocidad detectan la velocidad y la posición de MG1 y MG2, y envían los datos a la ECU de control HV. El MG2 cuenta con un sensor de temperatura integrado que detecta la temperatura del MG2 y envía la información a la ECU de control HV.

1.8 Resumen de funciones en elementos importantes de control

Control de la ECU de control de derrape

Durante la frenada, la ECU de control de derrape calcula la fuerza de frenada total y transmite una solicitud de fuerza de frenado regenerativa a la ECU de control HV. Cuando recibe la señal, la ECU de control HV calcula la cantidad de fuerza de frenada regenerativa necesaria y la transmite a la ECU de control de derrape. Basándose en esta información, la ECU de control de derrape calcula y ejecuta la fuerza de frenado de presión hidráulica necesaria.

Control de la ECU de la batería

La ECU de la batería supervisa el estado de la batería HV y controla el ventilador de refrigeración para mantener la batería de alta tensión HV a una temperatura determinada anteriormente. En consecuencia, se optimiza el control de estos componentes.

Control de cambio

La ECU de control HV detecta la posición del cambio (P, R, N, DoB) según la señal que recibe del sensor de posición del cambio y controla el MG1, el MG2 y el motor, para crear unas condiciones de conducción que se adecuan a la posición de cambio seleccionada. El conjunto de la ECU de control de la transmisión detecta que el conductor ha seleccionado la posición P mediante una señal que recibe de la ECU de control HV. Entonces, el conjunto de la ECU de control de la transmisión acciona el actuador de control del cambio para bloquear mecánicamente el transeje.

Control de colisión

Cuando se produce una colisión, si la ECU de control HV recibe una señal de

despliegue del airbag del sensor, del airbag central o una señal de activación del sensor del disyuntor de circuitos situado en el inversor, apaga el SMR y el interruptor de encendido, para cortar completamente el suministro de energía.

Control del funcionamiento del sistema de control de velocidad de crucero

Cuando la ECU de control de velocidad de crucero integrada en la ECU de control HV recibe una señal de control de la velocidad de crucero, calcula el valor de solicitud y las fuerzas motrices del motor, MG1 y MG2, para alcanzar una combinación óptima.

Control de la iluminación del indicador de advertencia y del indicador

Ilumina o hace parpadear las luces para informar al conductor sobre el estado del vehículo o acerca de una avería del sistema.

Diagnósticos

Cuando la ECU de control HV detecta una avería, diagnostica y almacena los valores referentes al fallo.

Función a prueba de fallos

Cuando la ECU de control HV detecta una avería, detiene o controla el actuador y las ECU, según los datos que tenía almacenados en la memoria.

Convertidor DC/DC

Disminuye la tensión nominal de 201.6 V DC hasta 12 V DC, para suministrar alimentación eléctrica a los componentes eléctricos de la carrocería, así como para recargar la batería auxiliar (12 V DC).

Inversor del A/C

Convierte la tensión nominal de la batería HV de 201.6 V DC a 201.6 V AC, y suministra electricidad al compresor del inversor eléctrico del sistema de A/C.

SMR (relay principal del sistema)

Conecta y desconecta el circuito de alta tensión entre la batería y el conjunto del inversor mediante la utilización de una señal proveniente de la ECU de control de HV.

Unidad de engranaje planetario

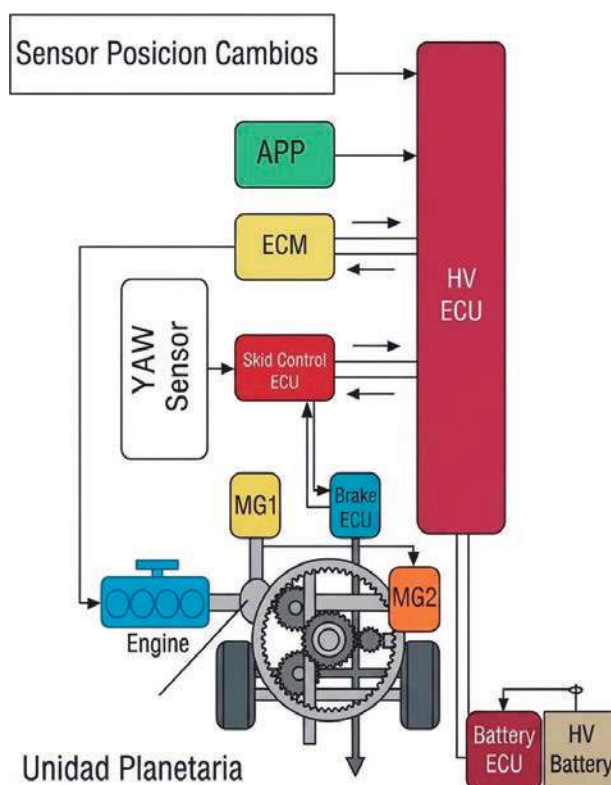
Distribuye la energía motriz del motor según sea necesario, para accionar directamente tanto el vehículo como el generador.

1.9 Unidades de control relacionadas (ECUS)

Este vehículo cuenta con un complejo mecanismo de funcionamiento en el cual alterna las operaciones de motores eléctricos y el motor de combustión interna. Para que todo este revolucionario sistema opere de forma segura y fiable, debe medir y controlar gran número de variables de forma independiente, como, por ejemplo, la temperatura de la batería o la temperatura de los inversores, entre otras. Para esto, el sistema debe ser descentralizado, teniendo unidades de control independiente, pero relacionándolas todas a través del bus de datos; es decir, aunque una unidad de control no reciba directamente la información de un componente, sí la va a tener todo el tiempo disponible, ya que esta información viajará permanentemente por el bus. En la gráfica se pueden apreciar

las principales unidades de control que están relacionadas para el funcionamiento.

Figura 18. Unidades de control electrónico relacionadas con el sistema de control híbrido (Toyota)



ECM (Unidad de control del motor)

Permite el funcionamiento del motor a los diferentes regímenes. Dentro de su programación está apagar y encender el motor de combustión cuando la unidad HV lo requiera. Tiene las condiciones similares de operación de cualquier ECM convencional, la única diferencia en cuanto a sensores es que no toma la señal del APP (sensor de posición del acelerador), solo recibe el mensaje a través del bus de datos.

BATTERY ECU (Unidad de control de la batería de alta tensión)

Esta unidad controla todo lo relacionado con la batería. Se encuentra al lado de ella en ubicación y está todo el tiempo monitoreando la operación de la misma. Entre sus funciones está monitorear la carga de los paquetes dentro de la batería de alta tensión. También controla la temperatura interna del paquete, y en la medida de lo necesario acciona un electroventilador con el cual se lleva a temperatura óptima la batería. Es importante conocer que el negativo de la batería HV no es el mismo que la batería auxiliar de 12 V, por lo cual esta unidad maneja los dos niveles de referencia, pero su electrónica de funcionamiento interna (fuente y procesamiento de datos) trabaja con la referencia de 12 V. Este módulo tiene adicionalmente la característica de medir la corriente que entra o sale de la batería HV, lo cual se realiza mediante la ubicación de un sensor de corriente que se encuentra ubicado en el conjunto de la batería HV.

HV ECU (Unidad de control del sistema híbrido)

Es el centro de la operación híbrida, tiene el control total de la operación, comunica con todos los módulos importantes del sistema híbrido y controla de forma directa la electrónica del inversor. También recibe señales de los sensores, como el APP (sensor de posición del acelerador) y señales correspondientes al seleccionador de marchas por parte de la unidad de la transmisión. Esta unidad controla en qué momento se debe accionar y desconectar el motor de inyección, al igual que la operación de los motogeneradores. Es importante saber que esta ECU no controla

los actuadores del motor de combustión, como tampoco interviene directamente en la manipulación (potencia) de los motogeneradores, solo se encarga de la gestión.

SKID CONTROL ECU (Unidad de control del derrape)

Tiene la función de controlar aspectos relacionados con el control del frenado y el sistema EBD (distribución de la presión de frenado). Entre sus funciones está la de medir los movimientos del centro de gravedad del vehículo para una mejor operación de la secuencia del frenado, esto asociado a la unidad del sistema de frenos. En ese momento el sistema SKID adopta estrategias diferentes a las usadas en un vehículo convencional; el sensor YAW mide el giro respecto al centro de gravedad del automóvil y envía esta señal al módulo SKID, que luego intercambia información a través de bus de datos con el Módulo HV.

BRAKE ECU (Unidad de control del frenado)

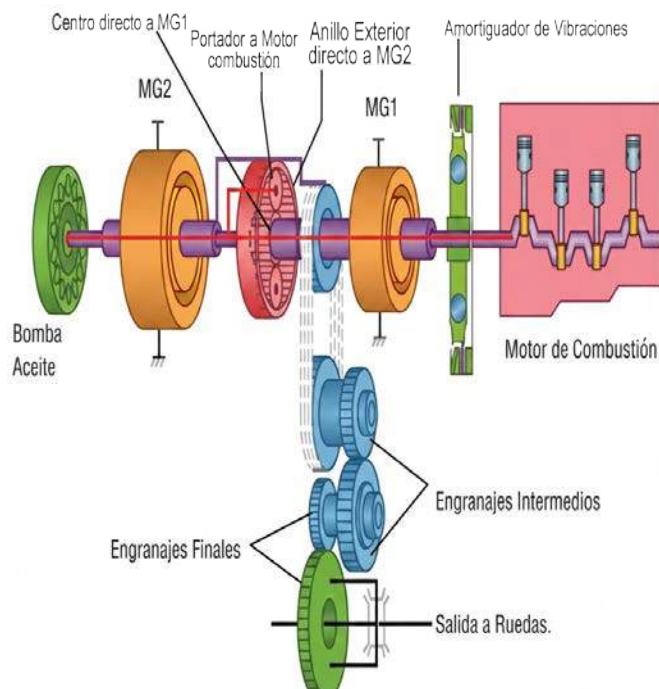
Tiene como función principal gestionar el frenado del vehículo (ABS). Su funcionamiento es similar a cualquier sistema ABS, pero en este caso varía puesto que por momentos el frenado no lo realiza completamente la hidráulica si no que interviene el motogenerador 2 MG2. Otro avance importante en este modelo es que en el frenado existe una regulación de la presión de frenado, que funciona porque en la hidráulica están dispuestos unos sensores que miden la presión de cada circuito y una gran bomba hidráulica dentro de la unidad de presión que generará la presión requerida en cada rueda. Toda esta

unidad se comunica a través del bus de datos con las demás unidades de control.

2 EXPLICACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HÍBRIDO

La operación del sistema híbrido requiere que gran número de condiciones estén establecidas antes que la unidad HV comience la estrategia de operación del motor de combustión y los motores generadores. Como se comentó anteriormente, el conjunto está formado por los dos motogeneradores y el motor de combustión, todo unido a través del conjunto sistema planetario; este último permite el aporte de potencia de cada uno de los elementos. En la gráfica inferior se observa cómo están relacionados mecánicamente.

Figura 19. Esquema del funcionamiento del sistema híbrido (Autosoporte, 2014)



En la gráfica se puede observar los dos motogeneradores y el motor de combustión. El motor de combustión va directo al portador (conjunto de portadores), a través del eje más delgado (sombreado en rojo en la figura) y finaliza en la bomba de aceite. El acople entre el eje del motor y los portadores se presenta a través de rodamientos en su interior.

Si el motor de combustión se mueve, no necesariamente existe movimiento en las ruedas, puesto que, al moverse el motor de combustión y estar frenado el aro exterior que esta sujeta al MG2 (línea violeta), la única posibilidad de movimiento es para MG1. Es decir, si el eje de salida está bloqueado (posición de parqueo) y el motor de combustión está encendido (movimiento de los portadores), MG1 tendría necesariamente que moverse por reacción; de esta forma se convertiría en generador para cargar la batería HV.

La misma situación anterior se puede analizar, pero suponiendo en este caso que el motor de combustión está apagado y el automóvil detenido en parqueo. La única forma de hacer girar el motor de combustión es que se accione el MG1. En ese momento, al accionarse y estar frenado el aro exterior, la única posibilidad es que el conjunto de los portadores se mueva, y como están conectados directamente al motor de combustión, éste tendrá que moverse y así arrancar.

El MG2 va directo al aro exterior (línea violeta) y por consiguiente al movimiento de las ruedas. Si el eje de salida no está bloqueado y si MG2 se mueve, el auto comenzará a moverse el vehículo. Si el MG2 gira de forma contraria, el auto debería moverse en marcha atrás. Un ejemplo

de este acople es que si el automóvil se coloca en neutral y alguien lo mueve de forma externa (jalado, por ejemplo), el MG2 se tiene que mover de forma obligada porque está directamente en la salida. En esta misma idea, si el MG2 está en movimiento (por ejemplo, vehículo en movimiento), y el MG1 coloca resistencia, se moverá todo el conjunto como un solo elemento, aportando potencia al MG2 y el motor de combustión; el MG1 sería arrastrado, generando energía para el sistema.

Algo interesante sucede si el vehículo está en movimiento y se quiere frenar. Para disminuir la velocidad, el MG2 se convierte en generador, tomando energía cinética del movimiento y transformándola en energía eléctrica que, mediante el inversor, pasará a las baterías; esto se conoce como freno regenerativo.

La secuencia de operaciones para el accionamiento de los motogeneradores y el motor de combustión es el secreto para crear esta nueva tecnología. No tiene sentido que el motor de combustión actúe la mayor parte del tiempo, y tampoco se podría presentar que el MG2 esté todo el tiempo trabajando, puesto que se descargaría la batería. Es entonces que se tiene que tener una secuencia lógica de procesos para poder tener el motor de combustión lo menos encendido posible y la carga de la batería siempre de forma óptima.

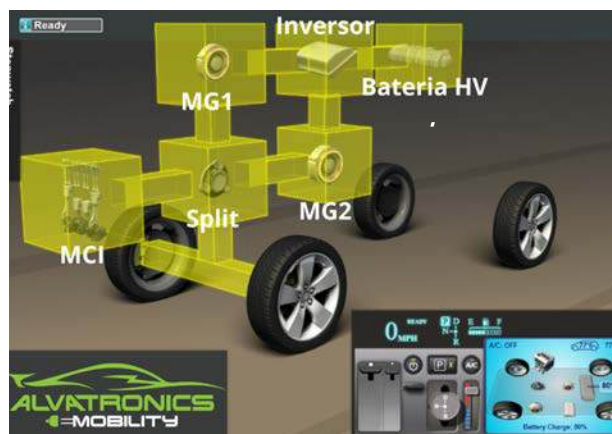
2.1 Modos de operación

A continuación, se explicará cada una de las estrategias que debe tener el sistema para poder operar cada una de las marchas. Todas las estrategias son comandadas por la unidad HV.

Vehículo detenido

Si el vehículo está detenido y la carga de la batería se encuentra en condición alta, el motor de combustión estará apagado. El motor de combustión interna arrancará automáticamente solo si la carga de la batería comienza a bajar o si ésta se encuentra por debajo del 30%. En este modelo de TOYOTA THS -II (2004 y posterior), para disponer de aire acondicionado o asistencia a la dirección no es necesario encender el motor de combustión si el vehículo está detenido, puesto que el mecanismo compresor del aire acondicionado y la dirección del vehículo son eléctricos. En el caso del sistema de aire acondicionado, se utiliza un motor trifásico de frecuencia variable, y en el caso de la dirección, se emplea un motor DC. Eventualmente la unidad del sistema híbrido seleccionara si encender o no el motor de combustión.

Figura 20. Esquema de vehículo detenido (Alvatronics, 2026)

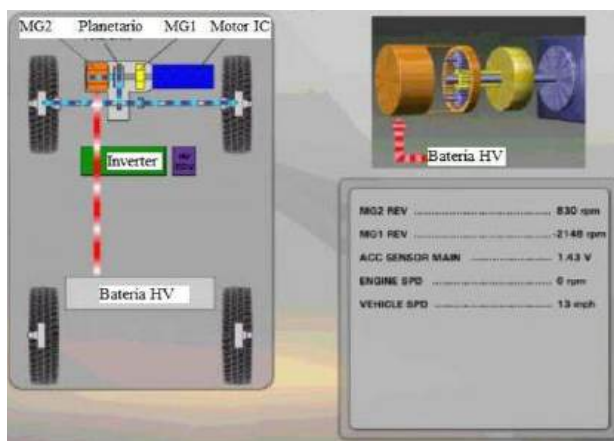


Empezando a mover el vehículo

Cuando el vehículo comienza a moverse inicialmente y la carga a la cual está sometido es baja, funciona con el accionamiento del motogenerador MG2. En este momento el motor de

combustión interna está apagado; si la carga sobre el vehículo comienza a aumentar, entrará en funcionamiento el motor de combustión. Esta estrategia también depende del nivel de carga del sistema HV. Para calcular la carga es muy importante la posición del pedal del acelerador (APP), el cual va directamente a la ECU HV y no al ECM. La energía para el movimiento del vehículo en la condición mencionada es tomada de la batería HV. Esta operación de comienzo de movimiento genera un arranque muy silencioso.

Figura 21. Esquema de vehículo en movimiento (Alvatronics, 2026)

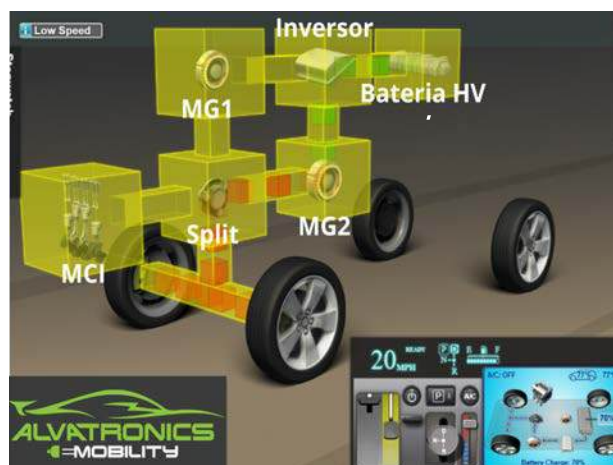


Conducción normal

En esta condición, cuando el vehículo se mueve a velocidad normal, a bajas velocidades, entre 30 y 70 Km/h, el motor de combustión interna se enciende y genera potencia. En determinados momentos, el MG2 se acciona y provee una asistencia eléctrica como ayuda mecánica al motor de combustión, en cuyo caso el MG1 gira en el mismo sentido que el MG2 y se convierte en un generador que provee carga eléctrica al sistema, usada principalmente en el MG2. Es decir, con el movimiento el MG1 genera carga que hace que el MG2

se mueva, y el MG2 ayuda al motor de combustión a mover el vehículo.

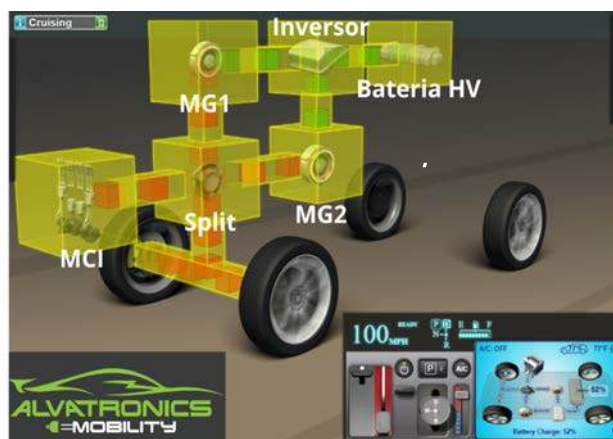
Figura 22. Esquema de vehículo en modo de conducción normal (Alvatronics, 2026)



Condición de aceleración fuerte y velocidad crucero

Para aceleraciones fuertes o altas velocidades (aproximadamente a 100 Km/h), el MG2 genera potencia para ayudar al motor de combustión. La batería suministra electricidad para el movimiento del MG2, en cuyo caso el MG1 también recibe electricidad de la batería. Para girar en reversa esto crea un radio de Overdrive (sobremarcha), con el objetivo de generar la máxima velocidad.

Figura 23. Esquema de vehículo en aceleración fuerte (Alvatronics, 2026)



Desaceleración y frenado

Esta condición comienza cuando el conductor levanta el pedal del acelerador y el vehículo está en velocidad. En ese momento el MG2 se convierte en generador, y con el movimiento del vehículo comienza a cargar la batería HV. De esta forma, a medida que toma energía cinética, disminuye la velocidad del vehículo, aunque en todo momento los frenos están en paralelo controlando la situación de forma hidráulica. Al proceso se lo denomina de frenos regenerativos. En este momento el motor de combustión interna se apaga y el MG1 gira al contrario para crear el radio de giro. Toda la carga es gestionada por la unidad HV, pero permitida en potencia a través del inversor.

Figura 24. Esquema de vehículo en frenado (Alvatronics, 2026)



Reversa

Cuando el vehículo se mueve en reversa, el MG2 trabaja como motor tomando energía de la batería HV, pero girando en sentido contrario, permitiendo que el vehículo gire de forma reversa. En este caso el MG1 gira en la misma dirección de forma libre, lo cual no genera electricidad.

Figura 25. Esquema de vehículo en reversa (Alvatronics, 2026)



Monitoreo de parámetros

Es posible observar en la línea de datos del escáner el funcionamiento de los motores MG1 y MG2 e interpretar los movimientos comentados anteriormente. El estudio de estos diagnósticos se realizará en el capítulo correspondiente. La siguiente tabla muestra unas condiciones reales evaluadas con el scanner para la operación de los motogeneradores. En el capítulo correspondiente a sistemas planetarios se estudiará a detalle este comportamiento.

Tabla 3. Condiciones reales evaluadas con el scanner para la operación de los motogeneradores (Alvatronics, 2026)

Condición	MG 1 (RPM)	MG 2 (RPM)
Motor parado en contacto	0	0
Motor parado con motor gasolina encendido	9000	0
Rodando con motor eléctrico	-440	170
Rodando manera mixta (2 motores)	4700	500
Cargando baterías	2500	900
En freno regenerativo	-4000	2000
Rodando en retro	690	-268
Rodando en neutro	-2700	1000

A continuación, se va a realizar una explicación de las condiciones capturadas con el escáner en una prueba de ruta.

2.2 Análisis de las diferentes condiciones de manejo

Motor parado e ignición colocada

En este momento solo se encuentra colocada la ignición, o bien puede estar el motor prendido con la batería cargada, en cuyo caso en el tablero aparecerá la palabra READY indicándonos que el auto está listo para ser usado. Las RPM de MG1 y MG2 serán cero porque no tienen movimiento para ver RPM en MG2 ni necesitan cargar la batería para ver movimiento en MG1.

Motor parado con motor a gasolina

En esta condición el motor está en parking, se encuentra encendido, pero se detectó que la batería estaba un poco baja y que requiere carga. Entonces MG1 tendrá RPM's positivas (entre 7000 y 9000 RPM) para poder encender al motor de gasolina y que éste ahora convierta al motor MG1 en generador para cargar la batería. En esta condición, como no hay movimiento de las ruedas, el MG2 se encuentra detenido con cero RPM.

Rodando con motor eléctrico

Cuando el auto comienza a rodar y encuentra una buena carga de batería (y además no hay una exigencia alta en la aceleración), puede ser movido únicamente por el MG2. Entonces tendremos RPM positivas en el MG2 que nos indicarán que el auto está en

movimiento por acción de éste, en tanto que el MG1 presentará RPM negativas, ya que debe rodar en sentido contrario para que no haga encender el motor térmico.

Rodando de manera mixta (2 motores)

En este caso se hace una exigencia mayor de aceleración, por ejemplo para rebasar a otro automóvil o en una pendiente positiva. Al detectar esto el sistema, veremos a al MG2 con RPM positivas para mover al auto, pero adicionalmente ahora se debe conectar el MG1 con RPM positivas, también para poder encender el motor de gasolina y que este a su vez aporte al movimiento y cumpla con el requerimiento de potencia. Una vez encendido el motor térmico, queda aportando al movimiento junto con el MG2, mientras que el MG1 vuelve a tomar valor negativo de RPM si es que no requiere carga la batería o valores positivos para aportar con carga al MG2, y si le sobra energía cargar la batería.

Cargando la batería

En esta condición se requiere que se encienda el motor térmico para que conviertala acción del motorengenerador. Entonces el MG2 seguirá con RPM positivas por la acción del movimiento y el MG1 tomará ahora un valor también positivo para poder encender el motor térmico y comenzar la generación.

En freno regenerativo

En la acción de frenado regenerativo no se requiere que el motor térmico esté encendido para cargar la batería, pues utilizó el movimiento del mismo auto. Por lo tanto, el motor MG1 estará con valor de

RPM negativo para no encender al motor térmico y el MG2 con un valor de RPM positivo del movimiento, que esta vez servirá de carga a la batería, así como de freno eléctrico.

Rodando en retro

Ésta es la única condición en la que el motor MG2 adquiere un valor de RPM negativo, ya que el sentido de giro del vehículo es contrario. Por otra parte, el MG1 toma ahora un valor positivo sin que esté cargando la batería ni queriendo encender al motor térmico. Su valor de RPM es solo por el movimiento mecánico.

Rodando en neutro

En la condición de neutro el auto no carga a la batería, pues por seguridad se requiere que esté en parking cuando está detenido, ya que tendrá así un bloqueo eléctrico al movimiento. Pero si rodamos en posición neutro tendremos un valor de RPM negativo para MG1 y positivo por el movimiento para MG2, valores que no tienen ninguna relación eléctrica y están dados solo por la inercia del movimiento.

3 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

Alternative Fuels Data Center: Electric Vehicles

<https://afdc.energy.gov/vehicles/electric>

Alternative Fuels Data Center: Hybrid Electric Vehicles

<https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-basics-hev>

Electric and Hybrid Vehicles – NHTSA

<https://www.nhtsa.gov/vehicle-safety/electric-and-hybrid-vehicles>

Electric and Hybrid Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives (3rd Edition)

<https://www.wiley.com/en-mx/Hybrid+%3A+Principles+and+Applications+with+Practical+Perspectives%2C+3rd+Edition-p-9781394295128>

HEV 4011 - Electric Hybrid Fundamentals

https://catalog.tbr.edu/preview_course_nopop.php?catoid=1&coid=1854

Hybrid - International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA)

<https://oica.net/hybrid-2/>

Introduction to Electric Vehicles (IEEE Webinar)

<https://events.vtools.ieee.org/m/229039>

Types of electric vehicles

<https://www.energy.gov.au/electric-vehicles/electric-vehicle-basics/types-electric-vehicles>



UNIDAD TEMÁTICA 3



EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

1 FUNDAMENTOS DE LA ALTA TENSIÓN EN EL AUTOMÓVIL

1.1 Definición de alta tensión (AT) según la normativa automotriz

En el ámbito de la ingeniería automotriz, el concepto de “alta tensión” difiere significativamente de las definiciones utilizadas por las compañías eléctricas en la distribución de red (donde la alta tensión empieza a partir de los 1,000V o 36,000V). En el sector automotor, el umbral de peligrosidad es mucho más bajo, debido a las condiciones de operación del vehículo y la exposición del técnico.

La norma internacional fundamental que define estos rangos es la ISO 6469-3 (Vehículos de carretera de propulsión eléctrica. Especificaciones de seguridad). Esta normativa clasifica los voltajes en “clases de tensión” para determinar qué componentes representan un riesgo eléctrico para el ser humano. Según esta norma, un sistema de propulsión eléctrica se considera de alta tensión (o técnicamente Clase de Voltaje B) cuando opera en los siguientes rangos:

- **Corriente alterna (AC):** Tensiones superiores a 30 V rms (valor eficaz) hasta los 1,000 V.
- **Corriente continua (DC):** Tensiones superiores a 60 V hasta los 1,500 V.

Todo lo que se encuentre por debajo de estos niveles (como la batería convencional de 12V o los sistemas de híbridos ligeros de 48V) se clasifica como Clase de Voltaje A (baja tensión) y, en condiciones normales, no requiere el uso de EPP dieléctrico especializado para el contacto directo.

A. Clasificación por color de aislamiento

Para garantizar la seguridad y la identificación rápida, la normativa automotriz obliga a los fabricantes a utilizar un código visual universal.

B. Regla de oro

Todo cable, conector o componente que transporte voltajes de Clase B (alta tensión) debe estar identificado con un aislamiento o recubrimiento de color naranja brillante. Este estándar permite que cualquier técnico, bombero o personal de rescate identifique instantáneamente que ese cable representa un riesgo de electrocución mortal y no debe ser manipulado sin el equipo y protocolo adecuados.

C. Justificación del umbral de 60V DC

La razón por la cual la normativa automotriz sitúa el límite en los 60V DC responde a la Ley de Ohm. En condiciones de taller (manos sudorosas, contacto con superficies metálicas del chasis), la resistencia eléctrica promedio del cuerpo humano se reduce. donde I es la corriente que atraviesa el cuerpo, V es el voltaje y R es la resistencia. A partir de los 60V DC, la corriente eléctrica tiene la “presión” suficiente para vencer la resistencia de la piel y alcanzar una intensidad (medida en miliamperios, mA) capaz de causar una parálisis muscular que impida al técnico soltar el componente (el efecto de “quedarse pegado”) o provocar daños irreversibles.

D. Diferencia entre tensión de red y tensión de batería

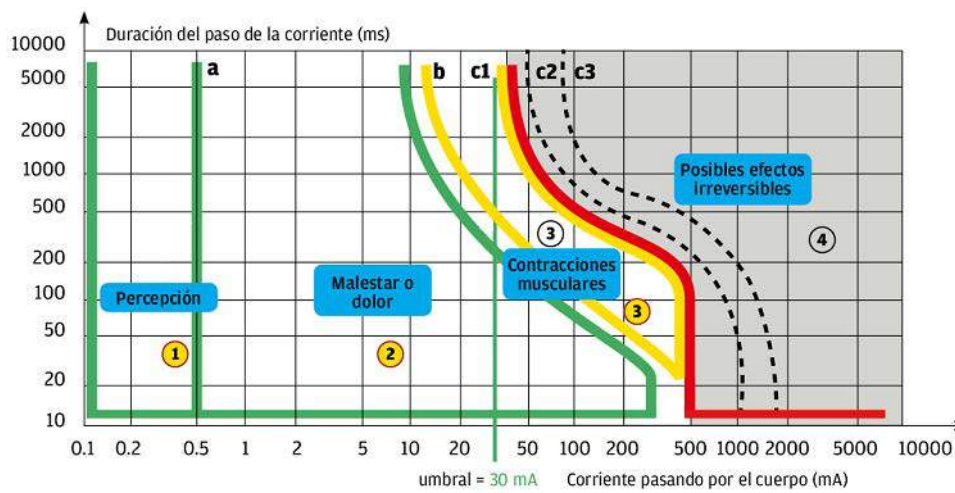
Es vital aclarar que, aunque en una casa 120V o 220V son peligrosos, la alta tensión de un vehículo eléctrico es mucho más crítica porque:

- Es corriente continua (DC): La DC es más difícil de “soltar” que la alterna, ya

que provoca una contracción muscular continua.

- No hay toma a tierra convencional: el sistema de alta tensión en el vehículo está “flotando” (aislado del chasis), lo que requiere equipos de medición especiales para detectar fugas de aislamiento.

Figura 26. Efecto de la corriente en el cuerpo (Hernández, 2026)



1.2 Componentes que operan con AT

En un vehículo eléctrico o híbrido, la arquitectura de alta tensión está separada de la red convencional de 12V. Los componentes que detallamos a continuación forman el “tren de potencia” y están interconectados por el cableado naranja de alta capacidad.

A. Batería de alta tensión (HV Battery Pack)

Es el “depósito de energía” del vehículo. A diferencia de la batería de plomo-ácido de 12V, es una unidad masiva compuesta por cientos de celdas de Ion-Litio o NiMH conectadas en serie y paralelo.

- **Función:** almacena energía en forma de corriente continua (DC) para alimentar el motor y otros sistemas de potencia.

- **Voltaje de operación:** dependiendo del fabricante, suele oscilar entre 200V y 800V DC.

- **Riesgo técnico:** La batería de tracción siempre tiene energía. Incluso si el vehículo está apagado, el voltaje permanece dentro de la carcasa de la batería. El peligro es constante hasta que se retira el conector de servicio y se verifica la ausencia de tensión.

B. Inversor (Power Inverter)

Es el cerebro electrónico del sistema de propulsión. Se ubica generalmente entre la batería y el motor eléctrico.

- **Función:** su tarea principal es realizar la conversión de energía. Toma la corriente continua (DC) de la batería de tracción y la transforma en corriente alterna (AC) trifásica para hacer girar el motor. También actúa en sentido inverso durante el frenado regenerativo.
- **Componentes críticos (capacitores):** el inversor contiene condensadores de alta capacidad que almacenan energía para estabilizar el voltaje.
- **Riesgo técnico:** debido a estos condensadores, el inversor puede retener una carga letal incluso después de desconectar la batería. Por ello, el protocolo de seguridad exige esperar de 5 a 10 minutos para que esta energía se disipe antes de abrirlo o tocar sus terminales.

C. Motogenerador (Electric Motor/Generator)

Es la unidad que convierte la energía eléctrica en movimiento mecánico y viceversa.

- **Función:** en modo tracción, recibe AC trifásica del inversor para mover las ruedas. En modo generación (frenado regenerativo), aprovecha la inercia del vehículo para generar electricidad y enviarla de vuelta a la batería.
- **Voltaje de operación:** opera con corriente alterna (AC) de alto voltaje.
- **Riesgo técnico:** los motores eléctricos de los EV utilizan potentes imanes permanentes.

D. Otros componentes periféricos de AT

- **Compresor del aire acondicionado:** en los HEV, el compresor es eléctrico y recibe directamente 400V para poder funcionar con el motor térmico apagado.
- **Convertidor DC/DC:** reduce la alta tensión (400V) a baja tensión (14V) para cargar la batería pequeña y alimentar las luces y la radio.

Tabla 4. Componentes y su función de seguridad (Alvatronics, 2026)

Componente	Tipo de corriente	Función de seguridad
Batería de alta tensión	DC	Fuente principal de energía; requiere aislamiento total del chasis.
Inversor	DC a AC / AC a DC	Gestión de potencia; riesgo por carga residual en condensadores.
Motogenerador	AC	Propulsión y recuperación; riesgo de generación por rotación.
Cables naranjas	DC o AC	Conductores blindados; nunca deben ser pelados o pinchados.

2 RIESGOS Y EFECTOS DE LA ELECTRICIDAD EN EL CUERPO HUMANO

2.1 Naturaleza del choque eléctrico en corriente continua (DC)

Para entender el peligro en los vehículos eléctricos (EV), primero debemos diferenciar la corriente alterna (AC) que usamos en los hogares de la corriente continua (DC), que es la que fluye desde la batería de tracción. Aunque ambas pueden ser fatales, su “comportamiento” al entrar en contacto con el cuerpo humano es drásticamente diferente.

A. El concepto de flujo unidireccional

A diferencia de la AC, donde los electrones oscilan (cambian de dirección 50 o 60 veces por segundo), en la corriente continua (DC) los electrones viajan en un solo sentido, de forma constante y sin interrupciones. En un choque eléctrico, esta continuidad provoca que no exista un “paso por cero” (el momento en que la tensión de la AC llega a 0V durante su ciclo). Esto significa que no hay un instante de alivio que permita a los músculos relajarse, lo que hace que la DC sea extremadamente difícil de interrumpir una vez que el circuito se cierra a través del cuerpo.

B. El efecto de “congelación muscular” (tetanización)

Uno de los peligros más graves de la DC en alta tensión es la contracción muscular sostenida.

C. En corriente alterna

Los espasmos suelen ser violentos y pueden llegar a “lanzar” a la víctima lejos de la fuente de energía.

D. En corriente continua

La corriente provoca una contracción muscular constante y potente. Si el técnico agarra un cable naranja con la palma de la mano, los músculos flexores se contraerán de tal forma que le será físicamente imposible soltar el componente. El técnico queda “pegado” o “atrapado” por la corriente, aumentando drásticamente el tiempo de exposición y la gravedad de las lesiones.

Diferencia en los umbrales de percepción y reacción: la normativa técnica internacional señala que el cuerpo humano tiene una mayor resistencia inicial a la DC que a la AC, pero una vez que se vence esa resistencia, la DC es más letal en términos de daño tisular.

Tabla 5. Efectos de la corriente (Alvatronics, 2026)

Tipo de corriente	Umbral de percepción	Reacción de “soltar”	Riesgo de fibrilación
AC (50/60 Hz)	0.5 mA	10 mA	Muy alto (interfiere con el ritmo)
DC	2 mA	40 - 60 mA	Alto (requiere más energía, pero es constante)

2.2 Factores de riesgo

La severidad de las lesiones producidas por un choque eléctrico en un vehículo eléctrico no depende de un solo factor, sino de la interacción de cuatro variables críticas.

A. Intensidad de la corriente (I)

Es el factor determinante de la muerte. No es el voltaje (tensión) lo que mata, sino la cantidad de electrones (amperaje) que logran atravesar el cuerpo. En los vehículos eléctricos, las baterías pueden entregar cientos de amperios, pero solo se necesitan unos pocos miliamperios (mA) para causar daños fatales:

- **1 a 5 mA:** Umbral de percepción. Se siente un ligero hormigueo.
- **10 a 20 mA:** “Umbral de no soltar”. Contracciones musculares dolorosas.

- **50 a 100 mA:** Fibrilación ventricular y posible muerte si no hay atención inmediata.
- **Más de 1 amperio:** Quemaduras graves y paro cardíaco inmediato.

B. Resistencia corporal (R)

El cuerpo humano actúa como una resistencia eléctrica. Según la Ley de Ohm ($I = V / R$), a menor resistencia, mayor será la intensidad que nos atraviese. La resistencia varía según:

- **El estado de la piel:** la piel seca tiene una resistencia alta (hasta 100,000 Ohms), pero la piel húmeda o sudorosa la reduce drásticamente (a menos de 1,000 Ohms).
- **Puntos de contacto:** el uso de herramientas o el contacto con el chasis metálico reduce la resistencia total.
- **Presión de contacto:** a mayor presión sobre el componente con tensión, menor es la resistencia y más grave el choque.

C. Trayectoria de la corriente

El camino que sigue la electricidad a través del cuerpo define qué órganos serán dañados. Las trayectorias más peligrosas son:

- **Mano a mano:** la corriente atraviesa directamente el tórax, afectando el corazón y los pulmones. Es el accidente más común al manipular conectores de batería.
- **Mano a pie:** la corriente recorre todo el tronco y órganos vitales para buscar la

salida a tierra a través del calzado (de ahí la importancia de las botas dieléctricas).

- **Mano a cabeza:** afecta el sistema nervioso central y puede causar parálisis respiratoria inmediata.

D. Tiempo de exposición

El daño es acumulativo. Cuanto más tiempo esté la persona bajo el efecto de la corriente, mayores serán las lesiones internas y las probabilidades de que el corazón entre en una arritmia irreversible.

2.3 Efectos fisiológicos

Cuando el cuerpo humano se ve sometido a las tensiones de un vehículo eléctrico (200V - 800V DC), la electricidad interactúa con los sistemas biológicos de tres formas distintas y potencialmente mortales.

A. Tetanización muscular (efecto de “agarrotamiento”)

El sistema nervioso humano funciona mediante impulsos eléctricos de muy baja intensidad para ordenar la contracción de los músculos. Cuando una corriente externa de alta intensidad (DC) atraviesa el cuerpo, anula las señales del cerebro.

Descripción: los músculos se contraen de forma involuntaria y con una fuerza máxima.

B. Quemaduras térmicas (efecto Joule)

La electricidad, al encontrar la resistencia de la piel y los tejidos internos, genera calor de acuerdo con la Ley de Joule.

- **Quemaduras externas:** se producen en los puntos de entrada y salida de la corriente. En alta tensión, estas quemaduras suelen ser de tercer grado y presentan un aspecto carbonizado.
- **Quemaduras internas:** son las más peligrosas en mecánica automotriz. La corriente viaja por el interior del cuerpo buscando los tejidos de menor resistencia (nervios, vasos sanguíneos y músculos), literalmente “cocinando” los órganos a su paso.

Figura 27. Quemadura por electricidad
(Alvatronics, 2026)



- **Consecuencia tardía:** estas quemaduras destruyen masivamente las células musculares, liberando una proteína llamada mioglobina en la sangre. Esta sustancia puede colapsar los riñones (insuficiencia renal) horas o días después del accidente.

C. Fibrilación ventricular

Es la causa más común de muerte por choque eléctrico en el taller. El corazón tiene su propio sistema eléctrico (“marcapasos natural”) que dicta un ritmo de bombeo coordinado.

3 EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP) ESPECÍFICO

3.1 Protección de manos

A. Clasificación de guantes dieléctricos (Clases 00, 0, 1).

El uso de guantes dieléctricos está regido por normas internacionales rigurosas como la IEC 60903 y la ASTM D120. Estas normas clasifican los guantes en “clases” según su capacidad para resistir la perforación eléctrica a diferentes niveles de tensión.

B. Las clases de guantes en el taller automotriz

En el sector automotriz, debido a que la mayoría de los vehículos operan entre 200V y 800V, las clases más utilizadas son la 00 y la 0.

Tabla 6. Características de los guantes para trabajos con alto voltaje (Alvatronics, 2026)

Clase	Voltaje máximo de uso (DC)	Voltaje máximo de uso (AC)	Color de la etiqueta
00	750 V	500 V	Beige / Marrón
0	1,500 V	1,000 V	Rojo
1	11,250 V	7,500 V	Blanco

- **Clase 00 (beige):** es el más flexible, y se usa en vehículos híbridos enchufables (PHEV) y vehículos eléctricos compactos que no superan los 400V-500V de corriente continua.
- **Clase 0 (rojo):** es el **estándar de la industria**. Dado que la mayoría de los EVs modernos (como Tesla, Hyundai Ioniq, Porsche Taycan) operan o tienen picos de hasta 800V, el guante Clase 0 garantiza un margen de seguridad amplio al soportar hasta 1,500V DC.
- **Clase 1 (blanco):** son guantes más gruesos y menos ergonómicos. Se reservan para infraestructura de carga rápida o vehículos industriales de gran tonelaje.

C. Composición y espesor

A diferencia de los guantes de nitrilo comunes, los dieléctricos están fabricados de látex natural o caucho sintético mediante un proceso de inmersión múltiple. El espesor del guante aumenta proporcionalmente con su clase:

- Un guante Clase 00 suele tener un espesor aproximado de 0.75 mm.

- Un guante Clase 0 aumenta a 1.0 mm.

Este espesor es el que impide que los electrones de alta tensión “salten” desde el cable hacia la mano del técnico.

D. El código de colores de las etiquetas

Para evitar errores fatales, cada guante lleva una etiqueta vulcanizada que no se puede borrar. El técnico debe verificar siempre que el color de la etiqueta coincida con el voltaje del vehículo. Si el vehículo es de 800V, un guante con etiqueta beige (Clase 00) es ilegal y peligroso, ya que su capacidad de aislamiento podría verse superada, provocando una perforación eléctrica.

E. Fecha de caducidad y recertificación

Un punto crítico es que los guantes dieléctricos tienen caducidad.

- **Guantes nuevos:** si están almacenados en su bolsa original sellada, pueden durar hasta 12 meses antes de su primer uso.
- **En uso:** una vez que el guante se saca de su bolsa, debe ser inspeccionado y, según la normativa, debe ser probado en laboratorio cada 6 meses.
- **Marcado:** si el guante no tiene la fecha de la última prueba de laboratorio legible, se considera “No apto para trabajo en alta tensión”.

F. Almacenamiento correcto

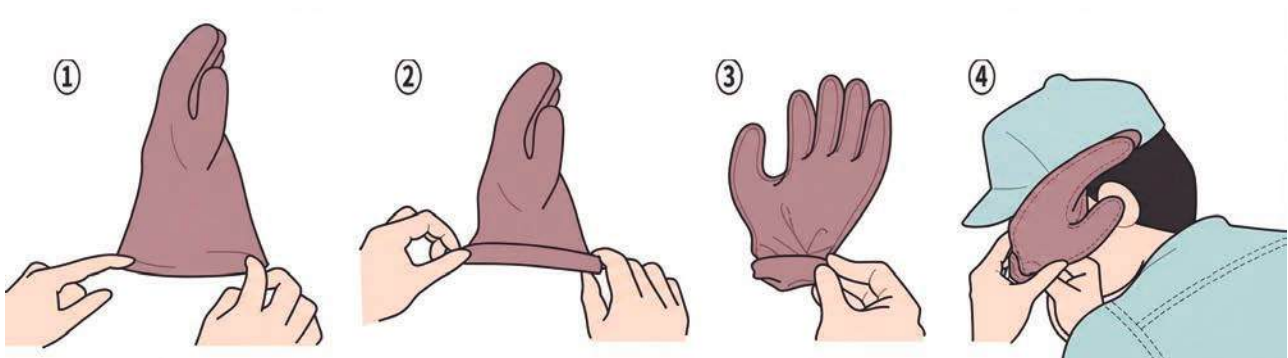
El látex es sensible a la luz ultravioleta (sol), al ozono y a los aceites/grasas.

- Deben guardarse en bolsas de lona oscuras y frescas.
- Nunca deben guardarse doblados o arrugados, ya que el caucho desarrolla “fatiga por estrés” en los pliegues, que es por donde la electricidad podría perforar el guante.

G. Comprobación básica de guantes aislantes

- Apoyar el guante sobre su lateral.
- Enrollar la abertura 2 o 3 veces.
- Doblar la abertura por la mitad para cerrarla.
- Asegurarse de que no hay salidas de aire.

Figura 28. Comprobación de salud de guantes para trabajos con alta tensión (Toyota, 2016)



3.2 Protección facial y ocular:

A. Pantallas faciales con clasificación de protección contra arco eléctrico

No cualquier careta de plástico sirve para trabajar en alta tensión. Las pantallas faciales deben estar certificadas específicamente para protección térmica.

- **Clasificación ATPV (Arc Thermal Performance Value):** es el valor que indica cuánta energía térmica puede soportar la pantalla antes de que el técnico sufra quemaduras de segundo grado. Se mide en cal/cm^2 . Para mecánica automotriz, se suelen requerir pantallas de categoría 2 (mínimo $8 \text{ cal}/\text{cm}^2$).
- **Material y composición:** están fabricadas de policarbonato de alta resistencia con

recubrimientos especiales. A diferencia de las caretas de esmerilado, no se derriten ni se inflaman al contacto con el calor extremo del arco.

- **Diseño de cobertura:** la pantalla debe ser envolvente (cubrir desde la frente hasta debajo del mentón y de oreja a oreja). Muchos modelos incluyen un “mentón protector” adicional para evitar que el destello del arco entre por la parte inferior en caso de una explosión a la altura del pecho (donde suele estar el inversor).
- **Propiedades ópticas:** suelen tener un tinte (gris o verde claro) que permite la visibilidad, pero bloquea el 99.9% de las radiaciones infrarrojas y ultravioletas producidas por el plasma del arco.

B. Lentes de seguridad con protección UV e impacto.

Aunque se use la pantalla facial, la normativa técnica exige el uso de lentes de seguridad debajo de la pantalla como una segunda barrera de protección.

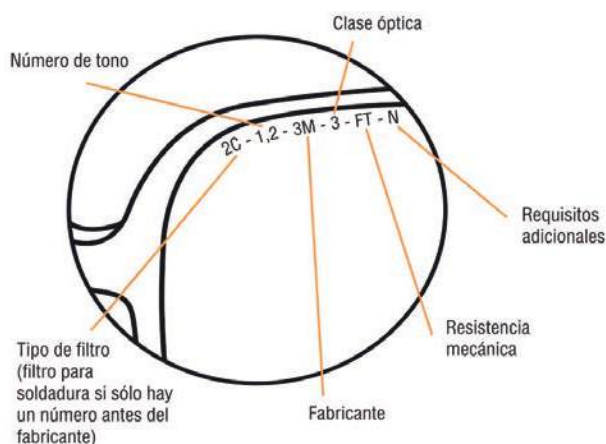
- **Protección contra impactos (norma ANSI Z87.1):** en caso de un cortocircuito en una batería de Ion-Litio, puede haber proyecciones de partículas de metal o plástico a alta velocidad. Los lentes deben ser de policarbonato resistente a impactos.

- **Filtro UV/Infrarrojo:** el arco eléctrico genera un destello lumínico similar al de la soldadura. Los lentes deben tener certificación de filtrado para evitar daños en la retina (quemadura por destello).

- **Diseño dieléctrico (sin metales):** esto es vital. Los lentes de seguridad para técnicos de vehículos eléctricos **no deben tener partes metálicas** (como tornillos o varillas de refuerzo expuestas). Un tornillo metálico en el armazón podría actuar como un conductor si la pantalla facial fallara o si el técnico se acercara demasiado a un borne activo.

- **Ajuste y sello:** se recomiendan modelos con sello de espuma o ajuste ergonómico que eviten la entrada de vapores químicos en caso de que una celda de la batería sufra un “escape térmico” (viento de gases).

Figura 29. Características de los lentes de seguridad (NAC, 2017)



Tipo de filtro de ocular (protección)

2, 2C ó 3 = UV

4 = IR

5 ó 6 = Brillo solar

1.7 a 7 = Filtro para soldadura si no hay número de tono

Número de escala (tono)

1.2 = Incoloro o amarillo

1.7 = Naranja, Minimizer o I/O

2.5 = Bronce o gris

3.1 = Gris oscuro, bronce oscuro o espejo

Fabricante: 3M (AOS)

Clase óptica 1: Uso permanente

Resistencia mecánica

Solidez incrementada (12 m/s) S

Impacto de baja energía (45 m/s) F(T)

Impacto de media energía (120 m/s) B(T)

Impacto de alta energía (190 m/s) A(T)

T = Protege contra impactos a

temperaturas extremas (-5°C / +55°C)

Requisitos adicionales

Arco eléctrico en cortocircuito 8

Salpicaduras de metal fundido 9

Deterioro superficial por partículas

finas K

Resistencia a empañamiento N

3.3 Protección corporal y calzado

Ropa ignífuga y categorías de riesgo

En el mantenimiento de vehículos eléctricos, la ropa convencional de algodón o mezclas sintéticas (como el poliéster) es extremadamente peligrosa. En caso de un arco eléctrico, las fibras sintéticas se funden y se adhieren a la piel, agravando las quemaduras. La ropa ignífuga está diseñada para autoextinguirse y no derretirse.

Propiedades de las fibras ignífugas

Existen dos tipos principales de tejidos utilizados en el taller:

- **Ignífugo inherente:** Fibras cuya estructura química es resistente al fuego por naturaleza (ej. Nomex, Kevlar). Su protección no se pierde con las lavadas.
- **Tratado químicamente:** Fibras de algodón que reciben un tratamiento para ser resistentes a la llama (ej. Indura). Son más económicas, pero requieren cuidados específicos en el lavado.

Categorías de riesgo (HRC / PPE Category)

La normativa NFPA 70E define categorías de riesgo según la energía incidente que la prenda puede soportar. Para el técnico automotriz de nivel medio-superior, las categorías estándar son:

- **Categoría 1 (riesgo bajo):** Resistencia mínima de 4 cal/cm². Adecuada para inspecciones visuales o trabajos en sistemas de baja tensión.
- **Categoría 2 (riesgo moderado):** Resistencia mínima de 8 cal/cm². Este es el estándar para mecánicos de vehículos eléctricos. Se utiliza al manipular baterías de tracción, inversores y realizar la desconexión del MSD.

Diseño de seguridad de la prenda

Para que un overol o conjunto de trabajo sea considerado apto para alta tensión, debe cumplir con:

- **Ausencia de metales expuestos:** No debe tener botones, remaches o cremalleras metálicas que puedan

hacer contacto con un borne vivo. Se prefieren cierres de velcro o cremalleras ocultas por una solapa ignífuga.

- **Ajuste en puños y tobillos:** Para evitar que la ropa se enganche en componentes del motor o que el arco eléctrico penetre hacia la piel por aperturas holgadas.
- **Identificación visible:** La prenda debe tener una etiqueta externa que indique claramente su nivel de protección (ATPV) y la norma que cumple.

Calzado dieléctrico

El calzado para técnicos de alta tensión no es una simple bota de seguridad industrial. Debe cumplir con especificaciones químicas y físicas estrictas, regidas principalmente por la norma ASTM F2413 o la EN ISO 20345.

Propiedades de la suela (resistencia eléctrica)

La suela es el componente aislante principal. En un vehículo eléctrico, el técnico suele estar de pie sobre un suelo de concreto que puede estar húmedo o tener contaminantes.

- **Aislamiento de tensión:** Las suelas deben estar probadas para resistir al menos 18,000V a 60Hz durante un minuto, con una corriente de fuga que no supere el 1.0 mA. Esto garantiza que, si el técnico toca accidentalmente un componente de 800V DC, la corriente no pueda cerrar el circuito a través de sus pies hacia el suelo.
- **Materiales de construcción:** Generalmente fabricadas de compuestos de poliuretano de doble densidad o caucho nitrilo de alta resistencia, diseñados no

solo para aislar, sino para resistir aceites, ácidos de batería y refrigerantes comunes en los talleres.

- **Diseño antideslizante:** Dado que el técnico maneja componentes pesados y peligrosos, la suela debe tener un grabado profundo para evitar caídas, las cuales podrían provocar un contacto accidental con cables de alta tensión.

Punteras de protección

En la mecánica tradicional, las punteras de acero son el estándar para proteger contra

aplastamientos. Sin embargo, en vehículos eléctricos, el metal está prohibido.

Puntera de composite: Estas punteras están fabricadas de materiales no metálicos como fibra de carbono, plástico reforzado o Kevlar.

Resistencia al impacto: Cumplen con la misma capacidad de carga que el acero (generalmente hasta 200 Joules de impacto), asegurando protección física sin el riesgo eléctrico.

4 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada Unidad Temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

Efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano (NFPA 70E)
<https://www.nfpa.org/es/product/id/evt014>

Electric & Hybrid Vehicle Safety Products
<https://www.autoresource.co.uk/resources/electric-hybrid-vehicle-safety-products/>

GM TechLink: Safety Arc-Rated Personal Protection Equipment for Electric Vehicles
<https://gm-techlink.com/?p=20792>

Hand in Glove: EV and Hybrid Service Safety
<https://shoppres.dormanproducts.com/ev-hybrid-safety/>

KIT VEH PPE (CATU)
<https://www.catuelec.com/productocatu/Servante%20d%E2%80%99atelier%20et%20kits%20VEH/Kits%20pour%20l%E2%80%99e-mobilit%C3%A9/95860>

Safety Tools Needed to Service EVs
<https://www.tirereview.com/ev-maintenance-safety-equipment-tools/>



UNIDAD TEMÁTICA 4



VERIFICACIÓN DE FALLAS DE AISLAMIENTO

1 INTRODUCCIÓN AL INVERSOR DE POTENCIA

¿Qué es el inversor y cuál es su función en el vehículo?

El inversor, junto con la batería y el motor, uno de los tres pilares fundamentales de cualquier vehículo eléctrico (EV) o híbrido (HEV). Se le considera el “cerebro logístico” del tren motriz, ya que es el componente encargado de administrar y transformar la energía eléctrica para que el vehículo pueda moverse.

2 FUNDAMENTOS DEL AISLAMIENTO EN ALTA TENSIÓN (HV)

2.1 Resistencia de aislamiento: definición y valores nominales

La resistencia de aislamiento es la oposición que ofrecen los materiales aislantes (goma, plástico, barniz, resina) al paso de una corriente de fuga hacia el chasis del vehículo. En un mundo ideal, esta resistencia sería infinita, pero en la práctica, siempre existen pequeñas corrientes de fuga imperceptibles.

Definición técnica

Mientras que una resistencia común se mide en ohmios (Ω), el aislamiento se mide en megohmios. Cuando el aislamiento de un cable naranja o de un bobinado de motor se deteriora (por calor, vibración o humedad), la resistencia baja. Si baja lo suficiente, la alta tensión (HV) puede “saltar” al chasis. Esto crea dos peligros:

1. Riesgo de electrocución: el usuario podría recibir una descarga al tocar la puerta o el capó.

2. Riesgo de cortocircuito: si el aislamiento falla en dos puntos distintos (uno en el positivo y otro en el negativo), se genera un arco eléctrico que puede derivar en incendio.

Valores nominales y estándares internacionales

La norma ISO 6469-3 establece los requisitos mínimos de seguridad para vehículos eléctricos e híbridos. El estándar se basa en una relación de “ohmios por cada voltio” de la batería de tracción.

• Requisito para circuitos de DC (batería y cables principales):

- Mínimo: 100 Ω/V .
- Ejemplo: en un Toyota Prius con batería de 201.6V, el aislamiento mínimo seguro sería de 20160 Ω (0.02 M Ω). No obstante, los fabricantes exigen niveles mucho más altos por seguridad.

• Requisito para circuitos de AC (inversor y motores):

- Mínimo: 500 Ω/V .
- Ejemplo: en un vehículo con sistema de 400V, el aislamiento mínimo debe ser de 200000 Ω (0.2 M Ω).

Valores de referencia en el taller (vida real)

Aunque las normas mencionan valores bajos como “seguros”, en el diagnóstico real de taller utilizamos otros parámetros. Un vehículo híbrido o eléctrico en buen estado debe presentar:

- **Estado óptimo:** $> 100 \text{ M}\Omega$ (muchas veces el equipo marcará “OL” o “Infinite”).
- **Estado de alerta:** entre $2 \text{ M}\Omega$ y $10 \text{ M}\Omega$. El sistema puede seguir funcionando, pero hay una degradación en proceso (humedad o suciedad).
- **Falla crítica:** $< 2 \text{ M}\Omega$. A este nivel, la computadora del sistema híbrido (HV ECU) detectará la falla y generará un código de diagnóstico (DTC), impidiendo que los contactores principales se cierren (el auto no pasa a modo “READY”).

Figura 30. Pantalla de verificación de conducción en un vehículo Toyota (Alvatronics, 2026)



Factores que afectan la medición

El técnico debe saber que la resistencia de aislamiento no es una constante; cambia según las condiciones ambientales:

- **Temperatura:** a mayor temperatura, el aislamiento tiende a bajar ligeramente.
- **Humedad:** es el enemigo número uno. La humedad condensada en los conectores de los motores eléctricos

es la causa del 70% de las fallas de aislamiento falsas.

- **Envejecimiento (degradación térmica):** el barniz de los motores MG1 y MG2 en los híbridos pierde propiedades con los años debido a los ciclos de calor extremo.

2.2 El Sistema de Monitoreo de Aislamiento (PIM)

El PIM es un circuito electrónico integrado generalmente dentro del inversor o de la BCU (Battery Control Unit). Su función es medir constantemente la resistencia entre el bus de alta tensión (+ y -) y la masa del chasis (GND) mientras el vehículo está encendido.

Principio de funcionamiento: el método de inyección

A diferencia de un fusible, que solo reacciona cuando hay un cortocircuito, el monitor de aislamiento es proactivo. Utiliza uno de estos dos métodos:

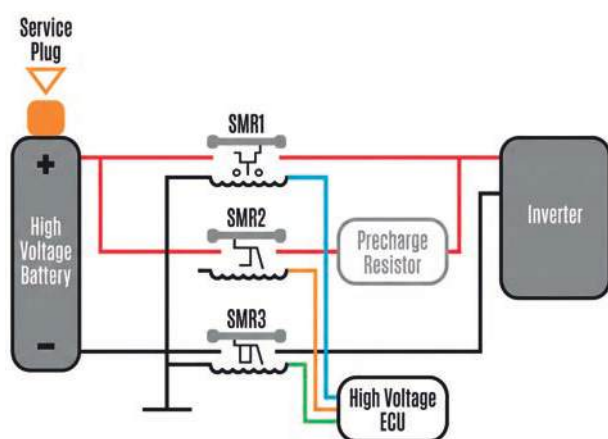
1. **Monitoreo pasivo:** mide las diferencias de potencial (voltaje) entre los polos positivo/negativo y el chasis. Si el sistema está perfectamente balanceado, el voltaje respecto a chasis debería ser casi cero o una fracción simétrica.
2. **Monitoreo activo (inyección de señal):** el sistema inyecta una señal de baja frecuencia (CA) de muy baja corriente hacia el bus de HV. Si esa señal “regresa” a través del chasis, el sistema calcula la impedancia de la fuga. Si la señal regresa con facilidad, significa que el aislamiento se ha roto.

El proceso de detección y los tres estados

El sistema de monitoreo no solo detecta la falla, sino que clasifica su severidad:

Estado de verificación inicial: al poner el vehículo en “IG-ON” (antes de pasar a READY), la computadora de HV realiza una prueba de aislamiento rápida. Si detecta una fuga masiva, no cerrará los contactores principales (SMR) para evitar que el chasis se energice.

Figura 31. Esquema de verificación de fallas en RMS (Coleman, 2025)



- **Monitoreo en marcha:** si la falla ocurre mientras el vehículo circula, el monitor detecta la caída de resistencia. Dependiendo del fabricante (Toyota, Tesla, Hyundai), el coche puede mostrar un mensaje de “Revise Sistema Híbrido” o entrar en un “Modo de Emergencia” (Limp Mode).
- **Detección de ubicación:** algunos monitores avanzados pueden distinguir si la falla está en el lado de corriente continua (batería) o en el lado de corriente alterna (motores/generadores) analizando la frecuencia de la fuga.

El Código de Falla Maestro: P0AA6

El P0AA6 (Hybrid Battery Voltage System Isolation Fault) es el código genérico que indica que el monitor ha encontrado un camino eléctrico hacia el chasis.

Importante: el P0AA6 suele venir acompañado de un “INF Code” (código de información de 3 dígitos). Este código secundario señala exactamente en qué área está la falla:

- **INF 526:** falla en el área del transeje (motores).
- **INF 612:** falla en el área de la batería.
- **INF 611:** falla en el compresor del aire acondicionado.

¿Por qué el vehículo se bloquea?

Cuando el monitor de aislamiento detecta una falla por debajo del umbral de seguridad, el vehículo entra en estado de protección por dos razones:

1. **Seguridad del usuario:** evitar que el chasis tenga un potencial eléctrico peligroso.
2. **Protección de componentes:** una pequeña fuga puede convertirse en un arco eléctrico masivo que destruiría el inversor o incendiaría las celdas de la batería

3 EQUIPAMIENTO Y SEGURIDAD PARA EL DIAGNÓSTICO

3.1 El mega óhmetro (Megger): diferencia entre un multímetro común y un comprobador de aislamiento

Para diagnosticar un vehículo híbrido o eléctrico, el mega óhmetro (coloquialmente llamado “Megger”) es la herramienta reina. Aunque ambos miden resistencia, funcionan bajo principios físicos completamente distintos.

Figura 32. Megómetro digital (UniT, 2026)



El problema del multímetro convencional

Un multímetro estándar mide resistencia inyectando un voltaje muy bajo, generalmente entre 3V y 9V DC.

- **Limitación física:** si el aislamiento de un cable naranja tiene una pequeña grieta, 9 voltios no tienen la “fuerza” (presión eléctrica) suficiente para saltar a través de esa grieta y llegar al chasis.
- **Resultado engañoso:** el multímetro indicará que el aislamiento es “infinito” u “Ok”, dando una falsa sensación de

seguridad. El auto, al trabajar con 300V o más, sí logrará que la corriente salte esa grieta, generando la falla que el multímetro no vio.

El principio del mega óhmetro

El comprobador de aislamiento es, en esencia, un generador de alta tensión controlada.

- **Inyección de voltaje:** el Mega óhmetro inyecta voltajes de prueba seleccionables (típicamente 250V, 500V o 1000V DC).
- **Detección de “fugas”:** al aplicar un voltaje similar o superior al que maneja el vehículo, el equipo “estresa” el aislante. Si hay una debilidad, el voltaje de prueba romperá la barrera dieléctrica y el equipo medirá la corriente de fuga, traduciéndola a mega ohmios.

Diferencias clave en la aplicación

Tabla 7. Diferencias entre un multímetro y un mega óhmetro (Alvatronics, 2026)

Característica	Multímetro común	Mega óhmetro (Megger)
Voltaje de prueba	3V a 9V (baja tensión)	250V a 1000V (alta tensión)
Rango de medida	Hasta unos pocos MΩ	Hasta Gigaohmios (GΩ)
Uso principal	Continuidad, sensores, 12V	Integridad de cables HV y motores
Riesgo	Inofensivo para componentes	Puede dañar la electrónica de 12V si se usa mal

Reglas de oro para el uso del mega óhmetro

Debido a que el mega óhmetro genera voltajes altos, su uso requiere un protocolo estricto para no destruir la computadora del vehículo:

- **Aislamiento total:** la prueba de aislamiento se realiza siempre con el sistema desenergizado y el conector de servicio (MSD) removido.
- **Desconexión de la electrónica:** nunca debe inyectar 500V en un cable que todavía esté conectado a un controlador electrónico de 12V o a la placa lógica del inversor. Podrían quemarse los microprocesadores instantáneamente.
- **Descarga de capacitores:** después de hacer una prueba con el Megger, el componente probado queda cargado como un capacitor. La mayoría de los mega óhmetros modernos descargan el componente automáticamente al soltar el botón de prueba, pero siempre hay que verificar.

¿Qué voltaje de prueba elegir?

Como regla general para vehículos híbridos/eléctricos:

- Para sistemas de batería de 200V a 400V: se usa la escala de 500V en el mega óhmetro.
- Para sistemas de 800V (como Porsche Taycan o Hyundai Ioniq 5): se usa la escala de 1000V.
- Nota: siempre se debe usar un voltaje de prueba ligeramente superior al voltaje nominal de operación del componente.

3.2 Categorías de seguridad (CAT III / CAT IV): protección del técnico durante la prueba

Éste es un punto donde la seguridad deja de ser teórica y se vuelve una cuestión de supervivencia. En el mundo de la alta tensión (HV) automotriz, no basta con que una herramienta “funcione”; debe ser capaz de proteger al técnico frente a un arco eléctrico o un transitorio de tensión (picos de voltaje repentinos). Las categorías de seguridad son estándares internacionales (definidos por la norma IEC 61010) que clasifican la capacidad de un instrumento de medición para resistir picos de energía sin explotar ni crear un arco eléctrico que calcine las manos del operador.

Entendiendo las categorías en el vehículo

Para un técnico de vehículos híbridos y eléctricos, solo existen dos categorías aceptables:

- **CAT III (600V / 1000V):** diseñada para mediciones en el cableado de distribución, motores eléctricos y el bus de datos de potencia. Es el estándar mínimo para trabajar dentro del vehículo una vez que la energía sale de la batería.
- **CAT IV (600V):** es el nivel más alto. Está diseñada para el origen de la instalación, donde los niveles de energía de cortocircuito son máximos. En un vehículo, el pack de baterías (antes de los contactores) se considera zona CAT IV.

¿Por qué no usar un multímetro CAT II o sin categoría?

Un multímetro barato o de uso doméstico (CAT II) tiene sus componentes internos muy cerca unos de otros.

- **El arco eléctrico:** si ocurre un pico de tensión mientras mides, el aire dentro del multímetro puede ionizarse y crear un puente conductor (arco).
- **La explosión:** el multímetro se convierte en un cortocircuito directo en tus manos. La energía de una batería de 300V-800V es capaz de vaporizar el metal de las puntas de prueba, causando quemaduras de tercer grado en milisegundos.
- **Protección interna:** los equipos CAT III y IV tienen fusibles de alta capacidad de ruptura (HRC) rellenos de arena para extinguir arcos eléctricos, y sus circuitos están diseñados con mayores distancias de aislamiento físico.

Los cables y puntas de prueba (el eslabón débil)

De nada sirve tener un mega óhmetro de \$1,000 USD si usa cables de prueba dañados o de baja categoría.

- **Marcado:** los cables también deben estar marcados como CAT III 1000V o CAT IV 600V.
- **Puntas cubiertas:** las puntas de prueba profesionales solo dejan expuesto un mínimo de metal (aprox. 4mm) para evitar que, por un descuido, se toquen accidentalmente dos terminales al mismo tiempo y se provoque un cortocircuito.

3.3 Protocolo de desenergización: verificación de ausencia de tensión antes de medir

Este protocolo garantiza que el sistema de alta tensión (HV) esté físicamente desconectado y que los capacitores internos del inversor se hayan descargado por completo antes de que conecte el mega óhmetro o sus manos.

Los cinco pasos del protocolo de seguridad

- 1. Apagado y bloqueo (LOTO):** apagar el vehículo, retirar la llave (o alejarla si es *Keyless*) y colocarla en una caja de seguridad. Esto evita que alguien presione el botón “Power” mientras se está trabajando.
- 2. Uso de EPP:** antes de tocar cualquier componente naranja, se debe llevar puestos los guantes de seguridad de clase 0 (1000V) con sus respectivos protectores de cuero.
- 3. Retiro del MSD (Manual Service Disconnect):** se debe extraer el conector de servicio (el “enchufe” naranja de la batería de tracción). Esto abre el circuito de la batería físicamente.
- 4. Tiempo de espera (descarga):** se debe esperar el tiempo especificado por el fabricante (usualmente entre 5 y 10 minutos). Durante este tiempo, las resistencias de descarga interna del inversor drenan la energía almacenada en los capacitores de alta capacidad.
- 5. Verificación de ausencia de tensión (la prueba de los 0V):** Ésta es la medición final obligatoria usando un multímetro CAT III/IV.

¿Dónde y cómo medir la ausencia de tensión?

No basta con quitar el MSD; hay que probar que el sistema está “muerto”. La medición se realiza generalmente en los terminales de entrada del inversor (donde llegan los cables de la batería).

Se deben realizar tres mediciones:

- Entre Positivo (+) y Negativo (-): debe marcar cerca de 0V (se acepta menos de 5V según el fabricante).
- Entre Positivo (+) y Chasis (GND): debe marcar 0V.
- Entre Negativo (-) y Chasis (GND): debe marcar 0V.

Nota crítica: si mide 0V entre los cables, pero no se verifica respecto al chasis, podría tener una falla de aislamiento que mantiene el chasis energizado, lo cual es extremadamente peligroso.

El peligro de los capacitores “pegados”

Si las resistencias de descarga del inversor fallan, los capacitores pueden retener 300V - 600V incluso horas después de quitar el MSD. Por eso, nunca se debe asumir que el tiempo de espera fue suficiente. La única verdad es la que muestra el multímetro CAT III

4 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

Cybertruck Service Manual: Isolation/Insulation Test (Tesla)

<https://service.tesla.com/docs/Cybertruck/ServiceManual/en-us/GUID-9A106B8A-034C-4832-8B7A-A2E47BB677C6.html>

Design of a High-Voltage Insulation Resistance Detection System for Commercial Vehicles (MDPI)

<https://www.mdpi.com/2313-0105/11/4/143>

EP 0897117 A1: Apparatus for the detection of insulation faults in a hybrid electric vehicle

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=pn%3DEP0897117A1+inciples+and+Applications+with+Practical+Perspectives%2C+3rd+Edition-p-9781394295128>

HEV 4011 - Electric Hybrid Fundamentals

https://catalog.tbr.edu/preview_course_nopop.php?catoid=1&coid=1854

Hybrid - International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA)

<https://oica.net/hybrid-2/>

Introduction to Electric Vehicles (IEEE Webinar)

<https://events.vtools.ieee.org/m/229039>

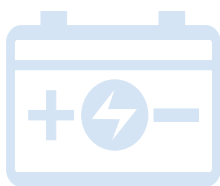
Types of electric vehicles

<https://www.energy.gov.au/electric-vehicles/electric-vehicle-basics/types-electric-vehicles>



UNIDAD TEMÁTICA 5

BATERÍAS DE LITIO



1 CONCEPTOS IMPORTANTES SOBRE BATERÍAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

1.1 Voltaje (V)

El voltaje de una batería de litio se refiere al voltaje medido a través de los terminales de la batería cuando no está conectada a ninguna carga o circuito. Es esencialmente el voltaje que produce la batería cuando no fluye corriente. El OCV puede variar según el nivel de carga y la composición química de la batería, pero proporciona una indicación del estado de carga de la batería.

1.2 Tensión de trabajo

El voltaje de trabajo es el voltaje que pasa a través de los terminales de la batería mientras la corriente fluye a través del circuito. Siempre es menor que el voltaje de circuito abierto, debido a la resistencia interna de la batería. El voltaje de trabajo de las celdas de litio NMC está típicamente entre 3.0 V (estado descargado) y 4.2 V (estado completamente cargado), mientras que el voltaje de operación de las celdas de fosfato de hierro y litio (LiFePO₄) está generalmente entre 2.5 V (estado descargado) y 3.65 V (estado completamente cargado).

1.3 Voltaje de descarga de corte

El voltaje de corte de descarga de una batería de litio es el nivel de voltaje mínimo en el que se debe descargar la batería para evitar daños o una reducción de la vida útil. Por debajo de este voltaje, una mayor descarga puede causar daños irreversibles a las celdas de la batería. El voltaje de corte de descarga de las celdas de litio NMC es típicamente de 3.0 V, mientras que el voltaje de corte de descarga de las celdas de fosfato de hierro y litio (LiFePO₄) es generalmente de 2.5 V.

1.4 Voltaje límite de carga

El límite de carga de una batería de litio es el voltaje máximo al que se puede cargar la batería de forma segura. Si se supera este voltaje, se puede producir un sobrecalentamiento, una reducción de la vida útil de la batería o incluso riesgos de seguridad. También es el voltaje al que la carga cambia de corriente constante a voltaje constante. El voltaje límite de carga de las celdas de litio NMC es normalmente de 4.2 V, mientras que el voltaje límite de carga de las celdas de fosfato de hierro y litio (LiFePO₄) es normalmente de 3.65 V.

Tabla 8. Voltajes característicos de diferentes tipos de baterías (Alvatronics, 2026)

Tipo de la batería	Tensión de trabajo	Voltaje de corte de descarga	Voltaje límite de carga
Plomo-ácido	2.0 V	1.7 V	2.3 V
Níquel cadmio	1.2 V	1.0 V	N/A
Hidruro de níquel-metal	1.2 V	1.0 V	N/A
Batería de iones de litio (NMC)	3.0 4.2-V	3.0 V	4.2 V
Iones de litio (LiFePO ₄)	2.5 3.65-V	2.5 V	3.65 V

2 CAPACIDAD DE LA BATERÍA (AH)

Definición: La capacidad representa la cantidad de energía que puede almacenar una batería, un indicador clave de su rendimiento. Depende de los materiales activos de los electrodos.

Unidad: Medido en Ah (amperios-hora) o mAh (miliamperios-hora).

Fórmula: Capacidad (Ah) = Corriente (A) × Tiempo de descarga (h).

Ejemplo: Una batería de 10 Ah se descarga en 2 horas a 5 A o 1 hora a 10 A.

Factores: La capacidad está influenciada por la cantidad, la calidad y la tasa de utilización de los materiales activos.

3 ENERGÍA DE LA BATERÍA (WH)

Definición: Es la energía almacenada en la batería, representada en Wh (vatios-hora).

Fórmula: Energía (Wh) = Voltaje nominal (V) × Corriente (A) × Tiempo (h).

Ejemplo: Una celda de 3.2 V 15 Ah tiene 48 Wh, mientras que una batería de 3.2 V 100 Ah tiene 320 Wh.

4 DENSIDAD ENERGÉTICA (WH/KG)

Definición: Se refiere a la cantidad de energía liberada por unidad de masa o volumen de la batería.

Ejemplo: Una batería de litio de 325 g con una clasificación de 3.7 V y 10 Ah tiene una densidad de energía de 113 Wh/kg.

Las baterías de litio suelen tener una densidad energética tres veces superior a la de las baterías de NiCd y NiMH. Una densidad energética mayor depende de la densidad y la estructura del material.

Tabla 9. Densidad energética de las baterías (Alvatronics, 2026)

Densidad de energía (Wh/kg)	Batería de ácido sólido	Batería de níquel-cadmio	Batería de níquel-hidruro metálico	Batería de litio
Wh / kg	30 – 50	50 – 60	60 - 70	130 - 150
Wh/L	50 – 80	130 – 150	190 - 200	350 - 400

5 POTENCIA Y DENSIDAD DE POTENCIA

Energía: Es la velocidad a la que se entrega energía desde la batería, medida en vatios (W) o kilovatios (kW).

Potencia: Es la potencia de salida por unidad de masa o volumen, medida en W/kg o W/L. Esto es crucial para evaluar

si una batería cumple con los requisitos de aceleración y ascenso de los vehículos eléctricos.

6 TASA DE DESCARGA (A)

Definición: La velocidad de descarga de una batería de litio, a menudo denominada tasa C, representa la

rapidez con la que se puede descargar la batería en relación con su capacidad. Por ejemplo, una tasa de descarga de 1 C significa que la batería descargará toda su capacidad en una hora. Una tasa C más alta indica una descarga más rápida, mientras que una tasa C más baja indica una descarga más lenta. La tasa de descarga es importante para determinar el rendimiento de una batería bajo una alta demanda de energía.

Ejemplo: Una batería de 10 Ah se descarga a 2 A (0.2 C) o 20 A (2 C).

7 MÉTODOS DE CARGA

CC / CV: La carga de corriente constante (CC) suministra una corriente fija, mientras que la carga de voltaje constante (CV) utiliza un voltaje fijo y la corriente disminuye a medida que se carga la batería.

Carga lenta: Consiste en cargar a una velocidad inferior a 0.1 C para llenar por completo una batería casi completa.

Carga flotante: Es un método utilizado para mantener una carga constante en una batería a lo largo del tiempo.

Tabla 10. Resumen de los métodos de carga (Alvatronics, 2026)

Método de carga	Batería de ácido sólido	Batería de níquel-cadmio	Batería de níquel-hidruro metálico	Batería de litio
Modo de carga	Voltaje constante después de corriente constante	Corriente constante	Corriente constante	Voltaje constante después de corriente constante
Método de control	Voltaje 2.3 V, carga flotante	/	Temperatura constante o V	Voltaje 4.2 V, carga flotante

8 PROFUNDIDAD DE CARGA/ DESCARGA (SOC, DOD)

Estado de carga (SOC): El porcentaje de capacidad restante en una batería después de descargarse.

Profundidad de descarga (DOD): El porcentaje de capacidad que una batería tiene descargada.

Ejemplo: Una batería de 10 Ah descargada a 2 Ah tiene un DOD del 80 %, mientras que cargada a 8 Ah tiene un SOC del 80 %.

encuentra la corriente cuando fluye a través de la batería durante su funcionamiento. El tamaño de la resistencia interna está influenciado principalmente por factores como los materiales, el proceso de fabricación y la estructura de la batería.

Clasificación: La resistencia interna de la batería consta de dos tipos: resistencia óhmica y resistencia de polarización. La resistencia óhmica está formada por la resistencia de los materiales de los electrodos, los electrolitos, los separadores y la resistencia de contacto de varias piezas. La resistencia de polarización incluye la resistencia causada por la polarización electroquímica y la polarización por concentración.

9 RESISTENCIA INTERNA (mΩ)

Definición: La resistencia interna de una batería se refiere a la resistencia que

Factores de influencia: La resistencia interna es una característica compleja y

crucial. Factores como los materiales y la estructura afectan la resistencia interna.

Efecto resultante: Debido a la existencia de resistencia interna, cuando la batería se descarga, se genera calor a medida que la corriente pasa a través de la resistencia interna, consumiendo energía. Cuanto mayor sea la corriente, más energía se consume. Por lo tanto, cuanto menor sea la resistencia interna, mejor será el rendimiento de la batería. No solo será mayor el voltaje de funcionamiento real de la batería, sino que se consumirá menos energía en la resistencia interna.

10 TASA DE AUTODESCARGA (%/mes)

Definición: La tasa se refiere a la relación entre la capacidad perdida y la capacidad total de la batería durante el almacenamiento. Indica cuánto disminuye la capacidad de la batería con el tiempo cuando no se utiliza.

Causa: La autodescarga se produce por la inestabilidad de los electrodos del electrolito. Entre ambos electrodos se produce una reacción química que hace que los materiales activos se consuman y se reduzca la energía química disponible para su conversión en energía eléctrica, disminuyendo así la capacidad de la batería.

Factores de influencia: La temperatura ambiental tiene un impacto significativo en la tasa de autodescarga. Las temperaturas más altas acelerarán la autodescarga de la batería.

Expresión: La expresión y la unidad de degradación de la capacidad de la batería (tasa de autodescarga) son %/mes.

Efecto resultante: La autodescarga de la batería reduce directamente su capacidad. La tasa de autodescarga afecta directamente el rendimiento de almacenamiento de la batería. Cuanto menor sea la tasa de autodescarga, mejor será el rendimiento de almacenamiento.

11 CICLO DE VIDA (CICLOS)

Definición: Es el número de ciclos de carga/descarga que puede experimentar una batería antes de que su capacidad caiga al 80% de su capacidad original.

Factores de impacto: Los métodos de carga, la temperatura de funcionamiento y la profundidad de descarga influyen significativamente en el ciclo de vida.

12 EFECTO MEMORIA

Definición: Es la tendencia de algunas baterías a perder capacidad si se cargan repetidamente antes de descargarse completamente.

Impacto: Las baterías de iones de litio no presentan efecto memoria.

13 MESETA DE DESCARGA

La meseta de descarga de una batería de litio se refiere al período durante el ciclo de descarga de la batería en el que el voltaje permanece relativamente estable antes de caer significativamente. Durante esta fase, la batería proporciona una salida de voltaje constante, lo que es particularmente importante para garantizar un rendimiento constante en los dispositivos. La meseta de descarga generalmente ocurre después de que la

batería se haya descargado hasta cierto punto, y su voltaje se estabiliza antes de comenzar a disminuir más rápidamente a medida que la batería se acerca al final de su ciclo de descarga.

14 CONSISTENCIA DEL PAQUETE DE BATERÍAS

Un paquete de baterías está formado por varias celdas individuales conectadas en serie o en paralelo. El rendimiento general y la vida útil del paquete de baterías dependen de la celda más débil que contenga. Esto significa que la consistencia del rendimiento de cada celda individual del paquete de baterías debe ser alta. Además de las variaciones en el rendimiento de las celdas individuales y la calidad de las materias primas, el factor más importante es el proceso de fabricación. Las mejoras en el proceso de fabricación son cruciales para mejorar la calidad general de la batería.

15 PROCESO DE FORMACIÓN

La formación se refiere al proceso de activación de los materiales activos positivos y negativos dentro de una batería a través de un método específico de carga y descarga después de que se fabrica la batería. Este proceso mejora el rendimiento de carga y descarga de la batería, la autodescarga, el almacenamiento y otras características integrales. Después de la formación, la batería puede exhibir su verdadero rendimiento. Además, el proceso de clasificación durante la formación ayuda a mejorar la consistencia del paquete de baterías, mejorando así el rendimiento general del paquete de baterías final.

15.1 Estructura básica de las celdas de batería de litio de los vehículos eléctricos

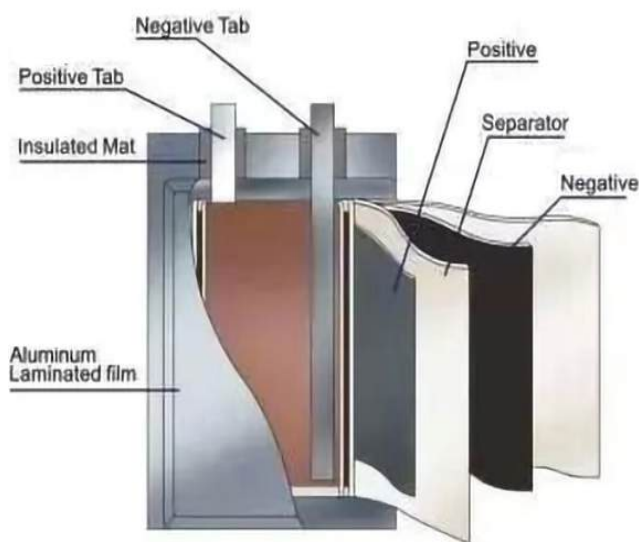
Materiales principales: cátodo, ánodo, electrolito, separador

Estructuras: cilíndrico, prismático; apilado, enrollado

Formulario: polímero (paquete tipo bolsa), ion de litio líquido (carcasa de acero)

Las celdas de la batería de litio de los vehículos eléctricos se construyen a partir de estos componentes centrales, cada uno de los cuales desempeña un papel fundamental en el rendimiento de la batería y la capacidad de almacenamiento de energía.

Figura 33. Estructura de las celdas de litio (greenbattpower, 2022)



15.2 Principio de funcionamiento de las baterías de litio para vehículos eléctricos

Material del cátodo: LiMn_2O_4 (óxido de litio y manganeso)

Material del ánodo: grafito

Proceso de carga: durante la carga, los iones de litio (Li^+) del cátodo y del electrolito migran hacia el ánodo. Los iones de litio reciben electrones y se reducen a Li , que se incrusta en la estructura de carbono del material del ánodo (grafito).

Proceso de descarga: al descargarse, los iones de litio del ánodo (grafito) liberan electrones. Estos electrones viajan a través del circuito externo y alimentan el dispositivo. Los iones de litio, ahora sin electrones, vuelven a ingresar al electrolito y migran nuevamente hacia el cátodo, completando el circuito.

15.3 Composición de las baterías de litio de los vehículos eléctricos

Cátodo: LiMn_2O_4 (óxido de litio y manganeso) + agente conductor (Negro de acetileno) + aglutinante (PVDF) + colector de corriente (lámina de aluminio)

Ánodo: Grafito + agente conductor (Negro de acetileno) + aglutinante (PVDF) + colector de corriente (lámina de cobre)

Estos materiales, incluidos los electrodos activos y los agentes conductores, determinan la eficiencia de la batería, la capacidad de carga y el rendimiento general. El cátodo y el ánodo trabajan en conjunto, facilitando el movimiento de los iones de litio y permitiendo el flujo de electricidad durante la carga y la descarga.

15.4 Proceso de carga en detalle

Durante la carga, una fuente de energía externa impulsa los electrones del cátodo y los envía a través del circuito externo hacia el ánodo. Mientras tanto, los

iones de litio (Li^+) del cátodo “saltan” al electrolito, pasan a través de los orificios microscópicos del separador y “nadan” hacia el ánodo. Una vez que llegan al ánodo, se combinan con los electrones entrantes y se almacenan en el material de grafito.

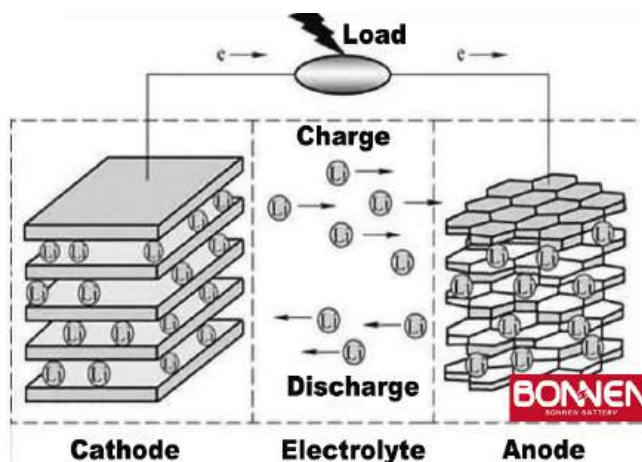
Reacción en el cátodo:



Reacción en el ánodo:



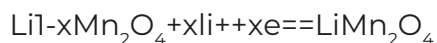
Figura 34. Reacción química durante los procesos de carga y descarga de una batería de litio (Batteries, 2025)



15.5 Proceso de descarga en detalle

Durante la descarga, el proceso se invierte. Los electrones fluyen desde el ánodo al cátodo a través del circuito externo, suministrando energía a la carga conectada (como un barco eléctrico o motores de vehículos). Al mismo tiempo, los iones de litio del ánodo viajan de regreso a través del electrolito, cruzando el separador hasta el cátodo, donde se combinan con los electrones que regresan.

Reacción en el cátodo:



Este flujo de iones de litio y electrones entre el cátodo y el ánodo es lo que alimenta los dispositivos durante la descarga.

Reacción en el ánodo:



16 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

A comprehensive review of electric vehicle recycling: Processes in selective collection, element extraction, and component regeneration

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344925001880>

A review of construction and sustainable recycling strategies of lithium-ion batteries across electric vehicle platforms

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/ra/d5ra04471e>

A review on Lithium-ion battery failure risks and mitigation indices for electric vehicle applications

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025ApEn..39326139K/abstract>

Current Status and Trends of Automotive Lithium-ion Batteries

https://www.jstage.jst.go.jp/article/electrochemistry/93/6/93_25-71009/_html/-char/en

Enhancing thermal performance for electric vehicle lithium-ion battery pack based on active thermal management

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931025003679>

Generation 1 - V4Smart

<https://www.v4smart.com/generation-1/>

Lithium-Ion Battery Technology & Products | Electrovaya

<https://electrovaya.com/technology-products/>

prBAS EN IEC 62660-3:2026 - Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles - Part 3: Safety requirements

<https://isbih.gov.ba/en/plan-rada/view/116131>

Recent update progress for the battery thermal management of electric vehicles: challenges and solutions

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-025-14524-x>

Secondary Lithium-Ion Cells for the Propulsion of Electric Road Vehicles Part 3 Safety Requirements (Bureau of Indian Standards)

https://www.services.bis.gov.in/php/BIS_2.0/StandardsFormulationV2/doc_details_outside.php?ID=MjgyMjk%3D



UNIDAD TEMÁTICA 6



MOTORES DE IMANES PERMANENTES

1 INTRODUCCIÓN

Un motor sincrónico de imanes permanentes (PMSM, por sus siglas en inglés) es una máquina eléctrica de corriente alterna generalmente alimentada con tensión trifásica. Esta máquina consta esencialmente de dos piezas principales. Por un lado, se tiene el estator, el cual posee arrollados

que, alimentados con tensión alterna, generan un campo magnético rotante. Por otro lado, se tiene el rotor, en cuyo interior se encuentran los imanes; el campo magnético de los mismos interactúa con el generado por el estator, logrando el movimiento. Existen varias configuraciones posibles de PSMs. Las más comunes son la de rotor interno y la de rotor externo.

Figura 35. Motor Brushless (Ajay, 2025)



La característica sincrónica de estos motores viene dada por la proporcionalidad que existe entre la frecuencia de la tensión de alimentación y la frecuencia de rotación de la máquina. Esto permite utilizarla en un cierto rango de estados de carga, sin que varíe la velocidad de rotación; sin embargo, existe un nivel de carga máxima para el cual el motor deja de funcionar. Otra característica destacable es que, al tener imanes en el rotor en vez de bobinas, este tipo de motores no poseen escobillas, lo cual disminuye la necesidad de realizar mantenimiento. Además, pueden alcanzar altas revoluciones con niveles de torque y eficiencia elevados. Estas propiedades hacen atractiva la aplicación de un PMSM en el área del aeromodelismo en herramientas portátiles. Por último, es importante mencionar que estas

máquinas también pueden ser operadas como generador, ya que al aplicar un torque externo sobre el eje y hacer girar el conjunto se observa una tensión trifásica en los bornes del estator.

2 ANTECEDENTES

2.1 Imanes permanentes

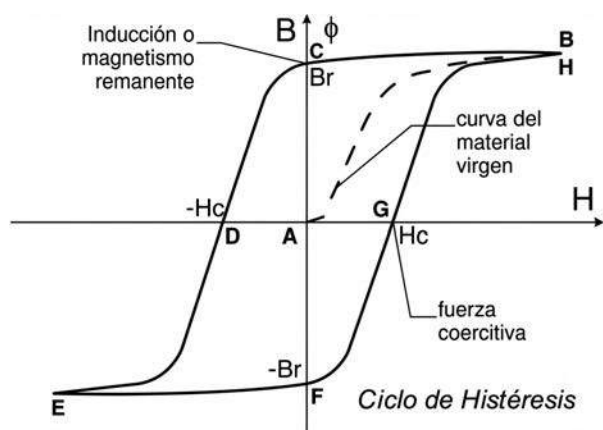
Los imanes permanentes son materiales que, sin presentar campo magnético de forma natural, al ser imantados pueden generar su campo magnético de forma persistente. La diferencia fundamental con un imán convencional es que estos últimos sólo generan campo mientras la fuerza externa que lo provoca esté actuando. Al igual que los materiales ferromagnéticos, se caracterizan por su curva de histéresis.

La curva de histéresis de un material es la curva que define su magnetización, enfrentando campo magnético (H) e inducción magnética (B); es particular de cada material. Una de las propiedades de los imanes permanentes es que su curva de histéresis es especialmente amplia.

2.2 Caracterización de los IP: curva de histéresis

Se pueden explicar las propiedades de estos materiales a través del estudio de su curva de histéresis.

Figura 36. Ciclo de histéresis (Lozano & Tendela, 2003)



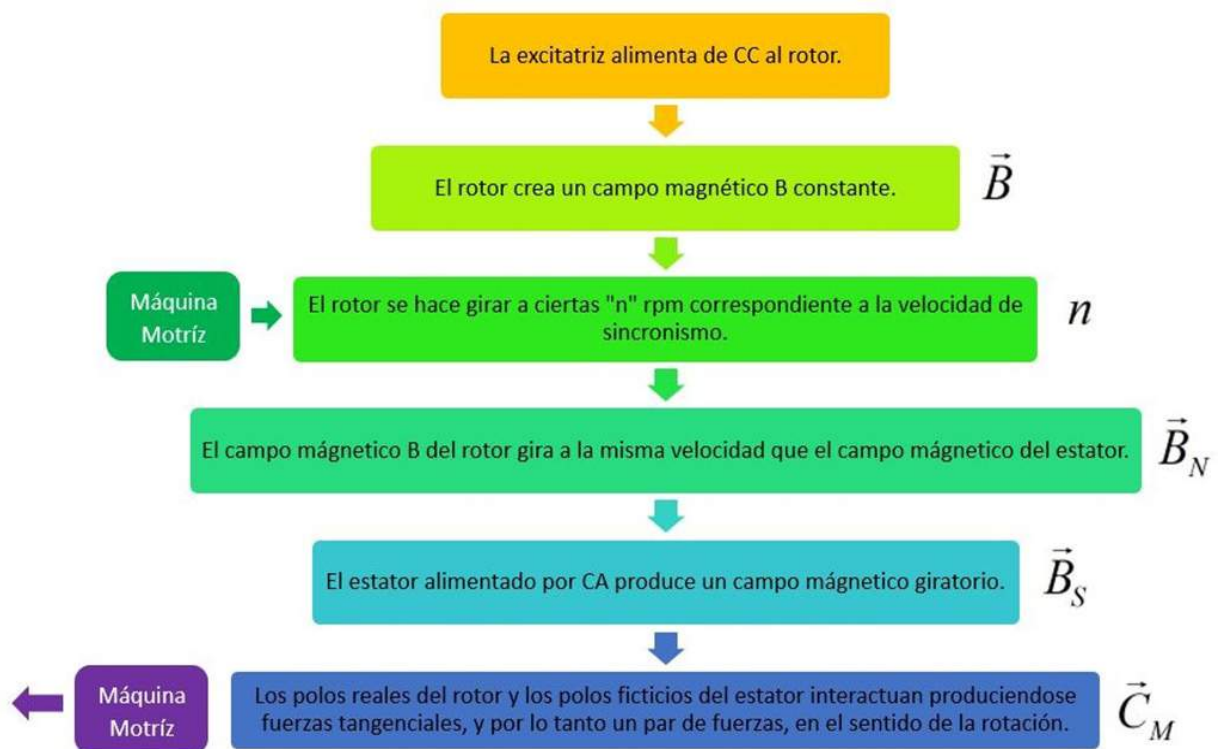
Ahora bien, la característica de estos imanes permanentes es que resulta difícil desimantarlos, aún en presencia de campos H de sentido contrario grandes, lo que significa que también deben presentar una alta fuerza coercitiva H_c . Este comportamiento se debe a que, una vez orientados los dominios, los ordenamientos magnéticos de los imanes tienen grandes dificultades para volver al estado original, con direcciones de sus momentos magnéticos al azar. Un imán permanente proporciona, por tanto, un campo magnético al exterior, al igual que una bobina por la que circula corriente. Gracias a ello es posible emplearlos en la construcción de motores eléctricos y

generadores de corriente continua. El inconveniente de estos materiales es que, una vez se desmagnetiza, el nivel de inducción alcanzado en la próxima magnetización no será el mismo, sino menor. Por lo tanto, debemos tener en cuenta un gran número de características que podrían concluir en la desmagnetización del imán. Un buen medidor de la calidad del imán es el producto energético máximo, $(BH)_{\text{máx}}$, que indica energía máxima por unidad de volumen que el imán permanente puede llegar a contener, y, por tanto, a generar

3 FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE IMANES PERMANENTES

En el funcionamiento de esta máquina, ambas partes se enlazan magnéticamente a través de un campo electromagnético. El estator está constituido por un núcleo de chapas apiladas de material ferromagnético y alberga un devanado monofásico de corriente alterna. Por su parte, el rotor, también fabricado con material ferromagnético, aloja el devanado de excitación en las máquinas síncronas convencionales; este se alimenta con corriente continua para generar el campo magnético de la máquina.

Es este bobinado el que se puede sustituir por los imanes permanentes. En estos sistemas, al tener los motores eléctricos convencionales un colector de delgas o un par de anillos rozantes, producen rozamiento, disminuyendo el rendimiento y desprendiendo calor y ruido, por lo que requerían mucho mantenimiento. Con el empleo de imanes se consiguen máquinas de mucho mejor rendimiento y bajo costo de mantenimiento, gracias al ahorro de uno de los devanados.



4 TIPOS DE MOTORES DE IMANES PERMANENTES

4.1 Según la armadura

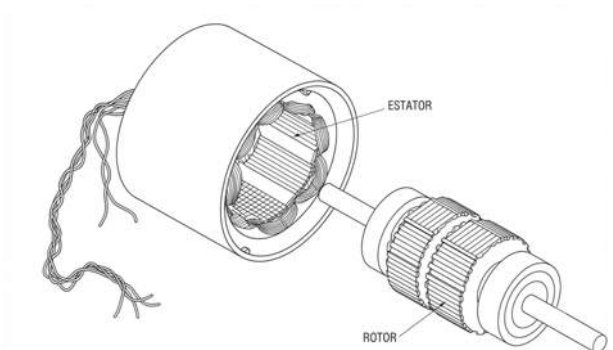
En general, el campo magnético de un motor de cd se puede producir por bobinas o imanes permanentes. Los motores de cd de imán permanente se pueden clasificar de acuerdo con el esquema de conmutación y al diseño de la armadura. Los motores de cd convencionales tienen escobillas mecánicas y conmutadores. Sin embargo, en una clase importante de motores de cd la conmutación se hace en forma electrónica; este tipo de motor se llama motor de cd sin escobillas. De acuerdo con la construcción de la armadura, el motor de cd de imán permanente tiene tres tipos de diseño de armadura.

De núcleo de hierro

Es un motor de imanes permanentes con núcleo hierro. También conocido

como motor de reluctancia variable, no utiliza un campo magnético permanente, resultado de lo cual puede moverse sin limitaciones o sin un par de paradas. Este tipo de montaje es el menos común y se usa, generalmente, en aplicaciones que no requieren un alto grado de par de fuerza, como puede ser el posicionamiento de un mando de desplazamiento.

Figura 37. Motor CC de imán permanente con núcleo hierro (sandhillskids, 2019)

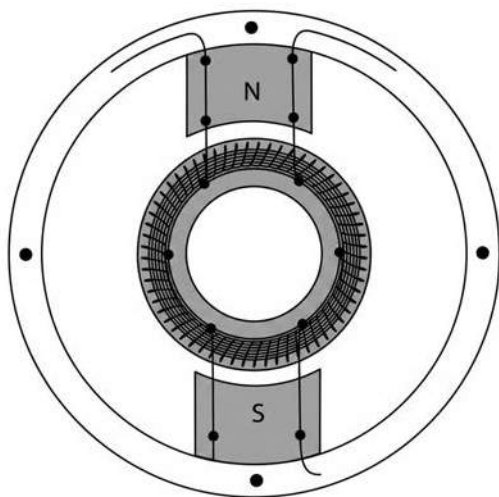


De devanado móvil

La figura muestra la construcción del rotor de un motor de DC de imán permanente de devanado superficial. Los conductores

de la armadura están pegados a la superficie de la estructura cilíndrica del rotor, la cual está hecha de discos laminados sujetos al eje del motor. Ya que en este diseño no se emplean ranuras sobre el rotor, no presenta el efecto de “rueda dentada”. Puesto que los conductores están proyectados en el entrehierro de aire que está entre el rotor y el campo de imán permanente, este campo tiene menor inductancia que el de estructura de núcleo de hierro.

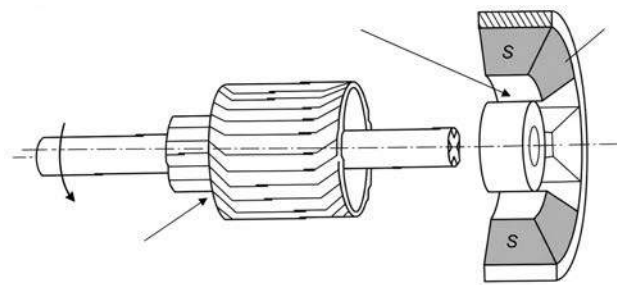
Figura 38. Motor de devanado móvil (Ecured, 2019)



De bobina móvil

Los motores de bobina móvil están diseñados para tener momentos de inercia muy bajos e inductancia de armadura también muy baja. Esto se logra al colocar los conductores de la armadura en el entrehierro entre la trayectoria de regreso del flujo estacionario y la estructura de imán permanente. En este caso la estructura del conductor está soportada por un material no magnético -normalmente resinas epóxicas o fibra de vidrio- para formar un cilindro hueco. Uno de los extremos del cilindro forma un eje que está conectado al eje del motor.

Figura 39. Motor de devanado móvil (Viscaino, s.f.)



4.2 Motores paso a paso

Los motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de tan solo 1.8° , es decir que se necesitarán 4 pasos en el primer caso (90°) y 200 para el segundo caso (1.8°), para completar un giro completo de 360° . Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas está energizada, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.

A. Principio de funcionamiento

Básicamente estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator. Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) debe ser externamente manejada por un controlador.

Figura 40. Rotor y estator (Quark, s.f.)



Imagen del rotor

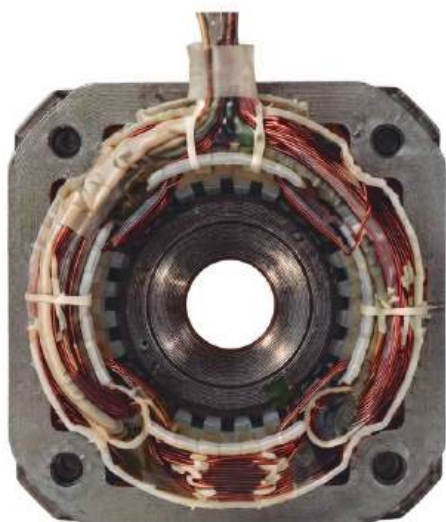


Imagen de un estator de 4 bobinas

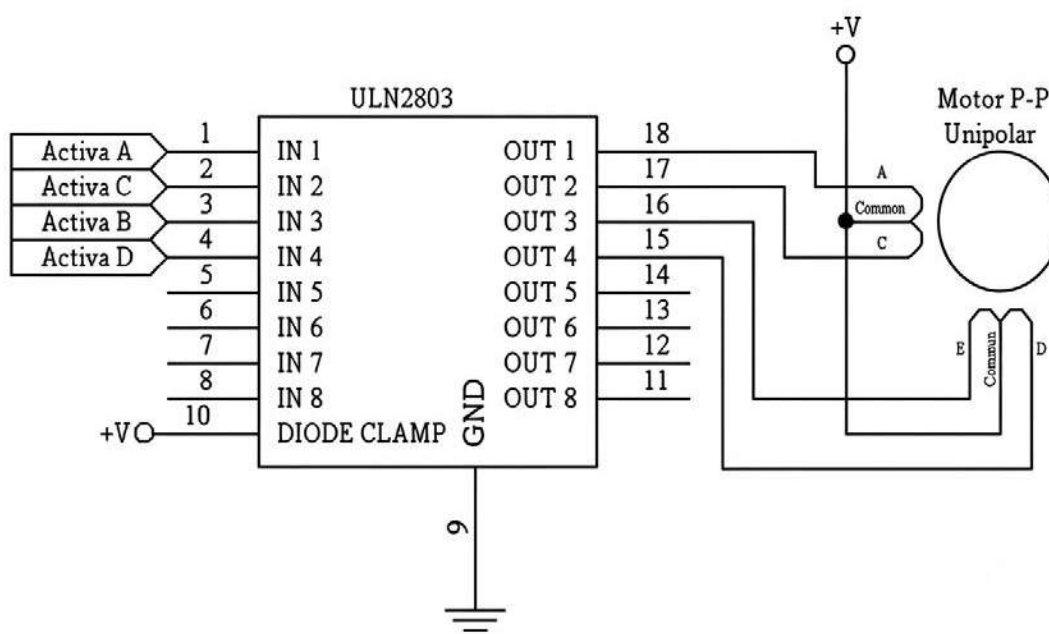
Unipolar

Estos motores suelen tener 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexión interna. Este tipo se caracteriza por ser más simple de controlar. En la figura podemos apreciar un ejemplo de conexión para controlar un motor paso a paso unipolar mediante el uso de un ULN2803, el cual es un array de 8 transistores tipo Darlington capaces de manejar cargas de hasta 500mA. Las entradas de activación (Activa A, B, C y D) pueden ser directamente activadas por un microcontrolador.

Aplicaciones:

- Impresoras, fotocopiadoras y ploteadoras.
- Máquinas de control numérico.
- Lectoras de CD.
- Robótica y servomecanismos.

Figura 41. Motor a pasos unipolar (need4bits, 2014)



Bipolar

Tienen generalmente cuatro cables de salida y necesitan ciertos trucos para ser controlados, debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento. En la figura podemos apreciar un ejemplo

de control de estos motores mediante el uso de un puente en H (H-Bridge). Como se aprecia, será necesario un H-Bridge por cada bobina del motor, es decir que para controlar un motor paso a paso de 4 cables, necesitaremos usar dos H-Bridges iguales al de la figura. En general es recomendable el uso de H-Bridge integrados, como es el caso del L293.

Figura 42. Motor bipolar (need4bits, 2014)

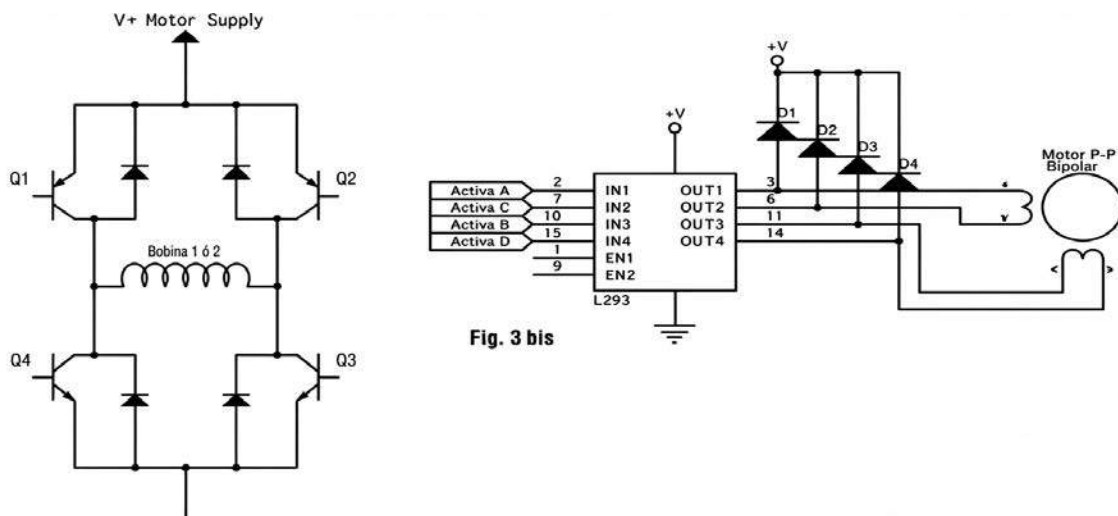


Fig. 3 bis

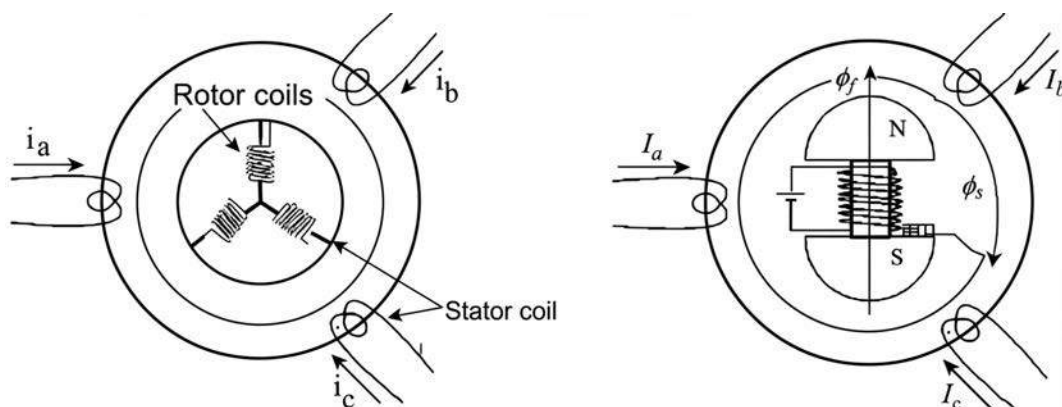
5 SEGÚN CAMPO MAGNÉTICO EN AC

5.1 Motores síncronos (PMSM)

Este motor tiene la característica de que su velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia de la red de

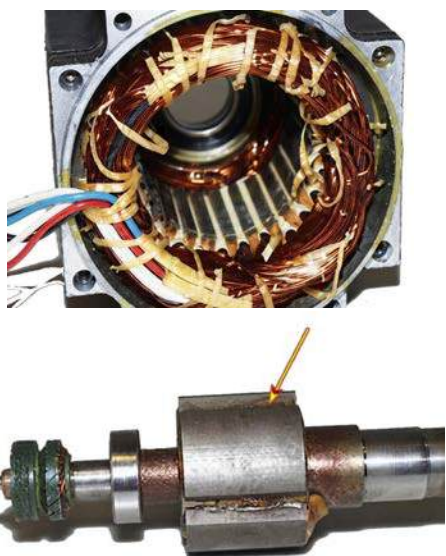
corriente alterna que lo alimenta. El motor síncrono utiliza el mismo concepto de un campo magnético giratorio producido por el estator, pero ahora el rotor consta de electroimanes o de imanes permanentes (PM) que giran sincrónicamente con el campo del estator.

Figura 43. Motores síncronos (Valencia, 2011)



El motor síncrono es utilizado en aquellos casos en que los que se desea velocidad constante.

Figura 44. Motor de imanes permanentes (Berizo, 2024)



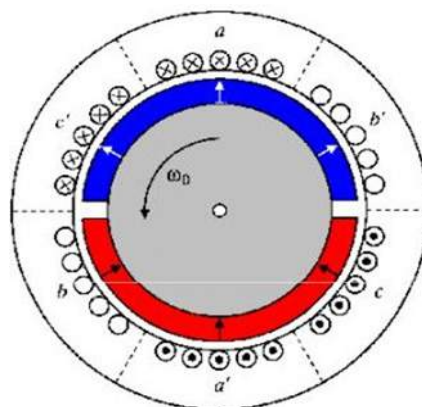
Al conectar el devanado trifásico del estator a una red exterior de alimentación, las corrientes trifásicas que circularán por las bobinas del estator darán origen a una onda de f.m.m. giratoria que será determinante, a su vez, de un campo giratorio de igual velocidad.

5.2 Motores de imanes permanentes conmutados o trapecoidales

El rotor tiene dos imanes que cubren cada uno aprox. 180° del perímetro del rotor y producen una densidad de flujo. El estator tiene un bobinado trifásico donde los conductores de cada fase están distribuidos uniformemente en porciones de arcos de 60° . El sistema de potencia conectará una fuente controlada de corriente a los bobinados del estator, de manera que en cada momento conectemos 2 fases del bobinado. Cada imán del rotor interactúa con 2 arcos de 60° por los que circule corriente. Cuando

los bordes del imán del rotor alcanzan el límite entre las fases del estator, un detector, tal como un sensor de efecto Hall montado en el estator, detectará la inversión del campo magnético del air-gap, causando una apropiada secuencia de conmutación de los transistores.

Figura 45. Motor de imanes permanentes conmutados (Valencia, 2011)



6 APLICACIONES

6.1 Vehículos híbridos-eléctricos

Los vehículos híbridos eléctricos son aquellos que comparten en su sistema de tracción un motor de combustión interna y un motor eléctrico; sin embargo, dependiendo de la función del vehículo y la distribución de potencia del mismo, la configuración y funciones de estos componentes puede diferir. Es así como se pueden clasificar, dependiendo de la conexión misma del motor eléctrico y de combustión, como series o paralelos.

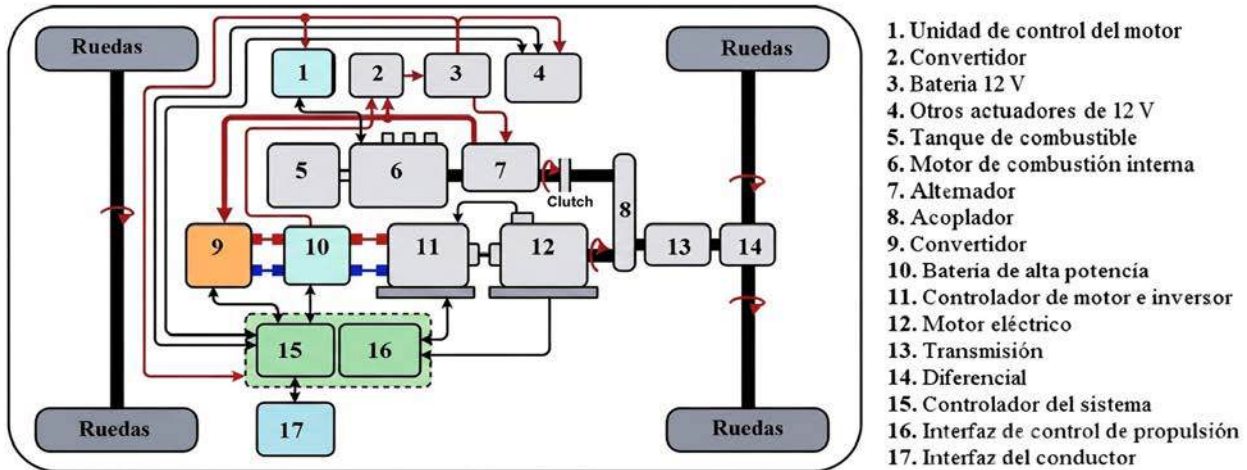
6.2 Conexión en paralelo

La configuración en paralelo permite que el motor de combustión interna y el motor eléctrico entreguen potencia al sistema de tracción de manera independiente o bien juntos, como se puede apreciar en la imagen. Tanto el motor eléctrico

como el motor de combustión están conectados a la transmisión del vehículo. El motor eléctrico puede ser usado como un generador para cargar el banco de

baterías por medio del freno regenerativo, el cual aprovecha la energía cinética del vehículo para transformarla en energía eléctrica por medio del motor síncrono.

Figura 46. Conexión en paralelo (Ramos Calambas, 2020)

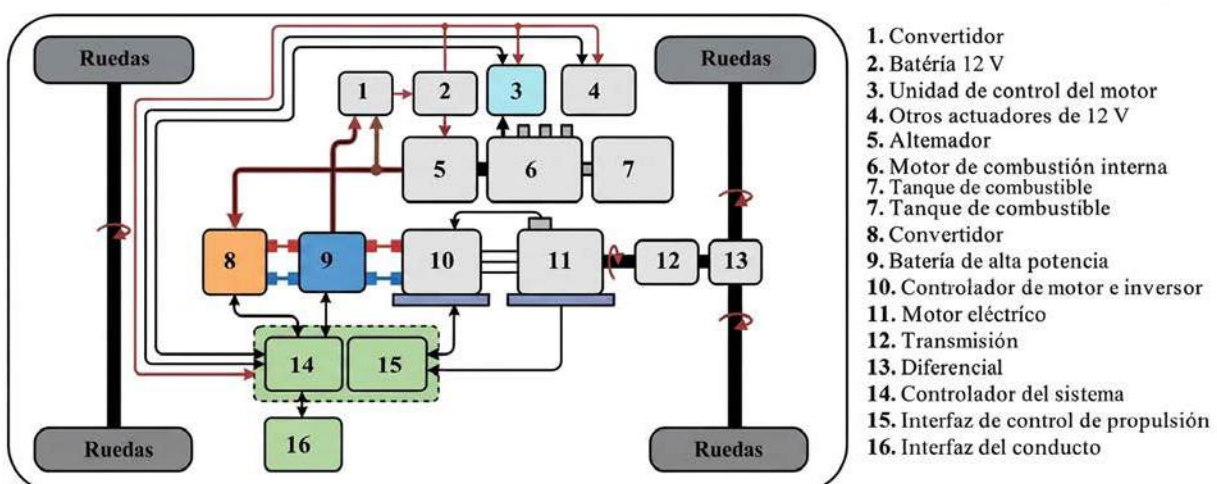


6.3 Conexión en serie

Con la configuración en serie el vehículo es impulsado únicamente por medio del motor eléctrico, empleando la energía suministrada por un generador que se encuentra accionado por el motor de combustión. Básicamente sería un motor eléctrico asistido por un motor de combustión, cuyo objetivo es ampliar el rango de conducción a comparación de uno netamente eléctrico. Una desventaja

sería que los dispositivos necesarios para su impulsión deben ser dimensionados para entregar su máxima potencia de forma sostenida, por ejemplo, al momento de subir una pendiente larga. Además, la eficiencia del vehículo es menor por la conversión de energía continua: mecánica del motor de combustión a eléctrica del generador, para luego ser mecánica nuevamente, como se observa en la figura.

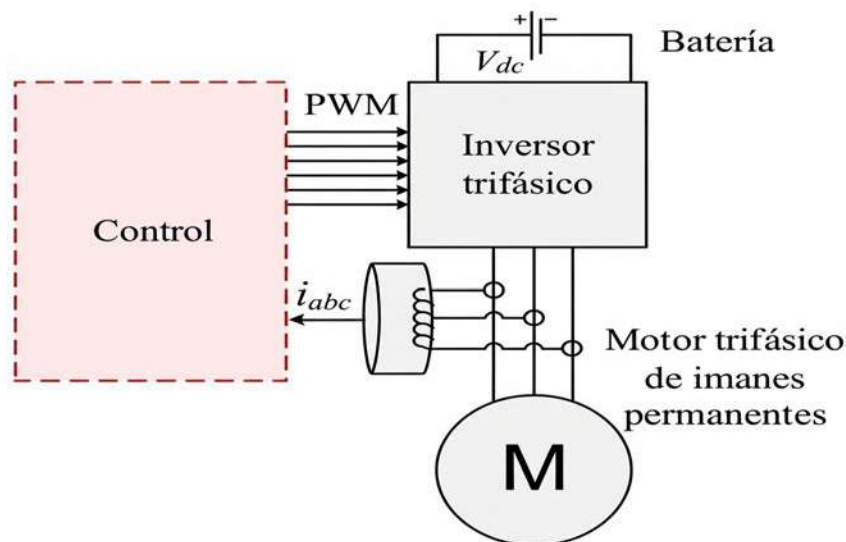
Figura 47. Conexión en serie (Ramos Calambas, 2020)



Los motores asíncronos son los más usados a nivel industrial. El movimiento giratorio en el rotor se produce por medio de inducción electromagnética del campo magnético generado por el bobinado del estator. Por otra parte, los motores síncronos se usan principalmente como generador de energía. Alrededor del 97% de la energía generada en el mundo es producida por ellos, pudiendo aquí trabajar como motor, convirtiendo energía eléctrica en mecánica, o como generador, convirtiendo energía mecánica en eléctrica. Para la tracción

de vehículos eléctricos, los motores síncronos de imanes permanentes son los principales competidores de los de inducción, gracias a su mayor eficiencia y menor calentamiento. Marcas como Toyota, Honda o Nissan emplean este tipo de motores para sus vehículos eléctricos. Como ejemplo, el reconocido Tesla Model S usa motores de inducción, mientras que otros, como el Toyota Prius, emplean motores de imanes permanentes. La siguiente es una representación del conjunto motor/inversor/control, asumiendo alimentación por baterías.

Figura 48. Conjunto de motor, inversor y batería (Alvatronics, 2026)



7 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

A comprehensive approach for design and optimization of a high power density interior permanent magnet motor for EVs

<https://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/vol33/iss5/9/>

Design and Analysis of an IE6 Hyper-Efficiency Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Applications

<https://www.mdpi.com/1996-1073/18/17/4684>

Design of a High-Specific-Power Traction Motor: Innovations and Strategies for Superior Performance

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/11082312>

Design optimization of a novel dual-skewed Halbach-array double-sided axial flux permanent magnet motor for electric vehicles

<https://www.nature.com/articles/s41598-025-10154-3>

High Performance Rare-Earth Free Interior Permanent Magnet Motor Enabled by Carbon Fiber Sleeve and Iron Nitride Magnets

<https://ieeexplore.ieee.org/document/11061088>

Optimisation of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles

<https://ieeexplore.ieee.org/document/10921191>

Performance evaluation of a nearest level control-based TCHB multilevel inverter for PMSM motors in electric vehicle systems

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025000374>

PM and PM-Less Motors for Electric Vehicles: A Comparative Analysis

<https://ieeexplore.ieee.org/document/10700450>

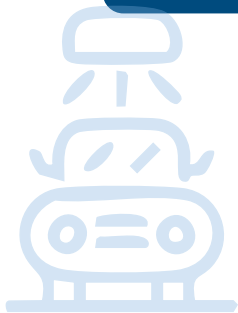
Real-time and hardware in the loop validation of electric vehicle performance: Robust nonlinear predictive speed and currents control based on space vector modulation for PMSM

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302400478X>



UNIDAD TEMÁTICA 7

TRANSMISIONES EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS



1 INTRODUCCIÓN

La creciente electrificación del sistema de propulsión representa tanto una oportunidad como un desafío para replantear la transmisión como una combinación de propulsión eléctrica y componentes mecánicos, adaptándola a las exigencias actuales del mercado. Pero ¿cómo es la transmisión híbrida perfecta? Los fabricantes de vehículos han desarrollado una innovadora transmisión híbrida que permite el funcionamiento en serie/paralelo, proporcionando así una sensación de conducción que antes solo estaba disponible en vehículos eléctricos.

Figura 49. Transmisión de un vehículo híbrido (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)



Dos motores eléctricos, un embrague laminar y una relación fija sin cambios con tres juegos de engranajes garantizan una complejidad general menor que la de la mayoría de los diseños de transmisión híbrida anteriores. El diseño básico se utiliza en aplicaciones transversales delanteras y en vehículos híbridos completos e híbridos enchufables. Paralelamente, se están desarrollando módulos híbridos para las posiciones P1 y P2, con el fin de aumentar aún más el grado de electrificación en las arquitecturas de propulsión convencionales.

Híbrido: ¿cuál es el siguiente paso?

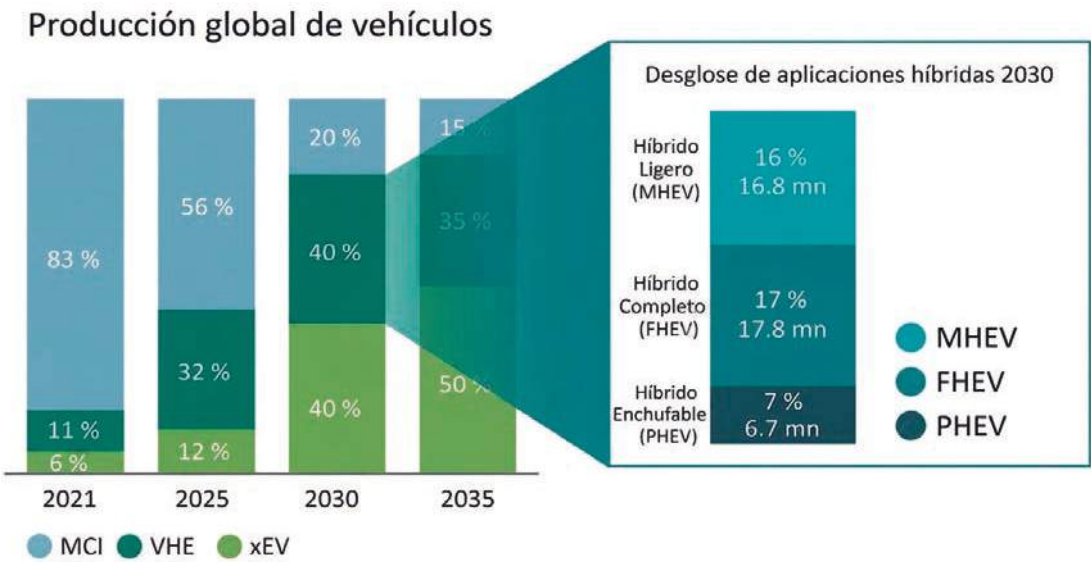
La legislación centrada en las emisiones del tubo de escape ha tenido un impacto significativo en la forma en que se ha desarrollado el mercado de sistemas de propulsión parcial o totalmente electrificados. El New Green Deal de la Unión Europea significará que sólo se podrán matricular vehículos completamente libres de emisiones a partir de 2035. En muchas otras regiones del mundo, los objetivos pueden variar. Por ejemplo, California también insiste en que los vehículos sean 100 % libres de emisiones para 2035, pero permite que el 20 % de ellos sean híbridos enchufables, mientras que, por otro lado, solo se están estableciendo umbrales de CO₂ para 2030 en muchos mercados asiáticos. Existe una inconsistencia adicional en el comportamiento del usuario final, ya que tanto los costes como la comodidad de conducción y, sobre todo, la facilidad de carga/repostaje tienen distintos grados de influencia. Los comportamientos de los consumidores varían enormemente y pueden verse influenciados por incentivos para comprar o prohibiciones de uso, como conducir vehículos con motores de combustión interna (ICE) en las ciudades.

En este contexto, se estima que los sistemas híbridos representarán aproximadamente el 40 % del mercado mundial para 2030, incluyendo sistemas híbridos suaves, híbridos completos y enchufables. Se prevé que el mercado de estos sistemas crezca de forma constante hasta 2030, año en el que comenzará a decrecer gradualmente debido a los avances en la tecnología de baterías y al desarrollo de la infraestructura de carga. Para mercados en crecimiento como India e Indonesia, la hibridación sigue siendo una opción muy atractiva para reducir las

emisiones de CO₂ del tráfico. Se estima que aproximadamente el 30 % de todos los vehículos de nueva matriculación

contarán con un sistema híbrido para 2035.

Figura 50. Cuota de mercado mundial de vehículos híbridos y distribución por tecnología híbrida (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)



El papel que desempeñará el sistema híbrido enchufable dependerá de la legislación regional pertinente. Un sistema híbrido enchufable ofrece una buena relación calidad-precio, especialmente cuando una parte significativa del trayecto puede completarse con energía eléctrica. Para cumplir este requisito, se espera que los vehículos híbridos enchufables ofrezcan una autonomía de al menos 100 km en el futuro. Además, permiten a los conductores cubrir

distancias mucho mayores sin depender de una infraestructura de carga gracias a la opción de usar el motor de combustión interna. En algunas regiones del mundo, éste podría ser el sistema de propulsión preferido a medida que los precios sigan bajando.

En el mercado se ofrece una gama de sistemas de accionamiento para satisfacer los diferentes requisitos de los vehículos híbridos.

Figura 51. Accionamientos de ejes eléctricos, módulos híbridos y una transmisión híbrida dedicada como sistemas de propulsión para vehículos híbridos (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)



Los accionamientos eléctricos de eje en posición P4 en el eje trasero permiten la hibridación de las cuatro ruedas al combinarse con una topología P0/P1 en el tren delantero. Esto produce mejoras específicas en el rendimiento y la tracción, además de mejoras en la eficiencia. La producción en serie comenzó en 2019. El conjunto de tecnologías existentes constituye la base de numerosas soluciones que se están desarrollando aún más, principalmente en términos de mayor densidad de rendimiento con una menor demanda de recursos. También se ofrecerán otras características de conducción para los clientes, como la opción de influir en la dinámica transversal mediante funciones de vectorización de par. El desacoplamiento del eje eléctrico, que permite una tracción total de alta eficiencia, también forma parte de la gama de soluciones.

Schaeffler, por ejemplo, ha estado produciendo módulos híbridos de alto voltaje para su instalación entre el motor y

la transmisión (P1 o P2) desde 2018. Un módulo de tercera generación con convertidor de par integrado ha estado en producción en serie desde 2019. Este módulo puede utilizarse con sistemas de propulsión en línea en combinación con transmisiones automáticas. Transmite hasta 700 Nm de par desde el motor de combustión interna y también suministra 300 Nm desde el motor eléctrico. Esto da como resultado una tracción muy alta, razón por la cual este módulo se utiliza principalmente en SUV y camionetas. Además de esto, también está en desarrollo un accionamiento P2 de 48 V de cuarta generación con electrónica de potencia integrada, que entrará en producción en serie en 2025. El diseño extremadamente compacto, que incluye el motor eléctrico y un convertidor de par, permite su instalación en un sistema de propulsión delantero transversal. La conexión directa a la electrónica de potencia garantiza que el fabricante del vehículo pueda integrar el sistema con un mínimo esfuerzo.

Figura 52. Tipos de módulos híbridos (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)



Otra solución, en producción en serie desde principios de 2022, es un módulo híbrido P1 para una transmisión híbrida dedicada P1+P3. El módulo híbrido funciona como una unidad que puede probarse por separado para el componente generador P1 de la transmisión híbrida dedicada. Un embrague separador está integrado en el rotor para desacoplar el motor de combustión interna y el generador P1 durante la conducción puramente eléctrica. Dado que se trata de una transmisión híbrida de tres velocidades en la aplicación de volumen actual, un segundo embrague actúa como un embrague clásico. Este módulo tiene 92 mm de longitud y una potencia eléctrica de 60 kW, y se caracteriza por un diseño axial extremadamente compacto y un motor eléctrico de alta eficiencia.

Los módulos híbridos ofrecen la ventaja de un uso flexible dentro de una plataforma de agregado existente, así como pares de eje muy elevados que se pueden generar combinando el motor de combustión interna y el motor eléctrico con las relaciones de transmisión. Los módulos híbridos se pueden combinar básicamente con todo tipo de transmisión. Los módulos híbridos avanzados y a gran escala se utilizan cada vez con más frecuencia en la electrificación de vehículos comerciales.

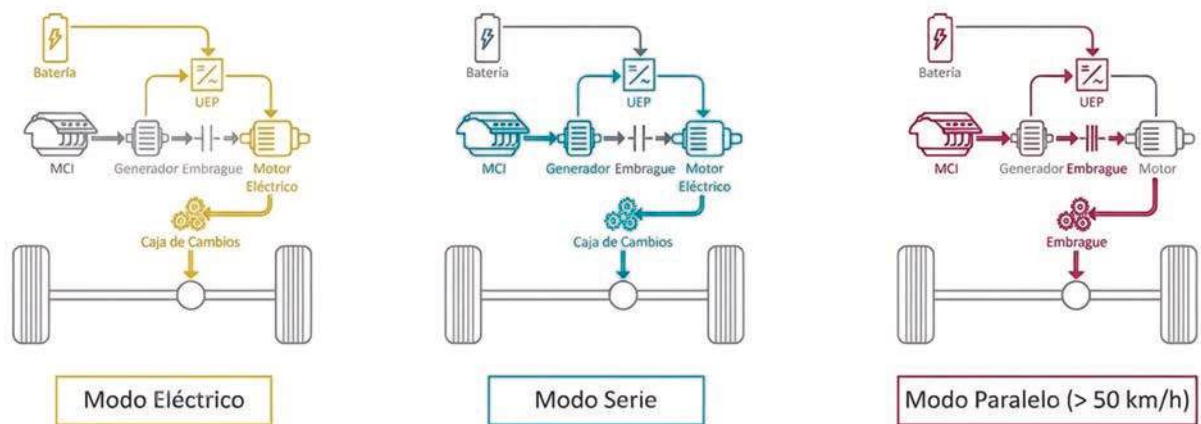
Se está desarrollando actualmente una transmisión ideal y específica para vehículos híbridos, conocida como transmisión híbrida multimodo (MMH), que se producirá en serie en 2025. Cuenta con dos motores eléctricos, uno en

configuración P1 y otro en configuración P3. La arquitectura elegida permite el funcionamiento eléctrico, en serie y en paralelo, con accionamiento mecánico directo del motor de combustión interna (de ahí la denominación de transmisión híbrida multimodo). Esta solución supone un paso más hacia la electrificación total e incluye un potencial de eficiencia extremadamente alto, máximo confort y costes muy bajos.

2 DISEÑO DE LA TRANSMISIÓN HÍBRIDA DEDICADA

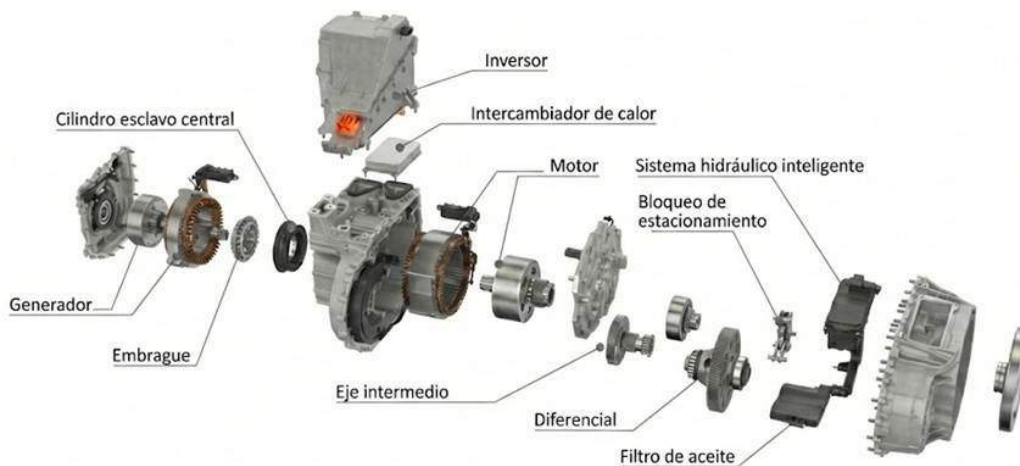
En la siguiente figura se muestra la arquitectura básica de la transmisión híbrida dedicada desarrollada por un fabricante. Se ha elegido la construcción con dos motores eléctricos, un embrague y una relación fija sin cambios, para permitir tanto el funcionamiento puramente eléctrico como el modo serie o paralelo. En modo puramente eléctrico o serie, el accionamiento se realiza íntegramente mediante el motor de tracción en la posición P3. En modo serie, el motor de combustión interna con el generador en la posición P1 proporciona la energía necesaria y puede producir un funcionamiento óptimo mediante una carga adicional en el generador si es necesario. El embrague se cierra en modo paralelo para facilitar el accionamiento mecánico directo a través del motor de combustión interna. Los motores eléctricos también pueden utilizarse como accionamiento adicional (boost) o como modo generador (desplazamiento del punto de carga).

Figura 53. Topología y flujos de energía en transmisiones híbridas
(Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)



La transmisión está diseñada como una unidad completa que incluye todos los componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos, incluidos los componentes necesarios para la disipación del calor.

Figura 54. Componentes clave de la transmisión híbrida
(Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)

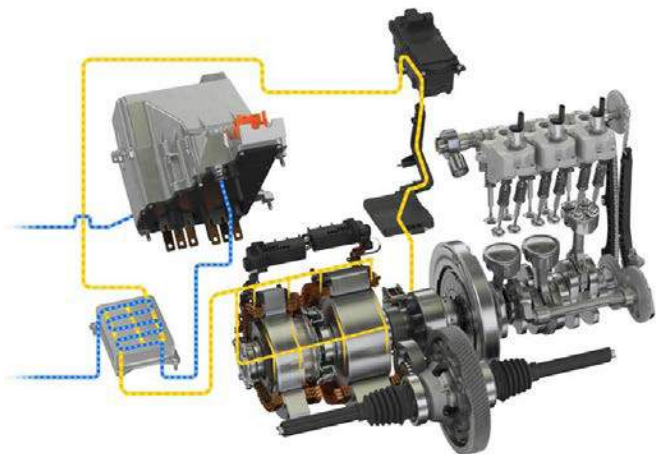


Tanto los motores eléctricos con tecnología de horquilla como el embrague de separación central están integrados en una carcasa que ahorra espacio. La carcasa de la transmisión se ubica tras una pared intermedia que oculta todas las etapas de engranaje: por un lado, una etapa de corona dentada que actúa como relación entre el motor de combustión interna y el generador, y por otro, la reducción al eje, que se logra mediante un eje intermedio en dirección a la transmisión final. Esta

solución altamente integrada incluye toda la unidad hidráulica, controlada según la demanda, responsable de la refrigeración y la lubricación, además de accionar el embrague y el bloqueo de estacionamiento. Dado que se utiliza una bomba hidráulica inversora que puede cambiar la dirección de transporte en menos de 30 ms, no se requiere una segunda bomba gracias a la lógica de válvulas adecuada.

La electrónica de potencia está conectada a la carcasa y directamente a los motores eléctricos mediante barras colectoras internas, por lo que no requiere cableado. La carcasa también incluye un intercambiador de calor agua/aceite. El alto grado de integración en la transmisión híbrida permite utilizar un sistema de refrigeración por etapas, en el que el circuito de baja temperatura del vehículo actúa como interfaz externa. El refrigerante fluye a través de la electrónica de potencia y luego al intercambiador de calor, donde extrae calor del aceite de la transmisión híbrida. A continuación, la unidad hidráulica transporta el aceite a través de un filtro de aceite hacia los motores eléctricos, los engranajes y los cojinetes en un circuito cerrado. La transmisión híbrida está diseñada para alcanzar la potencia máxima, con un caudal de refrigerante de 8 l/min a una temperatura máxima de 65 °C.

Figura 55. Concepto de refrigeración escalonada en la transmisión híbrida (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)

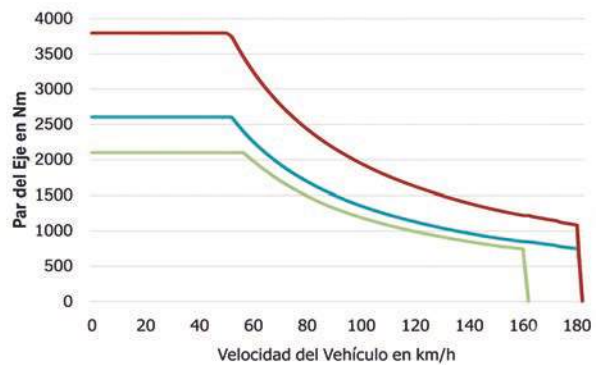


La complejidad mecánica de la transmisión es excepcionalmente baja, con solo tres engranajes de rodaje y once cojinetes. El diseño básico es para su uso en aplicaciones transversales delanteras como un diseño híbrido completo e híbrido

enchufable. Se basa en una salida eléctrica inicial de 125 kW y produce un par máximo en el eje de 2600 Nm. El generador tiene una salida máxima de 110 kW y puede soportar pares del ICE de hasta 250 Nm en el cigüeñal. Las velocidades máximas alcanzadas corresponden a una velocidad del vehículo de 180 km/h. Hay planes adicionales para ofrecer la transmisión en dos clases más de par/potencia. El factor decisivo es el par máximo del ICE, ya que éste tiene una influencia definitiva en los límites operativos de todo el accionamiento. Se pueden utilizar ICE de 80 a 170 kW con pares de 180 a 360 Nm. La velocidad de rotación máxima actual del motor de combustión interna es de 4700 rpm, que corresponde a un motor de gasolina turboalimentado moderno. La potencia de ambos motores eléctricos se adapta a las necesidades, variando principalmente la longitud activa.

Figura 56. Escalabilidad de la transmisión híbrida (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)

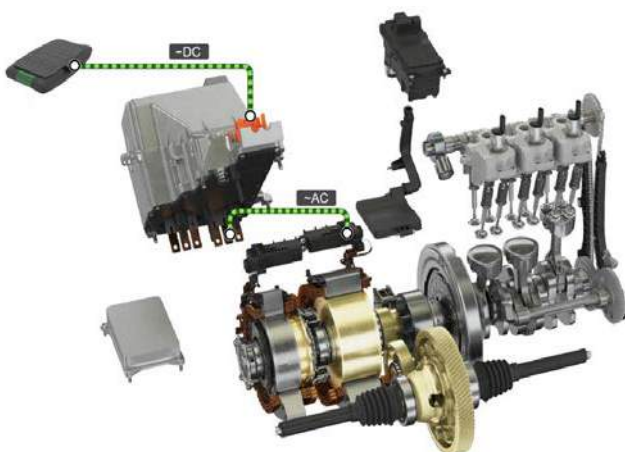
	MMH 180	MMH 250	MMH 360
Par ICE	180 Nm	250 Nm	360 Nm
Potencia del Generador	80 kW	110 kW	170 kW
Par de Rueda	2100 Nm	2600 Nm	3800 Nm
Potencia del Motor	110 kW	125 kW	180 kW
Velocidad del Vehículo	160 km/h	180 km/h	180 km/h
Peso	117 kg	125 kg	135 kg



3 FUNCIÓN DE LA TRANSMISIÓN HÍBRIDA

A continuación, se muestran los distintos modos de funcionamiento, con base en un recorrido teórico con una variante híbrida completa de la transmisión. Antes de iniciar la marcha, el sistema hidráulico libera el bloqueo de estacionamiento con una presión de aproximadamente 6 bares. Para ello, se puede lograr tanto un estado “normalmente cerrado” como un bloqueo biestable. La aceleración desde parado es puramente eléctrica a través del motor de tracción P3 con embrague abierto y el nivel de carga de la batería correspondiente. La velocidad de rotación del motor eléctrico se transmite al eje motriz a través de un eje intermedio y la transmisión final a aproximadamente $i = 8,3$, lo que proporciona la misma experiencia de conducción que un vehículo eléctrico de batería.

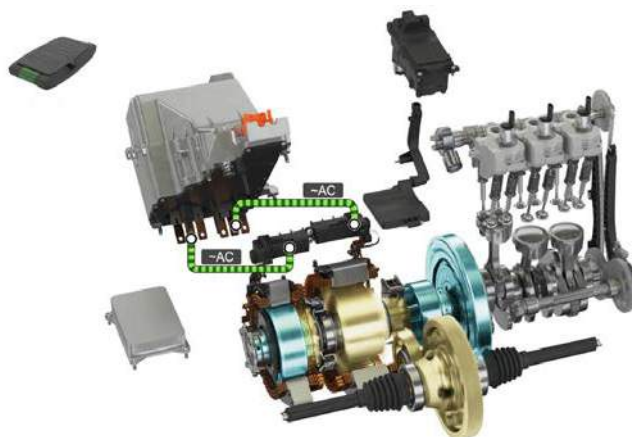
Figura 57. Flujo de energía y fuerzas en modo puramente eléctrico (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)



El motor de combustión interna se pone en marcha mediante el generador eléctrico para acelerar aún más, hasta alcanzar una velocidad típica fuera de ciudad y a

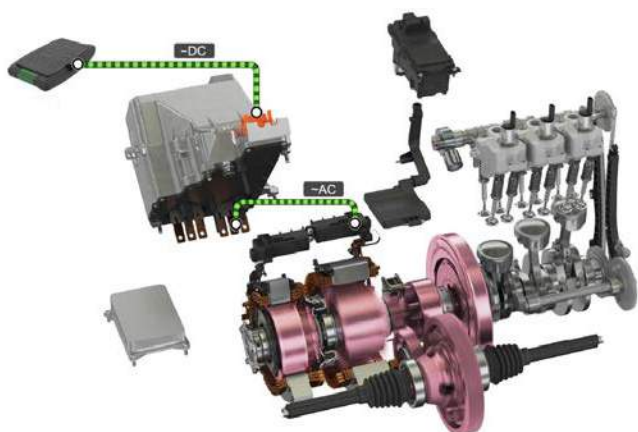
medida que se requiere más energía. En el modo en serie posterior, el generador produce una corriente que se convierte directamente en energía mecánica en el segundo motor eléctrico, es decir, sin necesidad de pasar por la batería. La transmisión directa de corriente a través de un circuito secundario, en lugar de cargar y descargar la batería, garantiza, por un lado, una mayor eficiencia y, por otro, menores costes, ya que se pueden utilizar celdas de batería de menor capacidad y menor vida útil.

Figura 58. Flujo de energía y fuerzas en modo serie (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)



Una vez alcanzada la velocidad de crucero, se puede alcanzar el nivel óptimo de eficiencia general cambiando al modo paralelo. Al cerrar el embrague laminar, el par del motor de combustión interna se utiliza para impulsar las ruedas directamente, y los motores eléctricos pueden generar corriente para el sistema eléctrico del vehículo o par adicional para la transmisión. El cierre del embrague y, por lo tanto, el cambio al modo paralelo se completa hidráulicamente en menos de 200 ms tras sincronizar las velocidades de los motores eléctricos.

Figura 59. Flujo de energía y fuerzas en modo paralelo (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)



La recuperación se produce durante el frenado mediante el motor eléctrico en la posición P3 con el embrague abierto. El diseño del convertidor CC/CC integrado para las variantes híbridas completas, con una potencia nominal de 44 kW (durante 20 s), proporciona una potencia de frenado adecuada que permite recuperar por completo todos los retrasos del ciclo.

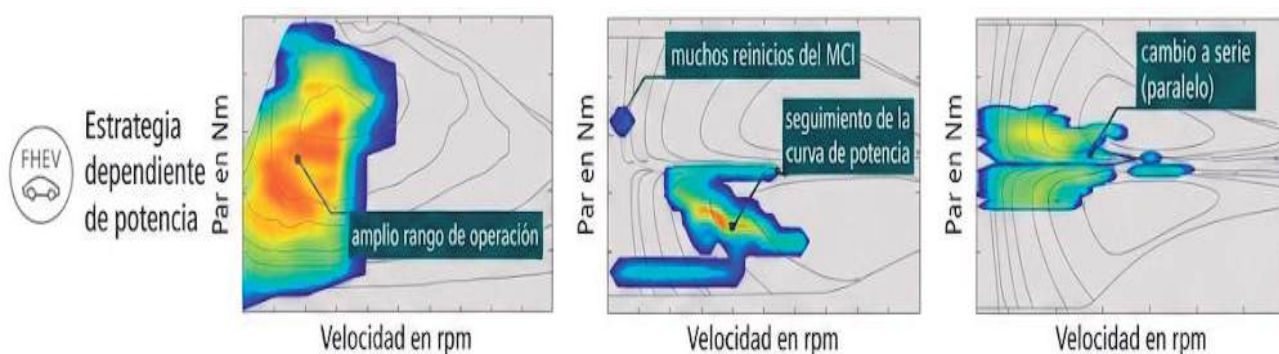
4 ESTRATEGIAS OPERATIVAS Y CAPACIDAD DE CONDUCCIÓN

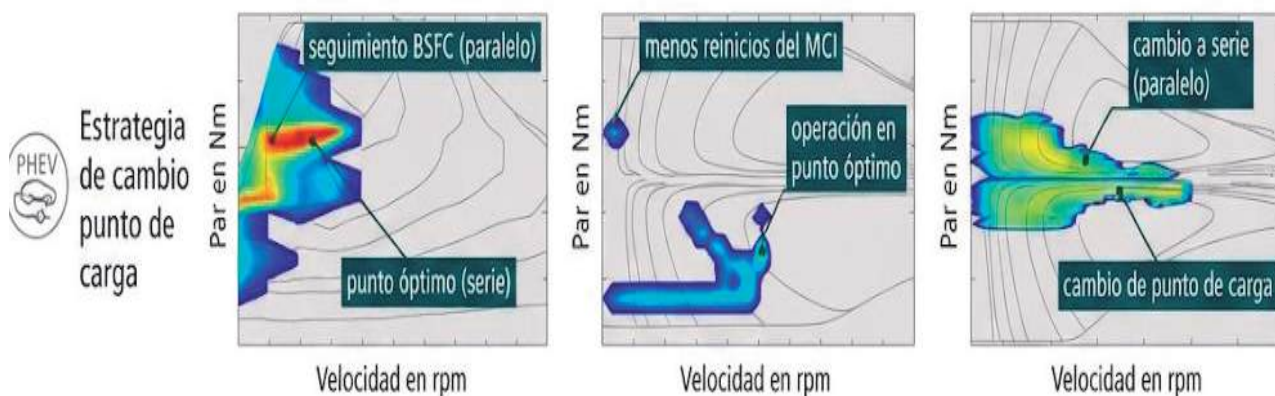
La eficiencia general de un sistema híbrido y, por consiguiente, la reducción de CO₂ dependen no solo de los

componentes individuales, sino también, fundamentalmente, de su funcionamiento conjunto y, por consiguiente, de la estrategia de conducción. Las siguientes estrategias de conducción, tanto para una variante híbrida completa como para una híbrida enchufable, se muestran utilizando el ejemplo de un MMH, que permite optimizar el consumo de combustible en el modo de mantenimiento de carga WLTC. La diferencia a nivel de vehículo reside principalmente en el tamaño de la batería, que influye significativamente en la estrategia de conducción.

En un vehículo híbrido completo, solo se dispone de una batería pequeña, por lo que se utiliza una estrategia de potencia dependiente. En modo serie, la velocidad siempre se selecciona desde el motor de combustión interna, independientemente de la velocidad de la rueda, lo que proporciona el punto óptimo de consumo específico en función de la demanda de potencia. En modo paralelo, la velocidad de conducción determina la potencia objetivo a la velocidad de rotación correspondiente. En general, esto resulta en un rango de funcionamiento comparativamente mayor para el motor de combustión interna.

Figura 60. Grado de utilización de ICE y motor eléctrico en el WLTC en diferentes estrategias operativas para un accionamiento híbrido serie/paralelo (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)





Al operar como vehículo híbrido enchufable con una batería significativamente mayor, es recomendable operar el sistema con desplazamiento del punto de carga. En modo serie, el motor de combustión interna (MCI) opera en el punto óptimo de consumo específico del mapa de rendimiento del motor. En modo paralelo, la carga se selecciona de forma que el punto de funcionamiento dependiente de la velocidad se encuentre en la curva óptima de consumo específico; el exceso de energía se revierte a la batería, mientras que ésta proporciona la energía faltante. En la figura se describe cómo se optimiza específicamente el MCI en este contexto para un sistema híbrido serie/paralelo.

El mapa de rendimiento del generador muestra el modo correspondiente a lo largo de una curva de rendimiento para la propulsión híbrida completa. El punto óptimo para un híbrido enchufable se encuentra claramente en el modo serie. La frecuencia con la que debe reiniciarse el motor de combustión interna disminuye a medida que aumenta el tamaño de la batería. La línea horizontal en el cuadrante de generación muestra, en ambos casos, que la energía cinética del motor de combustión interna se recupera

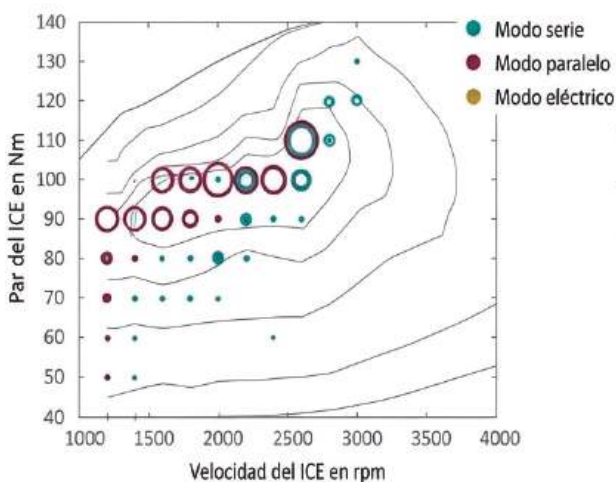
de forma constante en modo generador al apagarse.

Los mapas de rendimiento de los motores de tracción muestran que, entre 4000 y 6000 rpm, se produce una transición del modo serie al paralelo, a medida que el grado de utilización disminuye considerablemente. En el híbrido enchufable, el cuadrante generador presenta una utilización mucho mayor a bajas cargas gracias a la implementación del desplazamiento del punto de carga. El rango de utilización puede variar según el sistema, para proporcionar hasta el 100 % de cobertura de la conducción en un vehículo con autonomía extendida.

Fue posible ilustrar el potencial de la transmisión híbrida MultiMode mediante un vehículo de demostración. Un vehículo de producción en serie actual se convirtió utilizando un sistema híbrido enchufable (motor de gasolina de 1,6 l con una potencia nominal de 80 kW, instalación transversal delantera, transmisión de doble embrague, motor eléctrico P2). El cambio constante del punto de carga en el vehículo de demostración en los modos paralelo y en serie garantiza que más del 85% de los puntos de operación en el WLTC (modo de carga lenta) se

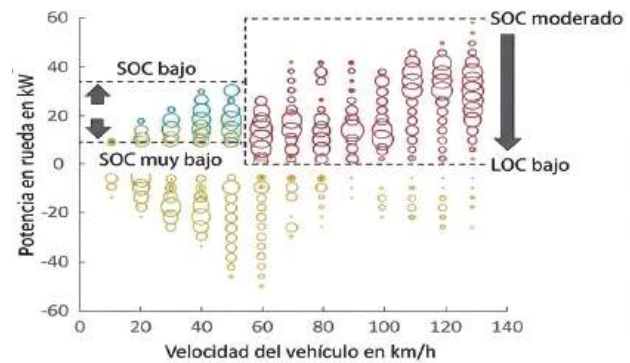
encuentren en el área del consumo específico de combustible óptimo. La imagen muestra los diversos modos de conducción en función del rendimiento y la velocidad del vehículo. Partiendo de un estado de carga alto de la batería, la transición cambia inicialmente del modo paralelo al eléctrico para un rendimiento de conducción menor, y luego pasa del modo serie al eléctrico. Si el estado de carga de la batería alcanza un nivel bajo, las áreas de operación eléctrica y paralela se maximizan por razones de eficiencia, mientras que el componente en serie se utiliza principalmente para estabilizar el estado de carga de la batería. A partir de aproximadamente 60 km/h, el modo principal es paralelo.

Figura 61. Estrategia operativa en un vehículo de demostración



- El 85 % de toda la energía proporcionada por el ICE ocurre durante la operación en el "punto óptimo".

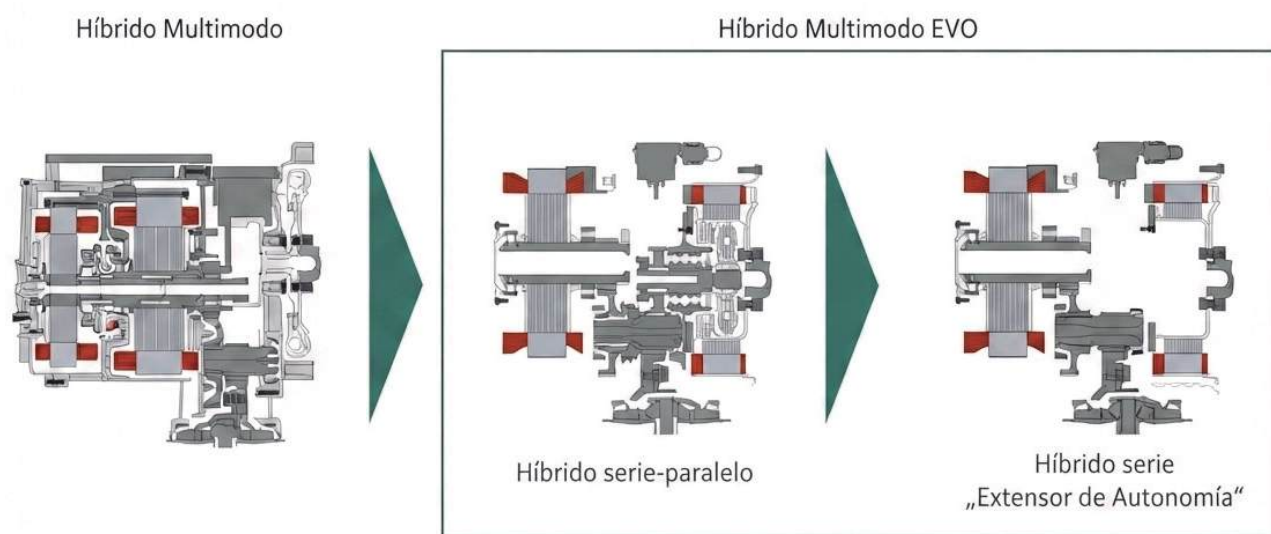
Figura 62. Estrategia operativa para los campos de velocidad y rendimiento en el WLTC (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)



- Maximizar el uso del modo paralelo con desplazamiento del punto de carga
- Utilizar el modo serie para estabilizar el SOC

Es igualmente importante que la estrategia operativa se diseñe de forma que se logre una excelente maniobrabilidad. Utiliza la aceleración a plena carga medida en el vehículo de demostración para mostrar que la transmisión híbrida dedicada no solo alcanzó una velocidad mayor con mayor rapidez durante el intervalo de tiempo en cuestión que la transmisión híbrida P2 instalada de serie, sino que la aceleración longitudinal es más uniforme, ya que no se producen interrupciones de par debido al cambio de marcha. El sistema híbrido puede alcanzar una aceleración híbrida a plena carga de 0 a 100 km/h en 9,2 s, mientras que el vehículo de producción en serie, con la misma batería y el mismo motor de combustión interna, requiere 10,4 s. Además, este vehículo se conduce tan cómodamente como un vehículo eléctrico gracias a sus características de aceleración uniforme y, por lo tanto, ya exhibe ADN eléctrico.

Figura 63. Aceleración híbrida a plena carga medida con un vehículo de demostración en comparación con el vehículo fabricado en serie con propulsión híbrida P2 (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)



Además, es evidente que las interfaces del vehículo son muy fáciles de usar con la transmisión híbrida multimodo. Cuenta con una interfaz de par para la comunicación con el vehículo y una interfaz de estado para el embrague y el bloqueo de estacionamiento, lo que significa que solo se controla el estado (abierto o cerrado). Gracias a su diseño intuitivo, la calibración del vehículo requiere muy poco esfuerzo en comparación con las transmisiones clásicas.

5 MAYOR DESARROLLO CONCEPTUAL

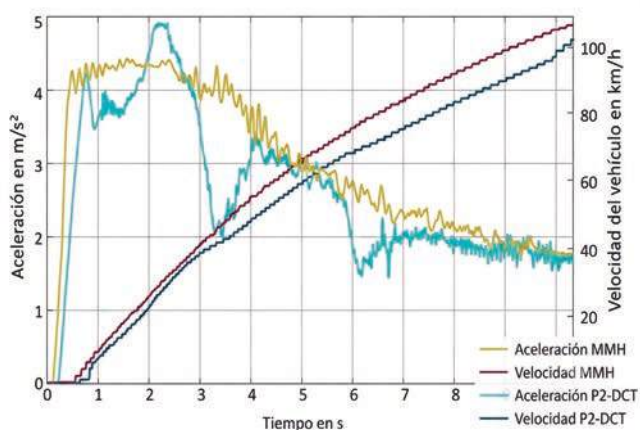
Una opción evolutiva para reducir aún más la complejidad general y los costes del sistema es utilizar un manguito deslizante desplazable en lugar de un embrague laminar. El accionamiento del manguito y del bloqueo de estacionamiento puede ser hidráulico o electromecánico. Esto puede combinarse con una configuración totalmente refrigerada por agua para los motores

eléctricos y lubricación pasiva con aceite para los elementos mecánicos. Este diseño también prescinde de la etapa de relación entre el motor de combustión interna y el generador, lo que permite reducir aún más las pérdidas mecánicas. Además, las pérdidas al desacoplar el motor en modo paralelo pueden reducirse con un segundo manguito deslizante.

Las ventajas reales de espacio y coste de este enfoque basado en soluciones se aprovechan si se adopta un enfoque más radical del concepto y se implementa únicamente el modo serie. En este caso, solo el motor eléctrico, impulsado por el generador, se conecta al cigüeñal para formar un extensor de autonomía junto con el motor de combustión interna. El motor de tracción eléctrica, por otro lado, forma un eje eléctrico con una etapa de engranajes rectos y un diferencial. En este caso, el acoplamiento es puramente eléctrico a través de la electrónica de potencia.

Figura 64. Evolución de la transmisión serie/paralelo a la transmisión híbrida puramente serie (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)

Aceleración WOT en propulsión híbrida – MMH vs. P2-DCT

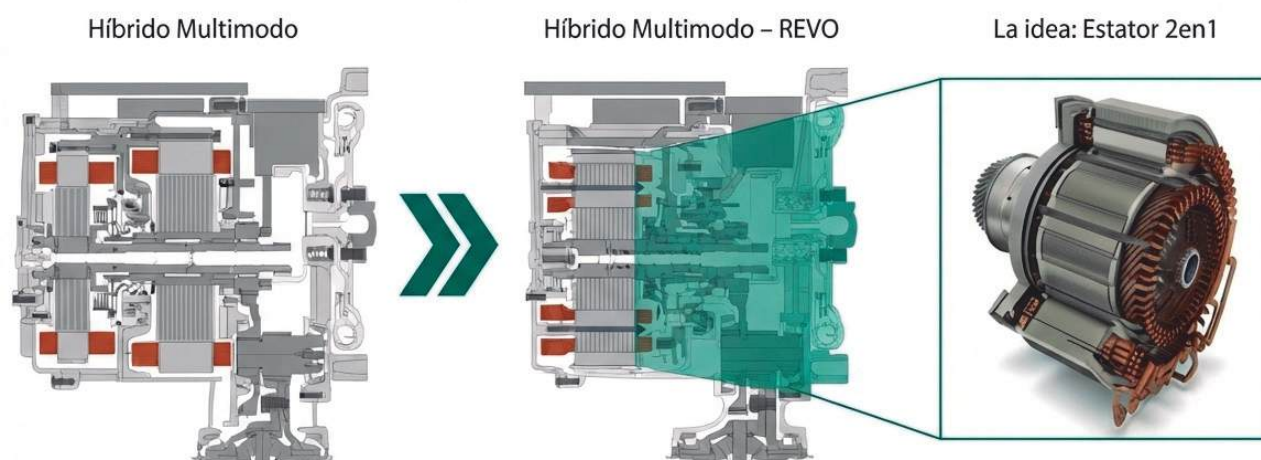


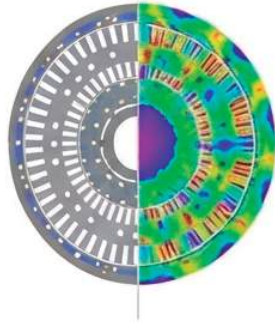
El ahorro de costes que se puede conseguir con este tipo de concepto se basa en la reducción de componentes. Por un lado, no se necesita el amortiguador, ya que no hay transmisión directa del motor de combustión interna a la rueda, lo que afecta al confort. Por otro lado, tampoco se requiere el elemento separador ni su accionamiento, ya que no se requiere un acoplamiento mecánico. Además, en este tipo de aplicación, el motor de combustión interna puede diseñarse para funcionar

únicamente en una zona específica del mapa, con un consumo mínimo de combustible. Este tipo de concepto es especialmente interesante para mercados donde las velocidades más altas (donde se pueden aprovechar las ventajas de eficiencia de la transmisión directa) no son relevantes debido a los ciclos de conducción correspondientes y donde, además, existen ciertas sensibilidades de precio.

Una modificación revolucionaria e innovadora de la transmisión híbrida dedicada consiste en la combinación de dos motores eléctricos en un estator, donde el componente radialmente interno (rotor interno) actúa como generador y el componente radialmente externo (rotor externo) como motor. La ventaja de este diseño anidado reside en su alta densidad de rendimiento. Además, se reduce significativamente el material utilizado, ya que ambos motores pueden troquelarse en chapa de acero. El yugo central del estator puede ser utilizado por los campos magnéticos de ambas máquinas.

Figura 65. Sección transversal de una transmisión híbrida con motores eléctricos anidados y construcción (Eckenfels, Fischer, Lehmann, Neuberth, & Reitz, 2022)





Los posibles efectos recíprocos de los campos magnéticos entre los dos motores representan un desafío. Las mediciones iniciales en un prototipo indican que los efectos recíprocos de los campos magnéticos son mínimos y pueden considerarse manejables. Al

integrarlo en la transmisión híbrida, se logra una reducción de peso de 10 kg y una reducción de longitud de 49 mm. La rigidez del sistema de propulsión también aumenta, a la vez que se reducen los costes.

6 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

A novel insulation resistance monitoring device for Hybrid Electric Vehicle
<https://www.infona.pl/resource/bwmetal.element.ieee-art-000004677682>

Cybertruck Service Manual: Isolation/Insulation Test (Tesla)
<https://service.tesla.com/docs/Cybertruck/ServiceManual/en-us/GUID-9A106B8A-034C-4832-8B7A-A2E47BB677C6.html>

Demonstration of a Binary-Logic Hybrid Transmission for Heavy-Duty Vehicles / SWH Project / H2020 / CORDIS
<https://www.cordis.europa.eu/project/id/651947>

Design and Analysis of Hydraulic Hybrid Passenger Vehicles
<https://conservancy.umn.edu/items/6b31baf5-ba4b-456e-aac7-d9479d22b5d2>

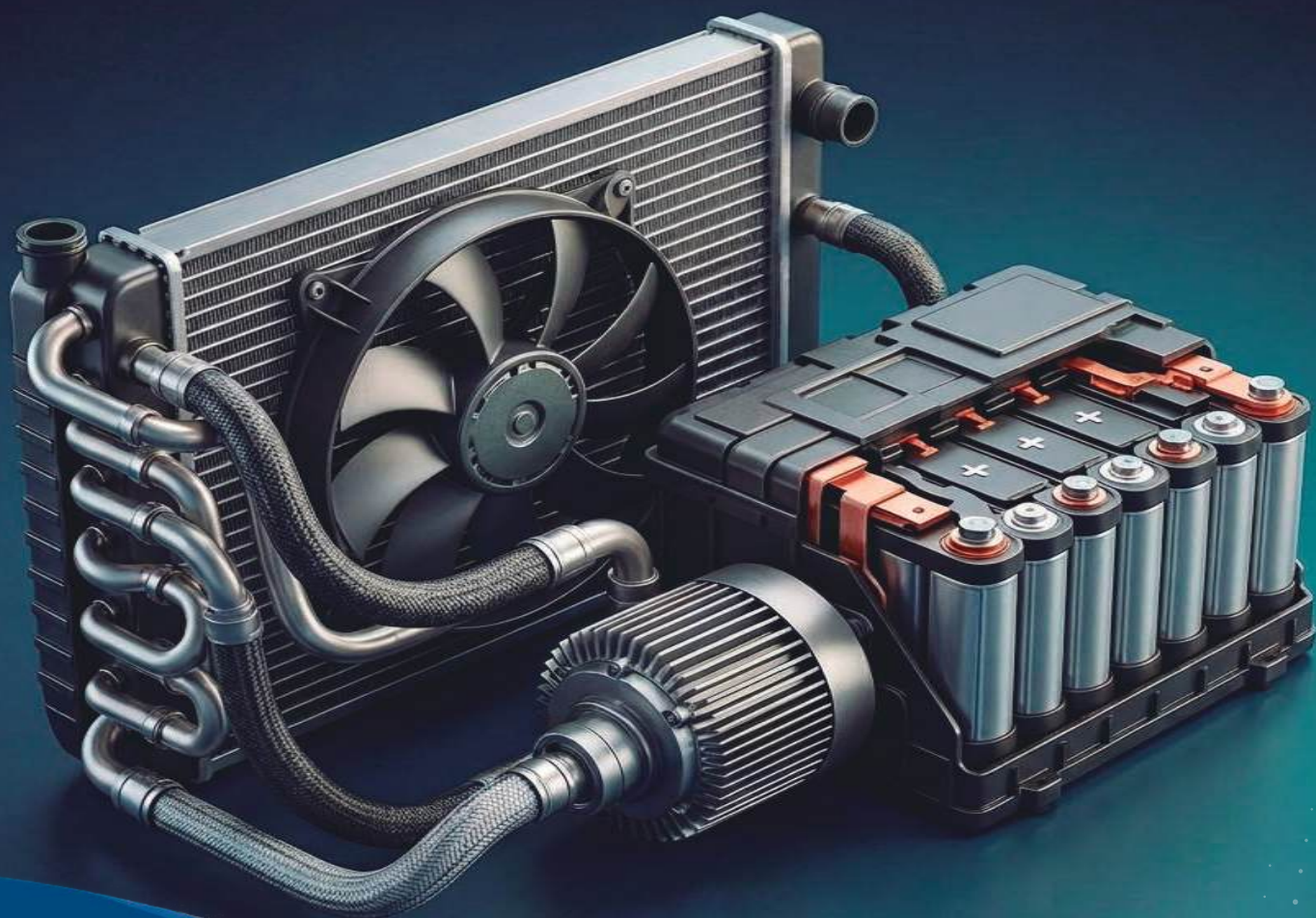
Design of a High-Voltage Insulation Resistance Detection System for Commercial Vehicles (MDPI)
<https://www.mdpi.com/2313-0105/11/4/143>

Hydraulic hybrid powertrain design proposal for passenger vehicles
<https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/22524>

IEC 61557-18 ED1: DC EV supply equipment monitoring device
<https://isme.me/en/project/show/iec:proj:105413>

Insulation fault detection and localisation in electric and hybrid electric vehicles
<https://core.ac.uk/download/pdf/52041373.pdf>

Powertrain configuration design for two mode power split hybrid electric vehicle (Nature Scientific Reports)
<https://www.nature.com/articles/s41598-025-87378-w>



UNIDAD TEMÁTICA 8



REFRIGERANTES PARA
VEHÍCULOS HÍBRIDOS Y
ELÉCTRICOS

1 FUNDAMENTOS DE LA GESTIÓN TÉRMICA EN ELECTROMOVILIDAD

Figura 66. Aditivo para vehículo eléctrico (SL, 2026)



Comparativa de refrigeración entre MCI y EV/HEV

En un motor de combustión (MCI), el refrigerante opera a altas temperaturas (90°C - 105°C) para optimizar la combustión. En un EV/HEV, el sistema es multizona:

- **Zona de electrónica/motor:** opera a temperaturas medias.
- **Zona de batería:** requiere temperaturas bajas y muy estables.

Rangos de operación óptimos según química

- **Baterías de Ion-Litio (Li-ion):** Su “zona de confort” es de 15°C a 35°C. Por encima de los 45°C, comienza la degradación acelerada; por encima de los 60°C, hay riesgo de desbocamiento térmico.
- **Baterías de Níquel-Metal Hidruro (Ni-MH):** Son más tolerantes al calor que las de litio, pero su eficiencia cae drásticamente fuera del rango de 0°C

a 45°C. Durante la carga, generan más calor por el efecto Joule, lo que exige un flujo de refrigerante constante para evitar la formación de cristales que dañan la celda.

El fenómeno del desbocamiento térmico

Es una reacción en cadena en la que el aumento de temperatura provoca que los componentes químicos de la celda se descompongan, liberando más calor. El refrigerante con aditivos específicos debe ser capaz de absorber esta energía rápidamente para evitar que el fallo de una celda se propague a las demás.

2 QUÍMICA DE LOS REFRIGERANTES DE BAJA CONDUCTIVIDAD

Composición: etilenglicol y agua desionizada

A diferencia del agua de grifo, el agua desionizada o desmineralizada utilizada en estos refrigerantes ha sido filtrada para eliminar minerales e iones (como calcio o magnesio). Sin estos iones, el líquido no puede transportar electricidad, convirtiéndose en un aislante químico.

Propiedades dieléctricas y conductividad eléctrica

La conductividad se mide en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

- Refrigerante convencional: $>2000\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Refrigerante de baja conductividad (LC): $<100\mu\text{S}/\text{cm}$. Esta baja conductividad evita que, en caso de una microfuga

dentro del pack de batería, se produzca un cortocircuito de alta tensión.

Evolución: de OAT a tecnologías LC (Low Conductivity)

Los refrigerantes orgánicos (OAT) convencionales usan sales que son conductoras. Los nuevos fluidos para EVs utilizan inhibidores de corrosión de base no iónica que mantienen la protección del metal sin aportar conductividad al fluido.

3 ADITIVOS ESPECÍFICOS Y SU FUNCIÓN QUÍMICA

Inhibidores de corrosión no iónicos

Son moléculas orgánicas complejas que se adhieren a las paredes de aluminio del sistema de refrigeración, creando una película protectora. Al ser no iónicos, no se disocian en partículas cargadas eléctricamente, manteniendo la propiedad dieléctrica del fluido.

Agentes estabilizadores de pH

El pH ideal debe ser neutro (cerca de 7). Si el refrigerante se vuelve ácido, atacará el aluminio; si se vuelve muy alcalino, dañará los sellos de polímero. Los aditivos estabilizadores contrarrestan la acidificación natural que ocurre con el tiempo y el uso térmico.

Compatibilidad de materiales y agentes marcadores

- **Compatibilidad:** el fluido no debe “hinchar” los elastómeros (gomos) de las mangueras.

- **Marcadores UV:** muchos refrigerantes modernos incluyen un aditivo fluorescente que brilla bajo luz ultravioleta, permitiendo detectar fugas milimétricas en las placas de enfriamiento del pack de baterías.

4 SISTEMAS DE INTERCAMBIO DE CALOR Y FLUIDOS

El Chiller (intercambiador de placas)

Es el componente en el cual el sistema de refrigeración líquida de la batería “se cruza” con el sistema de aire acondicionado del vehículo. A través de placas de acero inoxidable, el gas refrigerante (R1234yf) absorbe el calor del refrigerante líquido, permitiendo enfriar la batería incluso si la temperatura exterior es muy alta.

Refrigeración por inmersión (fase líquida)

Tecnología avanzada en la cual las celdas de la batería están totalmente sumergidas en un fluido dieléctrico de ingeniería (como aceites sintéticos especiales). Esto elimina la necesidad de placas de enfriamiento, permitiendo una transferencia térmica 100% directa y uniforme.

Degradación química del fluido

El fluido pierde propiedades por:

- **Oxidación térmica:** el calor constante rompe las moléculas del aditivo.
- **Contaminación cruzada:** el error más común en taller es rellenar con refrigerante convencional, lo que eleva

la conductividad y anula la protección del sistema.

5 MANTENIMIENTO, HERRAMIENTAS Y SEGURIDAD

Identificación en taller y normas de seguridad

Los refrigerantes LC suelen tener colores brillantes y distintivos. Es vital la señalización de “fluido de baja conductividad” en los depósitos, para evitar errores de servicio.

Instrumentos de medición críticos

- **Refractómetro digital:** determina la concentración de glicol para asegurar que el fluido no se congele ni hierva.
- **Conductivímetro (medidor de EC):** es la herramienta reina. Si la medición supera los $100\mu\text{S}/\text{cm}$, el fluido debe reemplazarse inmediatamente, aunque se vea limpio, ya que ha perdido su capacidad aislante.

Procedimientos de vacío y EPP

- **Purga por vacío:** debido a que las placas de enfriamiento de las baterías tienen canales muy estrechos, se debe usar una bomba de vacío para extraer el aire antes de cargar el líquido; de lo contrario, quedan burbujas (bolsas de aire) que generan puntos calientes.
- **EPP:** uso obligatorio de guantes de nitrilo y protección ocular. En caso de contacto con la piel, el etilenglicol es tóxico y debe lavarse de inmediato.

Figura 67. Guante de nitrilo para lubricantes en vehículos eléctricos (Segutecnica, 2026)



6 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

ASTM D8566-24: Standard Specification for Glycol-Based Electric Vehicle Coolant with Low Electrical Conductivity

<https://www.astm.org/d8566-24.html>

Coolant SP 19 EV – Specialized Coolant for Battery Thermal Management in (P) HEVs and BEVs

<https://www.kroon-oil.com/en/coolant-sp-19-ev-12-x-1-l-bottle-48998/>

Experimental investigation of an ejector-based integrated thermal management system for HEVs with refrigerants R134a and R1234yf

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544225041106>

New standards drive advances in EV thermal management fluids

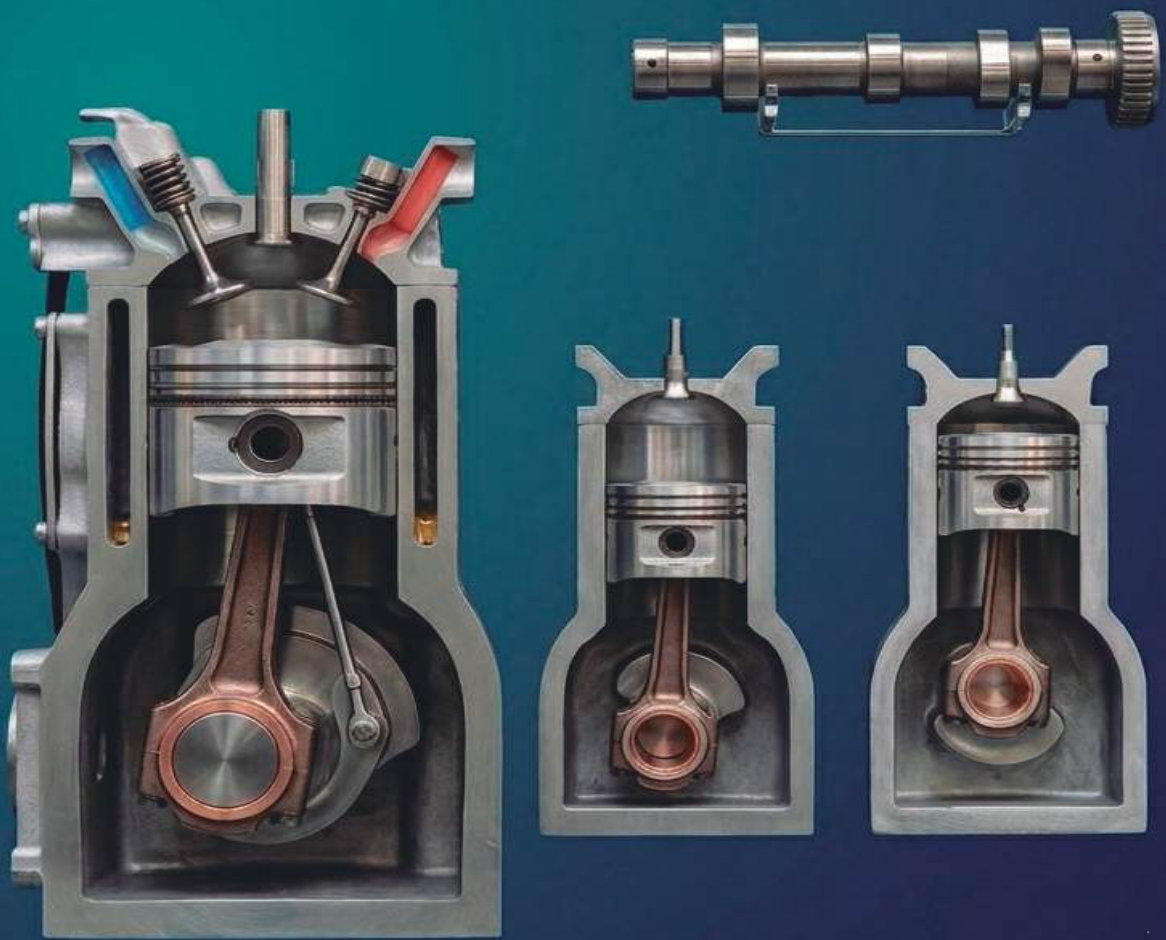
<https://www.evengineeringonline.com/new-standards-drive-advances-in-ev-thermal-management-fluids/>

NYCOBASE® V series- Synthetic esters for electrified vehicle cooling applications

<https://www.nyco-group.com/products/nycobase-v-series/>

Safe and Sustainable-by-Design: Setting New Standards for EV Coolants

<https://cti-symposium.world/safe-and-sustainable-by-design-setting-new-standards-for-ev-coolants/>



UNIDAD TEMÁTICA 9



INTRODUCCIÓN AL CICLO ATKINSON

1 INTRODUCCIÓN: DEL MECANISMO A LA ELECTRÓNICA

Históricamente, el funcionamiento de un motor dependía de conexiones físicas y mecánicas rígidas (carburadores, distribuidores de platino, bombas de inyección mecánicas). En ese esquema, el motor tenía un rendimiento fijo que no podía adaptarse a las condiciones de carga o clima de manera eficiente. La transición hacia la electrónica no fue solo “añadir cables”, sino sustituir la toma de decisiones mecánica por gestión computarizada.

El fin de la rigidez mecánica: Antes, el tiempo de apertura de las válvulas o el momento de la chispa estaban dictados por la forma física de una leva o la posición de un engranaje.

La era del control electrónico (ECU): Hoy, la unidad de control de motor actúa como el cerebro que procesa datos de sensores en milisegundos para modificar el comportamiento del motor en tiempo real.

A. Los actuadores como “músculos” electrónicos

En esta introducción, el estudiante debe entender que los mecanismos ahora obedecen a señales eléctricas. Los componentes clave que marcan este cambio son:

- **Cuerpo de aceleración electrónico (Drive-by-wire):** ya no hay un cable físico desde el pedal; una señal eléctrica decide cuánto aire entra.
- **Inyección electrónica:** la dosificación exacta de combustible está basada en

la estequiometría (14.7:1), optimizando el consumo.

- **Sincronización variable:** el uso de solenoides para mover el árbol de levas, permitiendo que un mismo motor se comporte como uno económico o uno potente según la necesidad.

B. Por qué la electrónica habilita nuevos ciclos (Atkinson)

Es fundamental recalcar que, sin la electrónica, el Ciclo Atkinson moderno no sería viable en automóviles de calle.

- La electrónica permite gestionar la transición entre eficiencia y potencia.
- Permite que el motor “hable” con la batería y el motor eléctrico para decidir quién aporta el torque en cada momento.

1.1 Atkinson moderno (ciclo de cinco tiempos)

En un motor convencional (Ciclo Otto), la válvula de admisión se cierra justo cuando el pistón comienza a subir desde el Punto Muerto Inferior (PMI). En el Atkinson moderno, la clave es el cierre retardado de la válvula de admisión (IVC - *Intake Valve Closing*).

Se le llama “Cinco tiempos” porque la fase de compresión se divide en dos:

1. **Admisión:** el pistón baja y entra la mezcla.
2. **Reflujo (el “quinto tiempo”):** el pistón empieza a subir, pero la válvula de admisión sigue abierta. Parte de la mezcla regresa al colector de admisión.

3. **Compresión real:** la válvula se cierra y comienza la compresión efectiva.
4. **Expansión (combustión):** la carrera de potencia.
5. **Escape:** expulsión de gases.

i. La asimetría del ciclo

La gran innovación del Atkinson moderno es que la carrera de expansión es más larga que la carrera de compresión.

- Al devolver parte del aire al colector (reflujo), el motor “cree” que el cilindro es más pequeño de lo que es.
- Sin embargo, al momento de la explosión, el pistón recorre toda la distancia física del cilindro.
- Resultado: se aprovecha hasta la última gota de energía de la presión de los gases quemados antes de abrir la válvula de escape.

ii. Ventajas técnicas

- **Reducción de pérdidas de calor:** al expandir más los gases, éstos se enfrían más antes de salir, enviando menos calor desperdiciado al escape.
- **Eficiencia térmica:** mientras un motor Otto ronda el 25-30% de eficiencia, un Atkinson moderno (como el de Toyota o Hyundai) puede superar el 40%.

iii. El rol de la electrónica en este ciclo

Antiguamente, el ciclo Atkinson requería un complejo sistema de bielas articuladas (mecánico). Hoy, el “Atkinson moderno” se logra mediante el VVT-i (distribución

variable). La computadora decide, mediante presión de aceite o motores eléctricos, qué tan tarde cerrar la válvula de admisión según la carga del motor

1.2 El papel del VVT-i / VTEC

En la mecánica antigua, el árbol de levas era una pieza de acero rígida: si se diseñaba para ahorrar combustible, el auto no tenía fuerza; si se diseñaba para correr, gastaba demasiada gasolina. El VVT-i (Toyota) y el VTEC (Honda) rompieron esa limitación.

A. VVT-i (variable Valve Timing - intelligent)

El VVT-i es el sistema de variación de fase. Su función principal es adelantar o retrasar el momento en que abren y cierran las válvulas.

- **En el ciclo Atkinson:** el VVT-i es el encargado de ejecutar el “retraso” del cierre de la válvula de admisión. La ECU envía una señal a un solenoide (OCV), que usa presión de aceite para girar el árbol de levas unos grados respecto al cigüeñal.
- **VVT-iE (eléctrico):** en los híbridos más modernos, este movimiento ya no es por presión de aceite (que depende de las RPM), sino por un motor eléctrico. Esto permite cambiar al ciclo Atkinson incluso antes de arrancar el motor o a muy bajas revoluciones.

B. VTEC (variable Valve Event and Lift)

A diferencia del VVT-i, que solo cambia cuando abren las válvulas, el VTEC cambia cuanto se abren (compresión) y por un determinado tiempo.

- **El mecanismo de “cama extra”:** usa un tercer lóbulo en el árbol de levas, que entra en acción mediante un pasador hidráulico.
- **Aplicación en híbridos:** permite tener una leva específica para máxima economía (Atkinson) a bajas cargas y otra leva para cuando el conductor exige potencia (Ciclo Otto).

C. Sincronía inteligente: la clave de la eficiencia

El papel fundamental de estos sistemas es permitir la transición de ciclos:

- 1. Carga baja (crucero):** el sistema retrasa el cierre de admisión para operar en Ciclo Atkinson y ahorrar combustible.
- 2. Carga alta (aceleración fuerte):** el sistema adelanta el cierre de la válvula para atrapar todo el aire posible, pasando instantáneamente a un Ciclo Otto para generar torque.

D. Importancia para el técnico

El diagnóstico de estos sistemas es vital. Una falla en el solenoide VVT-i o un aceite sucio (que obstruya las galerías) impedirá que el motor entre en ciclo Atkinson, disparando el consumo de combustible y encendiendo el Check Engine con códigos como el P0011 o P0012

1.3 Relación de compresión real vs. geométrica

En un motor convencional, estos dos conceptos suelen estar muy cerca. Sin embargo, en los motores modernos con gestión de ciclo Atkinson, la diferencia entre ambos es lo que permite que el

motor sea ultraeficiente sin destruirse por detonación (pistoneo).

Compresión geométrica

Es un valor puramente físico y matemático. Se calcula basándose en las dimensiones mecánicas del motor (diámetro, carrera y volumen de la cámara de combustión).

Definición: es la relación entre el volumen máximo del cilindro (cuando el pistón está en el punto muerto inferior, PMI) y el volumen mínimo (cuando está en el punto muerto superior, PMS).

La fórmula:

$$RC_g = \frac{V_{Unitario} + v_{Cámara}}{V_{Cámara}}$$

En el ciclo Atkinson: los motores Atkinson suelen tener relaciones geométricas muy altas (ej. 13:1 o 14:1). En un motor normal, esto causaría que la gasolina explote antes de tiempo (detonación), pero en el Atkinson no sucede gracias a la compresión real.

Compresión real (efectiva)

Aquí es donde entra en juego la dinámica de las válvulas. La compresión real no empieza cuando el pistón empieza a subir, sino en el momento exacto en que la válvula de admisión se cierra.

- **Definición:** es el cálculo de la compresión tomando como punto de partida el volumen atrapado en el cilindro, justo cuando se cierran las válvulas.
- **El fenómeno Atkinson:** como retrasamos el cierre de la válvula de admisión (el “quinto tiempo”), el pistón sube una parte del recorrido sin comprimir nada (porque el aire se está escapando de regreso al colector).

- **El resultado:** aunque el motor tenga una relación geométrica de 13:1, su relación real puede ser de 9:1 o 10:1.

Importancia

- 1. Uso de combustible:** esta diferencia permite que el motor use relaciones de expansión muy largas (aprovechando más la explosión) sin necesitar gasolinas de altísimo octanaje, ya que la “compresión real” se mantiene en niveles seguros.
- 2. Pruebas de compresión en el taller:** si un técnico mide la compresión de un motor Atkinson con un manómetro común (crankeo), verá valores más bajos que en un motor Otto. No debe confundirse con un motor desgastado; es simplemente el efecto del cierre retardado de válvulas.
- 3. Eficiencia térmica:** la magia está en que comprimimos “poco” (ahorrando energía en la subida del pistón), pero expandimos “mucho” (ganando energía en la bajada).

2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO PROFUNDO

En este nivel es importante comprender que el motor de combustión interna es, en esencia, un transformador de calor en movimiento. El análisis profundo se centra en entender dónde se pierde la energía y cómo el ciclo Atkinson logra “rescatar” parte de esas pérdidas que en un motor convencional se dan por sentadas.

A. El ciclo de trabajo en el Diagrama P-V (presión-volumen)

Mientras que el Ciclo Otto se representa como un rectángulo con bordes curvos, el Atkinson moderno modifica la base de ese diagrama

- El trabajo útil: Es el área encerrada dentro de la curva del ciclo.
- El objetivo del análisis: maximizar el área de expansión y minimizar el área de “gasto” (compresión y bombeo).

B. La segunda ley de la termodinámica en el motor

El calor siempre fluye del cuerpo caliente al frío. Un motor convencional expulsa gases de escape a temperaturas muy altas (energía desperdiciada).

El análisis profundo nos enseña que cuanto más logremos expandir esos gases dentro del cilindro, más calor se convertirá en trabajo mecánico y menos calor saldrá por el tubo de escape.

Esto se traduce en una reducción de la entalpía de los gases de escape.

C. Eficiencia volumétrica vs. eficiencia térmica

- En la mecánica tradicional, buscamos llenar el cilindro al máximo (eficiencia volumétrica).
- En el análisis termodinámico del Atkinson, sacrificamos a propósito el llenado (dejamos que escape aire en el “reflujo”) para ganar eficiencia térmica.

Conclusión: Es mejor tener un cilindro “medio lleno” que aproveche el 40% de la explosión, que uno “lleno” que solo aproveche el 25%.

2.1 Pérdidas por bombeo (Pumping Losses)

Las pérdidas por bombeo se definen como el trabajo negativo realizado por el motor durante los procesos de renovación de la carga (admisión y escape). En los motores de encendido provocado (MEP) convencionales, este fenómeno es especialmente crítico durante la operación a cargas parciales.

- **Mecánica de la pérdida:** bajo condiciones de baja demanda de par, la restricción impuesta por la placa de aceleración genera una caída de presión significativa en el colector de admisión. El pistón debe realizar un trabajo de succión contra un vacío parcial, lo que consume una fracción del trabajo neto producido en la carrera de expansión.
- **Mitigación en el ciclo Atkinson:** el control dinámico de las válvulas permite que el motor opere con una apertura de mariposa mayor a la requerida por un ciclo Otto para la misma carga. Al retrasar el cierre de la válvula de admisión, se reduce la presión diferencial entre el cilindro y la atmósfera, disminuyendo el área negativa del lazo de bombeo en el diagrama P-V.

2.2 Presión media efectiva (PME)

La presión media efectiva es un parámetro adimensional que permite evaluar el desempeño de un diseño de motor independientemente de su tamaño físico. Representa una presión constante que, de actuar sobre el pistón durante una carrera de expansión, produciría el mismo trabajo neto que el ciclo real completo.

- **PME indicada vs. PME efectiva:** el análisis termodinámico distingue entre la presión generada por la combustión y la presión disponible en el eje tras descontar las pérdidas por fricción interna y bombeo.
- **Balance en el ciclo Atkinson:** si bien el ciclo Atkinson maximiza la eficiencia térmica, su PME tiende a ser inferior a la del ciclo Otto. Esto se debe a que la masa de aire atrapada al inicio de la compresión es menor. No obstante, la reducción de la PME se traduce en una mejora del consumo específico de combustible (BSFC), priorizando la eficiencia sobre la densidad de potencia absoluta.

2.3 El proceso de expansión prolongada

La característica distintiva del ciclo Atkinson es el aprovechamiento de la energía residual mediante una carrera de expansión físicamente más larga que la carrera de compresión efectiva.

- **Desequilibrio de carreras:** En un ciclo termodinámico ideal, la expansión completa ocurre cuando la presión de los gases quemados iguala a la presión atmosférica. El ciclo Otto interrumpe este proceso prematuramente para iniciar el escape, evacuando gases con alta presión y temperatura residual.
- **Aprovechamiento de la entalpía:** al prolongar la expansión, el pistón continúa extrayendo trabajo de la presión de los gases hasta un punto mucho más bajo en la curva adiabática. Este proceso reduce la energía interna sobrante en los gases de escape, lo que se manifiesta físicamente en una menor

temperatura de salida y un incremento directo en el rendimiento térmico global del motor

3 COMPARACIÓN Y GESTIÓN DEL TORQUE

El torque (par motor) es la medida de la fuerza rotacional que el motor puede aplicar al cigüeñal. En un motor de combustión interna, el torque depende directamente de la presión media efectiva (PME) y del volumen de aire/combustible efectivamente comprimido.

3.1 ¿Por qué no se usa en autos no híbridos?

Históricamente, el ciclo Atkinson se reservó exclusivamente para vehículos híbridos debido a su baja densidad de par en regímenes bajos de revoluciones. Sin embargo, en la última década, fabricantes como Mazda (SkyActiv-G), Toyota y Lexus han implementado este ciclo en vehículos de tracción convencional. Las razones técnicas son las siguientes:

A. Mejora de la eficiencia en cruceros (carga parcial)

En vehículos no híbridos, el ciclo Atkinson no se utiliza de forma permanente, sino intermitente.

- Cuando el vehículo alcanza una velocidad de cruce constante (baja demanda de torque), la unidad de control de motor (ECU) activa el sistema de distribución variable para retrasar el cierre de las válvulas de admisión.
- Esto permite que el motor funcione con una eficiencia de combustible similar

a la de un híbrido durante el viaje por carretera, reduciendo las emisiones de CO₂

B. Reducción del fenómeno de detonación (Knocking)

Al tener una relación de compresión geométrica muy alta (necesaria para la eficiencia), pero una compresión real baja (gracias al ciclo Atkinson), los ingenieros pueden diseñar motores que funcionen con mezclas pobres sin el riesgo de pre-ignición o "pistoneo". Esto permite extraer más trabajo de la expansión sin destruir los componentes internos del motor.

C. La transición dinámica de ciclos

La razón por la cual hoy es posible usarlo en autos no híbridos es la velocidad de procesamiento de las ECU actuales y la precisión de los actuadores eléctricos de las levas.

- Un auto moderno puede funcionar en ciclo Atkinson mientras se espera en un semáforo o se va a 80 km/h constantes.
- En el momento en que el conductor pisa el acelerador para rebasar, el sistema cambia instantáneamente a ciclo Otto (cerrando las válvulas antes) para recuperar el torque máximo.

D. Cumplimiento de normativas ambientales (Euro 6 / Tier 3)

La industria se ha visto forzada a adoptar el ciclo Atkinson en modelos no híbridos para cumplir con los estándares de consumo de combustible. Es una solución mecánica/electrónica más económica que fabricar un sistema híbrido completo, logrando reducir el consumo hasta en un

10% a 15% en condiciones de laboratorio y carretera.

3.2 Sincronización con el motor eléctrico (MG2)

En el sistema de propulsión híbrido (específicamente en la configuración en serie-paralelo), el motor generador 2 (MG2) es el principal encargado de la tracción eléctrica y el apoyo al par motor.

A. El efecto de “Torque Fill” (llenado de par)

Dado que el motor de combustión en ciclo Atkinson tiene una respuesta lenta y un torque reducido a bajas revoluciones, el MG2 interviene de manera inmediata.

- **Respuesta instantánea:** a diferencia de un motor térmico, un motor eléctrico entrega el 100% de su torque desde las 0 RPM.
- **Sincronización:** cuando el conductor demanda aceleración, la unidad de control (PCU) ordena al MG2 inyectar par al engranaje planetario, mientras el motor de combustión alcanza su régimen de eficiencia. Esto elimina el “vacío” de potencia que sentiría el conductor en un auto Atkinson puro.

B. El MG2 como regulador de carga

El MG2 no solo suma fuerza, sino que permite que el motor Atkinson se mantenga en su “Sweet Spot” (punto óptimo de eficiencia). Si el motor térmico produce más energía de la necesaria para mantener la velocidad, el excedente es

convertido por el MG2 en energía eléctrica para recargar la batería de alta tensión, evitando el desperdicio.

3.3 Transición de ciclos

La transición de ciclos es el proceso mecatrónico mediante el cual un motor cambia su comportamiento de un ciclo de alta eficiencia (Atkinson) a uno de alta potencia (Otto), o viceversa, en fracciones de segundo.

A. Conmutación mediante variación de fase

La transición no es un cambio físico de piezas, sino un cambio en el tiempo de cierre de las válvulas de admisión (IVC).

1. **Modo Atkinson (eficiencia):** la ECU ordena al actuador del árbol de levas (VVT-i) retrasar el cierre. La compresión real es baja, la expansión es larga y el consumo es mínimo. Se usa en velocidades constantes o cruceros.
2. **Modo Otto (potencia):** cuando los sensores de posición del acelerador (TPS) y de carga (MAP/MAF) detectan una alta demanda, el actuador adelanta el cierre de la válvula. El motor “atrapa” toda la mezcla posible, aumentando la presión media efectiva (PME) para generar el torque necesario.

B. Gestión de la inercia y suavidad

Uno de los mayores retos tecnológicos en la transición de ciclos es que el conductor no perciba el cambio.

- **Control de inyección y chispa:** durante la transición, la ECU debe recalcular el tiempo de inyección y el avance de encendido para compensar el cambio repentino en la presión interna del cilindro.
- **Amortiguación eléctrica:** el motor eléctrico (MG2) suele realizar microajustes en su entrega de par durante estos milisegundos, para absorber cualquier vibración o “tirón” mecánico producido por el cambio de fase de las levas.

C. Estrategia de “arranque y parada” (Start-Stop)

En los híbridos, la transición más extrema es cuando el motor térmico se apaga por completo. Al reencenderse, lo hace directamente en una configuración que minimiza las vibraciones, a menudo utilizando un ciclo Atkinson muy agresivo para reducir la resistencia al giro inicial y facilitar que el MG1 (el motor-generator de arranque) lo lleve a las RPM de trabajo sin consumir apenas combustible.

Tabla 11. Diferencias entre motores de ciclo Otto y ciclo Atkinson (Alvatronics, 2026)

Característica	Ciclo Otto (convencional)	Ciclo Atkinson (eficiencia)
Relación de compresión	Igual a la relación de expansión (simétrica).	Menor que la relación de expansión (asimétrica).
Cierre de válvula de admisión	Cierra poco después del PMI (punto muerto inferior).	Cierra mucho después del PMI (retraso extremo).
Eficiencia térmica	Moderada (aprox. 25% - 30%).	Muy alta (puede superar el 40%).
Torque en bajas RPM	Alto y entrega inmediata.	Muy bajo (falta de presión inicial).
Pérdidas por bombeo	Altas (resistencia al succionar aire).	Bajas (el aire refluye al colector).
Temperatura de escape	Elevada (desperdicio de energía térmica).	Más baja (la expansión extra enfría los gases).
Densidad de potencia	Alta (muchos HP por litro de cilindrada).	Baja (pocos HP por litro de cilindrada).
Uso principal	Vehículos a gasolina estándar y deportivos.	Vehículos híbridos (HEV/PHEV).
Consumo de combustible	Estándar.	Mínimo (prioriza el ahorro).

4 APLICACIONES Y CASOS DE ESTUDIO EN LA INDUSTRIA

La implementación teórica del ciclo Atkinson alcanzó su madurez industrial gracias al desarrollo de sistemas de transmisión que eliminaron las cajas de cambio convencionales. El caso más emblemático es el sistema desarrollado por Toyota, que se ha convertido en el estándar de referencia.

4.1 El Sistema Hybrid Synergy Drive (HSD)

El HSD es una arquitectura de propulsión serie-paralelo que utiliza un transeje híbrido en lugar de una transmisión automática o manual. Su componente central es el Dispositivo de División de Potencia (Power Split Device), un conjunto de engranajes planetarios que conecta

tres elementos: el motor de combustión (ICE), el generador (MG1) y el motor de tracción (MG2).

- **Integración del ciclo Atkinson:** el HSD permite que el motor térmico funcione de forma desacoplada de la velocidad de las ruedas. Esto significa que la computadora puede mantener el motor en su zona de máxima eficiencia (ciclo Atkinson) sin importar si el auto va lento o rápido, ajustando las revoluciones mediante el MG1.

Arranque en movimiento

Una de las proezas del HSD es la transición imperceptible entre el modo eléctrico y el de combustión mientras el vehículo se desplaza.

- **El rol del MG1:** para arrancar el motor térmico en movimiento, el MG1 actúa como un motor de arranque ultra-potente. Utiliza la inercia del vehículo y la energía de la batería para llevar al motor de combustión de 0 a más de 1,000 RPM en menos de un segundo.
- **Descompresión controlada:** Durante este proceso, el motor Atkinson aprovecha el retraso en el cierre de válvulas para reducir la resistencia a la compresión. Esto permite que el motor “encienda” sin las vibraciones bruscas típicas de un arranque convencional, logrando una entrada en servicio suave incluso a altas velocidades.

Eficiencia térmica récord

La evolución de los materiales y la gestión electrónica ha permitido que el ciclo

Atkinson rompa barreras que antes se consideraban teóricas para motores de gasolina.

- El hito del 40% - 41%: motores como el Toyota Dynamic Force (utilizado en el Camry y RAV4 Híbrido) o el motor Kappa de Hyundai han alcanzado niveles de eficiencia térmica superiores al 40%. Para poner esto en perspectiva, un motor convencional de ciclo Otto rara vez supera el 25% o 30%.

Factores contribuyentes

1. **Rediseño de los conductos de admisión:** para crear un flujo de aire tipo “Tumble” (torbellino vertical) que acelera la combustión.
2. **Relación de compresión geométrica extrema:** el uso de relaciones de hasta 14:1, controladas dinámicamente para evitar la detonación.
3. **Reducción de fricción:** el uso de aceites de ultra baja viscosidad (0W-8 o 0W-16) y recubrimientos de diamante (DLC) en los pistones.

Impacto en el consumo real

Esta eficiencia récord permite que vehículos de tamaño mediano logren consumos de combustible inferiores a los 4 litros por cada 100 km en ciclo combinado, demostrando que el perfeccionamiento del ciclo Atkinson es, actualmente, la estrategia más efectiva para la descarbonización del transporte sin depender exclusivamente de la infraestructura de carga eléctrica.

5 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

Auto Fundamentals, 11th Edition: Atkinson- and Miller-Cycle Engines

<https://www.g-wonlinetextbooks.com/cdn-1496336098479/auto-fundamentals-2015/81>

Cost, Effectiveness, and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles (Appendix D: Ideal Thermodynamic Cycles)

<https://www.nationalacademies.org/read/21744/chapter/16>

Effect of Piston Stroke Characteristics on Performance of the Atkinson Cycle

<https://trid.trb.org/View/2387109>

High-Compression-Ratio Atkinson-Cycle Engine Using Low-Pressure Direct Injection (OSTI.gov)

<https://www.osti.gov/biblio/967307>

Performance analysis and parametric optimum criteria of an irreversible Atkinson heat-engine

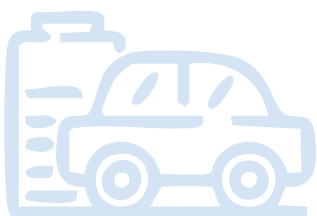
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261905001297>

Research and application of over-expansion cycle (Atkinson and Miller) engines – A review

<https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaror.html?id=W2554092479&task=detalhes>



UNIDAD TEMÁTICA 10



COMPONENTES
DE LA ELECTRÓNICA
DE POTENCIA

1 INTRODUCCIÓN

Los diodos de potencia son más complicados en su estructura y características operativas que sus contrapartes de baja potencia, con los cuales la mayoría tiene algún grado de familiaridad. La complejidad adicional proviene de las modificaciones en los dispositivos sencillos de baja potencia para adaptarlos a aplicaciones de alta potencia. Estas modificaciones son de naturaleza esencialmente genérica; es decir, las mismas modificaciones básicas se hacen a todos los dispositivos semiconductores de baja potencia para incrementar sus capacidades de potencia.

El estudio de los dispositivos semiconductores de potencia empieza con el diodo. Tanto los dispositivos de unión pn como las barreras de Schottky son los dispositivos semiconductores más sencillos. La manera más fácil de considerar las modificaciones para la operación de alta potencia es hacerlo a partir de este dispositivo. Además, el diodo o la unión pn es el ladrillo básico de todos los demás dispositivos semiconductores. Será mucho más fácil comprender los demás dispositivos semiconductores si se entienden primero con claridad las características del diodo.

2 DIODOS DE POTENCIA

Un diodo de potencia es un dispositivo de unión pn con dos terminales. Cuando el potencial de ánodo es positivo con respecto al cátodo, se dice que el diodo está polarizado directo, y conduce electricidad. Un diodo en conducción tiene una caída directa de voltaje a través de él relativamente pequeña; la magnitud

de esta caída depende del proceso de manufactura y de la temperatura de la unión. Cuando el potencial del cátodo es positivo con respecto al del ánodo, se dice que el diodo está polarizado inverso. Bajo condiciones de polarización inversa; pasa una corriente pequeña inversa (que también se llama corriente de fuga o corriente de pérdida), en del orden de micro o miliamperes; esta corriente de fuga aumenta de magnitud en forma paulatina hasta que se llega al voltaje de avalancha o ruptura.

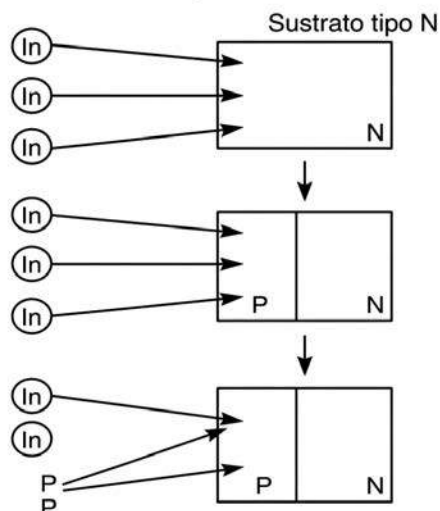
Los diodos de potencia juegan un papel importante en los circuitos electrónicos de potencia, para la conversión de la energía eléctrica. Un diodo funciona como interruptor que efectúa diversas funciones, como, por ejemplo, conmutadores en rectificadores, corrida libre en reguladores conmutados, inversión de carga de capacitor y transferencia de energía entre componentes, aislamiento de voltaje, regreso de energía de la carga a la fuente de alimentación y recuperación de energía atrapada.

Las técnicas de construcción de los semiconductores de potencia han llegado a un grado de perfección extremada, consiguiéndose componentes de larguísima vida si trabajan dentro de las condiciones especificadas. Una de las más utilizadas es la de difusión, que, aplicada a la fabricación de diodos, consiste básicamente en el proceso siguiente.

Se parte de un cilindro monocristalino del elemento semiconductor (Ge o Si) dopado con impurezas tipo N (donadoras de electrones) que ha sido fabricado por crecimiento de un cristal semilla en un baño de semiconductor fundido.

Figura 68. Atmósfera dopadora con átomos de aceptador (Hernay, 2019)

Atmósfera dopadora
con átomos de aceptador

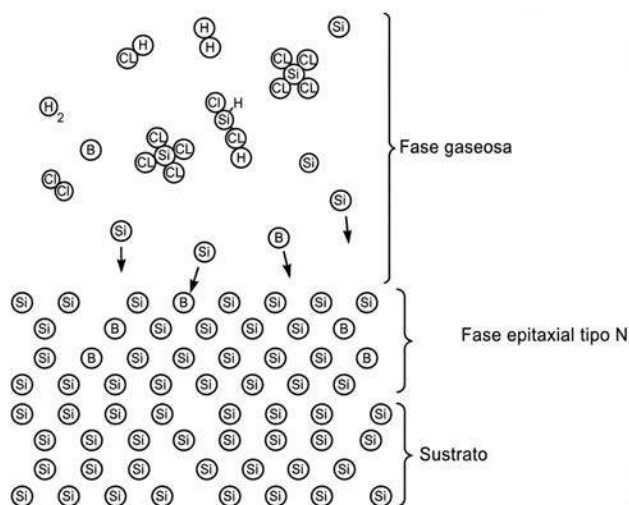


El cilindro, que puede tener uno o más centímetros de diámetro y varios de largo, se corta en discos mediante una sierra de hilo finísimo de tungsteno. El disco de material se introduce en un horno con atmósfera inerte en la que se ha inyectado una determinada cantidad de impurezas aceptadoras, tales como átomos de indio. Estas se difunden por una de las caras del disco hasta conseguir una determinada penetración y concentración. Por último, se efectúa otro dopado tipo P (o con impurezas aceptadoras de electrones) muy intenso y de poca penetración por la misma cara que el anterior, para reducir la resistencia eléctrica de la soldadura al terminal de ánodo.

La técnica que permite controlar de forma más exacta el espesor de la pastilla y grado del dopado es la de crecimiento epitaxial. Sobre una lámina de cristal semiconductor puro o sustrato se depositan nuevos átomos procedentes de una fase gaseosa. Este gas puede impurificarse con átomos de donadores o aceptadores que sustituyen algunos átomos de la red cristalina. La reacción

química principal es la reducción del tetracloruro de silicio o de germanio.

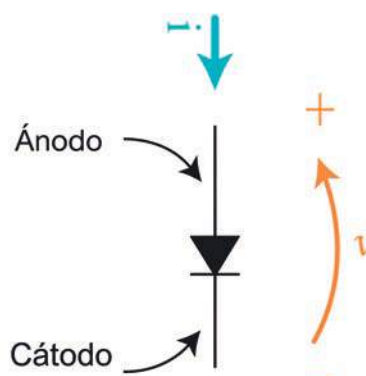
Figura 69. Reacción química principal (Hernay, 2019)

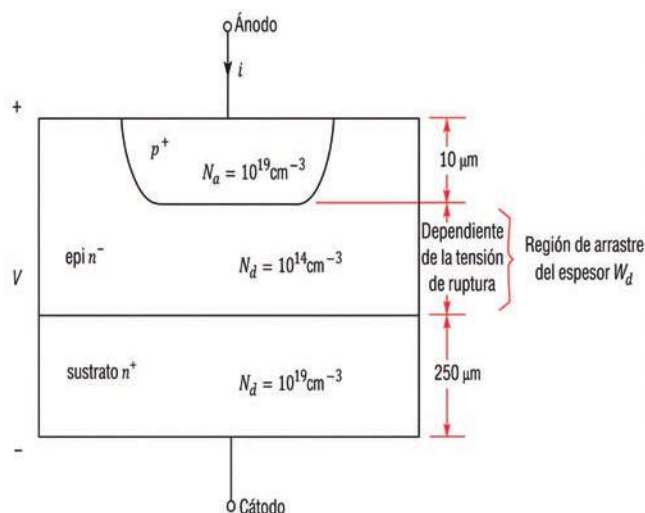


3 ESTRUCTURA BÁSICA

En la siguiente figura se ilustra la realización práctica del diodo para aplicaciones de potencia. Consiste en un sustrato muy dopado de tipo n+ encima del cual se cultiva una capa epitaxial n- ligeramente dopada de un espesor específico. Al final se forma la unión pn difundiendo una región de tipo p+ muy dopada que forma el ánodo del diodo. En la Figura también se pueden apreciar los espesores normales de la capa y los niveles de dopaje.

Figura 70. Espesores normales (Hernay, 2019)





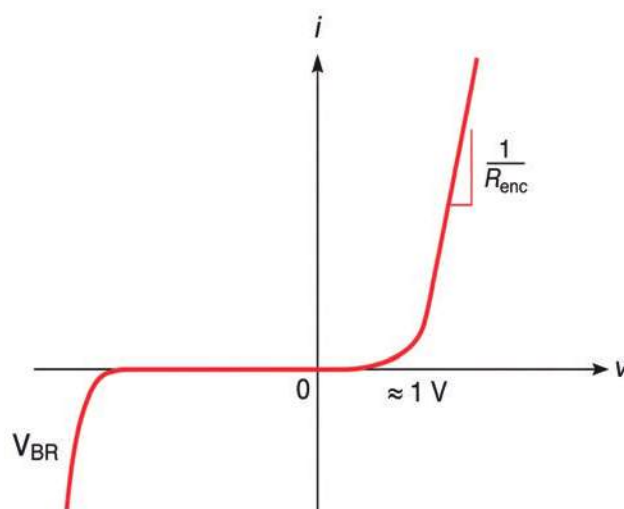
El área de sección transversal del diodo varía según la cantidad de corriente total para cuya conducción se diseña el dispositivo. Para diodos que conducen varios miles de amperios, el área puede ser de varios centímetros cuadrados (se usan obleas con diámetros hasta de 4 pulgadas en la producción de dispositivos de potencia). En la figura se muestra el símbolo de circuito para el diodo de potencia y es el mismo utilizado en diodos de baja potencia.

La capa n- suele llamarse región de arrastre, y es la característica estructural principal que no se encuentra en diodos de baja potencia. Tiene la función de absorber la zona de degradación o deplexión de la unión p+ n- de polarización inversa. Esta capa es bastante ancha con tensiones inversas grandes. La región de arrastre establece la tensión de ruptura inversa del dispositivo. Esta región relativamente larga y un poco dopada agrega una resistencia óhmica significativa al diodo cuando tiene polarización directa, situación que produce una disipación de potencia inaceptablemente grande en el diodo cuando conduce corriente. Sin embargo, otros mecanismos que describiremos en breve reducen de manera importante este problema notorio.

4 CARACTERÍSTICAS I-V

En la siguiente figura se muestra la característica i-v del diodo. En el sentido directo, la corriente crece en forma lineal con la tensión de polarización directa y no en forma exponencial. Las grandes corrientes en un diodo de potencia crean caídas óhmicas que ocultan las características exponenciales i-v. La caída de tensión en la región poco dopada explica una parte de esta resistencia óhmica.

Figura 71. Caída de tensión (Hernay, 2019)

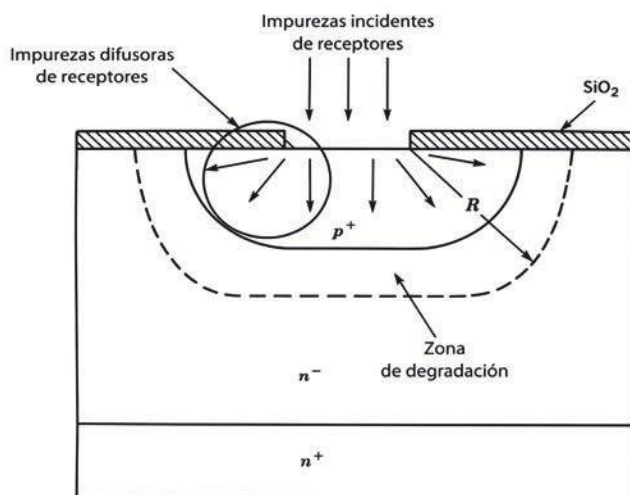


En sentido inverso, sólo fluye una corriente de dispersión pequeña e independiente de la tensión, hasta que se alcanza la tensión inversa de ruptura V_{BR} . Cuando se alcanza la ruptura, la tensión parece permanecer en esencia constante, mientras que la corriente aumenta de manera drástica, sólo limitada por el circuito exterior. La combinación de una tensión grande de ruptura y una corriente grande lleva a una disipación excesiva de potencia que puede destruir el dispositivo con rapidez. Por esta razón, se debe evitar la operación del diodo en ruptura.

5 CONTROL DEL LÍMITE DE LA ZONA DE DEGRADACIÓN

Las uniones paralelas planas que supusimos de forma implícita hasta este momento son una idealización no realista en la práctica. Las uniones en los dispositivos reales se forman por medio de difusiones de impurezas que causan invariablemente que la unión pn resultante tenga cierto grado de curvatura, como se muestra en la figura.

Figura 72. Curvatura de la unión (Hernay, 2019)

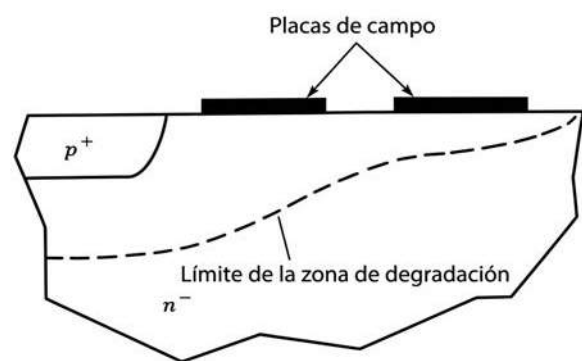


La cantidad de curvatura, especificada por el radio de curvatura R (indicado en la figura), dependerá del tamaño de la máscara de difusión, del tiempo de difusión y la magnitud de la temperatura de difusión. La curvatura es el resultado de que las impurezas se difunden con igual rapidez de manera lateral y vertical en el sustrato. En estas uniones, la descripción del plano paralelo es imprecisa cuando el radio de curvatura se hace comparable al ancho de la zona de deplexión. En estas circunstancias, el campo eléctrico en la zona de degradación pierde uniformidad espacial y tiene su mayor magnitud donde el radio de curvatura es más pequeño. Esto produce una tensión de ruptura más

pequeña en comparación con una unión de plano paralelo de dopaje similar.

La acción para contrarrestar esta reducción potencial de la tensión de ruptura es mantener el radio de curvatura lo más largo posible. Un método es el uso de placas de campo eléctricamente flotantes que se ilustran en la figura. Las placas de campo actúan como superficie equipotencial y, por medio de su colocación correcta, como se indica en la figura, redirigen las líneas del campo eléctrico e impiden que la zona de degradación tenga un radio de curvatura demasiado pequeño.

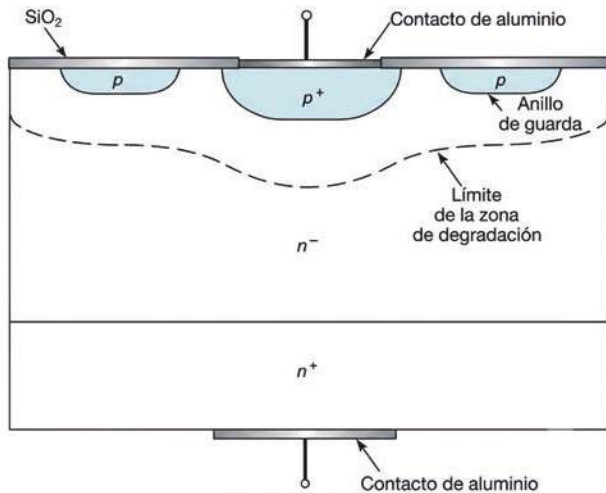
Figura 73. Placas de campo (Hernay, 2019)



El precio de este planteamiento es que las placas de campo requieren una cantidad considerable de silicio. Otro método para controlar la zona de degradación es el de anillos de guarda, como se ilustra para una unión pn simple en la figura. Se permite que los anillos de guarda tipo p floten eléctricamente. Las capas de degradación de los anillos de guarda se fusionan con la creciente zona de degradación de la unión pn de polarización inversa, lo que impide que el radio de curvatura se haga demasiado pequeño. Como los anillos de guarda son eléctricamente flotantes, no adquieren la tensión de polarización inversa completa, y por tanto

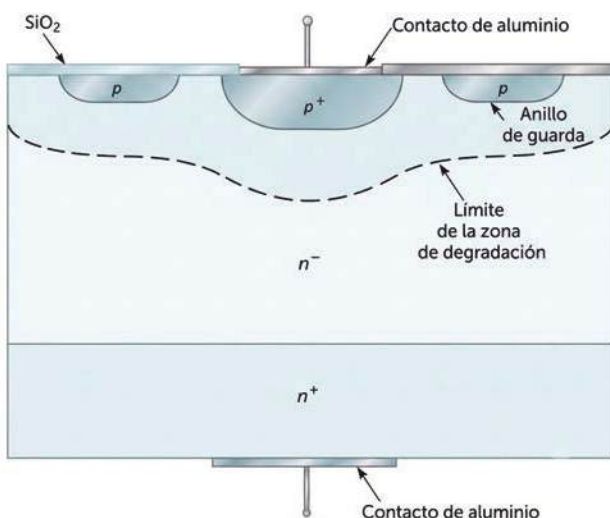
la ruptura no ocurre a través de sus capas de degradación, aunque sus radios de curvatura sean lo bastante pequeños.

Figura 74. Zona de degradación (Hernay, 2019)



En algunos dispositivos, la unión metalúrgica se extiende hasta la superficie del silicio, y la zona alta de degradación de campo atraviesa el límite de semiconductor/aire, aunque la unión metalúrgica propia sea una estructura plano-paralela

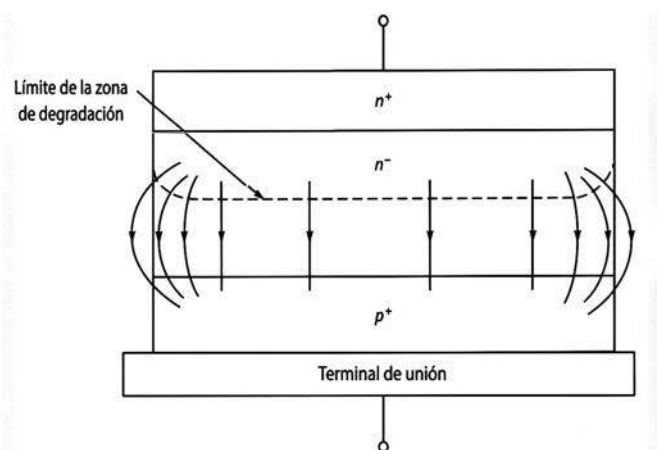
Figura 75. Límite de la zona de degradación (Hernay, 2019)



Los campos eléctricos que los rodean o están cerca de la superficie pueden

causar rupturas prematuras o interactuar con impurezas de la superficie que al final degradan el desempeño del dispositivo. Por ende, a menudo se necesita modelar los contornos topológicos del dispositivo para minimizar los campos eléctricos superficiales, ejemplo de lo cual es el biselado que se muestra en la figura. Además, el recubrimiento de las superficies con materiales apropiados, como dióxido de silicio u otro aislante, ayudan a controlar los campos eléctricos en la superficie.

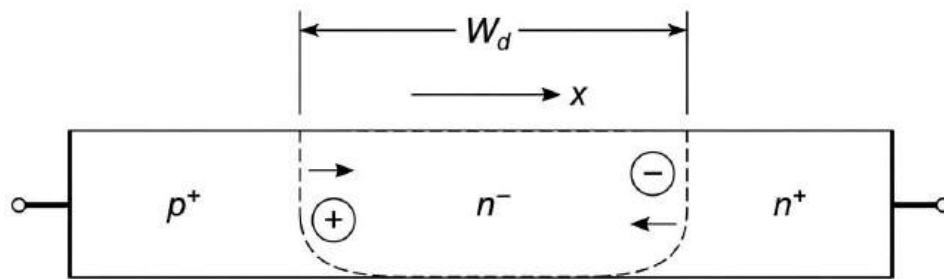
Figura 76. Ejemplo de biselado (Hernay, 2019)



6 MODULACIÓN DE CONDUCTIVIDAD

En estado activo hay una reducción sustancial de la resistencia de la región de arrastre debido a la gran cantidad de inyección de portadores excedentes a la región de arrastre. Esta modulación de conductividad, como se denomina a veces, reduce en forma considerable la disipación de potencia sobre lo que se estimaría en la base de la conductividad de equilibrio térmico de la región de arrastre. Considérese el modelo del diodo de potencia unidimensional que se muestra en la figura.

Figura 77. Modelo de un diodo de potencia (Hernay, 2019)



En estado activo, la unión pn con polarización directa inyecta huecos a la región de arrastre de tipo n-. En niveles bajos de inyección, los electrones de equilibrio térmico neutralizan sin dificultad la carga de espacio de los huecos; pero en niveles de inyección altos, la carga de espacio de huecos es lo bastante grande para atraer electrones de la región n+ a la región de arrastre. Esto lleva a la inyección de electrones a través de la interconexión n+n- a la región de arrastre. Estos electrones y huecos inyectados se difunden, recombinándose, en la región de arrastre uno hacia el otro. Éste es el origen de la llamada inyección doble.

7 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL DIODO DE POTENCIA

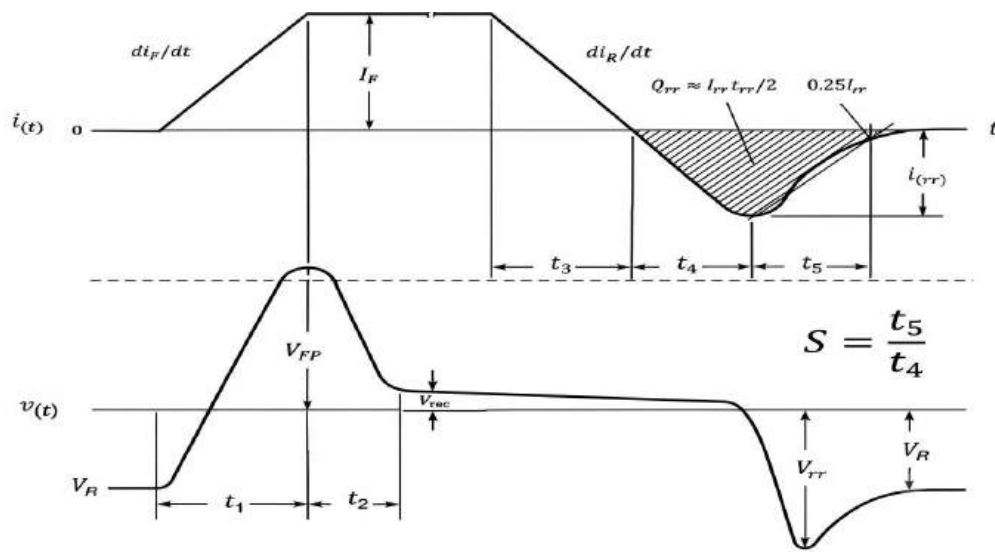
Un diodo de potencia requiere un tiempo finito para conmutar del estado de bloqueo (polarización inversa) al estado activo (polarización directa) y viceversa. El usuario se debe preocupar no sólo del tiempo requerido para las transiciones, sino también de cómo varía la tensión y la corriente del diodo durante las transiciones. Tanto el tiempo de transición

como las formas de onda se ven afectadas por las propiedades intrínsecas del diodo y por el circuito en que se incrusta el diodo. Las propiedades de conmutación de un diodo se dan a menudo en hojas de especificaciones (corrientes de diodos con un tiempo especificado de cambio, di/dt). La razón de ello es que los diodos de potencia son muy frecuentes en circuitos con inductancias que controlan el índice de cambio de la corriente, o se usan como diodos de circulación libre donde el apagado de un dispositivo de estado sólido controla di/dt . Durante la conmutación, las características de interés particular son la sobretensión momentánea durante el encendido y lo pronunciado de la caída de la corriente inversa durante la fase de apagado. La sobretensión momentánea durante el encendido no se observa en diodos de baja potencia.

7.1 Transitorio de encendido

En la siguiente figura, para un diodo de potencia sometido a una señal alterna de onda cuadrada, parte del encendido en las formas de onda del diodo está cubierta por los tiempos marcados t_1 y t_2 .

Figura 78. Diodo de potencia sometido a una señal alterna (Hernay, 2019)



Durante estos intervalos, dos procesos físicos ocurren en secuencia. Primero, la carga de espacio almacenada en la región de degradación (ubicada sobre todo en la región de arrastre) se retira (descarga) por el crecimiento de la corriente directa. Cuando la zona de degradación se descarga a su nivel de equilibrio térmico (intercepción de la curva de voltaje con el eje horizontal t), la unión metalúrgica adquiere una polarización directa y la inyección de portadores excedentes a través de la unión a la región de arrastre empieza durante el intervalo de tiempo t_1 , lo que marca el inicio de la segunda fase y el final de la primera. Durante la segunda fase, se inyectan portadores excedentes a la región de arrastre desde ambos extremos, con huecos que se inyectan desde la unión p+ n- y electrones desde la unión n+ n-. La distribución de portadores excedentes en la región de arrastre crece hacia el valor de estado permanente que soporta la corriente de polarización del diodo I_F .

Mediante una interpretación sencilla de esta secuencia de eventos esperaríamos

que la tensión del diodo aumentara suave y monótonamente desde su valor negativo grande (V_R) hasta un valor de polarización directa de estado permanente de aproximadamente 1 V. Sólo se observaría un intervalo distinto, que sería la descarga de la capa de carga espacial, análoga a la descarga de una capacitancia. De hecho, la zona de despoblación en condiciones de polarización inversa se modela a menudo como condensador (capacitancia de carga espacial).

Sin embargo, esta interpretación no explica la sobretensión momentánea en la forma de onda de la figura. El defecto de la interpretación es que no considera el efecto de la resistencia óhmica de la región de arrastre, ni la inductancia equivalente de la oblea de silicio y de los cables de enlace que llevan. Conforme la corriente directa crece con el tiempo, existe una caída de tensión cada vez más grande a través de la región de arrastre, pues no hay modulación de conductividad (disminución inmediata de la resistencia equivalente) de la región, sino hasta que se descarga la capa de

carga espacial a su valor de equilibrio térmico. La inductancia también agrega una caída de tensión significativa si se aplican valores grandes de di/dt . El efecto combinado de estos dos factores es una sobretensión momentánea que puede llegar hasta varias decenas de voltios, es decir, lo bastante grande para afectar gravemente la operación de algunos circuitos de electrónica de potencia.

El crecimiento de la tensión del diodo desacelera y al final se invierte cuando la región de arrastre se pone en cortocircuito por la gran cantidad de inyección de portadores en él. Además, la contribución inductiva termina cuando se estabiliza la corriente del diodo en I_F . El intervalo durante el cual la tensión cae desde el valor pico de sobretensión al valor de polarización directa de estado permanente marca el término del crecimiento de transitorios de la distribución de portadores excedentes en la región de arrastre.

La duración de la descarga de la capa de carga espacial y el crecimiento de la distribución de portadores excedentes en la región de arrastre se determina tanto por las propiedades intrínsecas del diodo como por el circuito externo en el cual está incrustado. Un valor grande de di/dt reduce el tiempo requerido para descargar la capa de carga espacial. Sin embargo, un valor grande de IF y del tiempo de vida de portadores en la región de arrastre alarga el tiempo requerido para que se complete la parte de portadores excedentes del transitorio. Los valores normales para estos tiempos de conmutación en diodos de alta potencia se encuentran en los cientos de nanosegundos para t_1 y en el rango de microsegundos para t_2 . Existen dispositivos con tiempos de encendido más rápidos, pero su desempeño mejorado en este aspecto se logra sólo mediante la re-

ducción del tiempo de vida. Así, al recortar los transitorios de encendido se compensan las pérdidas mayores en estado activo.

7.2 Recuperación directa

Cuando el diodo pasa de bloqueo a conducción, se necesita cierto tiempo para que los mayoritarios de ambas capas inunden la zona de carga espacial y se establezca en ésta el potencial de unión en conducción. Mientras tanto aparece un potencial positivo entre ánodo y cátodo provocado por el circuito exterior que tiende a poner el diodo en conducción. Dicho potencial puede ser de un valor considerable de voltios, y es tanto mayor cuanto más alta es la derivada de intensidad y el valor final de la misma. Este fenómeno es llamado recuperación directa, y se define el tiempo de recuperación directa ($t_1 + t_2$) como el que transcurre entre el instante en que la tensión ánodo-cátodo se hace positiva y aquél en que dicha tensión se establece definitivamente en el valor nominal de conducción V_{enc} . Este tiempo es menor comparado con el de recuperación inversa y no suele producir pérdidas de potencia ni trastornos de funcionamiento apreciables. La tensión directa máxima alcanzada en el proceso se llama tensión de recuperación directa.

7.3 Transitorio de apagado

La parte de apagado de la forma de onda de conmutación está cubierta por los tiempos marcados t_3 , t_4 y t_5 de la figura, y es en esencia lo contrario del proceso de encendido. Primero se tienen que eliminar los portadores excedentes almacenados en la región de arrastre antes de que las uniones metalúrgicas (terminales) adquieran una polarización inversa. Una vez

eliminados los portadores por la acción combinada de recombinación y barrido de corrientes negativas del diodo, la zona de degradación adquiere una cantidad considerable de carga espacial de la tensión de polarización inversa y se extiende a la región de degradación desde ambos extremos (uniones).

Mientras haya portadores excedentes en los extremos de la región de degradación, las uniones p+n- y n+n- poseen polarización directa. De este modo, la tensión del diodo V_{enc} sufrirá poco cambio de su valor de estado activo excepto una pequeña disminución debido a caídas óhmicas causadas por la corriente inversa. Pero después de que la corriente se convierte en negativa y el barrido de portadores ocurre durante el tiempo suficiente (t_4) para reducir la densidad de portadores excedentes en una o las dos uniones a cero, la unión o uniones adquieren una polarización inversa. En este punto, la tensión del diodo se vuelve negativa y rápidamente adquiere valores negativos sustanciales conforme las regiones de degradación de las dos uniones se extienden hacia la región de arrastre, una hacia la otra. En este momento, la distribución de portadores excedentes no soporta la corriente negativa del diodo que exige la inductancia de dispersión del circuito exterior porque no quedan suficientes portadores. La corriente del diodo suspende su crecimiento en sentido negativo y cae rápidamente, hasta llegar a cero después del tiempo t_5 . La corriente inversa tiene su máximo valor inverso, I_{rr} , al final del intervalo t_4 .

7.4 Recuperación inversa

Si el circuito exterior fuerza la anulación de la corriente previa I_F con cierta

velocidad di_R/dt para llevar al diodo al estado de bloqueo aplicándosele una tensión inversa, resultará que después del paso por cero de la corriente existe en la unión una cierta cantidad de portadores que cambian su sentido de movimiento y permiten que el diodo conduzca temporalmente en sentido contrario al ordinario. La tensión inversa entre ánodo y cátodo no se establece hasta después de un tiempo llamado tiempo de almacenamiento, t_4 , en que los portadores empiezan a escasear y aparece en la unión la zona de carga espacial. La intensidad todavía tarda un tiempo t_5 o tiempo de caída en descender a un valor despreciable, a medida que va desapareciendo el exceso de portadores por recombinación con cargas de signo contrario.

La suma de t_4 y t_5 se llama tiempo de recuperación inversa, t_{rr} , medido a partir del cruce inicial de la corriente en el diodo con cero, hasta que la corriente en sentido inverso llega al 25% de su valor máximo I_{rr} . La variable t_{rr} depende de la temperatura de la unión, de la velocidad de caída de la corriente en sentido directo di_R/dt , así como de la corriente en sentido directo antes de la conmutación, I_F . La razón t_5/t_4 se llama factor de suavidad (softness factor, SF por sus siglas en inglés). Para fines prácticos, uno debe ocuparse del tiempo total de recuperación t_{rr} y del valor pico de la corriente en sentido inverso I_{rr} .

La carga de recuperación inversa Q_{rr} es la cantidad de portadores de carga que atraviesan al diodo en el sentido de dirección inverso, debido a un cambio de conducción directa a una condición de bloqueo inverso. Su valor se determina con el área encerrada por la trayectoria de la corriente de recuperación inversa.

La carga de recuperación inversa aumenta con la intensidad directa previa al bloqueo I_F y con la derivada de intensidad di_R/dt con que el circuito lo fuerza. Sin embargo, para una determinada Q_{rr} , una derivada de intensidad elevada ayuda a vaciar antes la pastilla, de portadores, acortando t_{rr} . El tiempo de caída t_5 depende de la carga de recuperación almacenada Q_{rr} , y de las características constructivas del diodo. De las influencias entre parámetros resulta que, en las posibles aplicaciones de un diodo concreto, es más dependiente del modo de operación del circuito el tiempo de recuperación t_{rr} , que la carga de recuperación Q_{rr} (limita la frecuencia de funcionamiento), por lo que algunos fabricantes prefieren suministrar este segundo parámetro al primero para caracterizar la recuperación inversa. En tal caso, y a partir del valor de Q_{rr} (suministrado por el fabricante para una cierta gama de valores de I y di_R/dt), el diseñador puede deducir fácilmente el valor de t_{rr} e I_{rr} para un determinado valor de la derivada de intensidad. En efecto, y aun respetando un mínimo la complejidad del fenómeno de recuperación inversa, se pueden realizar algunas simplificaciones que ayudan en la utilización del parámetro Q_{rr} en los diodos. En primer lugar, puede suponerse triangular la evolución de la corriente inversa durante la recuperación, con lo que:

$$Q_{rr} \cong \frac{1}{2} I_{rr} t_4 + \frac{1}{2} I_{rr} t_5 = \frac{1}{2} I_{rr} t_{rr}$$

Es decir,

$$I_{rr} \cong \frac{2Q_{rr}}{t_{rr}}$$

La corriente pico en sentido inverso se puede expresar en función de di_R/dt en sentido inverso como sigue:

$$I_{rr} \cong t_4 \frac{di_R}{dt}$$

Se iguala I_{rr} de ambas ecuaciones, obteniéndose

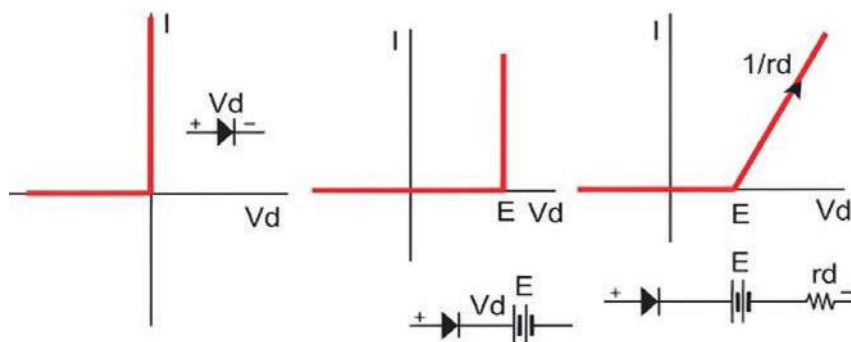
$$t_{rr} t_4 \cong \frac{2Q_{rr}}{di_R/dt}$$

8 CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DEL DIODO DE POTENCIA

8.1 Modelos estáticos del diodo

En estado de conducción, tres son los modelos que podemos utilizar para el diodo de potencia en función de la precisión que se requiera en los cálculos. En la figura están representados junto con la curva tensión-intensidad que caracteriza a cada modelo.

Figura 79. Diodo de potencia en función de la precisión (Hernay, 2019)



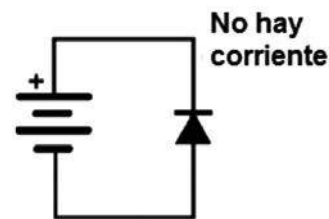
El primer modelo (modelo ideal) asemeja el diodo a un cortocircuito en polarización directa y circuito abierto en polarización inversa, despreciando la tensión de codo E , que sí es considerada en la segunda aproximación. En la tercera aproximación también se considera la resistencia interna del diodo r_d , junto a la tensión de codo.

8.2 Diodo en estado de bloqueo

Aplicando una tensión inversa a los terminales de un diodo de forma que la capa anódica sea más negativa que la catódica, los portadores mayoritarios de ambas son atraídos hacia los extremos de la pastilla, ensanchándose la zona de carga espacial y vaciándose de portadores. Aparece una barrera de potencial en la unión, del mismo valor aproximadamente que la tensión inversa aplicada exteriormente. La corriente de mayoritarios I_F cesa prácticamente y la de minoritarios I_R aumenta respecto del valor que tiene con la unión en equilibrio, hasta el que le permite la concentración

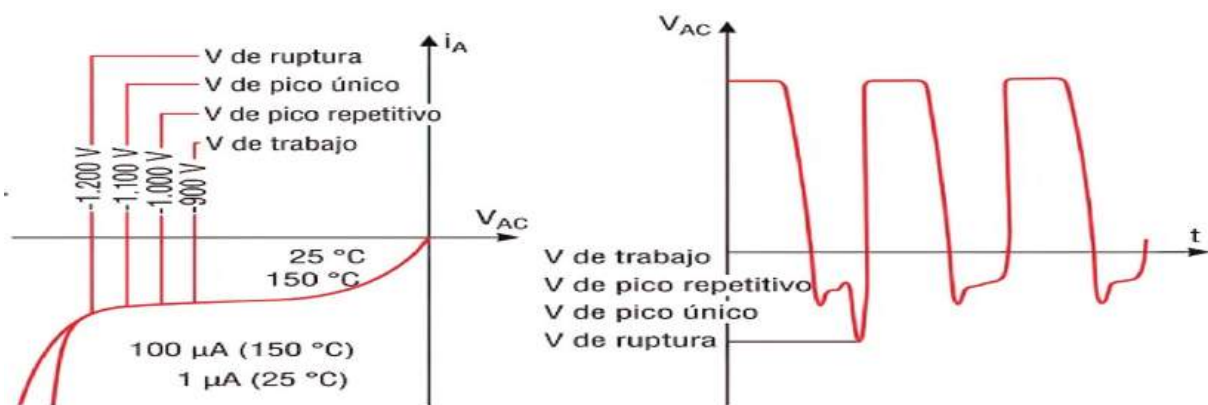
de los mismos, que es prácticamente independiente de la tensión aplicada, pero crece con la temperatura. Esta corriente inversa de saturación o corriente de fugas es muy pequeña, especialmente en el silicio, y puede decirse que el diodo no conduce o está bloqueado.

Figura 80. Diodo en estado de bloqueo (Hernay, 2019)



Cuando un diodo de potencia se encuentra en estado de bloqueo, existen una serie de valores de tensión y corriente que puede soportar de manera momentáneamente o continuada, sin que el dispositivo semiconductor corra el peligro de destruirse.

Figura 81. Valores de tensión y corriente (Hernay, 2019)



Puede verse en la característica $V_{ac} - I_A$ que la intensidad inversa es muy pequeña y que aumenta fuertemente con la temperatura. El fabricante suele definir en la zona próxima a la avalancha tensiones características del diodo que orientan al usuario para emplearlo correctamente, a saber:

- Tensión inversa de trabajo máxima (V_{RWM}): puede ser soportada por el diodo de forma continuada, sin peligro de calentamiento por avalancha.
- Tensión inversa de pico repetitivo (V_{RRM}): puede ser soportada en picos de

1 ms repetidos cada 10 ms por tiempo indefinido.

- Tensión inversa de pico no repetitiva (V_{RSM}): puede ser soportada por una sola vez cada 10 minutos o más, con duración del pico de 10ms.
- Tensión de ruptura (V_{BR}): si alcanza, aunque sea por una vez y con duración de 10 ms o menos, el diodo puede destruirse o al menos degradar sus características eléctricas (salvo en los diodos de avalancha controlada operando dentro de sus límites).
- Intensidad de fugas (I_R): intensidad que circula por el diodo cuando está bloqueado.

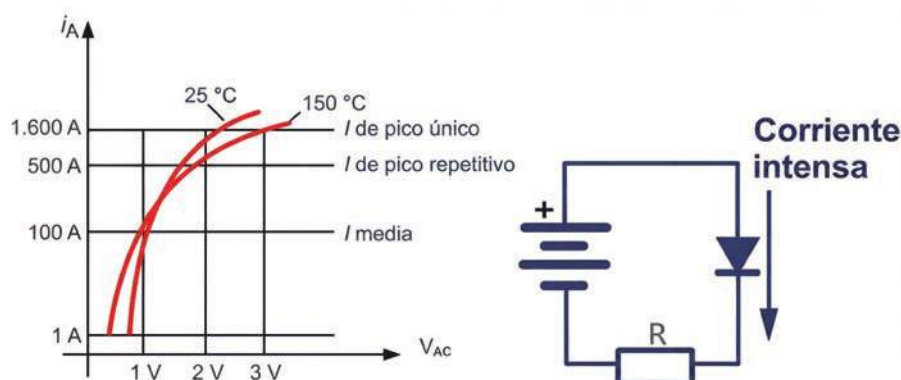
Hay que decir que no existe una norma universalmente aceptada para definir estos parámetros, y aquí se ha expuesto el criterio más corriente entre los fabricantes. Las pérdidas de potencia en bloqueo son extremadamente bajas, porque son iguales al producto de la tensión inversa por la intensidad de fugas, y ésta suele ser muy pequeña, frente a las pérdidas en conducción. El circuito equivalente de un diodo en estado de bloqueo puede aproximarse para la mayoría de los casos prácticos a un circuito abierto, aunque

sería más correcto desde un punto de vista teórico asimilarlo a una fuente de intensidad muy baja dependiente de la temperatura.

8.3 Diodo en estado de conducción

Si se aplica a los terminales del diodo una tensión directa, los portadores mayoritarios son empujados desde los extremos de la pastilla hacia la unión a través de la región de arrastre, pasando a la capa opuesta como minoritarios. En un primer instante las cargas se recombinarán, pero a medida que el voltaje de polarización se incrementa, la región de agotamiento se reduce hasta su desaparición, momento en el que las cargas no encuentran oposición y comienzan a moverse con libertad a través de todo el diodo, generando una corriente dentro el diodo que será mayor si el voltaje de polarización aumenta. Esta corriente I_F aumenta enormemente respecto del valor que tiene en equilibrio. Esta circulación de corriente produce una pequeña caída de tensión debido a la resistividad del semiconductor. La diferencia de potencial total V_{AC} (voltaje ánodo-cátodo) es la diferencia de las caídas resistivas y del potencial de unión, que es de sentido contrario, éstas son aproximadamente proporcionales a la intensidad directa.

Figura 82. Diodo en estado de conducción (Hernay, 2019)



Hay que hacer notar que en el estado de conducción el diodo no suele ser el responsable de limitar la intensidad establecida en el circuito. De ello se encargan normalmente los componentes pasivos, que en la figura se han reducido a la resistencia R . En la figura se muestra la característica eléctrica $V_{AC} - i_A$. A una temperatura de la unión elevada ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$), la caída de la tensión es menor porque los pares extra generados térmicamente reducen el potencial de unión y aumentan la conductividad del semiconductor. De esta forma, la potencia generada en la pastilla disminuye con la temperatura para una determinada intensidad, pudiéndose considerar este hecho favorable como una especie de autodefensa del diodo contra el calentamiento. Sin embargo, el efecto es contrario para intensidades mucho más altas que la nominal, y en tales condiciones aumenta la potencia disipada.

Igual que para la tensión en polarización inversa, el fabricante define intensidades características que orienten al usuario:

- **Intensidad media nominal $I_{F(AV)}$:** es el valor medio de la máxima intensidad de impulsos senoidales de 180° , que el diodo puede soportar con la cápsula mantenida a una determinada temperatura ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$ normalmente).
- **Intensidad de pico repetitivo I_{FRM} :** puede ser soportada cada 20 ms por tiempo indefinido, con duración del pico de 1 ms a determinada temperatura de la cápsula.
- **Intensidad de pico único I_{FSM} :** es el máximo pico de intensidad aplicable por una vez cada 10 minutos o más, con duración del pico de 10 ms .

Algunos fabricantes dan la intensidad nominal en valor eficaz $I_{F(RMS)}$, en lugar de darla en valor medio, algo a tener en cuenta cuando se comparan diodos de distinta marca.

8.4 Pérdidas de estado activo

Casi toda la potencia disipada en un diodo ocurre cuando está en estado activo (polarización directa). En altas frecuencias de conmutación, puede presentarse una cantidad considerable de disipación durante la conmutación de un estado a otro. En aplicaciones de baja potencia, la tensión de polarización directa es la tensión de la unión y a menudo se considera aproximadamente constante, pues la tensión depende en forma logarítmica de la corriente. En un diodo de silicio, este voltaje constante es de 0.7 a 1.0 V , y la disipación en estado activo sería entonces de $P = 0.7 I$, donde I es la corriente a través del diodo.

En diodos de potencia, esta estimación sólo sería satisfactoria en niveles de corriente bajos. En niveles de corriente altos, esto subestimaría gravemente la disipación total porque se ignora la disipación en la región de arrastre del diodo de potencia. Son precisamente estas pérdidas las que limitan la capacidad de potencia máxima del diodo. Sin embargo, para una estimación de la potencia dispersada en la región de arrastre se debe proceder con cuidado, porque el valor efectivo de resistencia de esta región en estado activo es mucho menor que el valor óhmico calculado a partir del tamaño geométrico y las densidades de equilibrio térmico.

Un análisis simplificado resume varias características importantes de las

pérdidas en estado activo no sólo de diodos. Antes que nada, si el tiempo de vida de los portadores se alarga lo suficiente para que la longitud de difusión sea compatible con la longitud de la región de arrastre W_d , la caída de tensión a través de la región de arrastre se reduce mucho y es aproximadamente independiente de la corriente. En segundo lugar, el precio de las pérdidas reducidas en estado activo es una gran cantidad de carga almacenada que pondrá en peligro a los tiempos de conmutación. En tercer lugar, entre más grande sea la tensión de ruptura del dispositivo, más grande será la caída de tensión V a través de la región de arrastre, pues esta tensión es proporcional al cuadrado de la longitud W_d , y esta longitud debe ser mayor para tensiones de ruptura mayores.

Considerando la tercera aproximación de modelo estático del diodo, donde el circuito equivalente en conducción puede representarse por una acumulación de corriente E igual al potencial de unión del semiconductor que se utilice, en serie con

una pequeña resistencia r_d igual a la pendiente promedio de la característica $V_{AC} - i_A$.

Las pérdidas en conducción directa están expresadas por:

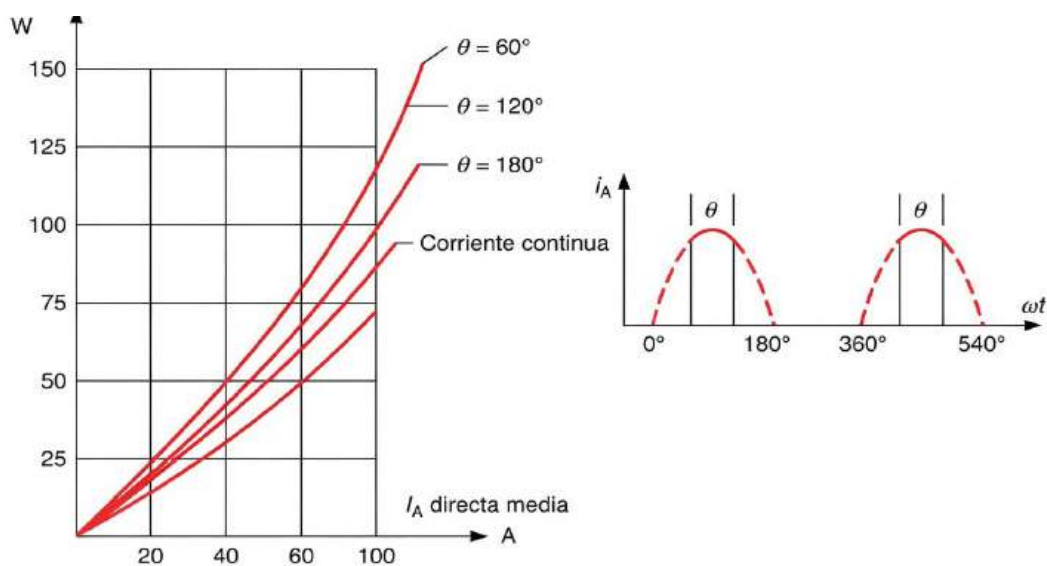
$$P_{con} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{AC} i_A dt$$

Esto para una onda de intensidad determinada con periodo de repetición T . Para un cálculo aproximado podría sustituirse la tensión ánodo-cátodo por la caída de tensión en el diodo durante la conducción, resultando:

$$P_{con} = \frac{1}{T} \int_0^T (E + r_d i_A) i_A dt = E I_{A(AV)} + r_d I_A^2$$

siendo $I_{A(AV)}$ el valor medio de i_A e I_A , el valor eficaz. El fabricante proporciona, para facilitar las cosas, las curvas que aparecen a continuación para corrientes pulsantes senoidales, que son las más normales en los equipos de potencia, y para diversos ángulos de conducción.

Figura 83. Curvas para corrientes pulsantes (Hernay, 2019)



Al tomarse como variable el valor medio, resulta que las pérdidas aumentan para menores ángulos de conducción para un mismo valor de la intensidad, porque el valor eficaz de la corriente aumenta. También suele darse una familia de curvas similar para impulsos rectangulares de corriente. Si las formas de las ondas reales de intensidad no son senoidales ni rectangulares, pueden asimilarse a ellas con ciertas precauciones y seguir utilizando las curvas citadas para deducir las pérdidas en conducción por aproximación. Con objeto de hacer todavía más fácil la elección de un diodo y su disipador, los catálogos suelen incluir curvas de intensidad máxima para una temperatura determinada de la cápsula. También suele darse la intensidad máxima para una temperatura dada del aire de refrigeración con una combinación diodo-disipador determinada.

9 TIPOS DE DIODOS DE POTENCIA

En el caso ideal, un diodo no debería tener tiempo de recuperación inversa. Sin embargo, el costo de fabricación de ese diodo podría aumentar. En muchas

aplicaciones no son importantes los efectos del tiempo de recuperación inversa y se pueden usar diodos poco costosos. Dependiendo de las características de recuperación y de las técnicas de manufactura, los diodos de potencia se pueden clasificar en las tres categorías siguientes:

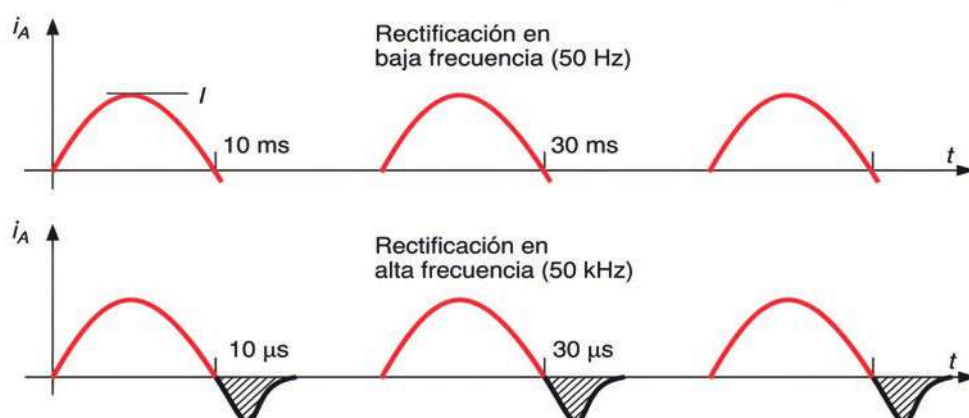
- Diodos normales, de propósito general
- Diodos de recuperación rápida
- Diodos de Schottky

Las características y las limitaciones prácticas de estos tipos restringen sus aplicaciones.

9.1 Diodos de propósito general

Los diodos rectificadores de propósito (o uso) general tienen un tiempo de recuperación inversa relativamente grande (en el caso típico, de unos 25 μ s), y se usan en aplicaciones de baja velocidad, donde no es crítico el tiempo de recuperación (por ejemplo, en rectificadores y convertidores de diodo, para aplicaciones con una frecuencia de entrada baja, hasta de 1 kHz, y para convertidores conmutados por línea).

Figura 84. Tiempo de recuperación inversa (Hernay, 2019)



Como se ve ilustrado en la figura, estos valores del tiempo de recuperación no afectan a aplicaciones de baja frecuencia, pero se puede hacer inviable la aplicación del diodo en circuitos de alta frecuencia. Para tales aplicaciones se fabrican diodos que acumulan poca carga en conducción y presentan, por tanto, tiempos de recuperación bajos. Esos diodos de uso general cubren especificaciones de corriente desde menos de 1A hasta varios miles de amperes, y las especificaciones de voltaje van de 50 V hasta 5 kV. En general, esos diodos se fabrican por difusión. Sin embargo, los tipos de rectificadores de aleación que se usan en las fuentes de poder para soldar, son lo más económicos y robustos, y sus capacidades pueden llegar hasta 1500 V, 400 A.

9.2 Diodos de recuperación rápida

Los diodos de recuperación rápida tienen tiempo de recuperación corto, en el caso normal, menor que 5 μ s. Se usan en circuitos convertidores de cd-cd y de cd-ca, donde la velocidad de conmutación tiene importancia crítica. Esos diodos abarcan especificaciones actuales de voltaje desde 50 V hasta unos 3 kV, y de menos de 1 A hasta cientos de amperes. La carga acumulada en conducción es proporcional, entre otras cosas, al espesor de la pastilla, por lo que los procesos de fabricación más interesantes para obtener diodos rápidos son los que mejor controlan el gradiente de dopado y, por tanto, menor espesor de pastilla. Para voltajes nominales mayores que 400 V, los diodos de recuperación rápida se suelen fabricar por difusión, y el tiempo de recuperación se controla por difusión de platino o de oro. Para especificaciones de voltaje menores que 400 V, los diodos epitaxiales proporcionan velocidades mayores de conmutación que las de los

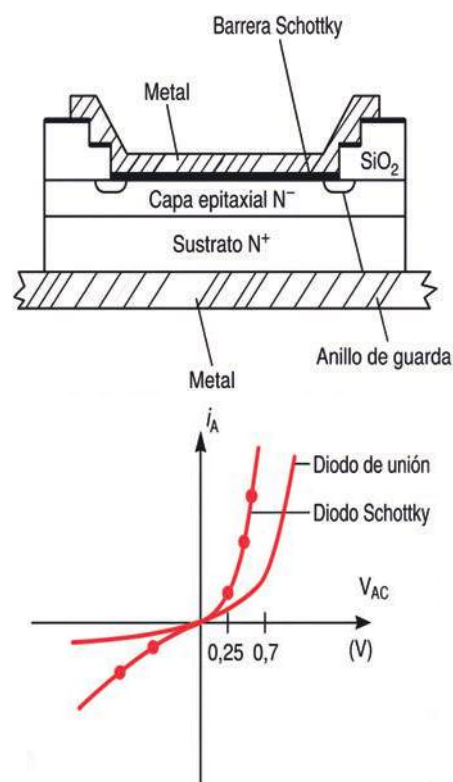
diodos por difusión. Los diodos epitaxiales son angostos de la base, lo que da como resultado un tiempo de recuperación tan corto como 50 ns.

9.3 Diodos Schottky

El problema de almacenamiento de carga de una unión pn se puede eliminar o minimizar en un diodo de Schottky. Esto se logra estableciendo un “potencial de barrera” (o “barrera de potencial”) con un contacto metal-semiconductor. Se deposita una capa de metal sobre una capa delgada epitaxial de silicio tipo n. La barrera de potencial simula el comportamiento de una unión pn. La acción rectificadora sólo depende de los portadores de mayoría, y en consecuencia no queda exceso de portadores de minoría que se recombinen. El efecto de recuperación sólo se debe a la capacitancia propia de la unión del semiconductor.

Figura 85. Efecto de recuperación (Hernay, 2019)

La carga recuperada de un diodo



Schottky es mucho menor que la de un diodo equivalente de unión pn. Ya que eso sólo se debe a la capacitancia de la unión, es bastante independiente de la di/dt inversa. Un diodo de Schottky tiene una caída de voltaje relativamente baja en sentido directo. La corriente de fuga de un diodo Schottky es mayor que la de un diodo de unión pn. Un diodo Schottky con voltaje de conducción relativamente bajo tiene una corriente algo alta, y viceversa. El resultado es que el voltaje máximo admisible para este diodo se limita en general a 100 V. Las especificaciones de corriente de los diodos Schottky varían de 1 a 400 A son ideales para fuentes de alimentación de gran corriente y alto voltaje de cd. Sin embargo, esos diodos también se usan en fuentes de poder de poca corriente, para tener mayor eficiencia. En la figura se puede observar una presentación comercial de este diodo.

Figura 86. Diodo de fuga (Hernay, 2019)



10 ASOCIACIÓN DE SEMICONDUCTORES

Cuando las exigencias de tensión de un circuito de electrónica de potencia exceden las capacidades de los semiconductores

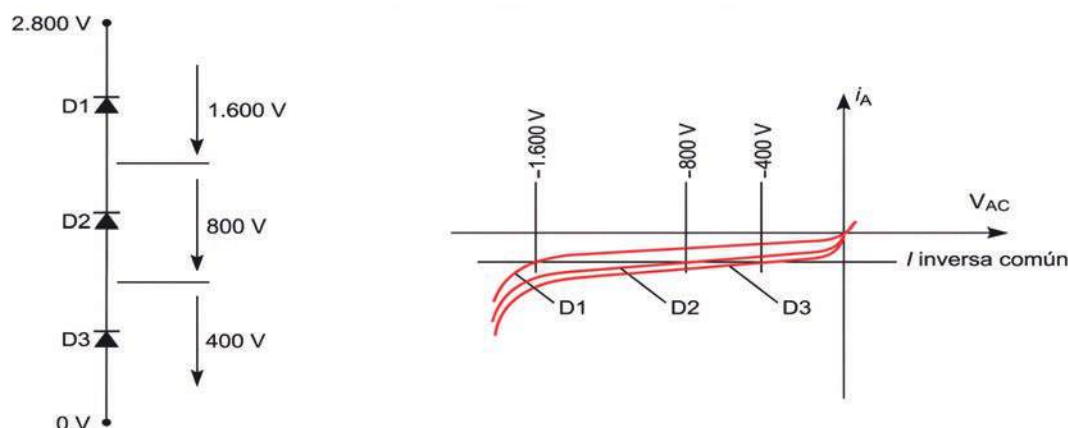
individuales comercialmente disponibles, es necesario recurrir a la conexión en serie de los componentes. Si se exceden las posibilidades de intensidad, hay que recurrir a la conexión en paralelo. Mediante este sistema es posible realizar instalaciones que manejen algunos cientos de miles de voltios y varias decenas de miles de amperios, como es el caso de las estaciones convertidoras para transmisión de corriente directa en alto voltaje (HVDC). Desgraciadamente, las tolerancias inevitables en las características eléctricas de los semiconductores de un mismo tipo hacen necesario tomar precauciones necesarias para asegurar el adecuado reparto de tensión o corriente entre los semiconductores, de forma que no excedan sus límites de trabajo.

10.1 Diodos conectados en serie

En el caso de rectificación de tensiones muy elevadas y en otras aplicaciones se presenta la necesidad de disponer varios diodos en serie para poder soportar la tensión inversa que presenta el circuito.

En la siguiente figura puede verse el reparto desigual de tensión estática en los diodos debido a las desviaciones entre sí de las características con polarización inversa. El diodo de menor intensidad de fugas tiende a soportar la mayor tensión y viceversa, con peligro de que en algún diodo se sobrepase la tensión inversa permitida. Un remedio sencillo consiste en conectar en paralelo con cada diodo una resistencia elevada R , que tienda a igualar la resistencia equivalente del conjunto diodo-resistencia, y así ecualizar las tensiones soportadas.

Figura 87. Tensión estática en los diodos (Hernay, 2019)



Naturalmente, una solución perfecta en este sentido consistiría en medir una a una la resistencia inversa de cada diodo a la tensión de trabajo esperada y conectarle en paralelo una resistencia de valor óhmico adecuado. Esto aumentaría el tiempo de montaje y haría difíciles las reparaciones, por lo que se prefiere, aun a costa de menor grado de utilización en tensión de los diodos, disponer resistencias iguales en toda la cadena que sirvan con cualquier unidad de un mismo tipo. El cálculo sencillo de estas resistencias, suponiendo que no hay tolerancias entre ellas, puede hacerse como sigue:

V_{tot} la tensión inversa total a soportar.
 V_{inv} la tensión inversa de trabajo de los diodos.
 I_{invM} la intensidad inversa máxima de los diodos para la tensión anterior.
 n el número de diodos en serie.

Resistencia equivalente mínima del diodo:

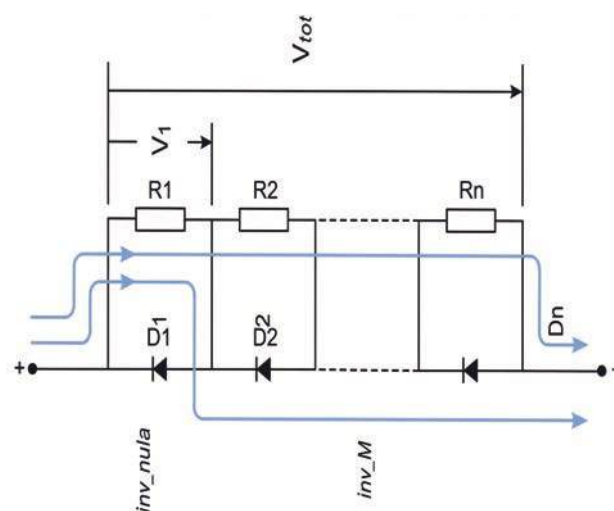
$$R_{eq. min} = \frac{V_{inv}}{I_{invM}}$$

Parámetro introducido para facilitar el cálculo:

$$a = \frac{R_{eq. min}}{R}$$

El peor caso para un diodo se daría suponiendo que tiene una intensidad inversa nula y todos los demás la máxima. Aun en este caso, la tensión V_1 del diodo debe ser menor o igual a V_{inv} .

Figura 88. Ecuación estática (Hernay, 2019)



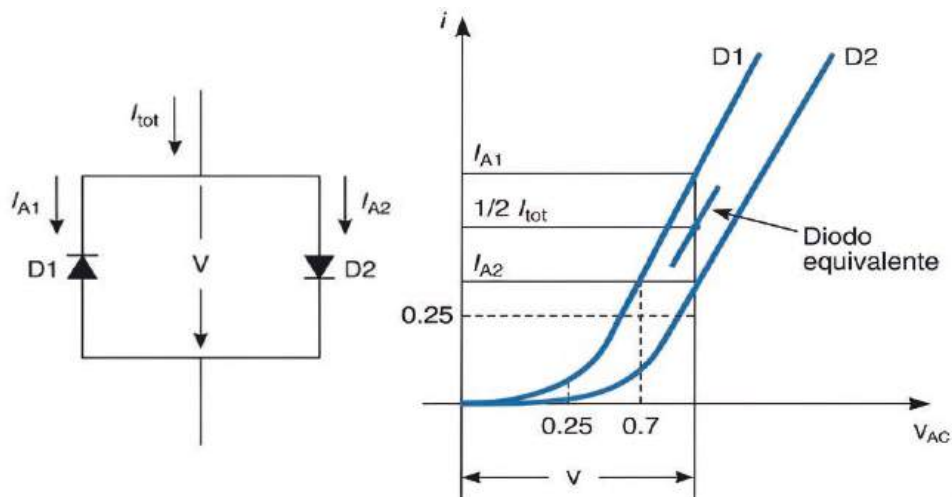
La ecuación estática de tensión no resuelve por completo la conexión en serie de los diodos. Es necesario considerar las diferencias de los tiempos de recuperación y de entrada en conducción, que pueden ocasionar sobretensiones fuertes en los diodos más rápidos. La ecuación dinámica se resuelve mediante la conexión en paralelo con cada diodo de un condensador de capacidad adecuada.

10.2 Diodos conectados en paralelo

Para manejar intensidades elevadas, es necesario disponer diodos en paralelo, pero las tolerancias en las características de conducción provocan un desigual

reparto de corrientes que no permite utilizar los diodos al 100% de su intensidad. En la siguiente figura se describe el reparto de corriente de dos diodos en paralelo.

Figura 89. Reparto de corriente de dos diodos en paralelo (Hernay, 2019)

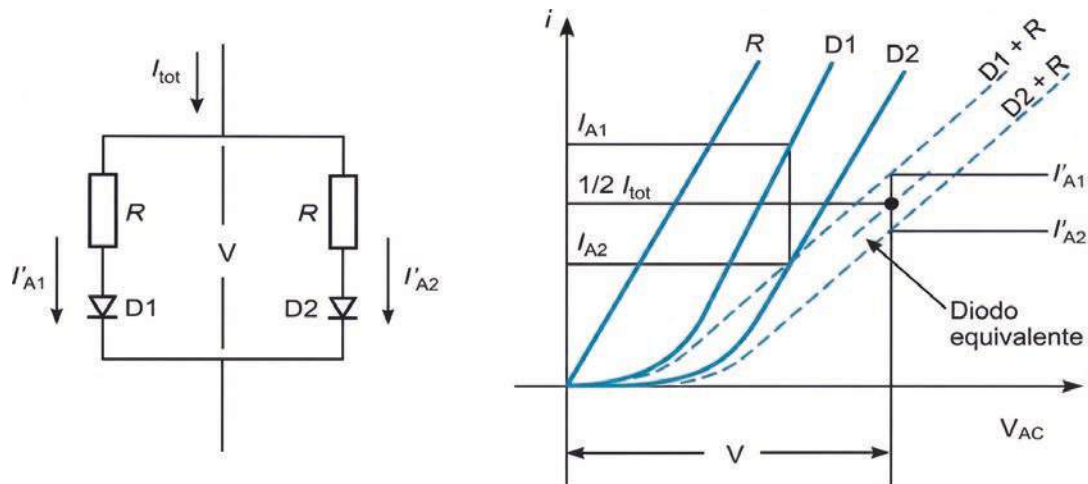


El diodo D_1 presenta una caída de tensión directa menor que D_2 y absorbe más intensidad. La curva característica intermedia a la de los diodos representa la característica de conducción de un hipotético diodo equivalente que se comporta como la pareja D_1 - D_2 , tomando en el eje de intensidades doble corriente que para los diodos reales. Puede resolverse la ecualización de corrientes eligiendo diodos que tengan la característica de conducción casi idéntica, pero esto supone problemas de suministro y de reparación. Suele ser más aconsejable sobredimensionar los diodos en intensidad o en el número de ellos, de forma que con las mayores desviaciones previstas de la característica de conducción no haya ningún diodo que sobrepase su intensidad límite. También

suele recurrirse a mejorar la ecualización mediante resistencias o bobinas en serie con los diodos.

Hay que resaltar que el hecho de que, a temperatura creciente de la unión, disminuya la tensión directa, lo que supone un inconveniente más en la conexión de diodos en paralelo. El diodo que absorba mayor intensidad se calentará más y, reduciendo su tensión más que los otros, todavía aumentará su intensidad. En la figura se presentan las características de conducción de los diodos descritos en la figura anterior, modificadas mediante sendas resistencias iguales R , en serie. Se aprecia inmediatamente el efecto ecualizador de las mismas.

Figura 90. Características de conducción de los diodos (Hernay, 2019)



Para estudiar numéricamente el problema sean

$$V_{A1} = E_1 + r_d I_{A1}$$

$$V_{A2} = E_2 + r_d I_{A2}$$

las expresiones simplificadas de las características de conducción de los diodos D_1 y D_2 respectivamente, y

$$V_1 = E_1 + (r_d + R) I_{A1}$$

$$V_2 = E_2 + (r_d + R) I_{A2}$$

las características de los diodos en serie con las resistencias de ecualización R . Se toma por sencillez la misma resistencia dinámica r_d para $D1$ y $D2$.

Sea

ΔV la máxima diferencia esperada entre los potenciales de unión

ΔI_A la máxima diferencia de intensidad permitida entre los dos diodos. Como la caída en ambas ramas ha de ser la misma, se deduce igualando

$$E_1 + (r_d + R) I_{A1} = E_2 + (r_d + R) I_{A2}$$

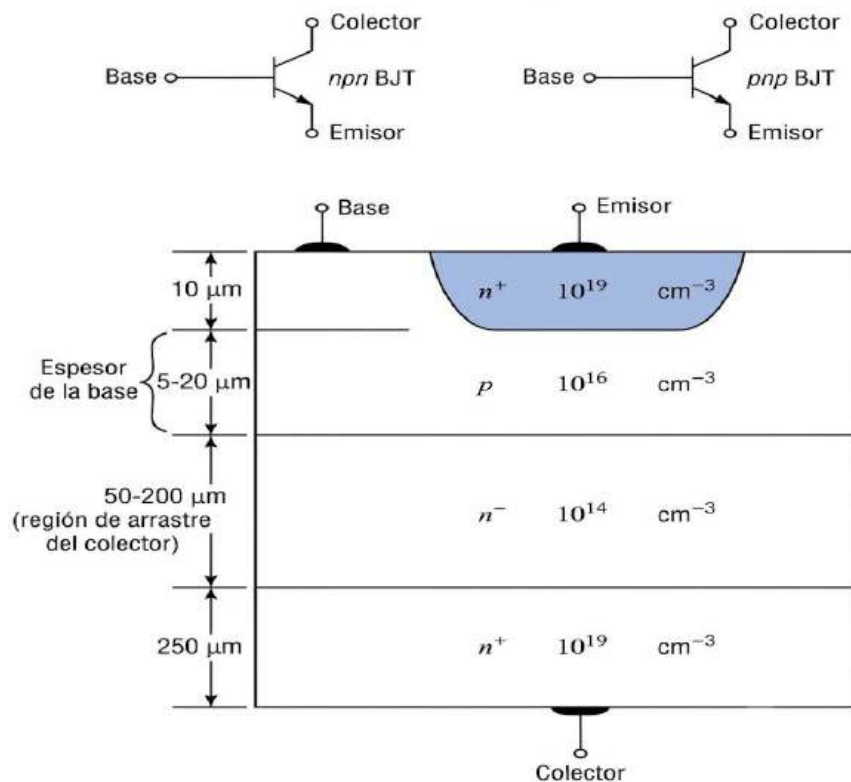
Normalmente la caída de tensión en R , con una intensidad igual a la de pico repetitivo permitida en el diodo, viene a ser del orden de 1,5 V. Este método de ecualización es simple, pero empeora el rendimiento porque aumenta las pérdidas en conducción. Para tensiones elevadas, la caída de tensión en conducción sigue siendo relativamente baja a pesar del aumento que comportan las resistencias, y el procedimiento de puesta en paralelo es completamente aceptable.

11 TRANSISTOR DE UNIÓN BIPOLAR (BJT)

11.1 Estructuras verticales de transistores de potencia BJT

Un transistor de potencia tiene una estructura de orientación vertical de cuatro capas de dopaje alternante de tipo p y tipo n, como el transistor NPN de la figura que se presenta a continuación:

Figura 91. Transistor NPN (Hernay, 2019)



Como lo indica la figura, el transistor tiene tres terminales, que se denominan colector, base y emisor. El símbolo de circuito del BJT se muestra en la misma figura. Un transistor PNP, cuyo símbolo de circuito también se muestra en la figura 91, tendría el tipo de dopaje opuesto en cada capa. Los transistores NPN se usan mucho más que los transistores PNP como interruptores de potencia. Se prefiere una estructura vertical para los transistores de potencia porque maximiza el área de sección transversal a través del cual fluye la corriente en el dispositivo. Esto reduce la resistencia del estado activo y por ende la disipación de potencia en el transistor. Además, un área grande de sección transversal disminuye la resistencia térmica del transistor, y de este modo ayuda también a controlar los problemas de disipación de potencia.

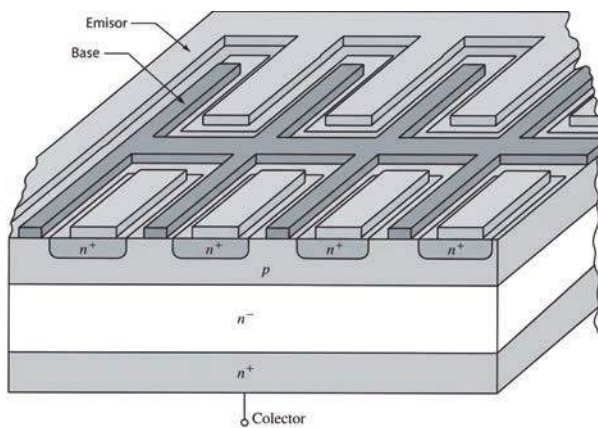
Los niveles de dopaje en cada capa y su espesor tienen un efecto significativo

en las características del dispositivo. El dopaje en la capa del emisor es muy grande, mientras que el dopaje de la base es moderado. La región n⁻ que forma la mitad de colector de la unión C-B (colector-base) suele llamarse región de arrastre del colector, y tiene un nivel de dopaje leve. La región n⁺ que termina la región de arrastre tiene un nivel de dopaje parecido al del emisor. Esta región sirve como contacto del colector con el mundo exterior. El espesor de la región de arrastre determina la tensión de ruptura del transistor y, por tanto, puede estar en un rango desde decenas hasta cientos de micrómetros de extensión. El espesor de la base se reduce lo más posible, a fin de tener buenas capacidades de amplificación; sin embargo, si el espesor de la base es demasiado pequeño, se pone en peligro la capacidad de la tensión de ruptura del transmisor. De este modo, los espesores de la base en dispositivos de potencia son una solución compensada

entre estas dos consideraciones en competencia. Suelen tener un espesor de varios micrómetros hasta unas cuantas decenas de micrómetros, en comparación con la pequeña fracción de un micrómetro de espesor para los transistores de nivel lógico.

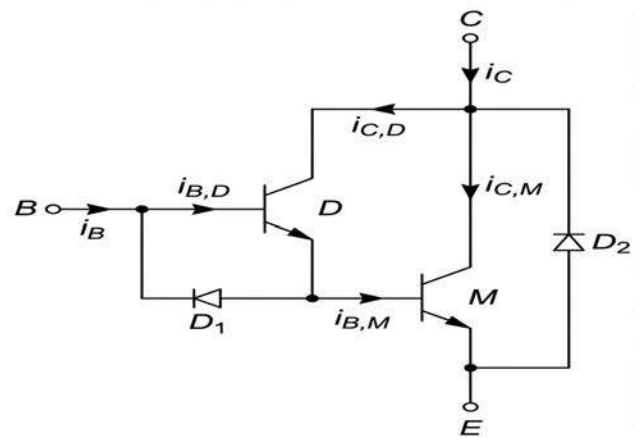
Los transistores de potencia prácticos tienen sus emisores y bases interfoliadas como dedos angostos, como se muestra en la figura:

Figura 92. Emisores y bases interfoliadas (Hernay, 2019)



El propósito de este arreglo es sobre todo reducir los efectos de apiñamiento de corriente proveniente del emisor, fenómeno que produce una segunda ruptura y la posible falla del dispositivo. Este diseño de emisores múltiples también reduce la resistencia óhmica parasítica en la ruta de la corriente básica, lo que ayuda a reducir la disipación de potencia en el transistor. La base relativamente gruesa que se encuentra en estructuras de transistores de potencia ocasiona que la ganancia de la corriente, $\beta = I_C/I_B$, sea muy pequeña, por lo general de 5 a 10. Para algunas aplicaciones esto es muy poco, y por esta razón se desarrollaron diseños monolíticos para pares de BJT de conexión Darlington, como se muestra en la figura:

Figura 93. Diseños monolíticos para pares de BJT (Hernay, 2019)

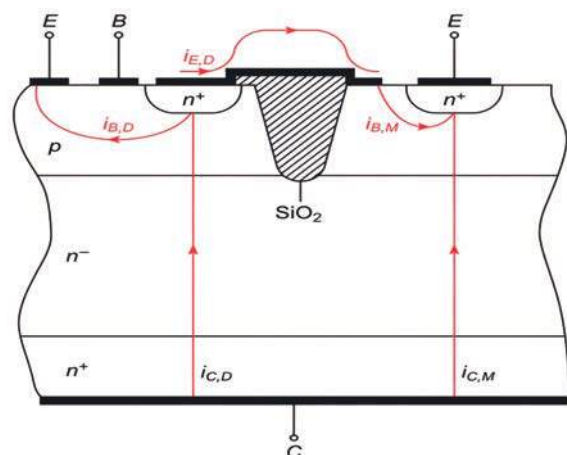


La ganancia de la corriente de un par Darlington está dada por

$$\beta = \beta_M \beta_D + \beta_M + \beta_D$$

De modo que, a pesar de que cada transistor individual tenga una beta pequeña, la beta efectiva del par aún sea muy grande. Se agrega el diodo discreto D1, como se muestra en la figura, para acelerar el tiempo de apagado del transistor principal. Se agrega el diodo discreto D2, que también se muestra en la figura, para aplicaciones de circuitos de medio puente o de puente completo.

Figura 94. Diodo discreto (Hernay, 2019)



La protuberancia de dióxido de silicio a través de la capa p (la región base de ambos transistores) aísla las dos bases

eléctricamente entre sí. En la figura aparecen transistores NPN de varios tamaños:

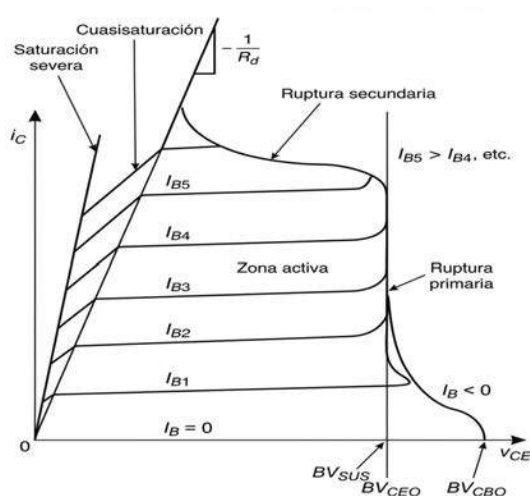
Figura 95. Transistores NPN (Hernay, 2019)



11.2 Características I-V del BJT

En la siguiente figura se muestran las características de salida (i_C versus v_{CE}) de un transistor habitual de potencia NPN:

Figura 96. Características de salida de un transistor habitual de potencia NPN (Hernay, 2019)



Las diversas curvas se distinguen entre sí por el valor de la corriente de la

base. Las características de Darlington monolíticas son muy parecidas a las que se muestran en la figura. Se debe observar varios elementos de estas características. Primero, hay un voltaje máximo de colector-emisor que se sustenta a través del transistor cuando lleva una corriente sustancial del colector. Este voltaje suele denominarse BV_{SUS} . En el límite de la corriente de base cero, el máximo voltaje entre colector y emisor que se sustenta aumenta un poco hasta un valor denominado BV_{CEO} , el voltaje de ruptura de colector-emisor cuando la base está en circuito abierto. Este último voltaje se usa a menudo como medida de la capacidad aislante del voltaje del transistor, porque, por lo general, la única vez que el transistor ve grandes tensiones es cuando la corriente de base es cero y el BJT está en corte. La tensión BV_{CBO} es el voltaje de ruptura de colector-base cuando el emisor está en circuito abierto. Se aprovecha que esta tensión sea mayor que BV_{CEO} en los llamados circuitos de apagado de transistores de emisores abiertos.

Si se sobrepasa la tensión máxima permitida entre colector y base con el emisor abierto BV_{CBO} , o la tensión máxima permitida entre colector y emisor con la base abierta, BV_{CEO} , la unión colector-base, polarizada inversamente, entra en un proceso de ruptura similar al cualquier diodo, que puede degradar o destruir el transistor. Esto es lo que suele llamarse avalancha normal o avalancha primaria en el transistor. Esta zona de ruptura primaria se debe evitar debido a la gran disipación de potencia que claramente acompaña a esta ruptura.

La zona denominada ruptura secundaria también se debe evitar, porque también le acompaña una gran disipación de

potencia, en particular en lugares dentro del semiconductor. El origen de la ruptura secundaria es diferente del origen de la ruptura de avalancha, y la consideraremos a continuación en detalle. La falla del transistor bipolar a menudo se asocia a la ruptura secundaria.

La diferencia observable más importante entre las características i - v de un transistor de potencia y las de un transistor de nivel lógico es la zona denominada cuasi saturación en las características de transistores de potencia de la figura 96. Como explicaremos en detalle en una sección posterior de este capítulo, la cuasi saturación es una consecuencia de la región de arrastre del colector un poco dopada en el transistor de potencia. Los transistores de nivel lógico no tienen esta zona de arrastre, y por tanto no muestran la cuasi saturación. Por lo demás, todos los elementos principales de la característica del transistor de potencia también se encuentran en las características de dispositivos de nivel lógico.

11.3 Física de operación del BJT

En la zona activa, la unión B-E (base-emisor) es de polarización directa, y la unión C-B, de polarización inversa. Se inyectan electrones a la base desde el emisor y se inyectan huecos desde la base al emisor. De hecho, la corriente total que fluye a través de la unión B-E es casi por completo corriente de difusión, igual que para el diodo de unión pn. A diferencia del diodo de unión pn de polarización directa, la corriente de base que entra al lado de tipo p de la unión B-E desde la fuente de polarización de la unión B-E no es igual a la corriente (del emisor) que sale del lado de tipo n. Las corrientes son desiguales porque la estructura del transistor ofrece una alternativa aparte de la terminal de

base para electrones inyectados a la base desde el emisor para salir de la zona.

Los electrones inyectados a la base desde el emisor salen de la base por el colector en lugar de la terminal de la base por tres razones. Primero, el espesor de la zona de base se reduce en gran medida en comparación con la longitud de difusión de electrones en la base, de modo que es improbable que se recombinen allí. Segundo, el área del colector es mucho más que el área del emisor o el contacto de base, como se muestra en la figura, por lo que es mucho más probable que los electrones que se difunden alejándose del emisor encuentren el colector y no otra cosa debido a la distancia corta entre emisor y colector. Tercero, la densidad de los electrones en la unión C-B es en esencia de cero, porque los campos eléctricos altos en la unión C-B de polarización inversa barren a todos los electrones en difusión hasta el borde de la zona de carga espacial a través de la unión y de la zona del colector. La facilidad relativa con la que los electrones pueden atravesar la unión en polarización inversa se comprende si se considera que, para la unión en polarización inversa, los electrones aparecerán como portadores minoritarios, engrosando la corriente de fuga por dicha unión. En otras palabras, tuvo lugar una inyección de portadores minoritarios.

Esto significa que la corriente de la base será mucho menor que la corriente del emisor y que la corriente del colector será casi igual a la corriente del emisor. Una corriente de base pequeña causa el flujo de una corriente mucho más grande entre el colector y el emisor, y por tanto se obtiene una cantidad sustancial de ganancia entre la corriente de entrada de la base y la corriente de salida del colector.

Éste es el mecanismo básico de ganancia del BJT. La ganancia se caracteriza cuantitativamente por la relación entre la corriente del colector i_c y la corriente de la base i_B (beta o β del transistor).

11.4 Ruptura secundaria del BJT

Los transistores bipolares y hasta cierto grado también otros tipos de dispositivos de portadores minoritarios tienen un modo de fallo potencial, por lo común llamado ruptura secundaria. Esto aparece en las características de salida del BJT como una caída en picada de la tensión de colector-emisor con grandes corrientes del colector. Conforme disminuye la tensión del colector, a menudo hay un aumento significativo de la corriente del colector y un aumento significativo de la disipación de potencia. El riesgo particular de esta situación para el BJT es que la disipación no se extiende de manera uniforme a través del volumen entero del dispositivo, sino que se concentra en zonas muy localizadas donde la temperatura local puede subir muy rápido a valores de altura inaceptable. Si esta situación no termina en un tiempo muy breve, provocará la destrucción del dispositivo. Cuando se analizan dispositivos destruidos de esta manera, a menudo muestran evidencia drástica de la disipación de potencia localizada, así como el calor que conlleva en forma de silicio fundido y luego recristalizado.

La ruptura secundaria no proviene de la ionización por impacto y la consecuente ruptura de avalancha de una unión pn. Esto queda claro porque una caída de tensión acompaña la ruptura secundaria, mientras que no se observa esta caída en la ruptura de avalancha. Se combinan varios aspectos intrínsecos del transistor para hacer que el BJT sea propenso

a la ruptura secundaria. Primero que nada, existe la tendencia general de los dispositivos de portadores minoritarios al desbordamiento térmico cuando la tensión a través de ellos se mantiene más o menos constante conforme sube la temperatura del dispositivo. Los dispositivos de portadores minoritarios tienen un coeficiente de temperatura negativo de resistividad (la resistividad disminuye conforme sube la temperatura). Esto significa que la disipación de potencia aumenta conforme disminuye la resistencia, mientras la tensión se mantenga constante. Si el índice de aumento en la disipación de potencia con la temperatura es mayor que en la región lineal con la temperatura (el índice de eliminación de calor es lineal con la temperatura, es decir, si se caracteriza por una resistencia térmica), surgirá una situación inestable cuando la potencia disipada exceda la velocidad con que se elimina el calor (una función de la resistencia térmica). La situación es entonces un caso clásico de realimentación positiva donde la disipación de potencia produce aumento de temperatura, lo que genera aumentos adicionales de la disipación de potencia, y así sucesivamente, hasta que el dispositivo queda destruido. Con frecuencia, y de manera muy apropiada, se denomina desbordamiento térmico.

Este potencial de desbordamiento térmico es aún mucho más peligroso si la densidad de la corriente en el dispositivo no es uniforme a través de la sección transversal del dispositivo. Pueden presentarse filamentos de corriente donde la densidad de la corriente sea mucho mayor que en las áreas circundantes, lo que aumenta las probabilidades de un desbordamiento térmico. La formación de filamentos de corriente y el subsiguiente desbordamiento térmico localizado

requiere sólo una falta de uniformidad en la densidad de la corriente y suficiente disipación de potencia para ocasionar un incremento sustancial de la temperatura del filamento. De hecho, el incremento de la densidad de los portadores en el filamento de corriente a menudo puede causar una caída de la tensión externa a través el dispositivo, si es considerable la resistencia externa en serie con el dispositivo, y aun así puede destruirse el dispositivo. Cuando el efecto de cortocircuito del filamento es lo bastante fuerte para causar esta caída de tensión, se dice que el dispositivo se encuentra en ruptura secundaria.

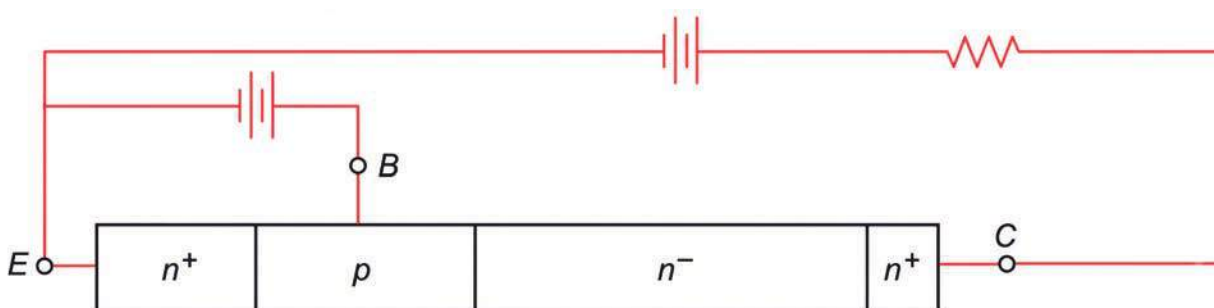
Así, parece que la clave para evitar la segunda ruptura es 1) controlar la disipación total de potencia y, aún más importante, 2) evitar toda falta de uniformidad de densidad de la corriente, en especial durante el encendido y apagado, cuando es mayor la disipación de potencia instantánea. Sin embargo, la construcción básica del transistor origina limitaciones de la corriente

por medio de mecanismos como el apiñamiento de la corriente del emisor. Si bien es posible posponer el apiñamiento de corriente hasta alcanzar niveles específicos de corriente, una vez excedidos estos niveles, la constricción de la corriente es lo bastante grave para producir la formación de un filamento de corriente y tal vez un desbordamiento térmico localizado. Otras medidas para reducir la posibilidad de una segunda ruptura son un índice controlado de cambios de la corriente de base durante el apagado, circuitos protectores, como amortiguadores y diodos de circulación libre, y ubicar la trayectoria de conmutación dentro de los límites del área de operación segura (SOA), tema que abordaremos en breve.

11.5 Cuasi saturación del BJT

Para entender el fenómeno de la cuasi saturación, se generaliza el modelo unidimensional del BJT, como se muestra en la figura:

Figura 97. Modelo unidimensional del BJT (Hernay, 2019)



Supondremos que el transistor está al principio en la zona activa y ahora se permite que aumente la corriente de la base. Conforme sube la corriente del colector en respuesta a la corriente de la base, cae la tensión C-E debido a la

caída de tensión aumentada a través de la carga del colector. Sin embargo, hay un incremento simultáneo de la caída de la tensión en la región de arrastre como resultado de su resistencia óhmica debido al aumento de i_C . Esto significa que la

polarización inversa a través de la unión C-B real (la unión n-p), se reduce más, y en algún punto la unión será de polarización directa.

Cuando esto ocurre, comienza una inyección de huecos desde la base hasta la región de arrastre del colector. Al mismo tiempo, la neutralidad de la carga espacial requiere que también se inyecten electrones a la región de arrastre más o menos en las mismas cantidades que los huecos. Estos electrones se obtienen con facilidad de la cantidad tan grande de electrones que se suministra a la unión C-B mediante la inyección desde el emisor y la difusión subsecuente a través de la base. Conforme empieza a ocurrir esta acumulación de portadores excedentes en la región de arrastre, se entra en la zona de cuasi saturación de la característica i-v. Si la resistencia óhmica de la región de arrastre es R_d , el límite entre la zona de cuasi saturación y la zona activa en la figura esta dado por:

$$i_C = \frac{V_{CE}}{R_d}$$

En la cuasi saturación ocurre la doble inyección en la región de arrastre de manera similar a la de la región de deriva del diodo de potencia de polarización directa. Sin embargo, la carga almacenada se acumula en la región de arrastre sólo desde un lado de la región de arrastre, es decir, el lado de la unión C-B (o lado pn-), En el transistor, la inyección de electrones a través de la unión n-n+ es mucho menos perceptible porque hay un suministro mucho más abundante de electrones en la unión pn- (debido a los electrones inyectados desde el emisor)

en comparación con el diodo de la unión pn, donde no existe tal suministro de electrones. Conforme aumenta el número de portadores inyectados, la región de arrastre se pone poco a poco en cortocircuito y baja la tensión, aunque la corriente del colector sea grande. En la cuasi saturación, la región de arrastre no se pone por completo en cortocircuito por la inyección de alto nivel; por tanto, la disipación de potencia en el BJT es mayor que cuando se entra en la saturación severa.

La saturación severa se obtiene cuando la densidad de portadores excedentes llega al otro lado (el lado n+) de la región de arrastre. Esto requiere una cantidad mínima de carga almacenada. En esta situación, el espesor efectivo de la base es más o menos la suma del espesor normal de la base más la longitud de la región de arrastre. Toda carga almacenada adicional empuja al transistor más profundamente en saturación severa. La caída de tensión a través de la región de arrastre es pequeña, y la disipación de potencia en estado activo se reduce en comparación con la cuasi saturación.

11.6 Tensiones de ruptura del BJT

Cuando el BJT está en el estado de bloqueo, la unión C-B debe soportar la tensión aplicada. Un BJT no puede bloquear la tensión de polaridad opuesta porque la unión B-E tiene una tensión de ruptura mucho más baja que la unión C-B debido al dopaje tan grave con que se incrementa la beta. Las tensiones de ruptura normales son de 5 a 20 V.

Al diseñar un transistor que soporte una tensión específica, el dopaje en la región de deriva del lado del colector

de la unión C-B disminuye tanto, que la zona de degradación se ubica predominantemente en el lado del colector, donde hay espacio para ella. Como en el caso de los diodos de alta tensión, se diseña con cuidado una región de arrastre (la región de arrastre del colector) un poco dopada para acomodar el ancho de la zona de degradación con el voltaje máximo aplicado, pero no demasiado largo, lo que produciría pérdidas mayores en estado activo. El espesor de la base se debe mantener pequeño, de modo que se puedan realizar valores respetables de beta (β). Esto significa que no se puede tolerar ninguna invasión importante de la base por la zona de degradación. Es inevitable cierto grado de invasión y disminuye el espesor efectivo de la base ocasionando un aparente incremento de beta. Este efecto se denomina modulación del espesor de la base y se muestra como la pendiente finita en la parte de la zona activa de las curvas i_c - v_{CE} . Si la base del transistor presenta una invasión significativa por la zona de despoblación C-B, se tiene que engrosar, lo que tiene el efecto indeseable de bajar beta.

El espesor de la base en un BJT de potencia es por tanto una solución negociada entre establecerlo pequeño para una beta grande y uno grande para reducir los problemas de penetración. Este compromiso genera mayores espesores de la base que los de los transistores de nivel lógico y por consiguiente betas más pequeños, con valores normales de 5 a 10.

En una configuración de emisor común la tensión de ruptura BV_{CEO} es más pequeña que BV_{CBO} . Existe una relación semiempírica entre estos dos parámetros, dada por:

$$BV_{CEO} = \frac{BV_{CBO}}{\beta^{1/n}}$$

donde $n = 4$ para transistores NPN y $n = 6$ para transistores PNP. La consecuencia de esta relación es que los transistores con altas tensiones de ruptura tienen valores pequeños de beta. Para transistores NPN de alta tensión, donde beta es entre 10 y 20, el valor de BV_{CEO} será más o menos de la mitad de BV_{CBO} .

11.7 Transistor BJT en corte y en saturación

Las principales características que han de considerarse en un transistor BJT de potencia para estas condiciones son:

I_C	Intensidad máxima de colector.
V_{CEO}	Tensión de ruptura del colector-emisor con la base abierta.
V_{CEsat}	Tensión en saturación del colector-emisor.
h_{FE}	Ganancia de intensidad en corriente continua.
$P_{m\acute{a}x}$	Potencia máxima disipable en régimen permanente.

El comportamiento de los transistores de potencia en la zona activa para aplicaciones en amplificadores de continua y alterna en baja y alta frecuencia, fuentes serie y paralelo, etc., no comporta diferencia sustancial respecto del ya bien conocido funcionamiento de transistores de señal en condiciones similares. Sin embargo, en la electrónica de potencia los transistores de potencia se emplean como interruptores, utilizando los estados de corte y saturación exclusivamente (switching mode operation). Las aplicaciones más corrientes con esta modalidad de trabajo son las fuentes

conmutadas, los troceadores cd-cd (choppers) y los inversores. En este caso interesa que el transistor se comporte lo más cercanamente posible a un interruptor ideal considerado entre sus terminales de colector y emisor.

Para que el transistor esté cortado y pueda soportar tensión colector-emisor con la menor circulación de corriente (corriente de fugas) se puede mantener la base abierta. En la figura 96 puede verse que en esta situación ($I_B=0$) la intensidad de colector es muy baja, y crece moderadamente con la tensión colector-emisor. Puede conseguirse una situación de corte mejor cortocircuitando la base al emisor, o mejor todavía con una polarización inversa de la misma de algunos voltios. De esta forma, la intensidad de fuga del colector disminuye a la vez que el transistor puede soportar mayor tensión colector-emisor sin entrar en avalancha.

Para saturar bien el transistor, y que se comporte lo más parecidamente posible a un cortocircuito entre colector y emisor, es necesario aportar una intensidad entrante de base (en los transistores NPN, los más habituales) tanto mayor cuanto más elevada vaya a ser la corriente de colector. Si esta se acerca a la corriente máxima permitida, la intensidad de base debe ser a veces tan elevada como 1/2 de la de colector, debido a la pobre ganancia de intensidad ya mencionada que presentan los transistores de potencia con corriente alta.

En la misma figura puede verse que la caída de tensión en la zona de saturación es aproximadamente proporcional a la intensidad de colector si se mantiene una

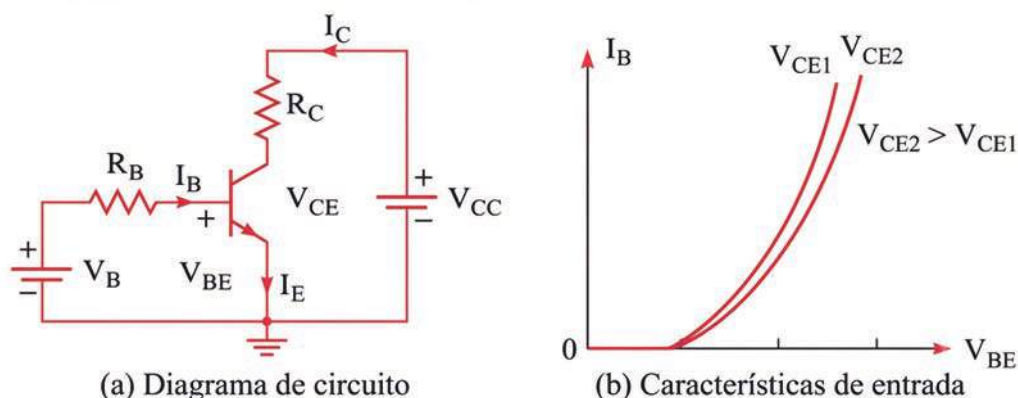
elevada intensidad de base. El circuito equivalente de colector-emisor puede muy bien aproximarse en esta situación a una pequeña resistencia. La caída de tensión para un transistor de germanio es de unos 0,5 V con intensidades cercanas a la máxima, y de 2 V aproximadamente para el silicio.

11.8 Características en estado permanente del BJT

Aunque hay tres configuraciones posibles para un transistor: colector común, base común y emisor común, la configuración emisor común, que se ve en la figura para un transistor NPN, es la que generalmente se utiliza en aplicaciones de conmutación. En la figura 98b se muestran las características típicas de entrada de corriente de base I_B en función del voltaje base-emisor V_{BE} .

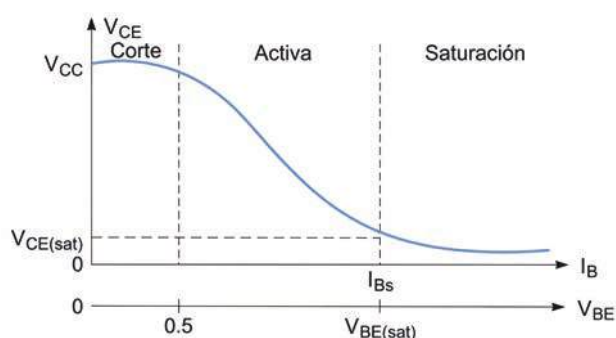
Como ya se mencionó anteriormente, hay tres regiones de operación: corte, activa y saturación. En la región de corte, el transistor está abierto o apagado, y las dos uniones (C-B y B-E) están polarizadas inversamente. En la región activa, el transistor actúa como un amplificador, en el que la corriente de base se amplifica una ganancia determinada, y el voltaje colector-emisor disminuye al aumentar la corriente de base. La unión C-B está polarizada inversamente, y la unión B-E tiene polarización directa. En la región de saturación, la corriente de base es suficientemente alta como para que el voltaje colector-emisor sea bajo, y el transistor actúa como un interruptor. Las dos uniones (C-B y B-E) tienen polarización directa.

Figura 98. Características en estado permanente del BJT (Hernay, 2019)



En la siguiente figura se muestra la característica de transferencia, que es una gráfica de V_{CE} en función de I_B :

Figura 99. Característica de transferencia (Hernay, 2019)



En un transistor NPN, la ecuación que relaciona las corrientes es

$$I_E = I_C + I_B$$

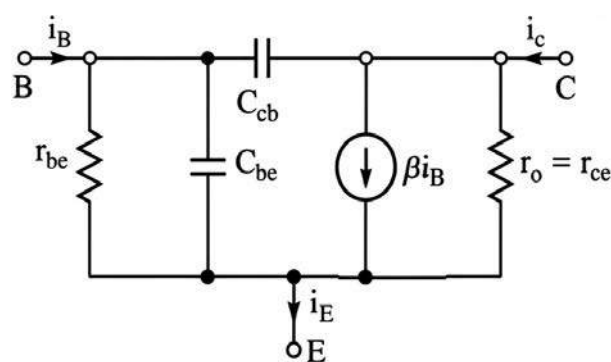
La corriente de base es de hecho la de entrada, y la corriente del colector es la de salida. La relación de la corriente de colector I_C entre la corriente de base I_B se llama ganancia de corriente en sentido directo, β_F

$$\beta_F = h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

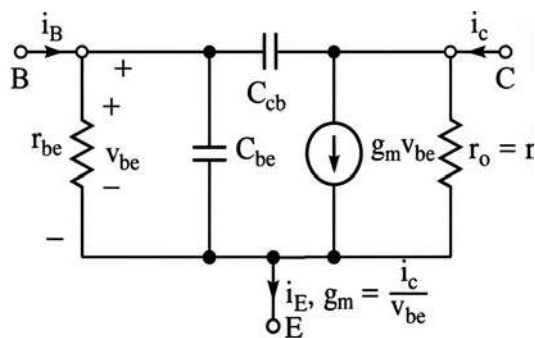
11.9 Características de conmutación del BJT

La unión pn con polarización directa contiene dos capacitancias en paralelo: una capacitancia de la capa de agotamiento y una capacitancia de difusión. Por otra parte, una unión pn con polarización inversa sólo tiene la capacitancia de agotamiento. Bajo condiciones de estado permanente, esas capacitancias no juegan papel alguno. Sin embargo, bajo condiciones transitorias, influyen sobre el comportamiento del transistor en su encendido y apagado. En la figura se ve el modelo de un transistor bajo condiciones transitorias, donde C_{cb} y C_{be} son las capacitancias efectivas de las uniones C-B y B-E, respectivamente:

Figura 100. Transistor bajo condiciones transitorias (Hernay, 2019)



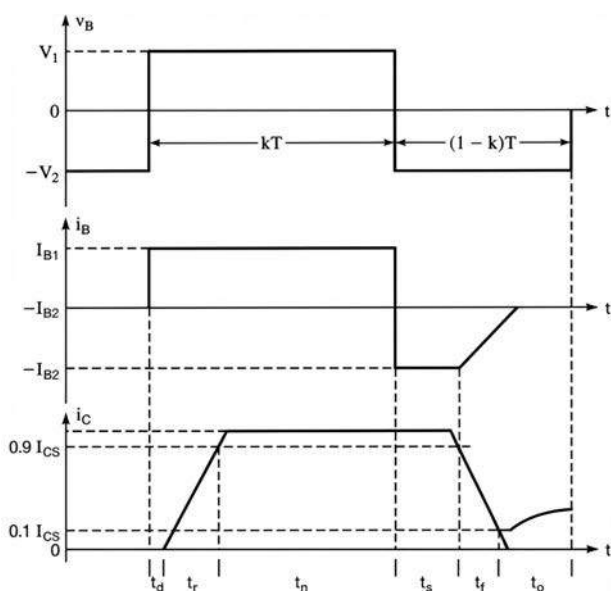
(a) Modelo con ganancia de corriente



(b) Modelo con transconductancia

La transconductancia g_m de un BJT se define como la relación de ΔI_C a ΔV_{BE} . Esas capacitancias dependen de los voltajes en las uniones y de la construcción física del transistor. La capacitancia C_{cb} afecta en forma apreciable a la capacitancia de entrada. Las resistencias de colector a emisor y de base a emisor son r_{ce} y r_{be} , respectivamente. A causa de las capacitancias internas, el transistor no se enciende al instante. La figura ilustra las formas de onda y los tiempos de conmutación.

Figura 101. Formas de onda y los tiempos de conmutación (Hernay, 2019)



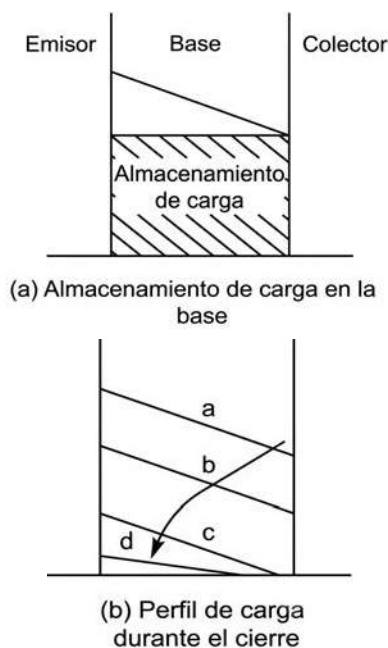
Cuando el voltaje de entrada v_B aumenta de cero a V_1 y la corriente de base aumenta a I_{B1} , la corriente de colector no responde

de inmediato. Hay un retardo, llamado tiempo de retardo t_d , para que haya un flujo de corriente por el colector. Este retardo se requiere para cargar la capacitancia de la unión BE hasta el voltaje de polarización directa V_{BE} (unos 0.7 V). Después de ese retardo, la corriente de colector sube hasta el valor I_{CS} de estado permanente. El tiempo de subida t_r depende de la constante de tiempo determinada por la capacitancia de la unión BE. En el caso normal, la corriente de base es mayor que la necesaria para saturar al transistor. El resultado es que el exceso de carga debido a los portadores minoritarios se almacena en la región de la base. Mientras mayor sea el ODF, más alta será la cantidad de carga adicional almacenada en la base. Esa carga adicional, llamada carga de saturación, es proporcional al exceso de excitación de la corriente de base.

Cuando el voltaje de entrada se invierte de V_1 a $-V_2$ y la corriente de base también cambia a $-I_{B2}$, la corriente de colector no cambia durante un tiempo t_s , llamado tiempo de almacenamiento. Se requiere el t_s para remover la carga de saturación de la base. Como v_{BE} todavía es positivo, aproximadamente sólo de 0.7 V, la corriente de base invierte su dirección debido al cambio de polaridad de v_B , desde V_1 hasta $-V_2$. La corriente $-I_{B2}$ en sentido inverso ayuda a descargar la base y a remover la carga extra de la base. Si no hay $-I_{B2}$, la carga de saturación debe removerse por completo por recombinación, y el tiempo de almacenamiento sería mayor. Una vez removida la carga adicional, la capacitancia de la unión BE se carga hasta el voltaje de entrada $-V_2$, y la corriente de base cae a cero. El tiempo de caída t_f depende de la constante de tiempo, que está determinada por la capacitancia de la unión BE con polarización inversa.

La figura muestra la carga de almacenamiento extra en la base de un transistor saturado. Durante el apagado, esta carga adicional se remueve primero en el tiempo t_s , y el perfil de la carga cambia de a a c, como se ve en la figura. Durante el tiempo de caída, el perfil de la carga baja desde el perfil c hasta que se remueven todas las cargas.

Figura 102. Carga de almacenamiento y perfil de carga durante el cierre (Hernay, 2019)



El tiempo de encendido o tiempo de activación, t_{enc} , es la suma del tiempo de retardo t_d y el tiempo de subida t_r :

$$t_{enc} = t_d + t_r$$

Por otro lado, el tiempo de apagado o tiempo de desactivación, t_{off} , es la suma del tiempo de almacenamiento t_s y el tiempo de caída t_f :

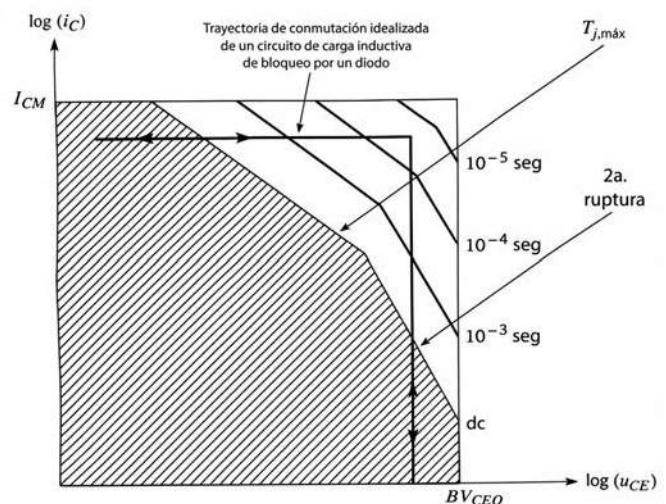
$$t_{apag} = t_s + t_f$$

11.10 Áreas de operación segura del BJT

Las áreas de operación segura, o SOA, son un método muy conveniente y conciso para

resumir los valores máximos de corriente y tensión a las que se va a someter el BJT. Dos SOA separados se usan en conjunto con BJT, y por lo general ambos aparecen en hojas de especificaciones. La llamada área de operación segura de polarización directa (FBSOA) que se muestra en la figura, y el área de operación segura de polarización inversa (RBSOA), en la Figura. Los términos polarización directa y polarización inversa se refieren a que la fuente de polarización de la corriente de base ponga a la unión B-E en polarización directa o inversa (lo cual sería lo correcto para apagar el BJT).

Figura 103. Trayectoria de conmutación idealizada de un circuito de carga inductiva de bloque por un diodo (Hernay, 2019)

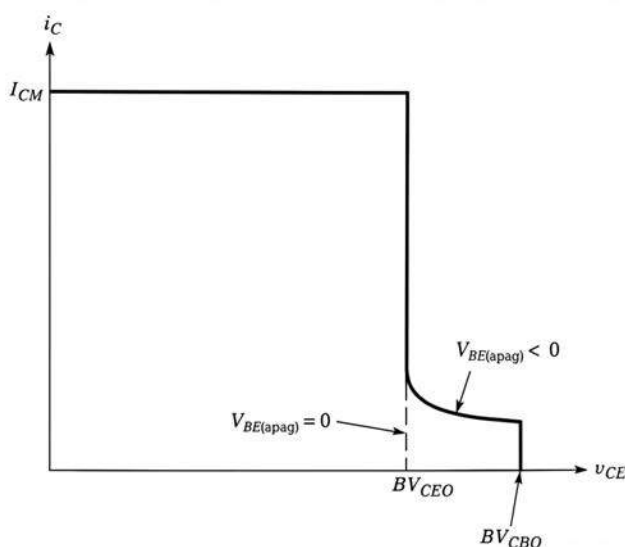


Varios mecanismos físicos están activos en la determinación de los límites del FBSOA de la figura. La corriente I_{CM} es la corriente máxima del colector incluso como pulso que se debe aplicar al transistor. Si se excede esta corriente, se pueden evaporar los hilos de soldadura o metalizaciones en la oblea, o pueden dejar de funcionar. El límite térmico es un límite de disipación de potencia establecido por la resistencia térmica del transistor y la máxima temperatura permisible de la unión. El límite de la segunda ruptura representa

las máximas combinaciones permisibles de tensión y corriente sin entrar en la zona del plano i_C - v_{CE} , donde puede ocurrir la segunda ruptura. La parte final del límite del FBSOA es el límite de tensión de ruptura BV_{CEO} .

Si el transistor se opera como interruptor, los límites del FBSOA se expanden, como se indica en la figura. En términos sencillos, la expansión del SOA ocurre para la operación de modo conmutado porque la oblea de silicio y su empaque tienen una capacitancia térmica y por tanto la capacidad de absorber una cantidad finita de energía sin que la temperatura de la unión suba a niveles excesivos. Si el transistor se enciende en unos cuantos microsegundos o menos, la cantidad de energía que se absorbe es demasiado pequeña para causar un aumento apreciable de la temperatura de la unión y, por consiguiente, el FBSOA es en esencia cuadrado y sólo está limitado por I_{CM} y BV_{CEO} . El SOA es en particular útil cuando la trayectoria de conmutación está trazada sobre él, porque esta construcción revela de inmediato si la operación del circuito pone al transistor fuera de su rango de especificación.

Figura 104. Límites del FBSOA (Hernay, 2019)



En forma parecida está construido el RBSOA. El área comprendida por el RBSOA, que es un SOA con pulsos, es algo más grande que el FBSOA debido a la extensión del área de tensión más alta que BV_{CEO} , arriba de BV_{CBO} con corrientes bajas del colector. Es posible operar el transistor hasta la tensión más alta porque la combinación de la corriente baja del colector y la corriente de base inversa redujeron la beta, de modo que la tensión de ruptura sube hacia BV_{CBO} .

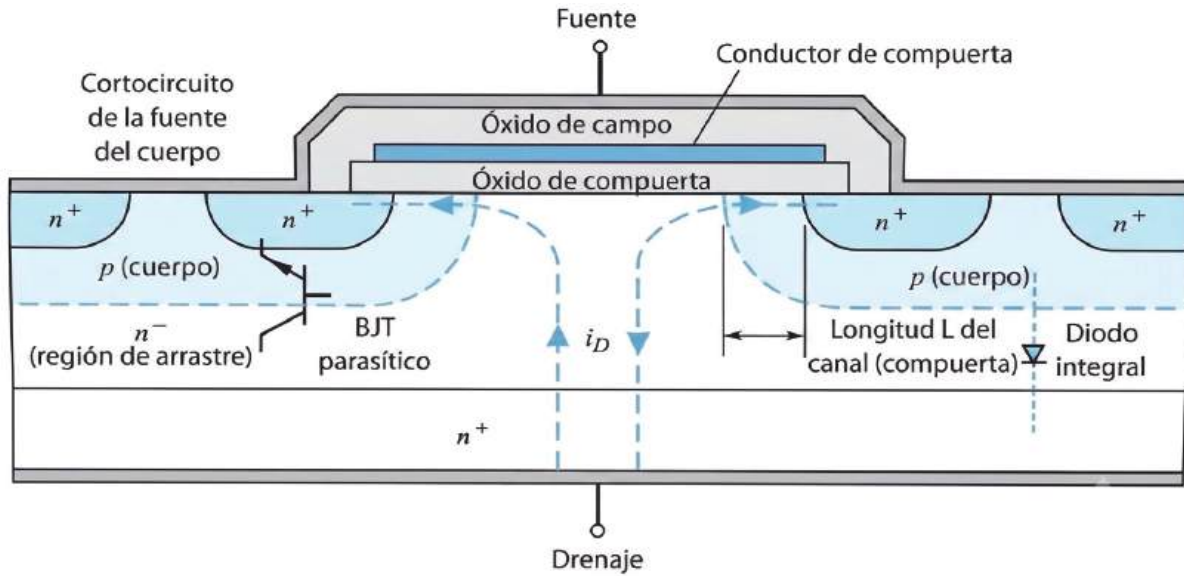
11 MOSFET DE POTENCIA

Un Mosfet de potencia es un dispositivo controlado por voltaje, y sólo requiere una pequeña corriente de entrada. La velocidad de conmutación es muy alta, y los tiempos de conmutación son del orden de nanosegundos. Los Mosfet de potencia están encontrando aplicaciones cada vez más numerosas en convertidores de baja potencia y alta frecuencia. Los Mosfet no tienen los problemas de fenómenos de segunda avalancha, como los BJT. Sin embargo, tienen los problemas de descarga electrostática y requieren cuidados especiales en su manejo. Además, es relativamente difícil protegerlos en condiciones de falla por cortocircuito.

11.1 Estructura básica del Mosfet

Un Mosfet de potencia tiene una estructura de orientación vertical del dopaje alterno de tipo p y tipo n que se muestra en la figura, para una celda individual de las múltiples celdas paralelas de un dispositivo completo. Un Mosfet completo está compuesto de muchos miles de celdas conectadas en paralelo para lograr una ganancia grande y una resistencia baja en estado activo.

Figura 105. Estructura de un Mosfet (Hernay, 2019)

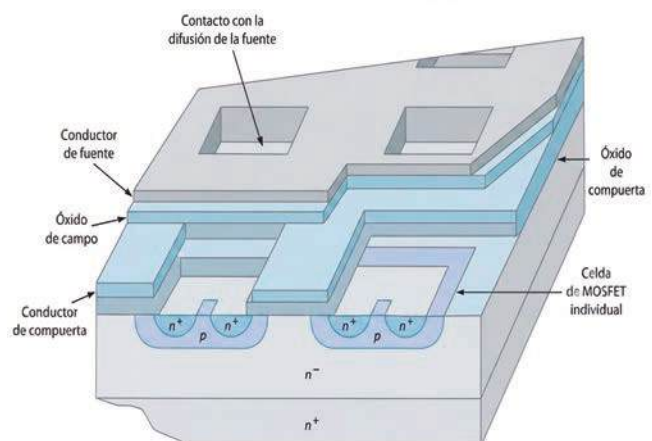


La estructura n^+pn se denomina Mosfet de canal n de modo de intensificación. También se fabrica una estructura con el perfil opuesto: Mosfet de canal p . El dopaje en las dos capas extremas n^+ , llamadas fuente y drenaje, es aproximadamente igual en ambas capas y muy grande. La capa central de tipo p suele llamarse cuerpo y es la zona donde se establece el canal entre fuente y drenaje. La capa n^- es la región de arrastre de drenaje. Esta región de arrastre determina la tensión de ruptura del dispositivo.

A primera vista, parece que no hay manera de que fluya la corriente entre las terminales del dispositivo, porque una de las uniones pn (ya sea la unión de cuerpo-fuente o la unión drenaje-cuerpo) se pondrá en polarización inversa por una de las polaridades de tensión aplicada entre el drenaje y la fuente. No puede haber inyección de portadores minoritarios en la zona del cuerpo por medio de la terminal de compuerta porque la compuerta está aislada del cuerpo por medio de una capa de dióxido de silicio (SiO_2), a menudo denominado óxido de compuerta y que es un muy buen aislante

y, por tanto, no hay operación de BJT. Sin embargo, la aplicación de un potencial positivo a la compuerta respecto de la fuente convierte la superficie de silicio debajo del óxido de compuerta en una capa o canal de tipo n , lo que conecta la fuente con el drenaje y permite el flujo de corrientes apreciables. El espesor del óxido de compuerta, el ancho de la compuerta (como se visualiza en la figura) y el número de zonas de compuerta/fuentes conectadas eléctricamente en paralelo son importantes para determinar la cantidad de corriente que fluirá para una tensión de compuerta a fuente dada.

Figura 106. Espesor y ancho de una compuerta (Hernay, 2019)



La estructura de la figura suele denominarse VDMOS, que significa Mosfet de difusión vertical. Se deben notar otros aspectos de la estructura Mosfet. Primero, la fuente está construida con muchos miles de pequeñas áreas de manera poligonal conectadas en paralelo y rodeadas por la zona de la compuerta. La forma geométrica de las zonas de la fuente influye hasta cierto grado en la resistencia en estado activo del Mosfet. La razón fundamental para las múltiples zonas pequeñas de fuente es maximizar la anchura (la dimensión lateral perpendicular al sentido de flujo de la corriente en el canal) de la zona de compuerta en comparación con su longitud (la longitud del canal). El ancho de la compuerta del Mosfet es la longitud periférica de cada celda multiplicada por el número de celdas que constituyen el dispositivo. Es deseable una relación muy grande entre el ancho y el largo de la compuerta, pues así se maximiza la ganancia del dispositivo.

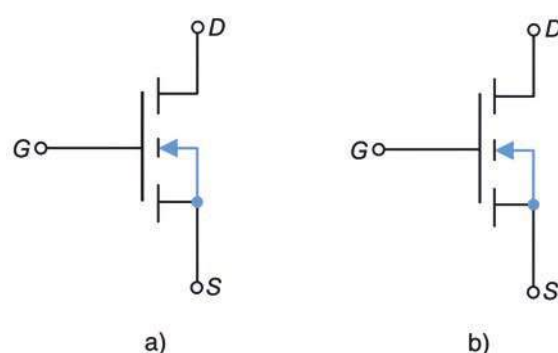
En segundo término, hay un BJT npn parasítico entre los contactos de fuente y drenaje, como se muestra en la figura, donde la zona de cuerpo de tipo p sirve como base del BJT parasítico. Para reducir la posibilidad de que este transistor jamás se encienda, la zona de cuerpo de tipo p se pone en cortocircuito con la zona de fuente mediante el traslape de la metalización de fuente sobre la zona del cuerpo de tipo p. Como resultado de este cortocircuito del cuerpo hay un diodo parasítico conectado entre drenaje y fuente del Mosfet. Este diodo integral sirve en convertidores de semipunto y de punto completo.

En tercer término, se produce el traslape de la metalización de compuerta a través de la región de arrastre n-, donde sobresale hacia la superficie del chip. Este traslape de

la metalización de la compuerta tiene dos propósitos. Primero, tiende a intensificar la conductividad de la región de arrastre en la interconexión n- SiO₂ al formar una capa de acumulación (zona de conductividad intensificada), lo que ayuda a disminuir la resistencia en estado activo. En segundo lugar, la metalización tiende a actuar como placa de campo cuando el Mosfet está apagado, lo que impide que el radio de curvatura de la zona de despoblación del drenaje-cuerpo pn se reduzca demasiado y de este modo también la tensión de ruptura del dispositivo.

En la figura a se muestra el símbolo de circuito para un Mosfet de canal n, y en la figura b para un Mosfet de canal p:

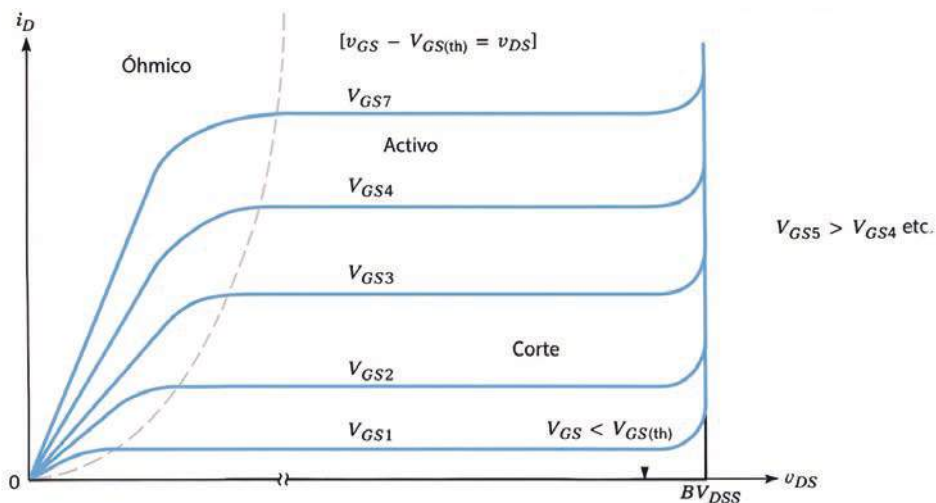
Figura 107. Símbolo de circuito para un Mosfet (Hernay, 2019)



11.2 Característica I-V del Mosfet

El Mosfet, como el BJT, es un dispositivo de tres terminales donde la entrada, la compuerta en el caso del Mosfet, controla el flujo de corriente entre las terminales de salida, la fuente y el drenaje. La terminal de la fuente es común entre la entrada y la salida de un Mosfet. Las características de la salida, la corriente de drenaje i_D como función del voltaje drenaje a fuente v_{DS} , con el voltaje compuerta a fuente V_{GS} como parámetro, se muestran en la figura para un Mosfet de canal n.

Figura 108. Características I – V (Hernay, 2019)



Las características de la salida para un dispositivo de canal p son las mismas, excepto que las polaridades de corriente y tensión están invertidas, de modo que las características para el dispositivo de canal p aparecen en el tercer cuadrante del plano i_D - v_{DS} .

Los Mosfet son dispositivos controlados por voltaje y tienen una impedancia de entrada muy alta. La compuerta toma una corriente de fuga muy pequeña, del orden de los nanoamperes. La ganancia de corriente, que es la relación entre la corriente de drenaje I_D y la corriente de compuerta I_G , no es un parámetro importante. La transconductancia, que es la relación de la corriente de drenaje al voltaje de compuerta, define a las características de transferencia, y es un parámetro muy importante. Hay tres regiones de operación:

- 1) la región de corte, donde

$$V_{GS} < V_{GS}(th);$$

- 2) la región activa, donde

$$vDS = VGS - VGS(th); \forall$$

- 3) la región óhmica, donde

$$V_{GS} - V_{GS}(th) > v_{DS} > 0.$$

En aplicaciones de electrónica de potencia, el Mosfet sirve como interruptor para controlar el flujo de potencia a la carga de una manera análoga al BJT. En estas aplicaciones, el Mosfet atraviesa las características de i_D - v_{DS} desde el corte a través de la zona activa hasta la zona óhmica, conforme se enciende el dispositivo, y de nuevo cuando se apaga.

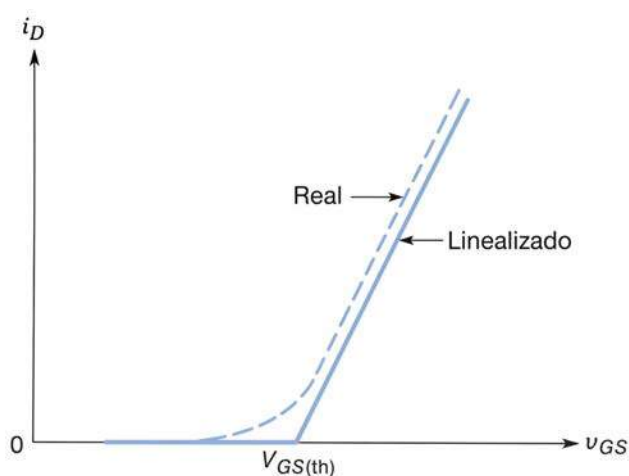
El Mosfet está en estrangulamiento cuando la tensión de compuerta-fuente es menor que la tensión de umbral $V_{GS(th)}$, que suele ser de unos cuantos voltios en la mayoría de los Mosfet de potencia. El dispositivo es un circuito abierto y debe rechazar la tensión de la fuente de alimentación aplicada al circuito. Esto significa que la tensión de ruptura de drenaje-fuente BV_{DSS} que se muestra en la figura debe ser mayor que la tensión externa aplicada de drenaje-fuente para evitar la ruptura y la disipación alta de potencia que conlleva. Cuando ocurre una

ruptura, se debe a la ruptura de avalancha de la unión de drenaje-cuerpo.

Cuando el dispositivo se acciona por una tensión grande de compuerta-fuente, se lleva a la zona óhmica, donde el voltaje de drenaje-fuente $V_{DS(enc)}$ es pequeño. En esta zona, la disipación de potencia se mantiene dentro de límites razonables cuando se minimiza $V_{DS(enc)}$, aunque la corriente de drenaje sea muy grande. En la zona activa, la corriente de drenaje es independiente de la tensión de drenaje-fuente y sólo depende de la tensión de compuerta-fuente. Se dice que a veces la corriente se satura, y por consiguiente esta zona se llama a veces zona de saturación o zona del pentodo. La llamaremos zona activa, para evitar el uso del término saturación y la confusión que crea con la saturación en BJT.

En la siguiente figura se muestra la curva de transferencia de un Mosfet de potencia (i_D - v_{GS}); en general es muy lineal, en contraste con la curva de transferencia parabólica del dispositivo de nivel lógico.

Figura 109. Curva de transferencia de un Mosfet (Hernay, 2019)



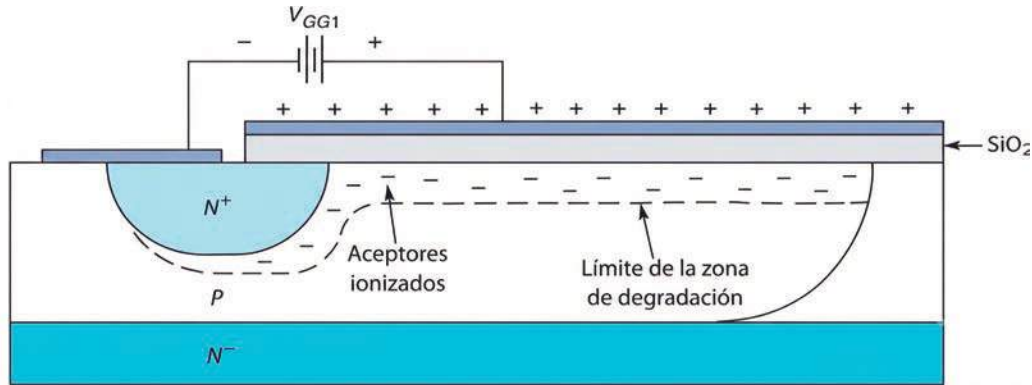
11.3 Física de operación del Mosfet

La parte de la compuerta de la estructura Mosfet de la figura es la clave para entender cómo trabaja el Mosfet. La parte de la compuerta consta de la metalización de la compuerta, el dióxido de silicio debajo del conductor, que se denomina óxido de la compuerta, y el silicio debajo del óxido. Esta zona forma un condensador (o capacitor) de alta calidad, como se muestra en la figura a, y a veces se le denomina condensador MOS. Aunque el condensador que se muestra suele estar compuesto por metalización de aluminio, aislante SiO_2 y una capa de fondo de silicio, la misma estructura básica se fabrica en otros semiconductores, como arseniuro de galio, y se usan otros aislantes, como nitruro de aluminio o nitruro de silicio, para el aislante. La capa superior de metalización también puede ser algún material conductor diferente. El polisilicio, metales refractarios como el tungsteno y otros metales se han usado en dispositivos Mosfet.

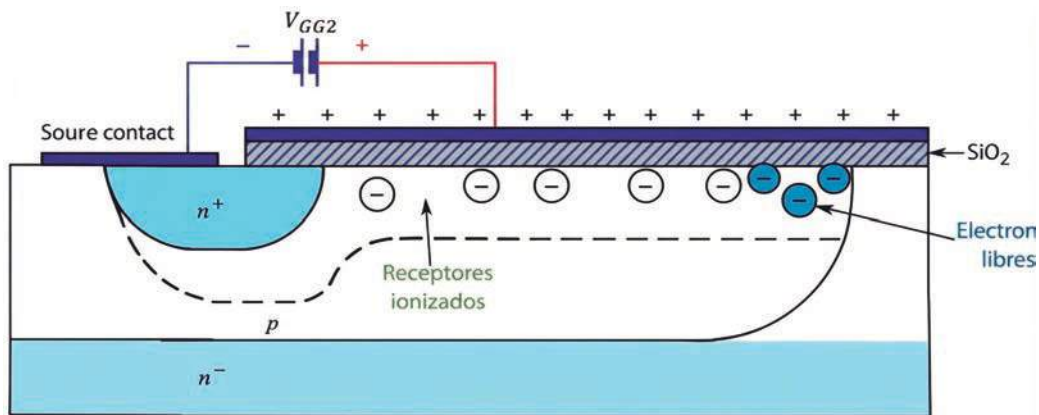
Cuando se aplica una tensión positiva pequeña de compuerta-fuente a la estructura del capacitor en el diagrama simplificado del Mosfet de canal n de la figura a, se forma una zona de degradación en la interconexión entre el SiO_2 y el silicio. La carga positiva inducida en la metalización superior (el lado de la compuerta) por la tensión aplicada requiere una carga negativa igual en la placa inferior, que es el lado de silicio del óxido de la compuerta. El campo eléctrico desde la carga positiva repele los huecos de portadores mayoritarios de la zona de interconexión, y de esta manera expone a los receptores de carga negativa, con lo que se crea una zona de degradación.

Figura 110. Estructura interna y principio de funcionamiento de un transistor MOSFET

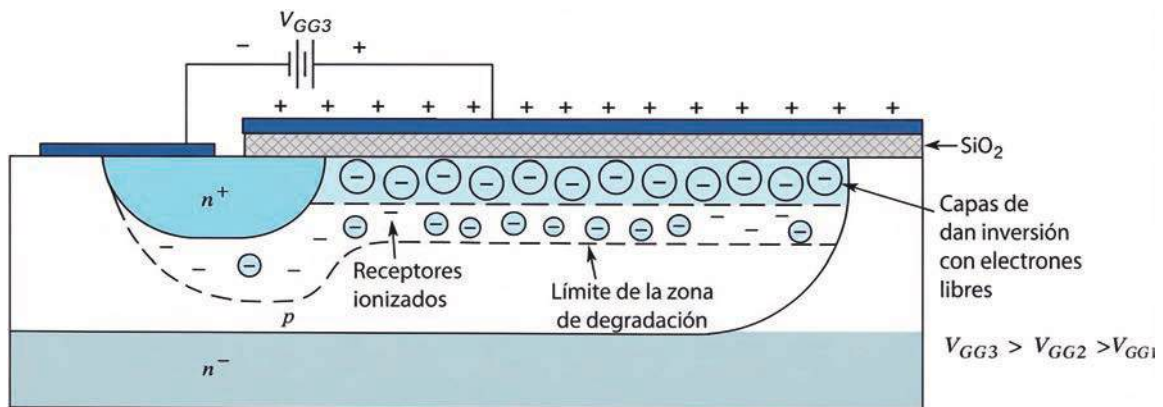
a)



b)



c)



Los incrementos adicionales en V_{GS} causan que la zona de degradación aumente su espesor, como se muestra en la figura b, para proporcionar la carga negativa adicional. El crecimiento de esta zona de degradación se modela aproximadamente como una unión de paso unilateral. Cuando se incrementa la tensión, el campo eléctrico en la interconexión de óxido-silicio aumenta de tamaño y empieza a atraer electrones

libres, así como a repeler huecos libres. La fuente inmediata de los electrones es la generación de electrones-huecos mediante la ionización térmica, mientras que se empuja a los huecos libres al bulto del semiconductor delante de la zona de degradación. Los electrones atraídos por la fuente n^+ debido a la carga positiva de los huecos neutralizan a los huecos excedentes.

A la larga, conforme se incrementa la tensión de polarización, la densidad de los electrones libres en la interconexión será igual a la densidad de los huecos libres en el bulto de la zona de cuerpo lejana a la zona de degradación. La capa de electrones libres en la interconexión es muy conductiva y tiene todas las propiedades de un semiconductor de tipo n. En este punto, la capa de electrones libres se llama capa de inversión, como se ilustra en la figura c. Esta capa es una ruta o canal conductivo entre el drenaje de n+ y las zonas de fuente (de donde proviene el término canal), que permite el flujo de corriente entre fuente y drenaje. Esta capacidad de modificar el tipo de conductividad del semiconductor inmediatamente inferior al aislante de la compuerta por medio de una tensión aplicada o campo eléctrico, se llama efecto de campo. El efecto de campo intensifica la conductividad de la interconexión, y por eso se le llama transistor de modo de intensificación del efecto de campo, que se basa en este mecanismo.

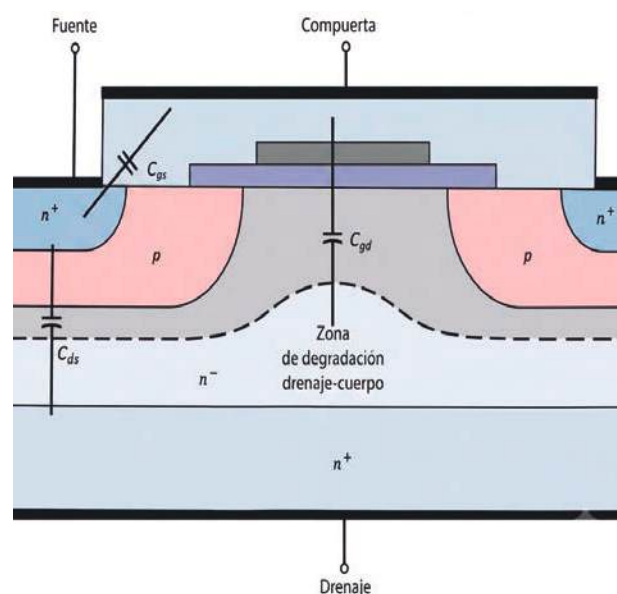
El valor de v_{GS} , donde se considera que se forma la capa de inversión, se denomina tensión de umbral $V_{GS(th)}$. Conforme v_{GS} excede $V_{GS(th)}$, la capa de inversión se espesa un poco y, más importante aún, adquiere más conductividad conforme la densidad de los electrones libres crece en tanto aumenta la tensión de polarización. La capa de inversión protege a su zona de degradación contigua de los incrementos adicionales de la tensión de polarización, de modo que el espesor de la zona de degradación ahora permanece constante. El valor de la tensión de umbral es una función de varios factores. Los fabricantes de dispositivos ajustan $V_{GS(th)}$ a cualquier valor deseado (por lo común, unos cuantos voltios). Se hacen ajustes mayores por

medio de la selección de la metalización de la compuerta, la densidad de dopaje de la zona del cuerpo y el espesor del óxido de la compuerta. Los ajustes menores de la tensión de umbral durante la fabricación se hacen por medio de la implantación de iones de impurezas en la zona del cuerpo justo debajo del óxido de la compuerta.

11.4 Modelos de circuitos Mosfet

Los Mosfet son intrínsecamente más rápidos que los dispositivos bipolares porque no tienen portadores minoritarios excedentes que se deban introducir o sacar del dispositivo cuando se enciende o apaga. Las únicas cargas que se tienen que mover son las que están en las capacitancias de disipación y las capacitancias de las zonas de degradación que se muestran en la sección transversal del Mosfet de la figura.

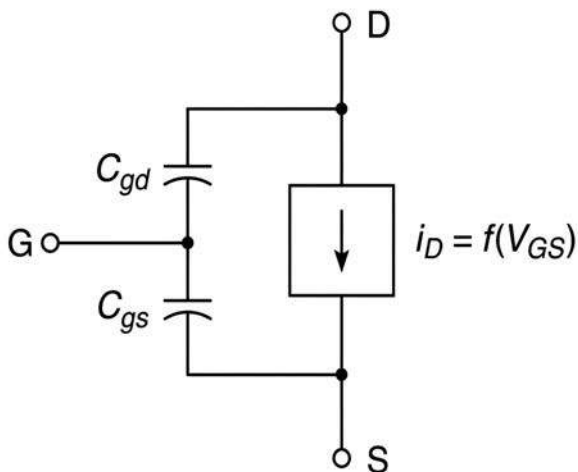
Figura 111. Sección transversal del Mosfet (Hernay, 2019)



Estas capacitancias se modelan con el circuito equivalente de la figura, que es válido cuando el Mosfet está en corte o en

la zona activa. Se necesitan modelos de circuitos como éste para un estudio detallado de las características de encendido y apagado del Mosfet, de modo que se diseñen los circuitos de accionamiento de compuerta correspondientes.

Figura 112. Capacitancias cuando el MOSFET está en corte



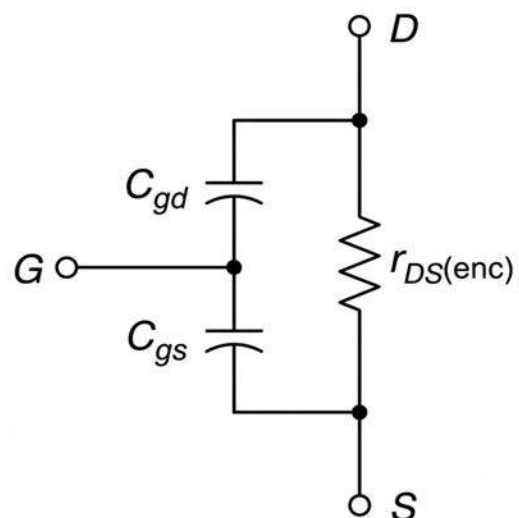
La capacitancia de drenaje-fuente que se muestra en la figura no se incluye en el circuito equivalente porque no afecta materialmente a ninguna de las características de conmutación ni a las formas de onda; sin embargo, se debe tener en cuenta para el diseño de amortiguadores, donde se necesita un amortiguador de capacitor sin pérdidas en topologías de convertidores de conmutación a cero volts. En este caso, C_{ds} puede ser parte del requerimiento de capacitancia total del amortiguador.

La fuente de corriente controlada por tensión de la compuerta que se muestra en el circuito equivalente es igual a cero cuando $V_{GS} < V_{GS(th)}$ y es igual a $g_m (V_{GS} - V_{GS(th)})$ cuando el dispositivo está en la zona activa. Este método de explicar el flujo de la corriente de drenaje en la zona activa se colige porque la característica de transferencia de la figura es lineal sobre la

mayor parte de este rango. La pendiente de la característica de transferencia en la zona activa es la transconductancia g_m .

El Mosfet entra en la zona óhmica cuando v_{DS} es igual o menor que $V_{GS} - V_{GS(th)}$. En aplicaciones de poder de modo conmutado, $V_{DS} \gg V_{GS(th)}$ cuando el dispositivo está encendido, de modo que los criterios para entrar en la zona óhmica se simplifican a $v_{DS} < v_{GS}$. En la zona óhmica, el modelo de la fuente de corriente dependiente ya no es válido porque la capa de inversión ya casi no está estrangulada en el extremo de drenaje del canal, sino que tiene un espesor casi espacialmente uniforme, pues v_{DS} es muy pequeño. La capa de inversión esencialmente pone en cortocircuito el drenaje y la fuente. Se agrega una resistencia de estado encendido $r_{DS(enc)}$ y se tiene el circuito equivalente de la figura, para dar cuenta de las pérdidas óhmicas que surgen sobre todo de la zona de arrastre del drenaje. Hay otras contribuciones a la resistencia en estado activo, como pérdidas óhmicas en el canal, pero por lo regular son pequeñas en comparación con la contribución de la zona de arrastre del drenaje.

Figura 113. Resistencia equivalente (Hernay, 2019)



En este último aspecto es conveniente advertir que los Mosfet de potencia suelen especificarse más que por caída tensión en conducción, por la resistencia equivalente drenaje-fuente $r_{DS(enc)}$ con una determinada tensión puerta-fuente, denominada $R_{DS(on)}$ en los catálogos en inglés. Así puede verse en las hojas de características del transistor IRFPS40N50L, que el fabricante lo caracteriza en las primeras líneas con las características:

$$V_{DSS} = 500V \rightarrow R_{DS(on)} \text{ typ.} = 0,087\Omega \rightarrow I_D = 46A$$

11.5 Tensión de ruptura del Mosfet

Los Mosfet tienen dos tensiones especificadas que no se deben exceder: $V_{GS(max)}$ y BV_{DSS} . La máxima tensión permisible de puerta-fuente $V_{GS(max)}$ está determinada por el requerimiento de que no se debe romper el óxido de compuerta por grandes campos eléctricos. En teoría, el SiO_2 resiste un voltaje de compuerta-fuente de 50 a 100V. Las especificaciones normales para $V_{GS(max)}$ son de 20 a 30V, lo que indica que los fabricantes de dispositivos incluyen un margen de seguridad en sus especificaciones. Esto es así porque una ruptura del óxido de compuerta significa la avería permanente del dispositivo. Incluso una carga estática que se ponga inadvertidamente sobre el óxido de puerta debido a un descuido en el manejo basta para romper el óxido. El usuario del dispositivo debe conectarse con cuidado a tierra antes de manejar un Mosfet, para evitar cualquier problema de carga estática. Si existe la posibilidad de que haya tensiones de compuerta-fuente en exceso de $V_{GS(max)}$, la compuerta se debe proteger mediante una conexión en serie de dos diodos Zener conectados espalda con espalda entre las terminales de compuerta y fuente. La tensión de

ruptura de los Zener debe ser menor que $V_{GS(max)}$.

El máximo voltaje de drenaje-fuente admisible BV_{DSS} es el voltaje más alto que el Mosfet puede repeler sin ruptura de avalancha de la unión pn de drenaje-cuerpo. Se obtienen grandes valores de tensión de ruptura mediante la zona de arrastre de drenaje un poco dopada. La región de arrastre de drenaje un poco dopada sirve para contener la zona de degradación de la unión de drenaje-cuerpo de polarización inversa. La longitud de la región de arrastre se determina por la tensión de ruptura deseada especificada. El dopaje ligero de la región de arrastre en comparación con el dopaje pesado de la zona del cuerpo asegura que la zona de degradación de la unión no se extienda mucho a la zona de la fuente, de modo que se evita la ruptura por medio de la penetración.

La curvatura relativamente aguda de la zona difundida del cuerpo de tipo p que se muestra en la figura puede producir la reducción de BV_{DSS} si no se toman las medidas correctivas correspondientes. La extensión de la metalización de la compuerta sobre la región de arrastre de drenaje actúa como una placa de campo que reduce la curvatura de la zona de degradación. Esto a su vez impide una reducción grave de la tensión de ruptura.

11.6 Características dinámicas del Mosfet

El comportamiento del Mosfet es más rápido que el del transistor BJT, por estar exento de los fenómenos de difusión de portadores minoritarios, principales causantes de los retardos de conmutación de este semiconductor. A continuación,

se estudia el Mosfet en aplicaciones de potencia, que es un interruptor destinado casi siempre a conmutar en alta frecuencia, bajo la distinción entre una situación con carga resistiva y otra con carga inductiva.

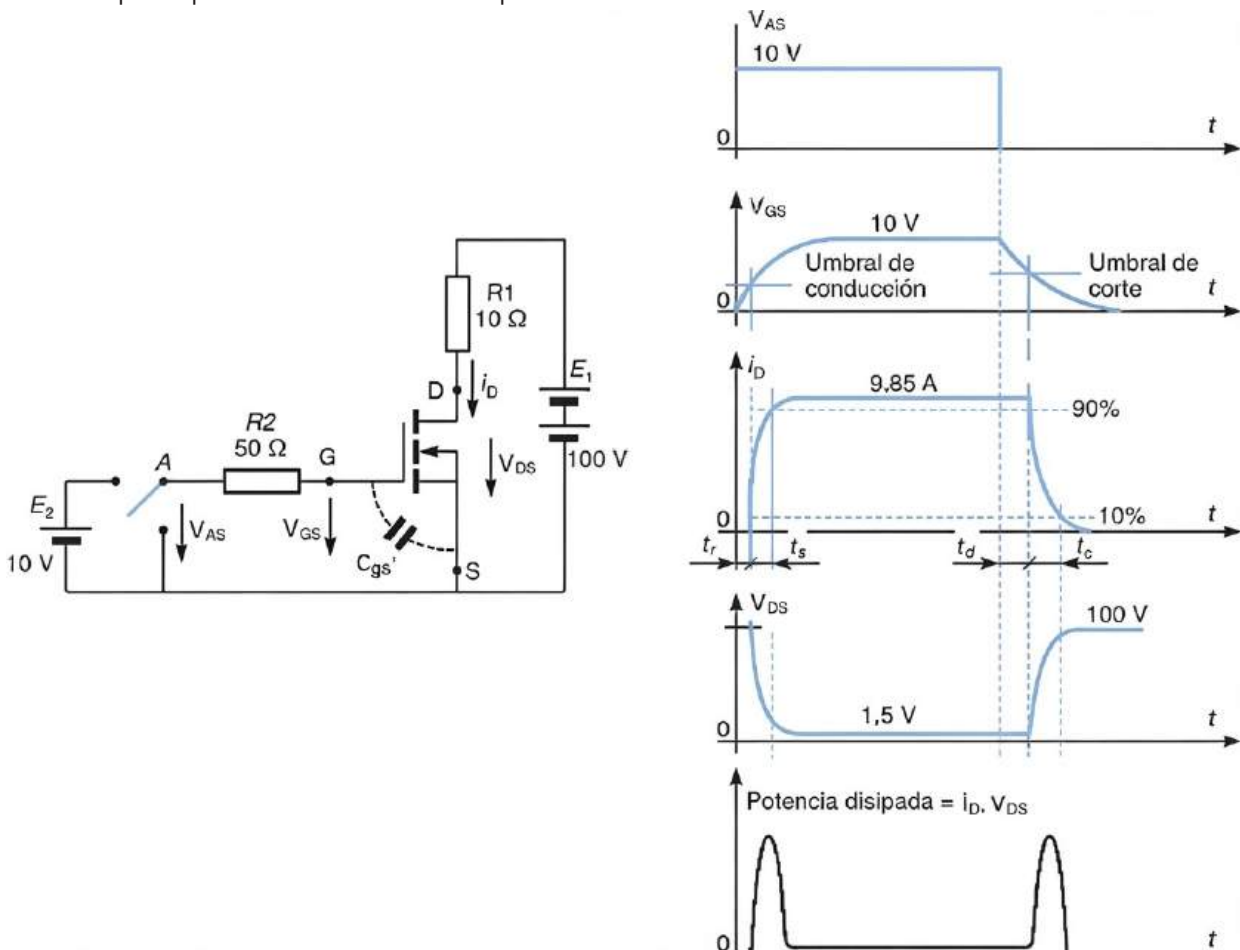
Conmutación del Mosfet con carga resistiva

En una conmutación con carga resistiva, de una manera simplificada se puede decir que en un Mosfet la corriente de drenaje responde casi instantáneamente

a la tensión de la puerta. Es la capacidad parásita de puerta-fuente C_{gs} inherente a la estructura del Mosfet, la que retrasa la respuesta de tensión de la puerta al circuito de control. Las capacidades parásitas que también existen entre los otros terminales no influyen tanto y se pueden despreciar en un análisis simplificado. En la figura se ejemplifica un esquema elemental para medir los tiempos de conmutación de un Mosfet de potencia de unos 10A y 100V.

Figura 114. Conmutación del Mosfet con carga resistiva (Hernay, 2019)

El interruptor permite conectar la puerta a la fuente de 10V o a masa a través de R2,



que simula la resistencia de salida del circuito de excitación. Su acción se supone instantánea. Las curvas muestran la evolución de las variables principales.

La tensión de puerta V_{GS} sigue curvas exponenciales de carga y descarga de constante de tiempo $R2 \cdot C_{gs}$. Cuando, en el proceso de paso a la zona óhmica, V_{GS}

alcanza un cierto umbral de conducción de unos 3V, la corriente de drenaje comienza a circular y alcanza luego su valor final

El proceso de corte es similar y también aparecen en él dos retardos bien diferenciados. El primero, desde el instante de anulación de la tensión de excitación V_{AS} hasta que se descarga la puerta a una tensión de umbral de corte, para la cual el transistor no puede mantener la corriente de drenaje previa, que comienza a disminuir. El segundo, desde este momento hasta que la corriente cesa.

Pueden definirse los siguientes intervalos en el proceso hacia la zona óhmica:

- **Tiempo de retardo, t_r :** es el transcurrido entre la excitación y el instante en que la corriente de drenaje alcanza el 10% del valor final. Este intervalo, el más corto de los cuatro, depende de la tensión E2 de excitación, siendo menor con tensiones mayores porque se alcanza antes el umbral de conducción en la puerta.
- **Tiempo de subida, t_s :** es el que tarda la intensidad de drenaje en pasar del 10% al 90% de su valor final. Disminuye con tensión de excitación E2 creciente porque la puerta alcanza más rápidamente la suficiente tensión para inducir una corriente elevada de drenaje. Por la misma razón, aumenta con mayor resistencia R2 de salida del circuito de excitación, pero ésta tiene poca influencia.

Para el proceso de corte pueden definirse los siguientes intervalos:

- **Tiempo de descarga, t_d :** es el que transcurre desde la desexcitación

hasta el instante en que la corriente de drenaje baja al 90% del valor máximo. Es el intervalo más largo normalmente. Aumenta con tensión E2 de excitación creciente porque la puerta tarda más en descargarse hasta la tensión de umbral de corte. Aumenta también con R2 creciente por la misma razón, siendo en este caso importante la influencia.

- **Tiempo de caída, t_c :** es el que tarda la intensidad de drenaje en bajar del 90% al 10% de su valor en saturación. No depende de la tensión de excitación porque ésta no influye en el proceso de descarga de C_{gs} una vez alcanzado el umbral de corte. Aumenta con mayor resistencia R2 de puerta porque se hace más lenta la descarga de la misma.

A la suma de los tiempos de retardo y subida se suele llamar tiempo de excitación t_e del transistor, y a la de los tiempos de descarga y caída, tiempo de apagado t_a . Para un Mosfet de 10A, los tiempos de excitación y apagado son del orden de 50ns a 100ns. Hay que hacer notar que estos tiempos son mayores para transistores de más corriente nominal porque la construcción de la pastilla semiconductora a base de múltiples celdillas-transistores en paralelo aumenta la capacidad total de puerta.

De los comentarios hechos relativos a la influencia de la resistencia de salida del circuito de excitación sobre la duración de los tiempos de excitación y apagado, se desprende que es conveniente reducir aquélla para tener una conmutación rápida. Por tanto, aunque en región óhmica el circuito de control no suministre apenas corriente, sí debe ser capaz de entregar y absorber picos relativamente elevados de intensidad durante los

escalones y tensión de activación y corte. Ello es especialmente importante en los circuitos que han de trabajar a frecuencias elevadas para minimizar las pérdidas por conmutación, ya que los Mosfet, por su extremada rapidez, se emplean a frecuencias de conmutación muy elevadas (20 a 200 kHz).

En la práctica, la mayor parte de las cargas manejadas por los circuitos de potencia son inductivas y conviene estudiar su conmutación en detalle, sobre todo para sacar conclusiones sobre el circuito de excitación. En la figura se ha representado un circuito típico con carga inductiva y diodo de libre circulación. Se han dibujado las inductancias parásitas L_D y L_S de los cableados de drenaje y de fuente, así como las capacidades parásitas internas entre puerta y drenaje C_{gd} y entre puerta y fuente C_{gs} . El circuito de excitación se representa por su equivalente Thévenin, con flancos de subida y bajada exageradamente lentos por claridad. Se supone una corriente constante I en la bobina de carga.

En el instante t_0 comienza el impulso de excitación, retardado en puerta debido a C_{gs} , C_{gd} y a la resistencia interna del circuito de excitación. En el instante t_1 se alcanza el umbral de conducción en la tensión puerta-fuente y comienza a circular corriente por el drenaje, restándose de la corriente del diodo i_D . La tensión drenaje-fuente disminuye ligeramente debido al efecto en la inductancia parásita L_D . La bobina de carga L sigue a tensión prácticamente nula porque el diodo continúa conduciendo.

La tensión puerta-fuente se separa de su curva inicial en el instante t_1 , elevándose más lentamente debido a la caída de

tensión producida por el crecimiento de i_D en la inductancia parásita de fuente L_S , que se opone a la tensión de excitación. También se retarda la elevación de la tensión puerta-fuente debido a la absorción de corriente del circuito excitador a través de C_{gd} causada por disminución de la tensión de drenaje. Este último fenómeno de realimentación negativa es llamado Efecto Miller, y su incidencia en el alargamiento del tiempo de saturación es menor cuanto menor sea la resistencia interna del circuito excitador.

En el instante t_2 , la corriente en el diodo, tras anularse, ha alcanzado el valor inverso de recuperación, quedando libre la carga para soportar tensión. Por tanto, V_{DS} disminuye rápidamente. El Efecto Miller se acentúa y mantiene, durante el intervalo t_2 - t_3 , el valor mínimo necesario en V_{GS} para soportar la corriente de carga. En el instante t_3 , el paso a la zona óhmica se completa, y se anula V_{DS} . El Efecto Miller cesa y la tensión de puerta queda libre para elevarse hasta la tensión de vacío del circuito excitador, retardada solamente por C_{gs} .

Figura 115. Tensión puerta-fuente (Hernay, 2019)

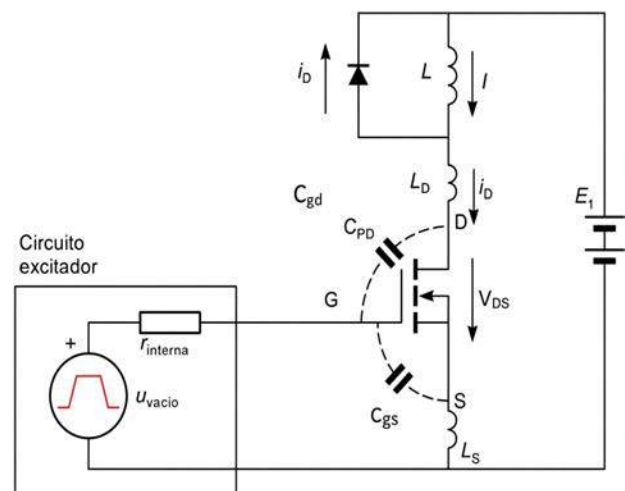
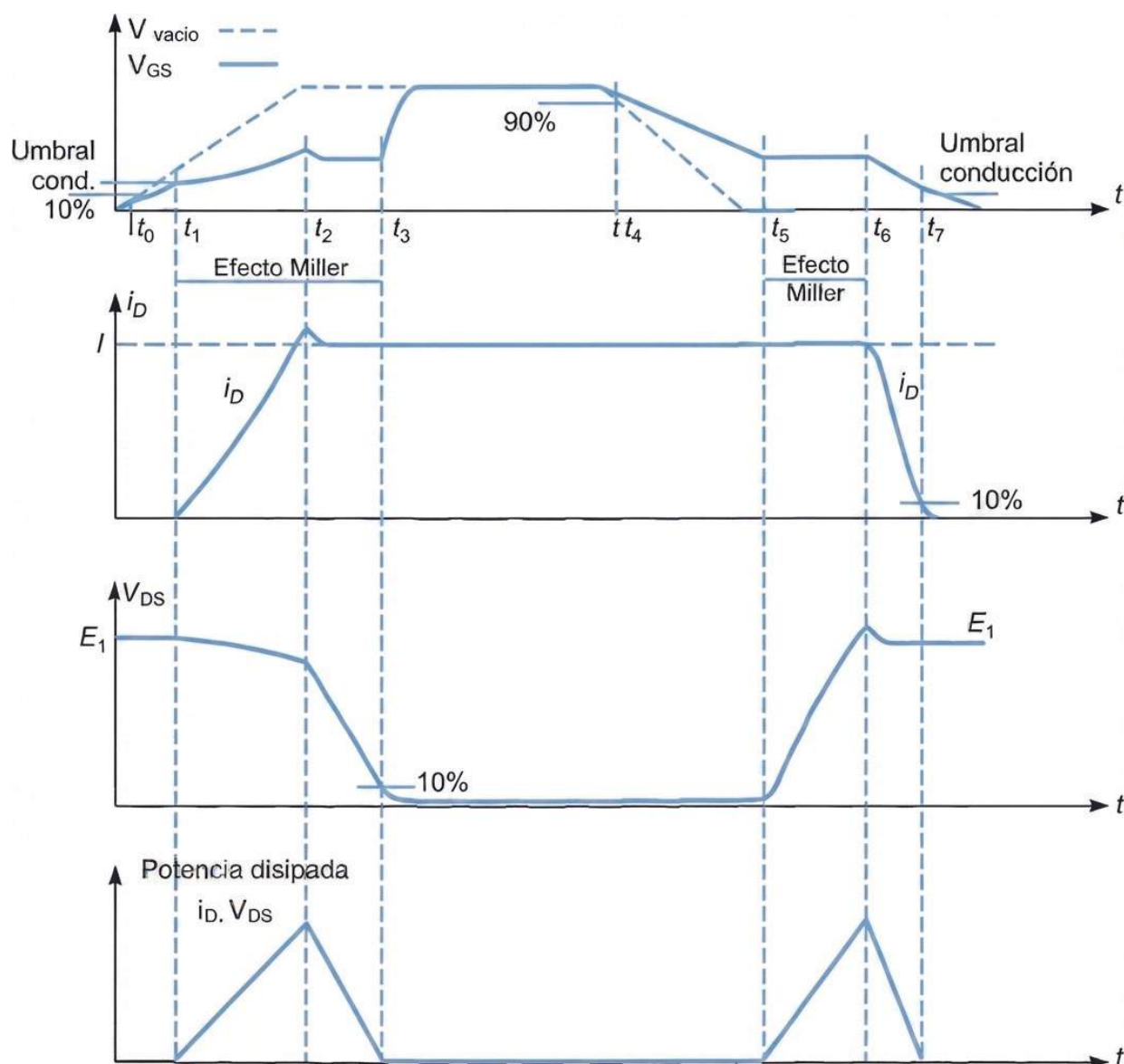


Figura 116. Curvas de tensión puerta - fuente (Hernay, 2019)



Los fenómenos de corte son parecidos. En el instante t_4 comienza a disminuir la excitación y en t_5 se alcanza la tensión puerta-fuente mínima para mantener la corriente de carga I . La tensión drenaje-fuente comienza a elevarse por entrar el transistor en la zona de corriente constante. El Efecto Miller de nuevo gobierna el proceso hasta el instante t_6 en que V_{DS} alcanza el valor de alimentación E_1 . La capacidad C_{gd} introduce una corriente en puerta mientras dura la elevación de V_{DS} , que retrasa la disminución de V_{GS} , manteniéndola en el valor mínimo

necesario para soportar la corriente de carga I . Cuanto menor sea la resistencia interna del circuito excitador, más corriente Miller puede absorber y menor será el intervalo t_5 - t_6 . En el instante t_6 , el diodo comienza a hacerse cargo de la corriente de la carga y la corriente de drenaje disminuye al ritmo marcado por la descarga de C_{gs} , gobernada solamente por el circuito de excitación.

De la descripción anterior se deduce que, también con carga inductiva, tanto el tiempo de transición a la zona óhmica t_0 - t_3

como el tiempo de corte t_4-t_7 disminuyen con circuito excitador más rápido y de menor resistencia.

12 TRANSISTOR BIPOLAR DE COMPUERTA AISLADA IGBT

Los transistores BJT y Mosfet tienen características que se complementan en algunos aspectos. Los BJT tienen pérdidas de conducción más bajas en estado activo, sobre todo en dispositivos con mayores tensiones de bloqueo, pero tienen también tiempos de conmutación más largos, en particular durante la desconexión. Los Mosfet se encienden y apagan mucho más rápido, especialmente en dispositivos especificados para mayores tensiones de bloqueo (algunos cientos de voltios y mayores). Estas observaciones motivaron la combinación de BJT y Mosfet en forma monolítica sobre el mismo chip de silicio, para obtener un circuito o quizá incluso un nuevo dispositivo que conjuntara las

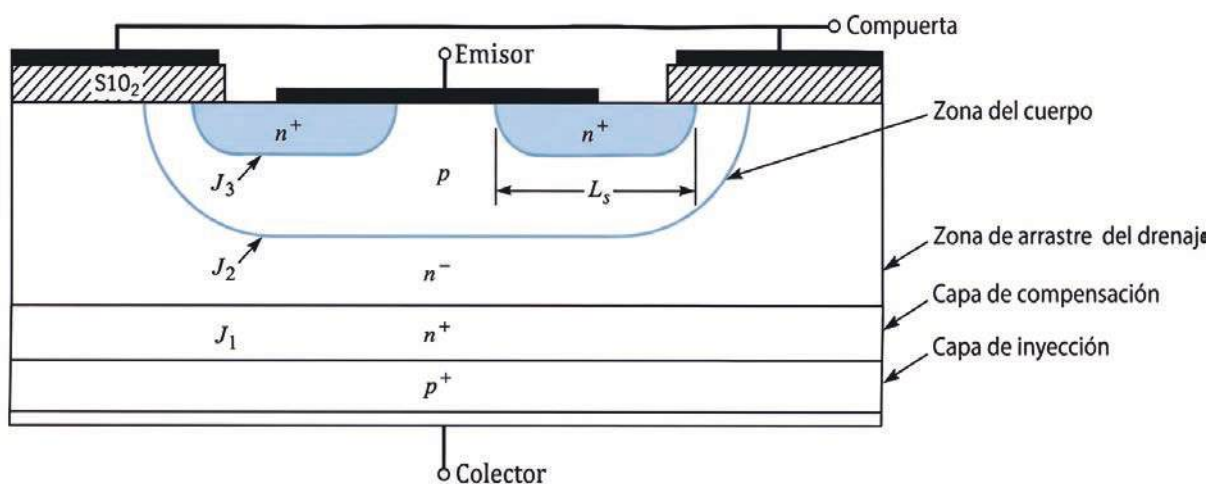
mejores cualidades de ambos tipos de dispositivos.

Así, se fabricó el transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT, del inglés *Insulated Gate Bipolar Transistor*), ahora el dispositivo preferido para la mayoría de las aplicaciones nuevas. Otros nombres de este dispositivo son GEMFET, COMFET (transistor de efecto de campo modulado por conductividad), IGT (transistor de compuerta aislada). En un IGBT se combinan las ventajas de los BJT y de los Mosfet. Un IGBT tiene alta impedancia de entrada, como los Mosfet, y pocas pérdidas por conducción en estado activo, como los BJT, y no tiene problema de segunda avalancha, como los BJT.

12.1 Estructura básica del IGBT

En la siguiente figura se muestra la sección transversal vertical de un IGBT genérico de n canales.

Figura 117. Sección transversal vertical de un IGBT (Hernay, 2019)

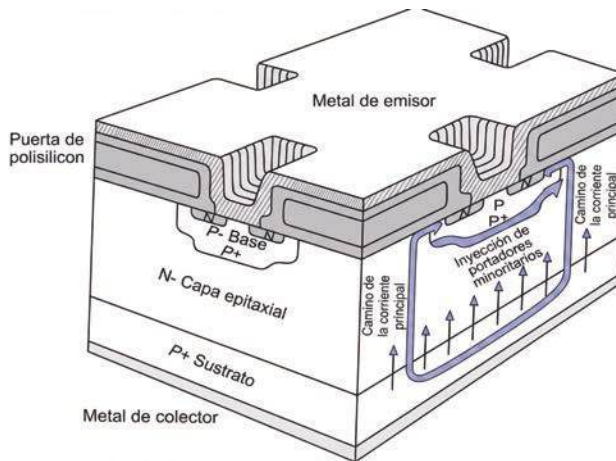


Esta estructura es muy parecida a la del Mosfet de difusión vertical. La diferencia principal es la presencia de la capa p^+ que forma el colector del IGBT. Esta capa forma

una unión pn (marcada con J_1 en la figura) que inyecta portadores minoritarios en lo que parece la zona de drenaje de un Mosfet vertical. La compuerta y emisor del IGBT

están dispuestas en una geometría interdigitada parecida a la del Mosfet vertical. En la figura se aprecia la perspectiva de un IGBT.

Figura 118. Estructura de un Mosfet (Hernay, 2019)



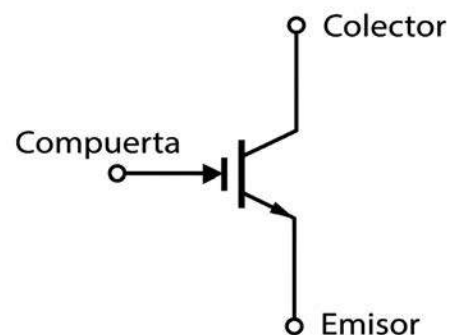
Los niveles de dopaje en cada capa del IGBT son similares a los de las capas comparables de las estructuras verticales del Mosfet, excepto en la zona del cuerpo. También es factible fabricar IGBT de canal p, al cambiar el tipo de dopaje en cada capa del dispositivo. En la figura también se muestra que la estructura del IGBT tiene un tiristor parásito. El encendido de este tiristor no es deseable, y varios detalles estructurales de una geometría práctica de un IGBT, sobre todo en la zona del cuerpo del tipo p que forma las uniones J_2 y J_3 , son diferentes de la geometría simple que se muestra en la figura para minimizar la posible activación de este tiristor. El IGBT no retiene la extensión de la metalización del emisor sobre la zona del cuerpo que también se usa en un Mosfet de potencia. El cortocircuito de cuerpo-emisor en el IGBT reduce la posibilidad de encendido del tiristor parasítico.

La capa de compensación n+ entre el contacto de colector p+ y la capa de

arrastre n- no es esencial para la operación del IGBT, y algunos IGBT se fabrican sin ella (algunas veces se denominan NPT-IGBT, es decir, IGBT de no perforación, mientras que los que tienen esta capa intermedia se denominan PT-IGBT: IGBT de perforación). Si se selecciona bien la densidad de dopaje y el espesor de esta capa, su presencia mejora la operación del IGBT en forma considerable.

En la figura se muestra un símbolo de circuito para un IGBT de canal n. La punta de la flecha tendría una dirección contraria en un IGBT de canal p.

Figura 119. Símbolo de circuito para un IGBT (Hernay, 2019)

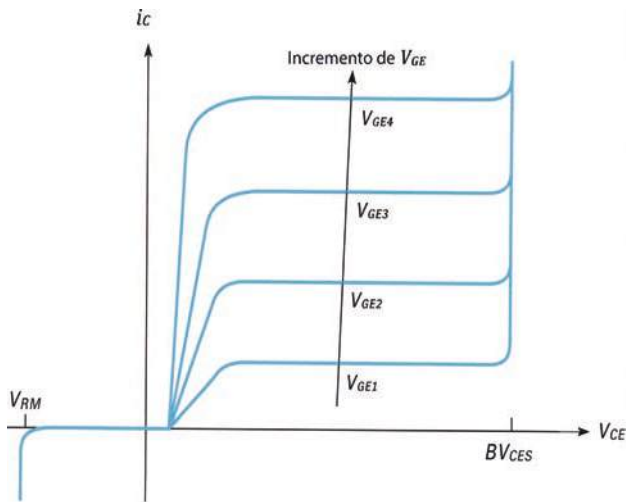


12.2 Características I-V del IGBT

En la siguiente figura se muestran las características i-v de un IGBT de canal n. Las características colector-emisor con tensión de puerta constante son similares a las del Mosfet, salvo que están desplazadas hacia la derecha por un pequeño voltaje, es decir, que existe un umbral de dicho valor en la tensión colector-emisor antes de que el transistor conduzca significativamente. No obstante, la curva de saturación o región óhmica es más vertical, como en los transistores bipolares, y se obtienen caídas de tensión menores que en los Mosfet para intensidades importantes de colector.

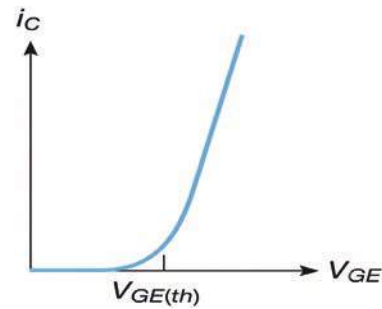
En el sentido directo, el parámetro de control es un voltaje de entrada, la tensión de compuerta-emisor, en vez de una corriente de entrada. Las características de un IGBT de canal p serían las mismas, excepto que las polaridades de tensiones y corrientes estarían invertidas.

Figura 120. Características I -V de un IGBT (Hernay, 2019)



La unión marcada J_2 en la figura bloquea todas las tensiones directas cuando el IGBT está desconectado. La tensión de bloqueo inverso V_{RM} indicada en la característica i-v crece tanto como la tensión de bloqueo directo BV_{CES} si el dispositivo se fabrica sin la capa de compensación n+. Esta capacidad de bloqueo inverso es útil en algunos tipos de aplicaciones de circuitos de CA. La unión marcada J_1 en la figura es la unión de bloqueo inverso. Sin embargo, si se usa una capa de compensación n+ en la construcción del dispositivo, la tensión de ruptura de esta unión disminuye en forma significativa a unas cuantas decenas de voltios, debido al fuerte dopaje ahora presente en ambos lados de esta unión, y el IGBT ya no tiene ninguna capacidad de bloqueo inverso. La curva de transferencia i_C - V_{GE} de la figura es similar a la del Mosfet de potencia.

Figura 121. Curva de transferencia I -V (Hernay, 2019)



La curva es razonablemente lineal a través de la mayor parte del rango de corriente de colector, y se vuelve no lineal sólo con corrientes bajas de colector, donde la tensión de compuerta-emisor se aproxime al umbral. Si V_{GE} es menor que el voltaje de umbral $V_{GE(th)}$, el IGBT está en estado pasivo. El máximo voltaje que se debe aplicar a las terminales de compuerta-emisor suele estar limitado por la corriente de colector máxima que se debe permitir fluir en el IGBT.

12.3 Operación en estado de bloqueo del IGBT

El IGBT es básicamente un Mosfet; la tensión de compuerta-emisor controla el estado del dispositivo. Cuando V_{GE} es menor que $V_{GE(th)}$, no se crea ninguna capa de inversión para conectar el colector y el emisor, y por ende el dispositivo está en estado pasivo. La tensión de colector-emisor aplicado disminuye a través de la unión marcada J_2 , y sólo fluye una corriente de disipación muy pequeña. Esta operación en estado de bloqueo es en esencia idéntica a la del Mosfet.

La zona de degradación o de agotamiento de la unión J_2 se extiende sobre todo a la región de arrastre n-, pues la zona del cuerpo de tipo p se dopa a propósito de modo mucho más grave que la región de arrastre. El espesor de la región de arrastre

es lo bastante grande para acomodar la capa de degradación, de modo que el límite de la capa de degradación no toca a la capa de inyección p^+ . Este tipo de IGBT a veces se llama IGBT simétrico o IGBT de no perforación, y bloquea tensiones inversas de una magnitud tan grande como las tensiones directas para cuyo bloqueo está diseñado. Esta capacidad de bloqueo inverso es útil en algunas aplicaciones de circuito de CA.

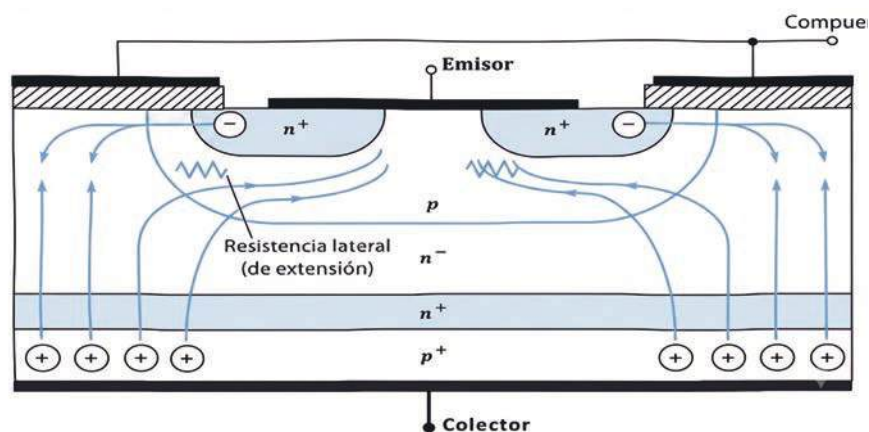
Sin embargo, es posible reducir el espesor requerido de la región de arrastre por un factor aproximado de 2 si se usa una estructura llamada de perforación. En esta geometría se permite que la capa de despoblación se extienda por toda la región de arrastre con tensiones significativamente menores al límite deseado de tensión de ruptura. La penetración de la capa de degradación a la capa p^+ se impide mediante la inserción de una capa de compensación n^+ entre la zona de arrastre y la zona p^+ . Este tipo de estructura del IGBT se llama a veces IGBT

asimétrica o de perforación. La longitud más corta de la región de arrastre significa pérdidas más bajas en estado activo, pero la presencia de la capa de compensación significa que la capacidad de bloqueo inverso de esta geometría de perforación será muy baja (unas cuantas decenas de voltios) y por tanto inexistente en cuanto se refiere a aplicaciones de circuito.

12.4 Operación en estado activo del IGBT

Cuando la tensión de compuerta-emisor excede el umbral, se forma una capa de inversión debajo de la compuerta del IGBT. Esta capa de inversión pone en cortocircuito a la región de arrastre n^- de la zona de emisor n^+ , igual que en el Mosfet. Una corriente de electrones fluye a través de esta capa de inversión, como se diagrama en la figura, lo que a su vez causa una inyección sustancial de huecos desde la capa de contacto del colector p^+ hasta la región de arrastre n^- , como también se indica en la figura.

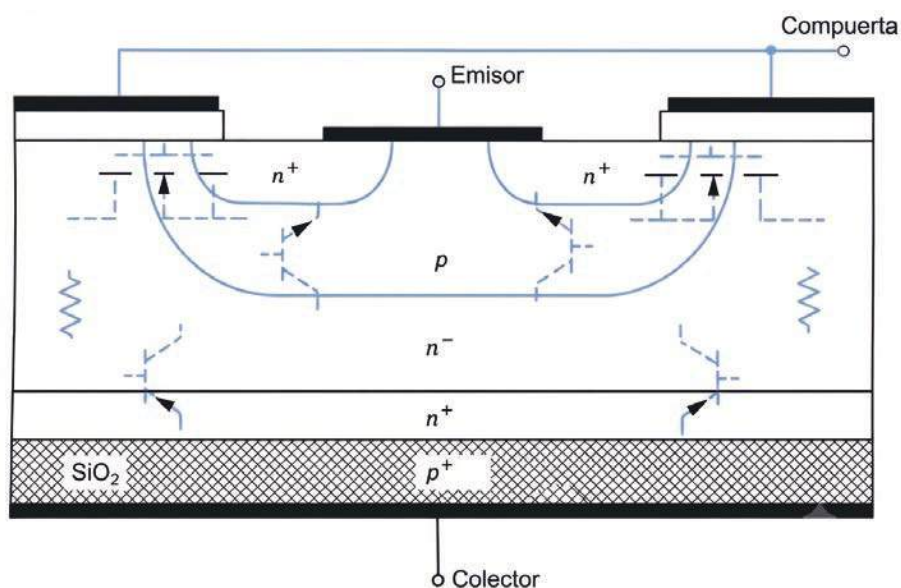
Figura 122. Corriente de electrones fluye a través de esta capa de inversión (Hernay, 2019)



Los huecos inyectados se mueven a través de la región de arrastre tanto por derivación como por difusión, por una multitud de rutas, como se indica en la figura, y llegan a la zona del cuerpo de tipo p que rodea a la zona de emisor n^+ .

Tan pronto los huecos llegan a la zona del cuerpo de tipo p , su carga espacial atrae electrones de la metalización del emisor que hace contacto con la zona del cuerpo, y los huecos excedentes se recombinan rápidamente.

Figura 123. Región de arrastre (Hernay, 2019)

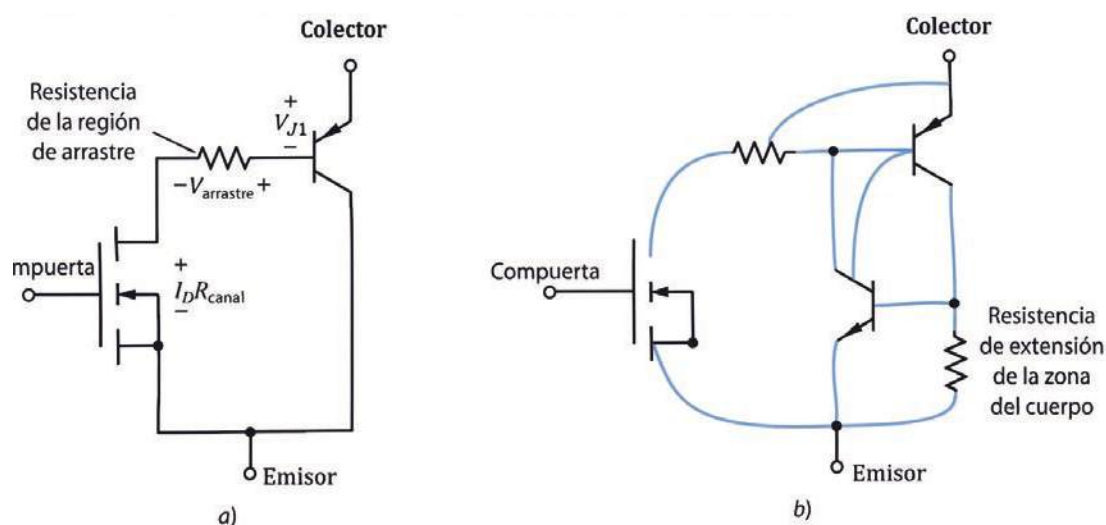


La unión formada por la zona del cuerpo de tipo p y la región de arrastre n- “recoge” los huecos de difusión y por tanto funciona como colector de un transistor de base espesa PNP. Este transistor, diagramado en la figura, tiene la capa de colector de contacto p+ como emisor, una base compuesta por la región de arrastre n- y

un colector formado por la zona de cuerpo del tipo p.

A partir de esta descripción se puede desarrollar unos circuitos equivalentes para modelar la operación del IGBT, como se muestra en la figura.

Figura 124. Circuitos equivalentes para la operación del IGBT (Hernay, 2019)



El circuito de la figura a) modela el IGBT como un circuito Darlington con el transistor PNP como transistor principal y el Mosfet como dispositivo de accionamiento. La resistencia entre la base PNP y el drenaje del Mosfet representa la resistencia de la región de arrastre n-. A diferencia del circuito Darlington

convencional, el Mosfet de accionamiento en el circuito equivalente del IGBT lleva la mayor parte de la corriente total de terminal. Esta división desigual del flujo de la corriente total es deseable por razones que tienen que ver con el encendido potencial del tiristor parásito.

13 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

Manual de Aplicación de Semiconductores de Potencia (Semikron Danfoss)
<https://assets.danfoss.com/documents/latest/530447/AB509142199100en-000205.pdf>

Power Diodes Characteristics - Dr. Oday A. Ahmed (Documento Académico)
<https://odayahmeduot.files.wordpress.com/2015/11/lecture-03.pdf>

Power Diode Reverse Recovery Characteristics (TutorialsPoint) https://www.tutorialspoint.com/power_electronics/power_diode_reverse_recovery_characteristics.htm

The Basics of Power Semiconductor Devices (All About Circuits) <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/a-review-on-power-semiconductor-devices/>



UNIDAD TEMÁTICA 11



**INVERSORES PARA
VEHÍCULOS HEV Y EV**

1 INTRODUCCIÓN AL INVERSOR DE POTENCIA

1.1 ¿Qué es el inversor y cuál es su función en el vehículo?

El inversor, junto con la batería y el motor, uno de los tres pilares fundamentales de cualquier vehículo eléctrico (EV) o híbrido (HEV). Se lo considera el “cerebro logístico” del tren motriz, ya que es el componente encargado de administrar y transformar la energía eléctrica para que el vehículo pueda moverse. En términos sencillos, el inversor es un dispositivo electrónico de estado sólido que realiza la conversión de energía entre la batería y el motor. Sin él, el motor eléctrico no sabría a qué velocidad girar ni cuánta fuerza (par motor) aplicar.

Figura 125. Inversor (CarsBits, 2026)



La función de conversión (DC a AC)

La batería de tracción de un vehículo eléctrico almacena energía en forma de corriente continua (DC). Sin embargo, la gran mayoría de los motores modernos utilizados en automoción (como los motores de imanes permanentes o de inducción) funcionan con corriente alterna (AC) trifásica. La función principal

del inversor es tomar esa corriente continua de alto voltaje de la batería y transformarla en una corriente alterna de tres fases (denominadas U, V y W). Esta transformación no es estática; el inversor cambia la frecuencia y la amplitud de esta corriente miles de veces por segundo para ajustar la velocidad y la potencia del coche en tiempo real.

Control de la propulsión y el par motor

A diferencia de un motor de combustión que usa una transmisión compleja para variar la velocidad, el vehículo eléctrico depende casi totalmente del inversor. Cuando el conductor pisa el pedal del acelerador, envía una señal electrónica a la unidad de control del inversor. Éste, a su vez, aumenta la frecuencia de la corriente eléctrica enviada al motor, lo que se traduce en una aceleración instantánea.

Gestión del frenado regenerativo (conversión AC a DC)

El inversor es un componente bidireccional. Esto significa que la energía puede fluir en ambos sentidos:

- **Modo tracción:** de la batería hacia el motor (el motor consume energía para mover las ruedas).
- **Modo generación:** de las ruedas hacia la batería. Cuando el conductor levanta el pie del acelerador o pisa el freno, el motor eléctrico empieza a girar como un generador. El inversor toma esa corriente alterna generada por el movimiento de las ruedas, la convierte de nuevo en corriente continua y la inyecta en la batería para recargarla.

Este proceso aumenta la autonomía del vehículo y reduce el desgaste de los frenos mecánicos.

Figura 126. Pantalla de flujo de energía (Alvatronics, 2026)



Suministro de energía para sistemas auxiliares

Aunque su tarea principal es mover el motor de tracción, el inversor también suele estar involucrado en la distribución de energía para otros sistemas de alta tensión, como el compresor del aire acondicionado y el calefactor de la cabina, asegurando que todos los sistemas reciban la energía necesaria bajo condiciones de seguridad controladas.

Tabla 12. Resumen de funciones de un inversor (Alvatronics, 2026)

Función	Descripción técnica
Transformación	Cambia la corriente continua (DC) en corriente alterna (AC).
Control de velocidad	Varía la frecuencia de la electricidad para acelerar o desacelerar el motor.
Recarga pasiva	Gestiona el flujo de energía durante el frenado regenerativo.
Protección	Monitorea constantemente el flujo eléctrico para evitar cortocircuitos o sobrecalentamientos en el motor.

1.2 El proceso de conversión: de corriente continua (batería) a corriente alterna (motor)

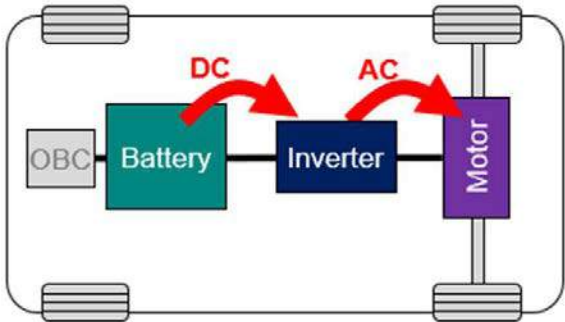
El proceso de conversión es la razón de existir del inversor, y es vital entender que este componente actúa como un traductor. La batería y el motor hablan “idiomas eléctricos” diferentes, y el inversor es el intérprete que permite la comunicación entre ambos.

La etapa de entrada: recepción de corriente continua (DC)

Todo comienza en los terminales de entrada del inversor, conectados directamente a la batería de tracción mediante los cables naranja de alta tensión.

- **Voltaje constante:** la batería entrega un flujo de electrones en una sola dirección. El problema es que un motor eléctrico de tracción no puede girar de manera eficiente y controlada solo con corriente continua; se quemaría o se bloquearía.
- **Filtrado inicial:** antes de ser procesada, la corriente pasa por un “banco de capacitores” que estabiliza el voltaje. Esto es necesario porque la batería puede tener pequeñas fluctuaciones y el inversor necesita un flujo de energía perfectamente limpio para trabajar.

Figura 127. Diagrama de flujo de la corriente (auto-parkingheate, 2025)



La conmutación

Dentro del inversor no hay piezas móviles (como engranajes), sino interruptores electrónicos de alta velocidad llamados IGBT (transistores bipolares de puerta aislada).

- **Funcionamiento de los interruptores:** estos transistores se abren y se cierran miles de veces por segundo (frecuencia de conmutación).
- **La “magia” de la alternancia:** al abrir y cerrar estos interruptores de forma ultra rápida y organizada, el inversor “trocea” la corriente continua de la batería y la envía al motor en pulsos. Al cambiar la polaridad de estos pulsos, se simula una onda de corriente alterna (AC).
- **Creación de las tres fases:** el inversor no crea una sola corriente, sino tres, conocidas como las fases U, V y W. Cada fase está desfasada 120 grados respecto a la otra, lo que permite crear un campo magnético giratorio dentro del motor, que es lo que finalmente hace girar el eje y las ruedas.

Figura 128. Conexión U V W y salidas
(Electronics, 2023)



Control de velocidad y par (fuerza)

Aquí es donde el contenido se vuelve técnico para el nivel medio-superior. El inversor controla dos variables críticas:

1. La frecuencia: si el inversor aumenta la velocidad con la que abre y cierra los transistores (hercios), el motor gira más rápido.

2. La amplitud (voltaje): si el inversor permite que pase más energía en cada pulso, el motor tiene más fuerza (par motor) para subir pendientes o cargar peso.

La etapa de salida: entrega al motor

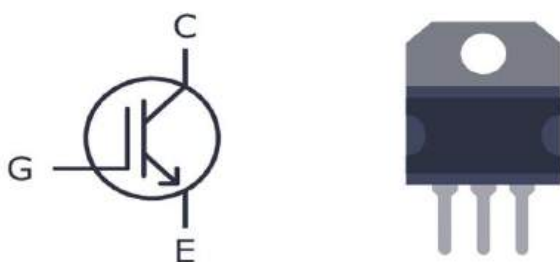
Finalmente, la corriente sale del inversor a través de tres cables gruesos (también naranjas) hacia el motor. En este punto, la energía ya es AC trifásica. El motor recibe este campo magnético variable y comienza a girar. Es un proceso de retroalimentación constante: el inversor “escucha” al motor (mediante sensores) y ajusta la conversión milisegundo a milisegundo para que la conducción sea suave

2 COMPONENTES PRINCIPALES Y FUNCIONAMIENTO

2.1 El módulo de potencia (IGBT): el interruptor electrónico del sistema

El IGBT (sigla de *Insulated Gate Bipolar Transistor*, transistor bipolar de puerta aislada), en el contexto de un vehículo eléctrico, no debemos imaginarlo como un pequeño componente de radio, sino como un módulo de potencia robusto capaz de gestionar flujos de energía masivos.

Figura 129. Transistor IGBT (Zamriy, s.f.)



Naturaleza híbrida del IGBT. El IGBT es un componente “híbrido” porque combina las mejores características de dos tipos de transistores:

1. **Del Mosfet:** toma la facilidad de control. Se activa con un voltaje pequeño en su “puerta”, lo que consume muy poca energía para ser operado por la computadora.
2. **Del transistor bipolar (BJT):** toma la capacidad de manejar grandes cantidades de corriente y alto voltaje con muy pocas pérdidas de energía en forma de calor.

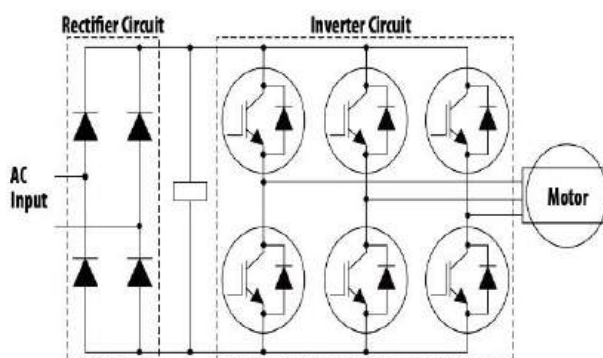
Esta combinación es lo que permite que un Tesla o un Nissan Leaf puedan acelerar de 0 a 100 km/h en pocos segundos sin que la electrónica se derrita instantáneamente.

Arquitectura en el inversor: el puente trifásico. Un inversor para un motor de tracción no utiliza un solo IGBT. Para poder generar las tres fases (U, V, W) que mencionamos antes, se requiere una configuración de 6 unidades de IGBT (organizados en 3 pares).

- Cada par de IGBT se encarga de una fase.
- Mientras un IGBT del par se conecta al polo positivo de la batería, el otro se conecta al negativo.

- La computadora alterna cuál de los dos se abre y se cierra. Si este proceso se hace de forma coordinada entre los 6 interruptores, el resultado a la salida es una corriente alterna trifásica que hace girar el motor.

Figura 130. Circuito de accionamiento del motor (Bourns, 2026)



La conmutación de alta frecuencia.

Los IGBT del vehículo eléctrico no se activan una vez por segundo; lo hacen a frecuencias de entre 8 kHz y 20 kHz (hasta 20,000 veces por segundo).

- Esta velocidad es tan alta que a menudo genera un silbido agudo que algunas personas pueden escuchar cuando un coche eléctrico acelera o frena (frecuencia de conmutación).
- Importancia: cuanto más rápida sea la conmutación, más suave es el giro del motor y más eficiente es el uso de la batería.

El desafío térmico y el fallo de componente. Debido a que el paso de corriente no es perfecto, cada vez que el IGBT se “cierra” para dejar pasar la energía, se genera calor por resistencia.

- **Empaquetado:** los chips de silicio del IGBT están montados sobre una placa

base de cobre o cerámica para transferir el calor rápidamente.

- **Modo de fallo:** el fallo más común de un IGBT es el cortocircuito por sobrecalentamiento. Si el sistema de refrigeración tiene aire o el líquido no fluye, el silicio se funde y el inversor queda inoperativo. En estos casos, el técnico suele encontrar un código de falla (DTC) que indica “Cortocircuito en fase U/V/W” o “Falla de módulo de potencia”

3 GESTIÓN DEL MOTOR Y SEÑALES

3.1 Las tres fases de salida (U, V, W) hacia el motor eléctrico

La salida trifásica es el resultado final de todo el esfuerzo de procesamiento del inversor. No es simplemente “electricidad que sale”, es una señal de potencia compleja y sincronizada.

La lógica del desfase de 120 grados

Para que el motor eléctrico sea eficiente, la corriente alterna en las fases U, V y W no llega al mismo tiempo. El inversor está programado para que cada fase tenga un retraso exacto de 120 grados eléctricos respecto a la anterior.

¿Por qué es vital?

Este desfase es lo que garantiza que el par motor (la fuerza de empuje) sea constante. Si las fases no estuvieran desfasadas, el motor daría “tirones” o saltos, lo que destruiría la transmisión y sería imposible de conducir.

Un técnico que conecta un osciloscopio a las tres fases verá tres ondas que suben y bajan de forma entrelazada, nunca coincidiendo en sus puntos máximos al mismo tiempo.

El concepto de “frecuencia de salida” vs “velocidad del motor”

A diferencia de un motor de combustión, donde la velocidad depende de la explosión de combustible, aquí la velocidad depende de la frecuencia fundamental

Relación directa: la velocidad de giro del motor (RPM) es directamente proporcional a la frecuencia (Hz) de las fases U, V, W.

El papel del inversor: para que el coche vaya a 120 km/h, el inversor debe alternar la polaridad de las fases muchísimo más rápido que cuando el coche va a 20 km/h. Esto se conoce como control de frecuencia variable.

El blindaje y la compatibilidad electromagnética (EMC)

Debido a que el inversor conmuta la energía a velocidades altísimas, los cables U, V y W se convierten accidentalmente en “antenas” que emiten mucha radiación electromagnética (ruido).

Cables apantallados

Si se observa un cable naranja de fase, se verá que debajo del aislante naranja hay una malla metálica trenzada. Esta malla debe estar conectada a tierra (masa) en ambos extremos.

Figura 131. Cable de alta tensión apantallado
(Alvatronics, 2026)



- **Consecuencia de falla:** si el blindaje está roto o la conexión a tierra del cable está floja, el cliente escuchará interferencias en la radio, el sistema de navegación podría fallar o, lo que es peor, los sensores de ABS y Airbag podrían dar lecturas erróneas por culpa del “ruido” de las fases.

Pruebas de diagnóstico en las fases (punto de vista del taller)

Cuando un vehículo llega con pérdida de potencia o ruidos en el motor, el técnico debe realizar tres pruebas críticas en las salidas U, V y W:

- **Prueba de equilibrio de resistencia:** se mide con un miliohmímetro entre los terminales (U-V, V-W y U-W). Las lecturas deben ser idénticas. Una diferencia de incluso un 2% indica un cortocircuito interno en el bobinado del motor o un terminal del inversor carbonizado.
- **Prueba de aislamiento:** se aplica un voltaje alto (ej. 500V o 1000V) entre una fase y la carcasa del motor (tierra). El aislamiento debe ser de varios gigaohmios. Si el aislamiento es bajo, la corriente “se fuga” al chasis, lo cual es

detectado por el sistema de seguridad y el coche se bloquea (fallo de aislamiento).

- **Inspección de terminales:** debido a las altas corrientes (hasta 400 amperios), los tornillos que sujetan los cables U, V y W en el inversor sufren ciclos de dilatación por calor. Un tornillo flojo genera una resistencia que puede derretir el conector plástico del inversor.

3.2 Introducción al PWM: ¿cómo el inversor controla la velocidad y la fuerza del motor?

La modulación por ancho de pulso (PWM) es la técnica que permite al inversor simular una señal variable utilizando una fuente de energía constante (la batería). En lugar de reducir el voltaje de la batería (lo cual sería ineficiente y generaría mucho calor), el inversor “pica” la electricidad de forma inteligente.

¿Cómo funciona el PWM?

Imaginando que se tiene un interruptor de luz.

- Si se lo deja encendido, la bombilla brilla al 100%.
- Si se lo deja apagado, brilla al 0%.
- Si se pudiera encenderlo y apagarlo 10,000 veces por segundo, se podría controlar el brillo de la bombilla dependiendo de cuánto tiempo pase el interruptor en “ON” frente a cuánto tiempo pase en “OFF”.

En el vehículo eléctrico, los IGBT son esos interruptores ultrarrápidos. Al variar el tiempo que el interruptor está cerrado (conduciendo), el inversor controla cuánta energía llega realmente al motor.

Control de la fuerza (par motor) mediante el “ciclo de trabajo”

El ciclo de trabajo (*Duty Cycle*) es el porcentaje de tiempo que el pulso está activo en un periodo determinado.

- **Aceleración suave:** el inversor envía pulsos muy estrechos (ej. 10% ON, 90% OFF). El motor recibe poca energía media y genera poca fuerza.
- **Aceleración a fondo:** el inversor envía pulsos muy anchos (ej. 90% ON, 10% OFF). El motor recibe casi todo el voltaje de la batería y entrega su máximo torque.

Control de la velocidad (frecuencia)

Mientras que el *ancho* del pulso controla la fuerza, la frecuencia (qué tan seguido se repiten esos pulsos) controla la velocidad de giro.

- Para que el motor gire más rápido, el inversor debe completar el ciclo de las tres fases (U, V y W) en menos tiempo.
- El PWM se organiza de tal manera que los pulsos varían su ancho progresivamente para imitar la forma de una onda

senoidal. Esto es lo que permite que el motor gire con total suavidad y sin ruidos mecánicos bruscos.

Importancia para el técnico: el “silbido” del inversor

Si se escucha un pitido agudo cuando un coche eléctrico arranca, ese sonido no es el motor, es el PWM.

- La frecuencia de conmutación suele estar entre 8 kHz y 18 kHz.
- Si el sonido cambia o se vuelve irregular, puede indicar que un módulo IGBT no está conmutando correctamente o que hay un problema en la placa de control.

El PWM en el frenado regenerativo

Cuando el vehículo frena, el PWM cambia su estrategia. En lugar de enviar energía para “empujar” el motor, los IGBT se activan para “capturar” los picos de energía que el motor genera al girar por inercia. El PWM modula esos picos para que el voltaje de retorno sea ligeramente superior al de la batería, permitiendo que la energía fluya hacia adentro y la cargue.

4 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

Applications (Springer - Scientific Reports)

<https://link.springer.com/article/10.1038/s41598-024-78529-6>

Collaboration to advance dual-inverter systems for hybrid and electric vehicles (EV Engineering)

<https://www.evengineeringonline.com/collaboration-to-advance-dual-inverter-systems-for-hybrid-and-electric-vehicles/>

Electric traction inverter (HEV/EV) - Danfoss

<https://www.danfoss.com/en-in/markets/automotive/dsp/electric-traction-inverter-hevev/>

Multi-Criteria Ranking of Z-Source Inverter Topologies for a Three-Wheel Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle (IEEE Transactions on Vehicular Technology)

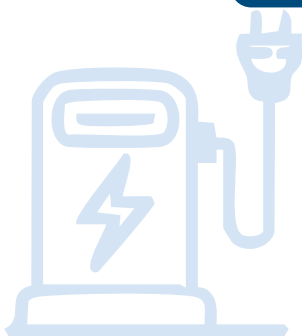
<https://trid.trb.org/View/2554089>

Understanding the Full Value of Inverters in Hybrid and Fully Electric Applications (Power & Motion)

<https://www.powermotiontech.com/technologies/article/55304472/parke>



UNIDAD TEMÁTICA 12



ESTACIONES DE CARGA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

1 FUNDAMENTOS Y CLASIFICACIÓN

1.1 Definición de EVSE: ¿por qué no es simplemente un “enchufe”?

El término EVSE (*Electric Vehicle Supply Equipment* o Equipo de Suministro para Vehículo Eléctrico) se refiere al conjunto de conductores, conectores, dispositivos de protección y protocolos de comunicación diseñados específicamente para entregar energía de forma segura desde la red eléctrica hacia el vehículo.

El cargador real está dentro del coche (en AC)

Una de las confusiones más comunes es llamar “cargador” a la caja de la pared.

- En la carga de corriente alterna (AC), el dispositivo que convierte la corriente de la casa en energía para la batería es el OBC (*On-Board Charger*), que está dentro del vehículo.
- El EVSE es, en realidad, un punto de suministro inteligente que autoriza y supervisa la entrega de esa energía.

¿Por qué no usar un enchufe convencional?

Si intentáramos cargar un vehículo eléctrico simplemente conectando los cables a un enchufe doméstico (como el de una lavadora) sin un EVSE, nos enfrentaríamos a tres problemas graves:

- **Riesgo térmico:** un enchufe común no está diseñado para soportar corrientes de 16A o 32A durante 8 o 10 horas seguidas. Los materiales se calientan, el plástico se derrite y puede causar

un incendio. El EVSE tiene contactores de grado industrial diseñados para uso continuo.

- **Falta de comunicación:** el vehículo necesita saber cuánta corriente puede extraer sin quemar los cables de la casa. Un enchufe “tonto” no puede decirle al coche: “Oye, solo tengo 10 amperios disponibles”. El EVSE sí lo hace a través de señales electrónicas.
- **Seguridad del usuario:** en un enchufe común, los terminales tienen energía siempre. En un EVSE, los terminales del conector están “muertos” (sin voltaje) hasta que el equipo detecta que el coche está correctamente enchufado y bloqueado. Esto evita chispazos o electrocuciones bajo la lluvia.

Las funciones críticas del EVSE

Para que un equipo sea considerado EVSE y no un simple tomacorriente, debe cumplir con las siguientes funciones:

- **Verificación de seguridad:** antes de cerrar el contactor interno, el EVSE comprueba que la puesta a tierra sea correcta y que no haya cortocircuitos.
- **Enclavamiento (Interlock):** asegura que el flujo de energía se detenga instantáneamente si el conector se desconecta accidentalmente o si el cable sufre un tirón.
- **Monitoreo de fugas (GFCI):** el EVSE integra sensores de corriente residual ultrasensibles que cortan la energía en milisegundos si detectan que una parte de la corriente se está desviando (por ejemplo, a través de una persona).

- **Gestión de carga:** Permite programar horarios para cargar cuando la luz es más barata o limitar la potencia si hay otros electrodomésticos encendidos.

1.2 Modos de carga (IEC 61851)

La normativa internacional clasifica la carga en cuatro modos, diferenciando el tipo de corriente, la seguridad y la comunicación entre la infraestructura y el vehículo.

A. Modo 1: Carga directa sin comunicación (obsoleto/prohibido)

Consiste en conectar el vehículo directamente a una toma de corriente doméstica estándar (Schuko) mediante un cable simple sin dispositivos de control intermedios.

- **Características:** no existe comunicación entre la red y el coche. La corriente es limitada y constante.
- **Riesgo:** al no haber protección específica ni control de temperatura, el riesgo de sobrecalentamiento e incendio en la instalación doméstica es altísimo.
- **Uso:** está prohibido en la mayoría de los países para la carga de coches eléctricos; solo se permite en algunos casos para vehículos ligeros como bicicletas o patinetes eléctricos de muy baja potencia.

B. Modo 2: Carga ocasional con cable portátil (ICCB)

Es el método de carga que utilizan los cables que el fabricante entrega con el coche (cargadores “de maleta”). Se

conectan a un enchufe doméstico, pero incorporan una caja de control en el cable.

- **El dispositivo ICCB (In-Cable Control Box).** Esta caja actúa como un EVSE portátil. Realiza funciones de seguridad como la verificación de la tierra y la protección diferencial.
- **Limitaciones:** la corriente suele estar limitada por seguridad a 10A o 13A (aprox. 2.3 kW).
- **Uso ideal:** carga de emergencia o cuando se viaja a lugares donde no hay infraestructura dedicada. No se recomienda como método de carga diario debido al desgaste que sufre el enchufe de la pared.

Figura 132. Cargador EV versión portátil 16A monofásico (Teison, 2026)



C. Modo 3: Estaciones de carga en AC (Wallbox)

Este es el estándar para la carga diaria en hogares, empresas y parkings públicos. El vehículo se conecta a una estación de carga fija (EVSE) conectada permanentemente a la red eléctrica.

- **Seguridad superior:** la estación de carga gestiona el protocolo de comunicación

Control Pilot (CP) de forma continua. El cable solo tiene energía cuando el EVSE y el auto confirman que todo es seguro.

- **Potencia:** permite cargas mucho más rápidas en corriente alterna, desde **3.7 kW hasta 22 kW** (en instalaciones trifásicas).
- **Conector:** utiliza típicamente el conector Tipo 2 (Mennekes) o Tipo 1. El cargador real sigue siendo el OBC (On-Board Charger) dentro del coche.

Figura 133. Wallbox (PulsarPlus, 2026)



D. Modo 4: Estaciones de carga rápida en DC

Este modo es fundamental para viajes largos, ya que permite cargar del 0% al 80% en 20-40 minutos. Aquí, el proceso de carga cambia radicalmente: se salta el cargador interno del coche.

- **Conversión externa:** la conversión de AC a DC ocurre dentro de la estación de carga (que es del tamaño de una nevera o armario grande). La energía va directamente a la batería.
- **Comunicación compleja:** requiere una comunicación digital avanzada (protocolos como ISO 15118) para controlar el voltaje y la temperatura de la batería en tiempo real.
- **Potencia:** desde 50 kW hasta 350 kW o más.
- **Conectores:** utiliza cables gruesos (a veces refrigerados por líquido) con conectores CCS (Combo) o CHAdeMO.

Tabla 13. Comparación de modos de carga (Alvatronics, 2026)

Modo	Corriente	Ubicación del cargador	Potencia típica	Seguridad
Modo 1	AC	Interna (auto)	< 2.3 kW	Nula (sin comunicación)
Modo 2	AC	Interna (auto)	2.3 kW - 3.7 kW	Básica (protección en cable)
Modo 3	AC	Interna (auto)	7.4 kW - 22 kW	Alta (comunicación Pilot)
Modo 4	DC	Externa (estación)	50 kW - 350 kW	Máxima (control digital)

1.3 Niveles de carga

La norma SAE J1772 es el estándar norteamericano (adoptado en gran parte de América Latina) que clasifica la carga

según la magnitud eléctrica suministrada al vehículo.

Nivel 1: Carga doméstica básica (120V AC)

Es el nivel más lento y se realiza utilizando una toma de corriente residencial estándar de una sola fase.

- **Voltaje:** 120V AC (monofásico).
- **Corriente:** típicamente 12A a 16A.
- **Potencia:** aproximadamente 1.3 kW a 1.9 kW.
- **Rendimiento:** añade entre 6 y 8 kilómetros de autonomía por cada hora de carga.
- **Uso:** es puramente para carga nocturna de emergencia o para vehículos híbridos enchufables (PHEV) con baterías pequeñas. Para un vehículo 100% eléctrico con batería de 60 kWh, tardaría más de 40 horas en cargarse por completo.

Nivel 2: Carga rápida residencial y comercial (210V - 240V AC)

Es el estándar de oro para la infraestructura de carga en hogares y lugares de trabajo. Requiere una instalación eléctrica dedicada similar a la de un aire acondicionado grande o una secadora eléctrica.

- **Voltaje:** 210V (comercial) o 240V (residencial) AC.
- **Corriente:** desde 16A hasta 80A (siendo 32A y 48A los más comunes).
- **Potencia:** desde 3.3 kW hasta 19.2 kW. El estándar común es de 7.4 kW.
- **Rendimiento:** añade entre 20 y 60 kilómetros de autonomía por hora.

- **Uso:** instalación obligatoria en garajes privados y estacionamientos públicos. Permite cargar la mayoría de los vehículos eléctricos en una noche (6-8 horas).

Nivel 3: Carga rápida en DC (Direct Current Fast Charge)

A menudo llamado incorrectamente "Nivel 3", su nombre técnico es DC Fast Charging. A diferencia de los niveles 1 y 2, este nivel suministra corriente continua directamente a la batería, evitando el cargador a bordo del vehículo.

- **Voltaje:** 400V a 1000V DC.
- **Corriente:** hasta 500A.
- **Potencia:** desde 50 kW hasta 350 kW (Ultra-Fast Charging).
- **Rendimiento:** puede cargar el 80% de una batería en un tiempo de 15 a 30 minutos.
- **Uso:** corredores de autopistas y estaciones de servicio. No se recomienda para uso diario exclusivo, ya que el calor generado por las altas potencias de carga puede acelerar la degradación de las celdas de litio si no hay una gestión térmica óptima.

2 ESTÁNDARES DE CONECTORES Y TOMAS DE CORRIENTE

2.1 Tipos de conectores según región

En la carga de corriente alterna (modos 2 y 3), existen tres estándares principales que dominan el mercado global. Cada

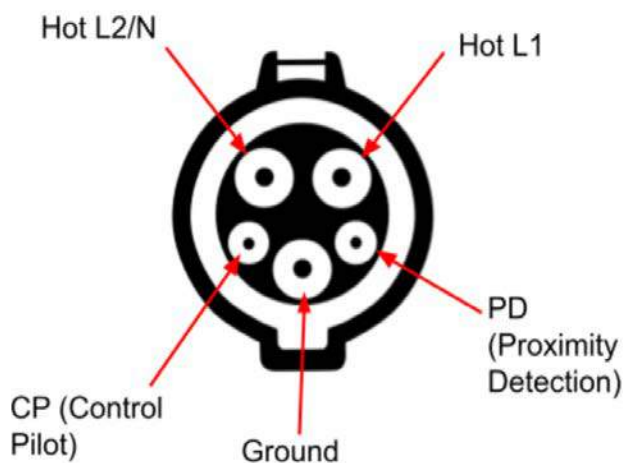
uno está diseñado para adaptarse a las redes eléctricas locales (monofásicas o trifásicas).

Tipo 1 (SAE J1772 / Yazaki) - América y Japón

Es el estándar oficial en Estados Unidos, Canadá, Japón y gran parte de América Latina.

- **Geometría:** tiene un diseño circular con 5 pines.
- **Configuración eléctrica:** diseñado exclusivamente para redes monofásicas.
 - 2 pines de potencia (L1 y Neutro).
 - 1 pin de tierra (PE).
 - 2 pines de comunicación (CP y PP).

Figura 134. Distribución de pines del conector J1772 (ResearchGate, 2026)



- **Seguridad física:** incluye un pestillo o gatillo mecánico que el usuario debe presionar para liberar el conector. Este gatillo tiene un interruptor interno que detiene la carga antes de que el conector salga del puerto, evitando arcos eléctricos.

- **Limitación:** al ser monofásico, su potencia máxima suele ser de 7.4 Kw.

Tipo 2 (IEC 62196-2 / Mennekes) - Europa

Es el estándar europeo, adoptado también en Australia y recientemente con mucha fuerza en el resto del mundo debido a su versatilidad.

- **Geometría:** tiene un diseño circular con un lado plano en la parte superior y cuenta con 7 pines.
- **Configuración eléctrica:** es un conector híbrido que soporta redes monofásicas y trifásicas.
 - 4 pines de potencia (L1, L2, L3 y Neutro).
 - 1 pin de tierra (PE).
 - 2 pines de comunicación (CP y PP).

Figura 135. Conector de carga tipo MENNEKES (EVSE, 2026)



Seguridad física: a diferencia del tipo 1, no tiene un gatillo manual. El vehículo bloquea el conector electrónicamente desde el interior mediante un perno motorizado. Si el coche está cerrado, el cable no se puede robar.

Potencia: puede entregar hasta 22 kW en instalaciones trifásicas de uso común, y hasta 43 kW en instalaciones industriales.

GB/T AC - China

China, al ser el mercado de vehículos eléctricos más grande del mundo, desarrolló su propio estándar nacional. Aunque por fuera se parece al tipo 2 (Mennekes), es eléctricamente incompatible y físicamente opuesto.

- **Diferencia clave (macho/hembra):** en los sistemas occidentales (Tipo 1 y 2), el cargador tiene los “pines” (macho) y el coche tiene los “huecos” (hembra). En el sistema GB/T de China, **es exactamente al revés**.
- **Pines:** cuenta con 7 pines, preparados también para carga trifásica.
- **Mercado:** si un técnico importa un vehículo directamente desde China, necesitará un adaptador o cambiar el puerto de carga, ya que los cargadores locales en América no encajarán físicamente.

Figura 136. Conector de carga tipo GB/T (greenc-ev, 2026)



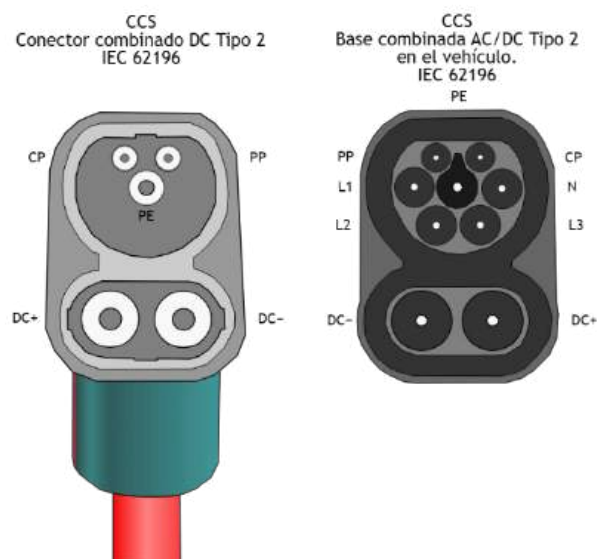
2.2 Carga rápida y conectores combinados

La carga rápida se basa en el concepto de “combo”: utilizar la base de comunicación de los conectores AC vistos anteriormente, pero añadiendo dos pines enormes para la potencia en DC.

CCS1 y CCS2 (Combined Charging System)

Es el estándar más extendido a nivel mundial (excepto en China y Japón). Se llama “combo” porque combina la toma de corriente alterna con la de continua en un solo puerto en el vehículo.

Figura 137. Conectores de carga combinados (Jancharge, 2024)



CCS1 (Combo 1): es la evolución del tipo 1 (Yazaki). Se usa principalmente en EE. UU. y Corea. Añade dos pines de DC debajo del conector circular de AC.

CCS2 (Combo 2): es la evolución del tipo 2 (Mennekes). Es el estándar en Europa y se está convirtiendo en el estándar global por su capacidad de manejar potencias de hasta 350 kW.

Funcionamiento

Cuando se carga en casa (AC), se usa la parte superior. Cuando se va a una estación rápida (DC), el cargador usa los dos pines inferiores de alta potencia y los pines de comunicación de la parte superior.

CHAdEMO

Desarrollado en Japón (asociación de Toyota, Nissan y Mitsubishi). El nombre es un juego de palabras en japonés que significa “¿Qué tal un té mientras cargamos?”.

- **Diseño:** a diferencia del CCS, CHAdEMO es un conector exclusivamente de DC. El vehículo debe tener dos puertos físicos separados: uno para AC y el gigante CHAdEMO para DC.
- **Capacidad bidireccional:** fue el primer estándar en permitir el **V2G (Vehicle**

to Grid), es decir, que el coche pueda devolver energía a la casa.

- **Estado actual:** está perdiendo la batalla frente al CCS en Occidente, pero sigue siendo fundamental para vehículos como el Nissan LEAF.

Figura 138. Conector de carga tipo CHAdEMO (AvtoTachki, 2022)



3 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

ChargePoint CT4000 Series: Site Design Guidelines

<https://docs.chargepoint.com/cpdocs-sec/content/2-ac/ct4000/sdg/st-dsgn-gdlns.htm>

Electric vehicle charging infrastructure design: Expertise, methods, and challenges (ScienceDirect)

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580525005618>

Electric vehicle supply equipment (Australian Department of Industry)

<https://www.industry.gov.au/ja/node/93152>

Introduction to EV Charging Stations (Texas Instruments)

<https://www.ti.com/document-viewer/ja-jp/lit/html/SLLA497/GUID-4444417B-083E-47CB-9D7B-5EF8E172021F>

Optimization Planning and Operation of Electric Vehicle Charging Facilities (Elsevier)

<https://shop.elsevier.com/books/optimization-planning-and-operation-of-electric-vehicle-charging-facilities/li/978-0-443-43952-0>

Plugs and cables (Chargefox Support)

<https://support.chargefox.com/hc/en-au/articles/13310677891983-Plugs-and-cables>

Review of EV Adoption, Charging Standards, and Infrastructure Growth in Europe and Italy (MDPI Batteries)

<https://www.mdpi.com/2313-0105/11/6/229>

Shasta EV Charging Stations (Blink Charging)

<https://blinkcharging.com/products/shasta-ev-charging-stations>



UNIDAD TEMÁTICA 13



ESTUDIO CONECTOR
IEC 62196

1 INTRODUCCIÓN AL INVERSOR DE POTENCIA

Para entender el estándar IEC 62196, es fundamental comprender que no nació de la nada, sino de la necesidad de adaptar la carga de vehículos a las diferentes infraestructuras eléctricas del mundo. La transición del tipo 1 al tipo 2 representa el salto de una solución regional a una global y más potente.

1.1 Evolución del estándar: del tipo 1 al tipo 2 (Mennekes)

La evolución de los conectores responde a la búsqueda de mayor velocidad, seguridad y, sobre todo, polivalencia en las redes eléctricas.

El origen: tipo 1 (SAE J1772 / Yazaki)

Apareció como el primer estándar moderno, impulsado principalmente por los mercados estadounidense y japonés.

- **Contexto eléctrico:** diseñado para redes donde la carga residencial es mayoritariamente monofásica (120V o 240V).
- **Limitación:** físicamente solo tiene espacio para una fase. Esto limita la potencia máxima de carga en AC a unos 7.4 kW en la mayoría de las aplicaciones comerciales.
- **Diseño:** un conector circular con 5 pines y un pestillo mecánico superior.

La necesidad del cambio: el nacimiento del tipo 2 (Mennekes)

A medida que el vehículo eléctrico llegó a Europa, los ingenieros se encontraron

con un problema: Europa utiliza ampliamente la corriente trifásica (400V). El conector tipo 1 no podía aprovechar esta infraestructura. En 2009, la empresa alemana Mennekes diseñó un nuevo conector que fue propuesto y finalmente aceptado bajo la norma IEC 62196-2.

Ventajas de la evolución al tipo 2

La transición al tipo 2 (IEC 62196-2) trajo mejoras significativas que hoy son el estándar de la industria:

- **Capacidad trifásica:** el tipo 2 añade dos pines adicionales de potencia (L2 y L3). Esto permite pasar de los 7.4 kW (monofásico) a los 22 kW o incluso 43 kW en corriente alterna.
- **Seguridad por bloqueo:** el tipo 1 se bloquea con un gatillo manual que cualquiera puede presionar. El tipo 2 introdujo el bloqueo electrónico: el coche “atrapa” el cable y no lo suelta hasta que el usuario abre el coche o finaliza la carga desde la app.
- **Simetría y ergonomía:** aunque no es perfectamente reversible, su diseño es más robusto y permite que el mismo puerto en el vehículo acepte carga monofásica en casa y trifásica en la vía pública.

Base para el futuro (CCS): el diseño del tipo 2 fue tan exitoso que se utilizó como la mitad superior del conector CCS2 (combo), permitiendo integrar carga lenta y ultrarrápida en el mismo espacio.

Tabla 14. Diferencias estructurales clave (Alvatronics, 2026)

Característica	Tipo 1 (antiguo/regional)	Tipo 2 (actual/global)
Normativa	SAE J1772	IEC 62196-2
Pines de potencia	2 (L1, N)	4 (L1, L2, L3, N)
Pines de control	2 (CP, PP)	2 (CP, PP)
Pin de tierra	1 (PE)	1 (PE)
Bloqueo	Mecánico (gatillo)	Electromecánico (solenoido)

1.2 Anatomía de los siete pines: función específica de cada terminal

A diferencia de los enchufes domésticos, aquí la energía no fluye hasta que los pines de control confirman que es seguro. A continuación, detallamos la función de cada terminal:

Figura 139. Conector de carga tipo GB/T (greenc-ev, 2026)



Pines de potencia (los más gruesos)

Ubicados en la parte central y superior, son los encargados de transportar la corriente de carga.

- 1. L1 (fase 1):** conductor de fase principal. Se usa en todas las cargas.
- 2. L2 y L3 (fases 2 y 3):** solo se activan en instalaciones trifásicas. Permiten subir la potencia de 7.4 kW a 11 kW o 22 kW.
- 3. N (neutro):** proporciona el camino de retorno para la corriente en sistemas monofásicos y equilibra las fases en trifásicos.

Pin de protección (el más largo)

- 4. PE (Protective Earth - Tierra):** Es el pin central.

- **Seguridad mecánica:** es físicamente más largo que los demás. Esto garantiza que, al conectar, sea el primero en hacer contacto y, al desconectar, sea el último en separarse.
- **Función:** deriva cualquier fuga de corriente al suelo y sirve como referencia de voltaje para las señales de comunicación.

Pines de comunicación y control (los más pequeños)

Ubicados en la parte superior, son la "inteligencia" del conector.

- **CP (Control Pilot):** es el canal de comunicación bidireccional. Transmite una señal de Modulación por Ancho

de Pulso (PWM). A través de este pin, el cargador le dice al coche cuánta corriente hay disponible y el coche le dice al cargador cuándo está listo para recibirla.

- **PP (Proximity Pilot / Plug Present):** su función es la proximidad y la identificación del cable. Evita que el

vehículo arranque mientras el cable está conectado. Indica al cargador y al vehículo la capacidad máxima de corriente del cable (usando una resistencia interna) para evitar que el cable se derrita por sobrecarga.

Esquema de distribución (vista frontal del conector hembra)

Figura 140. Esquema de distribución (ECV, 2025)

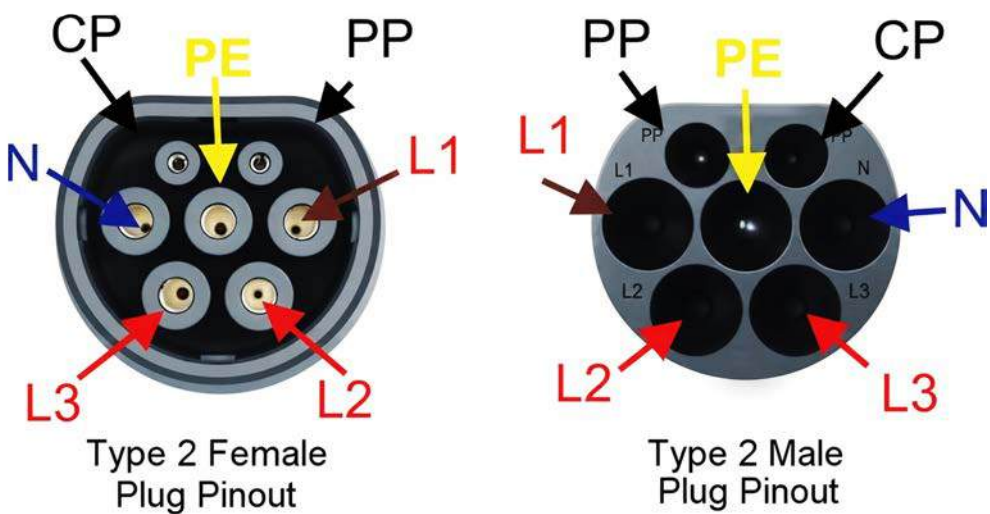


Tabla 15. Esquema de distribución (Alvatronics, 2026)

Posición	Pin	Nombre	Descripción técnica
Superior izq.	CP	Control Pilot	Señal de comunicación ($\pm 12V$ PWM).
Superior der.	PP	Proximity Pilot	Detección de conexión y límite de amperaje.
Centro	PE	Tierra	Protección y referencia de señal.
Media izq.	L1	Fase 1	Alimentación principal AC.
Media der.	N	Neutro	Retorno de corriente.
Inferior izq.	L2	Fase 2	Alimentación adicional (trifásica).
Inferior der.	L3	Fase 3	Alimentación adicional (trifásica).

1.3 Grados de protección (IP): resistencia al agua y al impacto (IK)

Grado de protección IP (Ingress Protection)

El código IP clasifica el nivel de protección que ofrece la envolvente del conector contra la entrada de objetos sólidos y líquidos. En el conector IEC 62196, el grado de protección suele ser dual, dependiendo de si está conectado o no:

- **Estado desconectado (IP44 o IP54):**
 - Cuando el conector está en su soporte (o con la tapa puesta), debe proteger contra proyecciones de agua y polvo.
 - IP44: protege contra objetos sólidos mayores a 1mm y salpicaduras de agua desde cualquier dirección.
- **Estado acoplado (IP67):**
 - Cuando el conector está insertado en el vehículo, la unión debe ser mucho más hermética, para evitar arcos eléctricos.
 - IP67: El sistema es totalmente estanco al polvo y puede resistir una inmersión temporal en agua (importante para carga bajo lluvia intensa).

Dato clave: los conectores tienen pequeños canales de drenaje internos. Si el agua entra en la cara del conector, estos canales guían el líquido hacia afuera para que no se acumule alrededor de los pines de potencia.

Grado de protección IK (Impact Protection)

El código IK indica la resistencia mecánica de la carcasa del conector frente a impactos de energía (golpes), medida en

Julios (J). Los conectores de carga pública suelen ser de categoría IK08 o IK10:

- IK08: resiste el impacto de una pieza de 2.5 kg caída desde 40 cm (5 Julios). Es el estándar para uso residencial.
- IK10: Resiste un impacto de 20 Julios. Es vital en estaciones de carga pública para soportar actos de vandalismo o, lo que es más común, que un vehículo le pase por encima al conector accidentalmente cuando se deja tirado en el suelo

2 PROTOCOLO DE SEÑALIZACIÓN (CONTROL PILOT)

2.1 La señal PWM (Modulación por Ancho de Pulso)

A diferencia de un enchufe común, que entrega todo lo que puede hasta que salta el térmico, el estándar IEC 62196 utiliza una señal PWM (Pulse Width Modulation) para negociar la potencia.

¿Qué es la señal PWM en el cargador?

Es una onda cuadrada que oscila a una frecuencia constante de 1 kHz (1000 ciclos por segundo). El cargador (EVSE) genera esta señal para decirle al coche: “Estoy aquí y ésta es la corriente máxima que te puedo dar sin quemar mi instalación”.

El “Duty Cycle” (ciclo de trabajo)

La clave no está en el voltaje, sino en el ancho del pulso positivo. El coche mide qué porcentaje del tiempo la señal está en nivel alto dentro de un ciclo. Ese porcentaje le indica el límite de amperaje.

Fórmula de conversión estándar (según IEC 61851)

- **Si el ciclo es entre 10% y 85%:** corriente (A) = ciclo de trabajo (%) x 0.6.
- **Si el ciclo es entre 85% y 96%:** corriente (A) = ciclo de trabajo (%) - 64) x 2.5.

Ejemplos prácticos de Duty Cycle

- 1. Ciclo del 10%:** el cargador indica que el mínimo disponible son 6A (carga muy lenta).
- 2. Ciclo del 25%:** $25 \times 0.6 = 15\text{A}$ (carga estándar doméstica).
- 3. Ciclo del 50%:** $50 \times 0.6 = 30\text{A}$ (carga rápida en AC / Wallbox de 7.4 kW).

- 4. Ciclo del 90%:** $(90 - 64) \times 2.5 = 65\text{A}$ (potencia máxima del estándar AC).

¿Por qué es necesario esto?

- **Protección de la red:** si el cargador detecta que hay otros electrodomésticos encendidos en la casa (mediante un sensor de potencia externo), puede reducir el ancho del pulso en tiempo real. El coche verá que el pulso se encoge y bajará su consumo inmediatamente para no hacer saltar el automático de la vivienda.
- **Seguridad:** si el cable se daña y la señal PWM se pierde (se queda en 0V fijos), el coche corta la carga al instante.

3 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

BS EN IEC 62196-1:2022 - Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets. Conductive charging of electric vehicles: General requirements
https://www.intertekinform.com/en-au/standards/bs-en-iec-62196-1-2022-1314286_saig_bsi_bsi_3212464

DS/EN IEC 62196-1:2022 - Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements
<https://webstore.ansi.org/standards/ds/dseniec621962022-2493211>

IEC 62196 - Definition, type 2 EV connectors, charging cables, and EU standards (Monta)
<https://monta.com/en/blog/iec-62196/>

IEC 62196 (Elinta Charge Glossary)
<https://elintacharge.com/glossary/iec-62196/>

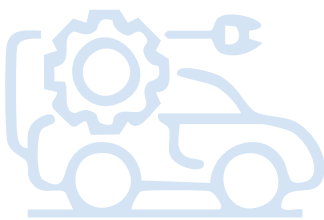
IEC 62196-1:2022 - Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements (Intertek Inform)
https://www.intertekinform.com/en-gb/standards/iec-62196-1-2022-569892_saig_iec_iec_3134060/

IEC 62196-1:2025 - Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements
<https://www.nen.nl/en/iec-62196-1-2025-en-fr-346070>

IEC 62196-1:2025-CMV - Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements (Commented version)
<https://www.nen.nl/en/iec-62196-1-2025-cmv-en-346205>



UNIDAD TEMÁTICA 14



**PUESTA A TIERRA DE
ESTACIONES DE CARGA
PARA VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS**

1 FUNDAMENTOS Y MÉTODOS DE CONEXIÓN

1.1 Métodos de puesta a tierra

La puesta a tierra en instalaciones de infraestructura de carga para vehículos eléctricos (EVSE - *Electric Vehicle Supply Equipment*) es el componente de seguridad más crítico. A diferencia de un electrodoméstico común, un cargador de VE maneja potencias elevadas durante tiempos prolongados y está conectado a un vehículo que es, esencialmente, una gran caja metálica con ruedas sobre aislantes (neumáticos).

Figura 141. Estación de carga domiciliaria (Plus, 2026)

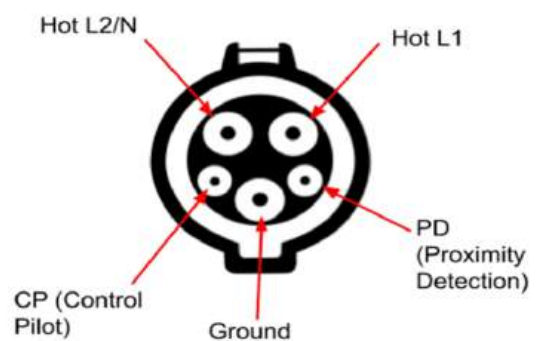


Definición y propósito técnico

El método de puesta a tierra consiste en la conexión eléctrica intencional de las partes metálicas no activas de la instalación (carcasas, canalizaciones, chasis del vehículo) a un electrodo enterrado en el suelo. Sus funciones se dividen en tres pilares:

- **Limitación de la tensión de contacto:** en caso de que un cable de fase dentro del cargador se pele y toque la carcasa metálica, la corriente fluirá hacia la tierra en lugar de esperar a que una persona toque el equipo. Esto garantiza que la “tensión de contacto” no supere los 50V en entornos secos o 12V en entornos húmedos, que son los límites de seguridad humana.
- **Referencia para la electrónica de comunicación:** los cargadores modernos utilizan un protocolo de comunicación llamado CP (Control Pilot). Este protocolo mide la impedancia (resistencia) entre el cable de tierra y el de comunicación. Si el método de puesta a tierra es deficiente, la señal de comunicación se ensucia (ruido eléctrico) y el vehículo interrumpirá la carga por “falla de aislamiento”.

Figura 142. Distribución de pines del conector J1772 (ResearchGate, 2026)



- **Estabilización de voltaje y transitorios:** el sistema de tierra drena las cargas estáticas generadas por el flujo de aire sobre el vehículo y protege los inversores del cargador contra picos de voltaje en la red.

Clasificación de métodos según la conexión del neutro (sistemas de red)

Dependiendo de cómo se conecte el transformador de la red eléctrica con el cargador, existen tres métodos principales que un instalador debe conocer:

- **Sistema TN-S (tierra y neutro separados):**

1. Es el método más recomendado para estaciones de carga.
2. El neutro (N) y la tierra de protección (PE) están unidos únicamente en el transformador de la calle o en el tablero principal. Desde ahí, viajan como dos cables totalmente independientes hasta el cargador.
3. **Ventaja:** ofrece la máxima seguridad y mínima interferencia electromagnética para la electrónica del coche.

- **Sistema TN-C-S (tierra y neutro combinados y luego separados):**

1. Muy común en instalaciones residenciales. El cable de la calle trae el neutro y la tierra combinados (PEN).
2. Al llegar al tablero del cargador, se deben separar obligatoriamente. Una vez separados, nunca deben volver a unirse.
3. **Riesgo:** si el cable neutro de la calle se corta, la carcasa del coche podría quedar electrificada si no hay una jabalina local de refuerzo.

- **Sistema TT (tierra local independiente):**

1. En este método, el neutro viene de la red, pero la tierra del cargador se obtiene exclusivamente de una

jabalina (electrodo) instalada al pie del cargador.

2. Es común en cargadores públicos en lugares abiertos. Requiere que el interruptor diferencial (RCD) sea extremadamente sensible, ya que la resistencia de la tierra suele ser mayor.

El concepto de la “pérdida de neutro” y el riesgo en VE

En la instalación de cargadores, existe un riesgo específico llamado “PME Fault” (Protective Multiple Earthing). Si el cable neutro del proveedor de energía se rompe, la corriente de retorno intentará volver a través del cable de tierra hacia el coche.

- **Consecuencia:** el chasis del vehículo puede alcanzar voltajes peligrosos (ej. 110V o 230V) respecto al suelo donde está parado el usuario.
- **Solución técnica:** se instalan dispositivos de detección de falla de neutro o se asegura una red equipotencial perfecta en el suelo de carga.

Requerimientos de impedancia (resistencia de tierra)

No basta con conectar un cable. El método de puesta a tierra se mide por su eficacia en ohmios

- **Estándar residencial:** menos de 25 ohmios (según NEC).
- **Recomendación para EVSE:** muchos fabricantes de vehículos (como Tesla o Renault) exigen menos de 10 Ohmios para que el sistema de carga rápida funcione sin errores.

- Si la resistencia es alta, el cargador detectará una “tierra flotante” y enviará una señal de error al tablero del vehículo, denegando el flujo de energía.

Materiales y conexiones en el punto de carga

Para que el método sea duradero, las conexiones no pueden ser simples empalmes:

- **Conexiones exotérmicas:** se recomienda la soldadura química (cadweld) para unir el cable de tierra al electrodo, evitando la corrosión galvánica.
- **Barras de tierra Busbars:** dentro del cargador, debe haber una barra de cobre donde converjan la tierra del vehículo, la tierra de la carcasa del cargador y la tierra de la acometida.

1.2 Puesta a tierra en bajo voltaje

La puesta a tierra en interiores busca crear un entorno equipotencial. Esto significa que, en caso de una falla, no debe haber una diferencia de potencial peligrosa entre el cargador del auto, una tubería de agua, la estructura del edificio o el suelo que pisa el usuario.

El conductor de protección (PE) en circuitos de BT

En sistemas de bajo voltaje, el conductor de protección (tierra) debe dimensionarse con el mismo rigor que los conductores de fase.

- **Criterio de sección:** según la norma IEC, si los conductores de fase tienen una sección $S \leq 16\text{mm}^2$; el conductor de

tierra debe tener exactamente la misma sección (S). Para cables más gruesos, se puede aplicar la fórmula de esfuerzo térmico:

$$K^2 S^2 \geq I^2 t$$

(Donde I es la corriente de falla, t el tiempo de disparo y k una constante del material).

- **Canalización única:** en interiores, el cable de tierra debe viajar dentro de la misma tubería o bandeja que las fases y el neutro. Esto reduce la impedancia del bucle de falla y evita que se generen campos electromagnéticos que calienten las estructuras metálicas cercanas.

La barra principal de tierra (BPT) o borne principal de equipotencialidad

En el interior de un local o taller, debe existir una barra de cobre dedicada (BPT). A esta barra se deben conectar:

1. **El conductor de tierra de la acometida:** el que viene del transformador o medidor.
2. **Los conductores de protección de los circuitos:** incluye el del cargador de VE.
3. **Tierras funcionales:** como las de sistemas de datos o telecomunicaciones.
4. **Masas extrañas:** tuberías metálicas de gas, agua, sistemas de climatización y armaduras metálicas del edificio.

¿Por qué conectar las tuberías a tierra?

Si un cable de fase del cargador toca accidentalmente una tubería metálica y ésta no está aterrizada, toda la red de tuberías del edificio quedaría electrificada, poniendo en riesgo a cualquier persona que abra un grifo en otro piso.

Particularidades en garajes y talleres de VE

Los garajes suelen tener suelos de concreto que, aunque parecen aislantes, pueden conducir electricidad si están húmedos o tienen mallas metálicas internas.

- **Superficies conductoras:** en locales de carga de VE, se recomienda que el área donde se estaciona el vehículo tenga una malla de equipotencialidad bajo el piso, conectada a la tierra del cargador. Esto evita la “tensión de paso” y la “tensión de toque”.
- **Protección contra corrosión:** en interiores, los puntos de conexión de tierra suelen sufrir por la humedad ambiental o productos químicos de limpieza. Se deben usar terminales de presión (ojales) y grasa conductiva para evitar la oxidación del contacto.

Esquema de conexión a tierra (ECT) en BT

Dependiendo del diseño del local, se aplican diferentes configuraciones:

- **Sistema TN-S:** el neutro y la tierra están separados en toda la instalación del local. Es el más seguro para evitar que corrientes de retorno del neutro circulen por el chasis del cargador.

- **Sistema TT (recomendado):** muy común cuando el cargador está en un local independiente con su propia jabalina. Aquí, el diferencial (RCD) es el único que garantiza la vida del usuario, ya que la corriente de falla es limitada por la resistencia del suelo.

- **Sistema IT:** se usa en hospitales o industrias críticas donde no se puede cortar la luz ante la primera falla. Requiere un monitor de aislamiento que avise si el cargador tiene una fuga, pero sin apagarlo inmediatamente.

El diferencial (RCD) y su relación con la tierra

En bajo voltaje, la puesta a tierra por sí sola no corta la corriente; solo ofrece un camino de escape. Para que la instalación sea segura, el sistema de tierra debe trabajar en conjunto con el interruptor diferencial.

- Para cargadores de VE, la normativa exige un RCD Clase B o un Clase A con detección de 6mA DC.
- Si la puesta a tierra en el interior del local tiene una resistencia muy alta (mal diseñada), el diferencial podría no detectar la fuga a tiempo, dejando el chasis del vehículo a un voltaje peligroso.

2 COMPONENTES DEL SISTEMA

2.1 Conductores de tierra

El conductor de protección, conocido técnicamente como PE (*Protective Earth*), es el enlace físico entre la masa del cargador (EVSE) y el sistema de electrodos. Su diseño debe garantizar que su impedancia

sea lo suficientemente baja para que las protecciones (disyuntores y diferenciales) actúen de forma instantánea.

Propiedades de los materiales

El material estándar por excelencia es el cobre electrolítico, debido a su baja resistividad y alta resistencia a la corrosión mecánica.

- **Conductores de cobre:** deben ser preferiblemente cableados (multifilares) en lugar de alambres sólidos para instalaciones de cargadores, ya que la vibración y los cambios térmicos pueden quebrar un alambre sólido con el tiempo.
- **Conductores de aluminio:** aunque son más económicos, su uso en conductores de tierra para estaciones de carga está restringido en muchas normativas debido a la corrosión galvánica que ocurre en los puntos de unión con terminales de cobre o bronce. Si se utiliza, requiere calibres mucho más robustos y el uso obligatorio de grasas inhibidoras de oxidación.

Dimensionamiento y cálculo de calibres

El calibre del conductor de tierra no se elige al azar; se rige por la capacidad del circuito de alimentación.

- **Regla de simetría (secciones menores a 16 mm²):** para la mayoría de los cargadores residenciales y semipúblicos (7.4 kW a 22 kW), la normativa técnica exige que el conductor de tierra sea de la misma sección que los conductores de fase y

neutro. Si alimentas un cargador con cables de 6 mm² (10 AWG), la tierra debe ser de 6 mm².

- **Regla de reducción (secciones mayores):** en cargadores de carga rápida (DC) donde las fases pueden ser de 50 mm² o más, el conductor de tierra puede ser de la mitad de la sección de la fase, pero nunca inferior a 16 mm².
- **Criterio de resistencia térmica:** el cable debe ser capaz de soportar la energía disipada durante un cortocircuito sin que el aislante se derrita. Esto se calcula con la constante de material (k):

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{k}$$

Donde S es la sección en mm², I es la corriente de falla en amperios, t es el tiempo de desconexión en segundos y k es el factor del material (143 para cobre).

Tipos de aislamiento y recubrimiento

No todos los cables verdes son iguales. Dependiendo de dónde se instale la estación de carga, el conductor debe tener protecciones específicas:

- **Cables THHN/THWN-2:** comunes en instalaciones entubadas (conduit). Son resistentes al calor y a la humedad.
- **Cables desnudos:** solo se permiten cuando el conductor va enterrado directamente en el suelo para formar parte del sistema de electrodos (malla de tierra).

- **Aislamiento LSZH (Low Smoke Zero Halogen):** obligatorio para estaciones de carga instaladas en lugares de pública concurrencia (centros comerciales, parkings subterráneos), ya que en caso de incendio no emiten gases tóxicos ni opacos.

Identificación y marcado normativo

La confusión de cables en una instalación de potencia puede ser fatal. Por ello, el conductor de tierra tiene reglas estrictas de identificación:

- **Color:** debe ser verde o verde con franjas amarillas (norma IEC 60446). Está estrictamente prohibido usar estos colores para fases o neutros.
- **Etiquetado:** en el tablero de distribución, el conductor debe llegar a una barra de tierra identificada con el símbolo internacional de puesta a tierra.

Figura 143. Símbolo “Tierra” (Rasik, 2020)



Integridad mecánica y conexiones

Un conductor de tierra “suelto” es lo mismo que no tener tierra.

- **Terminales de ojo:** las conexiones deben realizarse mediante terminales

de compresión (ponchados) de cobre estañado. No se permiten empalmes por torsión (tipo “cola de rata”).

- **Protección contra daño mecánico:** si el conductor de tierra corre por el exterior de un edificio hacia la jabalina, debe estar protegido por un tubo de PVC rígido o acero galvanizado hasta una altura mínima de 2.5 metros, para evitar cortes accidentales o vandalismo.

Tabla 16. Resumen de selección de conductores (Alvatronics, 2026)

Aplicación	Tipo de conductor	Calibre mínimo sugerido
Cargador 3.7 kW (16A)	Cobre aislado (verde)	2.5 mm ² (14 AWG)
Cargador 7.4 kW (32A)	Cobre aislado (verde)	6.0 mm ² (10 AWG)
Cargador 22 kW (32A 3f)	Cobre aislado (verde)	6.0 mm ² (10 AWG)
Cargador rápido DC (>50kW)	Cobre aislado / desnudo	16 mm ² a 35 mm ²

2.2 Electrodo de tierra

El electrodo de tierra es el terminal metálico que se introduce en el terreno para dispersar las corrientes de falla. En instalaciones de EVSE (Electric Vehicle Supply Equipment), la calidad del electrodo determina si el vehículo aceptará o no la carga, ya que muchos coches eléctricos realizan una medición de “lazo de tierra” antes de permitir el flujo de energía.

Tipos de electrodos según su construcción

Existen diversos tipos de electrodos, y su elección depende del tipo de suelo

(rocoso, arcilloso, arenoso) y del espacio disponible:

- **Electrodos de varilla (jabalinas):** son los más comunes. Consisten en un núcleo de acero recubierto por una capa de cobre (tecnología *Copperweld*). El acero aporta resistencia mecánica para el hincado y el cobre asegura conductividad y protección contra la corrosión.
- **Electrodos de placa:** se utilizan en suelos con poca profundidad (donde hay roca cerca de la superficie). Tienen una mayor área de contacto superficial.
- **Conductores enterrados (anillos de tierra):** es un cable de cobre desnudo que rodea la base de la estación de carga o el edificio. Es ideal para estaciones de carga rápida (DC) donde se requieren resistencias muy bajas.
- **Electrodos químicos:** varillas huecas llenas de sales minerales que se filtran al suelo para aumentar su conductividad en terrenos muy secos o desérticos.

Especificaciones técnicas y dimensiones

Para cumplir con las normativas internacionales (como la IEEE 80 o la IEC 60364), el electrodo debe cumplir mínimos físicos:

- **Longitud:** el estándar mínimo suele ser de 2.4 a 3 metros (8 a 10 pies). En terrenos de alta resistividad, se pueden unir varillas mediante acoples roscados para alcanzar profundidades de 6 o 9 metros, buscando capas freáticas o suelos más húmedos.

- **Diámetro:** los diámetros comerciales típicos son de 5/8" o 3/4". Un mayor diámetro no reduce significativamente la resistencia de tierra, pero sí ofrece mayor robustez mecánica al momento de enterrarla con martillos rotativos.
- **Espesor del recubrimiento de cobre:** para evitar que el electrodo se pudra en 2 años, el recubrimiento de cobre debe ser de al menos 250 micrones (0.25 mm). Los electrodos "económicos" suelen fallar en este punto.

La zona de influencia y el gradiente de potencial

Cuando una corriente de falla fluye por el electrodo, el suelo a su alrededor se electrifica. Esto crea una "esfera de influencia".

- **Regla de oro de la distancia:** si se instalan dos electrodos para bajar la resistencia, deben estar separados entre sí al menos dos veces su longitud (si la jabalina mide 3m, la siguiente debe estar a 6m). Si están muy cerca, sus zonas de influencia se solapan y no reducen la resistencia de manera eficiente.

Conexión entre conductor y electrodo

El punto donde el cable de cobre se une a la jabalina es el punto más débil del sistema. Existen tres métodos de unión:

- **Grapas de presión (mecánicas):** son económicas y fáciles de instalar, pero tienden a aflojarse con las vibraciones o a sulfatarse. Requieren una cámara de inspección para mantenimiento.

- **Soldadura exotérmica (recomendado):** una reacción química crea una unión molecular entre el cable y la varilla. No se oxida, no se afloja y tiene la menor resistencia eléctrica posible. Es el estándar en estaciones de carga de alta potencia.
- **Conectores de compresión:** utilizan herramientas hidráulicas para “aplastar” el conector. Son mejores que las grapas, pero inferiores a la soldadura.

Cámaras de inspección o cámara de registros

Todo sistema de tierra profesional para VE debe contar con una cámara de inspección en la cabeza del electrodo.

- **Función:** permite al técnico desconectar el sistema de tierra del resto de la instalación para medir la resistencia del electrodo de forma independiente con un telurómetro.
- **Normativa:** la cámara debe estar nivelada con el suelo y tener una tapa identificada con el símbolo de tierra, para evitar que se cubra con pavimento o cemento accidentalmente.

3 DISEÑO E INSTALACIÓN

3.1 Métodos de instalación

La instalación de un sistema de puesta a tierra para una estación de carga (EVSE) debe seguir una secuencia lógica para asegurar la durabilidad y la baja impedancia.

Ubicación y excavación

- **Selección del sitio:** el electrodo debe instalarse lo más cerca posible del cargador para reducir la longitud del conductor (y, por ende, la resistencia), pero guardando una distancia mínima de las fundaciones del edificio, para evitar corrosión estructural.
- **Hincado:** para jabalinas verticales, se utiliza un martillo rotativo o percutor. No se recomienda el uso de mazos manuales, ya que las vibraciones excesivas pueden separar la capa de cobre del núcleo de acero, arruinando el electrodo.

Canalización del conductor de tierra

- **Profundidad:** si el conductor va enterrado directamente (sin tubo), debe estar a una profundidad mínima de 0.5 a 0.8 metros, para evitar cortes por trabajos de jardinería o mantenimiento de suelos.
- **Protección:** en el punto donde el cable sale del suelo para entrar al cargador, debe estar protegido por un tubo rígido de acero o PVC cédula 80, para evitar daños mecánicos.

3.2 Comportamiento de los electrodos

El éxito de la tierra no depende solo del metal, sino de la interacción eléctrica con el terreno. El suelo se comporta como una resistencia variable.

Resistividad del suelo

Cada terreno es diferente. La humedad y las sales minerales determinan qué tan fácil fluye la corriente:

- **Suelos arcillosos/húmedos:** tienen baja resistividad (buenos para la tierra).
- **Suelos arenosos/rocosos:** tienen alta resistividad (requieren más electrodos o tratamientos químicos).

El efecto de la humedad y la temperatura

La resistencia de un electrodo no es estática.

- **Estacionalidad:** en verano, el suelo se seca y la resistencia sube. En invierno, si el suelo se congela, la resistencia se dispara (el hielo es aislante).
- **Solución:** los electrodos deben enterrarse por debajo de la “línea de congelación” y buscar capas de humedad permanente.

Disipación de la corriente

Cuando ocurre una falla en el cargador, la corriente viaja por el electrodo y se dispersa en el suelo. La mayor caída de voltaje ocurre en los primeros 30 cm alrededor de la jabalina. Por eso, el área alrededor del electrodo debe estar compactada y no tener huecos de aire.

3.3 Diseño de sistemas de electrodos

Para estaciones de carga rápida o electrolineras con múltiples cargadores, una sola jabalina no es suficiente. Se debe diseñar un sistema complejo.

A. Configuración en paralelo

Si una jabalina da 30 ohmios y el vehículo exige menos de 10 ohmios, instalamos más jabalinas y las unimos en paralelo.

- **Regla de separación:** deben estar separadas por una distancia mayor a su longitud, para evitar que sus “áreas de influencia” choquen, lo que reduciría su efectividad.

B. Cálculo de resistencia (fórmula de Laurent)

Para un diseño profesional, se estima la resistencia final (R) del sistema. Una fórmula simplificada para una jabalina vertical es:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{4L}{r} \right) - 1 \right)$$

Donde:

- ρ : Resistividad del suelo (Ωm).
- L: Longitud del electrodo (m).
- r: Radio del electrodo (m).

Mallas de tierra (Ground Grids)

En estaciones de carga DC de alta potencia, se entierra un “emparrillado” de cables de cobre desnudo.

- **Función:** controlar las tensiones de paso y de toque. Esto garantiza que si hay una falla masiva mientras alguien toca el cargador, el diferencial de voltaje entre sus pies y sus manos sea casi cero, salvándole la vida.

4 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

Analysis of transient overvoltages in EV charging stations due to direct lightning strikes (IET)

<https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-transient-overvoltages-in-EV-charging-Moradi-Foroud/84e7063e8d6c5d7ada899946bd5a187a1f89a398>

APPENDIX CC ELECTRIC VEHICLE CHARGING PROVISIONS FOR NEW COMMERCIAL CONSTRUCTION (ICC)

<https://codes.iccsafe.org/content/EPCOTEEC2024P1/appendix-cc-electric-vehicle-charging-provisions-for-new-commercial-construction>

CEI CLC/IEC/TS 61581-3-1:2024 Electric vehicles conductive charging system (IEC)

https://www.intertekinform.com/en-us/standards/cei-clc-iec-ts-61581-3-1-2024-1358367_saig_cei_cei_3396759/

Electric Vehicles Charging (PSA Corporation Limited — Battery Charge and Swap Station Trial) Rules 2024 (Singapore Statutes)

<https://sso.agc.gov.sg/SL-Supp/S507-2024/Published?DocDate=20240610&ProvIds=pr8->

Standard for Safety for Personnel Protection Systems for Electric Vehicle (EV) Supply Circuits – Part 1: General Requirements (CSA Group)

<https://scc-ccn.ca/standards/notices-of-intent/csa-group/standard-safety-personnel-protection-systems-electric-4>

Study, measurement, and modeling of the propagation of conducted emissions due to on-board chargers in grids with various earthing systems (Université Paris-Saclay)

<https://cyu.hal.science/SATIE/tel-04861197v1>

TN / TT / IT earthing systems (Elinta Charge)

<https://elintacharge.com/glossary/tn-tt-it-earthing-systems/>

Vehicle charging system, vehicle charging station and rechargeable car (Yutong Patent)

<https://eureka-patsnap-com.libproxy1.nus.edu.sg/patent-CN109986970A>



UNIDAD TEMÁTICA 15



**MANTENIMIENTO DE
ESTACIONES DE CARGA**

1 FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DE RECARGA

1.1 Introducción a la movilidad eléctrica (EV y HEV)

Para el técnico de mantenimiento, la distinción fundamental no es el tipo de vehículo, sino cómo este gestiona la energía entrante.

El concepto de cargador a bordo (OBC)

En la carga de corriente alterna (AC), el equipo que vemos en la pared o poste (wallbox) no es el cargador. El cargador real (rectificador AC/DC) está dentro del vehículo. El equipo externo (EVSE) o estación de carga, actúa como un “portero de seguridad”, comunicándose con el coche para decirle cuánta energía puede tomar de forma segura.

Figura 144. Wallbox (PulsarPlus, 2026)



Carga en corriente continua (DC): aquí, el “portero” se convierte en una central eléctrica en miniatura. El rectificador está en la estación (fuera del coche), permitiendo inyectar energía directamente a la batería de alta tensión, saltándose el OBC del vehículo. Esto implica componentes de mayor riesgo y complejidad.

1.2 Clasificación técnica de estaciones de carga (IEC 61851 / SAE J1772)

Nivel 1 (Carga de emergencia/doméstica):
Voltaje: 120V - 230V AC (Monofásico).
Corriente: Hasta 16A.

Arquitectura: cable con caja de control en línea (IC-CPD). Mantenimiento limitado a inspección visual y reemplazo de cable.

Nivel 2 (Carga AC comercial/privada):
Voltaje: 208V - 240V (Monofásico) o 400V (Trifásico).

Potencia: De 3.7 kW a 22 kW.

Componentes críticos: contactor de potencia, controlador de carga (placa PCB), protecciones diferenciales y módulo de comunicaciones.

Figura 145. Estación de carga nivel 3 (lasser, 2025)



Nivel 3 (Carga rápida DC / HPC):

Voltaje: 400V a 1000V DC.

Potencia: 50 kW hasta 350+ kW.

Complejidad

Incluye módulos de potencia AC/DC apilables, transformadores de aislamiento, filtros armónicos y sistemas de refrigeración líquida activa.

Figura 146. Electrolinera (SmartWallboxes, 2019)

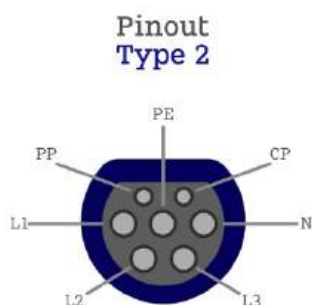


1.3 Anatomía de los conectores y protocolo de pines

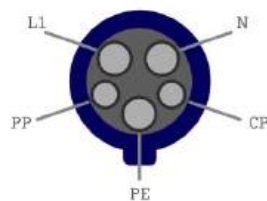
El técnico debe conocer la función de cada pin para diagnosticar fallos de comunicación: Pines de potencia (L1, L2, L3, N): transfieren la energía.

- **PE (Protective Earth):** tierra física; sin una buena lectura aquí, la carga nunca iniciará.
- **CP (Control Pilot):** es la línea de comunicación; a través de una señal PWM (onda cuadrada), el cargador y el auto negocian la corriente máxima. Si este cable falla, la carga se detiene.
- **PP (Proximity Pilot):** es un mecanismo de seguridad física que informa al vehículo que el conector está insertado para activar el inmovilizador del coche y evitar arcos eléctricos por desconexión accidental.

Figura 147. Distribución de pines de los conectores tipos 1 y 2 (Leicht, 2024)



Pinout
Type 1 / J1772



2 SEGURIDAD Y NORMATIVA

2.1 Riesgos eléctricos específicos

Arco eléctrico (Arc Flash)

En cargadores DC de alta potencia, abrir un gabinete sin desenergizar puede provocar una explosión de plasma debido a la ionización del aire.

Energía residual (Bus DC): los cargadores rápidos poseen bancos de capacitores grandes. Incluso desconectados de la red, pueden retener voltajes letales (>60V DC) durante varios minutos. Regla: esperar siempre el tiempo de descarga indicado por el fabricante (usualmente 5-10 minutos) antes de tocar componentes internos.

2.2 Las tres reglas de oro (aplicadas a EVSE)

Para cualquier mantenimiento correctivo o interno:

Desconexión efectiva: abrir el interruptor termomagnético en el cuadro de distribución principal.

Bloqueo y etiquetado (LOTO): colocar un candado físico en el interruptor y una etiqueta con nombre, fecha y motivo del bloqueo.

Figura 148. Dispositivo de bloqueo LOTO (Nisac, 2025)



Verificación de ausencia de tensión

Utilice un voltímetro certificado para medir las tensiones entre fase-fase, fase-neutro y fase-tierra. Es indispensable verificar el instrumento antes y después de cada medición

Puesta a tierra y en cortocircuito: (aplicable principalmente en mantenimiento de acometidas de media tensión o grandes estaciones DC).

Figura 149. Verificación de la ausencia de tensión (Técnica, s.f.)



Señalización de la zona, delimitar el área de trabajo con conos o cinta de peligro para evitar el acceso de usuarios o vehículos.

2.3 Equipos de protección personal (EPP)

Guantes dieléctricos

Clase 00 (500V) para AC Nivel 2, Clase 0 (1000V) para DC. Deben usarse con guantes de cuero protectores encima.

Figura 150. Guante dieléctrico (epp-ec, 2025)



Protección facial

Pantalla facial con protección UV y contra arco eléctrico (calificada en cal/cm²).

Figura 151. Protector facial contra Arc flash (SAS, s.f.)



Ropa ignífuga

Camisas y pantalones de algodón tratado o fibras sintéticas resistentes al fuego, sin partes metálicas expuestas.

Figura 152. Overol ignífugo y antiestático (SAS, s.f.)



Calzado dieléctrico (EH - Electrical Hazard)

Botas de seguridad con suela aislante que impide que la corriente fluya desde el cuerpo hacia la tierra a través de los pies. Deben cumplir con normas como la ASTM F2413.

Figura 153. Bota de seguridad (Berrendo, s.f.)



Herramientas aisladas (1000V)

Destornilladores, alicates y llaves recubiertos con material dieléctrico (generalmente bicolor para indicar desgaste) certificados bajo norma VDE o IEC 60900.

Figura 154. Herramientas aisladas (Interempresas, s.f.)



3 LA IMPORTANCIA DEL MANTENIMIENTO TÉCNICO

3.1 Eficiencia operativa y energética

El mantenimiento regular previene el fenómeno de *derating* térmico. Cuando los filtros de aire de un cargador se obstruyen o las conexiones eléctricas se aflojan creando resistencia, la temperatura interna sube. El cargador, para autoprotegerse, reduce drásticamente la potencia de carga (ej., de 50kW baja a 20kW). Esto frustra al usuario y alarga los tiempos de ocupación del puesto.

3.2 Gestión del ciclo de vida (Life Cycle Management)

Un cargador bien mantenido puede superar los 10 años de vida útil. El fallo más costoso en cargadores DC son los módulos de potencia. Estos módulos son sensibles al polvo y la humedad. Una limpieza preventiva semestral puede ahorrar miles de dólares en reemplazos prematuros de estos módulos.

3.3 Reducción de costos (OPEX vs. CAPEX)

Mantenimiento reactivo (esperar a que falle): alto costo por urgencia, pérdida de ingresos por inactividad y posible daño en cascada a otros componentes.

Mantenimiento preventivo: costo programado y bajo.

Análisis: reparar una placa de control a tiempo (ej., cambiar un ventilador de refrigeración de 20 USD evita quemar la placa madre completa (2.000 USD)).

3.4 Estabilidad de la red y calidad de energía

Los cargadores son cargas no lineales que pueden inyectar armónicos a la red eléctrica. El mantenimiento incluye verificar el estado de los filtros EMC (compatibilidad electromagnética). Si éstos fallan, la estación de carga puede causar interferencias en equipos médicos, informáticos o de comunicaciones cercanos.

4 PROTOCOLOS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

4.1 Inspección visual y estructural

Carcasa

Buscar grietas, vandalismo o decoloración por UV. Verificar la integridad de los sellos de goma (IP54/IP65) para evitar el ingreso de agua.

Anclajes: revisar que el pedestal o wallbox esté firmemente sujeto al

suelo/pared. Un equipo flojo puede dañar el cableado interno por vibración.

Pantalla HMI

Verificar la legibilidad y sensibilidad táctil. Limpiar con productos no abrasivos.

4.2 Mantenimiento del sistema de cableado y conectores

Inspección de pines

Utilizar una linterna para inspeccionar los pines dentro de la pistola de carga.

Signos de alarma

Plástico derretido alrededor del pin, coloración azul/negra en el metal (indica sobrecalentamiento excesivo).

Limpieza de contactos

Usar spray limpia contactos de residuo cero específicos para electrónica si hay suciedad, pero nunca lijar los pines (tienen baños de plata/níquel que se dañarían).

Prueba de aislamiento (megado)

Desconectar el cargador de la red. Usar un megóhmetro a 500V DC entre los conductores de fase del cable de carga y tierra, para asegurar que no hay fugas de corriente a través del aislante de la manguera.

4.3 Mantenimiento hardware interno

Gestión térmica

Limpiar o sustituir filtros de aire de entrada y salida. Verificar el giro libre de los ventiladores. En sistemas refrigerados por líquido, verificar nivel de refrigerante y ausencia de fugas en manguitos.

Torque (reapriete)

El ciclo de calentamiento y enfriamiento afloja los tornillos. Se debe reapretar todas las borneras de potencia (entrada y salida de contactores y protecciones) usando un destornillador dinamométrico según las especificaciones del fabricante (Nm). Esto previene incendios.

4.4 Actualización de software y comunicaciones

Verificar la versión de firmware actual. Los fabricantes lanzan parches para corregir errores con nuevos modelos de coches. Comprobar la latencia de la conexión (4G/Ethernet) mediante el menú de servicio. Una mala conexión provoca fallos en la autenticación de usuarios (RFID/App).

5 DIAGNÓSTICO Y RESOLUCIÓN DE AVERÍAS

5.1 Herramientas de diagnóstico avanzado

Simulador de vehículo (EVSE Tester)

Dispositivo esencial que emula los estados de un coche (A, B, C, D) y simula fallos (diodo cortocircuitado, falta de tierra). Permite probar el cargador sin tener un coche real presente.

Figura 155. Simulador de vehículo (HT-instruments, 2026)



Osciloscopio

Necesario para visualizar la señal PWM del piloto de control (CP). Permite ver si la señal está “sucia” o tiene voltaje incorrecto.

Multímetro True-RMS

Para mediciones precisas en entornos con ruido eléctrico.

5.2 Fallos de hardware comunes y soluciones

- **Fallo:** el contactor “tabletea” (suena repetidamente) y la carga no inicia.
 - **Causa:** voltaje de bobina insuficiente o señal piloto inestable.
 - **Solución:** verificar la fuente de alimentación de 12V/24V interna. Revisar el cableado de control hacia la bobina.
- **Fallo:** conector bloqueado en el vehículo.
 - **Causa:** fallo en el solenoide de bloqueo del cargador o falta de energía para retraer el perno.
 - **Solución:** usar el mecanismo de desbloqueo manual de emergencia (generalmente un cable o palanca oculta). Reemplazar el actuador de bloqueo.
- **Fallo:** pantalla negra o sistema muerto.
 - **Causa:** fuente de alimentación interna (PSU) quemada o fusible interno fundido.
 - **Solución:** verificar voltaje de entrada y salida de la fuente AC/DC interna.

5.3 Fallos de software y el protocolo OCPP

El protocolo OCPP (Open Charge Point Protocol) es el lenguaje universal entre cargadores y sistemas de gestión.

- **Problema:** “Transaction Rejected” o tarjeta RFID no leída.
 - **Diagnóstico:** verificar si el cargador está “online”. Si está “offline”, puede tener una lista blanca local (Local Whitelist) desactualizada.
 - **Acción:** reiniciar módem, verificar tarjeta SIM, forzar actualización de la lista de usuarios.
- **Problema:** la carga se interrumpe aleatoriamente.
 - **Diagnóstico:** puede ser un error de “timeout”. El servidor tarda mucho en responder a la solicitud de carga.

5.4 Interpretación de la señal PWM

El técnico debe saber interpretar los voltajes en el pin CP (Control Pilot) respecto a Tierra (PE):

- Estado A (+12V DC): vehículo desconectado.
- Estado B (+9V DC): vehículo conectado, pero no listo para cargar.
- Estado C (+6V PWM): vehículo conectado y listo. El cargador cierra contactores y empieza la carga.
- Estado D (+3V PWM): requiere ventilación (usado en baterías de plomo antiguas, raro hoy en día).
- Estado F (0V o -12V): error/falla a tierra.

Si al conectar el coche el voltaje no baja de 12V a 9V, el cableado del piloto está roto o el circuito del coche está abierto.

5.5 Errores de usuario vs. fallos reales

- **Error:** “carga muy lenta”.
 - **Análisis:** muchas veces no es fallo del cargador. Si la batería del coche está muy fría o casi llena (>80%), el propio coche limita la velocidad. El técnico debe educar al cliente sobre la “curva de carga”.
- **Error:** botón de parada de emergencia (EPO) presionado.
 - **Análisis:** causa muy común de “Estación fuera de servicio”. Verificar siempre si la “seta” de emergencia ha sido pulsada por accidente o vandalismo.

Figura 156. Botón de parada de emergencia EVSE



6 WEBGRAFÍA



Con la finalidad de fortalecer el aprendizaje autónomo y complementar los contenidos e información desarrollado en cada unidad temática, se presenta la siguiente webgrafía. Los documentos y videos digitales seleccionados permitirán al personal docente ampliar sus conocimientos y reforzar la comprensión de los contenidos abordados.

ChargePoint Launches Safeguard Care to Proactively Ensure EV Charger Reliability

<https://www.chargepoint.com/about/news/chargepoint-launches-safeguard-care-proactively-ensure-ev-charger-reliability>

Customised EV charging solution - Service and maintenance (SBRS - Member of Shell Group)

<https://www.sbrs.com/solutions/design-service/>

EV Charge Point Service and Maintenance FAQs (TSG Solutions)

<https://www.tsg-solutions.com/uk/ev-charge-point-service-maintenance-faqs/>

Maintenance and Service: The Present and Future of EV Supply Equipment (Electrical Business Magazine)

<https://www.ebmag.com/maintenance-and-service-the-present-and-future-of-ev-supply-equipment/>

O&M manuals (Elinta Charge Glossary)

<https://elintacharge.com/glossary/o-and-m-manuals/>

Operation manuals (Elinta Charge Glossary)

<https://elintacharge.com/glossary/operation-manuals/>

T/ZSM 0107-2025 - (China Standard Service Network)

<https://cssn.net.cn/cssn/productDetail/3123292db02a6716016a3de96f7d927c>

T/HNJX 0014-2024 - (China Standard Online Service)

<https://www.spc.org.cn/online/d5ee64f3627dc38dc2e1d0ac329439f5.html>

Las estrategias metodológicas son seleccionadas a partir de las habilidades que se desea desarrollar en los estudiantes, ante los retos laborales que se presentan. Éstos son: resolución de problemas complejos, pensamiento crítico, inteligencia emocional, toma de decisiones, orientación hacia el servicio, capacidad de negociación, flexibilidad cognitiva, entre otros. Estas habilidades necesarias requieren un reenfoque en las formas de enseñanza, ubicando en el centro del proceso de enseñanza y aprendizaje el desempeño y competencia que el estudiante debe adquirir de acuerdo al área de formación. En ese sentido, el docente debe aplicar estrategias que propicien experiencias y permitan descubrir nuevos conocimientos y desarrollar una serie de competencias, para lo cual el estudiante asume un papel dinámico, efectuando una intervención activa tanto hacia los conceptos, teorías y principios como hacia los medios del proceso, de forma práctica y bajo los principios de aprender a aprender y aprender haciendo.

Las estrategias metodológicas generales propuestas para el área de movilidad eléctrica parten del análisis de contenidos, los criterios de evaluación y los resultados de aprendizaje, las cuales permiten la planeación, ejecución y control del proceso aprendizaje desarrollado por el docente de los institutos técnicos y tecnológicos. Las siguientes estrategias metodológicas pueden ser seleccionadas, adaptadas al sentido y naturaleza de la asignatura que regenta el docente:

7.1 APRENDIZAJE BASADO EN PROBLEMAS (ABP)

Nilson, L. (2010), establece: “El aprendizaje basado en problemas es un enfoque centrado en el estudiante en el cual los estudiantes aprenden sobre un tema, trabajando en grupos, para resolver un problema que puede tener múltiples soluciones. Este problema es lo que impulsa la motivación y el aprendizaje”. Esta estrategia metodológica, por lo tanto, fomenta la reflexión, la cooperación y la toma de decisiones por parte del estudiante, en torno a un problema diseñado y realizado, ficticio o real, situado en el contexto del área de formación y planteado por el docente, con el objetivo de desarrollar un aprendizaje a partir de la propuesta de solución. Esta estrategia metodológica se fundamenta en la premisa de que el aprendizaje más efectivo ocurre cuando se sitúa en un contexto o problemática del mundo real, cuando el estudiante interactúa a partir de los conocimientos transmitidos y experiencias previas, planteando soluciones en base a un trabajo colaborativo y de integración de diferentes disciplinas. Asimismo, se caracteriza por estimular un trabajo activo y de participación práctica que exige una indagación externa, centrada en el estudiante, asumiendo el docente un rol de facilitador y guía del aprendizaje.

Los pasos básicos para su desarrollo son los siguientes:

- a) Planificación y organización;** el docente delimita la conformación de los grupos de trabajo, los lineamientos y condiciones del trabajo, plazos y formas de presentación de las propuestas de solución.
- b) Presentación del problema;** el docente presenta una situación o problema real o ficticio que requiere una propuesta de solución, estableciendo que no existe una solución única al mismo.
- c) Delimitación del problema e identificación de las necesidades de aprendizaje;** los estudiantes analizan y delimitan el problema, identificando los conocimientos y las habilidades que tienen para su resolución y los que requieren adquirir.
- d) Distribución de tareas de investigación;** los estudiantes deben organizarse para establecer los objetivos de investigación externa y aquéllos que pueden ser facilitados por el docente.
- e) Diseño y presentación de solución;** los estudiantes, en base a la información recogida, a partir del cual adquieren nuevos conocimientos y habilidades, toman decisiones y proponen soluciones prácticas, reales y pertinentes; presentan la solución al problema conforme las condiciones establecidas por el docente.
- f) valuación y autoevaluación;** de forma conjunta, docentes y estudiantes analizan la viabilidad de la solución y si resuelve en su integridad el problema planteado; a partir del diálogo, se plantean nuevos problemas.

El aprendizaje basado en problemas debe enfocarse en problemas que requieran soluciones prácticas y aplicables, considerando que el proceso formativo en formación técnica es 70% práctica, enfocada prioritariamente en el desarrollo de habilidades y en el saber hacer.

7.2 ESTUDIO DE CASO

El estudio de caso fue inicialmente concebido como una técnica cualitativa de investigación, y en una segunda etapa como un método educativo, el cual facilita el proceso de enseñanza y aprendizaje a través de un enfoque que privilegia el autoaprendizaje y bajo una dinámica esencialmente constructivista. En el área de movilidad eléctrica, el estudio de caso implica un análisis intensivo y completo de una problemática del área, con la finalidad de resolverla a través de un diagnóstico adecuado, actividades que estimulen la ejercitación repetida, registro, comprobación y contrastación de fenómenos, situaciones y hechos, así como la aplicación de procedimientos alternativos. Estos procesos deben llevar al desarrollo de un pensamiento crítico, habilidad adquirible que demanda competencias para evaluar, intuir, debatir, sustentar y decidir para

transformar. A continuación, se detallan las etapas del proceso de estudio de caso, como estrategia metodológica de enseñanza:

- a) Redacción del caso;** delimitar el objetivo de enseñanza y las competencias que se desean desarrollar son elementos básicos para la construcción o selección del estudio de caso; el docente deberá plantearse preguntas exploratorias, diagnósticas predictivas o prescriptivas entorno al Caso.
- b) Presentación a los estudiantes;** posterior a la organización de los equipos, el docente presenta el caso a los estudiantes, a través de una proyección visual (película, video), documento escrito u otro, estimulando las primeras reacciones de los estudiantes.
- c) Exploración inicial;** se propicia el debate inicial, opiniones diversas de los estudiantes, en base a sus conocimientos y experiencias previas, los cuales fortalecen la interacción, la comprensión de los diferentes puntos de vista y un análisis inicial a partir del cual se establece la ruta de análisis.
- d) Análisis e investigación;** parte central del estudio de caso, en la que los estudiantes investigan, ejercitan acciones prácticas de solución, recopilan datos, contrastan información y registran datos; la etapa concluye cuando los estudiantes articulan una síntesis objetiva de respuesta o solución aceptada por todos los integrantes del grupo.
- e) Síntesis acciones prácticas;** se caracteriza por la formulación y presentación de una síntesis del caso, que integra un inicio, una argumentación técnica compuesta por un diagnóstico y propuesta de intervención sustentadas en definiciones, principios, conceptos operativos o procedimentales que son aplicables al caso, cerrando con una conclusión.

Estos pasos, esenciales para el desarrollo del estudio de caso, deben permitir al estudiante tener éxito si se presentan como una orden de trabajo real, relacionada al área de movilidad eléctrica y a las casuísticas que se presentan y deben ser atendidas en su quehacer como técnico.

7.3 APRENDIZAJE BASADO EN PROYECTOS (ABP)

Entre las metodologías de enseñanza activas, el aprendizaje basado en proyectos (ABP), aplicado en el contexto de la educación superior, es considerado altamente efectivo por promover un aprendizaje significativo, no solo por la adquisición de conocimientos nuevos, sino por contribuir de forma directa en el desarrollo de competencias transversales, como pensamiento crítico, creatividad, colaboración la retroalimentación del docente, evaluando el desempeño técnico y el grado de colaboración del grupo, así como su incidencia en los resultados obtenidos.

En la formación superior técnica y tecnológica, esta metodología, permite la innovación, la integración de tecnologías y la articulación de diferentes áreas de conocimiento o especialidades. Asimismo, se puede lograr mejores resultados al gestionar la colaboración de instituciones externas, como empresas o espacios productivos, los cuales, al concretarse, permiten que los proyectos se alineen a las necesidades y demandas del mercado laboral, al ser implementadas en un contexto real. Por lo tanto, el aprendizaje basado en proyectos es el preferido en este ámbito educativo, por sus resultados y evidencias de aprendizaje. A continuación, detallaremos las etapas que componen la metodología de aprendizaje basado en proyectos:

- a) Planteamiento del proyecto;** surge a partir de la identificación del problema que se pretende abordar, el cual puede ser trabajado de forma conjunta en el aula, delimitando el planteamiento de la pregunta guía y posibles propuestas de solución.
- b) Organización y plan de trabajo;** la conformación de los equipos de trabajo al interior del grupo o de forma transdisciplinar guiados por un interés común y la delegación de responsabilidades específicas, es parte de la organización inicial a desarrollar. La fijación de los objetivos del proyecto y su producto guiarán el plan de trabajo, el cual debe incluir la justificación, las actividades, los recursos, los insumos, el tiempo y otros aspectos. El docente asume un rol de guía, aportando con conocimientos y habilidades para el logro de las competencias esperadas.
- c) Ejecución;** etapa en la que se desarrollan las actividades programadas, tanto investigativas como de análisis de información, para concluir en la creación del producto final. En esta área de aprendizaje, las actividades de aprendizaje central serán la construcción, el diseño y la fabricación o mantenimiento de un prototipo.
- d) Presentación y evaluación;** de acuerdo a los lineamientos de trabajo establecidos por el docente, se realizará la presentación del proyecto en aula, taller u otro espacio. La evaluación deberá permitir demostrar el logro de las competencias a través de la descripción de cada fase de realización del proyecto.

Esta metodología de enseñanza debe ser adaptada por el docente en base a los resultados de aprendizaje que se plantea, así como el tiempo y el alcance de los proyectos, incluyendo en todo el proceso de desarrollo un enfoque verde y de equidad de género.

7.4 APRENDIZAJE COLABORATIVO

Una de las metodologías de enseñanza más conocidas en los procesos formativos es el aprendizaje colaborativo, el cual fomenta el trabajo conjunto entre pares, con la finalidad de cohesionar el grupo de estudiantes conforme a sus intereses y expectativas educativas, pero con roles definidos para la solución de tareas técnicas específicas planteadas por el docente y asumiendo de forma conjunta responsabilidad de sus resultados. Se fundamenta en el hecho de que los conocimientos y habilidades previas de los estudiantes son variados, pero en un trabajo colaborativo, los mismos se nutren

en un proceso de permanente retroalimentación, asumiendo el estudiante un rol de liderazgo, responsabilidad por el aprendizaje y autonomía en la toma de decisiones. Usualmente este tipo de metodología se realiza de forma permanente; no obstante, en el presente caso se caracteriza por el planteamiento de tareas concretas para su atención en un tiempo corto.

Existen diferentes tipos de aprendizaje colaborativo: grupos de estudio, grupos de debate y otros. Para el área de movilidad eléctrica se utilizarán los talleres de intercambio de habilidades, en los que los estudiantes, en base a una tarea concreta, puedan enseñar sus diferentes habilidades y destrezas al resto del equipo, lo cual permitirá un juego de roles dentro del proceso enseñanza y aprendizaje, siendo el docente el acompañante para verificar el cumplimiento de los procesos técnicos y de las medidas de seguridad aplicables. Esta metodología permitirá interdependencia positiva, interacción técnica, responsabilidad individual y compromiso por los resultados conjuntos.

Los pasos básicos a desarrollar en el aula-taller para la aplicación de esta metodología de enseñanza son los siguientes:

- a) Delimitación de la tarea práctica a desarrollar;** el docente realiza el planteamiento de la tarea técnica a efectuar, presentando un problema real concorde al área de conocimiento que se desarrolla; un criterio básico para su efectividad es no dar a conocer la solución o respuesta.
- b) Conformación de equipos y asignación de roles;** el docente conforma los equipos y asigna los roles; al tratarse de movilidad eléctrica, éstos pueden ser: técnico ejecutor, responsable de seguridad, técnico de medición, registrador, entre otros, en base a los cuales asumen una responsabilidad individual, en la suposición de que su actuar afecta a todo el grupo.
- c) Aplicar estructuras colaborativas;** el equipo de estudiantes analiza el problema, discute para la toma de decisiones, ejecuta el procedimiento y reflexiona sobre los resultados; se sugiere que en el proceso verbalice las acciones y resultados. El docente acompaña el proceso, observando, orientando y realizando las preguntas técnicas, así como promoviendo la reflexión.
- d) Evaluar los resultados de la colaboración;** el grupo explica su actuar, sus aciertos, dificultades y conclusiones; este proceso permite la retroalimentación del docente, evaluando el desempeño técnico y el grado de colaboración del grupo, así como su incidencia en los resultados obtenidos.

7.5 REGISTRO TÉCNICO (BITÁCORA)

En el área estratégica de movilidad eléctrica, el Registro Técnico (Bitácora) es una metodología de enseñanza que se centra en el uso de la bitácora, como un instrumento de registro de información, pasos y procedimientos técnicos y productivos, mediciones

aplicadas, fallas y soluciones aplicadas, que, organizados de forma sistemática, permiten al estudiante la reflexión sobre lo que se aprende y realiza en el taller o laboratorio, así como el análisis de las problemáticas y necesidades del quehacer técnico, enriquecido por las valoraciones, apreciaciones y retroalimentación por los pares y por el docente. Esta metodología genera un aprendizaje significativo en tanto existe un compromiso reflexivo del docente y estudiante, el primero para analizar y retroalimentar los contenidos y el segundo para el registro de la información y de las etapas del proceso práctico desarrollado en el aula-taller para la toma de decisiones basada en evidencias. Se caracteriza por ser descriptiva, por el registro en orden cronológico de las evidencias, por el uso de los criterios de seguridad y por la reflexión técnica respecto a los procedimientos aplicados en movilidad eléctrica.

Los pasos básicos para la implementación de esta metodología en el aula taller, son los siguientes:

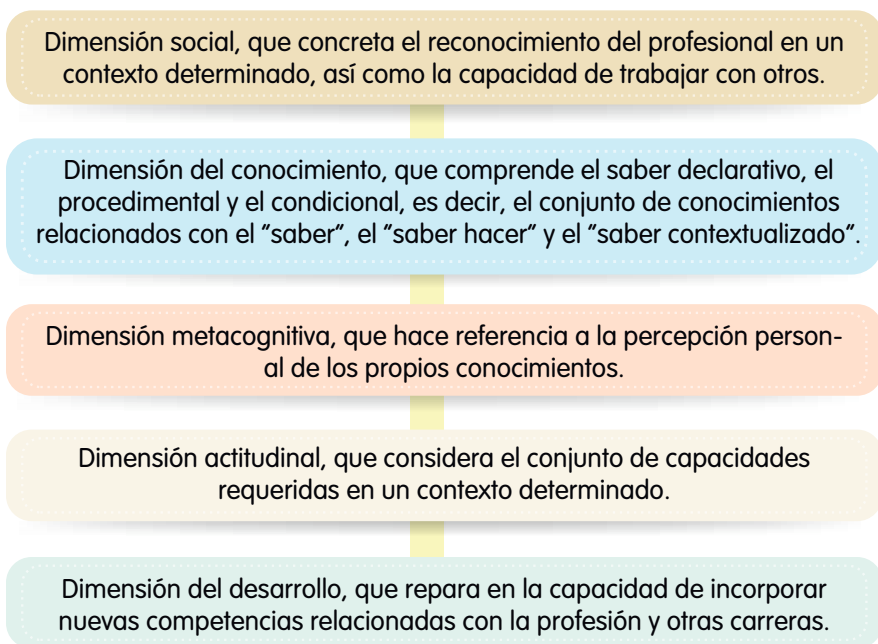
- a) Orientación y definición del formato;** el docente explica la funcionalidad de la bitácora, estableciendo un formato específico, ya sea teórico o digital, y los criterios a considerar para su llenado. El formato de la bitácora debe comprender mínimamente: actividad realizada, equipos e insumos utilizados, procedimiento aplicado (de acuerdo a la normativa y otros principios), mediciones y fallas detectadas, soluciones aplicadas, riesgos y observaciones técnicas.
- b) Registro durante el proceso formativo;** el registro debe ser llenado por el docente al momento de realizar la práctica en el aula-taller o laboratorio
- c) Revisión docente;** el docente debe revisar los registros realizados, corrigiendo la terminología técnica utilizada, el registro de datos y otros pertinentes, de acuerdo a los objetivos de enseñanza.
- d) Retroalimentación técnica;** el docente fomenta el debate y discusión, permitiendo la identificación de errores de procedimiento, la interpretación de datos, los criterios de diagnóstico y las soluciones aplicadas, así como la evaluación de otras opciones de abordaje.
- e) Evaluación y ajuste;** los estudiantes revisan el registro de la bitácora, la coherencia del procedimiento y los resultados obtenidos, estableciendo acciones correctivas para un posterior procedimiento. El hacer consciente los errores y aciertos del proceso permitirá un proceso más autónomo y eficiente.

Esta estrategia permite el desarrollo de un pensamiento crítico y diagnóstico, así como la responsabilidad profesional, fortaleciendo acciones para la prevención de riesgos y seguridad personal y del entorno. Asimismo, los docentes podrán visibilizar que los estudiantes no persiguen los mismos objetivos en el proceso de aprendizaje, adecuando su labor docente a las necesidades y expectativas de los estudiantes.

Criterios de evaluación

La evaluación por competencias se constituye en un proceso continuo e integral orientado a la recolección de evidencias sobre un desempeño profesional, con la finalidad de verificar el logro progresivo de las competencias establecidas en la matriz base y en las competencias específicas por carrera; esto a partir de un referente estandarizado e identificando aquellas áreas de desempeño que deben ser fortalecidas mediante capacitación, nivelación y otros, para que el estudiante alcance el nivel de competencia esperado. Implica por lo tanto juzgar la capacidad de realización, ejecución y demostración de desempeños técnicos en situaciones reales o simuladas de trabajo, más allá de un carácter abstracto y no excluyendo la medición del contenido conceptual que sustenta la competencia, por lo cual es una evaluación integral de conocimientos, habilidades, destrezas y valores en contextos específicos.

Desde el enfoque de la competencia laboral, Barbier (1999), propone cinco dimensiones básicas en la evaluación de competencias:



La valoración del aprendizaje se realizará mediante evidencias observables de desempeño, producto y conocimiento, articuladas a prácticas de laboratorio, actividades de taller, resolución de casos técnicos y proyectos aplicados. En ese marco, los elementos que definen la evaluación son las competencias que serán valoradas, el nivel de profundidad, el momento y los resultados esperados, para lo cual la selección de los métodos pertinentes al tipo de desempeño a evaluar, así como la selección adecuada de las evidencias concretas, es fundamental, ya que de éstas dependerá determinar el

nivel de competencia alcanzado por el estudiante, a fin de promover la mejora continua, la prevención de riesgos y la toma de decisiones técnicas responsables en el contexto de la transición energética.

En el siguiente cuadro se establecen los criterios generales de evaluación, los tipos de evidencias a considerar y los instrumentos aplicables al área de movilidad eléctrica, los cuales servirán de guía y podrán ser ajustados por el docente al momento de evaluar las competencias específicas desarrolladas de acuerdo a la naturaleza de la asignatura y la unidad temática:

Criterios de evaluación	Tipos de evidencia	Instrumentos de evaluación
1. Dominio técnico - Interpreta manuales técnicos, diagramas eléctricos y especificaciones del fabricante. - Identifica componentes de sistemas eléctricos, electrónicos y de alto voltaje. 2. Desempeño práctico - Ejecuta procedimientos de diagnóstico en vehículos híbridos y eléctricos. - Realiza verificaciones técnicas siguiendo protocolos establecidos. 3. Seguridad eléctrica - Aplica protocolos de bloqueo eléctrico - Utiliza correctamente EPP especializado para alto voltaje. - Identifica zonas de riesgo y previene accidentes. - Manipula baterías y componentes eléctricos sin generar riesgos ambientales. - Gestiona residuos tecnológicos conforme a la normativa ambiental. - Aplica criterios de eficiencia energética en la intervención técnica. 5. Rigurosidad profesional - Registra datos técnicos en informes o bitácoras. - Propone soluciones técnicas fundamentadas. - Trabaja con orden, responsabilidad y disciplina preventiva. 6. Actitudes profesionales - Respetar normas de seguridad y el trabajo colaborativo e inclusivo. - Demuestra ética laboral y responsabilidad social.	1. Evidencias de conocimiento - Cuestionarios técnicos - Análisis de casos - Interpretación de diagramas - Explicaciones de funcionamiento 2. Evidencias de desempeño - Prácticas de laboratorio y en taller. - Diagnóstico en vehículos híbridos y eléctricos - Mediciones eléctricas y aplicación de protocolos HV 3. Evidencias de producto Informe técnico - Reporte de diagnóstico - Plan de mantenimiento - Bitácora de intervención	- Rúbricas de desempeño - Listas de cotejo - Guías de observación - Estudio de casos técnicos - Proyectos aplicados

A continuación, se presenta un ejemplo de evaluación de competencias del área de movilidad eléctrica, articulando la unidad de competencia, el elemento competencia, el resultado de aprendizaje, los criterios, las evidencias y el instrumento de evaluación:

TEMA: Análisis de riesgos eléctricos y selección de equipos de protección		
Unidad de competencia:	Elemento competencial:	Resultado de aprendizaje
UC-2/Seguridad eléctrica y ocupacional: intervenir vehículos electrificados aplicando protocolos de seguridad de alto voltaje, bloqueo eléctrico, descarga de capacitores y uso de EPP especializado, demostrando actitud preventiva, disciplina y respeto por la igualdad de condiciones en el entorno laboral.	Identificar riesgos eléctricos en sistemas de alto voltaje de vehículos híbridos y eléctricos, seleccionando adecuadamente los equipos de protección personal y herramientas.	Reconoce zonas de riesgo eléctrico en vehículos híbridos y eléctricos, determina el nivel de peligro y selecciona equipos de protección personal y herramientas, antes de iniciar su intervención.

EJEMPLO:

Se podría considerar, entre otros, los siguientes criterios

Criterio de evaluación	Evidencia	Instrumento
Identifica correctamente las zonas de alto voltaje del vehículo	Evidencia de conocimiento	Cuestionario técnico
Selecciona adecuadamente guantes dieléctricos, careta, calzado y herramientas aisladas	Evidencia de desempeño	Guía de observación/ rúbrica práctica
Verifica ausencia de tensión utilizando instrumento apropiado	Evidencia de desempeño	Guía de observación

Infraestructura y equipamiento

La implementación del área de movilidad eléctrica en los Institutos técnicos y tecnológicos requiere de una infraestructura adecuada que garantice condiciones seguras y funcionales para el aprendizaje práctico, tales como talleres especializados, áreas delimitadas para trabajo con sistemas de alto voltaje, señalización de seguridad, sistemas de puesta a tierra y espacios destinados a la instalación y operación de equipos de carga y sistemas eléctricos. Asimismo, la infraestructura debe responder a criterios técnicos, normativos y de seguridad, favoreciendo un aprendizaje afín a las condiciones reales y óptimas de trabajo.

A continuación, se presenta un cuadro base de equipamiento mínimo requerido para el desarrollo del área estratégica de movilidad eléctrica en la formación superior técnica y tecnológica, el cual constituye una referencia esencial para el logro de las competencias establecidas.

Tipo de equipamiento	Item	Característica	Canti- dad	Necesidad	
				Año de formación	Alta/media/ baja
Máquinas estacionarias	Banco didáctico EV	Banco con motor eléctrico, inversor y BMS $\leq 60V$	2	Todos	Alta
Máquinas estacionarias	Estación de carga AC	Cargador modo 3 monofásico/trifásico	4	Todos	Alta
Máquinas estacionarias	Estación de balanceo de baterías	Equilibrador de baterías de alta y baja tensión	2	Todos	Alta
Máquinas estacionarias	Estación de carga y descarga de baterías	Cargador de baterías de alta tensión	2	Todos	Alta
Máquinas portátiles	Escáner EV/HEV	Diagnóstico sistemas HV, BMS, inversor	4	Todos	Alta
Máquinas portátiles	Megóhmetro	Medición aislamiento hasta 1000 V DC	5	Todos	Alta
Instrumentos de medición	Multímetro CAT III/IV	Hasta 1000 V, puntas aisladas	5	Todos	Alta
Instrumentos de medición	Pinza amperimétrica	AC/DC hasta 1000 A	5	Todos	Media
Herramientas	Herramientas aisladas	Juego certificado IEC 60900	5	Todos	Alta
Equipos de protección personal	Guantes dieléctricos	Clase 0 hasta 1000 V	20	Todos	Alta
Seguridad	Extintor ABC	5 lb – 15 lb	4	Todos	Alta
Seguridad	Botiquín	Primeros auxilios completo	2	Todos	Alta
Señalización	Kit señalización HV	Conos, cintas y avisos alto voltaje	4	Todos	Alta



Para el desarrollo de las temáticas vinculadas a movilidad eléctrica, los docentes de las asignaturas correspondientes deberán ajustar su planificación curricular incorporando estos contenidos en el desarrollo de sus clases. Para tal efecto, además de los contenidos base planteados en el presente documento, podrán remitirse a los recursos de la webgrafía sugerida para cada unidad temática, así como a las actividades prácticas propuestas, las cuales se encuentran incluidas en el acápite de Anexos. En este marco, y con el propósito de orientar el proceso de planificación docente, se presenta a continuación una propuesta de plan de clase elaborada bajo el enfoque por competencias, la cual constituye un referente para el desarrollo de las sesiones formativas. Este modelo deberá ser adaptado a los lineamientos académicos institucionales de cada instituto tecnológico, a sus reglamentos internos de planificación (formatos de plan de clase), así como a las condiciones y características del contexto de aplicación, ya sea en aula, taller o laboratorio.

PLAN DE CLASE					
1. Datos generales					
Instituto	ITT.....	Carrera	Mecánica Automotriz	Año/Semestre	Tercer Año
Asignatura	Diagnóstico del automóvil	Unidad temática	7. Fallas de aislamiento en vehículos híbridos y	Tema de la clase	7.2. Equipamiento y seguridad para el diagnóstico
Docente		Gestión académica	2026	Duración	90 min (2 Horas académicas)
2. Competencia y resultado de aprendizaje					
COMPETENCIA	Evaluar fallas en sistemas electrónicos automotrices, sensores, actuadores, redes y sistemas de control mediante escáner automotriz, osciloscopio y multímetro automotriz, actuando con rigurosidad técnica, pensamiento analítico, equidad de género y responsabilidad ambiental.			"Área estratégica Movilidad Eléctrica"	Movilidad eléctrica
Resultado de aprendizaje	Contenidos				
	Conceptuales (saber)	Procedimentales (hacer)	Actitudinales (ser)		
- Identifica códigos de falla relacionados a aislamiento eléctrico en sistemas EV/HEV mediante escáner automotriz. - Mide el estado de aislamiento en un sistema simulado o banco didáctico utilizando megóhmetro, aplicando protocolos de seguridad. - Registra e interpreta resultados técnicos en una bitácora, determinando posibles causas de falla.	- Fundamentos básicos de aislamiento eléctrico en sistemas HV - Equipos de diagnóstico: megger, multímetro, escáner - Categorías de seguridad eléctrica en vehículos	- Lectura de códigos de falla con escáner - Medición de resistencia de aislamiento (megóhmetro) - Verificación de ausencia de tensión - Registro de datos en bitácora técnica	- Rigurosidad técnica - Trabajo seguro - Responsabilidad en el manejo de equipos HV - Orden y registro técnico (bitácora)		

3. Secuencia didáctica de la clase			
Tiempo	Estrategias metodológicas	Recursos y materiales	Evaluación
20 min	1. INICIO: PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA: El Docente presenta un problema real/simulado a través de imágenes o diapositivas: “Vehículo híbrido presenta el código de falla P0AA6 (falla de aislamiento en sistema de alto voltaje). El dueño (cliente), señala que el vehículo entró en modo seguro y se desactiva el sistema eléctrico” El docente establece preguntas problematizadoras: 1. ¿Qué significa una falla de aislamiento? 2. ¿Qué riesgos implica para el técnico? 3. ¿Qué posibles causas pueden generar esta falla? 4. ¿Qué procedimiento técnico aplicarías? 5. ¿Qué instrumentos utilizarías? El docente motiva una lluvia de ideas, estableciendo un análisis de conocimientos previos, permitiendo a los estudiantes establecer hipótesis. El docente concluye con el objetivo de la clase: “Realizar el aislamiento en sistemas HV, utilizando...”	Recursos didácticos: • Presentación digital (diapositivas con caso P0AA6) • Imágenes/esquemas de sistemas HV • Fichas técnicas o extractos de manuales de fabricante Equipos e instrumentos: • Escáner automotriz • Megóhmetro (medidor de aislamiento) • Multímetro digital	1. Criterio de Evaluación: Ejecuta la verificación del estado de aislamiento en un sistema de alto voltaje, aplicando el procedimiento técnico, utilizando correctamente el megóhmetro y cumpliendo normas de seguridad, registrando e interpretando los resultados para emitir un diagnóstico preliminar en trabajo colaborativo.
50 min	2. DESARROLLO: Actividad 1: Explicación técnica del tema (10 min) El docente a partir de imágenes y otros, explica los conceptos base: Fundamentos básicos de aislamiento eléctrico en HV; categorías de seguridad en vehículos eléctricos; los tipos de herramienta y equipos a considerar el análisis, estableciendo diversos casos de solución. Actividad 2: Demostración práctica (15 m in.) El docente explica los riesgos eléctricos y procedimiento correcto de diagnóstico, para ello demuestra: - Uso correcto de EPP especializado. - Verificación de ausencia de tensión - Uso adecuado del megóhmetro - Criterios para la lectura del escáner El docente motiva una lluvia de ideas, estableciendo un análisis de conocimientos previos, permitiendo a los estudiantes establecer hipótesis. El docente concluye con el objetivo de la clase: “Realizar el aislamiento en sistemas HV, utilizando...” Actividad 3: Práctica en Taller (25 min) El docente aplica el método de Aprendizaje Colaborativo, realizando la conformación de grupos, delimitación de roles de los estudiantes (Técnico ejecutor, responsable de seguridad, técnico de medición y registrador), el tiempo de la actividad y el puntaje adicional que obtendrá el primer grupo que concluya la actividad, presentación de datos en la plantilla de registro de datos (bitácora), así como la breve explicación del procedimiento seguido para obtener los mismos. El enunciado será el siguiente: “Ejecutar el procedimiento técnico de verificación del estado de aislamiento en un sistema de alto voltaje (HV), simulado o real, aplicando protocolos de seguridad eléctrica y utilizando los instrumentos adecuados”. El docente para la actividad proporciona datos: - Lectura de escáner - Síntomas del vehículo - Condición de operación Para ello cada grupo, a partir de la estructura colaborativa conformada, deberá: 1. Identificar el sistema o componente a evaluar. 2. Aplicar el procedimiento de verificación de ausencia de tensión. 3. Realizar la medición de resistencia de aislamiento utilizando el megóhmetro. 4. Interpretar los valores obtenidos en función de parámetros técnicos de referencia. 5. Contrastar los resultados, registrar en la bitácora y explicar los resultados, es decir el diagnóstico preliminar.	• Banco de prueba / sistema simulado HV (o maqueta didáctica) Equipos de protección personal (EPP) especializado: • Guantes dieléctricos • Gafas de seguridad • Calzado de seguridad • Ropa de trabajo adecuada Material de trabajo: • Plantilla de bitácora técnica (impresa o digital) • Marcadores / pizarra	2. INDICADORES DE EVALUACIÓN SABER (conceptual): • Reconoce fundamentos de aislamiento eléctrico en sistemas HV. • Identifica riesgos eléctricos y normas de seguridad aplicables. HACER (procedimental): • Aplica correctamente el procedimiento de verificación de ausencia de tensión. • Utiliza adecuadamente el megóhmetro y escáner automotriz. • Registra datos técnicos de forma ordenada en la bitácora y emite un diagnóstico preliminar. SER (actitudinal): • Cumple normas de seguridad y uso de EPP. • Trabaja de forma colaborativa respetando roles asignados. 3. TIPO DE EVIDENCIA • Ejecución del procedimiento técnico en taller (diagnóstico de aislamiento HV). • Bitácora técnica completa con registro de datos, interpretación y diagnóstico preliminar. • Explicación oral del procedimiento y resultados. • Comportamiento en trabajo colaborativo y cumplimiento de normas de seguridad. 4. INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN • Guía de observación • Rúbrica de evaluación de producto (bitácora) • Lista de cotejo (trabajo colaborativo)
20 min	3. CIERRE: Evaluar los resultados de la colaboración: Cada grupo de forma breve expone sus resultados y el registro de su bitácora, asimismo, explica sus aciertos y dificultades de trabajo y su incidencia en los resultados. El docente guía la discusión en el aula, en base a las siguientes cuestionantes: ¿Qué error se pudo cometer?, ¿Qué riesgos implica un mal diagnóstico? Respondiendo a través de los aportes de los estudiantes a la pregunta problematizadora inicial de la clase. El docente consolida aprendizajes, reforzando conceptos de seguridad en alto voltaje, importancia del diagnóstico correcto y la importancia del uso adecuado de instrumentos y de los EPP.		
OBSERVACIONES:			
FIRMA DOCENTE		FIRMA JEFE DE CARRERA/DIRECTIVO	

Acevedo Camacho, J., Caipa Tolosa, N., Barajas, G.A. et al. (2002). **Manual para diseñar estructuras curriculares y módulos de formación para el desarrollo de competencias en la formación profesional integral**. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Dirección de Formación Profesional. Colombia.

Alvarado, T. R. (2023). **Vehículos híbridos y eléctricos**. Wolf Bolivia.

Alvarado, T. R. (2024). **EVSE**. Wolf Bolivia.

Barbier, Jean-Marie (1999). **Prácticas de profesión. Evaluación y profesión**. Buenos Aires: Ed. Novedades Educativas, Serie Documentos.

Barton, Jonathan (1998). **La dimensión Norte-Sur de las industrias de limpieza ambiental y la difusión de tecnologías limpias**. Revista CEPAL, N° 64, abril de 1998, pp. 129-150.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2016). **Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe**. Naciones Unidas.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2024). **Análisis y propuestas para un transporte público eléctrico desde la perspectiva de género: un enfoque basado en la economía circular y la búsqueda de oportunidades económicas para las mujeres en tres ciudades latinoamericanas (LC/TS/2024/61)**. Naciones Unidas.

Comisión Europea (1988). **The emerging industries, Panorama of EC Industry**. Office for Official Publications of European Community.

Cobo, J.P. (2022), **La bitácora como estrategia de enseñanza e instrumento de aprendizaje**. En: Parra Puentes, A. y Carrillo Salazar, M. L. (eds. científicas). *Herramientas pedagógicas: Manual para la creación de textos en el aula* (pp. 163-177). Colombia: Editorial Universidad Santiago de Cali. <https://doi.org/10.35985/9786287501591.8>

Departamento de Electrónica IES Juan de la Cierva. (s. f.). **Electrotecnia básica**. España.

Domínguez Soriano, E. J., & Ferrer Ruiz, J. (2024). **Sistemas de transmisión de fuerzas y trenes de rodaje**. Editex.

Eckenfels, T., Fischer, N., Lehmann, S., Neuberth, U., & Reitz, D. (2022). **Innovative Hybrid Transmissions with Electric DNA**. En Schaeffler Kolloquium. Digital Conference Book 2022: Hybrid Powertrain. Schaeffler Group. <https://www.schaeffler.com/en/media/dates-events/kolloquium/digital-conference-book-2022/hybrid-powertrain/>

Ghiotto, Luciana y Pascual, Rodrigo F. (2008). **Trabajo decente versus trabajo digno: acerca de una nueva concepción del trabajo**. UNAM, México.

<https://biblat.unam.mx/hevila/HerramientaBuenosAires/2010/no44/12.pdf>

Hendershot, J.R. y Miller, T.J.E. (2010). **Design of brushless permanent-magnet machines**. Motor Design Books LLC.

Hernández, H. (s. f.). **La relación de la electricidad con el cuerpo humano y sus efectos**. **Electricistas.cl**. <https://electricistas.cl/la-relacion-de-la-electricidad-con-el-cuerpo-humano-y-sus-efectos/>

Holst, F. y Solbreck, M. (2014). **Numerical and experimental investigation of the Atkinson cycle on a 2.0 liter 4-cylinder turbocharged SI-engine** (Tesis de maestría, Chalmers University of Technology). Publication Library.

Ministerio de Planificación del Desarrollo (2021). **Plan de desarrollo económico y social 2021-2025**. Estado Plurinacional de Bolivia.

Nilson, L.B. (2010). **Teaching at its best: A research-based resource for college instructors** (3.^a ed.). Jossey-Bass.

Organización Internacional del Trabajo (2019). **El gran problema del empleo en el mundo: Las malas condiciones de trabajo**. 13 de febrero del 2019.

<https://www.ilo.org/es/resource/news/el-gran-problema-del-empleo-en-el-mundo-las-malas-condiciones-de-trabajo>

Organización Internacional de Trabajo (OIT) (2023). **Trabajo decente y la agenda 2030 de desarrollo sostenible. Revisión septiembre 2023**. https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@dgreports/@dcomm/documents/publication/wcms_470340.pdf

Rajagopal, R. (1992). **Clean technology development -The ultimate solution?** Norwegian Journal of Geography, N° 46.

Ramos Calambas, J.F. (2020). **Modelado y control del motor síncrono de imanes permanentes para la aplicación en vehículos eléctricos** [Tesis de pregrado/maestría, Universidad Autónoma de Occidente]. Repositorio Institucional.

Rashid, M.H. (2015). **Electrónica de potencia** (4.^a ed., R. Navarro Salas, Trad.). México: Pearson.

Sutler, H.P. (1989). **An integrated approach to low waste technology**, International Journal of Clean Technologies, N° 1.

Sendyka, B., & Sochacki, M. (2009). **Ecological problems of internal combustion engines in city traffic**. Journal of KONES Powertrain and Transport, 16(2), 437-444. <https://kones.eu/ep/2009/vol16/no2/JO%20KONES%202009%20NO.%202%20VOL.%2016%20SENDYKA.pdf>

Sladogna, M.G. (2002). **Una mirada a la construcción de competencias desde el sistema educativo: la experiencia argentina**. Boletín Cinterfor, (149), 55-72.

Urquiza, A. y Billi, M. (2020). **Seguridad hídrica y energética en América Latina y el Caribe: definición y aproximación territorial para el análisis de brechas y riesgos de la población**. Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/138), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Vargas Leyva, M.R. (2008). **Diseño curricular por competencias**. Asociación Nacional de Facultades y Escuelas de Ingeniería (ANFEI). México

Zanelli, Jorge (2011). **Energía nuclear ¿riesgo u oportunidad?** En Cubillos Meza, A. y Estenssoro Saavedra, J. (comps.) *Energía y medio ambiente. Una ecuación difícil para América Latina: los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático*. CLACSO.

Zolezzi, Manuel (2011). **Energía y medio ambiente: el desafío de producir energía eléctrica en el contexto del cambio climático**. En Cubillos Meza, A. y Estenssoro Saavedra, J. (comps.) *Energía y medio ambiente. Una ecuación difícil para América Latina: los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático*. CLACSO.

Fuentes electrónicas consultadas:

Abilita Ltd. (2022). **Electric And Hybrid Vehicles** [PDF].<https://www.abilitald.com/wp-content/uploads/2022/12/Electric-and-Hybrid-Vehicles-PDFDrive-.pdf>

Analfatécnicos. (s. f.). **Sistemas de puesta a tierra** [PDF].
<https://www.analfatecnicos.net/archivos/08.PuestaATierra.pdf>

Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2019). **RA8-031: Instalación de estaciones de carga para vehículos eléctricos** [PDF].
<https://www.epm.com.co/content/dam/epm/proveedores-y-contratistas/RA8-031.pdf>

EURECAR. (2023). **Safety in Hybrid and Electric Vehicle Works** [PDF].
https://www.eurecar.org/sites/default/files/2023-08/gb_etf_safety_in_hybrid_and_electric_vehicle_works_29.pdf

Ferreiro, A. A. (2018). **Aprendizaje basado en proyectos para el desarrollo de la competencia digital docente en la formación inicial del profesorado**. Relatec: Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa, 17(1), 9-24. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6566732>

Power, N. (2021). **DIY lithium batteries: The essential guide to master the function of lithium batteries and how to build a battery pack for electric bikes**.
<https://books.google.com/>

Suzuki Motor Corporation. (2019). **Safe handling of high voltage electrical components in electric vehicles** [PDF].https://www.globalsuzuki.com/xev_battery/download/pdf/idis_common_hv_en.pdf

ANEXO 1: UNIDAD TEMÁTICA 2

PRÁCTICA 1: RECONOCIMIENTO DE COMPONENTES DEL SISTEMA HÍBRIDO Y FLUJOS DE ENERGÍA

Competencia: Identificar los componentes principales de un vehículo híbrido y sus flujos de energía mediante la inspección visual y el monitoreo en consola, en condiciones de taller, demostrando rigor técnico y orden en la identificación de sistemas de alta tensión.



1. Materiales:

- Vehículo híbrido (Toyota Prius o similar).
- Escáner automotriz con funciones para sistemas híbridos.
- Guantes aislantes para alta tensión (como medida de precaución).
- Manual de servicio del fabricante



2. Pasos:

- a) Identificar visualmente el inversor en el compartimento del motor, el motor de combustión interna (1NZ 1.5L) y el transeje híbrido.
- b) Localizar los conectores y cables de alta tensión (color naranja) que conectan la batería HV con el inversor.
- c) Encender el vehículo en modo "READY" y observar el monitor de energía en la pantalla central.
- e) Verificar el flujo de energía en tres estados: vehículo detenido, inicio de marcha (modo eléctrico) y frenado regenerativo.
- f) Registrar el estado de carga (SOC) de la batería de alta tensión mediante el uso del escáner.



3. Resultados de aprendizaje:

Identifica la ubicación de los componentes críticos del sistema híbrido y diferencia los flujos de energía según la condición de manejo del vehículo.

PRÁCTICA 2: ANÁLISIS DEL CONJUNTO DE LA BATERÍA DE ALTA Tensión Y SEGURIDAD

Competencia: Verificar el estado y los elementos de seguridad de la batería de alta tensión (HV) mediante la interpretación de datos técnicos y procedimientos de inspección, en condiciones de seguridad controladas, demostrando compromiso con los protocolos de seguridad eléctrica.



1. Materiales:

- Batería de alta tensión (instalada en vehículo o en banco de pruebas).
- Multímetro digital de alta impedancia.
- Jumper de seguridad (Service Plug).
- Equipo de protección personal (EPP) para alta tensión.



2. Pasos:

- a) Localizar físicamente el conjunto de la batería de alta tensión (debajo de los asientos posteriores o en el maletero).
- b) Identificar el Jumper de seguridad y realizar el procedimiento de retiro siguiendo las normas de seguridad del fabricante.
- c) Verificar visualmente el estado del ventilador de refrigeración y los sensores de temperatura de la batería.
- d) Identificar la ubicación de los relevadores principales del sistema (SMR) y la ECU de la batería.
- e) Medir el voltaje de la batería auxiliar de 12V para asegurar que el sistema de control tenga alimentación para los diagnósticos.



3. Resultados de aprendizaje:

Reconoce los dispositivos de seguridad de la batería HV y comprende el procedimiento técnico para el aislamiento de alta tensión en caso de mantenimiento.

ANEXO 2: UNIDAD TEMÁTICA 3

PRÁCTICA 1: APLICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE SEGURIDAD Y LOCK-OUT TAG-OUT (LO/TO) PARA SISTEMAS DE ALTO VOLTAJE

Competencia: Aplicar procedimientos de bloqueo y etiquetado (LO/TO) en sistemas de alto voltaje, identificando puntos de desconexión y verificando la ausencia de tensión conforme a protocolos de seguridad, demostrando rigurosidad técnica y responsabilidad.



1. Materiales:

- Vehículo híbrido/eléctrico de entrenamiento o simulador de HV
- Dispositivos LO/TO (candados, etiquetas, dispositivos de bloqueo)
- Guantes y equipo PPE HV
- Manual de procedimientos



2. Pasos:

- a) Identificar circuitos de alto voltaje y puntos seguros de desconexión.
- b) Aplicar bloqueo de baterías y componentes HV según norma LO/TO.
- c) Etiquetar con información clara (trabajo en curso / no energizar).
- d) Verificar mediante mediciones que no existe tensión residual.
- e) Registrar procedimiento en formato de bitácora.



3. Resultado de aprendizaje:

Ejecuta el procedimiento de bloqueo y etiquetado (LO/TO) en sistemas de alto voltaje, verificando la ausencia de tensión y cumpliendo normas de seguridad.

PRÁCTICA 2: ANÁLISIS DE RIESGOS ELÉCTRICOS Y SELECCIÓN DE EQUIPOS DE PROTECCIÓN

Competencia: Identificar riesgos eléctricos y químicos en vehículos híbridos y eléctricos, en escenarios de diagnóstico, mantenimiento o reparación, analizando condiciones de trabajo y características del sistema, demostrando criterio técnico, responsabilidad y enfoque preventivo.



1. Materiales:

- Lista de riesgos (alto voltaje, baterías, químico)
- Casos de trabajo
- Equipos de protección personal y colectivo (EPP/EPC)
- Fichas técnicas de equipos



2. Pasos:

- a) Analizar un escenario de trabajo (diagnóstico, reparación o mantenimiento).
- b) Identificar riesgos eléctricos y químicos posibles.
- c) Seleccionar EPP (guantes HV, gafas, aislantes) y EPC (pantallas, señalización) adecuados.
- d) Presentar justificación técnica de elección de equipos y medidas preventivas.



3. Resultado de aprendizaje:

Identifica riesgos eléctricos y químicos en un escenario de trabajo, describiendo sus posibles consecuencias.

ANEXO 3: UNIDAD TEMÁTICA 4

PRÁCTICA 1: PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO EN COMPONENTES DE ALTA TENSIÓN

Competencia: Determinar la integridad del aislamiento dieléctrico en sistemas de alta tensión de vehículos híbridos y eléctricos, mediante la aplicación de procedimientos de desenergización y el uso de megóhmetro, en condiciones de seguridad controladas, demostrando rigor técnico, precisión en la medición y compromiso con la prevención de electrocución por contacto indirecto.



1. Materiales:

- Vehículo o banco de baterías híbrido/eléctrico.
- Megóhmetro (comprobador de aislamiento) con rangos de 500V y 1000V
- Multímetro CAT III/IV.
- Equipo de protección: guantes aislantes de goma (clase 0) y guantes de protección de cuero.



2. Pasos:

- a) Realizar el procedimiento de desactivación del sistema de alta tensión extrayendo el conector de servicio según el punto 2.4 del manual.
- b) Verificar con el multímetro la ausencia de tensión en los puntos de prueba después del tiempo de espera de descarga.
- c) Inspeccionar visualmente los cables naranjas en busca de daños mecánicos o quemaduras.
- d) Conectar el terminal de tierra del megóhmetro a un punto de metal descubierto del chasis.
- e) Conectar la punta de prueba al terminal positivo (y luego al negativo) del componente de alta tensión.
- f) Aplicar la tensión de prueba y registrar el valor en megohmios. Si el valor es inferior a 10MOMh (o el estándar del fabricante), se diagnostica una falla de aislamiento.



3. Resultados de aprendizaje:

Mide la resistencia de aislamiento con megóhmetro y diagnostica la integridad dieléctrica del sistema HV conforme a valores técnicos establecidos.

PRÁCTICA 2: LOCALIZACIÓN DE FALLAS DE AISLAMIENTO POR CONTAMINACIÓN Y FUGAS

Competencia: Identificar fallas de aislamiento en sistemas de alta tensión causadas por contaminación, humedad o fugas de electrolito, mediante inspección técnica, uso de scanner y verificación de parámetros eléctricos, en condiciones de diagnóstico, demostrando análisis crítico, precisión y responsabilidad en el mantenimiento correctivo.



1. Materiales:

- Batería de alta tensión (fuera del vehículo o en simulador).
- Solución de limpieza dieléctrica.
- Espejo de inspección y linterna potente.
- Scanner automotriz para lectura de códigos de falla (DTC) relacionados con “Isolation Fault”.



2. Pasos:

- a) Utilizar el scanner para identificar si el sistema de monitoreo de aislamiento del vehículo ha registrado códigos de error.
- b) Realizar la inspección de fuga según el punto 2.2.4 del manual, buscando residuos de electrolito en los terminales.
- c) Inspeccionar los conectores de alta tensión en busca de humedad, corrosión o suciedad acumulada que pueda generar un arco eléctrico.
- d) Limpiar los aisladores y conectores con producto dieléctrico y secar completamente.
- e) Reevaluar la resistencia de aislamiento tras la limpieza para confirmar la corrección de la falla.



3. Resultado de aprendizaje:

Detecta y corrige fallas de aislamiento por contaminación o fugas, verificando la recuperación de los valores de resistencia del sistema.

ANEXO 4: UNIDAD TEMÁTICA 5

PRÁCTICA 1: PRUEBA DE AISLAMIENTO Y SEGURIDAD EN EL SISTEMA DE ALTA TENSIÓN

Competencia: Verificar el aislamiento eléctrico en componentes de alta tensión mediante el uso de un megóhmetro y la interpretación de valores técnicos, en condiciones de taller, demostrando rigor en la aplicación de protocolos de seguridad y protección personal.



1. Materiales:

- Vehículo híbrido o eléctrico con sistema de alta tensión.
- Megóhmetro (comprobador de resistencia de aislamiento).
- Multímetro digital de alta impedancia (CAT III o IV).
- Equipo de protección personal (guantes clase 0, careta y calzado aislante).
- Manual de servicio del fabricante.



2. Pasos:

- a) Realizar el procedimiento de desenergización retirando el conector de servicio (Jumper) y esperando el tiempo de descarga de capacitores.
- b) Verificar la ausencia de tensión en los terminales de entrada del inversor utilizando el multímetro.
- c) Conectar el megóhmetro entre el terminal positivo de alta tensión y la masa del chasis del vehículo.
- d) Aplicar la tensión de prueba según especificación y registrar el valor de resistencia de aislamiento obtenido.
- e) Repetir la medición en el terminal negativo y comparar ambos resultados con los límites mínimos establecidos por el fabricante.



3. Resultados de aprendizaje:

Determina el estado del aislamiento eléctrico del sistema de alta tensión, garantizando la seguridad del operario y la integridad de los componentes electrónicos.

PRÁCTICA 2: DIAGNÓSTICO Y BALANCEO DE MÓDULOS DE LA BATERÍA HV

Competencia: Diagnosticar el estado de salud (SOH) de los módulos de una batería de alta tensión mediante la medición de voltajes internos y análisis de datos en tiempo real, siguiendo procedimientos técnicos de mantenimiento preventivo y correctivo.



1. Materiales:

- Paquete de batería de alta tensión desmontado o accesible.
- Escáner automotriz con software de diagnóstico específico.
- Multímetro digital.
- Herramientas de mano aisladas.



2. Pasos:

- a) Acceder a la lectura de datos en vivo con el escáner, para observar el voltaje individual de todos los bloques o bloques pares.
- b) Identificar módulos con desviaciones de voltaje superiores a 0.3V respecto al promedio del paquete.
- c) Realizar una inspección visual de las barras de unión (busbars) para detectar corrosión o puntos de alta resistencia.
- d) Medir el voltaje de reposo de cada módulo individual utilizando el multímetro para confirmar las lecturas del escáner.
- e) Registrar las variaciones de temperatura reportadas por los termistores de la batería durante un ciclo de carga rápido.



3. Resultados de aprendizaje:

Identifica módulos defectuosos o desbalanceados dentro de un paquete de batería HV y propone acciones correctivas basadas en el análisis de datos técnicos.

ANEXO 5: UNIDAD TEMÁTICA 6

PRÁCTICA 1: IDENTIFICACIÓN Y COMPROBACIÓN DEL ESTATOR EN MOTORES PMSM

Competencia: Evaluar el estado de los arrollamientos del estator en un motor síncrono de imanes permanentes mediante mediciones de resistencia y aislamiento, en condiciones de laboratorio, demostrando precisión técnica y orden en el manejo de máquinas eléctricas.



1. Materiales:

- Motor síncrono de imanes permanentes (desarmado o con terminales accesibles).
- Multímetro digital de alta precisión.
- Megóhmetro (comprobador de aislamiento).
- Manual de especificaciones del fabricante.
- Limpiador de contactos dieléctrico.



2. Pasos:

- a) Identificar visualmente las tres fases (U, V y W) en la caja de conexiones o terminales del motor.
- b) Medir la resistencia entre las fases (U-V, V-W y W-U) utilizando el multímetro en la escala más baja.
- c) Determinar que los valores de resistencia sean iguales entre sí, cumpliendo con la simetría del motor trifásico.
- d) Ejecutar una prueba de aislamiento con el megóhmetro entre cada fase y la carcasa (masa) del motor.
- e) Registrar los valores obtenidos y compararlos con los límites de resistencia de aislamiento establecidos por el fabricante.



3. Resultados de aprendizaje:

Determina la integridad eléctrica de las bobinas del estator, detectando posibles cortocircuitos o fallas de aislamiento en motores de tracción eléctrica

PRÁCTICA 2: ANÁLISIS DE LA RELACIÓN MOTOR-INVERSOR Y SENSORES DE POSICIÓN

Competencia: Analizar la interacción entre el motor de imanes permanentes y el inversor mediante el monitoreo de sensores de posición y señales de fase, siguiendo procedimientos técnicos de diagnóstico, para asegurar el correcto sincronismo del sistema motriz.



1. Materiales:

- Vehículo eléctrico o banco de pruebas (motor + inversor).
- Osciloscopio automotriz de dos o más canales.
- Escáner de diagnóstico profesional.
- Herramientas de mano aisladas.
- Diagramas eléctricos del sistema de control.



2. Pasos:

- a) Localizar el sensor de posición (Resolver o efecto Hall) encargado de informar la posición del rotor a la ECU.
- b) Conectar el escáner y monitorear la frecuencia de rotación de la máquina en relación con la frecuencia de alimentación.
- c) Utilizar el osciloscopio para visualizar las formas de onda de las fases durante la rotación del motor.
- d) Comprobar la correlación entre la señal del sensor de posición y la activación de los transistores de potencia del inversor.
- e) Medir la tensión inducida en los terminales (generación) haciendo girar el rotor de forma externa.



3. Resultados de aprendizaje:

Valida la sincronización electrónica necesaria para el funcionamiento de los motores PMSM y la comunicación entre los sensores de posición y el módulo de potencia.

ANEXO 6: UNIDAD TEMÁTICA 7

PRÁCTICA 1: ANÁLISIS E INSPECCIÓN DE LA TRANSMISIÓN HÍBRIDA DEDICADA (DHT)

Competencia: Evaluar la configuración mecánica y los modos de acople de una transmisión híbrida mediante la identificación de componentes y el seguimiento de flujos de potencia, en condiciones de taller, demostrando precisión técnica y orden en el diagnóstico de sistemas de propulsión electrificados.



1. Materiales

- Vehículo híbrido con transmisión serie/paralelo o maqueta seccionada de transmisión DHT.
- Escáner automotriz profesional.
- Juego de herramientas manuales aisladas.
- Manual de taller y diagramas de despiece de la transmisión.
- Elevador hidráulico o soportes de seguridad.



2. Pasos:

- a) Identificar visualmente la carcasa de la transmisión y localizar los puntos de unión entre el motor térmico y los motores eléctricos.
- b) Localizar el sistema de embrague laminar y los juegos de engranajes de relación fija descritos en la documentación técnica.
- c) Conectar el escáner y monitorear el estado de acople del embrague durante las transiciones entre el modo serie y el modo paralelo.
- d) Comprobar el funcionamiento de los actuadores encargados de gestionar la distribución de par entre la unidad de potencia eléctrica y la mecánica.
- e) Registrar las temperaturas de operación de la unidad de transmisión para asegurar que los sistemas de lubricación y refrigeración interna sean óptimos.



3. Resultados de aprendizaje:

Diferencia las arquitecturas de transmisión híbrida y comprende el funcionamiento de los componentes mecánicos que permiten la combinación de torque entre motores eléctricos y térmicos.

ANEXO 7: UNIDAD TEMÁTICA 8

PRÁCTICA 1: ANÁLISIS DE CONDUCTIVIDAD Y ESTADO DEL REFRIGERANTE DIELECTRICO

Competencia: Analizar la conductividad y estado de refrigerantes en sistemas térmicos de vehículos eléctricos, utilizando instrumentos de medición y criterios técnicos de comparación, en un contexto de taller o laboratorio, demostrando precisión, análisis crítico y responsabilidad técnica.



1. Materiales:

- Muestras de refrigerante específico para EV (baja conductividad) y refrigerante convencional.
- Refractómetro (para medir concentración de glicol).
- Multímetro digital con capacidad de medir megohmios
- Dos recipientes de vidrio y electrodos de prueba (pueden ser puntas de prueba limpias).



2. Pasos:

- a) Llenar un recipiente con refrigerante convencional y otro con refrigerante específico para vehículos eléctricos (EV).
- b) Configurar el multímetro en la escala más alta de resistencia y sumergir las puntas a una distancia fija (p. ej., 2 cm) en ambas muestras para comparar la resistencia eléctrica.
- c) Utilizar el refractómetro para medir el porcentaje de mezcla de la muestra EV y determinar si cumple con las especificaciones del fabricante según el libro de Denton (típicamente, 50/50).
- f) Registrar los valores de resistencia y los grados de protección térmica encontrados en una tabla comparativa.



3. Resultado de aprendizaje:

Mide y compara la conductividad y concentración de refrigerantes, evaluando su cumplimiento con parámetros técnicos del sistema EV.

PRÁCTICA 2: GESTIÓN ACTIVA Y PURGADO DEL SISTEMA TÉRMICO DE ALTA Tensión

Competencia: Ejecutar procedimientos de llenado, purgado y verificación del sistema de gestión térmica en vehículos eléctricos, utilizando herramientas de diagnóstico y siguiendo protocolos técnicos, asegurando que no existan bolsas de aire que provoquen “puntos calientes” en el pack de baterías, demostrando orden, rigurosidad y responsabilidad.



1. Materiales:

- Vehículo híbrido/eléctrico o banco de entrenamiento con sistema de refrigeración activo.
- Equipo de diagnóstico (scanner automotriz) con funciones especiales.
- Unidad de llenado por vacío (opcional) o kit de llenado manual.
- Fuente de alimentación estable (mantenedor de batería de 12V).



2. Pasos:

- a) Identificar los componentes del circuito: bomba eléctrica de refrigerante, intercambiador de calor (Chiller) y depósito de expansión.
- b) Conectar el scanner al puerto OBD-II y navegar hasta el módulo de control de la batería o gestión térmica.
- c) Activar de forma manual la bomba de agua eléctrica a través del scanner para verificar su funcionamiento y flujo.
- d) Ejecutar la rutina de “Purga de aire” (Bleeding routine) siguiendo los tiempos marcados por el software, mientras se monitorea el nivel en el depósito.
- e) Verificar mediante el flujo de datos del scanner que las temperaturas de entrada y salida del refrigerante se estabilicen.



3. Resultados de aprendizaje:

Realiza el purgado del sistema térmico y verifica su funcionamiento mediante parámetros de temperatura y flujo.

ANEXO 8: UNIDAD TEMÁTICA 9

PRÁCTICA 1: ANÁLISIS DINÁMICO DE LA SINCRONIZACIÓN DE VÁLVULAS

Competencia: Analizar la sincronización de válvulas en motores con ciclo Atkinson, mediante instrumentos de medición mecánica y comparación con parámetros técnicos, en condiciones de laboratorio, demostrando precisión, criterio técnico y capacidad de análisis.



1. Materiales:

- Motor didáctico con tecnología VVT-i o similar (común en Toyota Prius/Híbridos).
- Disco graduado de grados del cigüeñal.
- Reloj comparador (palpador).
- Manual de servicio del motor.



2. Pasos:

- a) Instalar el disco graduado en la polea del cigüeñal y ubicar el punto muerto superior (PMS).
- b) Colocar el reloj comparador sobre el platillo de la válvula de admisión del cilindro número 1.
- c) Girar el motor manualmente y registrar en qué grado del cigüeñal la válvula de admisión cierra completamente después del punto muerto inferior (PMI).
- d) Comparar los grados registrados con los de un motor Otto estándar para evidenciar el cierre tardío (LIVC).
- e) Calcular la relación de expansión teórica frente a la de compresión real.



3. Resultado de aprendizaje:

Determina el cierre de la válvula de admisión y compara su comportamiento con el ciclo Otto, identificando el efecto Atkinson.

PRÁCTICA 2: DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE VARIACIÓN DE FASE EN CICLO ATKINSON

Competencia: Diagnosticar el funcionamiento del sistema de variación de fase en motores híbridos, utilizando scanner y osciloscopio para analizar señales y parámetros en tiempo real, en condiciones de operación, demostrando rigor técnico, interpretación de datos y responsabilidad profesional.



1. Materiales:

- Vehículo híbrido o motor con VVT activo.
- Scanner automotriz con lectura de datos en vivo.
- Osciloscopio automotriz.
- Bomba de vacío manual o multímetro.



2. Pasos:

- a) Conectar el scanner e identificar los parámetros de “Intake Camshaft Position” y “Target Angle”.
- b) Utilizar el osciloscopio para captar la señal PWM que la ECU envía a la válvula OCV (Oil Control Valve).
- c) Provocar variaciones de RPM y observar cómo la computadora retrasa el cierre de la válvula de admisión para entrar en modo Atkinson.
- d) Verificar que el ángulo de fase coincida con los requerimientos de diseño descritos por el fabricante.
- e) Registrar el cambio en el vacío del múltiple de admisión al activarse el ciclo Atkinson.



3. Resultado de aprendizaje:

Verifica el funcionamiento del sistema de variación de fase (VVT), analizando parámetros y señales de control en condiciones reales de operación.

ANEXO 9: UNIDAD TEMÁTICA 10

PRÁCTICA 1: CARACTERIZACIÓN DE DIODOS DE POTENCIA Y RECTIFICACIÓN

Competencia: Examinar el comportamiento eléctrico y la caída de tensión en diodos de potencia mediante pruebas de polarización directa e inversa, en condiciones de laboratorio, demostrando precisión en la toma de datos y cumplimiento de las normas de seguridad electrónica



1. Materiales:

- Diodos de potencia de diversas especificaciones.
- Fuente de alimentación de corriente continua (DC).
- Osciloscopio con sondas de potencia.
- Multímetro digital.
- Disipadores de calor y grasa térmica.



2. Pasos:

- a) Identificar físicamente los terminales de ánodo y cátodo en diferentes encapsulados de diodos de potencia.
- b) Realizar una prueba de continuidad para descartar dispositivos en cortocircuito o abiertos.
- c) Montar un circuito de polarización directa y medir la caída de voltaje (V_f) a diferentes niveles de corriente.
- d) Observar mediante el osciloscopio el tiempo de recuperación inversa (t_{rr}) al conmutar el diodo.
- e) Registrar la temperatura del componente durante la operación continua para analizar la eficiencia de la disipación térmica.



3. Resultados de aprendizaje:

Diferencia las características operativas de los diodos de potencia frente a los de baja señal y comprende su función crítica en los sistemas de rectificación.

PRÁCTICA 2: CONMUTACIÓN Y CONTROL CON TRANSISTORES IGBT

Competencia: Comprobar el funcionamiento de un transistor IGBT como interruptor de potencia mediante la aplicación de señales de control en la compuerta (Gate), siguiendo procedimientos técnicos de medición, para validar su capacidad de gestión de altas corrientes en inversores.



1. Materiales:

- Módulo de transistor IGBT (o transistor individual).
- Generador de funciones o circuito de disparo (Gate Driver).
- Carga resistiva o inductiva para la prueba.
- Osciloscopio de dos canales.
- Herramientas de mano aisladas.



2. Pasos:

- a) Identificar los terminales de compuerta (Gate), colector y emisor en el diagrama del fabricante.
- b) Aplicar una señal de control de bajo voltaje en la compuerta y observar la activación del flujo de corriente entre colector y emisor.
- c) Medir con el osciloscopio el tiempo de encendido (turn-on) y apagado (turn-off) del dispositivo.
- d) Analizar el comportamiento del diodo de libre circulación (freewheeling) integrado en el módulo cuando se trabaja con cargas inductivas.
- e) Documentar la relación entre el voltaje de compuerta y la saturación del transistor para determinar su punto de operación óptimo.



3. Resultados de aprendizaje:

Valida la operación del IGBT como elemento de control de potencia y comprende el modelo de circuito equivalente Darlington-Mosfet que rige su funcionamiento.

ANEXO 10: UNIDAD TEMÁTICA 11

PRÁCTICA 1: SIMULACIÓN DE CONVERSIÓN DC - AC Y CONTROL DE MOTOR

Competencia: Analizar el proceso de conversión de energía DC-AC en sistemas de tracción eléctrica, mediante el uso de simuladores e instrumentos de medición, en condiciones de laboratorio, demostrando cómo un inversor convierte la tensión de la batería en energía AC para el motor y cómo se controla su frecuencia, actuando con comprensión técnica, precisión y capacidad de interpretación



1. Materiales:

- Simulador de motor AC/BLDC con panel de control
- Fuente DC ajustable (simulando batería)
- Multímetro y osciloscopio



2. Pasos:

- a) Configurar la fuente DC simulando una batería de 48-400 V según el motor.
- b) Conectar a un inversor de laboratorio y medir la salida AC usando osciloscopio.
- c) Variar la frecuencia de salida y observar cambio en velocidad del motor.
- d) Registrar voltaje, corriente y frecuencia y graficar relación entre frecuencia y velocidad del motor.



3. Resultados de aprendizaje:

Mide y relaciona variables eléctricas y frecuencia con la velocidad del motor en un sistema de conversión DC-AC.

PRÁCTICA 2: ENSAYO DE PROTECCIÓN Y AISLAMIENTO EN INVERSORES

Competencia: Verificar condiciones de seguridad y aislamiento en inversores de alta tensión en HEV/EV, aplicando protocolos de seguridad eléctrica y medición, demostrando disciplina preventiva, orden y responsabilidad profesional.



1. Materiales:

- Simulador de inversor y motor de laboratorio
- Guantes HV, gafas, tapete aislante
- Multímetro y pinzas de corriente



2. Pasos:

- a) Revisar manual de seguridad y realizar Lock-Out Tag-Out (LO/TO) del circuito.
- b) Medir continuidad y aislamiento entre terminales DC y chasis.
- c) Verificar que el inversor esté correctamente conectado al motor y a la BMS.
- d) Documentar todos los valores y procedimientos de seguridad.



3. Resultado de aprendizaje:

Aplica procedimientos de seguridad y mide aislamiento en inversores, registrando resultados conforme a criterios técnicos.

PRÁCTICA 3: DIAGNÓSTICO Y MONITOREO DE EFICIENCIA DE INVERSORES

Competencia: Evaluar la eficiencia y desempeño de inversores en sistemas de tracción eléctrica, mediante la medición de variables eléctricas y análisis de condiciones de carga y operación, en entornos de taller/laboratorio, demostrando rigor técnico, capacidad de interpretación y criterio para la optimización energética.



1. Materiales:

- Inversor conectado a motor de laboratorio o simulador
- Medidores de potencia DC y AC



2. Pasos:

- a) Configurar motor con inversor en carga parcial y máxima.
- b) Medir potencia consumida de DC y potencia entregada a motor AC.
- c) Calcular eficiencia del inversor para distintas condiciones.
- d) Analizar cómo la eficiencia varía según frecuencia y torque, y discutir causas.



3. Resultado de aprendizaje:

Calcula y analiza la eficiencia del inversor en distintas condiciones de carga, interpretando su comportamiento en función de la frecuencia y el torque.

ANEXO 11: UNIDAD TEMÁTICA 12

PRÁCTICA 1: DISEÑO DEL CIRCUITO ELÉCTRICO PARA UNA ESTACIÓN DE CARGA EV

Competencia: Diseñar circuitos eléctricos para estaciones de carga EV, seleccionando conductores, protecciones y dispositivos conforme a normativa técnica, en contextos de diseño eléctrico, demostrando precisión, criterio técnico y responsabilidad.



1. Materiales:

- Plano eléctrico base de una instalación industrial o comercial
- Tablas de conductores y protecciones
- Norma RA8-031 (adjunto al contenido)
- Software básico de dibujo eléctrico o papel milimétrico



2. Pasos:

- a) Identificar el punto de conexión de la estación de carga al tablero principal.
- b) Determinar la potencia nominal y corriente de la estación.
- c) Seleccionar el calibre de conductores adecuados.
- d) Definir protecciones contra sobrecorriente y falla a tierra.
- e) Dibujar el esquema unifilar completo del circuito.
- f) Resultados de la práctica:
- g) Esquema eléctrico correcto y técnicamente justificado.
- h) Selección adecuada de protecciones y conductores.



3. Resultados de aprendizaje:

Dimensiona conductores y selecciona protecciones para una estación de carga según parámetros técnicos.

PRÁCTICA 2: MONTAJE FÍSICO Y CANALIZACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE CARGA EV

Competencia: Ejecutar el montaje y canalización de estaciones de carga EV, aplicando técnicas de instalación eléctrica y criterios de seguridad, en condiciones de taller, demostrando orden, precisión y responsabilidad.



1. Materiales:

- Estación de carga EV (real o simulada)
- Herramientas manuales
- Canalizaciones eléctricas (PVC, EMT)
- Equipo de protección personal



2. Pasos:

- a) Definir la ubicación de montaje de la estación.
- b) Instalar la estación respetando alturas y accesos seguros.
- c) Canalizar conductores desde el tablero hasta la estación.
- d) Verificar fijación, orden y protección mecánica del cableado.
- e) Resultados de la actividad práctica:
- f) Estación correctamente instalada y canalizada.
- g) Trabajo ordenado y seguro.



3. Resultados de aprendizaje:

Instala y canaliza conductores eléctricos respetando criterios técnicos y de seguridad.

PRÁCTICA 3: INSPECCIÓN TÉCNICA Y PRUEBA FUNCIONAL DE UNA ESTACIÓN DE CARGA EV

Competencia: Verificar el funcionamiento de estaciones de carga EV, mediante pruebas eléctricas y simulación de carga, aplicando procedimientos técnicos, demostrando rigor, análisis y responsabilidad.



1. Materiales:

- Multímetro
- Pinza amperimétrica
- Lista de verificación técnica
- Simulador de carga o equipo de prueba



2. Pasos:

- a) Verificar continuidad y correcta conexión del circuito.
- b) Comprobar actuación de protecciones eléctricas.
- c) Simular condiciones de carga y observar comportamiento.
- d) Registrar resultados y emitir informe técnico.
- e) Resultados de la actividad práctica:
- e) Informe de inspección técnica.
- f) Identificación de posibles no conformidades



3. Resultados de aprendizaje:

Realiza pruebas de funcionamiento y verifica la correcta operación del sistema.

ANEXO 12: UNIDAD TEMÁTICA 13

PRÁCTICA 1: IDENTIFICACIÓN DE TERMINALES Y MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE CONTACTO

Competencia: Verificar terminales y resistencia de contacto en conectores tipo 2 (IEC 62196), mediante la interpretación de diagramas y el uso de instrumentos de medición de precisión, en condiciones de laboratorio, demostrando rigor técnico, orden y compromiso con la seguridad eléctrica.



1. Materiales:

- Conector/plug tipo 2 (IEC 62196).
- Multímetro digital con escala de miliohmios o microhmios.
- Manual de especificaciones del fabricante.
- Limpiador de contactos eléctrico.



2. Pasos:

- a) Identificar visualmente los siete terminales del conector: L1, L2, L3, N, PE (tierra), CP (Control Pilot) y PP (Proximity Pilot).
- b) Limpiar los terminales para asegurar una medición precisa.
- c) Medir la resistencia entre los terminales de potencia y sus correspondientes cables, verificando que no exceda los valores máximos indicados de la ficha técnica.
- d) Realizar una prueba de continuidad en el pin de tierra (PE) para garantizar la seguridad del usuario.
- e) Registrar los valores y comparar con el límite de incremento de temperatura especificado.



3. Resultados de aprendizaje:

Identifica pines y mide la resistencia de contacto del conector tipo 2, comparando resultados con valores técnicos establecidos.

PRÁCTICA 2: VERIFICACIÓN DE LOS PROTOCOLOS DE SEGURIDAD PP Y CP EN EL CONECTOR

Competencia: Diagnosticar el funcionamiento de los protocolos de comunicación PP y CP en conectores de carga EV, utilizando instrumentos de medición y simulación de condiciones de operación, en entornos de prueba, demostrando análisis técnico, precisión y responsabilidad.



1. Materiales:

- Cable de carga tipo 2.
- Multímetro y osciloscopio.
- Resistencias de prueba (simuladores de estado de vehículo).
- Pie de rey (calibrador vernier).



2. Pasos:

- a) Medir la resistencia del pin PP (Proximity Pilot) respecto a tierra para determinar la capacidad de corriente máxima que el cable puede soportar según su diseño.
- b) Verificar las dimensiones físicas del conector utilizando el pie de rey, asegurando que cumple con los acoplamientos mecánicos.
- c) Simular la conexión a una estación de carga y observar mediante el osciloscopio la señal PWM en el pin CP (control Pilot).
- d) Comprobar que el mecanismo de bloqueo (latch) funcione correctamente al insertar el conector, evitando extracciones accidentales bajo carga.



3. Resultado de aprendizaje:

Mide y analiza señales PP y CP, verificando su funcionamiento conforme parámetros técnicos del sistema de carga.

ANEXO 13: UNIDAD TEMÁTICA 14

PRÁCTICA 1: MEDICIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA PUESTA A TIERRA DE UN PUNTO DE CARGA EV

Competencia: Verificar la resistencia de puesta a tierra en estaciones de carga EV, mediante el uso de instrumentos de medición y aplicación de procedimientos técnicos, en condiciones de prueba controladas, demostrando rigurosidad técnica, orden y compromiso con la seguridad eléctrica.



1. Materiales:

- Estación de carga simulada o cargador EV (wallbox).
- Telurómetro / medidor de resistencia de tierra.
- Varillas de prueba auxiliares.
- Multímetro y toma de tierra de prueba.



2. Pasos:

- a) Identificar los puntos de conexión a tierra del tablero y del cargador.
- b) Instalar las varillas auxiliares de prueba alrededor de la toma a tierra existente según el método de caída de potencial.
- c) Medir resistencia de puesta a tierra usando el telurómetro.
- d) Registrar valores y evaluar si cumple criterios
- e) Discutir qué implica un valor alto de resistencia en la seguridad de los usuarios de la estación.



3. Resultados de aprendizaje:

Mide e interpreta la resistencia de puesta a tierra utilizando el telurómetro, verificando su cumplimiento con criterios de seguridad.

PRÁCTICA 2: DISEÑO Y CÁLCULO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA UNA ESTACIÓN DE CARGA EV

Competencia: Diseñar sistemas de puesta a tierra para estaciones de carga EV, aplicando cálculos básicos y criterios técnicos según condiciones del terreno y normativa, demostrando precisión, análisis y responsabilidad profesional.



1. Materiales:

- Planos eléctricos básicos de una estación de carga.
- Tabla de resistividades del suelo (puede estimarse).
- Papel milimétrico o software básico de diseño (AutoCAD, etc.).
- Criterios de resistencia de tierra mínima.



2. Pasos:

- a) Definir la ubicación del cargador y tipo de suelo.
- b) Calcular la resistencia de un electrodo vertical (varilla) usando fórmula estándar (por ejemplo, método de caída de potencial).
- c) Diseñar un arreglo de electrodos (varillas + conductor horizontal) para lograr la resistencia objetivo.
- d) Esquematizar el recorrido de conductores de protección y puesta a tierra desde cargador a la barra principal.
- e) Presentar un breve informe con cálculo, dibujo y justificación.

3. Resultado de la práctica:

- Dibujo con dimensiones de electrodos.
- Cálculo de resistencias y justificación de cumplir con seguridad.
- Comprensión de cómo las condiciones del terreno influyen en el diseño.



4. Resultado de aprendizaje:

- Calcula y diseña un sistema de puesta a tierra, determinando disposición de electrodos y conductores.

ANEXO 14: UNIDAD TEMÁTICA 15

PRÁCTICA 1: DIAGNÓSTICO DEL ESTADO DE COMUNICACIÓN EN ESTACIONES DE CARGA (EVSE)

Competencia: Analizar los estados de comunicación entre el vehículo y la estación de carga mediante la interpretación de la señal PWM en el pin de control (CP), en condiciones de servicio técnico, demostrando precisión en la medición y comprensión de los protocolos de seguridad



1. Materiales:

- Estación de carga (Wallbox) operativa.
- Simulador de vehículo eléctrico (EV Simulator) o vehículo real.
- Osciloscopio portátil o multímetro con funciones de frecuencia.
- Puntas de prueba y conectores adecuados al tipo de toma (Tipo 1 o Tipo 2).



2. Pasos:

- a) Identificar el terminal de Control Pilot (CP) y el terminal de tierra (PE) en el conector de la estación.
- b) Medir el voltaje de reposo (estado A) y confirmar que se encuentra en +12V DC antes de realizar la conexión.
- c) Conectar el simulador y documentar el cambio de voltaje al estado B (+9V) para validar que la estación detecta la presencia del vehículo.
- d) Comprobar la transición al estado C (+6V PWM) y observar la forma de onda en el osciloscopio para calcular el ciclo de trabajo (Duty Cycle) que define la corriente máxima permitida.
- e) Simular un error a tierra (estado F) y registrar el tiempo de respuesta de la estación para cortar el suministro eléctrico.



3. Resultados de aprendizaje:

Interpreta las variaciones de voltaje y frecuencia en el circuito de control para diagnosticar fallas de comunicación en el proceso de carga.

PRÁCTICA 2: INSPECCIÓN TÉCNICA Y MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE WALLBOX

Competencia: Ejecutar procedimientos de mantenimiento preventivo y resolución de fallas comunes en estaciones de carga AC mediante la inspección de componentes críticos y pruebas de continuidad, siguiendo los estándares de seguridad industrial vigentes.



1. Materiales:

- Estación de carga AC (Wallbox) instalada.
- Kit de herramientas aisladas (desarmadores, pinzas).
- Limpiador de contactos eléctrico y dieléctrico.
- Analizador de estaciones de carga (EVSE Tester).
- Manual de instalación y mantenimiento del fabricante.



2. Pasos:

- a) Examinar el estado físico de la manguera y el conector, buscando signos de desgaste, quemaduras o pines doblados.
- b) Comprobar la rigidez mecánica y el funcionamiento del botón de parada de emergencia (EPO) para descartar bloqueos por vandalismo o uso accidental.
- c) Realizar una limpieza técnica de los terminales de potencia utilizando aire comprimido y solventes dieléctricos.
- d) Verificar la conectividad del módem o tarjeta SIM en estaciones inteligentes, asegurando que el estado del servidor figure como "Online".
- e) Contrastar los valores de resistencia de la puesta a tierra con las especificaciones técnicas, para garantizar la protección contra fallas de aislamiento.



3. Resultados de aprendizaje:

Aplica rutinas de mantenimiento técnico para prolongar la vida útil de los equipos de recarga y asegurar la continuidad del servicio al usuario final.



**LED SERVICIO DE
LIECHTENSTEIN
PARA EL DESARROLLO**

LED Servicio de Liechtenstein para el Desarrollo
Obrajes, Calle 7
La Paz – Bolivia
Tel.: (+591-2) 241-9965, 211-2141 Int. 112
www.swisscontact.bo



swisscontact

Swisscontact
Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico
Calle 15 de Achumani, esquina Iriarte casa # 5
Tel. +591 (2) 2775566
La Paz - Bolivia
www.swisscontact.bo