



Diseño de un sistema KERS para vehículo eléctrico basado en supercondensadores



Marcos Mier Fanjul

Universidad de Oviedo

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

UO264559

Tutor: Manuel Rico Secades



Índice

1. Resumen	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 3
2. Introducción	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 4
3. Coche eléctrico	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 5
4. Modelo eléctrico del EV	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 10
5. Sistemas de recuperación de energía cinética (KERS)	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 17
6. Supercondensadores	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 24
7. Supercondensadores implementados en la red del EV	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 28
8. Modelo del bus de continua	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 31
9. Estrategia de control “droop”	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 34
10. Control droop con zona muerta	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 37
11. Circuito de potencia	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 40
12. Convertidor CC – CC bidireccional de 2 ramas con modo de control de corriente (Imax, Toff)	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 45
13. Presentación del circuito de simulación	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 51
14. Resultados de la simulación regular	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 53
15. Control de tensión del módulo de supercondensadores	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 66
16. Conclusiones y trabajo futuro	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 69
17. Referencias	-	-	-	-	-	-	-	-	p. 71



1. Resumen

La venta de vehículos eléctricos (EV) ha visto un gran auge en los últimos años. Debido a esto, están surgiendo múltiples tecnologías que buscan mejorar las características de este tipo de vehículos. Los nuevos modelos de baterías con mayor autonomía o los sistemas de conexión a red V2G son claros ejemplos.

En este trabajo se busca incrementar la eficiencia del vehículo eléctrico por medio de la implementación de sistemas de recuperación de energía cinética (KERS) basados en supercondensadores. Para ello se estudiará cómo implementar esta clase de sistemas, sus características y se realizará una simulación con componentes ideales para entender su comportamiento.

El modelo simplificado de un vehículo eléctrico consta de un bus de continua con una tensión nominal, a la cual se conectan los distintos componentes del vehículo. Por medio de este bus se llevan a cabo los intercambios de energía entre los componentes, lo cual permite al vehículo desplazarse. Los elementos más comunes del EV suelen ser la batería, el motor eléctrico, los sistemas auxiliares y el sistema de alimentación de conexión a red. Otro componente que puede conectarse al bus de continua del vehículo es el KERS basado en supercondensadores, el cual se estudiará en detalle.

Existen múltiples tipos de KERS, diferenciándose principalmente entre mecánicos, como un volante de inercia, o eléctricos, como los supercondensadores. Analizando la eficiencia de los distintos sistemas, se ha estimado que el KERS eléctrico es el que mejores resultados puede traer a la hora de mejorar las características del EV. Un supercondensador es similar a un condensador electrolítico común, pero su capacidad es entre 3 y 6 unidades de magnitud superior. Tiene una enorme densidad de potencia, pudiendo suministrar grandes picos de energía. Su tamaño y precio también son mayores. A la hora de implementar este sistema, se ha escogido un módulo de varios condensadores, en lugar de un único SC, ya que las prestaciones equivalentes del módulo en su conjunto son más adecuadas.

Para conectar este módulo a la red del vehículo se ha implementado un circuito de potencia, ya que existe una gran diferencia entre la tensión nominal del bus y la del módulo. Se ha escogido un convertidor CC – CC bidireccional de 2 ramas. Como método de control de este convertidor se ha programado un modo de control de corriente, el cual dirigirá el comportamiento del circuito, guiando el flujo de corriente en un sentido o el otro en función de las necesidades del sistema. A la hora de conectar el módulo de SC al bus de continua, dado que existen varios sistemas de almacenamiento (batería, módulo de SC...) debe establecerse un control que rija cuánta energía se almacena en cada uno. Para ello, se ha programado un modo de control “droop” con zona muerta. Este modo de control permite a los SC suministrar corriente únicamente cuando hagan falta grandes cantidades de energía de forma instantánea, ayudando a la batería principal en estas situaciones extremas.

Teniendo el sistema definido, se ha realizado una simulación del circuito con condiciones variantes en el programa LTSpice y se han analizado los resultados, para comprender el comportamiento de los supercondensadores en distintas situaciones.



2. Introducción

Estos últimos años, la concienciación social contra el cambio climático y la contaminación ha impulsado la búsqueda de nuevas tecnologías limpias y sostenibles. En el sector de la automoción, el vehículo eléctrico ha sido un gran avance en la reducción de emisiones producidas por el transporte de particulares. Los efectos de los gases emitidos por los motores de combustión interna (CI) son evidentes hoy en día en multitud de grandes ciudades. Según la Agencia Europea del Medio Ambiente, se estima que alrededor de 31.520 personas mueren anualmente en España debido a la contaminación atmosférica [1]. Un gran número de habitantes suele equivaler a un gran número de vehículos en la zona. Esto hace de las grandes ciudades, núcleos de contaminación focalizada. La implementación del coche eléctrico ayudaría a reducir en gran medida las emisiones producidas por el consumo de combustibles fósiles de los vehículos convencionales, mejorando de esta manera la calidad del aire y, por tanto, el nivel de vida en dichos núcleos de población.

Los vehículos eléctricos (se referirá a ellos por sus siglas en inglés, EV) han sufrido un drástico auge en las últimas décadas. El interés social por esta tecnología y las políticas de reducción de emisiones establecidas por diferentes instituciones gubernamentales de multitud de países han impulsado a las empresas a acelerar el desarrollo de las tecnologías relacionadas con el coche eléctrico. La evolución de las baterías, el aumento de la autonomía, la reducción de los costes, el desarrollo de distintos sistemas de carga... Todas estas tecnologías son actualmente de vital relevancia para las compañías del sector automovilístico. Sin embargo, a pesar de los grandes puntos a favor que trae consigo el EV, está aún lejos de ser una tecnología perfecta. Uno de los mayores inconvenientes es sin duda la reducida autonomía en comparación con los coches de CI. El almacenamiento de energía eléctrica en grandes cantidades es un problema de gran relevancia actualmente, y el cual afecta especialmente a los vehículos eléctricos. El desarrollo de baterías de mayor capacidad, la mejora en la eficiencia de la conversión energética o los sistemas de recuperación de energía son sistemas que intentan aplacar este inconveniente.

Los sistemas de recuperación de energía cinética (KERS) se encargan de recuperar y/o reutilizar energía malgastada por el vehículo, para de esta manera, mejorar la eficiencia del sistema en su conjunto. Existen varios tipos de sistemas KERS. El más conocido es el sistema de volante de inercia, el cual utiliza la propia inercia de la rotación del eje del motor para almacenar energía cuando se reduce la velocidad de giro de dicho eje. También existen sistemas de recuperación de energía por suspensión activa, los cuales recuperan la energía perdida por los sistemas de suspensión del vehículo. En los coches eléctricos, un sistema KERS realmente efectivo es la implementación de supercondensadores. Éstos son un tipo de condensadores cuyo valor de capacitancia es muy elevado. Los condensadores convencionales, como los cerámicos o los electrolíticos, tienen unos valores de capacitancia alrededor de los picofaradios y los nanofaradios [2]. Los valores de capacitancia de los supercondensadores pueden oscilar entorno a los cientos de faradios. Estos componentes permiten una rápida descarga de energía eléctrica en cortos periodos de tiempo. Su tiempo de ciclo de carga y descarga es mucho menor

que el de una batería, lo cual los hace idóneos para usos que requieren grandes cantidades de energía en momentos puntuales.

3. Coche eléctrico

El número de vehículos en las carreteras aumenta cada año, así como su producción [3][4]. En 2020, había en circulación 10 millones de coches eléctricos, lo que representa tan solo el 1% del total de vehículos matriculados [5]. Sin embargo, en estos últimos años, el crecimiento en las ventas de EV está incrementándose exponencialmente. En 2020, las ventas en el mercado del automóvil se desplomaron un 16%, en gran medida debido a la crisis del COVID-19. Mientras tanto, las ventas de coches eléctricos se incrementaron un 40% respecto a 2019 [5]. Esta tendencia se lleva acumulando durante varios años. En la Figura 1 se pueden apreciar las ventas de EV por año en las distintas regiones del mundo.

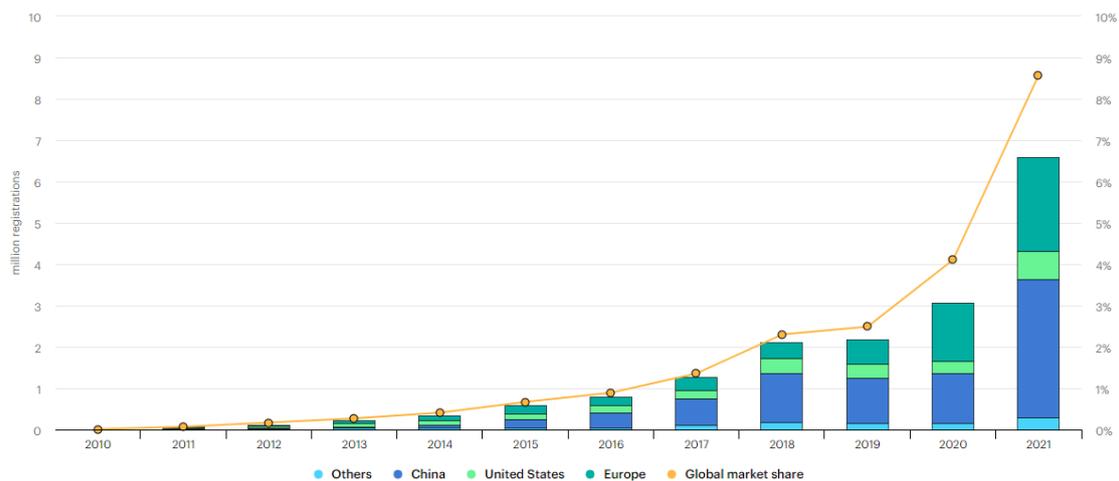


Fig. 1. Ventas mundiales de coches eléctricos entre 2001 y 2021 [50]

Hay múltiples razones por las que los coches eléctricos están aumentando su popularidad. En primer lugar, la percepción social que se tiene sobre este producto es muy positiva. Debido a que el funcionamiento de los EV produce cero emisiones de gases de efecto invernadero [6], el consumidor ve este producto como una tecnología limpia y sostenible. Poner recursos en el desarrollo de vehículos eléctricos mejora la imagen de marca de la empresa en cuestión. Esto incentiva a más empresas a entrar en el sector y competir, lo que a su vez aumenta exponencialmente la velocidad del desarrollo de estos sistemas. Actualmente, empresas de nivel global en el sector del automóvil, como pueden ser Volkswagen, BMW o Toyota, están invirtiendo gran cantidad de fondos y recursos en el desarrollo de vehículos eléctricos. Volkswagen lidera las inversiones en este campo con una cartera de 112 mil millones de dólares [7].

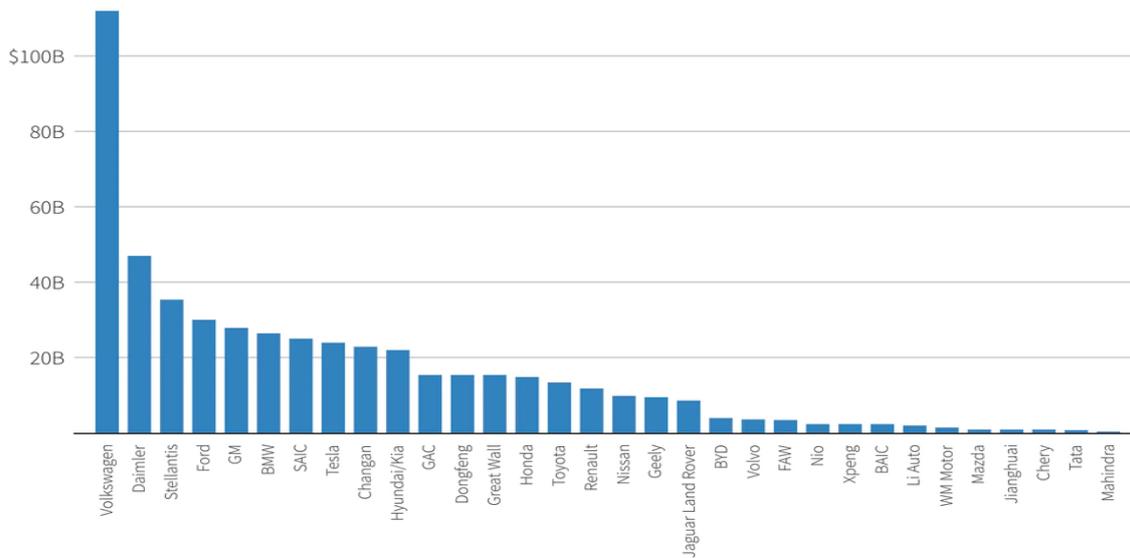


Fig. 2. Inversiones mundiales en tecnologías eléctricas y desarrollo de baterías en el sector del automóvil [50]

Por otro lado, la concienciación climática ha tenido una gran repercusión política, lo cual ha incentivado a gobiernos e instituciones de todo el mundo a buscar una conversión eléctrica de la movilidad de forma rápida y eficaz. Multitud de leyes han salido adelante para favorecer el avance del vehículo eléctrico en el sistema actual. Empezando por la Agenda 2030 y los 17 objetivos de desarrollo sostenible [8], entre los cuales se encuentra el cuidado y protección del medio ambiente, lo que automáticamente descarta a los vehículos de combustión interna como una alternativa sostenible a largo plazo e inclina la balanza a favor de tecnologías más limpias, como el propio EV. A raíz de estas medidas globales tomadas por entidades como las Naciones Unidas o la Comisión Europea, los gobiernos de distintos países han ido legislando en concordancia con estas ideas de sostenibilidad. En España, por ejemplo, se aprobó en Julio de 2021 un Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) el cual planifica una inversión de 4.300 millones de euros en el sector del vehículo eléctrico [9].

Otro aspecto clave en el incremento del número de ventas de EV es la gran mejora que se ha producido en la tecnología relacionada con este producto. Los avances en motores eléctricos, electrónica de potencia, baterías, etc...han sido determinantes a la hora de ofrecer a los consumidores un producto de una calidad cada vez superior y con unas prestaciones que cada vez se hacen más competitivas.

Un aspecto que ha sufrido una sustancial mejora son las prestaciones generales de los EV. La velocidad, la potencia y la eficiencia. El motor eléctrico tiene una mayor eficiencia frente al motor de combustión, debido a las grandes pérdidas en forma de calor de este último. El proceso de combustión en un motor de gasolina tiene una eficiencia de “tanque a rueda” de entre 14 – 33 %. Mientras tanto, el motor eléctrico tiene una eficiencia de “batería a rueda” de entre 50 – 80 % [10]. Como se puede apreciar, la diferencia es muy significativa, lo que coloca al EV muy por delante en términos de eficiencia.

Otro aspecto primordial en el que el sector del vehículo eléctrico ha estado trabajando encarecidamente es la autonomía de las baterías eléctricas. Esta es, sin duda, una de las mayores desventajas que tiene el EV frente a los vehículos de combustión. Como ejemplo, un coche de gasolina puede tener una autonomía de alrededor de 800 km de media. Los modelos con mayor eficiencia pueden sobrepasar incluso los 1000 km. El EV no alcanza aún estas cifras, pero los grandes avances en este campo han provocado un enorme incremento en la autonomía de los coches eléctricos más actuales. El Nissan Leaf de 2011, tenía una autonomía de 199 km [11], mientras que, actualmente, el Tesla Model S puede alcanzar los 600 km de autonomía [12]. Esta mejora cambia por completo el panorama del vehículo eléctrico. En un primer momento, los EV tenían una función de uso diario. Debido a la poca distancia que se podía recorrer con ellos, se utilizaban principalmente para desplazamientos cortos, como ir al trabajo o moverse por la ciudad. Sin embargo, las nuevas características de los últimos modelos permiten desplazamientos lo suficientemente largos como para plantear al EV como única opción. Antes, si se quería realizar un viaje de larga distancia, se requería un vehículo de combustión. Ahora, las nuevas baterías de los coches eléctricos, sumadas a las cada vez más estaciones de carga establecidas por la red vial, presentan la opción de una sustitución total del vehículo de CI. Como se puede apreciar en la Figura 3, la autonomía de los vehículos eléctricos sigue aumentando año tras año, acercándose cada vez más a valores similares a los de un CI.

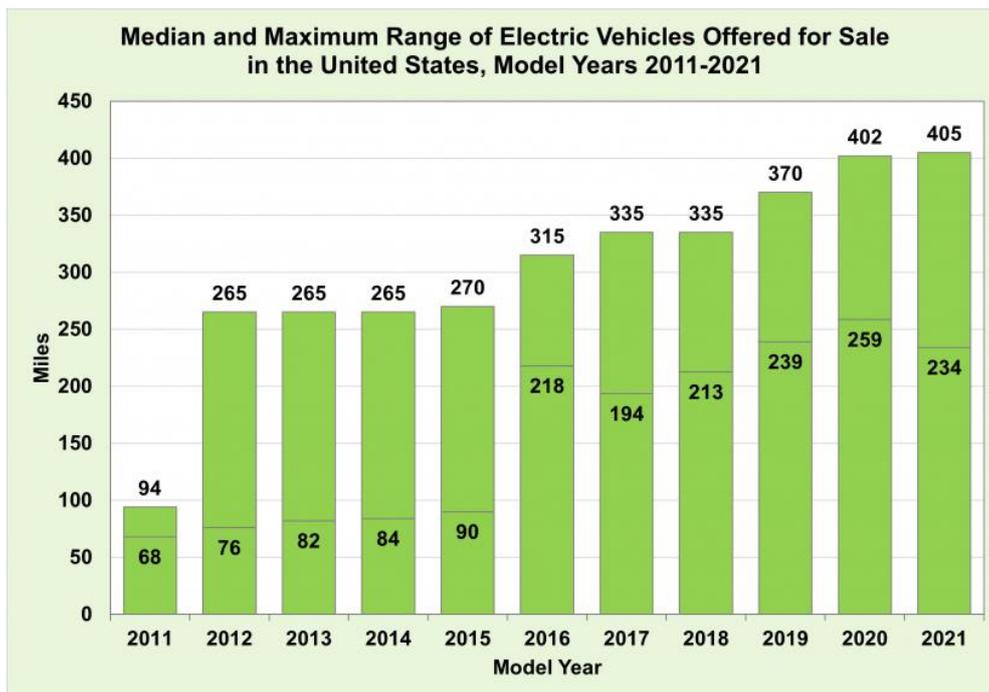


Fig. 3. Autonomía media y máxima de los vehículos eléctricos en venta en Estados Unidos entre los años 2011 y 2021 [51].

Viniendo de un sistema enormemente adaptado para los vehículos de combustión interna, el salto al coche eléctrico conlleva numerosas dificultades. Ya no solo el desarrollo de la tecnología referente al vehículo en sí. Además, se debe implementar una infraestructura adecuada que permita la circulación de los EV de forma continuada y global. Para facilitar esta incorporación del coche eléctrico al sistema de circulación actual, se deben construir, por ejemplo, ciertas estaciones de carga donde los conductores

puedan recargar las baterías de sus vehículos en caso de necesidad. De la misma manera que el sistema de gasolineras y distribución de carburantes ya existente actualmente, se debería promover un sistema de puntos de carga y cableado de distribución eléctrica que permitiese ofrecer este servicio. Esta implementación daría más facilidades a los propietarios de EV, lo cual incentivaría a su vez adquisición de este tipo de vehículos. Muchos gobiernos ya están llevando a cabo medidas relacionadas. En Reino Unido existen ya más de 20.000 estaciones de carga repartidas por el país [13]. Además, el gobierno británico planea alcanzar las 300.000 estaciones de carga para el año 2030 [14].

Teniendo en cuenta lo anterior, y siendo conscientes de la falta de infraestructura actual, cabe preguntarse cómo son capaces de circular entonces los vehículos eléctricos en este momento. La respuesta a esta pregunta radica en una de las grandes ventajas de los EV: la posibilidad de recarga en el propio domicilio del propietario. Un vehículo de CI debe acudir casi por obligación a una gasolinera para adquirir el combustible. Sin embargo, el propietario de un EV puede instalar una estación de carga en su propia casa [15]. Existen actualmente multitud de diseños y prototipos de estaciones de carga para hogares. Mientras la demanda de coches eléctricos crezca, el desarrollo de estos dispositivos seguirá evolucionando.

Debido al desarrollo por separado que cada compañía estaba llevando a cabo en el campo de los cargadores de EV, y siguiendo la tendencia actual en los campos tecnológicos, se presentó en 2020 una regularización de los sistemas de carga en España, basada en la normativa europea ya vigente, UNE-EN IEC 61851-1 [16]. Esto permitió establecer unos estándares que unificasen las características de los sistemas de carga desarrollados por las distintas compañías. De esta manera terceras compañías pueden a su vez lanzar al mercado sus propios diseños de cargadores, lo que crea un mercado más competitivo y da más alternativas a los consumidores. Por otro lado, si un cliente adquiere un sistema de carga, este podrá ser utilizado en distintos vehículos, lo que elimina la necesidad de comprar un cargador por cada vehículo, reduciendo así el consumo y los costes finales.

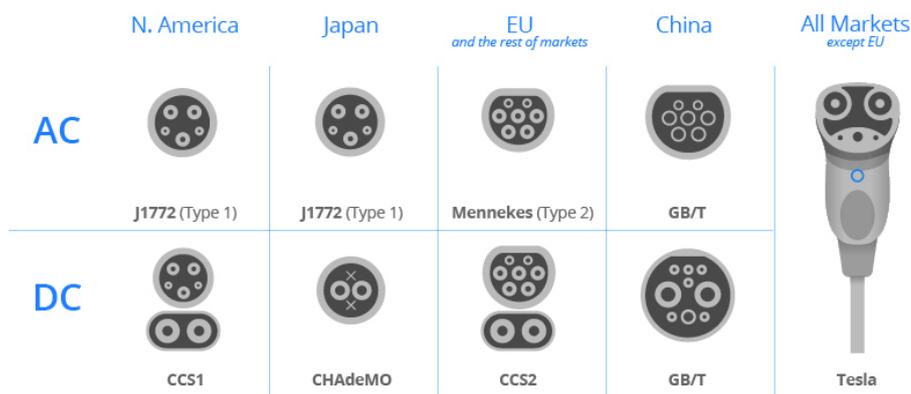


Fig. 4. Distintos tipos de cargadores establecidos por las normativas de las distintas regiones [52]

La norma IEC 61851 establece una primera clasificación de los sistemas de carga en función de la potencia nominal de estos [17]. Esta potencia está en gran medida relacionada a su vez con la velocidad de carga de estos equipos, la cual es una característica de vital interés para los consumidores. La clasificación por potencias queda reflejada en la Tabla 1.

Método de Carga	Conexión	Potencia [kW]	Corriente Máxima [A]	Ubicación
Baja Potencia	AC Monofásico	3,7	10 - 16	Doméstico
Media Potencia	AC Monofásico o Trifásico	3,7 - 22	16 - 32	Doméstico / Público
Alta Potencia	AC Trifásico	> 22	> 32	Público
Alta Potencia	DC	> 22	> 3,225	Público

Tabla 1. Características eléctricas de distintos tipos de sistemas de carga. [17]

Los sistemas de mayor potencia son generalmente públicos. Los puntos de carga repartidos por la vía pública son equipos especializados, capaces de aguantar grandes niveles de corriente, lo cual permite una carga más rápida al poder suministrar más potencia por unidad de tiempo. Por otro lado, los sistemas domésticos tienen menor capacidad, ya que se alimentan directamente de la red doméstica. Un sistema de carga con una potencia muy elevada podría desestabilizar dicha red y además elevar en gran medida el consumo eléctrico de la vivienda. Esta diferenciación es en verdad muy conveniente. Haciendo un análisis general de las necesidades, habitualmente, cuando se estaciona en un punto de carga público, el tiempo de estancia es limitado [18]. El consumidor aparcará en dicha plaza durante un periodo de tiempo, realizará las distintas tareas por las que se desplazó en un primer momento y posteriormente marchará. Esto quiere decir que una mayor potencia de carga permite al vehículo cargarse más rápido, lo cual permite a su vez cargar la batería lo máximo posible en un tiempo, como se ha dicho, limitado. Los sistemas domésticos, sin embargo, no necesitan dicha potencia, ya que, por lo general, los tiempos de estacionamiento del vehículo en la vivienda son más largos. Un uso cotidiano de dichos sistemas es la carga del EV durante la noche, para su utilización durante el día siguiente. Estos largos periodos de tiempo permiten a la batería cargarse en su totalidad sin la necesidad de suministrarle enormes cantidades de corriente.

En un estudio realizado en Australia, se midieron los hábitos de varios propietarios de vehículo eléctricos. En él se halló que, mayormente, las cargas se realizan en el hogar o en estaciones habituales, como pueden ser estaciones colocadas cerca de su trabajo u ocupación [18]. Otro resultado que se obtuvo en este estudio es el hecho de que, de media, los coches pueden pasar 16 horas enchufados a la red y estando completamente cargados. Teniendo esto en cuenta, se entrará ahora a presentar otro aspecto cuya posible implementación se encuentra actualmente en estudio. El concepto de coche eléctrico como almacenamiento de energía.

Dado que el coche eléctrico puede pasar largos periodos de tiempo conectado a la red doméstica, se presenta una posible utilidad para la batería del vehículo como



componente de almacenamiento de energía en esta red. Para ello, se requiere un sistema de carga bidireccional, que se capaz de, además de transformar la tensión de red AC a tensión DC que cargue la batería, convertir dicha tensión DC en tensión alterna para poder suministrarla de nuevo a la red [19]. Este proceso se conoce como vehículo a la red (V2G, de sus siglas en inglés), y tiene beneficios económicos para los propietarios de los EV con esta funcionalidad [20].

4. Modelo eléctrico del EV

El vehículo eléctrico es una máquina realmente compleja. En ella intervienen gran cantidad de sistemas eléctricos y electrónicos, los cuales se coordinan para dar lugar al funcionamiento del mismo. Sin embargo, esto no se debe únicamente a que el coche sea “eléctrico” en el sentido de que su fuente de energía sea la electricidad. En los vehículos de CI, también hay innumerables sistemas electrónicas que permiten una experiencia de conducción más segura, cómoda y accesible. Años atrás, la mayoría de los componentes y sensores de los vehículos eran mecánicos. Ahora, además de haber adaptado muchos de esos sistemas al mundo de la electrónica, se han desarrollado nuevos sistemas de automatización y control. Desde sensores de presión en los neumáticos, detección de temperatura de los componentes del motor, hasta cambios de marchas automáticos o incluso sistemas de conducción asistida [21]. Todos estos avances, los cuales mejoran la experiencia de conducción en gran medida, se deben en gran parte a los enormes avances en electrónica y en sistemas eléctricos.

Para este documento no se van a desarrollar al completo los sistemas del vehículo eléctrico, pero si presentar una imagen general del mismo y de sus componentes más fundamentales. De forma muy simplificada, el modelo de un EV se puede presentar como un bus de continua, al que se conectan los distintos sistemas del vehículo. Estos sistemas pueden, o bien suministrar energía al bus, o bien recibir energía de este. En la Figura 5 se muestra el sistema descrito, representando los componentes del mismo por bloques simplificados.

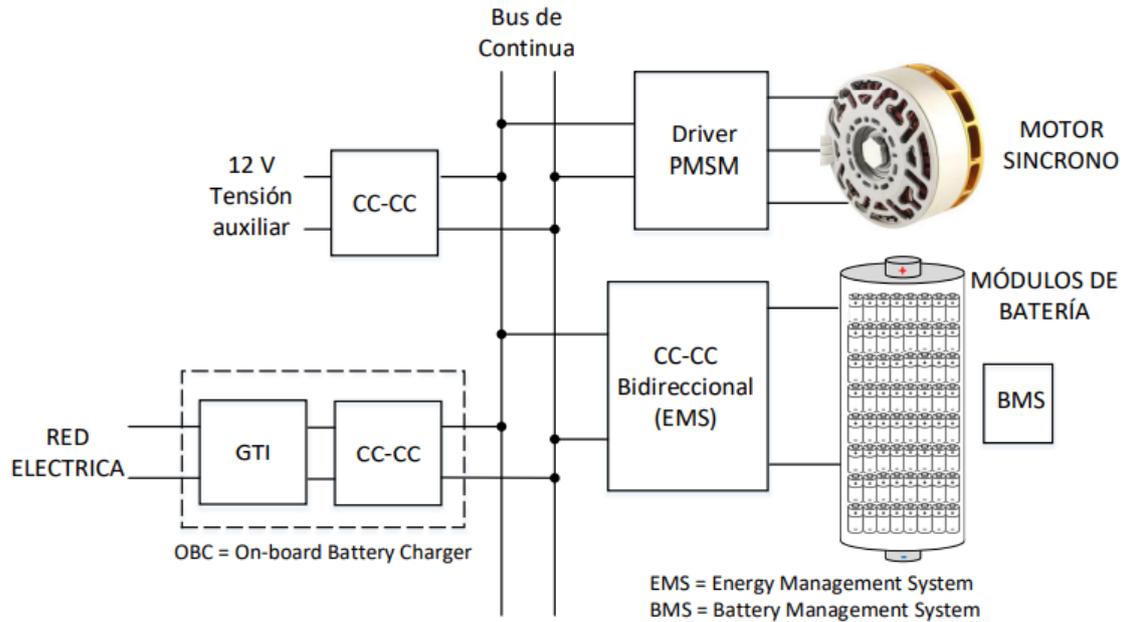


Fig 5. Modelo simplificado de un vehículo eléctrico [53].

La parte troncal del modelo es el bus de continua. Todos los componentes del EV están conectados a este bus. Algunos de ellos, como la batería o la red eléctrica, suministran energía al bus, mientras que otros, como el motor síncrono o los componentes electrónicos del vehículo, consumen dicha energía. Sin embargo, el comportamiento de esta red no es tan simple. A pesar del comportamiento de los componentes descrito anteriormente, una característica de la mayoría de estos elementos conectados a la red es la capacidad de, a pesar de tener una función clara, poder suministrar o consumir energía de la red en función de las condiciones en las que se encuentre el sistema. Posteriormente se entrará a describir el comportamiento específico de estos componentes y explicar cómo se dan estas situaciones, las cuales mantienen la estabilidad del bus.

- Batería

La batería es un componente que se encarga de almacenar energía eléctrica para después suministrarla al sistema cuando se requiera. Estos dispositivos son objeto fundamental del estudio e investigación en el sector de la electricidad debido a la incesable búsqueda de mejores métodos de almacenamiento de energía. Durante los últimos años han surgido múltiples tipos de baterías, cada cual con mejores características que la anterior. Sin embargo, como en la mayoría de casos en el desarrollo de tecnologías, la mejora de una cualidad significa muchas veces el sacrificio de otra. Por ejemplo, una batería con mayor densidad de potencia puede tener menor tiempo de vida y viceversa. Actualmente, las baterías más extendidas en el sector del automóvil son las baterías basadas en litio [22]. La batería de litio tradicional está compuesta por un ánodo y un cátodo (electrodos negativo y positivo de la batería respectivamente) y un electrolito compuesto por un solvente orgánico en el que se disuelven sales de Litio [23].

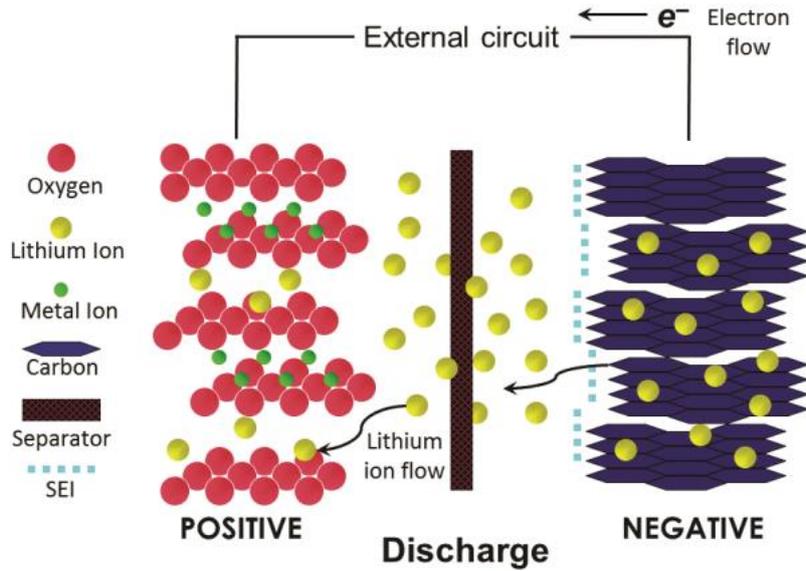


Fig 6. Esquema del funcionamiento de la batería de Litio al descargarse [30].

El funcionamiento básico de la batería es el siguiente. Cuando la batería se descarga, los iones de litio migran del electrodo negativo al positivo. De esta manera, los electrones que quedan liberados de los iones se desplazan por el circuito conectado a los electrodos desde el polo negativo al positivo, generando una corriente eléctrica en la dirección opuesta. El separador facilita el movimiento de los iones a través del electrolito y evita el paso de los electrones a través de él. El proceso de carga es el mismo que durante la descarga, pero a la inversa. Los iones de Litio migran del electrodo positivo al negativo, lo que hace fluir en la misma dirección los electrones liberados, pero estos por el circuito externo a la batería, produciendo la corriente.

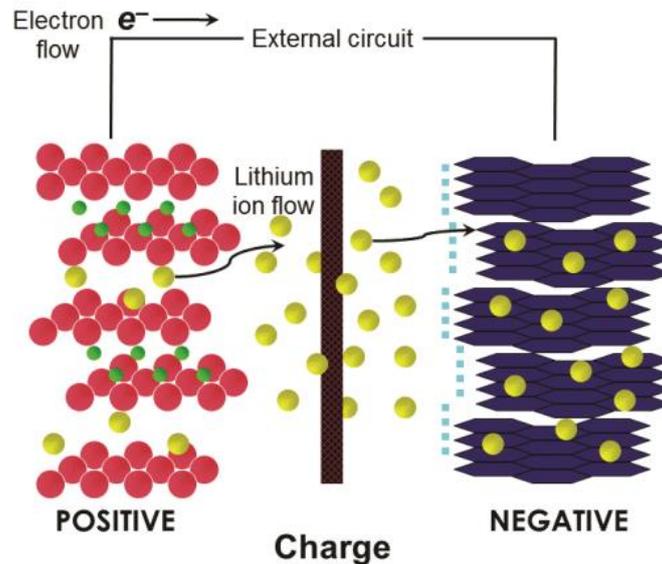


Fig 7. Esquema del funcionamiento de la batería de Litio al cargarse [30].

El material utilizado principalmente para el cátodo es el grafito. Es sin duda el más extendido y, a pesar de que se siguen buscando alternativas, como el titanato de litio, aun no tiene alternativas reales en el mercado. Una de las cualidades más importantes en

los electrodos es la variación de volumen que sufren al recibir o desprenderse de los iones de litio. En este caso, el óxido de silicio es una alternativa que se platea, debido a su baja variación en volumen entre estar cargado o descargado de litio (10 %). Por otro lado, los materiales utilizados para el cátodo sí que abarcan una gran variedad de opciones. Este componente debe ser escogido en función de la finalidad que va a tener la batería en cuestión. Durante el diseño de la misma, se deben barajar las distintas opciones teniendo en cuenta las distintas características que se van a requerir. Desde el coste, el tiempo de vida, hasta la densidad de potencia y densidad de energía. Todas estas variables varían en función de la composición del cátodo. En la tabla 2 se muestra una comparativa entre las características y los usos de los distintos tipos de materiales utilizados [24].

Categories	LCO	LNO	LMO	NMC	NCA
Chemical structure	LiCoO ₂	LiNiO ₂	LiMnO ₂	LiNiMgCoO ₂	LiNiCoAlO ₂
Max spec. capacity (mAh/g)	274	275	285	280	279
Average spec. capacity (mAh/g)	145	150	140	170	200
Typical volumetric capacity (mAh/cm ³)	550	1,280	1,148	600	700
Theoretical volumetric capacity (mAh/cm ³)	1,363	1,280	1,148	1,333	1,284
Average voltage (Li/Li ⁺)	3.8	3.8	3.3	3.7	3.6
# Cycle	500-1,000	300-700	300-700	1,000-2,000	500
State of development	commercially stable	commercially stable	commercially stable	newly commercialized	newly commercialized
Anode	graphite anode	graphite anode	power tools, electric train	graphite anode / silicon-graphite	graphite anode
Commercial application	Apple iphone	power tools, medical devices, electric train	Nissan leaf	EVs, medical devices, industrial	electric train, industrial

Tabla 2. Comparativa de los distintos materiales utilizados como cátodos [31].

Los materiales catódicos examinados en este documento son óxido de litio-cobalto (LCO), óxido de litio-níquel (LNO), óxido de litio-manganeso (LMO), óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC) y óxido de litio-níquel-cobalto-aluminio (NCA). El primero de todos, fue el primer material desarrollado e implementado, siendo a la vez el más extendido. Posteriormente, se fueron desarrollando materiales más complejos, llevando a cabo mezclas de distintos metales, intentando buscar combinaciones que tuviesen las cualidades requeridas. Las características comparadas son la densidad de energía (la cual hace referencia a la cantidad de energía a lo largo de tiempo que la batería puede suministrar por unidad de masa o volumen), el voltaje nominal de las baterías resultantes, los ciclos de vida que pueden alcanzar, su estado comercial actual y el ánodo compatible. Se puede apreciar como suele haber una correlación en las características. Los materiales que permiten una mayor densidad de energía, como el NCA, suelen tener otras desventajas, como en este caso el reducido número de ciclos de vida. Por tanto, la decisión sobre el material catódico escogido será crucial a la hora de determinar las características que tendrá la batería diseñada. Para los EV, los diseños de baterías de NMC suelen ser escogido debido a su gran número de ciclos de vida ya su buena densidad de energía en función del volumen, la cual permite ahorrar espacio en el vehículo [25].

En el EV se suelen instalar módulos de baterías, los cuales constan de un conjunto de numerosas baterías conectadas en paralelo y en serie, lo que aumenta la capacidad.

Estas baterías almacenan la energía eléctrica que se le suministra al cargar el vehículo. Normalmente, esta carga se realiza conectando el vehículo a la red eléctrica, lo cual se tratará más adelante. La energía que es capaz de almacenar la batería define en gran medida la autonomía que tendrá el vehículo. Por ello, es crucial buscar desperdiciar la menor energía posible. Para ello, se implementa un diseño de red compatible con el frenado regenerativo, un proceso de recuperación de energía.

- Motor eléctrico

El motor de un EV es otro componente fundamental del sistema. Es el componente encargado de convertir la energía eléctrica que se almacena en la batería en energía cinética que desplace el vehículo. Existen dos tipos fundamentales de motores: motores de continua (DC) y motores de alterna (AC). En los vehículos eléctricos se utilizan en la gran mayoría de casos motores de corriente alterna. Dentro de los motores de alterna podemos encontrar motores síncronos y motores asíncronos [26]. La diferencia fundamental entre ambos reside en que, en el motor síncrono, el campo magnético producido por el estator y el rotor giran a la misma velocidad. Por otro lado, en el motor asíncrono, también conocido como motor de inducción, hay un desfase entre la rotación del campo magnético y las del rotor. Ambos diseños podrían ser válidos.

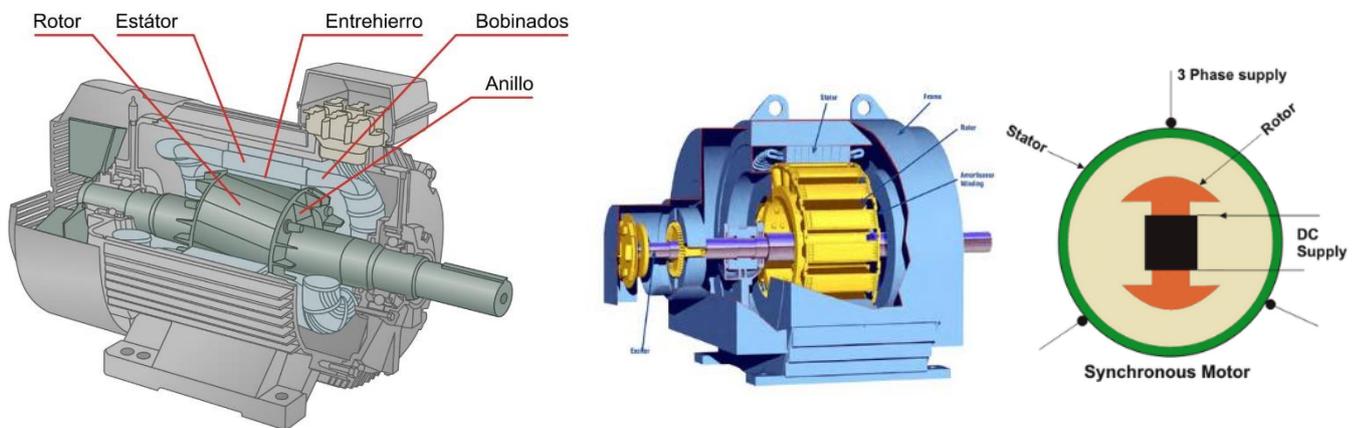


Fig 8. Motor de inducción y sus componentes principales (Izquierda) [38]. Motor síncrono y esquema simplificado (Derecha) [39].

Cada uno de los motores tiene sus propias ventajas. Por un lado, el motor asíncrono tiene un gran funcionamiento a altas revoluciones, permite desarrollar una gran potencia y el coste del propio motor suele ser menor que el de un motor síncrono. Por otro lado, el motor síncrono tiene una buena respuesta en bajas revoluciones (lo que es ideal para desplazamientos por ciudad), su tamaño es menor que el de un motor asíncrono, es más eficiente que su contraparte y también se ve menos afectado por cambios en la tensión y en la carga aplicadas al motor [27]. Sin embargo, el motor síncrono requiere de una fuente de tensión continua que magnetice el estator, además de un colector o

escobillas que lleven a cabo esta magnetización. Por esta razón se desarrolló el motor síncrono de imanes permanentes.

Este motor de alterna suprime los inconvenientes de los motores asíncronos de inducción colocando imanes permanentes en el rotor que generan un campo magnético sin necesidad de suministrar una corriente magnetizante. En este caso la corriente del estator se utilizará por completo para producir torque, lo que aumenta la potencia del motor y lo hace más eficiente que el motor de inducción. Además, el motor de imanes permanentes elimina la necesidad de colocar escobillas o colectores como en el caso de los motores síncronos convencionales, lo que elimina pérdidas en el rotor y tiempos de mantenimiento. Por estos motivos, el motor síncrono de imanes permanentes suele ser el escogido a la hora de diseñar un EV, aunque cada empresa realiza sus propios diseños en función de las distintas necesidades [28].

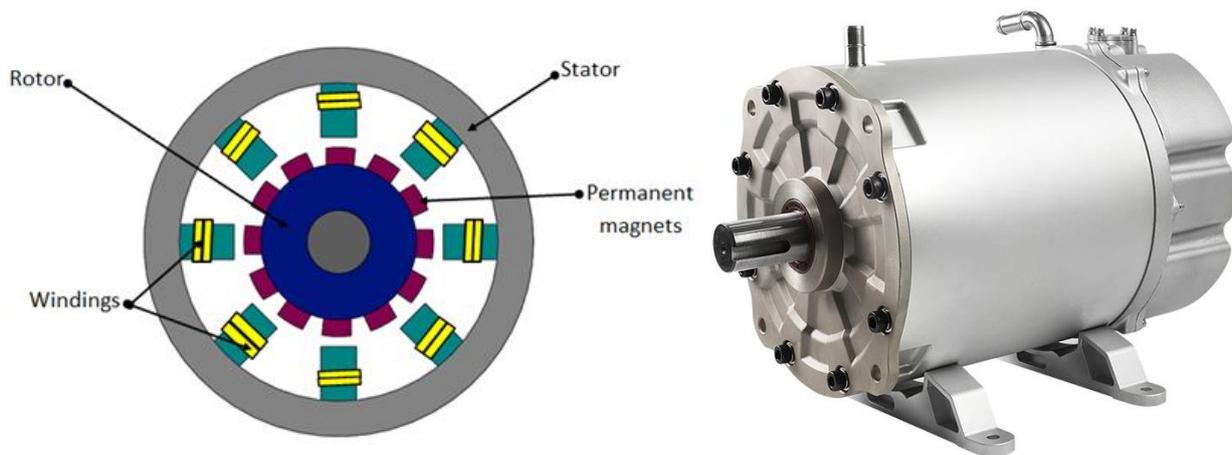


Fig 9. Motor síncrono de imanes permanentes [40].

Cuando el vehículo acelera, el motor hace avanzar el vehículo gracias al movimiento del rotor. Para conseguir este movimiento, la batería suministra electricidad al motor. Sin embargo, cuando se pisa el pedal del freno y el vehículo decelera, la tensión en los extremos del circuito equivalente del motor pasa a ser superior que la tensión que se le está suministrando en ese momento. Por esta razón, debido a la diferencia de tensión, el motor es capaz de devolver energía eléctrica al bus de continua del vehículo, la cual puede ser recuperada por otros componentes como la batería y reutilizada más adelante. Este proceso se denomina frenado regenerativo y es ya una parte fundamental en el diseño de vehículos eléctricos. Mejora en gran medida la eficiencia del vehículo eléctrico, alargando así su autonomía. Es por esto por lo que la red debe estar diseñada para que muchos de sus componentes pueden dar y recibir energía del bus, para buscar el funcionamiento óptimo en cada situación. Además de devolver energía, el rotor del motor experimenta un torque en la dirección contraria a su dirección de rotación. Es decir, además de devolver energía el motor se frena. El frenado producido de esta manera muchas veces no es suficiente para decelerar el vehículo de una forma óptima, por lo que se suele acompañar con otro sistema de frenado hidráulico equivalente al de los coches de combustión. Sin embargo, la compatibilidad de estos sistemas hace que el gasto de las pastillas de los frenos hidráulicos se reduzca enormemente, lo cual supone una reducción de costes en el uso de un EV comparado a un vehículo de CI [29][30].

Un aspecto fundamental a tener en cuenta es la conversión eléctrica de corriente continua del bus (DC) a la corriente alterna requerida por el motor (AC). Para ello se deberá implementar un driver de motor síncrono de imanes permanentes, el cual generalmente consta de un inversor y un sistema de control que regula el comportamiento del motor. El inversor permite llevar a cabo el frenado regenerativo al poder transformar corriente continua del bus a corriente alterna necesaria para alimentar el motor al acelerar; y la corriente alterna sobrante en el motor durante las deceleraciones del vehículo, convertirla en corriente continua que pueda pasar al bus y ser almacenada por otro componente del sistema.

- Conexión a la Red Eléctrica

Al igual que los vehículos de combustión deben parar a repostar combustible, el vehículo eléctrico debe recibir energía eléctrica de una fuente externa para poder recargar su batería. En la gran mayoría de casos, esta fuente externa suele ser la red de distribución eléctrica. Esto representa una de las mayores ventajas de los EV respecto a los VCI. Un vehículo de combustión debe acudir casi por obligación a una gasolinera a recargar su combustible. Sin embargo, la distribución eléctrica llega a multitud de lugares y casi a cualquier domicilio. Esto permite instalar puestos de carga de EV casi en cualquier lugar. La mayoría de los propietarios de vehículos eléctricos instalan una estación de carga en sus propios domicilios, lo que les permite tener la fuente de energía de su vehículo en su propio hogar. Es obvia la diferencia de facilidad que esto supone respecto a los VCI. Además, ya existen propuestas de creaciones de electrolineras, espacios con múltiples puntos de carga a los que los conductores pueden ir a recargar sus vehículos de una manera similar a las actuales gasolineras [17][31].

Por otro lado, en multitud de ciudades se están instalando puntos de carga individuales en múltiples lugares repartidos por la ciudad. De esta manera, los conductores de EV pueden cargar su vehículo en cualquier parte, implementando así un servicio de comodidad al consumidor. En ciudades como Madrid, se han implementado ya más de 900 puntos de recarga con más de 3000 conectores en total [32].

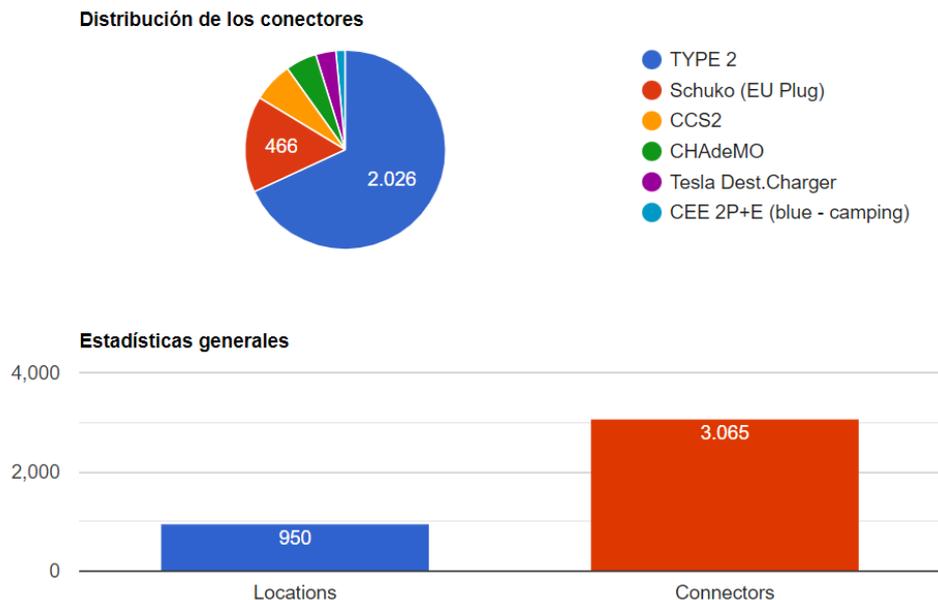


Fig 10. Número y tipo de estaciones de carga en Madrid (España) [43].



- **Sistemas electrónicos del vehículo**

Además del motor eléctrico, el EV tiene otros sistemas electrónicos que deben ser alimentados para funcionar de forma adecuada. Por tanto, estos sistemas deben estar conectados a su vez al bus de continua para poder tener conexión con una fuente de energía, como la batería u otros posibles sistemas de almacenamiento. Muchos de estos sistemas son fundamentales para el funcionamiento del vehículo. Esto se debe en gran parte a la enorme electrificación en el sector del automóvil, la cual se espera que continúe, con un crecimiento anual del 11% [33]. Los esfuerzos en el desarrollo de vehículos autónomos llevarán a la necesidad de implementar cada vez más sistemas de control electrónicos. Muchos sistemas que son completamente necesarios para la circulación, como los distintos sensores del vehículo o accionadores, eran antes mecánicos. Ahora, estos componentes son completamente electrónicos, lo que los hace mucho más óptimos y eficaces. Sin embargo, la mayoría de estos componentes requieren ser alimentados por una tensión continua de baja tensión.

El bus del vehículo está en DC, pero la tensión de 400 V es muy elevada para estos sistemas. Por tanto, se necesitará implementar un convertidor continua-continua bidireccional. En el extremo de alimentación de los componentes electrónicos deberá suministrarse una tensión de alrededor de 10 V, por lo que se debe llevar a cabo una reducción de tensión bastante significativa. Las opciones de topología para este circuito son en realidad las mismas que para la conexión entre bus y batería, adaptando las características del circuito a las necesidades específicas de cada caso. Se podría implementar un convertidor CC – CC bidireccional de 1 o 2 ramas, o bien un convertidor DAB.

5. Sistemas de recuperación de energía cinética (KERS)

Hasta ahora, se han tratado componentes fundamentales de los EV. Elementos sin los que el vehículo no podría funcionar. Sin embargo, ha este sistema eléctrico que se ha presentado, se pueden incorporar múltiples componentes extra con diferentes funciones, las cuales pueden no ser completamente necesarias para la viabilidad del sistema, pero si mejoran las características del mismo o realizan tareas que optimizan su funcionamiento. Un ejemplo de estos sistemas auxiliares son los sistemas de recuperación de energía. Estos sistemas se encargan de recuperar energía que, sin ellos, se habría desperdiciado debido a las pérdidas en los demás sistemas del vehículo.

En todo sistema real, la eficiencia nunca es del 100%. Todo sistema experimenta pérdidas. Por ejemplo, en el caso de un vehículo eléctrico, la propia fricción producida por el rozamiento de los componentes móviles produce pérdidas. Ya se ha presentado con anterioridad como un motor eléctrico es más eficiente que un motor de combustión. Un motor de CI puede tener una eficiencia de entre 14 y 33 %. Mientras tanto, un EV puede

tener una eficiencia cercana al 50 % o superior (figura 18) [10]. Aun así, se pueden tomar medidas para incrementar la eficiencia en mayor medida, para hacer así el sistema más viable. Dado que nunca se podrán evitar por completo, lo que se debe buscar es hacer el vehículo lo más eficiente posible. Por ello, se han desarrollado sistemas que intentan mejorar la eficiencia del EV analizando en qué partes del sistema se producen estas pérdidas y como podrían evitarse o reabsorber la energía perdida. A continuación, se presentan las fuentes de pérdidas más comunes y los sistemas de recuperación de energía que se han desarrollado para intentar contrarrestar dichas pérdidas. Entre ellas se encuentran procesos como las oscilaciones verticales del vehículo o la inercia del vehículo [34].

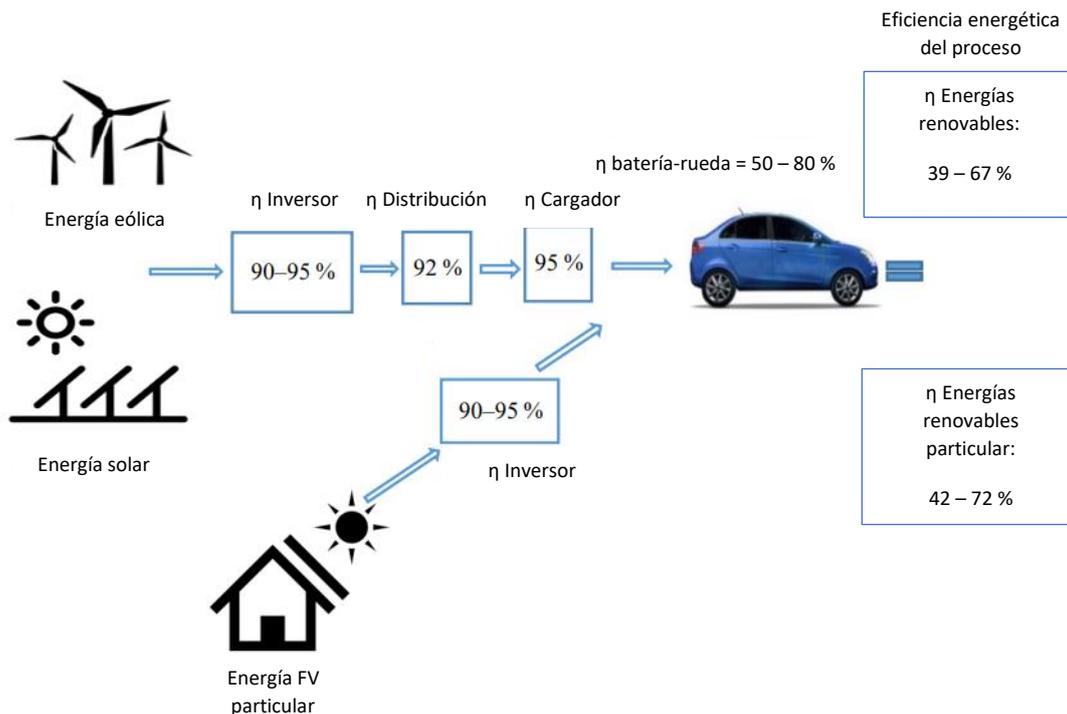


Fig 11. Eficiencia de un vehículo eléctrico alimentado de electricidad producida por energías renovables [10].

- Oscilaciones verticales

Cuando el vehículo circula por la calzada, se encuentra constantemente con irregularidades en el asfalto o variaciones en el terreno. En un coche completamente rígido, estas variaciones provocarían un excesivo rebote del vehículo, lo que reduciría el confort además de la eficiencia técnica en la conducción. Por ello, desde hace ya mucho tiempo, estas oscilaciones verticales son disipadas gracias a la implementación de la suspensión. Las suspensiones de los vehículos suelen estar constituidas por un muelle con una dureza alta, ya que debe amortiguar las oscilaciones, pero a la vez aguantar el peso del vehículo, el cual puede ser cercano a los 1000 kg. Existen multitud de distintos diseños de suspensiones, cada uno con distintas características, pero la principal variable a la hora de modificar este componente es su dureza. La dureza de la suspensión hace referencia a cómo de rígido es el muelle. Para superficies lisas se utilizan suspensiones más rígidas para mantener el coche más estable en la calzada. Para superficies muy irregulares se

utilizan suspensiones más blandas, capaces de amortiguar estas imperfecciones y evitar que el coche se vea afectado por estas oscilaciones verticales. La forma de amortiguar este movimiento es absorbiendo dicha energía y expulsándola en forma de calor u otras formas de energía. Estos sistemas de recuperación de energía se denominan amortiguadores regenerativos.

Existen varios métodos de recuperación de esta energía producida por la oscilación del vehículo. Pueden utilizarse transductores electromagnéticos o electrostáticos, aunque el método más extendido y el que más ha sido estudiado es la implementación de materiales piezoeléctricos. Estos materiales transforman directamente la energía cinética de la suspensión en energía eléctrica, la cual puede ser almacenada y utilizada posteriormente. Los transductores de materiales piezoeléctricos son capaces de producir hasta tres veces más densidad de potencia que los demás sistemas de recuperación de energía [35]. Existen dos tipos de materiales piezoeléctricos: piezo-cerámicas y piezo-polímeros. El principal y más utilizado debido a su mayor generación eléctrica con la menor variación de volumen es el Titanato zirconato de plomo, un material piezo-cerámico [36].

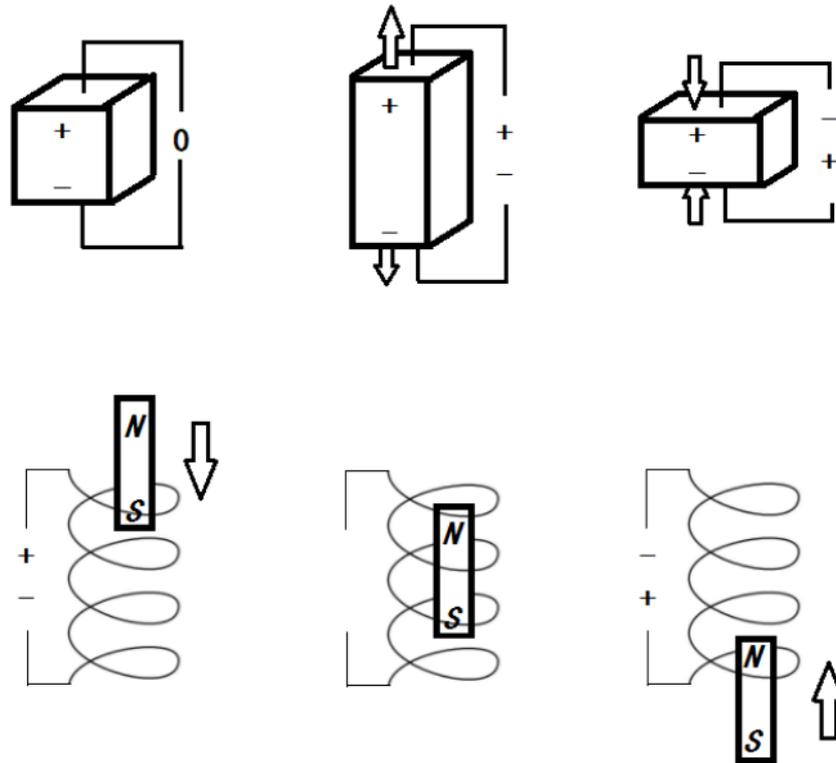


Fig 12. Esquema de funcionamiento de componente piezoeléctrico (arriba) y transductor electromagnético [57].

Aplicando estos sistemas de recuperación de energía se puede obtener una mejora de la eficiencia del vehículo de entre un 2 % y 10 % [34]. Por tanto, un sistema de amortiguadores regenerativos podría ser fundamental para alargar la autonomía de un vehículo eléctrico. Sin embargo, se remarca que la eficiencia de estos sistemas es mucho mayor para vehículos pesados y para vehículos que recorren superficies irregulares, por lo que su implementación para vehículos ligeros de carretera podría ser limitada [37].

- Inercia del vehículo

Un vehículo es capaz de desplazarse ya que convierte un tipo de energía, ya sea química como en los VCI, o eléctrica como en los EV, en energía cinética. Esta energía hace acelerar al vehículo y le confiere una determinada velocidad, la cual se mantiene relativamente constante si se deja de suministrar energía al sistema. Esta velocidad mantenida se denomina inercia. Para reducir esta velocidad se necesita liberar esta energía cinética del sistema. Para ello se debe transformar de nuevo en otro tipo de energía. Por ejemplo, el sistema de freno convencional de un coche convierte esta energía cinética en energía térmica debido a la fricción producida por las pastillas de freno al apretar el disco de freno. Dicha energía térmica es dispersada en el aire. Esto reduce la velocidad del vehículo. Por otro lado, los vehículos también frenan “solos” cuando se les deja de aplicar energía. Esto es debido a las pérdidas producidas en el sistema por el rozamiento del aire y de la calzada. Sin embargo, este frenado es mucho más suave. El vehículo pierde velocidad mucho más despacio debido a que la energía liberada del sistema es mucho menor que cuando se aplica el freno convencional.

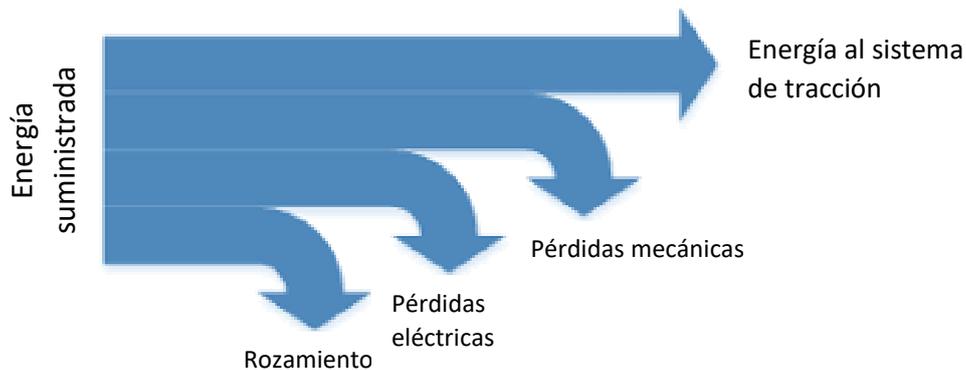


Fig 13. Pérdidas de energía de vehículo eléctrico.

Los sistemas de recuperación de energía basados en la inercia del vehículo tratan de recuperar esta energía que se libera al reducir su velocidad y que es desperdiciada. El concepto trata de transformar esta energía cinética sobrante en otro tipo de energía que pueda ser reutilizada por el vehículo más adelante, como energía eléctrica. Existen distintos tipos de KERS con diferentes características, aunque todos ellos tienen algo en común. Los momentos en los que se puede recuperar energía son puntuales, durante las frenadas del vehículo. Por tanto, el rendimiento que se puede sacar a estos sistemas dependerá de las condiciones en las que se circule. Conduciendo por ciudad, donde se acelera y decelera constantemente, podrá recuperarse gran cantidad de energía; mientras que, en un viaje por autopista, donde la mayoría del tiempo se lleva una velocidad constante, estos sistemas no serán tan provechosos debido a que no hay situaciones de frenado en las que recuperar la energía.

➤ KERS de muelles y elastómeros

El KERS basado en muelles y elastómeros consiste en implementar uno de estos componentes en el sistema de tracción del vehículo. Durante la frenada, por medio de la torsión o compresión del elastómero o muelle, se acumula energía mecánica en el mismo. Posteriormente, cuando se necesite la energía para acelerar el vehículo, esta se libera haciendo que la pieza elástica vuelva a su forma original, y así transmitirá la energía acumulada en ella al sistema de tracción del coche.

El funcionamiento de este tipo de KERS es puramente mecánico, por tanto, no hay pérdidas debidas a conversiones de energía. Por otro lado, en estos sistemas, la energía se puede almacenar durante largos periodos de tiempo, aunque a la vez ocupan un espacio considerable, lo que hace al vehículo perder algo de eficiencia. Además, estos componentes suelen tener un tiempo de vida corto [38].

➤ KERS neumático e hidráulico

Otro sistema de recuperación de energía cinética es el KERS neumático e hidráulico. Estos sistemas almacenan energía aumentando la presión de un fluido. En caso de un sistema neumático, el fluido se almacena en tanques, mientras que, en el caso de un sistema hidráulico, se almacena en acumuladores. Cuando necesita extraerse la energía acumulada en el fluido, se libera la presión del sistema y se utiliza dicha energía para acelerar el tren de tracción del vehículo. Estudios han calculado que un sistema KERS neumático de este tipo con una capacidad de almacenamiento de energía de 400 kJ, supuso una mejora del 25% en el rendimiento del vehículo. Un sistema KERS hidráulico de 90 kJ supuso a su vez una mejora de rendimiento de 35% [39]. Estos incrementos del rendimiento son muy considerables, lo que hace a estos sistemas una gran alternativa que permita reducir en gran manera el consumo de combustible de un vehículo, ya sea este combustible químico o eléctrico. Sin embargo, como desventaja, un sistema neumático o hidráulico requiere de tanques de almacenamiento que ocupan un espacio considerable y añaden peso al vehículo. Debido al gran volumen ocupado, estos sistemas serían más adecuados para vehículos pesados, los cuales suelen tener más espacio para albergar estos tanques de almacenamiento [40].

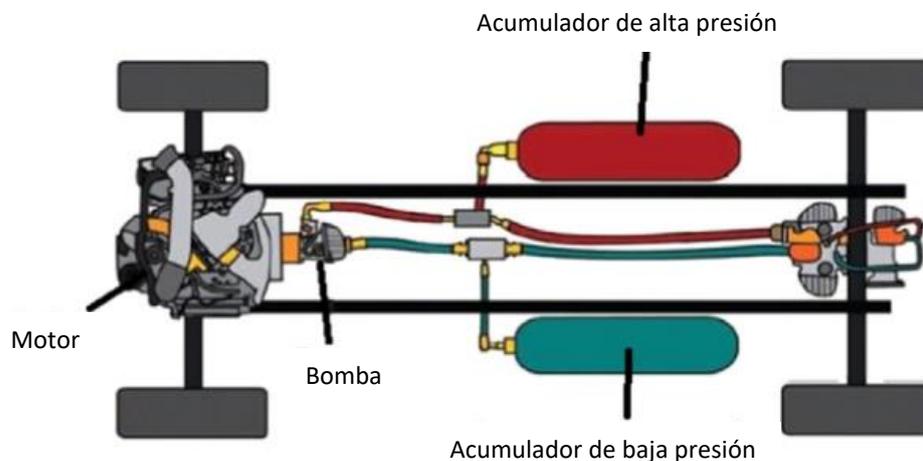


Fig 14. Sistema de recuperación de energía cinética hidráulico [34].

➤ Volante de inercia

El último tipo de KERS de inercia mecánica es el basado en volantes de inercia, o conocido por su nombre en inglés, flywheel KERS. Para almacenar la energía en estos sistemas se hace girar el volante de inercia, el cual continúa girando incluso cuando el vehículo decelera. De esta forma se almacena energía cinética en la rotación de este volante. Sin embargo, la rotación de esta pieza produce un rozamiento, ya sea con el aire o con las piezas con las que entra en contacto, lo que va frenando la rotación y de esta manera disipando la energía en el volante. Por tanto, la energía almacenada en este sistema tiene una limitación de tiempo. Después de un periodo determinado, la energía se disipará. Para mejorar la eficiencia del sistema, se debe intentar reducir este rozamiento al mínimo. Para ello se desarrollan complejos sistemas de volantes de inercia en cámaras de vacío, eliminando así la resistencia del aire. Además, se implementan rodamientos magnéticos. Estos rodamientos utilizan materiales magnetizados para sujetar el eje de rotación del volante de inercia sin entrar en contacto directo con él para evitar así el rozamiento entre las piezas. El volante está por tanto “flotando” dentro de la cámara de vacío [41].

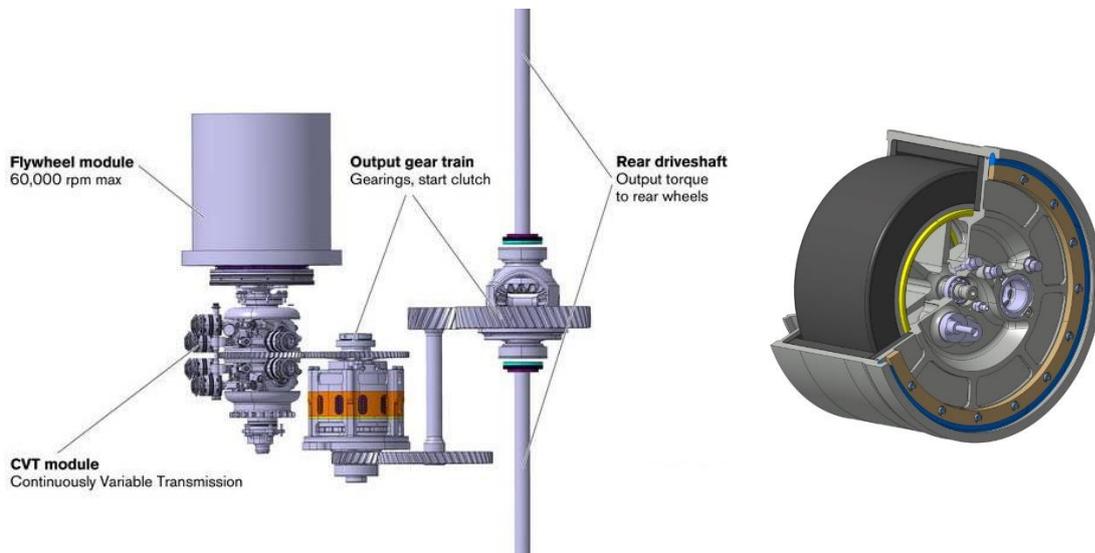


Fig 15. Sistema de recuperación de energía cinética por volante de inercia [58].

Estos sistemas han probado disminuir el consumo de combustible de alrededor de un 20% [41]. Además, han sido estudiados en mayor profundidad que los sistemas descritos hasta ahora. Han sido incluidos incluso en competiciones deportivas en vehículos de competición, como la Fórmula 1. Múltiples empresas de vehículos están buscando implementar esta tecnología en sus vehículos de calle, aunque su complejo diseño e implementación, especialmente por los componentes necesarios para hacer el sistema eficiente como la cámara de vacío o los rodamientos magnéticos, hacen que el sistema no termine de encontrar su implementación a gran escala.

➤ KERS eléctricos

Los sistemas de KERS eléctricos transforman la energía cinética del vehículo en electricidad que es almacenada en baterías u otros sistemas de almacenamiento eléctrico.

Como en el resto de sistemas, esta energía se puede utilizar posteriormente cuando el vehículo lo requiera. Este tipo de KERS son ampliamente utilizados actualmente en los vehículos híbridos. En la mayoría de los casos, en estos vehículos híbridos, el sistema consiste en un motor-generator eléctrico colocado en el sistema de transmisión del vehículo. Este generador produce la electricidad gracias a la rotación del eje de transmisión, el cual es propulsado por el propio motor del vehículo. La electricidad producida por este motor-generator es almacenada en una batería. A bajar velocidades, la batería y el motor-generator eléctrico son capaces de propulsar el vehículo sin necesidad de utilizar el motor de combustión, reduciendo así enormemente el consumo [42].

Para un EV, al ser el motor también eléctrico, la implementación podría hacerse de manera más sencilla, sin necesidad de un generador. Con un sistema de este tipo, se pueden obtener ahorros de combustible de hasta el 40% [34], el valor más alto de los sistemas presentados hasta ahora.

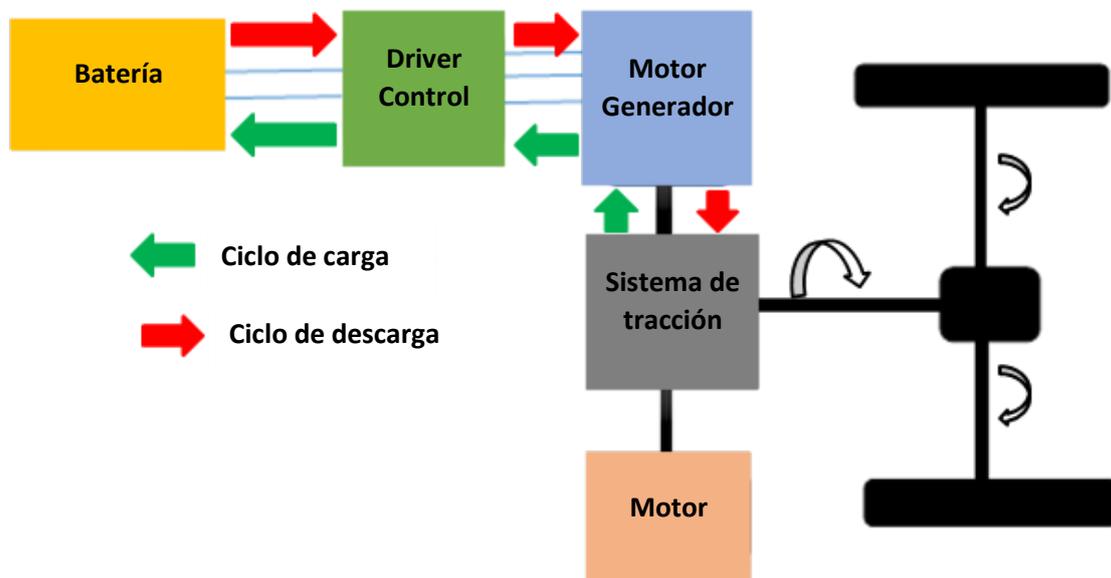


Fig 16. Sistema de recuperación de energía cinética eléctrico [47].

Por otro lado, también existe un sistema de KERS eléctrico con un diseño distinto. Este es conocido como KERS de control de alternador. La implementación de esta clase de sistemas es mucho más sencilla que la de un motor-generator eléctrico, ya que no requiere componentes que no tenga ya un coche de combustión. Este tipo de KERS funciona por medio del control de la corriente de entrada y salida del alternador de manera más eficiente. Normalmente, la salida de corriente del alternador se incrementa durante la frenada para cargar la batería del vehículo y alimentar los sistemas eléctricos del vehículo. Después, durante la aceleración, se reduce la salida de energía del alternador y se utiliza la energía almacenada en la batería en un primer momento para alimentar los sistemas del vehículo. De esta manera, la eficiencia de motor de combustión en la aceleración se ve incrementada, ya que no tiene que consumirse energía en alimentar el alternador. Esta tecnología supone una mejora de entre el 1% y el 5% en el consumo de combustible. Esta mejora de eficiencia es mucho menor que la de un KERS con motor-



generador, pero su implementación es sencilla ya que no requiere de elementos nuevos para el vehículo [34].

Por último, existe un último tipo de KERS eléctrico, el cual está siendo ampliamente estudiado en la actualidad gracias a las prometedoras prestaciones que puede aportar a los vehículos eléctricos e híbridos. Estos son los KERS basados en supercondensadores.

6. Supercondensadores

Las baterías han sido durante mucho tiempo el componente eléctrico de almacenamiento de energía fundamental. Como se presentó anteriormente, las baterías almacenan energía química, la cual puede ser absorbida o cedida por la batería para así aumentar o disminuir su carga respectivamente. Estos elementos tienen una gran capacidad de almacenamiento de energía, por lo que suelen ser la opción principal cuando se planta un sistema de almacenamiento de electricidad. Sin embargo, las baterías también tienen algunos inconvenientes. Uno de ellos es el elevado tiempo de carga. Cargar una batería de litio puede llevar horas. Esta es una gran desventaja, ya que para aplicaciones en las que el flujo de energía deba ser constante, las baterías tienen el inconveniente de que deben parar de suministrar su energía durante largos periodos de tiempo para poder ser recargadas. En el caso de los EV esto se convierte en una desventaja frente a los coches de CI. En estos últimos, la recarga del depósito puede llevar unos pocos minutos y el vehículo está listo para volver a circular. En cambio, un EV debe estar periodos de tiempo largos recargándose antes de poder volver a ser utilizado [43]. Es por esta razón que actualmente los sistemas de carga rápida son un foco central del estudio tecnológico [44].

Otro inconveniente que tienen las baterías es su limitada densidad de potencia. La carga es la cantidad de energía que puede almacenar una batería. La densidad de energía de un componente es la cantidad de energía que puede almacenar por cantidad de masa o volumen. Por otro lado, la densidad de potencia representa la potencia que puede suministrar de forma instantánea. Las baterías tienen buena densidad de energía ya que son capaces de almacenar mucha energía, sin embargo, su densidad de potencia no es tan buena, suele oscilar entre los 50 kW/kg y los 100 kW/kg [45]. Esto quiere decir que la cantidad de corriente que puede suministrar o absorber de forma instantánea es limitada. Debido a esto, la potencia eléctrica puntual que puede suministrar una batería no es muy elevada. Al no poder absorber mucha corriente, la batería tarda más tiempo en cargarse, ya que tarda más tiempo en reunir la carga que necesita para estar totalmente cargada.

Teniendo en cuenta las desventajas de las baterías, se desarrollaron los supercondensadores (SC). Estos componentes eléctricos son similares a los condensadores electrolíticos convencionales, pero sus capacidades pueden ser de hasta 6 órdenes de magnitud superior al de los convencionales. Mientras que el valor de

capacidad de un condensador electrolítico puede rondar el rango de los milifaradios, un supercondensador poder tener una capacidad de entre 1 Faradio e incluso 2000 Faradios.

Los supercondensadores, justo al contrario que las baterías, tienen una densidad de energía baja, lo que quiere decir que no pueden almacenar grandes cantidades de energía en su interior. Sin embargo, tienen una muy elevada densidad de potencia. Esto quiere decir que la energía que sí es capaz de almacenar puede ser suministrada de golpe, en grandes cantidades. La potencia que pueden suministrar estos componentes es muy grande, a la vez que la capacidad de absorber energía es también muy elevada. Un supercondensador puede por tanto suministrar picotazos muy elevados de corriente, y de forma inversa, absorber grandes picos de corriente y almacenar dicha energía. Sin embargo, debido a la gran cantidad de energía que puede salir del SC, sumado a la baja densidad de energía que tienen, hace que el componente se cargue y descargue en cuestión de segundos. Esto es opuesto a las baterías, las cuales almacenan mucha energía, pero debido a que no pueden absorber mucha energía de golpe, tardan en cargarse.

Un supercondensador puede estar cargado en unos pocos segundos y listo para volver a ser descargado. Otra ventaja que tienen los SC es su elevado tiempo de vida.



Fig 17. Supercondensadores comerciales [46].

Estos componentes pueden aguantar hasta un número de ciclos de carga y descarga mucho superior a los de una batería, haciéndolos así muy duraderos en el tiempo, especialmente los modelos que incorporan electrodos de carbono [46].

Entendiendo el comportamiento de un supercondensador se puede apreciar la buena sinergia que surge entre baterías y SC. Las deficiencias de uno son las ventajas del otro. Esto da gran flexibilidad a un sistema que cuente con ambos elementos. La batería proporciona energía durante largos periodos de tiempo de forma controlada, mientras que el supercondensador se encarga de suministrar energía en grandes cantidades cuando el sistema lo necesite. Algunas aplicaciones que se han hecho de los condensadores se encuentran en el sector de la aviación, en dispositivos de eyección; el sector energético, para estabilizar y mejorar el comportamiento de redes eléctricas; y por supuesto en el sector del transporta, siendo implementados en el transporte público de múltiples ciudades, en vehículos pesados y maquinaria de construcción y por supuesto en vehículos eléctricos comerciales [47].

La estructura interna de un supercondensador es similar al de una batería. En él se encuentran dos electrodos, introducidos en un material que actúa como electrolito, y un separador que mantiene aislados ambos electrodos entre sí. Sin embargo, existen algunas diferencias en estos componentes entre los que se encuentran en un supercondensador y los que se encuentran en una batería. Una de las mayores diferencias es el área de los materiales que actúan como electrodos. Esta es mucho mayor en los supercondensadores que en las baterías. La carga eléctrica se almacena de la siguiente forma. Los electrodos están constituidos por materiales con gran número de microporosidades. Los electrones se concentran en dichas microporosidades al separarse de los iones que se encuentran en el electrolito y viajar por los terminales de un electrodo a otro cuando se aplica una tensión de carga. Los iones con carga positiva tienden a aglomerarse alrededor del electrolito con carga negativa, atraídos por la carga eléctrica de los electrones que se encuentran en ellos. De esta manera, se crea una capa con carga eléctrica negativa en los electrodos y otra capa con carga eléctrica positiva alrededor de los mismos. De la misma manera, en el electrodo con carga positiva, se crea alrededor suyo una capa partículas con carga negativa. Estos tipos de supercondensadores se denominan supercondensadores de doble capa (Figura 20 y 21) [48].

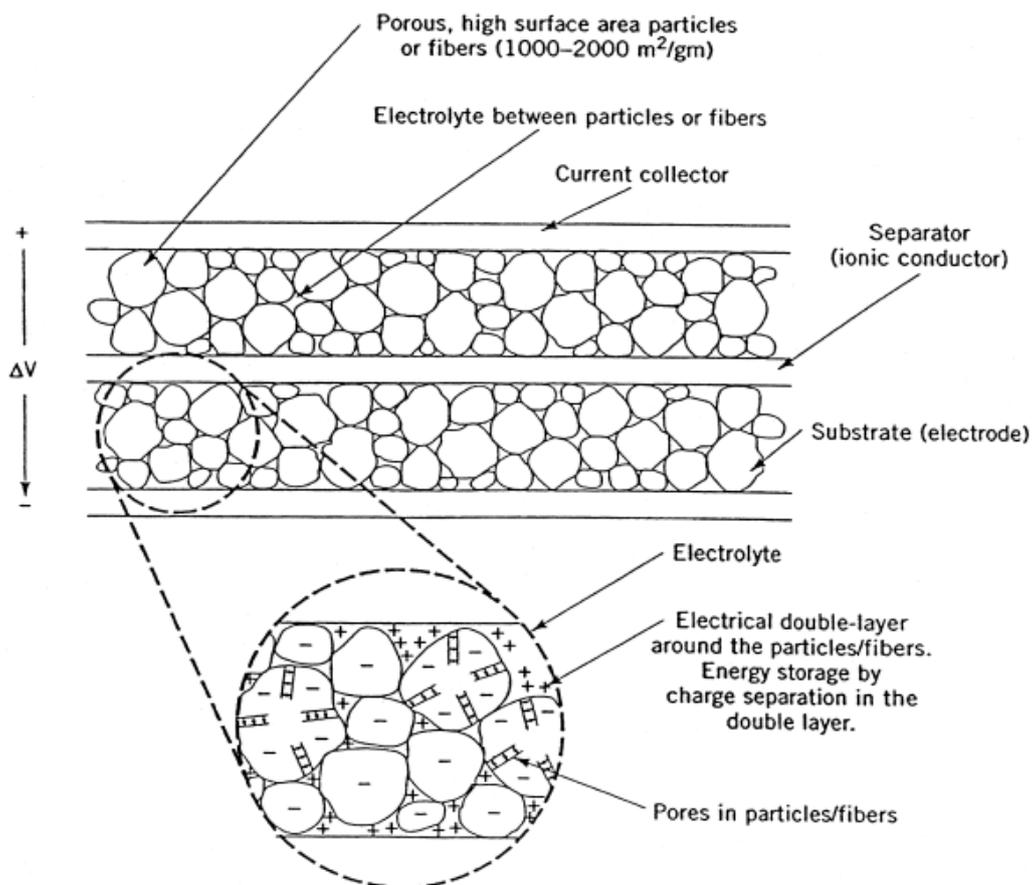


Fig 18. Representación de la estructura interna de un supercondensador [45].

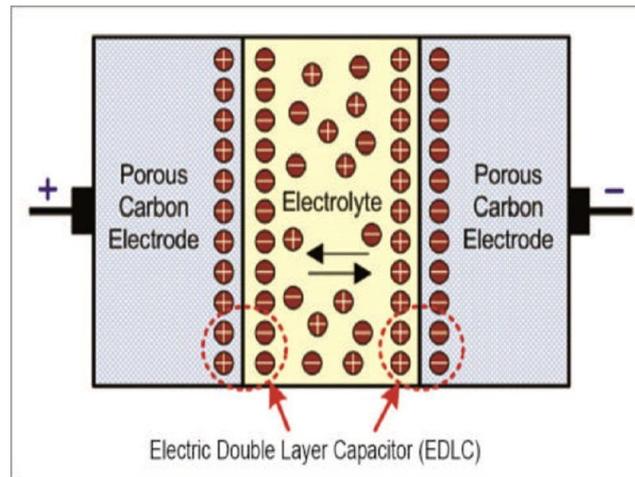


Fig 19. Representación de la doble capa en un supercondensador [48].

La capacidad de carga de un condensador depende principalmente de la porosidad de los materiales de los electrodos y del área de estos. El hecho de que el área de los electrodos de un supercondensador sea tan elevada es un factor crucial que hace elevar enormemente su capacidad. A partir de este valor de capacidad, el valor de energía almacenada en un condensador se define por la siguiente fórmula cuyo resultado se expresa en Julios (J):

$$E = \frac{1}{2} * C * V^2$$

De forma similar, la carga eléctrica almacenada se define por la formula siguiente, cuyo resultado queda expresado en Culombios (C):

$$Q = C * V$$

En función de los materiales utilizaos como electrodos y electrolito, los valores de capacidad del supercondensador también pueden variar, como se ve reflejado en la Tabla 3.

The specific capacitance of selected electrode materials

Material	Density (g/cm ³)	Electrolyte	F/g	F/cm ³
Carbon cloth	0.35	KOH	200	70
		organic	100	35
Carbon black	1.0	KOH	95	95
Aerogel carbon	0.6	KOH	140	84
Particulate from SiC	0.7	KOH	175	126
		organic	100	72
Particulate from TiC	0.5	KOH	220	110
		organic	120	60
Anhydrous RuO ₂	2.7	H ₂ SO ₄	150	405
Hydrous RuO ₂	2.0	H ₂ SO ₄	650	1300
Doped conducting polymers	0.7	organic	450	315

Tabla 3. Capacidad en función de distintos materiales utilizados como electrodos y electrolito [45].

La tensión nominal de condensador será también dependiente del material utilizado como electrolito. Para electrolitos acuosos, la tensión rondará 1 V, mientras que, para electrolitos orgánicos, la tensión nominal será cercana a 3 V.

7. Supercondensadores implementados en la red del EV

La idea presentada en este trabajo consiste en añadir una batería de supercondensadores a la red eléctrica de un vehículo eléctrico para mejorar las prestaciones del mismo. Se llevará a cabo un estudio de los efectos que este componente tendrá en el sistema y se analizará el funcionamiento del supercondensador en distintas situaciones.

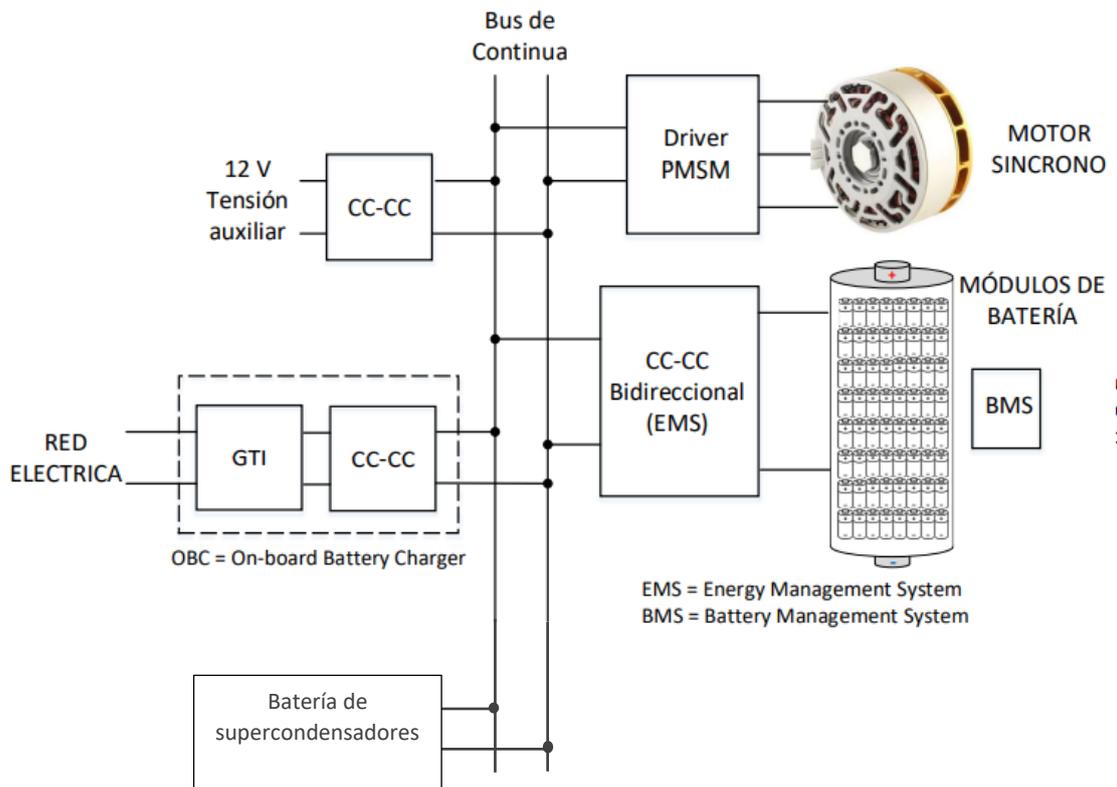


Fig 20. Incorporación de la batería de supercondensadores al modelo simplificado de un vehículo eléctrico.

Teniendo en cuenta el modelo eléctrico del EV presentado con anterioridad, la incorporación de la batería de supercondensadores al sistema requeriría únicamente conectar dichos supercondensadores al bus de continua del vehículo. El nuevo componente deberá trabajar y compenetrarse con las demás partes del sistema para llevar a cabo su labor.

El funcionamiento básico del sistema sería el siguiente. El bus de continua del vehículo eléctrico tiene una tensión nominal, en este caso se ha definido esta tensión a 400 V. Los componentes conectados a esta red pueden suministrar energía o absorberla. De esta manera, si un componente saca energía (o lo que es equivalente, corriente) de la red, la tensión del bus disminuye; mientras que, si un componente suministra corriente, la tensión del bus aumentará. El control de estas variaciones de tensión provocadas en el bus y el uso eficiente de estos flujos de entrada y salida de energía repercutirán en gran medida en el funcionamiento del vehículo eléctrico y su rendimiento. Para llevar a cabo el control de dichos flujos de corriente se pueden llevar a cabo distintas estrategias de control.

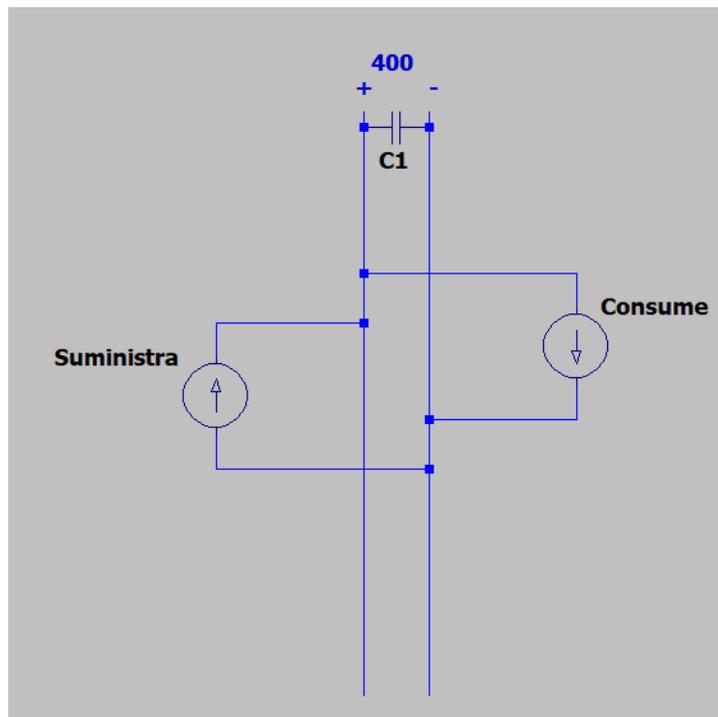


Fig 21. Esquema de un bus de continua con un componente generador de energía y uno que consume energía.

Como ya se explicó con anterioridad, hay componentes del sistema que aportan energía al sistema y otros que la consumen. Regular la entrada y salida de corriente en el bus permite mantener una estabilidad en el sistema y ayuda a un mejor comportamiento del mismo. Para mantener una tensión de bus constante se necesitaría por tanto que la corriente de entrada y la corriente de salida fueran iguales. El condensador que aparece conectado entre ambas líneas del bus representa la capacidad residual resultante generada por el conjunto de componentes conectados al bus.

Mantener la estabilidad de bus es fundamental para mantener la seguridad en el sistema y su correcto funcionamiento. Un pico de tensión demasiado elevado, por ejemplo, podría dañar alguno de los componentes conectados al bus. Para ello se deberían establecer unos límites de tensión. De esta manera, si la tensión alcanza un alto valor de tensión, determinado previamente, el sistema deberá dejar de recibir corriente, y para ello

los elementos de suministro de energía deberán dejar de operar. De la misma manera, si se alcanza un valor bajo de tensión determinado, se deberá suspender el trabajo de los elementos del sistema que consumen corriente. Para el sistema planteado en este proyecto se han establecido como límite superior una tensión máxima de 450 V y una tensión mínima de trabajo de 350 V. Por tanto, los componentes conectados a esta red deberán ser capaces de trabajar en estas condiciones.

En la figura 22 se muestra un esquema de un bus de continua de 400 V con un elemento de generación y otro de consumo. En este sistema puede surgir un problema fundamental de funcionamiento al establecer los límites de tensión anteriores si no se puede controlar a generación o el consumo de energía. Si la fuente de generación de energía fuese un panel solar, por el día este elemento del sistema suministraría corriente constantemente y podría superarse el límite superior de tensión. De la misma manera, si se comienza a consumir mucha energía por la noche, cuando el panel solar no genera energía, podría descargarse el bus y llegar a tensiones excesivamente bajas. La única manera de controlar este sistema es pudiendo controlar a su vez o bien los elementos de generación o los elementos de consumo, para desactivarlos en caso de ser necesario. Sin embargo, como se ha visto, en muchas ocasiones esto no es posible. Por tanto, se debe incorporar otro componente al sistema. Un elemento de almacenamiento. Una batería, por ejemplo, absorbería la energía producida sobrante que no se fuese a consumir en ese momento, evitando que se alcanzase la tensión máxima establecida. De la misma manera, la batería cedería la energía cuando la necesita el elemento de consumo de energía y la fuente de generación no puede suministrarla. Aun así, los sistemas de almacenamiento también tienen sus limitaciones. Si la batería estuviese totalmente cargada y se siguiese suministrando corriente al bus, esta no podría almacenarla y la tensión del bus se incrementaría de nuevo.

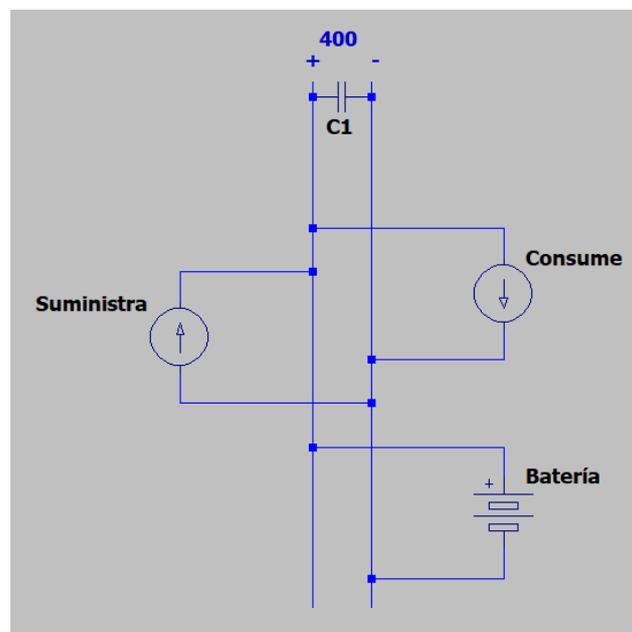


Fig 22. Esquema de un bus de continua con un componente generador de energía, uno que consume energía y una batería de almacenamiento.



Para mantener el sistema en equilibrio, la batería de almacenamiento debe suministrar o almacenar energía en función de las necesidades del sistema. Una manera sencilla de equilibrarlo sería siguiendo la siguiente función lógica.

$$\text{Generación} = \text{consumo} + \text{almacenamiento}$$

De esta manera, el almacenamiento sería positivo, si guarda energía; o negativo, si el consumo fuese muy alto y se necesitase suministrar más energía. Por otro lado, si en vez de un único elemento de suministro y uno de consumo se tuviesen varios, el funcionamiento sería el mismo, ya que al final, lo relevante sería la cantidad total de energía que entra y que sale del sistema. Sin embargo, la existencia de varios sistemas de almacenamiento de energía conectados al bus, como es el caso de estudio, ya que tenemos batería y supercondensadores como componentes de almacenamiento; no tendría una implementación tan sencilla. Se requeriría controlar cuánta energía es almacenada en cada componente de almacenamiento, o bien diferenciar los comportamientos de cada uno, de manera que uno suministrase y otro pudiese almacenar esa energía.

8. Modelo del bus de continua

Como ejemplo práctico del bus de continua, se presenta el circuito de la figura 23 pero con valores de trabajo reales:

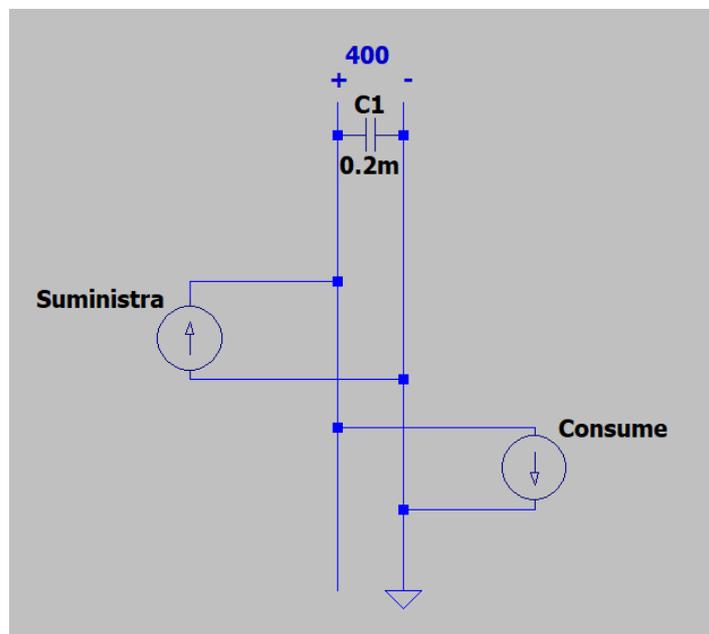


Fig 23. Esquema de un bus de continua con un componente generador de energía y uno que consume energía.

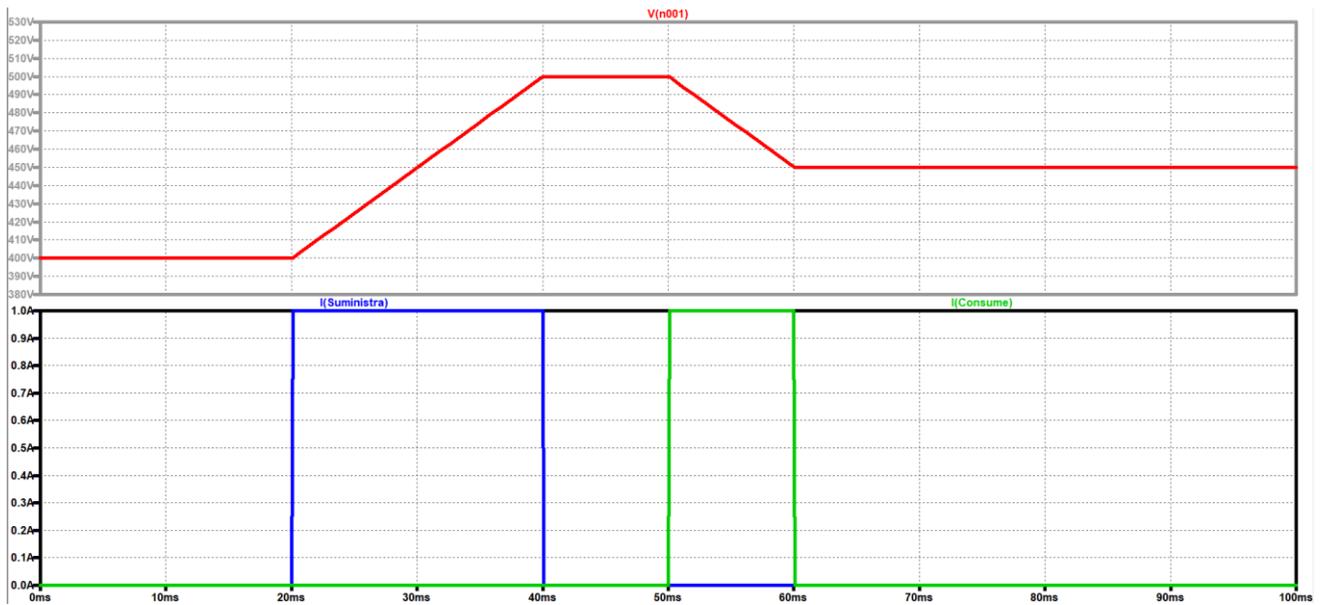


Fig 24. Resultado simulación del circuito de la Figura 30.

En la Figura 24 se muestra el resultado de la simulación. Como se puede ver, cuando el elemento que suministra energía vierte corriente sobre el bus, la tensión del propio bus se incrementa. Por el contrario, cuando el elemento de consume absorbe corriente del bus, la tensión de este disminuye. Como se ha comentado anteriormente, el control del flujo de corriente es fundamental para la estabilidad del sistema. En este caso, en el trabajo planteado se ha colocado un límite superior de tensión de 450 V. Asumiendo que los componentes conectados al sistema han tenido este dato en cuenta, una tensión de bus superior a esta podría dañar los componentes. En este mismo ejemplo de simulación se ha alcanzado una tensión de 500 V. Por tanto, se muestra como la presencia del control de este flujo de corriente es esencial.

Si se añade un componente capaz de almacenar energía, se puede controlar hasta cierto punto la tensión del bus, ya que un sistema de almacenamiento puede absorber o ceder corriente en función de las necesidades. Como se puede ver en la figura 26, la acción del elemento de almacenamiento limita las tensiones del bus dentro del rango especificado.

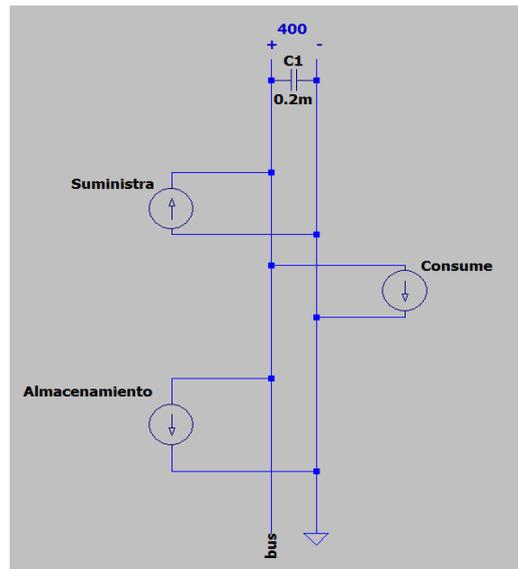


Fig 25. Esquema de un bus de continua con un componente generador de energía, uno que consume energía y una batería de almacenamiento.

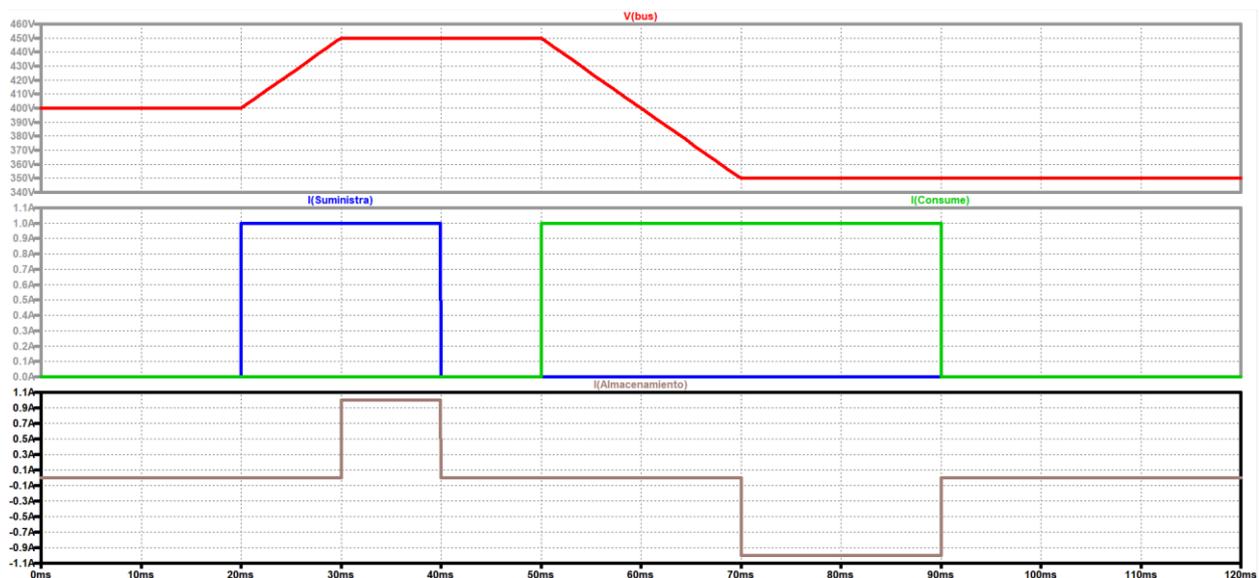


Fig 26. Resultado de la simulación del circuito de la Figura 32.

A la hora de implementar varios elementos de almacenamiento a una red, deben definirse los flujos de energía entre los distintos componentes. Por ejemplo, podría existir un sistema de almacenamiento primario y uno secundario. El secundario únicamente recibiría energía cuando el primario hubiese alcanzado su límite. Por otro lado, podría distribuirse el almacenamiento de forma equivalente entre ambos sistemas. Para esta tarea se suelen utilizar distintas estrategias de control. En este caso se ha escogido la estrategia de control “droop”.

9. Estrategia de control “droop”

El control droop se basa en, por medio de una referencia, llevar a cabo un control proporcional de la variable asignada. En este caso, la referencia será la tensión del bus; y la variable de control será la corriente de entrada o salida del elemento de almacenamiento de energía. Por tanto, la corriente estará en función de la tensión del bus.

$$I = f(V_{bus})$$

Las condiciones de funcionamiento que se estipulen definirán dicha función. En este caso, se busca mantener la tensión del bus estable dentro de unos límites de tensión establecidos. Para ello, como se vio en el apartado anterior, será necesario suministrar corriente a la red cuando la tensión disminuya; y se absorberá corriente cuando la tensión se incremente. Al ser proporcional, la función será lineal. A medida que se incremente la tensión, se incrementará la corriente absorbida. Por otro lado, se deben tener en cuenta los límites de tensión establecidos de antemano. Además, se debe conocer la potencia máxima que los sistemas de almacenamiento pueden soportar, ya que una corriente demasiado elevada podría dañar estos componentes. Todos estos comportamientos quedan descritos en la Figura 27.

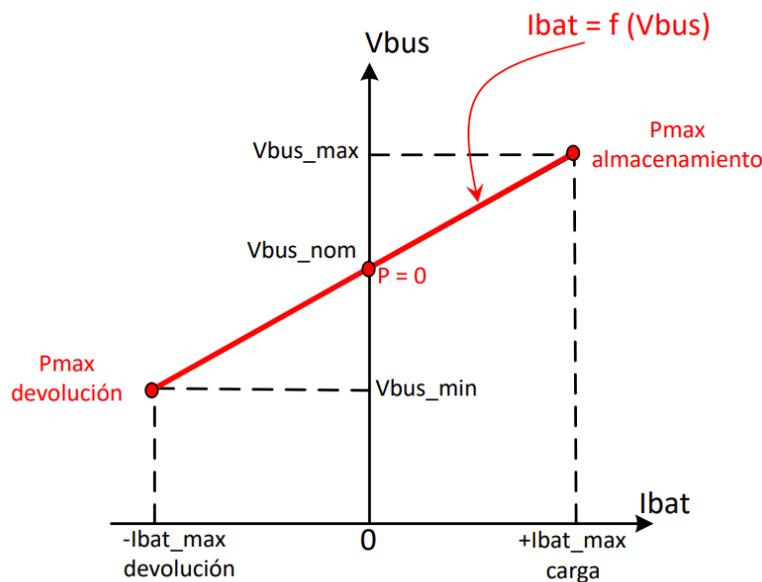


Fig 27. Esquema de control droop [59].

Este tipo de estrategia de control dota de independencia a los distintos sistemas de almacenamiento entre sí, ya que todos dependen únicamente de la tensión del bus, y no del comportamiento de los demás sistemas. Esto es fundamental ya que, en caso de fallo de uno de los sistemas, los demás podrán seguir operando sin mayor variación. En este diseño, se establecerá una corriente positiva como corriente que sale de la red y se almacena, mientras que una corriente negativa representará corriente devuelta a la red. Cabe destacar que, en el caso de que se detuviese el flujo de energía entre los elementos de la red, un sistema de este tipo estabilizaría la tensión del bus en su tensión nominal.

Teniendo definido el comportamiento deseado del sistema, faltan por definir algunos puntos que permitan a la función ser utilizada en condiciones reales. En caso de

que la tensión del bus sea inferior a la tensión mínima permitida, como puede ser en el caso del arranque del sistema, se deben considerar comportamientos diferentes a la dependencia lineal. Si se continuase calculando la corriente a suministrar con las mismas directrices que en el caso estándar, se podrían producir unos picos de corriente que podrían dañar el sistema.

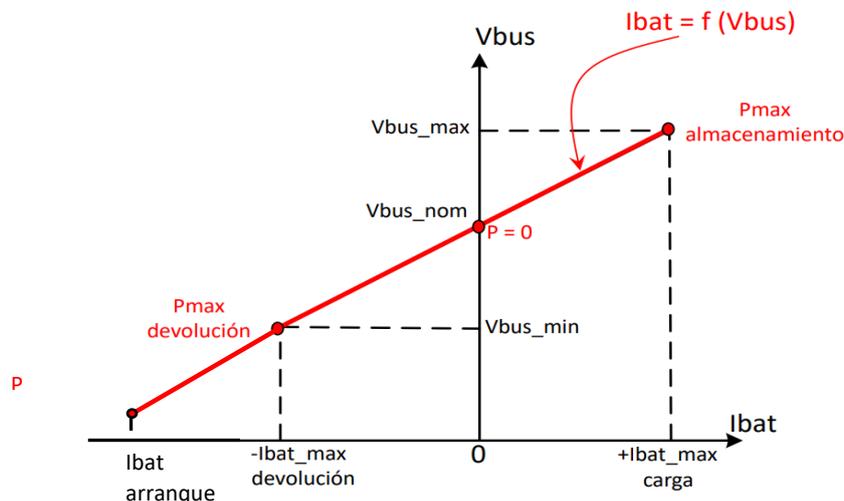


Fig 28. Esquema de control droop en caso de tensión inferior al límite.

En el caso planteado:

$$|Ibat_{arranque}| > |Ibat_{max}|$$

Por tanto, los componentes que no sean capaces de aceptar más corriente de la máxima establecida pueden ser dañados. Dado que las especificaciones de los componentes se escogen en función de las características de la red, si se supera dicha corriente máxima es probable que se pueda exceder la corriente máxima aceptada por estos componentes. Para evitar esto, se establece una nueva condición al sistema. Si la tensión es inferior al límite inferior de tensión, se le pedirá al sistema de almacenamiento la máxima corriente que pueda aportar, pero manteniendo el límite establecido en la red. Este comportamiento se presenta en la figura 29.

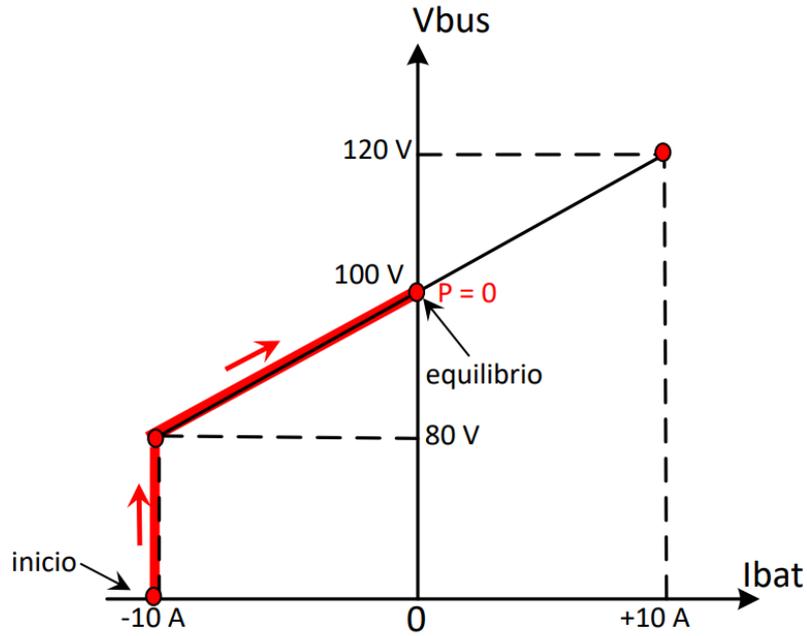


Fig 29. Esquema de control droop durante arranque [59].

En el otro extremo, se puede dar el caso en el que la tensión del bus supera la tensión máxima establecida. Esta situación nunca debería darse, ya que esto significa que la generación de energía es muy superior al consumo y se está inyectando excesiva corriente a la red. Los propios sistemas de generación deberían tener un sistema de control que regule la energía necesaria en el sistema. En este caso excepcional, el sistema de almacenamiento no puede aportar mucho. Lo único que puede hacer sería, mientras tenga capacidad de almacenamiento, absorber esa energía sobrante para intentar limitar la tensión del bus. Sin embargo, a medida que esta tensión aumenta, la potencia que tendría que absorber sería cada vez mayor ($P=V \cdot I$). Por tanto, se debe limitar la corriente aceptada para no exponer el sistema de almacenamiento a una potencia que no sea capaz de asumir.

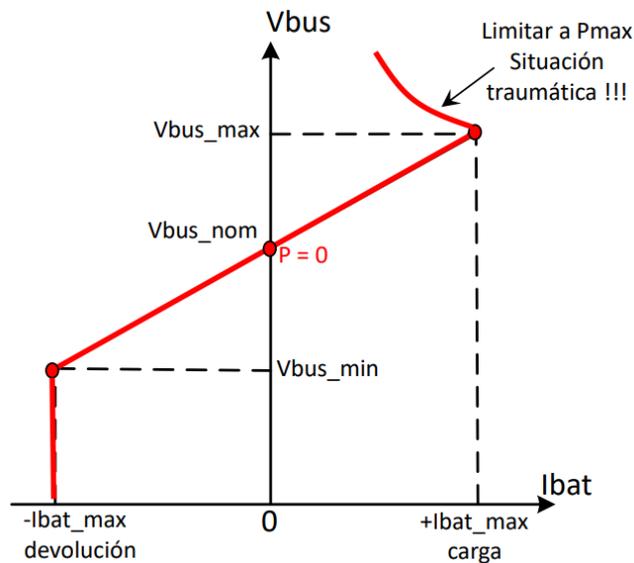


Fig 30. Esquema de control droop completo [59].

10. Control droop con zona muerta

Para el caso a tratar en este proyecto, la estrategia droop común no sirve para llevar a cabo el funcionamiento deseado. Una estrategia droop como la presentada anteriormente podría ser utilizada para regular la corriente en la batería del EV. Sin embargo, un supercondensador no actúa constantemente. El SC se encarga de suministrar grandes picos de corriente cuando el vehículo necesita altas dosis de potencia, ya sea debido a una rápida aceleración del vehículo, una cuesta, etc. Del mismo modo, no se recargará de recargarse con la energía en exceso, sino con los grandes picotazos de energía que puedan darse debido a altas recuperaciones de energía, como frenadas bruscas.

Como se puede apreciar, el funcionamiento del supercondensador quedará relegado a las situaciones en las que se requiera suministrar o absorber grandes cantidades de energía. El resto del flujo de corriente será dirigido por la batería del vehículo. Esto se debe en gran medida a las características del condensador que se presentaron anteriormente. La poca densidad de energía hace que el SC no pueda alimentar el motor del vehículo durante largos periodos de tiempo, pero su buena densidad de potencia, es decir, la gran cantidad de corriente que es capaz de suministrar y absorber instantáneamente, lo hacen ideal para las situaciones que requieren grandes cantidades de potencia de forma momentánea.

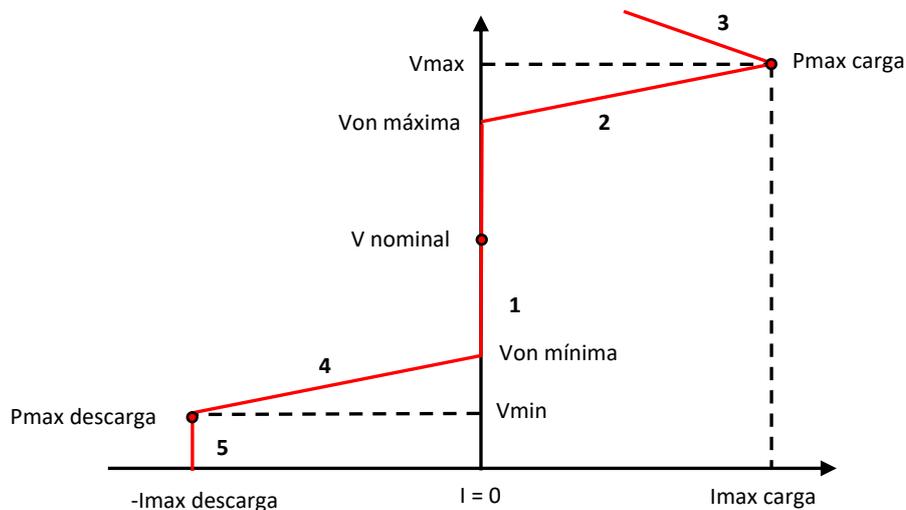


Fig 31. Esquema de control droop con zona muerta completo.

En la figura 31 se puede ver el esquema de funcionamiento final del control de corriente del supercondensador. Los valores establecidos en este trabajo son los siguientes:

- $I_{max_carga} = 100 \text{ A}$
- $I_{max_descarga} = -100 \text{ A}$
- $V_{nominal} = 400 \text{ V}$
- $V_{max} = 450 \text{ V}$
- $V_{on_max} = 430 \text{ V}$
- $V_{on_min} = 370 \text{ V}$
- $V_{min} = 350 \text{ V}$

I_{max_carga} y $I_{max_descarga}$ son el valor de corriente máxima que puede recibir y suministrar el supercondensador respectivamente. Estos valores dependen de las especificaciones del supercondensador escogido. $V_{nominal}$ es la tensión nominal del bus. V_{max} y V_{min} son los valores de tensión máxima y mínima que puede alcanzar el bus. Por último, V_{on_max} es la tensión a partir de la cual el supercondensador sale de la zona muerta y empieza a cargarse, es decir, a recibir energía. V_{on_min} por otro lado, es la tensión del bus más baja a partir de la cual el supercondensador comienza a ceder energía al bus.

En la figura 32 aparecen también representados los 5 estados de trabajo del sistema, los cuales pueden quedar definidos por la máquina de estados siguiente.

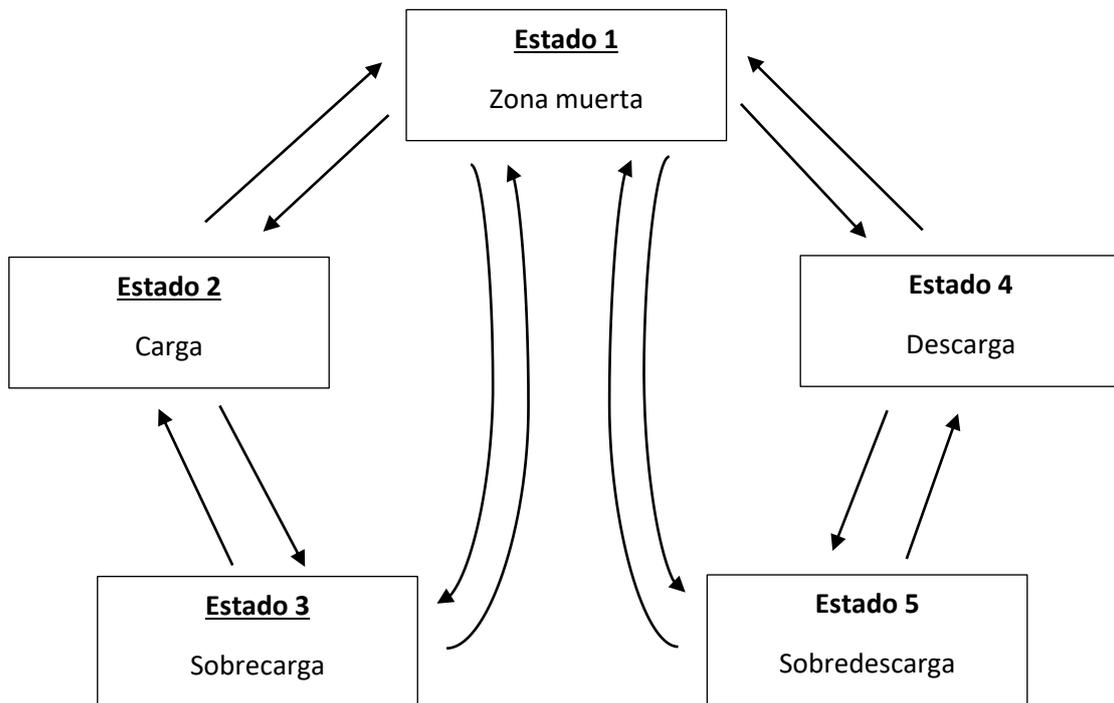


Fig 32. Máquina de estado droop control.



- Estados

- **Estado 1:** En este estado, la corriente que entra o sale del supercondensador es 0. El sistema de almacenamiento no está trabajando ya que la tensión del bus es aún cercana a la tensión nominal. Por tanto, es la batería la que se encarga de regular el bus.
- **Estado 2:** Estado de carga. La tensión del bus de continua del vehículo es elevada y el supercondensador recibe la energía sobrante. La corriente entra en el SC.
- **Estado 3:** Estado de sobrecarga. Se da únicamente cuando se produce un fallo en los sistemas del vehículo. La tensión del bus es mayor que la tensión máxima admisible. El supercondensador absorbe energía si aún tiene capacidad. La potencia absorbida se mantiene constante a pesar de que a tensión aumente.
- **Estado 4:** Estado de descarga. La tensión del bus es baja, por lo que el supercondensador suministra corriente al sistema para aportar al motor la potencia necesaria.
- **Estado 5:** Sobredescarga. Puede darse en el arranque o por algún fallo del sistema. La tensión es inferior a la tensión mínima estipulada. El supercondensador suministra la máxima corriente que es capaz de ceder o la máxima que se ha establecido por diseño.

- Conexiones

Las conexiones definen las condiciones que deben cumplirse para pasar de un estado del sistema a otro. Las condiciones son las siguientes.

- **1 – 2:** $V_{bus} > V_{on_max}$ & $V_{bus} < V_{max}$
- **2 – 1:** $V_{bus} < V_{on_max}$

- **1 – 3:** $V_{bus} > V_{max}$
- **3 – 1:** $V_{bus} < V_{max}$ & $V_{bus} < V_{on_max}$

- **1 – 4:** $V_{bus} < V_{on_min}$ & $V_{bus} > V_{min}$
- **4 – 1:** $V_{bus} > V_{on_min}$

- **1 – 5:** $V_{bus} < V_{min}$
- **5 – 1:** $V_{bus} > V_{min}$ & $V_{bus} > V_{on_min}$

- **2 – 3:** $V_{bus} > V_{max}$
- **3 – 2:** $V_{bus} < V_{max}$ & $V_{bus} > V_{on_max}$

- **4 – 5:** $V_{bus} < V_{min}$
- **5 – 4:** $V_{bus} > V_{min}$ & $V_{bus} < V_{on_min}$

11. Circuito de potencia

Conociendo el funcionamiento y el sistema de control del sistema, falta por conocer cómo se va a aplicar este proceso de control y como se va a realizar este intercambio de energía desde el bus al sistema de almacenamiento. Para ello se debe conectar el supercondensador al bus de continua. Sin embargo, aparece un inconveniente. El bus tiene una tensión nominal de 400 V, mientras que un supercondensador tiene normalmente una tensión nominal de alrededor de 2,5 V. Para poder conectar el SC a la red hacen falta un par de consideraciones.

Lo primero, una tensión nominal de 2,5 V es demasiado baja para una operación correcta. Por ello se intenta elevar esta tensión nominal lo máximo posible. Para ello se colocan, en vez de uno, varios supercondensadores en serie (y a veces también en paralelo). Así se obtiene un módulo de supercondensadores, similar a los módulos de baterías. Al colocar los SC en serie, la capacidad equivalente disminuye.

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Esto ha de tenerse en cuenta ya que se necesitará calcular la capacidad equivalente del módulo que se implemente. Además, la carga en cada condensador en sería será la misma en todos ellos, según la fórmula:

$$Q_{eq} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Por otro lado, la tensión nominal entre los bordes del módulo es mayor que la de los supercondensadores de forma separada. Esto se debe a que la tensión nominal total será la suma total de las tensiones nominales de los SC. En cierta manera, la diferencia de tensión se repartirá de forma equivalente entre el conjunto de los supercondensadores instalados.

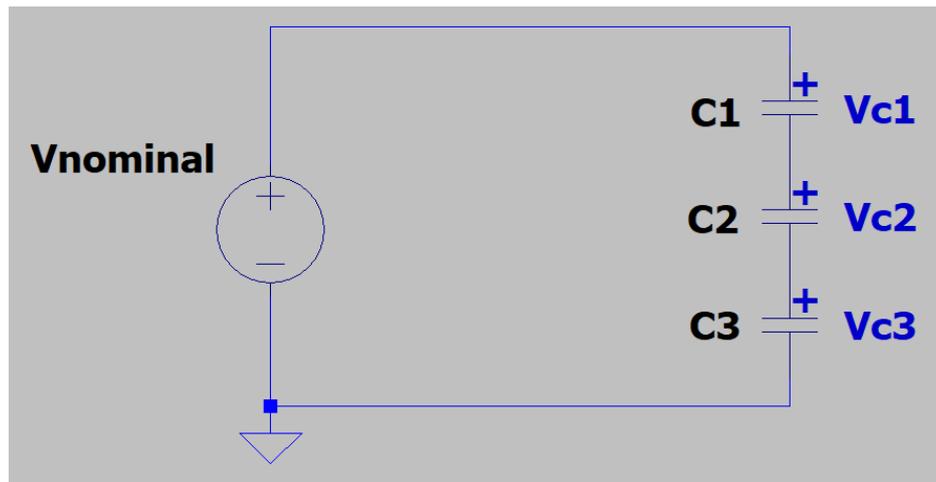


Fig 33. Tensión nominal equivalente de un módulo de supercondensadores.

Del circuito de la figura 33 se haya la siguiente función:

$$V_{nominal} = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3}$$

Estas cualidades de los módulos de supercondensadores han de tenerse en cuenta para la correcta implementación de los mismos. Las características equivalentes del módulo deberán ser calculadas, ya que diferirán de las características del SC escogido.

El módulo de supercondensadores aumenta la tensión nominal equivalente a la que pueden trabajar estos. Sin embargo, al ser la tensión del bus tan elevada (400 V), para poder igualar esta tensión se deberían colocar demasiados SC en serie. Suponiendo que el SC escogido tiene una tensión nominal de 2,5 V:

$$\frac{400}{2,5} = 160$$

Se necesitarían implementar 160 SC en serie, lo cual es obviamente, por motivos de espacio y de precio, inviable. Por tanto, para conectarse al bus de continua, se debe implementar un circuito de potencia que pueda transformar la tensión de 400 V en un extremo del circuito en una tensión mucho menor, con la cual pueda trabajar el módulo de SC. La tensión en el bus es continua (CC). La tensión y corriente que el módulo requiere para cargarse y descargarse es también continua. Por tanto, se necesitará implementar un convertidor CC – CC. Además, el intercambio de energía se realizará en ambas direcciones. Durante la carga el bus cede energía al módulo y durante la descarga el módulo cede la energía al bus. De esta forma, el convertidor CC – CC deberá ser bidireccional.

Existen múltiples diseños de circuitos de potencia convertidores CC -CC bidireccionales. Sin entrar en modelos demasiado complejos, se han valorado tres alternativas para este proyecto.

- Convertidor CC – CC bidireccional de 1 rama

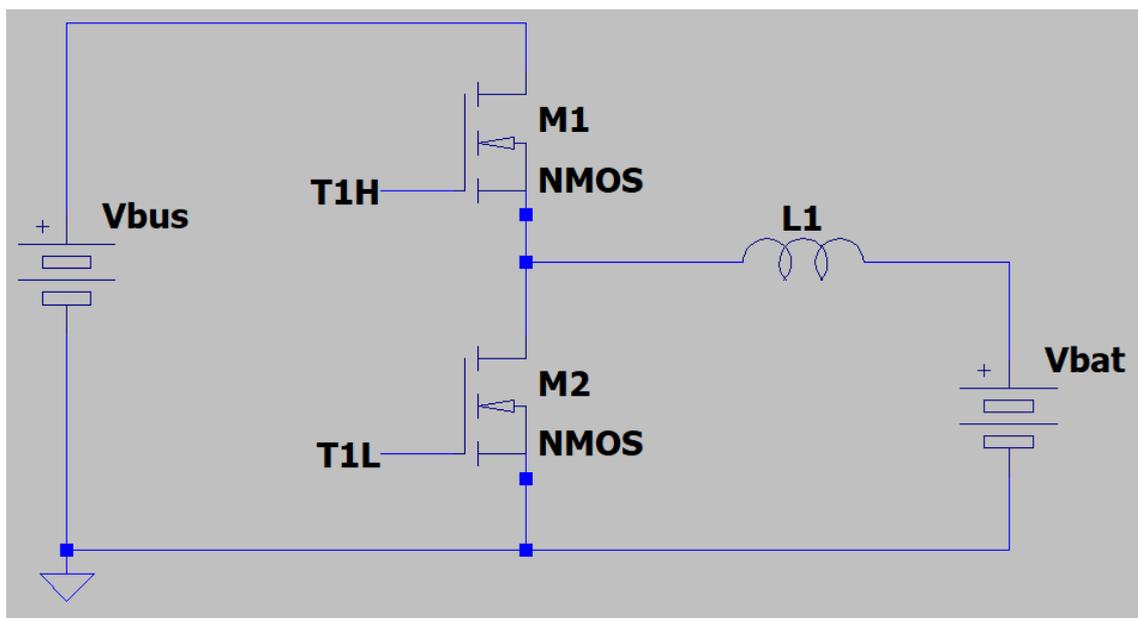


Fig 34. Convertidor CC – CC bidireccional de 1 rama.



El funcionamiento de este circuito es bastante sencillo. Básicamente funciona como convertidor elevador en una dirección y como convertidor reductor en su otra dirección. Para ello, sustituye los diodos que suelen utilizarse en el desarrollo de estos convertidores, por transistores MOSFET, en los cuales se puede controlar su apertura y cierre según se necesite para controlar de esta forma el comportamiento de circuito. De esta manera puede conectar dos redes de distinta tensión. En la figura 34, actuaría como un convertidor reductor de izquierda a derecha, reduciendo la tensión del bus a la tensión nominal del módulo de SC. De derecha a izquierda actuaría como un convertidor elevador, elevando la tensión del módulo a la tensión que requiere el bus.

Para llevar a cabo este doble régimen de trabajo, se necesita desarrollar un sistema de control que regule el comportamiento de los MOSFET. Cuando se quiera utilizar el circuito como un reductor, los MOSFET deberán actuar de una determinada manera; mientras que, si se quiere utilizar la funcionalidad de elevador, los MOSFET deberán comportarse de otra manera completamente distinta.

Los inconvenientes que puede tener este circuito son los siguientes. Este tipo de convertidores tienen un límite de tensión que pueden elevar/reducir. A partir de cierta diferencia entre las tensiones de ambos extremos, este tipo de circuitos serán ineficaces. La elevación/reducción se lleva a cabo controlando los tiempos de apertura y cierre de los MOSFET. Se pondrá el ejemplo del circuito elevador.

En este circuito, la tensión a la salida (V_r) será superior a la tensión de entrada suministrada por V_s . Esta tensión de salida queda definida por la siguiente función:

$$V_r = \frac{V_s}{1 - D}$$

Donde D es el duty cycle, el cual define el tiempo que este se pasa abierto o cerrado durante cada ciclo de trabajo del MOSFET. Para aumentar la tensión a la salida, habrá que incrementar el duty cycle todo lo posible de acuerdo con esta función. Sin embargo, el duty cycle solo puede tomar valores entre 0 y 1. El 0 significa que el MOSFET está constantemente abierto y 1 que el MOSFET está constantemente cerrado. Por tanto, se puede comprender como se alcanzará un valor máximo de tensión a la salida que no podrá superarse ya que el duty cycle tiene un valor límite.

En un circuito convertidor reductor nos encontraríamos en una situación similar. Para implementar este tipo de circuitos hay que asegurarse de que es capaz de alcanzar las tensiones deseadas en ambas direcciones. Sin embargo, ya que se optará por realizar un modo de control de corriente (explicado más adelante), en vez de un modo de control de tensión habitual, esta limitación no será relevante en este sistema.

Otro inconveniente que tienen este tipo de circuitos es la falta de protección frente a cortocircuitos. Los transistores MOSFET tienen en la mayoría de los casos incorporado en su encapsulado un diodo en antiparalelo el cual sirve como protección para el propio MOSFET. Sin embargo, este diodo en antiparalelo crea un camino para la corriente que no puede ser impedido.

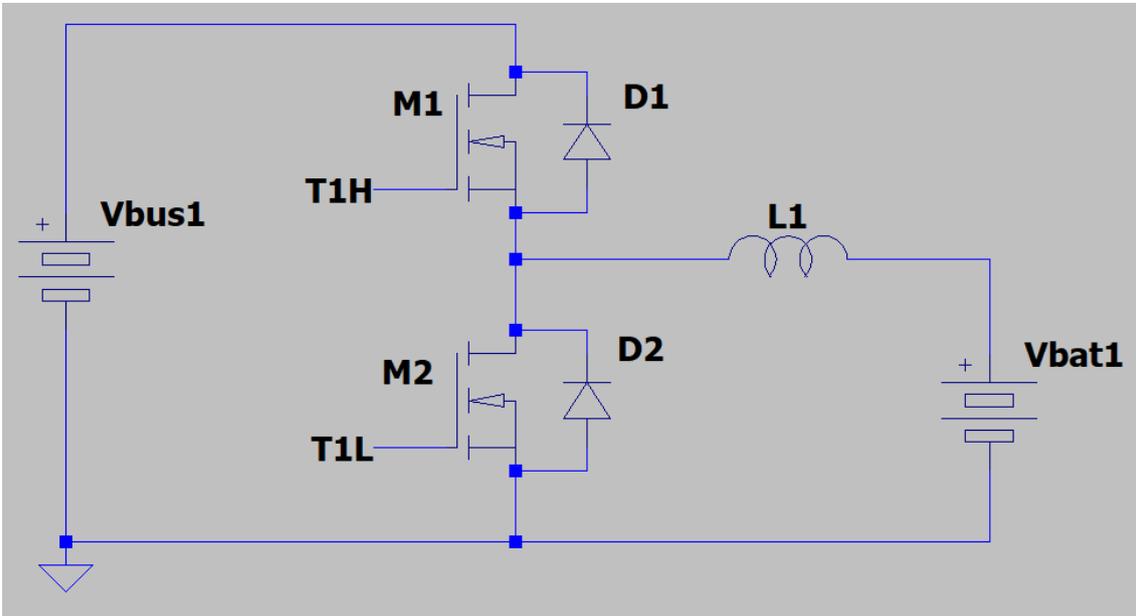


Fig 35. Diodos en antiparalelo en convertidor CC – CC de 1 rama.

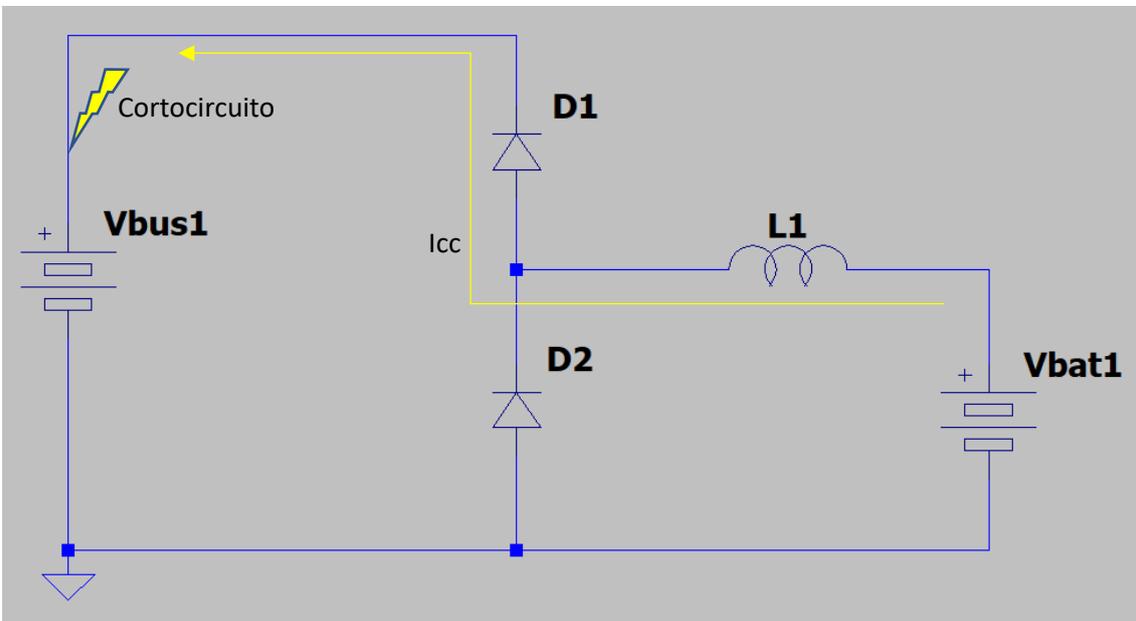


Fig 36. Circuito equivalente a diodos en antiparalelo en convertidor CC – CC de 1 rama.

En el circuito de la figura 35 se pueden apreciar los diodos en antiparalelo presentes en los MOSFET. Cuando los transistores MOSFET se encuentran abiertos, el circuito de la figura 42 se puede simplificar al de la figura 36. Como se puede ver, en caso de que se produzca un cortocircuito en el bus de continua, la corriente tendría vía libre

para fluir desde el módulo de condensadores hasta el bus. No habría ningún elemento que pudiese aislar ambos extremos del circuito de potencia.

- Convertidor CC – CC bidireccional de 2 ramas

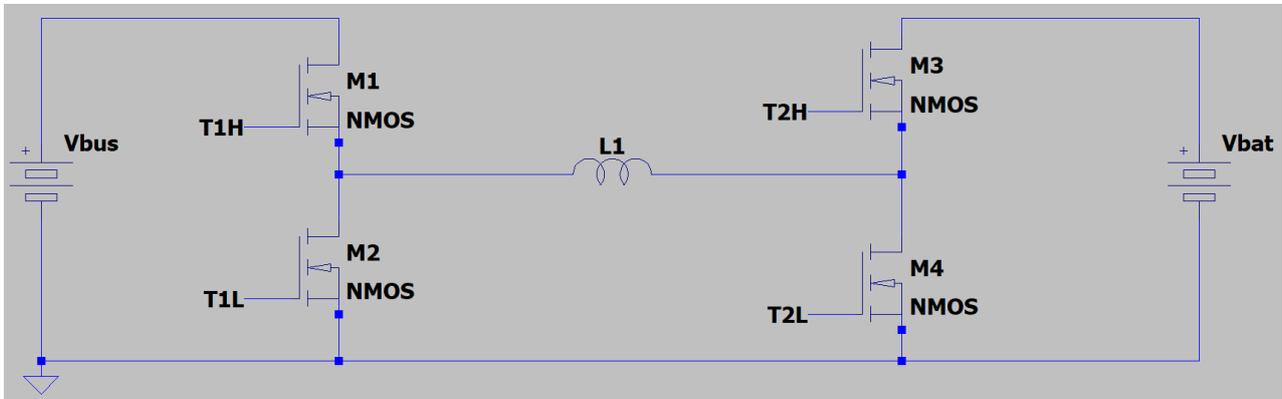


Fig 37. Convertidor CC – CC bidireccional de 2 ramas.

Este circuito funciona de forma muy similar al convertidor de 1 rama. Simplemente se añade una rama extra con otros dos MOSFET en el extremo contrario del circuito. El control de los 4 MOSFET simultáneamente hará que el circuito actúe como un convertidor reductor-elevador, transformando la tensión de salida en ambas direcciones.

La ventaja que otorga este circuito sobre el anterior reside en que este circuito si presenta una protección frente a cortocircuitos. La implementación de la segunda rama permite aislar completamente ambos extremos del circuito en caso de que se produzca un fallo en alguno de ellos. Como desventaja podría presentarse el hecho de que la implementación de la segunda rama aumenta la complejidad y el coste del circuito.

Dado que esta será la topología de circuito escogida para el diseño propuesto, se definirá su funcionamiento en mayor detalle posteriormente.

- Convertidor DAB

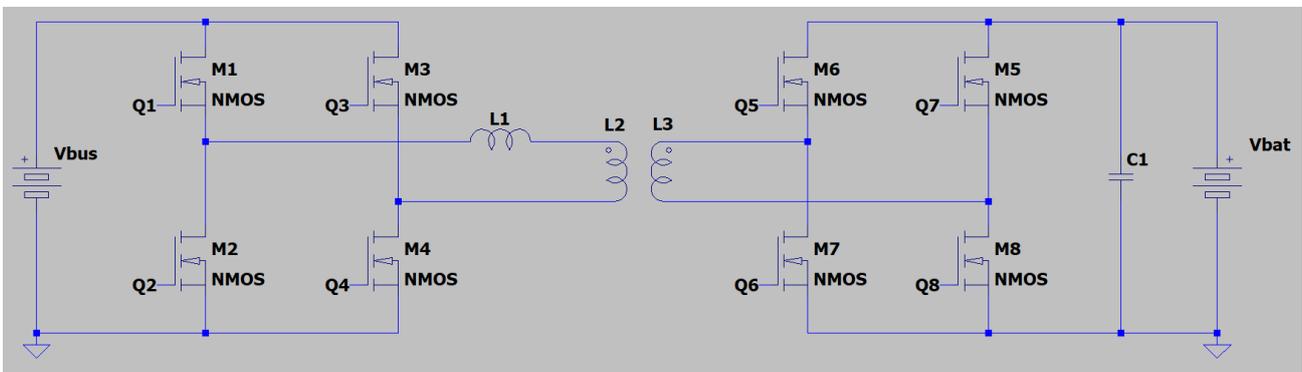


Fig 38. Convertidor CC – CC bidireccional de 2 ramas.



Este circuito es mucho más complejo que los presentados hasta ahora. Incorpora un transformador para elevar o reducir la tensión. Sin embargo, para ello, requiere primero convertir la tensión CC en CA por medio de un inversor de puente en H, y posteriormente volver a convertir esta CA en CC que pueda ser suministrada al módulo de condensadores. Esto conlleva que el precio y la complejidad del circuito serán mucha más elevados que los circuitos anteriores.

Este tipo de convertidor, sin embargo, soluciona un inconveniente presente en las otras tipologías de circuitos. Al implementar un transformador entre ambos lados del sistema, permite elevar y reducir la tensión de una rama a otra de forma más eficaz. Es capaz de alcanzar diferencias de tensión entre una rama y otra que los otros circuitos no serían capaces de alcanzar.

Realizando una comparación de las características y complejidad de todos los circuitos presentados, se ha decidido optar por el convertidor CC – CC bidireccional de 2 ramas, ya que es menos complejo que el convertidor DAB y su precio es también menor. Como añadido, el modo de control de corriente hace innecesaria la mejora en la elevación y reducción de tensión que podría aportar este último. Además, a pesar de ser algo más complejo que el convertidor de 1 rama, el de 2 ramas incorpora la protección ante cortocircuito gracias al aislamiento de ambos lados del convertidor. Esto permite ahorrar el coste de instalar un sistema de protección extra.

12. Convertidor CC – CC bidireccional de 2 ramas con modo de control de corriente (I_{max} , T_{off})

Habitualmente, para el sistema de control de un convertidor si implementa un modo de control de tensión. En esta clase de sistemas, la frecuencia de conmutación de los transistores MOSFET se mantiene constante, mientras que la variable de control pasa a ser el duty cycle, o periodo de trabajo, el cual se presentó anteriormente. El aumento o disminución de este duty cycle variará la tensión a la salida del convertidor. De esta manera es como se controla generalmente el valor de tensión a la salida del convertidor.

En este trabajo, sin embargo, se llevará a cabo un modo de control de corriente, el cual regulará el valor de la corriente a la salida o a través de del convertidor. Ya que lo que se busca es almacenar o suministrar energía en función de las características del bus, controlar la corriente permite regular este flujo de energía de manera más sencilla que con un modo de control de tensión. El modo de control de corriente I_{max} T_{off} define como constante el valor que puede tomar la corriente máxima a través de la bobina del convertidor y el tiempo que los MOSFET estarán cerrados o abiertos cada ciclo.

Este convertidor actuará como un convertidor reductor-elevador. En el caso a tratar, reducirá la tensión del bus al módulo de SC y elevará la tensión del módulo al bus. El sistema tendrá dos modos de funcionamiento básicos: carga y descarga. Durante la carga se llevará a cabo la labor de suministrar corriente del bus al módulo de

condensadores. Durante la descarga, será e la dirección opuesta. El funcionamiento en cada uno de los modos será el siguiente.

En el modo de control implementado, el modo de corriente (I_{max} , T_{off}), el control sobre T1H y T2L será equivalente, mientras que el control sobre T1L y T2H será también equivalente. Esto quiere decir que estos pares de transistores se abrirán y cerrarán al mismo tiempo.

En la figura 39 se muestran los ciclos de trabajo que seguirán los MOSFET, regulados por el sistema de control, en el modo de carga. En este modo, el bus inyectará corriente ala bobina (estado 1 en la figura 39), la cual se cargará, y posteriormente suministrará esa energía al módulo de supercondensadores (estado 3 en la figura 39). Los estados 2 y 4 corresponden a los tiempos muertos de los transistores MOSFET. En sistemas ideales no sería necesario tener en cuenta estos estados, pero en un sistema real, no incluirlos puede conllevar consecuencias fatales para el sistema. Un MOSFET real no corta el paso de corriente a través de él de forma instantánea. Existe un cierto periodo de tiempo entre que se deja de mandar la señal de control al MOSFET y entre que este se abre eficazmente. Debido a esto, se espera un corto periodo de tiempo entre el estado 1 y el estado 3, ya que, en caso contrario, podría darse la situación de que los 4 MOSFET se encontrasen cerrados al mismo tiempo y el sistema podría colapsar. De todas maneras, la presencia de los diodos antiparalelo en los MOSFET seguiría permitiendo el paso de determinada cantidad de corriente de la manera adecuada, como se ve en los estados 2 y 4.

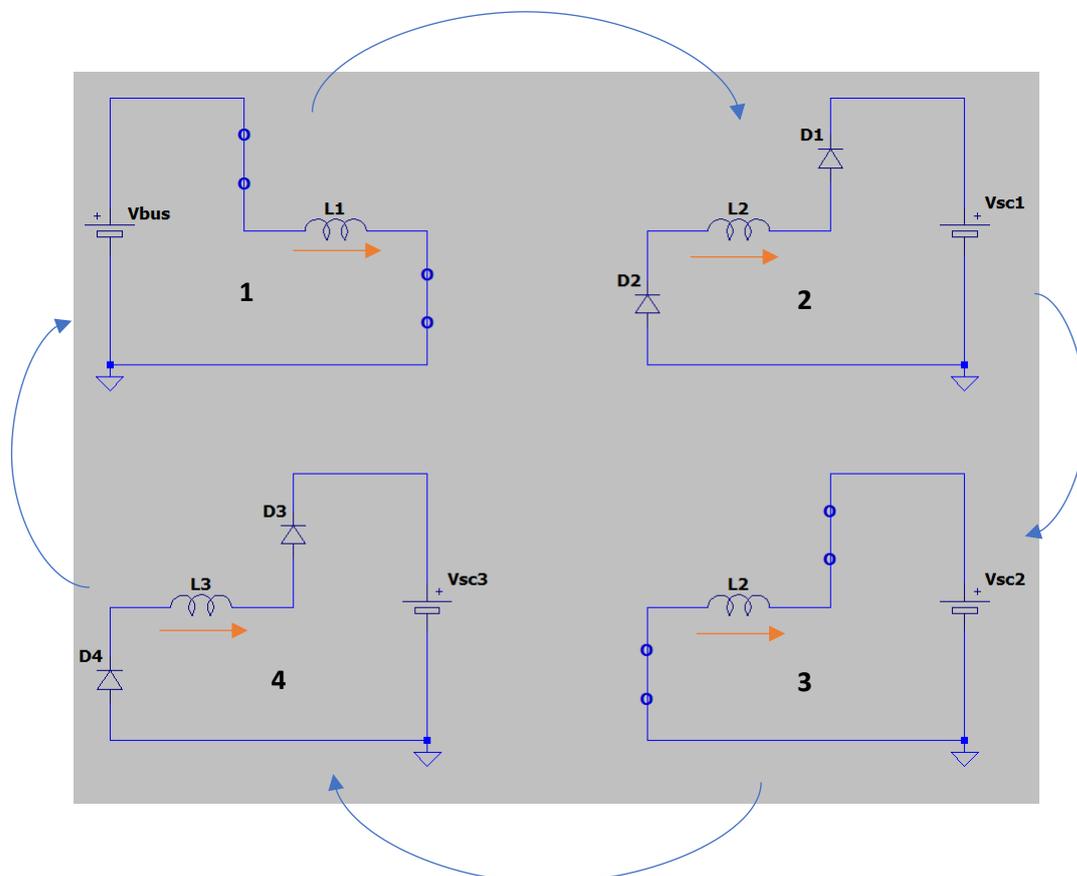


Fig 39. Ciclos de trabajo convertidor CC – CC bidireccional de 2 ramas en modo de carga.

Dado que la fuente de energía de la bobina se conecta y desconecta de esta constantemente debido a la apertura y cierre de los transistores MOSFET, la corriente a través de la bobina variará constantemente con el tiempo, generando una corriente oscilante (figura 40). La corriente equivalente será la corriente media entre la corriente máxima (I_{max}) y la corriente mínima (I_{min}). Las ecuaciones que rigen la corriente a través de la bobina son las mismas que para un circuito

$$\Delta = I_{max} - I_{min}$$

$$I_{med} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$$

$$T_s = T_{on} + T_{off}$$

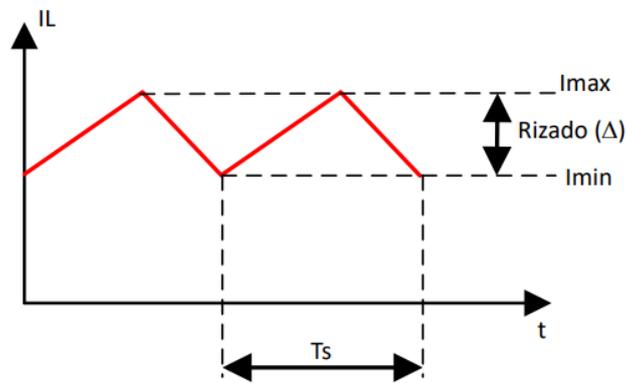


Fig 40. Corriente a través de la bobina en modo de carga [60].

Durante el modo de descarga, el proceso será similar, pero en el sentido contrario. El módulo de supercondensadores suministrará la corriente a la bobina, y esta la verterá posteriormente al bus de continua del vehículo.

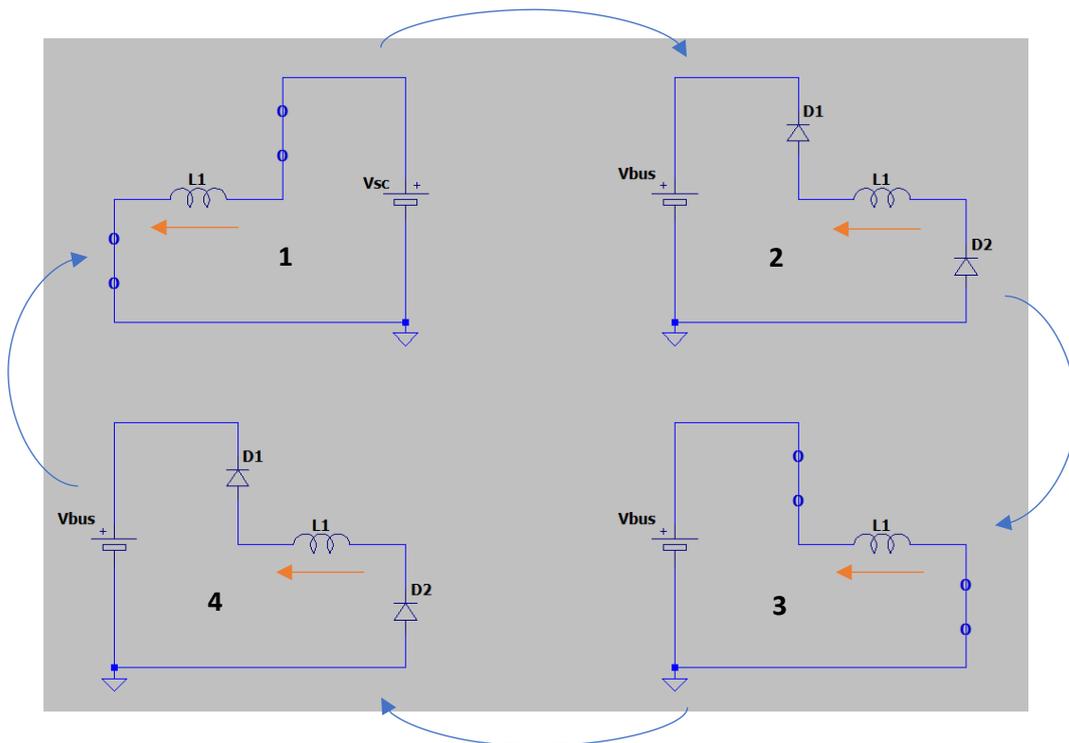


Fig 41. Ciclos de trabajo convertidor CC – CC bidireccional de 2 ramas en modo de descarga.

La corriente será positiva en el modo de carga, cuando entra hacia el módulo de SC; y negativa cuando sale hacia el bus.

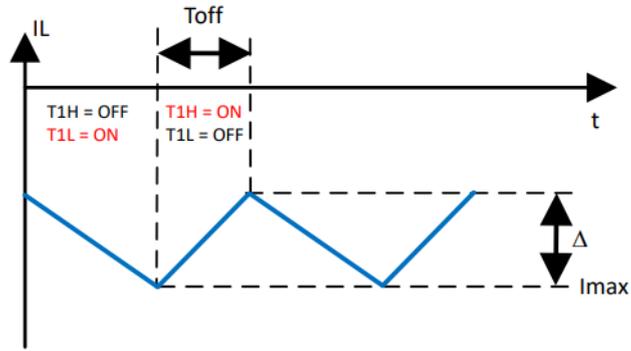


Fig 42. Corriente a través de la bobina en modo de descarga [60].

- Máquina de estados en control de modo corriente

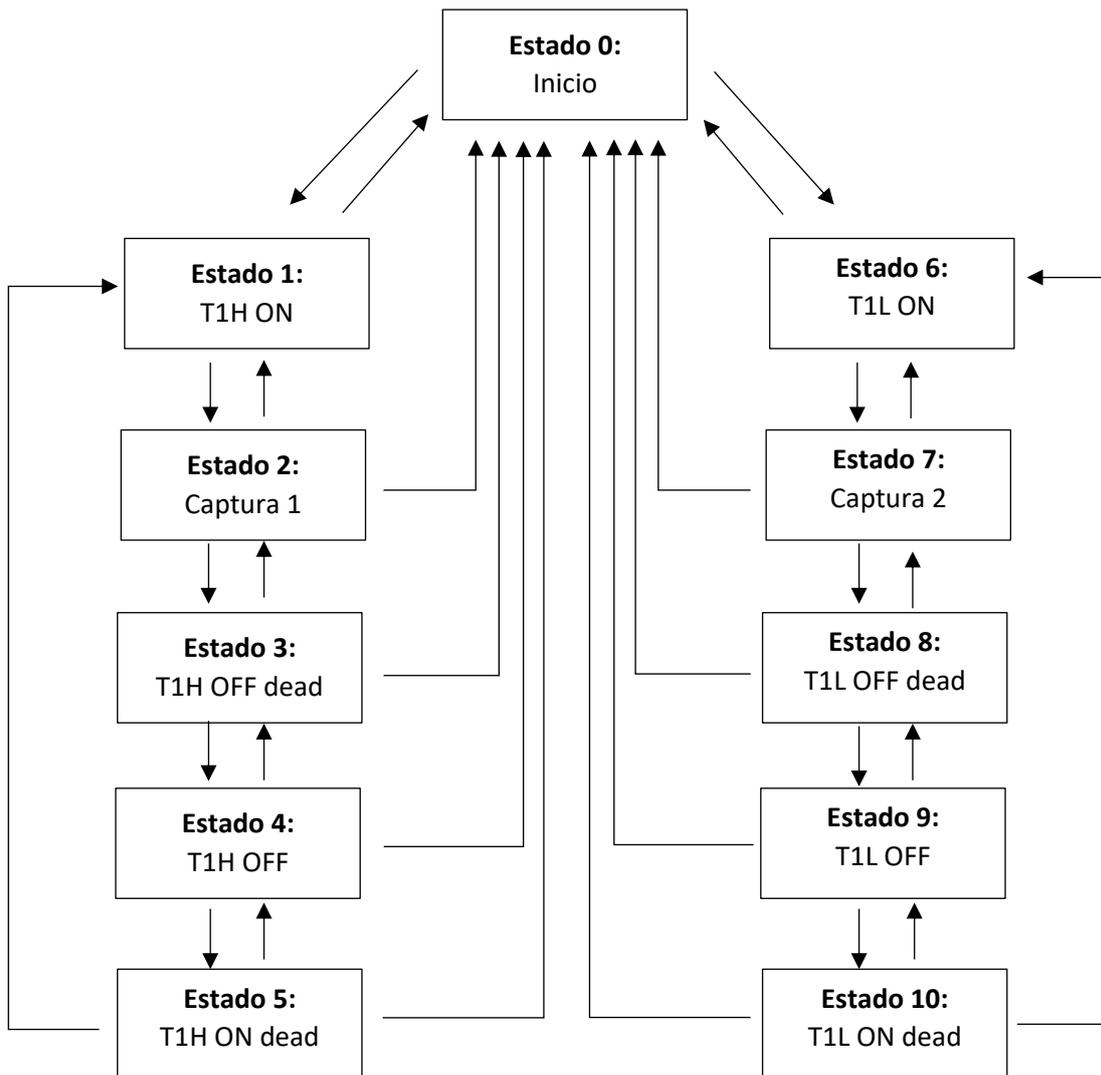


Fig 43. Máquina de estados modo de control de corriente.



Se pueden diferenciar claramente dos ramas principales que parten del estado inicial. La rama izquierda es la rama del comportamiento en modo carga. El control se realiza sobre el MOSFET T1H. Ya que los transistores trabajan por pares, el control del MOSFET T1H implica también el comportamiento idéntico del MOSFET T2L. Ambos se abrirán y cerrarán a la vez. Por otro lado, en la rama derecha, la cual describe el control del modo de descarga, se controlará el MOSFET T1L, y a su vez, el MOSFET T2H.

- Estados

- **Estado 0:** Es el estado inicial. El sistema no está trabajando. Todos los transistores se encuentran abiertos y la corriente no circula por el circuito. También se mantiene este estado cuando la corriente máxima de referencia es 0.
- **Estado 1:** Es el primer estado de trabajo en el modo de carga. Se cierran T1H y T2L para permitir que la corriente fluya del bus a la bobina y esta se cargue.
- **Estado 2:** El estado 2 es un estado interno necesario para llevar a cabo la simulación. Ya que en los sucesivos estados se necesitará medir el tiempo que transcurre, en este estado se toma la referencia de tiempo (T_{ref}) sobre la que calcularán el tiempo transcurrido los demás estados que lo requieran.
- **Estado 3:** Este es el primer estado de seguridad. Es un estado intermedio entre la apertura del primer par de transistores y el cierre del segundo par. Se espera un determinado tiempo (T_{dead}) con todos los MOSFET abiertos para evitar la posibilidad de que, debido al retraso en la apertura del primer par, pueda darse la situación en la que los cuatro MOSFET estén cerrados.
- **Estado 4:** Una vez esperado el tiempo de seguridad, se cerrará el segundo par de MOSFET: T1L y T2. De esta manera, la energía almacenada en la bobina será traspasada al módulo de SC.
- **Estado 5:** Al igual que el estado 3, es un estado de seguridad. Dado que se va a volver a proceder a la apertura de un par de transistores y el cierre del par inverso, se esperará un tiempo de seguridad.
- **Estado 6:** Es el primer estado del modo de trabajo de descarga. Se cierran los transistores T1L y T2H, de forma que la corriente fluye de los SC a la bobina, cargándola.
- **Estado 7:** De la misma forma que en el estado 2, en este estado se toma la referencia de tiempo para este ciclo de trabajo.
- **Estado 8:** Estado de seguridad para evitar complicaciones en la alternancia del estado de los transistores.
- **Estado 9:** Se cierran los transistores T1H y T2L para que la corriente fluya de la bobina al bus de continua, alimentando así el bus de la red del vehículo.
- **Estado 10:** Último estado de seguridad para evitar complicaciones durante el cambio de estado de los transistores.



- Conexiones

- **0 – 1:** $I_{max} > 0$
- **0 – 6:** $I_{max} < 0$
- **1 – 0:** $I_{max} \leq 0$
- **1 – 2:** $IL \geq I_{max}$
- **2 – 0:** $I_{max} \leq 0$
- **2 – 3:** Estado = Estado 2
- **3 – 0:** $I_{max} \leq 0$
- **3 – 4:** tiempo $\geq T_{ref} + T_{dead}$
- **4 – 0:** $I_{max} \leq 0$
- **4 – 5:** tiempo $\geq T_{ref} + T_{off} - T_{dead}$
- **5 – 0:** $I_{max} \leq 0$
- **5 – 1:** tiempo $\geq T_{ref} + T_{off}$

- **6 – 0:** $I_{max} \geq 0$
- **6 – 7:** $IL \leq -I_{max}$
- **7 – 0:** $I_{max} \geq 0$
- **7 – 8:** Estado = Estado 7
- **8 – 0:** $I_{max} \geq 0$
- **8 – 9:** tiempo $\geq T_{ref} + T_{dead}$
- **9 – 0:** $I_{max} \geq 0$
- **9 – 10:** tiempo $\geq T_{ref} + T_{off} - T_{dead}$
- **10 – 0:** $I_{max} \geq 0$
- **10 – 6:** tiempo $\geq T_{ref} + T_{off}$

13. Presentación del circuito de simulación

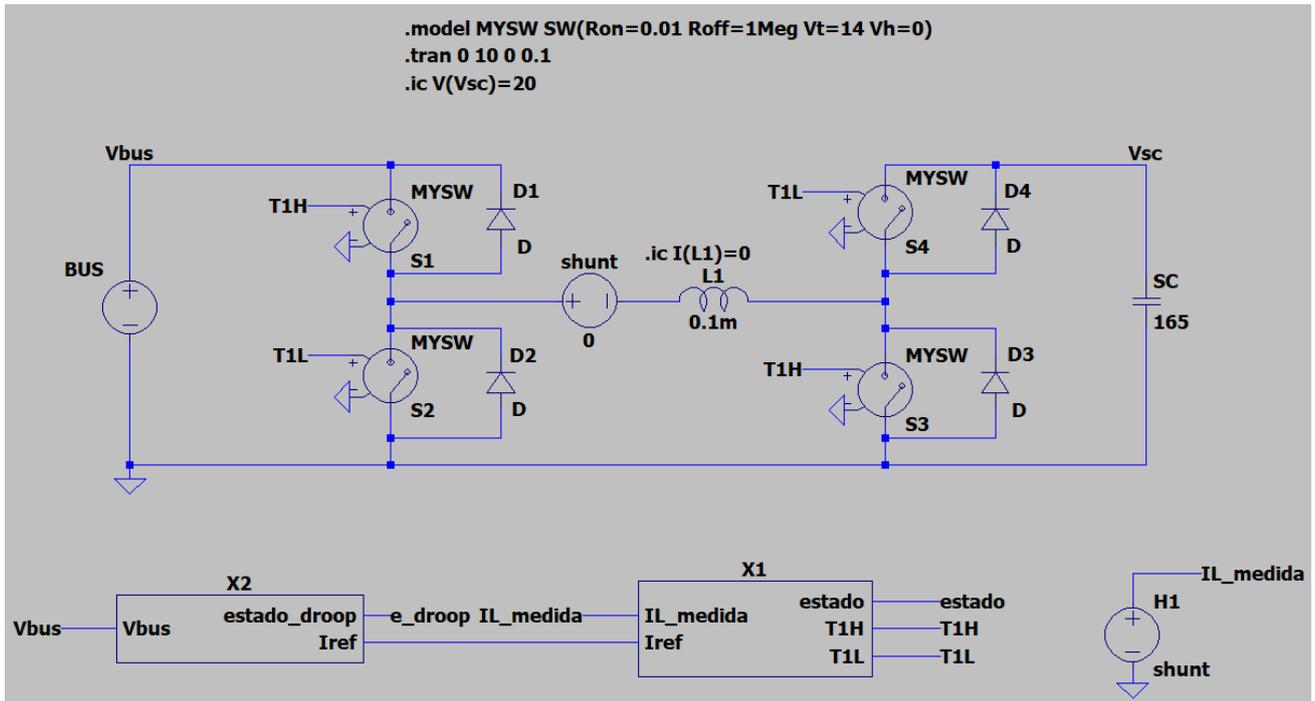


Fig 44. Circuito de simulación.

Este circuito se trata de una simulación realizada en el programa LTSpice con componentes ideales para estudiar con detalle el funcionamiento básico que tendría un sistema de estas características.

El primer elemento a describir es el bus de continua del vehículo (Vbus). La tensión del bus se define por la fuente variable BUS. El valor de esta fuente se puede variar durante la simulación para comprobar los efectos que tendrá en el sistema los cambios en la tensión del bus que se producirán por la acción de los demás componentes conectados al bus, como el motor o la batería principal.

Al otro extremo del circuito se encuentra el módulo de supercondensadores (SC). A pesar de ser un elemento ideal, se ha consultado los datos de módulos reales para establecer unas características similares a las que tendría un módulo real [49]. Las características de este módulo son 48 V de tensión nominal, 165 F y, a pesar de poder soportar mayores picos de corriente, se ha establecido una corriente máxima admisible de ± 100 A. El módulo, a pesar de estar conformado por múltiples supercondensadores, en la simulación se ha simplificado por medio de un único elemento capacitivo, al cual se le han dado las características equivalentes del módulo escogido.

En la parte central del circuito se encuentra el convertidor CC – CC. La estructura de este circuito ya se ha presentado anteriormente. Sin embargo, en esta simulación se han implementado interruptores ideales en lugar de MOSFET buscando un comportamiento completamente ideal. Además, se han colocado diodo en antiparalelo con estos interruptores para imitar el comportamiento que tendrían los MOSFET.



Existen dos ramas de interruptores. La primera rama, formada por los interruptores S1 y S2, los cuales están controlados por las señales de control T1H y T1L. La segunda rama está constituida por los interruptores S3 y S4, los cuales deberían estar controlados por las señales T2H y T2L. Sin embargo, ya que en este sistema de control implementado $T2H = T1L$ y $T2L = T1H$, las señales de control de la segunda rama se han sustituido por su equivalente de la primera rama. El modelo de funcionamiento de estos interruptores ha sido programado de tal forma que una señal igual o superior a 14 V cierre los interruptores, y una señal inferior a 14 los abra.

La inductancia situada entre las dos ramas es un componente fundamental del circuito. Permite llevar a cabo los intercambios de corriente por medio de las topologías de convertidor Boost y Buck. Las bobinas amortiguan las variaciones de corriente a través de sí mismas, en función de su valor de inductancia. Por tanto, el valor que se le dé a la bobina debe ser adecuado para controlar el rizado de corriente que se produce durante la operación del circuito debido a la apertura y cierre de los transistores. El rizado será equivalente a:

$$\Delta = I_{max} - I_{min}$$
$$\Delta = \frac{V}{L} * T_{off}$$
$$I_{eq} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$$

Durante el proceso de carga, la V tomará el valor de la Vsc, la tensión en el módulo de supercondensadores. En el proceso de descarga, la V tomará el valor de la tensión de bus. Ya que la tensión del bus siempre será superior a la tensión en extremos del condensador, el mayor rizado siempre se producirá durante la descarga. Ya que este estado de descarga se mantiene entre 370 y 350 V, para calcular el mayor rizado se tomará el mayor valor de tensión (370 V). Habiéndose establecido arbitrariamente un límite de rizado de 10 A, y siendo el valor de Toff establecido de 10 μ s, el valor de la bobina se puede calcular según:

$$L = \frac{V_{bus}}{\Delta} * T_{off}$$
$$L = \frac{370}{10} * 10 * 10^{-6} = 0,37 \text{ mH}$$

Otro elemento del circuito principal es la simulación de una resistencia shunt. Esta fuente de tensión de valor 0 sirve para medir la corriente a través de la línea en la que se encuentra, dentro del programa en el que se trabaja. Al estar colocada en serie con la inductancia (L1), sirve para medir la corriente que está circulando por la bobina en cada momento (IL_medida).

Por último, tenemos los elementos de control. En este caso se tratan de un bloque existente en LTSpice, el cual permite implementar máquinas de estados. Se han realizado dos: la primera X1, la cual define el funcionamiento del convertidor en modo de control de corriente por medio del control de los interruptores del circuito; y X2, el cual define el modo de control droop, calculando la corriente de referencia con la que debe trabajar el



modo de control de corriente en función de la tensión que tome el bus de continua en cada momento. El código de programación de estos bloques se puede consultar en el Anexo 1 y en el Anexo 2.

También se ha establecido la tensión inicial del módulo de SC en 20 V para saltar la fase de carga inicial, en la cual, hasta que el módulo alcanza una tensión mínima, el funcionamiento no es aplicable. Además, la corriente inicial a través de la bobina será 0.

14. Resultados simulación

A continuación, se estudiarán los resultados obtenidos en distintas simulaciones para comprobar el correcto funcionamiento del sistema y analizar el comportamiento del mismo en distintas situaciones.

- Simulación modo de control de corriente

Inicialmente, se comprobará que el circuito de potencia diseñado cumple su función. Dado que se ha implementado un modo de control de corriente, el circuito debe controlar la corriente que circula a través de él en función de una referencia (I_{ref}). Esta referencia será definida en cada momento por el control droop, el cual dirige la entrada y salida de corriente entre el bus y el SC. Sin embargo, en esta primera simulación, se establecerá una referencia de corriente de forma arbitraria, para comprobar así que el sistema sigue estas referencias.

La referencia de corriente se mide en voltios ya que la máquina de estados en la simulación necesita tensiones para trabajar y no sirven corrientes. Aun así, 30 V de $V(I_{ref})$ son equivalentes a 30 A de I_{ref} . En la figura 45 se puede ver como la corriente a través de la inductancia $I(L1)$ sigue el valor determinado por la referencia $V(I_{ref})$. Esto quiere decir que el modo de control de corriente está implementado correctamente. Cuando la corriente es negativa, lo que quiere decir que la corriente sale del módulo de SC y entra al bus, se puede apreciar un rizado muy significativo debido a la alta tensión del bus. Sin embargo, también existe rizado cuando la corriente es positiva, aunque este sea mucho menor.

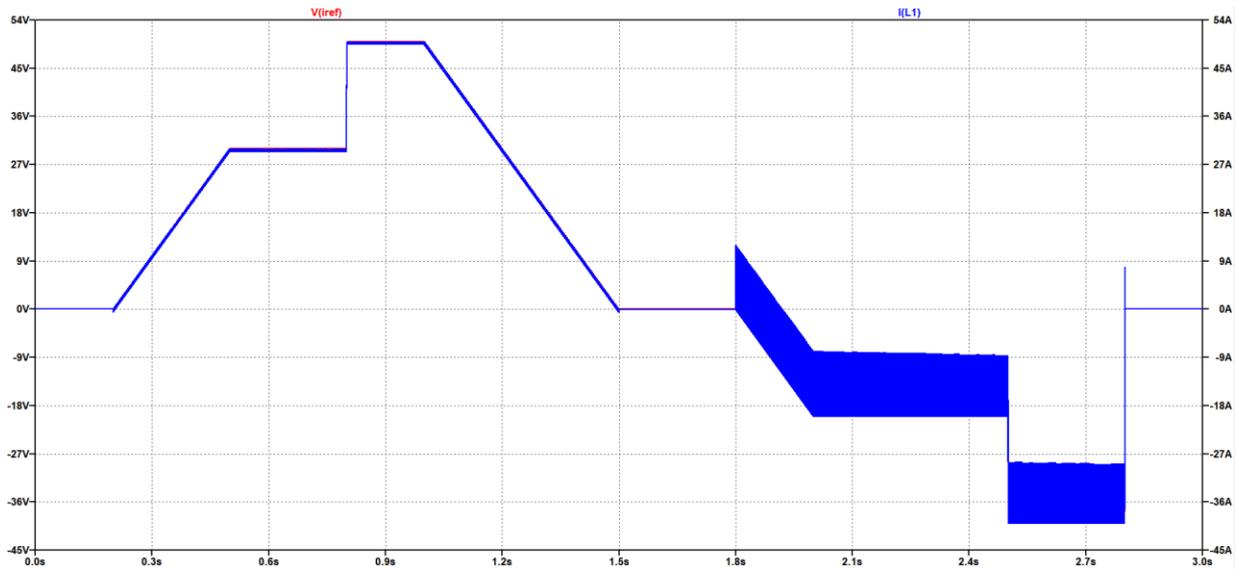


Fig 45. Simulación modo de control de corriente.

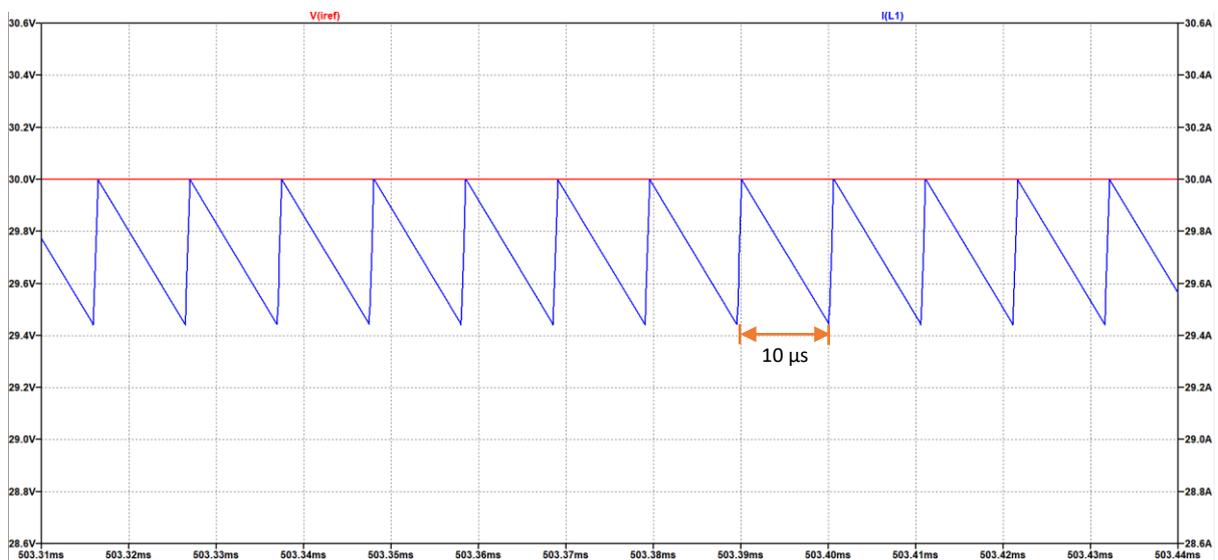


Fig 46. Rizado de carga en simulación modo de control de corriente.

En la figura 46 se aprecia el rizado de carga el cual tiene un valor aproximado de 0,5 A. Se puede ver también como la corriente se incrementa hasta alcanzar el valor de referencia y posteriormente decrece durante el tiempo de descanso que se establece ($T_{\text{off}} = 10 \mu\text{s}$). Este es el comportamiento descrito en la máquina de estados del apartado 12.

De la misma forma, en la figura 47 se representa el rizado en el modo de descarga, el cual es mucho mayor que el rizado en modo de carga, con un valor aproximado de 12 A. Este valor es superior al máximo establecido ya que en esta primera simulación no se trabaja con el circuito final, sino con una simplificación en la que la tensión del bus es superior a 370 V. El comportamiento es el mismo que en el modo de carga. Al alcanzar el valor de referencia, la corriente decrece en valor absoluto durante el tiempo de reposo T_{off} , para posteriormente volver a incrementarse.

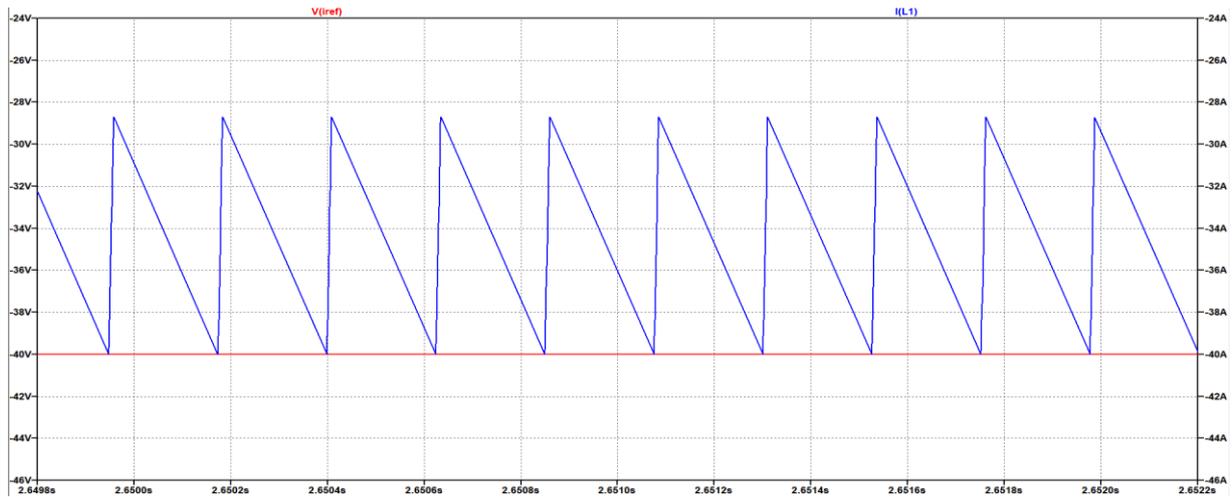


Fig 47. Rizado de descarga en simulación modo de control de corriente.

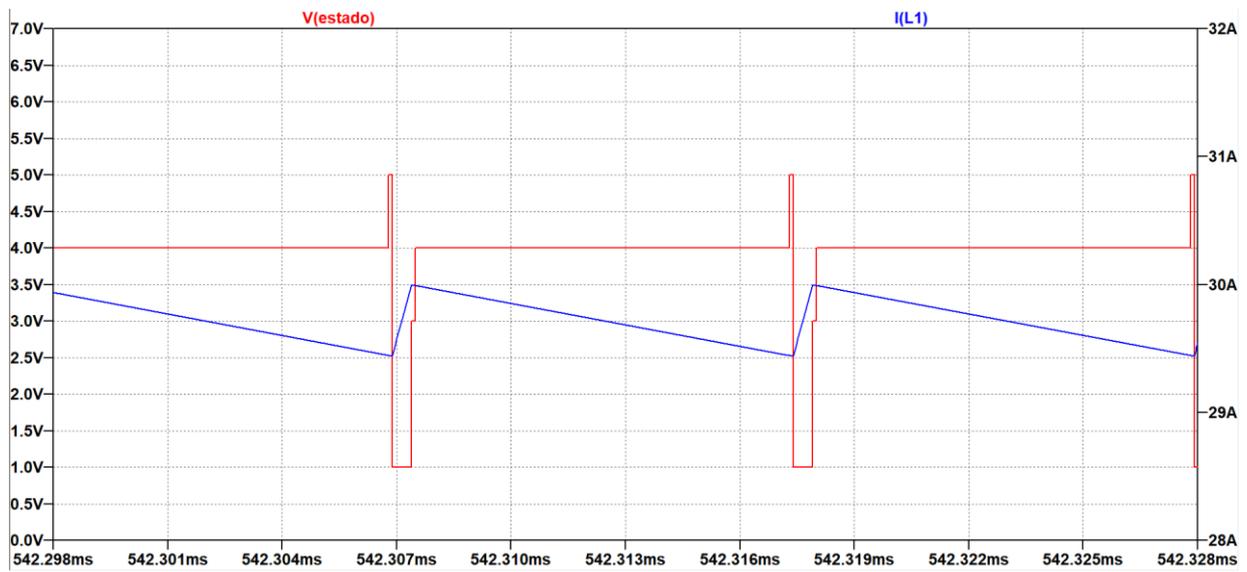


Fig 48. Máquina de estados de modo de control de corriente.

El comportamiento de la máquina de estados, mostrado en la figura 48, también concuerda con el descrito en la figura 43 (página 48), por lo que la implementación de esta máquina de estados es correcta.

- Simulación modo de control droop de zona muerta

Para entender mejor los resultados obtenidos en la simulación del sistema para el control droop, se recordará el esquema de trabajo presentado anteriormente.

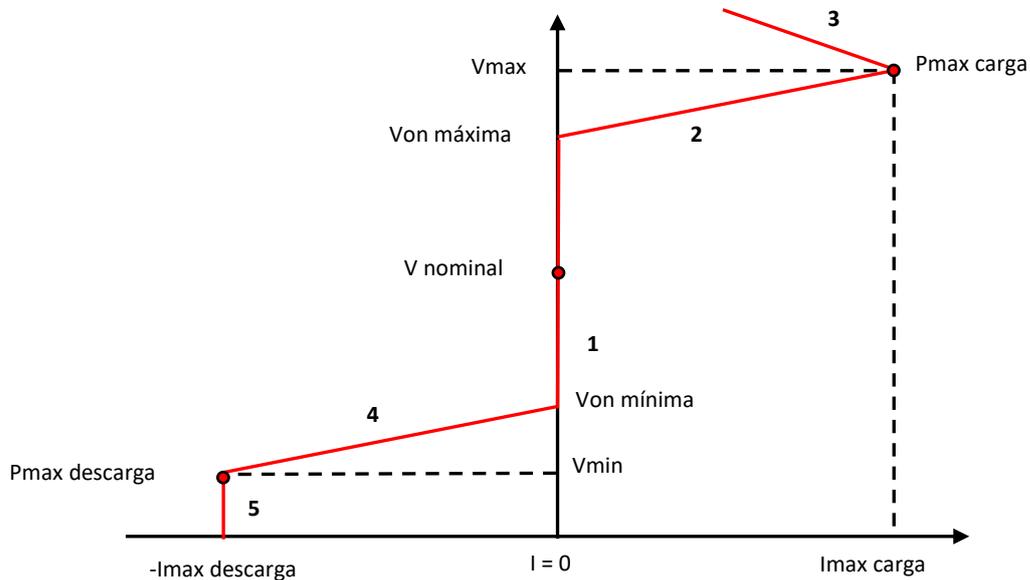


Fig 49. Esquema de control droop con zona muerta completo.

Los valores establecidos para el trabajo del sistema son:

- $I_{max_carga} = 100 \text{ A}$
- $I_{max_descarga} = -100 \text{ A}$
- $V_{nominal} = 400 \text{ V}$
- $V_{max} = 450 \text{ V}$
- $V_{on_max} = 430 \text{ V}$
- $V_{on_min} = 370 \text{ V}$
- $V_{min} = 350 \text{ V}$

Existen 5 estados de trabajo. El estado en el que se encontrará el sistema depende de la tensión del bus de continua. En la figura 50 se presenta una primera simulación del sistema completo. En ella se pueden diferenciar los distintos estados por los que pasa el circuito.

- Estado 1:

Al comienzo de la simulación, el bus se encuentra a 400 V. Al estar en la tensión nominal del bus el sistema se encuentra en la zona muerta (estado 1). En el estado 1, el sistema se encuentra entre las tensiones máxima y mínima de trabajo ($V_{on_max} = 430 \text{ V}$ y $V_{on_min} = 370 \text{ V}$). Mientras el bus se encuentre entre estos valores de tensión el circuito no conducirá corriente y el sistema se encontrará en un estado de reposo.

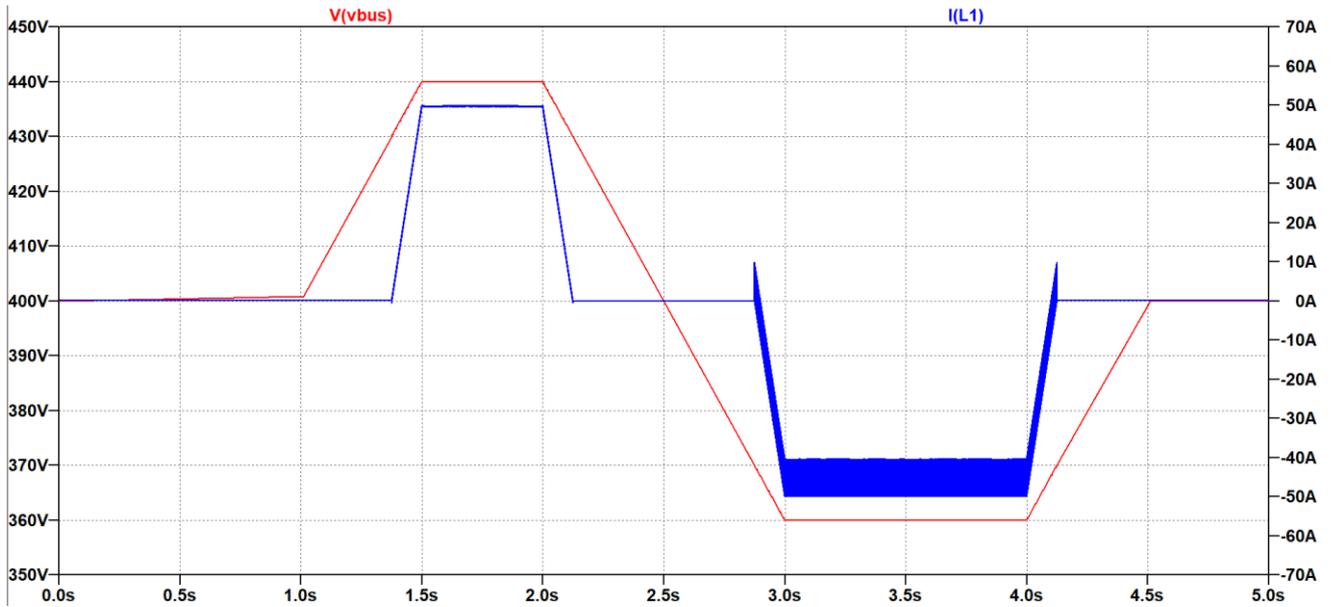


Fig 50. Simulación control droop 1.

Hasta el segundo 1, la tensión del bus se mantiene en 400 V, por lo que el estado 1 se mantiene. A partir de 1 segundo de simulación, la tensión del bus comienza a crecer. Aun así, el sistema se mantiene en el estado 1 y la corriente no circula por la bobina, ya que aún no se ha alcanzado la tensión máxima de trabajo. Sin embargo, al alcanzar esta tensión V_{on_max} de 430 V, el sistema pasa al estado 2, el estado de carga. En la figura 51 se muestra en más detalle esta transición.

- Estado 2:

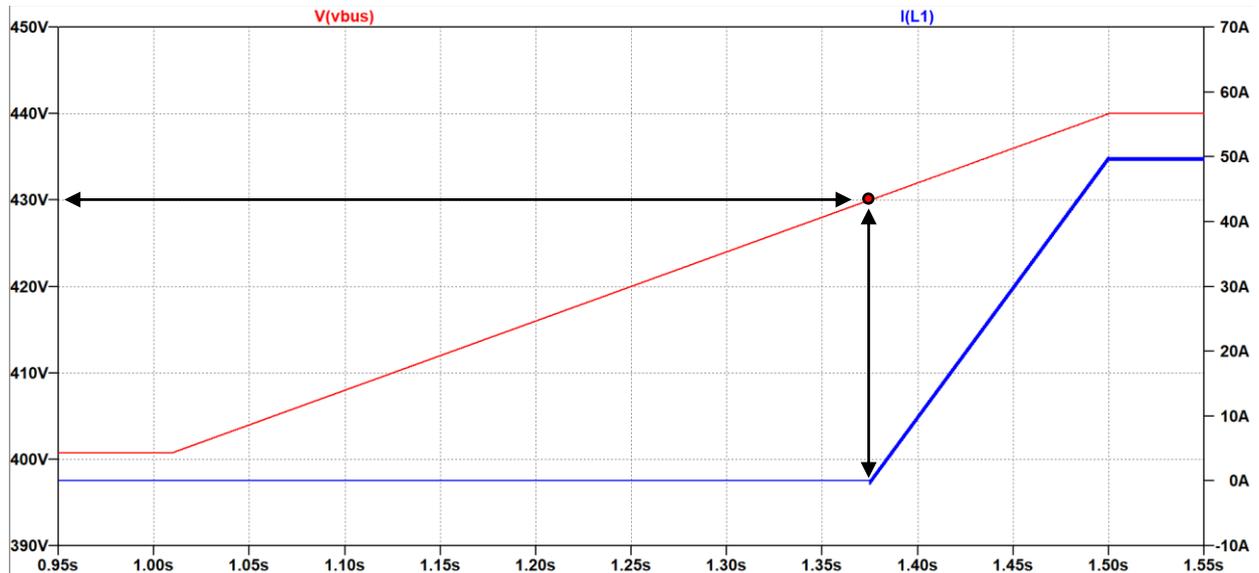


Fig 51. Simulación control droop 1 (estado 1 a estado 2).

Al llegar a los 430 V, V_{on_max} , el sistema entra en el estado de carga y la corriente comienza a circular del bus hacia el módulo de supercondensadores. En este estado 2, la corriente es proporcional a la tensión del bus. Cuanto más crece la tensión,

más se incrementa la corriente a través del circuito. La corriente de referencia para el modo de carga es equivalente a:

$$I_{ref} = I_{max} * \frac{V_{bus} - V_{on_max}}{V_{max} - V_{on_max}}$$

Para un determinado valor de tensión, le corresponde un valor de corriente equivalente. Así, en la figura 51 se aprecia como, al llegar a 440 V y mantener esta tensión constante, la corriente también se mantiene constante en 50 A.

$$I_{ref} = 100 * \frac{440 - 430}{450 - 430} = 50 A$$

Cuando se alcanza la tensión máxima de 450 V, se alcanzará también el valor máximo de corriente establecido en 100 A (figura 52).

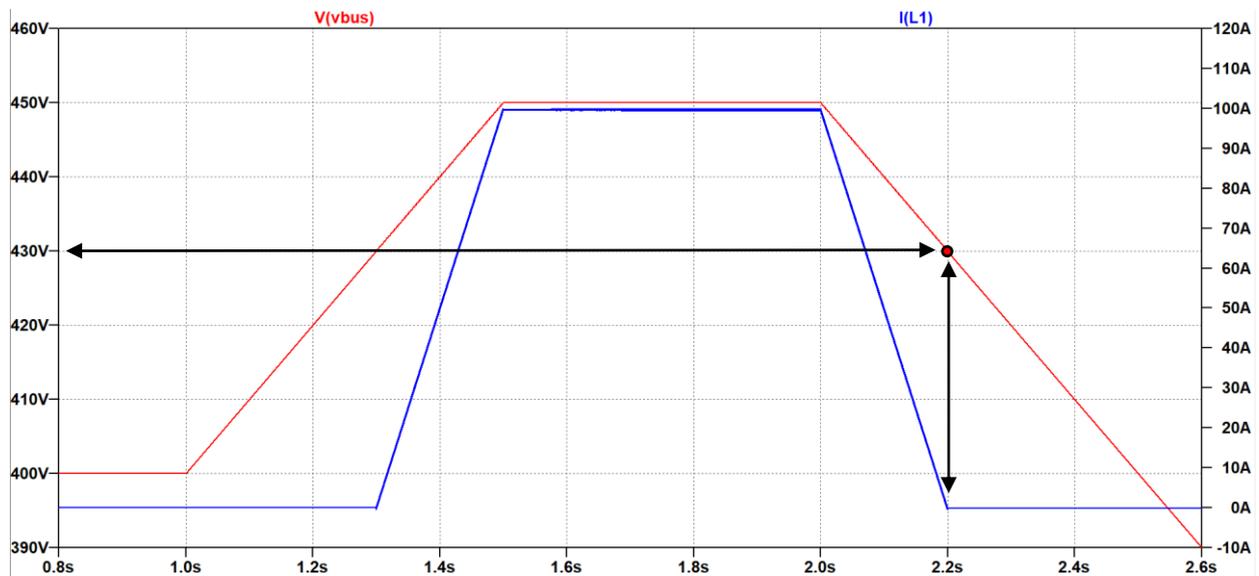


Fig 52. Simulación control droop 2. Estado 2 de carga.

En la figura 52 también se puede apreciar como a partir del segundo 2, la tensión del bus comienza a disminuir. Debido a esto, la corriente suministrada al módulo de SC también se va reduciendo progresivamente. Cuando la tensión alcanza de nuevo el valor de 430 V, la corriente vuelve a ser 0 a través del circuito, volviendo así al estado 1 de reposo.

La evolución del estado 1 al estado 2 en el esquema del sistema se representa en la figura 53. En la figura 54 también se puede apreciar cómo, al entrar la máquina de estados en el estado de carga, el cual se representa por una referencia de 1 V, el sistema empieza a conducir la corriente.

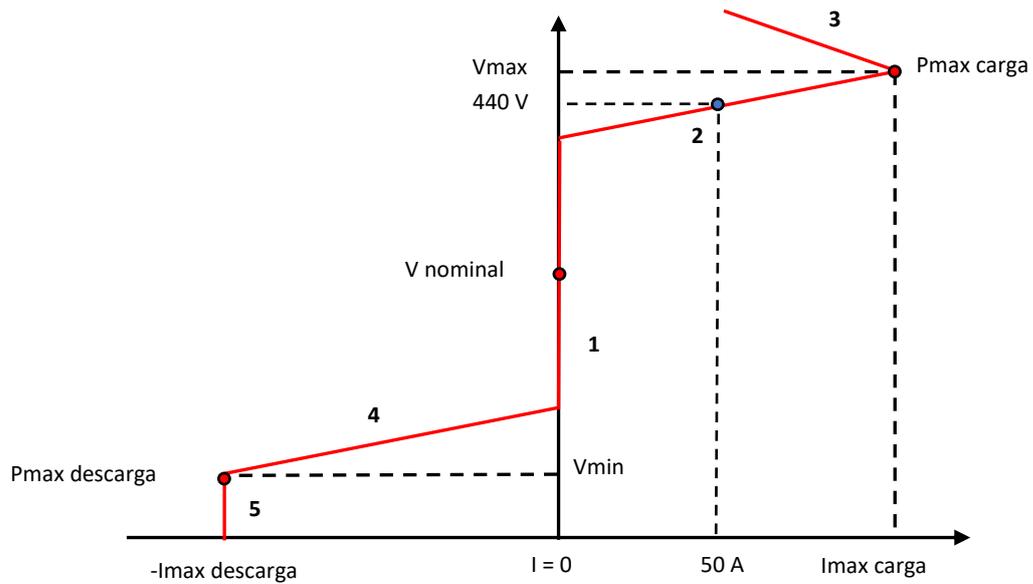


Fig 53. Esquema de control droop con zona muerta. Estado 2 de carga.

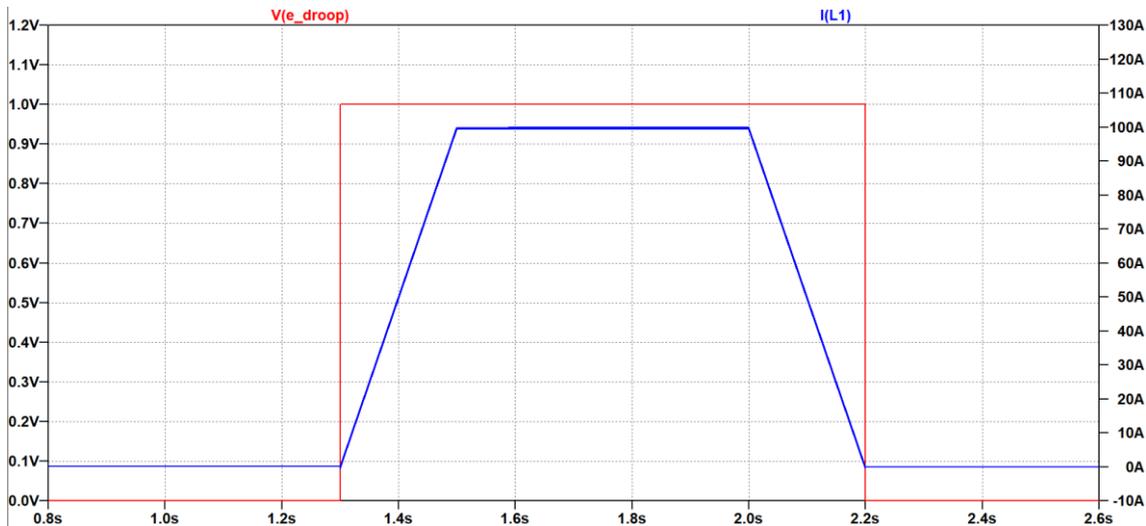


Fig 54. Simulación control droop 2. Estado 2 en máquina de estados.

En este estado de carga, al ser la corriente positiva y fluir del bus al módulo de supercondensadores, el módulo se estará cargando. Esto se puede apreciar en el aumento de la tensión del módulo, el cual acumula esta energía para utilizarla más adelante. Dado que el tiempo de carga es corto, la tensión no se eleva demasiado.

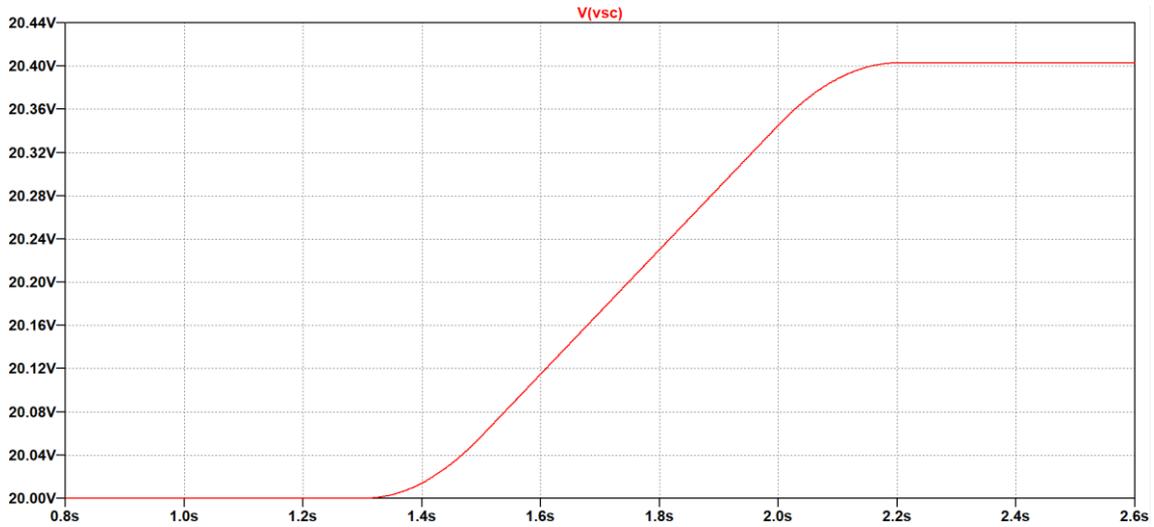


Fig 55. Simulación control droop 2. Carga del módulo de SC.

- **Estado 3:**

Se ha estudiado el comportamiento a tensión de bus máxima. Sin embargo, si la tensión sobrepasase este valor, se entraría en el estado de sobrecarga, el estado 3. En este estado, el sistema ha alcanzado valores de tensión excesivamente altos, que pueden llegar a ser dañinos para los componentes del sistema. Se supone el caso de la figura 56, en donde la tensión alcanza los 480 V.

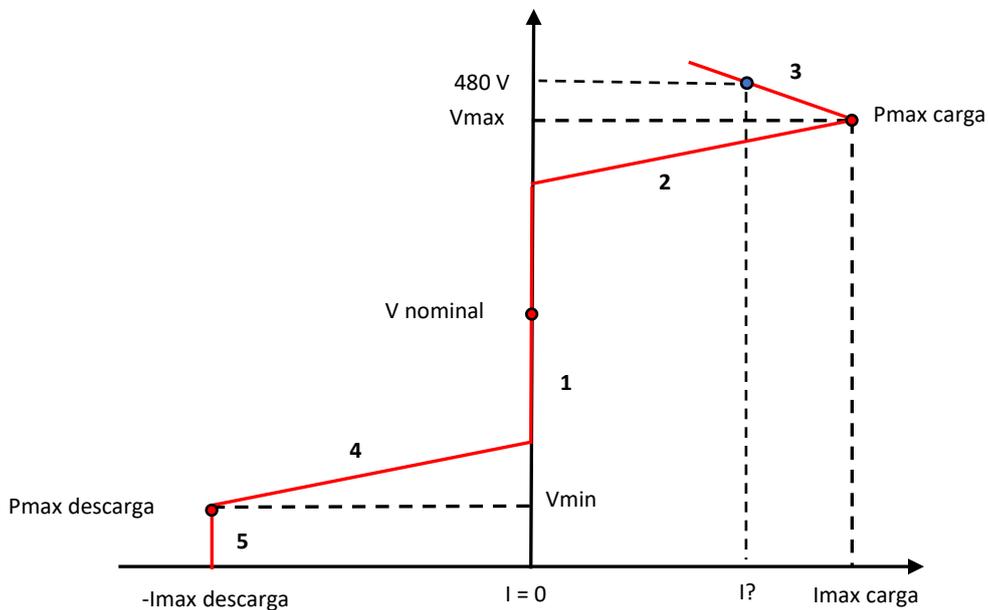


Fig 56. Esquema de control droop con zona muerta. Estado 3 de sobrecarga.

En esta situación, el módulo de supercondensadores solo puede intentar reducir la tensión del bus cuanto pueda absorbiendo corriente del bus. Continúa cargándose, recibiendo energía para intentar liberarla de la red de continua, pero sin exceder la potencia máxima admisible del módulo establecida, la cual es:

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} = 450 * 100 = 45 \text{ kW}$$

Para ello, según sigue incrementándose la tensión del bus, la corriente aceptada disminuye progresivamente, de tal forma que, cuando se alcanza el máximo de 480 V, la corriente toma un valor aproximado de 93 A. Por tanto, la potencia aceptada sigue siendo:

$$P = V * I = 480 * 93 = 44,64 \text{ kW} \approx 45 \text{ kW}$$

Cuando la tensión comienza a disminuir, la corriente se incrementa de nuevo, hasta que se alcanzan los 450 V otra vez, y se entra de nuevo en el modo carga normal. Este comportamiento descrito se refleja en la figura 57.

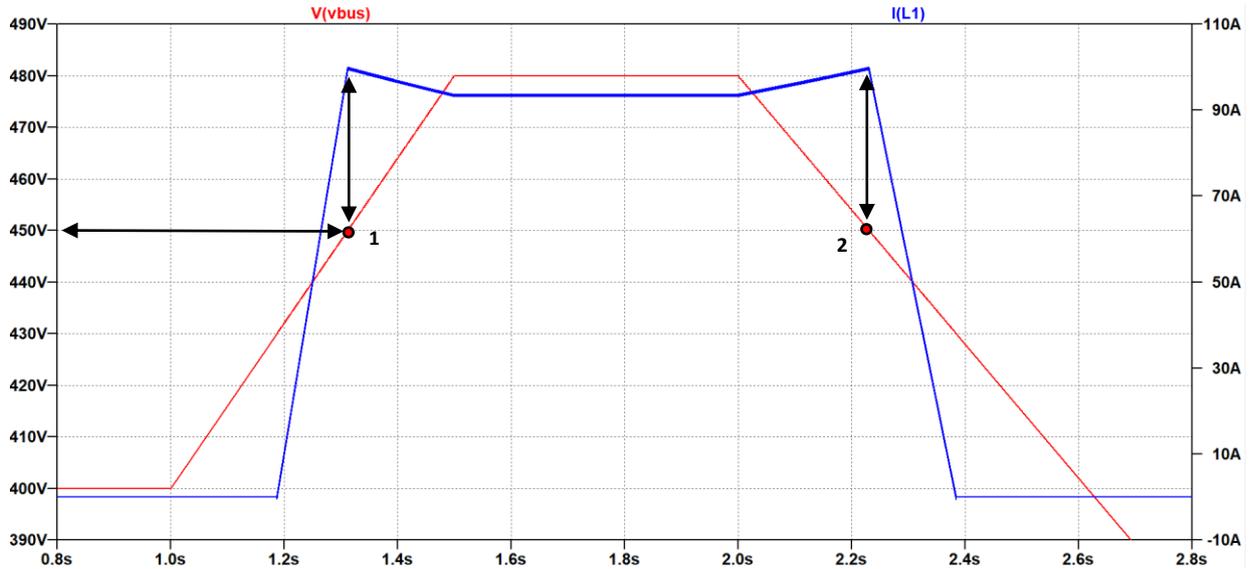


Fig 57. Simulación control droop 3. Estado 3 de sobrecarga.

En el punto 1 de la figura 57 la tensión del bus alcanza su valor máximo de 450 V. De la misma forma, la corriente alcanza su valor máximo de 100 A en ese punto. Sin embargo, como se explicó previamente, a medida que la tensión sobrepasa este valor máximo permitido, la corriente absorbida por el SC se va reduciendo para mantener así la potencia equivalente constante. Cuando la tensión se estabiliza en 480 V, la corriente también lo hace en un valor cercano a 93 A.

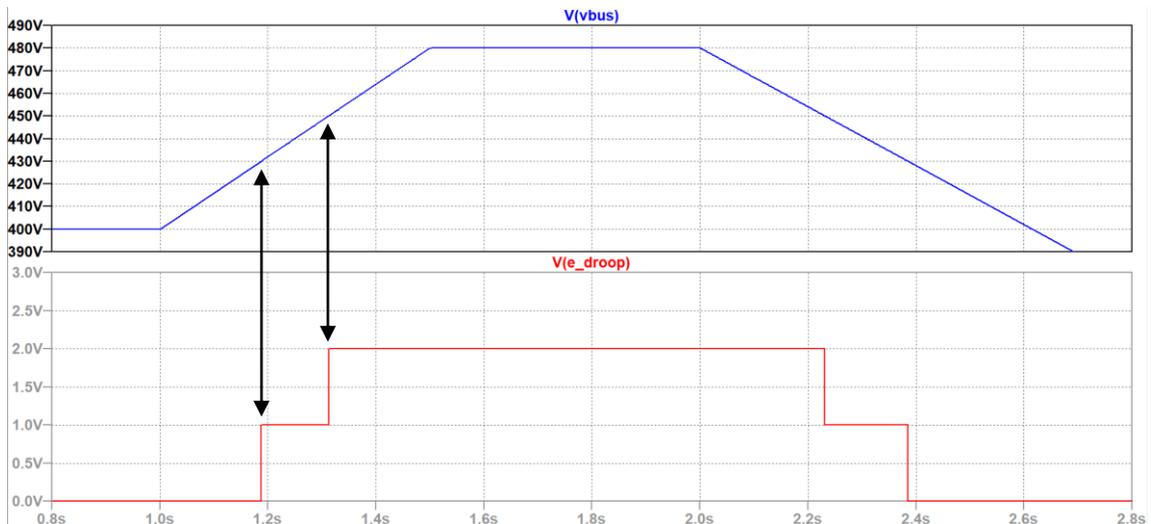


Fig 58. Simulación control droop 3. Estado 3 de sobrecarga.

En la figura 58 se puede ver como al llegar a 430 V el sistema pasa al estado 2 (1 V) y al superar los 450 V se pasa al estado 3 (2 V).

- **Estado 4:**

Hasta ahora se han tratado los casos en los que la tensión del bus aumenta por encima de su valor nominal. Estos son los estados de carga ya que el bus suministra energía al módulo de supercondensadores. Ahora se pasará a estudiar los casos en los que la tensión se reduce por debajo de la tensión nominal. Estos son los estados de descarga, en los que el módulo suministra su energía almacenada al bus de continua.

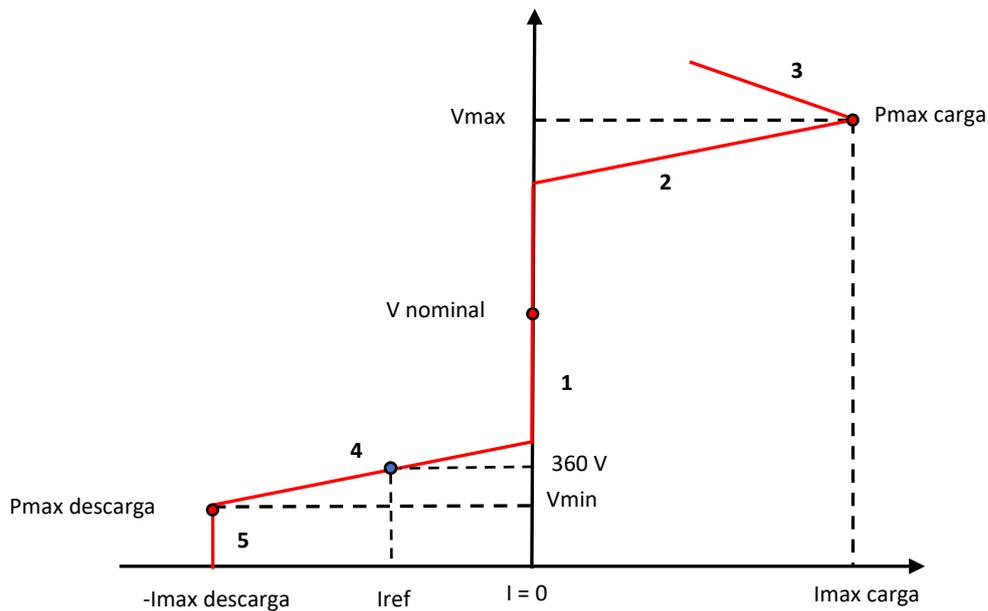


Fig 59. Esquema de control droop con zona muerta. Estado 4 de descarga.

Este estado es inverso al estado 2. El reducirse la tensión por debajo de la tensión mínima de trabajo ($V_{on_min} = 370 \text{ V}$) la corriente fluye del módulo al bus para intentar que este último recupere su valor de tensión nominal. Esta corriente suministrada será también proporcional a la tensión del bus, esta vez de acuerdo a la siguiente función:

$$I_{ref} = I_{min} * \frac{V_{on_min} - V_{bus}}{V_{on_min} - V_{min}}$$

La corriente en el punto presentado en la figura 61, donde se tiene una tensión de 360 V será:

$$I_{ref} = -100 * \frac{370 - 360}{370 - 350} = -50 \text{ A}$$

Este comportamiento se puede comprobar en la figura 60. La corriente será negativa ya que se ha establecido desde un principio que una corriente en dirección al SC

sería una corriente positiva y una corriente en dirección hacia el bus (en dirección contraria) sería por tanto negativa.

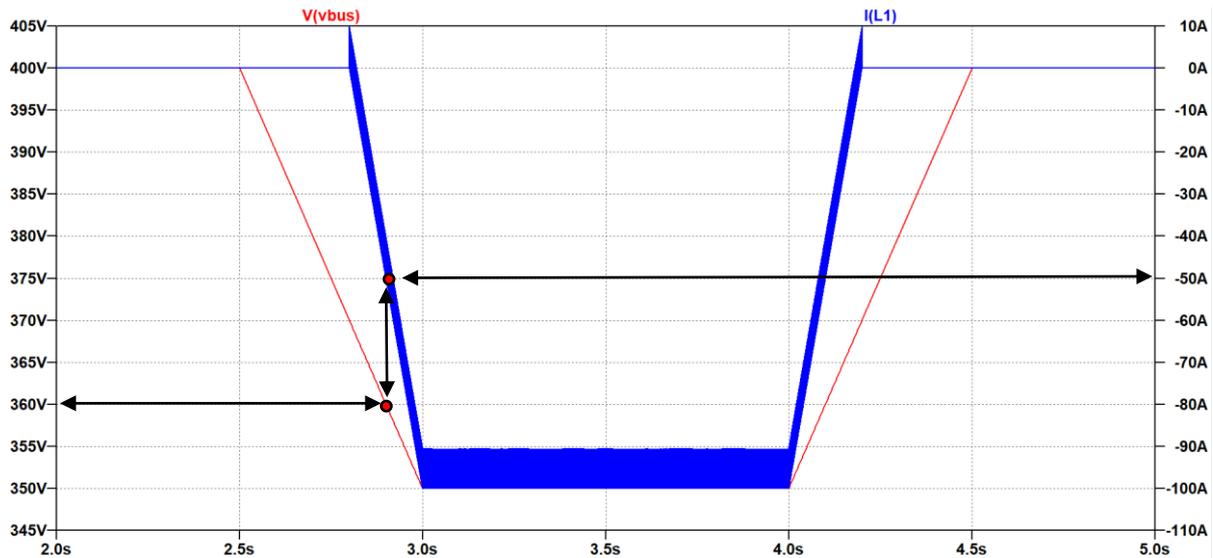


Fig 60. Simulación control droop 3. Estado 4 de descarga.

En la figura 60 se aprecia el comportamiento del sistema en el estado 4 de descarga. En la tensión nominal al comienzo, el sistema se encuentra en el estado 1 de reposo y no conduce corriente. En 2,5 segundos la tensión del bus comienza a disminuir. Cuando esta disminuye hasta 370 V, el sistema entra en el estado 4 de descarga, y el módulo de SC comienza a suministrar corriente a bus. En esta ocasión el rizado es mucho mayor debido a que el sistema se encuentra en modo descarga, como ya se explicó con anterioridad. La corriente equivalente será:

$$I_{eq} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$$

A partir de los 370 V, la corriente aumenta en valor absoluto de forma proporcional a la tensión del bus. Cuando se alcanza la tensión mínima de 350 V, la corriente llega hasta la corriente de referencia mínima de -100 A. Sin embargo, el rizado provocará que la corriente equivalente sea algo inferior a este valor. Teniendo un rizado aproximado de 10 A:

$$I_{eq} = \frac{-100 - 90}{2} = -95 \text{ A}$$

La corriente equivalente de descarga será de aproximadamente 95 A de valor absoluto. Posteriormente, cuando la tensión vuelve a incrementarse, la corriente comienza a disminuir hasta llegar a 0 A al volver a alcanzar los 370 V. En la figura 61 se muestra como el sistema entra en el estado 4 al alcanzar los valores especificados.

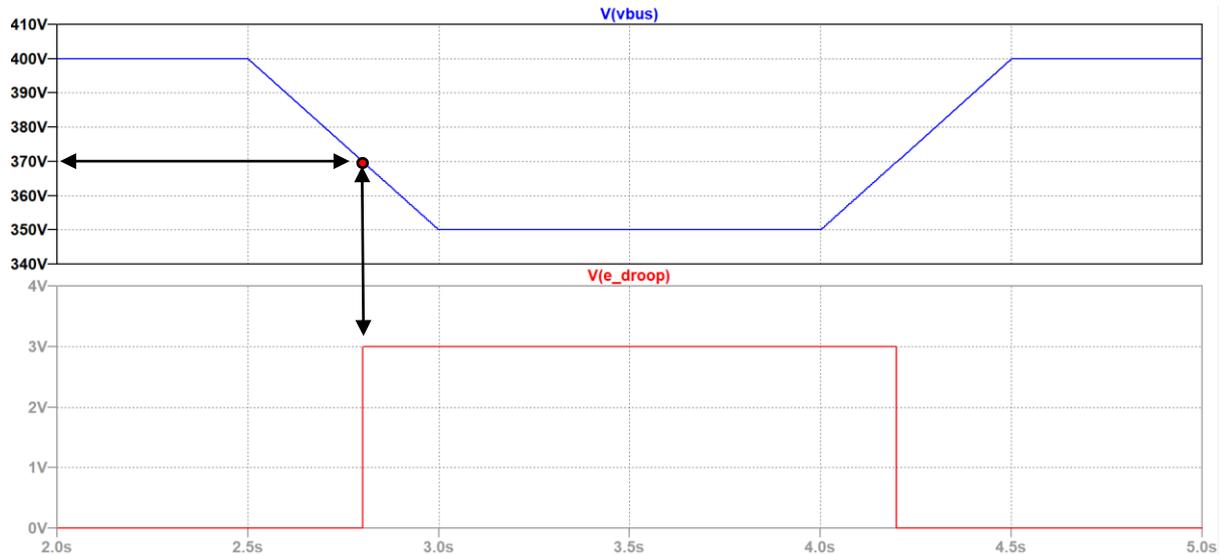


Fig 61. Simulación control droop 3. Estado 4 de descarga.

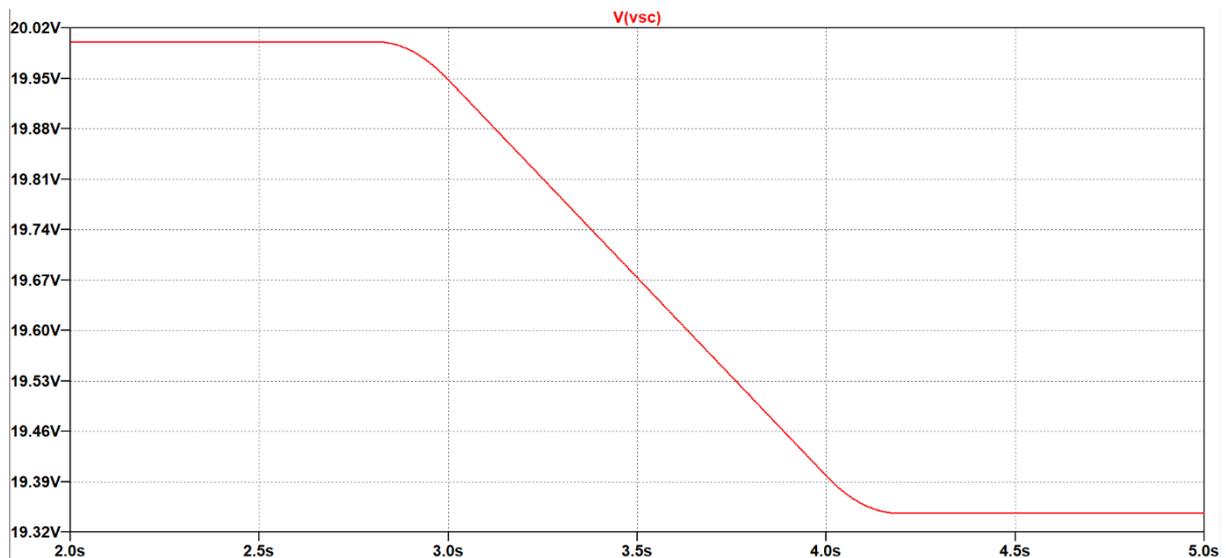


Fig 62. Simulación control droop 3. Estado 4 de descarga.

Finalmente, en la figura 62 se muestra la tensión del módulo de supercondensadores durante el proceso de descarga. Como se puede ver, la tensión del módulo disminuye, lo que indica que el módulo está liberando su carga.

- **Estado 5:**

En determinadas situaciones puede darse que la tensión del bus sea inferior a la tensión mínima aceptada por el sistema. Por ejemplo, en un arranque, la tensión del bus será inicialmente 0 V y progresivamente irá aumentando hasta alcanzar el valor nominal. En estos casos, se programa el sistema para mantener una corriente constante suministrada por el módulo, sin superar la corriente máxima permitida para evitar posibles sobrecorrientes que puedan dañar los componentes del circuito.

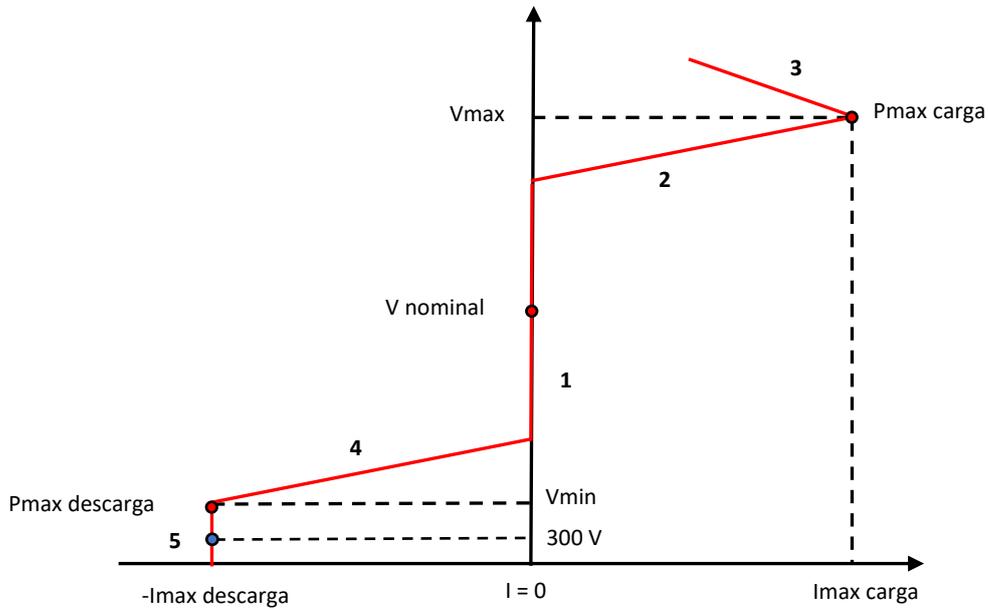


Fig 63. Esquema de control droop con zona muerta. Estado 5 de sobredescarga.

En la figura 63 se puede ver cómo, a pesar de que la tensión es inferior a V_{min} (350 V), la corriente seguirá siendo igual a $I_{\text{max descarga}}$. Este comportamiento se presencia en la simulación en la figura 64.

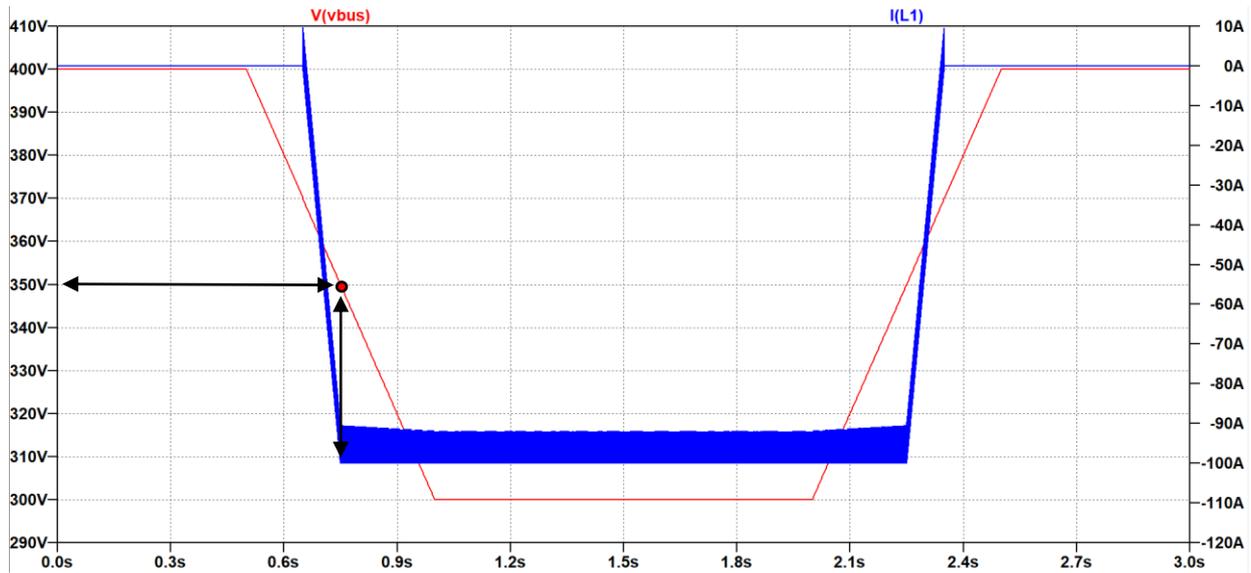


Fig 64. Simulación control droop 4. Estado 5 de sobredescarga.

La corriente aumenta en dirección hacia el bus a medida que la tensión disminuye. Cuando se alcanza el mínimo de 350 V, la corriente llega a los 100 A máximos establecidos. Al seguir disminuyendo la tensión, el sistema entra en el estado 5 de sobredescarga, en el que la corriente deja de aumentar. Se mantiene estable en 100 A como se explicó anteriormente. Continúa con este valor hasta que la tensión vuelve a alcanzar los 350 V, donde se vuelve a entrar en el estado 4 de descarga. En la figura 65 se puede ver el cambio en los estados del sistema durante esta caída de tensión.

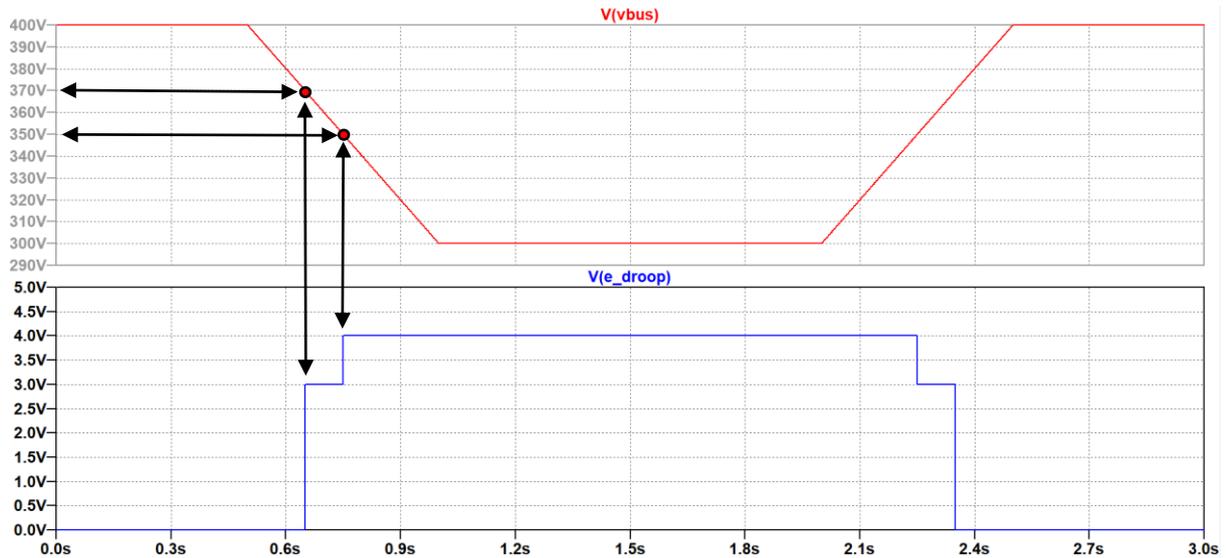


Fig 65. Simulación control droop 4. Estado 5 de sobredescarga.

15. Control de tensión del módulo de supercondensadores

En ocasiones, podría darse una situación en la que el módulo se cargue por completo y no pueda aceptar más energía. En estos casos, el módulo debe dejar de trabajar de la manera habitual. Si la tensión excede la tensión nominal del módulo, podría llegar a dañar el componente. Por esta razón, debe evitarse alcanzar esta sobretensión para evitar dañar el sistema KERS. En esta situación, se establece un límite máximo de tensión en bordes del módulo. Al ser la tensión nominal de 48 V, se establecerá este valor como límite máximo aceptable.

Para implementar este control de tensión se necesitaría un sensor en los extremos del módulo de SC que tomase medidas de la tensión en cada momento. La información de este sensor podría utilizarse en el sistema de control para programar un nuevo modo de trabajo que solo permita al circuito descargar el condensador.

En el caso de la simulación en LTSpice se ha diseñado una máquina de estados intermedia entre las dos anteriores (X3 en la figura 66). Esta nueva máquina recibe la referencia de corriente generada por el control droop y el valor de la tensión del módulo como entradas. La salida consistirá en otro valor de corriente de referencia, el cual se enviará a la máquina de estados del control en modo corriente. Este sistema intermedio actuará básicamente como interruptor, convirtiendo la referencia de corriente del sistema en 0 en los casos en que esta corriente pueda sobrecargar el módulo de supercondensadores.

A la entrada, una referencia de corriente positiva proveniente del control droop querrá decir que el sistema está en el modo de carga, mientras que una referencia de corriente

negativa querrá indicar que el sistema está en modo descarga. Si el valor de la tensión en el módulo es superior a 48 V y el sistema está en modo carga, este control intermedio convertirá el valor de la referencia de salida en 0, lo que evitará que el control en modo corriente entre en funcionamiento y evitando así una posible sobrecarga del módulo.

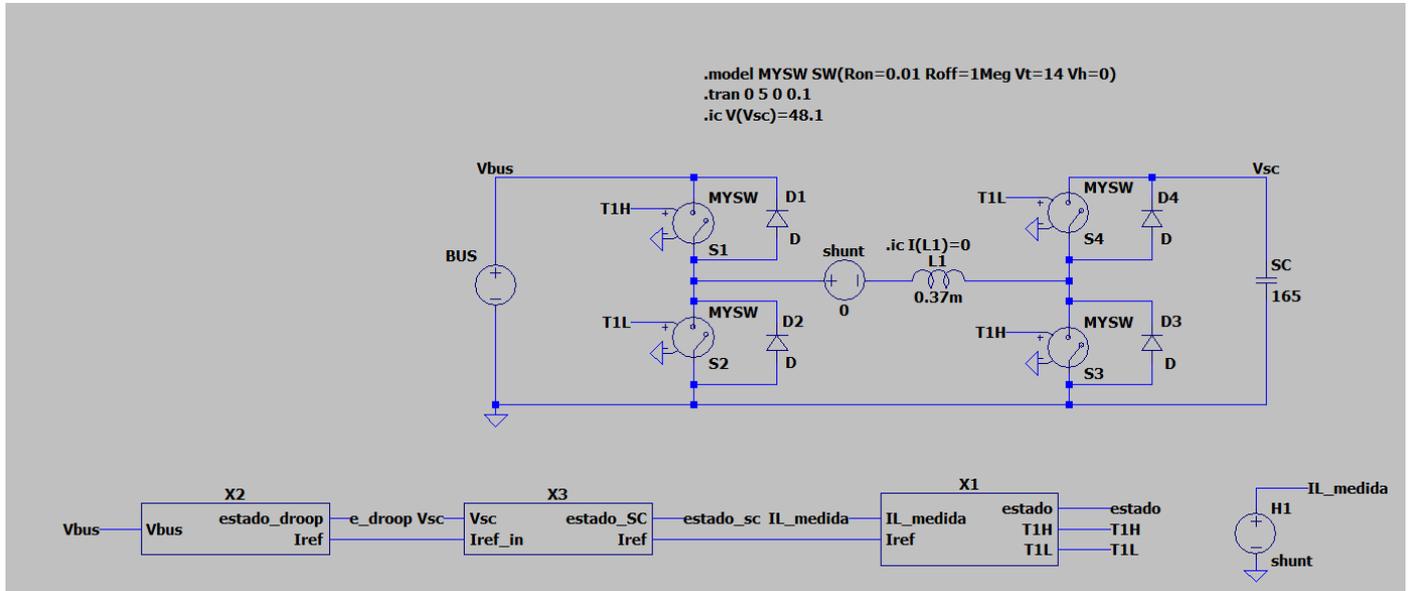


Fig 66. Circuito de simulación del control de tensión en el módulo de supercondensadores.



Fig 67. Resultado de simulación del control de tensión en el módulo de supercondensadores.

En la simulación se ha iniciado el valor de tensión del módulo en 48,1 V; 0,1 por encima del valor nominal. En estas condiciones se puede ver cómo la tensión del bus aumenta al comienzo de la simulación, condición por la que el sistema debería entrar en modo de carga y enviar corriente del bus al módulo. Sin embargo, la corriente se mantiene en 0 a pesar del exceso de tensión en el bus.



Posteriormente, cuando la tensión del bus disminuye y el sistema entra en modo descarga, el control de tensión del módulo permite que el bus extraiga energía de los supercondensadores para reducir así su carga. Una vez por debajo de los 48 V, el sistema vuelve a funcionar de forma normal. Por último, a partir de 3,5 segundos de simulación, la tensión del bus vuelve a aumentar de golpe y el módulo comienza a cargarse. Cuando se alcanzan los 48 V la carga se detiene y el módulo se mantiene en ese valor de tensión, demostrando así que el sistema trabaja de forma correcta.



16. Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se ha presentado el exponencial crecimiento que ha experimentado el desarrollo de vehículos eléctricos a nivel mundial. A su vez, se ha remarcado la importancia de desarrollar sistemas eléctricos más eficientes y que sean capaces de paliar los inconvenientes que esta clase de vehículos puedan tener, para impulsar la sustitución definitiva del vehículo de combustión. Este avance permitirá reducir las emisiones deslocalizadas de gases de efecto invernadero en gran medida.

Siendo uno de los mayores inconvenientes de los vehículos eléctricos su limitada autonomía respecto a los vehículos de CI, los sistemas que mejoran la eficiencia y alargan la duración de la batería principal del vehículo son fundamentales para poder extender el uso de vehículos eléctricos. En esta línea, se han presentado distintos sistemas de recuperación de energía cinética (KERS), los cuales permiten devolver energía desperdiciada por el vehículo para ser reutilizada y así aumentar la eficiencia del sistema en general. Siendo, para un vehículo eléctrico, la implementación de un módulo de supercondensadores conectada a la red del vehículo, la opción con mejores resultados.

En las simulaciones realizadas en el programa LTSpice, se demuestra como el comportamiento de un módulo de supercondensadores implementado con un sistema de control droop de zona muerta, conectado al bus de continua del vehículo eléctrico, es capaz de ayudar a regular la tensión de dicho bus absorbiendo los picos excesivos de energía y devolviendo grandes cantidades instantáneas de energía cuando la red lo requiere.

La implementación de un sistema de control droop de zona muerta también permite al módulo de supercondensador trabajar a la par con distintos sistemas de almacenamiento presentes en la red eléctrica del vehículo, como la batería. La coordinación automática del trabajo de estos dos elementos que permite el control droop hace que su implementación sea sencilla y que no requiera de comunicación directa entre la batería y el módulo de SC, simplificando en gran medida el sistema.

Después de plantear varias alternativas sobre topologías de circuitos de potencia que permitiesen conectar el bus de continua del vehículo, de 400 V de tensión nominal, con un módulo de supercondensadores con tensión nominal estimada de 48 V, se decidió implementar un convertidor CC – CC bidireccional de 2 ramas. Esta topología cumple la función de intercambiar la energía entre dos extremos a distinta tensión, trabajando como un convertidor reductor-elevador en ambas direcciones. Además, gracias a la presencia de 2 ramas de 2 transistores MOSFET cada una, permite aislar completamente ambos extremos, pudiendo así proteger al sistema de posibles sobrecorrientes en caso de fallo en alguno de los elementos conectados.

Para controlar el funcionamiento de este convertidor se ha programado un modo de control de corriente. Este tipo de sistemas de control permite que la corriente circule por el circuito hasta que se alcance el valor de referencia dado (I_{max}). Una vez alcanzado este valor, corta el paso de corriente durante un determinado tiempo (T_{off}). De esta manera, a partir de una referencia calculada por el control droop de zona muerta, el circuito de potencia podrá operar para suministrar o absorber un valor de corriente muy cercano a la referencia.



Además, se ha tenido en cuenta el posible funcionamiento del módulo de SC en caso de sobretensiones y en situaciones de tensiones bajas, como puede ser el arranque. En ambos casos, el módulo ayuda a mantener el bus en valores de tensión adecuados, a pesar de no ofrecer una protección total al sistema.

Por último, se ha implementado un sistema de control que evite exponer al módulo de supercondensadores a valores de tensión excesivamente elevados debido a una sobrecarga. Este sistema corta el suministro de corriente hacia el módulo cuando este se encuentra completamente cargado. Evitando que la tensión en bordes del módulo supere su tensión nominal, se protege el componente de posibles fallos que pudiesen dañar los supercondensadores.

Como trabajo futuro, cabría plantear la simulación de múltiples componentes de la red del vehículo. De esta forma se estudiaría como la batería y el KERS se coordinan para regular la tensión del bus de continua. De la misma forma, se podría estudiar de forma precisa cuánto mejora la eficiencia del sistema, midiendo la energía que la batería es capaz de ahorrar gracias al trabajo de los supercondensadores.

Por último, podría llevarse a cabo una simulación con componentes reales, para poder estudiar posibles imperfecciones que el sistema pudiese presentar y que podrían reducir la eficiencia del sistema.



17. Referencias

- [1] Fageda, X., Flores, R. (2018) *Atascos y contaminación en grandes ciudades: Análisis y soluciones*. FEDEA Policy Papers.
- [2] Sarjeant; W. J. (1989) *Capacitor fundamentals*. Proceedings of the 19th Electrical Electronics Insulation Conference. pp. 1-51.
- [3] Placek, M. (2022) *Estimated worldwide motor vehicle production from 2000 to 2021*. Statista. Enlace: <https://www.statista.com/statistics/262747/worldwide-automobile-production-since-2000/>
- [4] Statista Researge Department (2022) *Number of motor vehicles registered in the United States from 1990 to 2020*. Statista. Enlace: <https://www.statista.com/statistics/183505/number-of-vehicles-in-the-united-states-since-1990/#:~:text=How%20many%20registered%20motor%20vehicles,11%20million%20units%20in%202020.>
- [5] IEA (2021) *Electric Vehicles*. International Energy Agency. Enlace: <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>
- [6] Vidhi, R., Shrivastava, P. A (2018) *Review of Electric Vehicle Lifecycle Emissions and Policy Recommendations to Increase EV Penetration in India*. Energies 2018. Vol. 11. P. 483.
- [7] Lienert, P., Bellon, T. (2021) *Exclusive: Global carmakers now target \$515 billion for EVs, batteries*. Reuters. Enlace: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/exclusive-global-carmakers-now-target-515-billion-evs-batteries-2021-11-10/>
- [8] Naciones Unidas (2015) *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Asamblea General de las Naciones Unidas. Enlace: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [9] Gobierno de España (2021) *PERTE para el desarrollo del vehículo eléctrico y conectado*. Consejo de Ministros del 13 de julio de 2021. Enlace: <https://planderecuperacion.gob.es/como-acceder-a-los-fondos/pertes/perte-del-vehiculo-electrico-y-conectado>
- [10] Albatayneh, A., Assaf, M., Alterman, D., Jaradat, M. (2020) *Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles*. Environmental and Climate Technologies, vol. 24, no. 1, pp. 669–680
- [11] Martínez, D., Poveda, J., Montenegro, D. (2017) *Li- Ion Battery management system based in Fuzzy Logic for improving Electric Vehicle Autonomy*. IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), pp. 1-6.
- [12] Tesla (2022) Tesla Model S.
- [13] Statista Research Department (2022) Statista. *Number of public charging points for electric vehicles by type in the United Kingdom (UK) from 2018 to 2020*. Enlace: <https://www.statista.com/statistics/673612/charging-connectors-type-uk/>
- [14] Roach, S. (2022) Protocol. *The UK's new EV charging vision: 300,000 stations by 2030*. Enlace: <https://www.protocol.com/bulletins/electric-uk-charging-stations>



- [15] Renewable Energy Consumer Code (2019) *An introduction to Electric Vehicle home chargepoints*. RECC.
- [16] Asociación Española de Normalización UNE (2020) *Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos*. UNE-EN IEC 61851-1.
- [17] Falvo, M. C., Sbordone, D., Bayram, I. S., Devetsikiotis, M. (2014) *EV Charging Stations and Modes: International Standards*. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.
- [18] Speidel, S., Braunl, T. (2014) *Driving and charging patterns of electric vehicles for energy usage*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 40, Pages 97-110.
- [19] Kisacikoglu, M. C., Ozpineci, B., Tolbert, L. (2013) *EV/PHEV Bidirectional Charger Assessment for V2G Reactive Power Operation*. Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 12.
- [20] Letendre, S., Kempton, W. (2002) *The V2G concept: A new model for power?* Public Utilities Fortnightl.
- [21] Ziebart, W. (1991) *Car electronics-key factors of success for the '90s*. 1991 Eighth International Conference on Automotive Electronics. pp. 1-6.
- [22] Xiaoqiao, Z., Li, M., El-Hady, D. (2019) *Commercialization of Lithium Battery Technologies for Electric Vehicles*. Advanced Energy Materials. Volume 9. Issue 27. Enlace: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aenm.201900161>
- [23] IEEE Xplore (2018) *IEEE Guide for the Characterization and Evaluation of Lithium-Based Batteries in Stationary Applications*. IEEE Std 1679.1-2017. pp.1-47.
- [24] Arambarri, J., Hayden, J., Elkurdy, M. (2019) *Lithium-ion car batteries: Present analysis and future predictions*. Environmental Engineering Research. vol. 24. no. 4. Korean Society of Environmental Engineering. pp. 699–710.
- [25] Whittingham, M. (2004) *Lithium Batteries and Cathode Materials*. Chemical Reviews. 104. pp 4271–4301.
- [26] Renault Group (2021) *Learn all you need to know about the motor of an electric car. Electric Mobility*. Renault Group Webpage. Enlace: <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/learn-all-you-need-to-know-about-the-motor-of-an-electric-car/#:~:text=synchronous,field%20created%20by%20the%20stator>
- [27] Saleem, M. (2018) *Difference Between Synchronous and Asynchronous Motor*. Circuit Globe. Enlace: <https://circuitglobe.com/difference-between-synchronous-and-asynchronous-motor.html#:~:text=Synchronous%20motor%20is%20a%20machine,stator%20magnetic%20field%20is%20equal.&text=Asynchronous%20motor%20is%20a%20machine,less%20than%20the%20synchronous%20speed.&text=Brushless%20motor%2C%20Variable%20Reluctance%20Motor,motor%20are%20the%20synchronous%20motor.>
- [28] Pillay, P., Krishnan, R. (1989) *Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives. Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive*. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 25. No. 2



- [29] Heydari, S., Fajri, P., Sabzehgar, R., Asrari, A. (2019) *Optimal Blending of Regenerative and Friction Braking at Low Speeds for Maximizing Energy Extraction in Electric Vehicles*. 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). pp. 6815-6819.
- [30] Liu, H., He, X., Chu, L., Tian, J. (2011) *Study on Control Strategy of Regenerative Braking for Electric Bus based on Braking Comfort*. Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. pp. 1037-1040.
- [31] Liu, Z., Wen, F., Ledwich, G. (2013) *Optimal Planning of Electric-Vehicle Charging Stations in Distribution Systems*. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 28. No. 1.
- [32] Electromaps (2022) *Puntos de recarga en Madrid (España)*. Enlace: <https://www.electromaps.com/puntos-de-recarga/espana/madrid>
- [33] Burkacky, O., Deichmann, J., Doll, G., Knochenhauer, C. (2018) *Rethinking car software and electronics architecture*. McKinsey&Company.
- [34] Gabriel-Buenaventura, A., Azzopardi, B. (2015) *Energy recovery systems for retrofitting in internal combustion engine vehicles: A review of techniques*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 41. pp. 955-964.
- [35] Al-Yafeai, D., Darabseh, T., Mourad, A. H. (2020) *A State-Of-The-Art Review of Car Suspension-Based Piezoelectric Energy Harvesting Systems*. Energies 2020. Vol. 13. pp. 2336.
- [36] Makki, N.; Pop-Iliev, R. (2011) *Piezoelectric Power Generation in Automotive tires*. Proceedings of the Mart Materials, Structures & NDT in Aerospace Conference NDT in Canada. Enlace: <https://spie.org/news/3702-piezoelectric-power-generation-in-tires?SSO=1#:~:text=Piezoceramic%20benders%20attached%20to%20pneumatic,generate%20energy%20for%20onboard%20electronics.&text=The%20battery%20range%20of%20many,be%20used%20for%20short%20trips>.
- [37] Li, Z., Zuo, L. & Kuang, J., Luhrs, G. (2012). *Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier*. Smart Materials and Structures. Vol. 22.
- [38] Wen, M., Kum Tien, D. (2018) *Analysis of a Hybrid Mechanical Regenerative Braking System*. MATEC Web Conference. Vol. 152.
- [39] Barr, A., Veshagh, A. (2008) *Fuel Economy and Performance Comparison of Alternative Mechanical Hybrid Powertrain Configurations*. SAE Technical Paper 2008-01-0083. Enlace: https://www.researchgate.net/publication/296643349_Fuel_Economy_and_Performance_Comparison_of_Alternative_Mechanical_Hybrid_Powertrain_Configurations
- [40] Pugia, L., Pagliaia, M., Nocentinia, A., Lutzembergerb, G., Prettoc, A. (2017) *Design of a hydraulic servo-actuation fed by a regenerative braking system*. Applied Energy. Vol. 187. pp. 96-115.
- [41] Mathews, T. (2013) *Flywheel Based Kinetic Energy Recovery Systems (KERS) Integrated in Vehicles*. International Journal for Engineering Science and Technology. Vol. 5. pp. 1694-1699.
- [42] Sampurno, B., Abdurrakhman, A., Hadi, H. S. (2015) *Development of electrical Kinetic Energy Recovery System (KERS) on motorcycle*. 2015 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA). pp. 131-136.



- [43] Chen, L. R., Hsu, R. C., Liu, C. S. (2008) *A Design of a Grey-Predicted Li-Ion Battery Charge System*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 55. No. 10. pp. 3692-3701.
- [44] Tu, H., Feng, H., Srdic, S., Lukic, S. (2019) *Extreme Fast Charging of Electric Vehicles: A Technology Overview*. IEEE Transactions on Transportation Electrification. Vol. 5. No. 4. pp. 861-878.
- [45] Burke, A. (2000) *Ultracapacitors: Why, How, and Where Is the Technology*. Journal of Power Sources. Vol. 91. pp. 37-50.
- [46] Maxwell Technologies. *Ultracapacitor Overview*. Enlace: <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/>
- [47] Raj (2014) *Kinetic Energy Recovery System – How it Works*. Blog. Enlace: <https://mechguru.com/machine-design/kinetic-energy-recovery-system-kers-works/>
- [48] StudiosGuy. Working Principle of Supercapacitor. Enlace: <https://studiousguy.com/working-principle-supercapacitor/#:~:text=A%20supercapacitor%20typically%20works%20on,of%20the%20capacitor%20electrode%20plates.>
- [49] Maxwell Technologies. (2022) *NEW 48V MODULE (COB)*. Datasheet.
- [50] Paoli, L. & Gul, T. (2022) International Energy Agency. *Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales*. Enlace: <https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales>
- [51] U.S. Department of Energy and U.S. Environmental Protection Agency (2021) Fueleconomy.gov website. Enlace: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1220-january-10-2022-model-year-2021-electric-vehicle-longest-range>
- [52] Best EV Chargers (2020) *Different types of EV Charging Connectors*. Enlace: <https://bestchargers.eu/blog/different-types-of-ev-charging-connectors>
- [53] Rico, M. (2021) *Sistemas Electrónicos para el Vehículo Eléctrico*. Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón.
- [54] Fernandez, A. *Componentes y frecuencias de interés. Motores de inducción de corriente alterna*. Power-MI. Enlace: <https://power-mi.com/es/content/componentes-y-frecuencias-de-inter%C3%A9s>
- [55] Electrical 4 U (2021) *Synchronous Motors: Applications, Starting Methods & Working Principle*. Enlace: <https://www.electrical4u.com/synchronous-motor-working-principle/>
- [56] How a Car Works. *Permanent magnet synchronous motor construction*. Enlace: <https://www.newkidscar.com/electric-car/permanent-magnet-synchronous-motor-construction/>
- [57] Zhang, R., Wang, X., John, S. (2018) *A Comprehensive Review of the Techniques on Regenerative Shock Absorber Systems*. Energies 2018. Vol. 11. pp. 1167.
- [58] Clavero, D. (2013) *Volvo confía en el Flywheel KERS para conseguir hasta un 25% menos de consumo*. Tecmovia. Enlace: <https://www.diariomotor.com/tecmovia/2013/04/25/volvo-confia-en-el-flywheel-kers-para-conseguir-hasta-un-25-menos-de-consumo/>



[59] Rico, M. (2022) *Entendiendo las estrategias de control “droop” para la regulación de buses de continua en sistemas electrónicos de potencia*. Workrooms Journal.

[60] Rico, M. (2022) *Implementación de estrategias “droop” en el convertidor cc-cc bidireccional de cuadrante con control en modo corriente (I_{max}, T_{off})*. Workrooms Journal.