



UNIVERSIDAD
DE ALMERÍA

Escuela Internacional de Doctorado
Doctorado en Informática

Tesis Doctoral

**Modelado y simulación de un nuevo
concepto de vehículo urbano eléctrico
ligero basado en la optimización del
uso de energías renovables y la
reducción de emisiones de CO₂**

Presentada por:

Francisco José Gómez Navarro

para optar al título de
Doctor Ingeniero en Informática
por la Universidad de Almería.

Dirigida por:

Dr. D. Luis José Yebra Muñoz

Dr. D. Antonio Giménez Fernández

Almería - España, Junio 2021

Escrito y editado en L^AT_EX por: Francisco José Gómez Navarro

© Francisco José Gómez Navarro - 2021

Tesis Doctoral

**Modelado y simulación de un nuevo concepto
de vehículo urbano eléctrico ligero basado en
la optimización del uso de energías renovables
y la reducción de emisiones de CO₂**

**Modeling and simulation of a new Urban
Lightweight Electric Vehicle concept based on
the optimized use of renewable energies and
the reduction of CO₂ emissions**

Francisco José Gómez Navarro
Almería - España, Junio 2021

Dirigida por:

Dr. D. Luis José Yebra Muñoz	Dr. D. Antonio Giménez Fernández
Científico Titular de OPI	Catedrático de Universidad
CIEMAT (PSA)	Departamento de Ingeniería
Ministerio de Ciencia e Innovación	Universidad de Almería
Almería	

Escuela Internacional de Doctorado
de la
Universidad de Almería

Programa de Doctorado en Informática

Tesis Doctoral:

Modelado y simulación de un nuevo concepto de vehículo urbano eléctrico ligero basado en la optimización del uso de energías renovables y la reducción de emisiones de CO₂

Francisco José Gómez Navarro
Centro Mixto CIESOL
Universidad de Almería, España

Documento editado y generado en L^AT_EX.

© Francisco José Gómez Navarro - 2021

Modelado y simulación de un nuevo concepto de vehículo urbano eléctrico ligero basado en la optimización del uso de energías renovables y la reducción de emisiones de CO₂

Francisco José Gómez Navarro

Resumen

La sociedad moderna ha basado su desarrollo en gran medida en la posibilidad de desplazar cantidades suficientes de bienes y personas entre distintas localizaciones de forma eficaz. El transporte consume el 19 % de la energía a nivel mundial y emite el 23 % del dióxido de carbono (CO₂) debido al consumo energético [9]. Con la tendencia actual, el uso de energía para el transporte aumentará un 50 % para 2030 y más de un 80 % para 2050. El transporte ligero, fundamentalmente orientado a personas, consumió en 2006 el 47 % de la energía dedicada al transporte [9]. El parque mundial de vehículos ligeros es previsible que se triplique para el año 2050, principalmente debido al incremento en países en vías de desarrollo [8].

El *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* advierte que para evitar las desastrosas consecuencias del cambio climático, el calentamiento global no debe sobrepasar 1.5 °C, por lo que las emisiones antropogénicas globales netas de CO₂ deben disminuir un 45 % de aquí a 2030 con respecto a los niveles de 2010 y ser iguales a cero para el año 2050 [96] [55].

Dos de los focos de actuación preferentes para la consecución del objetivo de reducción de la emisión de gases de efecto invernadero está en el **transporte urbano ligero** y en el uso de **fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles**. Estas fuentes deben:

- Ser renovables para evitar su agotamiento.
- Estar disponibles en la zona para evitar la dependencia energética de terceros.
- Ser acumulables para poder disponer de las reservas adecuadas que equilibren la capacidad de producción y la demanda.

La hipótesis principal que se pretende demostrar en el presente trabajo es la viabilidad de un nuevo concepto de movilidad urbana basado en el uso intensivo de fuentes de energía renovable, al que se ha llamado *Vehículo Eléctrico Urbano Ligero (ULEV)*. Para conseguirlo, se ha desarrollado una plataforma software basada en el lenguaje de modelado Modelica[®] que permite definir un modelo multidisciplinar completo del comportamiento de un *Vehículo Eléctrico (EV)* teniendo en cuenta las ecuaciones mecánicas, eléctricas, electrónicas, físicas del entorno y de control.

Se ha partido de la idea principal de un *Smart Energy Hub (SEH)*, un concepto en el que se agrupan los distintos elementos componentes del *EV* que aportan o consumen energía. Una vez disponibles los modelos de los distintos elementos que lo conforman, así como los del entorno con el que interactúa el vehículo en su conjunto, se ha realizado la simulación dinámica con ayuda de Dymola[®] y LTSpice[®] de los elementos de mayor impacto, así como del vehículo completo. Se ha desarrollado una librería de componentes denominada *Very Light Duty Vehicle (VLDV)*, que incluye los diferentes elementos del vehículo y su entorno, especialmente orientada al concepto del *ULEV*.

Dentro de la producción científica generada, en [65] se muestran las aproximaciones matemáticas para el modelado dinámico de una *smart-grid* para su uso en un *ULEV* movido por energía solar, al objeto del desarrollo de los algoritmos de control del vehículo. En [66] se presenta un modelo dinámico de batería que tiene por objeto simular el comportamiento de los distintos tipos de batería de uso común en *ULEVs*. En [64], se presenta un nuevo modelo linealizado de convertidor CC-CC para su uso en unidades de suministro y recuperación de energía, aplicadas fundamentalmente en *ULEVs*.

Se ha definido el modelo completo de un *ULEV*, alimentado por batería, panel fotovoltaico y con sistema de recuperación de energía en las frenadas. Se han definido dos ciclos de conducción específicos en base a las condiciones y características propias del transporte urbano, adaptados a las limitaciones de velocidad impuestas por el vehículo y que pueden servir de circuitos normalizados para comparar los resultados de distintas propuestas de vehículos de cualquier tipo. De la simulación del modelo completo en los ciclos de conducción definidos, se obtienen los resultados que confirman que el concepto de *ULEV* basado en el uso de energías renovables, consigue una reducción del uso de energía que oscilan entre el 88.3% y el 99.6% en función del ciclo seleccionado. Asociada a esta reducción en el consumo de energía está la reducción en la emisión CO₂, que oscila entre los 35 gr y 41 gr durante un solo ciclo.

Modeling and simulation of a new Urban Lightweight Electric Vehicle concept based on the optimized use of renewable energies and the reduction of CO₂ emissions

Francisco José Gómez Navarro

Abstract

The development of modern society has been primarily enabled by the possibility of efficiently transporting people and goods between locations. Transport currently accounts for 19 % of global energy consumption and 23 % of global (CO₂) emissions [9]. Current trends suggest that transport energy consumption will increase 50 % by 2030 and 80 % by 2050. Lightweight transport, which is primarily relevant for human transport, accounted for 47 % of this energy consumption in 2006 [9]. It is expected that the number of lightweight vehicles globally will increase threefold by 2050 due to expected economic progress in developing countries [8].

The *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* has warned that global temperatures must not rise above 1.5°C if the most catastrophic consequences of climate change are to be avoided. To achieve this, global net anthropogenic CO₂ emissions must decrease by 45 % by 2030 relative to 2010, and reach net zero by 2050 [96] [55].

Two of the primary initiatives for reducing greenhouse gas emissions involve the uses of urban lightweight transport vehicles and alternative energy sources. These sources must be:

- Renewable.
- Locally available to avoid dependence on third-party suppliers.
- Capable of being stored to balance supply and demand.

The primary hypothesis this work aims to explore is the viability of a new urban mobility concept based on the extensive use of renewable energy sources, termed *Urban Lightweight Electric Vehicle (ULEV)*. To achieve this, a software platform based on Modelica[®] language was developed. The platform enables the complete definition and behavioural simulation of a multidisciplinary *Electric Vehicle (EV)* model. These simulations account for mechanical, electrical, electronic, environmental physics and control equations of the vehicle.

The concept is based on the idea of a *Smart Energy Hub (SEH)*, where the various components of the *EV* that provide or consume energy are grouped together. The models of each component and the environment were developed, and Dymola[®] and LTSpice[®] were used to simulate the behaviour of the most significant components, as well as the full vehicle. A component library called *Very Light Duty Vehicle (VLDV)* was developed, which includes components of the vehicle and its environment and is specifically oriented towards its use within the *ULEV* concept.

This work has produced a series of scientific contributions. In [65], the mathematical expressions and assumptions for the dynamic modelling of an *smart-grid* located within a solar-powered *ULEV* are derived. These expressions were later used to derive the control algorithms of the *ULEV*. In [66], the dynamic model of a battery is presented. This is used to simulate the behaviour of commonly used batteries in *ULEVs*. In [64], a novel linearized DC-DC converter model is presented for simulation of power supply and demand units, mainly used in *ULEVs*.

In this work, a complete *ULEV* model is developed. This *ULEV* is powered by a battery which is fed through a photovoltaic panel and a brake energy recovery system. Finally, two driving cycles were defined which simulates urban driving conditions. Those driving cycles could be used as a baseline to compare the behaviour and performance of other vehicle types and architectures. Driving cycle simulation results of the renewable energy-powered *ULEV* concept show a significant reduction in energy usage (from 88.3% to 99.6% depending on the cycle) and greenhouse gas emissions, specifically CO₂ (from 35gr to 41gr in only one cycle).

Agradecimientos

En cualquier experiencia vital que se desarrolla a lo largo de los años, son muchas las personas que te acompañan en el camino, aunque sea solamente por breve tiempo. No quiero parecer desagradecido si olvido incluir a alguna de ellas.

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores, Luis Yebra y Antonio Giménez, su incondicional apoyo, su ayuda permanente y su ánimo sin fin para avanzar y concluir. Por las particularidades de este trabajo y su larga andadura, sin su aliento y su estímulo hubiera sido imposible llegar a término. Ellos lo han convertido en una experiencia apasionante. Muchas han sido las horas compartidas, adaptándose siempre a las circunstancias y a los condicionantes del momento.

A José Luis Torres, que me sirvió desde un principio de inspiración, por prestarme su ayuda y colaboración en esta aventura.

Al personal técnico del Grupo de Automática, Robótica y Mecatrónica de la Universidad de Almería (TEP-197) encargados de la operación de la micro-red experimental del CIESOL, por la ayuda prestada en la obtención de los registros experimentales necesarios. Sus consejos me fueron de gran ayuda.

A Luis Iribarne, por sus orientaciones y guía a lo largo de todo este tiempo. Siempre disponible y resolutivo.

A mis profesores del Máster de Ingeniería Industrial, que inspiraron en mí el interés por la mecatrónica y la orientación multifísica del modelado de sistemas. En especial a José Antonio Piedra, que despertó en mí el interés por la investigación y que tan buenos momentos me hizo pasar.

El presente trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto DPI2017-85007-R del Plan Nacional I+D+i del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (actual Ministerio de Ciencia e Innovación) del Reino de España y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

*Dedicado a mi esposa Emilia
y a mis hijos Francisco y Marta.*

Con ellos, nada es imposible.

Índice General

Glosario	XIV
Siglas	XVI
Lista de Símbolos	XXII
Índice de Tablas	XXII
Índice de Figuras	XXV
Índice de Listados de Código	XXIX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	5
1.2. Hipótesis	5
1.3. Contenido	6
2. Estado del Arte	7
3. Materiales y Métodos	14
3.1. Modelica [®]	15
3.2. Modelica Standard Library	16
3.2.1. Modelica.Mechanics	17
3.3. Librería Vehicle Interfaces	18
3.4. Dymola [®]	20
3.5. Librería Design.Calibration	21
3.6. LTSpice XVII [®]	21
3.7. ScanIt	21
3.8. Micro-red CIESOL	21
3.9. eCARM	22

4. Librería VLDV	24
4.1. Clases Base	26
4.1.1. VLDV.BaseClass.Atmosphere	26
4.1.2. VLDV.BaseClass.Chassis	28
4.1.3. VLDV.BaseClass.EnergySource	37
4.1.4. VLDV.BaseClass.EnergyStorage	43
4.1.5. VLDV.BaseClass.EnergyBus	53
4.1.6. VLDV.BaseClass.TractionMotor	62
4.2. Componentes	64
4.2.1. VLDV.Component.Atmosphere	64
4.2.2. VLDV.Component.Chassis	65
4.2.3. VLDV.Component.EnergySource	65
4.2.4. VLDV.Component.EnergyStorage	65
4.2.5. VLDV.Component.EnergyBus	67
4.2.6. VLDV.Component.TractionMotor	73
4.3. Sumario	74
5. Resultados y Discusión	75
5.1. Modelo de Panel Fotovoltaico	76
5.2. Modelos de Batería	79
5.2.1. Batería LiFePo4 BBOX5 100Ah	80
5.2.2. Batería Li-Ion A123-26650	85
5.3. Modelo de Convertidor CC-CC Linealizado	85
5.3.1. Medida de Tiempos de Simulación del Convertidor CC-CC	86
5.3.2. Comparación y Validación del Comportamiento del modelo LZM	90
5.3.3. Convertidor Bidireccional	97
5.3.4. Discusión de Resultados	99
5.4. Modelo del Vehículo Completo	100
5.4.1. Descripción del Modelo	100
5.4.2. Ciclos de Conducción	101
5.4.3. Simulación y Resultados del Modelo	104
5.4.4. Discusión de Resultados	112
6. Conclusiones, Aportaciones al Estado del Arte y Trabajos Futuros	113
6.1. Conclusión y Aportaciones al Estado del Arte	114
6.2. Trabajos Futuros	116
Bibliografía	118

Apéndices	128
A. Publicaciones	129
A.1. Congreso MathMod 2018	130
A.2. Artículo RIAI 2019	132
A.3. Artículo IEEE 2020	134
B. Listados de Código VLDV	136

Glosario

CAPE-OPEN

El estándar CAPE-OPEN define las reglas y los interfaces que permite interoperar a las aplicaciones y componentes CAPE (Computer-Aided Process Engineering, Ingeniería de Procesos Asistida por Computador). [21](#)

CIESOL

Centro mixto creado y gestionado por la Universidad de Almería y el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT - Ministerio de Ciencia e Innovación) para colaborar en la investigación en energía solar. Está situado en el Campus Universitario de la Universidad de Almería.. [21](#), [22](#), [67](#), [68](#), [81](#), [85](#), [116](#)

DASSL

Método de integración DASSL - Solucionador de sistemas de ecuaciones diferenciales multi-paso (dassl/dasslrt de Petzold modificado por Dassault Systemes). [88-91](#), [105](#)

DCR

Direct Current Resistance – Resistencia de Corriente Continua. Se define como la resistencia de una bobina, resultante de la resistencia del hilo conductor utilizado para el arrollamiento. [71-75](#)

Deportancia

En aerodinámica de vehículos automóviles se refiere a la fuerza de sustentación negativa. [33](#)

Desradialización

Se aplica a la deformación por cizallamiento producida en los flancos del neumático por el efecto de la puesta en plano de la superficie de rodadura, a consecuencia de la carga. [33](#)

ECE-R75

Reglamento num. 75 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE) — Disposiciones uniformes relativas a la homologación de neumáticos para motocicletas y ciclomotores. [35](#)

ESR

Equivalent Series Resistance – Resistencia Serie Equivalente. Se define como la resistencia de un condensador (o un inductor) al paso de una corriente alterna de una frecuencia determinada. [71](#), [73-75](#)

Functional Mock-up Interface

El FMI es un estándar abierto, que define un contenedor y un interfaz para el intercambio dinámico de modelos usando una combinación de ficheros XML, binarios y de código C, comprimidos en un solo fichero. [20](#)

HIL

Hardware In the Loop. Técnica de simulación que se basa en la interconexión de un equipo físico externo con un modelo en tiempo real que simula el comportamiento de la planta o sistema con el que debe interactuar. El modelo describe el comportamiento del sistema físico. [15](#), [20](#)

LTSpice XVII[®]

LTSpice es un programa gratuito para la simulación de circuitos electrónicos analógicos basado en SPICE y desarrollado por Analog Devices, Inc.. [21](#), [87](#), [91](#), [92](#), [96](#), [97](#), [116](#)

Modelica[®]

Lenguaje declarativo, orientado a objetos y multidominio, para el modelado de sistemas complejos. Desarrollado y distribuido de forma gratuita por la Modelica Association, una asociación sin ánimo de lucro. [6](#), [10](#), [15](#), [16](#), [20](#), [21](#), [24–28](#), [30](#), [34](#), [42](#), [46](#), [48](#), [57](#), [63](#), [85](#), [87](#), [93](#), [95](#), [97](#), [115](#), [116](#)

UAL-eCARM

Vehículo eléctrico experimental desarrollado por el Grupo de investigación de Automática, Robótica y Mecatrónica de la Universidad de Almería - España. [22](#), [38](#)

USABC

United States Advanced Battery Consortium. El USABC persigue la promoción de la investigación y desarrollo futuro de los sistemas de almacenamiento de energía electroquímico en la industria de EE.UU. y el mantenimiento del consorcio que engloba a constructores de vehículos, fabricantes de baterías, laboratorios, universidades e inversores clave. [9](#)

Siglas

AC-Link

Alternating Current Link - Bus de Conexión de Corriente Alterna. [54](#)

ARM

Grupo de investigación de Automática, Robótica y Mecatrónica de la Universidad de Almería - España. [22](#)

ARV

Average Rectified Value - Valor Rectificado Medio. [93](#), [95](#), [97](#), [98](#), [101](#)

ASTM

American Society for Testing and Materials - Sociedad Americana para el Ensayo y los Materiales. [40](#)

BEV

Battery Electric Vehicle - Vehículo Eléctrico a Batería. [4](#), [9](#), [21](#), [22](#), [24](#), [104](#)

CA

Corriente Alterna. [21](#)

CC

Corriente Continua. [11](#), [12](#), [21](#), [23](#), [38](#), [55-60](#), [62-64](#), [69](#), [75](#), [115](#), [116](#)

CCM

Continuous Conduction Mode - Modo de Conducción Continua. [60](#)

CR

Circunferencia de Rodadura. [35-37](#)

DC-Link

Direct Current Link - Bus de Conexión de Corriente Continua. [21](#), [54](#), [68](#), [69](#), [87](#), [99](#)

DSP

Digital Signal Processor - Procesador Digital de Señales. [58](#)

Dymola[®]

Dynamic Modeling Laboratory. [15](#), [20](#), [21](#), [29](#), [30](#), [34](#), [37](#), [40](#), [43](#), [48](#), [56-58](#), [65](#), [74](#), [77](#), [81](#), [83](#), [84](#), [87-92](#), [96](#), [97](#), [99-101](#), [105](#), [115](#), [116](#)

EMI

ElectroMagnetic Interference - Interferencia ElectroMagnética. [69](#)

EMS

Energy Management Systems - Sistemas de Gestión de Energía. [8](#)

ETRTO

European Tyre and Rim Technical Organisation - Organización Técnica Europea de Neumáticos y Llantas. [35](#), [36](#), [69](#)

EV

Electric Vehicle - Vehículo Eléctrico. [6–12](#), [44](#), [45](#), [54](#), [55](#), [86](#), [115](#), [116](#)

FCELL

Fuel Cell - Pila de Combustible. [8](#), [11](#), [117](#)

FCHEV

Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle - Vehículo Híbrido Eléctrico con Pila de Combustible. [4](#), [8](#), [11](#), [24](#), [55](#), [115](#)

FEM

Fuerza Electro Motriz. [65](#), [75](#)

FES

Flywheel Energy Storage - Almacenamiento de Energía por Volante de Inercia. [11](#)

FSM

Finite State Machine - Máquina de Estado Finito. [10](#), [46](#), [48](#)

GHG

GreenHouse Gases - Gases de Efecto Invernadero. [2](#), [3](#), [8](#), [105](#), [113](#), [117](#)

HDAE

Hybrid Differential-Algebraic Equations - Sistema Híbrido de Ecuaciones Diferenciales y Algebraicas. [48](#)

HEV

Hybrid Electric Vehicle - Vehículo Híbrido Eléctrico. [8](#), [9](#), [12](#), [24](#), [55](#), [104](#), [115](#)

HV

High voltage - Voltaje Alto. [99](#)

ICE

Internal Combustion Engine - Motor de Combustión Interna. [9](#), [24](#), [104](#)

IEA

International Energy Agency - Agencia Internacional de la Energía. [8](#)

IPCC

Intergovernmental Panel on Climate Change - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. [2](#)

LA

Lead-Acid Battery - Batería de Plomo-Ácido. [9](#), [10](#), [12](#), [23](#), [45](#), [46](#), [86](#), [116](#)

LCO

Lithium Cobalt Oxide Battery - Batería de Óxido de Litio Cobalto. [9](#)

LDV

Light-Duty Vehicle - Vehículo Ligero. [3](#), [4](#), [7](#), [9](#), [24](#)

Li-Ion

Litio Ion Battery - Batería de Iones de Litio. [9](#), [10](#), [12](#), [45–48](#), [51](#), [67](#), [81](#), [85](#), [86](#), [116](#)

LiFePo4

Lithium Iron Phosphate battery - Batería de Ion Litio FerroFosfato. [9](#), [10](#), [21](#), [45](#), [47](#), [51–53](#), [68](#), [81](#), [85](#), [86](#), [116](#)

LiPo

Lithium ion Polymer battery - Batería de Polímero de iones de Litio. [10](#), [46](#), [86](#), [116](#)

LMO

Lithium Manganese Oxide Battery - Batería de Óxido de Litio Manganeso. [10](#)

LTO

Lithium Titanate Battery - Batería de Titanato de Litio. [10](#)

LTS

LTSpice switched models - Modelos conmutados de componentes en LTSpice. [87](#), [92](#), [93](#), [95–98](#), [101](#)

LV

Low Voltaje - Baja Tensión. [99](#)

LZM

Linearized Model in Modelica - Modelo Linealizado en Modelica. [56](#), [87](#), [90–94](#), [96–101](#)

MA

Modelica Association. [15](#), [16](#), [18](#)

MICRR

Maximum Inductor Current Ripple Ratio - Relación de Ondulación de Corriente Máxima de la Bobina. [69](#)

MMA

Masa Máxima Autorizada. [23](#)

MOVR

Maximum Output Voltage Ripple - Ondulación Máxima del Voltaje de Salida. [69](#)

MPPT

Maximum Power Point Track - Seguimiento del Punto de Máxima Potencia. [12](#), [21](#), [39](#), [55](#), [57](#), [58](#)

MSL

Modelica Standard Library. [15–17](#), [24](#), [38](#), [44](#), [45](#), [54](#), [56](#), [63](#), [64](#), [82](#), [102](#), [105](#), [115](#), [116](#)

NCA

Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide Battery - Batería de Óxido de Litio Níquel Cobalto Aluminio. [9](#)

NEDC

New European Drive Cycle - Nuevo Ciclo de Conducción Europeo. [103](#)

NHBBC

Non-isolated Half-Bridge Bidirectional DC-DC Converter - Convertidor Bidireccional CC-CC de Medio Puente No Aislado. [12](#), [56–62](#), [73–75](#), [88](#), [98](#), [101](#), [116](#)

NiCd

Nickel Cadmium Battery - Batería de Níquel Cadmio. [10](#), [45](#), [46](#), [86](#), [116](#)

NiMH

Nickel Metal Hydride Battery - Batería de Níquel Metal-Hidruro. [10](#), [45](#), [46](#), [86](#), [116](#)

NMC

Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide Battery - Batería de Óxido de Litio Níquel Manganeso Cobalto. [9](#)

NRMSE

Normalized Root Mean Square Error - Raíz Normalizada del Error Cuadrático Medio. [85–87](#), [93](#), [95–98](#), [101](#)

OCDE

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. [3](#)

OCV

Open-Circuit Voltage - Voltaje a Circuito Abierto. [10](#)

OOM

Object-Oriented Modeling - Modelado Orientado a Objetos. [10](#), [46](#)

PHEV

Plug-in Hybrid Electric Vehicle - Vehículo Híbrido Eléctrico Enchufable. [8](#), [9](#), [24](#), [115](#)

PVP

PhotoVoltaic Panel - Panel Fotovoltaico. [10](#), [11](#), [21](#), [22](#), [38–44](#), [58](#), [66](#), [67](#), [74](#), [77](#), [80](#), [102](#), [107](#), [108](#), [111–113](#), [115](#), [116](#)

PWM

Pulse Width Modulation - Modulación del Ancho de Pulso. [11](#), [55](#), [56](#)

P&O

Perturb and Observe - Perturba y Observa. [58](#)

Rd

Radio aplastado del neumático bajo carga en dinámico. [35](#), [37](#)

RF

Radio Frequency - RadioFrecuencia. [69](#)

Rs

Radio aplastado del neumático bajo carga en estático. [35](#)

SEH

Smart Energy Hub - Centro de Energía Inteligente. [45](#), [54–56](#), [68](#), [69](#), [73](#), [87](#), [99](#), [102](#), [110](#), [112](#), [113](#), [115](#), [116](#)

Smart-Grid

Red de Distribución de Energía Inteligente. [115](#)

SOC

State Of Charge - Estado de Carga. [10](#), [45](#), [47](#), [48](#), [51](#), [81](#), [107](#), [108](#)

SOH

State Of Health - Estado de Salud. [10](#)

SPICE

Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis - Programa de Simulación con Énfasis en Circuitos Integrados. [21](#), [116](#)

STC

Standard Test Conditions - Condiciones de Prueba Standard. [40–42](#), [44](#), [67](#), [77](#), [79](#), [80](#)

SWM

Switched Model in Modelica - Modelo Conmutado de Componentes en Modelica. [54](#), [56](#), [59](#), [62](#), [87](#), [88](#), [90–98](#), [100](#), [101](#)

TTW

Tank To Wheel - Del Tanque a la Rueda. [4](#)

UAL

Universidad de Almería - España. [21](#), [22](#)

ULEV

Urban Lightweight Electric Vehicle - Vehículo Eléctrico Urbano Ligerero. [5](#), [24](#), [25](#), [58](#), [68](#), [102](#), [113](#), [115](#), [116](#)

VI

Vehicle Interfaces Library - The Modelica Association. [16](#), [18–20](#), [24](#), [25](#), [27–29](#), [34](#), [38](#), [44](#), [46](#), [54](#), [63](#), [102](#), [115](#), [116](#)

VLDV

Very Light-Duty Vehicle Library - Librería para Vehículos Muy Ligeros. [6](#), [14](#), [24](#), [25](#), [27–31](#), [38](#), [44](#), [54](#), [75–77](#), [81](#), [86](#), [102](#), [115](#)

WTT

Well To Tank - De la Fuente al Tanque. [4](#)

WTW

Well To Wheel - De la Fuente a la Rueda. [4](#)

Lista de Símbolos

Entrada	Descripción	Símbolo
A_f	Área frontal del vehículo.	m^2
C_x	Coefficiente de penetración aerodinámica del vehículo.	
D_a	Resistencia aerodinámica.	N
F	Frecuencia, número de ocurrencias por unidad de tiempo.	s^{-1}
G_n	Radiación solar nominal de acuerdo a condiciones STC.	W/m^2
G	Radiación solar.	W/m^2
M_{bat}	Masa de las baterías.	kg
M_{con}	Masa del conductor y equipaje o carga de pago.	kg
M_{tveh}	Masa total del vehículo en estático, incluidos conductor+equipaje y baterías.	kg
M_{veh}	Masa vehículo en estático, sin conductor+equipaje ni baterías.	kg
R_x	Fuerza de resistencia a la rodadura.	N
T_n	Temperatura nominal de acuerdo a condiciones STC.	K
T	Temperatura de la unión p-n del diodo de la célula fotovoltaica.	K
f_r	Coefficiente de resistencia a la rodadura del neumático.	N/N
g	Aceleración de la gravedad terrestre.	m/s^2
h	Humedad ambiente.	$\%$
p	Presión atmosférica.	Pa
R	Valor de la constante universal de los gases ideales = 8.314472 $J/(K \cdot mol)$.	$J/K \cdot mol$
ρ	Densidad del aire.	kg/m^3
T_{amb}	Temperatura ambiente.	$^{\circ}C$
v_r	Velocidad relativa del aire respecto al vehículo.	m/s^2
v	Velocidad del aire.	m/s
v_{veh}	Velocidad de desplazamiento del vehículo respecto al sistema de referencia.	m/s

Índice de Tablas

3.1. Principales datos técnicos del vehículo UAL-eCARM	23
4.1. Paquetes componentes de la librería VLDV.	25
4.2. Nomenclatura de las posiciones sobre el vehículo.	29
4.3. Listado de parámetros de la clase base ParamTriAVDrive_2.	36
4.4. Listado de parámetros de la clase base eCARM_2017_10.	36
4.5. Listado de parámetros de la clase base PVpanelVillalba_improved.	44
4.6. Parámetros y variables principales del modelo de la clase base EnergyStorage.LIonbattery_Dizqah_BBOX5_100Ah_SinDecay_LiIon.	50
4.7. Parámetros y variables adicionales para el cálculo del decaimiento de la clase base EnergyStorage.LIonbattery_Dizqah_BBOX5_100Ah_lim_1_L1L2.	52
4.8. Listado de parámetros del componente PV_Vill_KC200GT_improved.	66
4.9. Listado de parámetros del componente LIonbatDizqah_LiIon_BBOX5_NoDec_L1L2.	66
4.10. Listado de parámetros del componente LIonbatDizqah_A123_26650.	66
4.11. Listado de parámetros del componente LIonbatDizqah_LFP4_BBOX5_L1L2.	67
4.12. Especificaciones de diseño del convertidor del motor en modo <i>Boost</i>	69
4.13. Especificaciones de diseño del convertidor del motor en modo <i>Buck</i>	70
4.14. Parámetros de los modelos EnergyBus.BoostAveraged_100k_DCmotor_RcR1_2_Res y EnergyBus.BuckAveraged_100k_DCmotor_RcR1_2_Res de la librería VLDV.	72
4.15. Parámetros del modelo EnergyBus.BoostAveraged_15k_PVpanel_RcR1_2_Res de la librería VLDV.	73
4.16. Parámetros del modelo EnergyBus.BuckAveraged_15k_Accesories_RcR1_2_Res de la librería VLDV.	74
4.17. Listado de parámetros del componente TractionMotor.DCMotorRN120_MB_RevkE.	74
5.1. Tabla comparativa de los resultados obtenidos en la simulación del panel fotovoltaico para condiciones <i>STC</i>	79
5.2. Parámetros del componente EnergyStorage.LIonbatDizqah_LFP4_BBOX5_L1L2.	81

5.3. Parámetros obtenidos tras la calibración del modelo según ecuación (4.25) en columna II y según ecuación (4.15) en columna III. 83

5.4. Ciclo de operación del convertidor bidireccional Buck-Boost 98

Índice de Figuras

1.1. Evolución de las emisiones GHG por grupos de población según ingresos. Total anual de emisiones antropogénicas de gases GHG en el periodo desde 1970 al 2010. Fuente IPCC-2014 [49] pag.45.	3
1.2. Parque mundial de vehículos ligeros en el periodo 2000-2050, dentro (azul) y fuera (verde) de la OCDE. Fuente UNEP [8] pag. 1.	4
1.3. Esquema de la cadena del ciclo de energía desde la fuente a la rueda [3].	5
3.1. Diagrama del ejemplo LossyGearDemo3 de la librería Rotational.	17
3.2. Diagrama del ejemplo Oscillator de la librería Translational	17
3.3. Modelo del ejemplo DoublePendulum de la librería Mechanics.MultiBody	18
3.4. Diagrama del modelo de ejemplo ConventionalManualVehicle de la librería VehicleInterfaces	19
3.5. Esquema de la micro-red CIESOL utilizada como banco de ensayos.	22
3.6. Vehículo eléctrico experimental eCARM de la UAL.	22
4.1. Estructura general de la librería VLDV.	25
4.2. Clases base de la librería VLDV.	26
4.3. Clases base Atmosphere de la librería VLDV.	27
4.4. Clases base Chassis de la librería VLDV.	28
4.5. Clases base Chassis.Interface de la librería VLDV.	29
4.6. Diagrama de la clase base Chassis.Interface.TwoAxleBaseVLDV de la librería VLDV.	30
4.7. Diagrama de la clase base Chassis.Interface.ThreeWheelAVDriveBase.	30
4.8. Diagrama de la clase base Chassis.Interface.ThreeWheelARDriveBase.	31
4.9. Clases base Chassis.Resistance de la librería VLDV.	31
4.10. Diagrama de la clase base Chassis.Resistance.ResistanceRollWind.	34
4.11. Clases base Chassis.SetParameters de la librería VLDV.	34
4.12. Diagrama de la clase base Chassis.TricycleAVdriveMinimal.	37
4.13. Clases base del subpaquete BaseClass.EnergySource de la librería VLDV.	38
4.14. Esquema de principio de una célula fotoeléctrica [129]	39
4.15. Diagrama de la clase base EnergySource.Interface.SourceBase de la librería VLDV.	40

4.16. Funciones del subpaquete <code>BaseClass.EnergySource.FunctionalBlocks</code> de la librería <code>VLDV</code>	41
4.17. Diagrama de la clase base <code>EnergySource.PVpanel.PVpanelVillalba_improved</code> de la librería <code>VLDV</code>	43
4.18. Clases base del subpaquete <code>BaseClass.EnergyStorage</code> de la librería <code>VLDV</code>	45
4.19. Diagrama de la clase base <code>EnergyStorage.Interface.StorageBase</code> de la librería <code>VLDV</code>	46
4.20. Diagrama de la clase base <code>EnergyStorage.BatteryVconst</code> de la librería <code>VLDV</code>	47
4.21. Diagrama de la clase base <code>LIonbattery_Dizqah_BBOX5_100Ah_SinDecay_LiIon</code> de la librería <code>VLDV</code>	48
4.22. <i>FSM</i> que representa el comportamiento discreto de la batería. Dos estados: S_0 (descarga) y S_1 (carga) y condiciones para las transiciones.	48
4.23. Determinación de los parámetros básicos de la batería sobre la gráfica de descarga.	50
4.24. Diagrama de la clase base <code>LIonbattery_Dizqah_BBOX5_100Ah_L1L2</code> de la librería <code>VLDV</code>	51
4.25. Gráfica de la ecuación (4.24).	51
4.26. Puntos de inicio y fin del decaimiento de la gráfica de descarga para una intensidad de 20 A (0.2C).	52
4.27. Clases base del subpaquete <code>BaseClass.EnergyBus</code> de la librería <code>VLDV</code>	54
4.28. Diagrama de la clase base <code>EnergyBus.Interface.VoltConvBase_BuBo_Duty_Mode</code> de la librería <code>VLDV</code>	56
4.29. Diagrama simplificado de la clase base <code>EnergyBus.HalfBridge_HvLv_RcR1</code> de la librería <code>VLDV</code>	58
4.30. Definición de los intervalos de conmutación D y $1-D$	59
4.31. Diagrama de la clase base <code>EnergyBus.BoostConvBase_Averaged_2_Res</code> de la librería <code>VLDV</code>	61
4.32. Diagrama de la clase base <code>EnergyBus.BuckConvBase_Averaged_2</code> de la librería <code>VLDV</code>	62
4.33. Diagrama de la clase base <code>TractionMotor.DCMotor_Rotational_EMFkTKE_MB</code> de la librería <code>VLDV</code>	64
4.34. Componentes del subpaquete <code>Component.Chassis</code> de la librería <code>VLDV</code>	65
4.35. Diagrama esquemático de la conexión entre el motor y el <i>DC-Link</i>	68
4.36. Convertidor <i>NHBBC</i> en modo <i>Boost</i>	69
4.37. Convertidor <i>NHBBC</i> en modo <i>Buck</i>	70
4.38. Diagrama del componente <code>EnergyBus.BuBoAveraged_100k_DCmotor_RcR1_2_Res_Cond</code> de la librería <code>VLDV</code>	73
5.1. Diagrama del experimento de simulación de la instancia del componente <code>PV_Vill_KC200GT_improved</code> de la librería <code>VLDV</code>	76
5.2. Comparación de los resultados de curvas I-V del modelo <code>PV_Vill_KC200GT_improved</code> con los del panel <i>Kyocera KC200GT</i> [82].	77

5.3. Comparación de respuesta I-V para $G = 1000 \frac{W}{m^2}$ entre el componente PV_Vi11_KC200GT_improved y los datos proporcionados por el fabricante del panel <i>Kyocera KC200GT</i> [82].	77
5.4. Especificaciones técnicas del panel <i>Kyocera KC200GT</i> [82]	78
5.5. Curva P-V del componente PV_Vi11_KC200GT_improved en condiciones STC.	78
5.6. Curva P-I del componente PV_Vi11_KC200GT_improved en condiciones STC.	79
5.7. Gráfica de descarga a 20 A (0.2C) del equipo B-Box 5.0	81
5.8. Diagrama en Dymola del experimento de validación, con entrada para el valor de la intensidad de descarga.	82
5.9. Resultados del experimento de validación previa.	82
5.10. Gráfica del resultado de la calibración del modelo según ecuación (4.25)	83
5.11. Gráfica del resultados del componente LIonbatDizqah_LiIon_BB0X5_NoDec_L1L2 calibrado y del equipo real.	84
5.12. Gráfica con la comparación de resultados de los componentes LIonbatDizqah_LiIon_BB0X5_NoDec_L1L2 y LIonbatDizqah_LFP4_BB0X5_L1L2, con respecto a los valores experimentales del equipo real.	85
5.13. Gráficas de descarga del componente LIonbatDizqah_A123_26650 y de la batería comercial <i>ANR26650M</i> , para una intensidad de 5 A (2C).	86
5.14. Diagrama simplificado del experimento con el convertidor SWM en modo Boost. $V_{in}=6V$, $V_{out}=48V$	87
5.15. Diagrama simplificado del experimento con el convertidor SWM en modo Buck. $V_{in}=48V$, $V_{out}=36V$	88
5.16. Diagrama simplificado en Dymola [®] para la comparación y validación de prestaciones entre los modelos SWM, LZM y LTS en configuración Boost durante la fase de arranque y estabilización.	91
5.17. Modelo LTS en LTSpice XVII [®] en configuración <i>Boost</i> para simulación de la fase de arranque y estabilización.	92
5.18. Valor ARV calculado de la tensión de salida en condiciones estabilizadas para el convertidor SWM (Boost).	92
5.19. Comparación de la tensión de salida de los convertidores SWM, LZM y LTS en configuración Boost durante la fase de arranque y estabilización: (a) Valor ARV de la tensión de salida. (b) Diferencias entre SWM-LZM y LTS-LZM.	93
5.20. Diagrama simplificado en Dymola [®] para la comparación y validación de prestaciones entre los modelos SWM, LZM y LTS en configuración Buck durante la fase de arranque y estabilización.	94
5.21. Modelo LTS en LTSpice en configuración Buck para simulación de la fase de arranque y estabilización.	94
5.22. Comparación de la tensión de salida de los convertidores SWM, LZM y LTS en configuración <i>Buck</i> durante la fase de arranque y estabilización: (a) Valor ARV de la tensión de salida. (b) Diferencias entre SWM-LZM y LTS-LZM.	95
5.23. Modelo LTS en LTSpice en configuración <i>Boost</i> para simulación con variaciones sinusoidales de la tensión de entrada.	96
5.24. Diagrama simplificado en Dymola [®] para la comparación y validación de prestaciones entre los modelos SWM, LZM y LTS en configuración Boost bajo variaciones sinusoidales de la tensión de entrada.	96

5.25. Comparación de la tensión de salida de los convertidores SWM, LZM y LTS en configuración <i>Boost</i> bajo variaciones sinusoidales de la tensión de entrada: (a) Valor ARV de la tensión de salida. (b) Diferencias entre SWM-LZM y LTS-LZM.	97
5.26. Diagrama en Dymola del experimento para la simulación del convertidor bidireccional linealizado Boost-Buck.	98
5.27. Simulación del convertidor bidireccional Boost/Buck para el ciclo de operación propuesto en la Tabla 5.4: (a) Tensiones LV y HV del convertidor. (b) Ciclo de trabajo <i>D</i> . (c) Modo de operación del convertidor (True = modo Boost, False = modo Buck).	99
5.28. Diagrama del modelo del vehículo completo <code>VehicleAvDrive_PV</code>	102
5.29. Ciclo de conducción urbano <i>VLDV3600-U1</i>	103
5.30. Ciclo de conducción urbano <i>VLDV4200-U1</i>	104
5.31. Diagrama en Dymola [®] del componente <code>conductor</code> del vehículo.	104
5.32. Comparación entre la consigna de velocidad-tiempo del ciclo de conducción urbano <i>VLDV3600-U1</i> y la velocidad real del vehículo.	105
5.33. Evolución de la carga de la batería durante el ciclo <i>VLDV3600-U1</i>	106
5.34. Evolución de la carga de la batería durante el ciclo <i>VLDV4200-U1</i>	107
5.35. Análisis del intercambio de energía de la batería durante el ciclo <i>VLDV3600-U1</i>	107
5.36. Análisis del intercambio de energía de la batería durante el ciclo <i>VLDV4200-U1</i>	108
5.37. Análisis del intercambio de energía del motor durante el ciclo <i>VLDV3600-U1</i>	108
5.38. Análisis del intercambio de energía del motor durante el ciclo <i>VLDV4200-U1</i>	109
5.39. Evaluación energética del vehículo durante el ciclo <i>VLDV3600-U1</i>	110
5.40. Evaluación energética del vehículo durante el ciclo <i>VLDV4200-U1</i>	111

Índice de Listados de Código

B.1. BaseClass.Atmosphere.Interface.irradianceBase	137
B.2. BaseClass.Atmosphere.VLDVConstantAtmosphere	137
B.3. BaseClass.Chassis.Interface.ThreeWheelAVDriveBase	138
B.4. BaseClass.Chassis.TricycleAVdriveMinimal	139
B.5. BaseClass.EnergySource.FunctionalBlocks.Iscn_To_Ipvn_improved . .	140
B.6. BaseClass.EnergySource.FunctionalBlocks.SingleDiode_Id	140
B.7. BaseClass.EnergyStorage.FuntionalBlocks.Block_Dizqah_LiIon_BBOX5_100Ah_SinDecay	141
B.8. BaseClass.EnergyStorage.FuntionalBlocks.Block_Dizqah_BBOX5_100Ah_L1L2(parte1)	142
B.9. BaseClass.EnergyStorage.FuntionalBlocks.Block_Dizqah_BBOX5_100Ah_L1L2(parte2)	143
B.10.BaseClass.EnergyBus.FuntionalBlocks.BoostAveragedModel_2	144
B.11.BaseClass.EnergyBus.FuntionalBlocks.BuckAveragedModel_2	145
B.12.Component.Atmosphere.VLDVConstantAtmosphere	145
B.13.Component.EnergySource.PVpanel.PV_Vill_KC200GT_improved	146
B.14.BaseClass.TractionMotor.EMF_kT_kE_Revised	146

Capítulo 1

Introducción

La sociedad moderna ha basado en gran medida su desarrollo sobre la posibilidad de desplazar cantidades suficientes de bienes y personas entre distintas localizaciones de forma eficaz. El desarrollo del transporte marítimo y fluvial primero, por ferrocarril y carretera después y finalmente el aéreo, han hecho posible alcanzar el estado actual de avance económico y social de los países desarrollados. Con una población mundial creciente, con numerosos países en vías de desarrollo densamente poblados, la necesidad del transporte aumenta vertiginosamente. El transporte consume el 19% de la energía a nivel mundial y emite el 23% del dióxido de carbono (CO₂) debido al consumo energético [9]. Con la tendencia actual, el uso de energía para el transporte aumentará un 50% para 2030 y más de un 80% para 2050.

Según el [Intergovernmental Panel on Climate Change - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático \(IPCC\)](#) [49], durante el periodo comprendido entre 2000 y 2010, las emisiones antropogénicas de [GreenHouse Gases - Gases de Efecto Invernadero \(GHG\)](#) han aumentado más rápidamente que en las tres décadas anteriores. El total de las emisiones de [GHG](#) en este mismo periodo fueron las más altas de la historia de la humanidad, alcanzando los 49 GtCO₂eq/año^{1 2} en 2010. Asimismo, el crecimiento medio fue de 1 GtCO₂eq/año, muy elevado en comparación con los 0.4 GtCO₂eq/año del periodo anterior desde el 1970 al 2000, según se puede apreciar en la figura 1.1. Las emisiones de CO₂ provenientes de la combustión de combustibles fósiles y de la actividad industrial contribuyeron aproximadamente en un 78% al aumento del total de emisiones de gases [GHG](#) en el periodo comprendido entre el año 1970 y el 2000, con similar porcentaje para el periodo 2000-2010.

Dado que este escenario futuro es insostenible, el [IPCC](#) advierte, que para evitar las desastrosas consecuencias del cambio climático, el calentamiento global no debe sobrepasar 1.5 °C, por lo que las emisiones antropogénicas globales netas de CO₂ deben disminuir un 45% de aquí a 2030 con respecto a los niveles de 2010 y ser iguales a cero para el año 2050 [96] [55]. El transporte juega un papel decisivo en la consecución de este objetivo. Para alcanzarlo es necesario, a corto plazo, aplicar la mejor tecnología disponible y a medio-largo plazo desarrollar tecnologías que permitan avanzar en el mismo. Paralelamente resulta indispensable incidir en la necesaria adaptación de los modos actuales de desplazamiento. Las políticas que adopten los distintos gobiernos deben permitir avanzar en estos aspectos en el corto y medio plazo de forma coordinada, estableciendo una hoja de ruta común a nivel internacional.

En Europa, ya se establecieron en 2009 las bases para una política de transportes competitiva y sostenible [7], entre las que cabe destacar las siguientes:

- El reto es romper la dependencia de los sistemas de transporte respecto del petróleo sin sacrificar su eficiencia, ni comprometer la movilidad.
- La opción de restringir la movilidad no se plantea.
- Tienen que surgir nuevos modelos de transporte y mejorar el rendimiento en cuanto a eficiencia energética de los vehículos en todos los modos. Desarrollar y utilizar combustibles y sistemas de propulsión sostenibles.
- La eliminación progresiva de los vehículos de “propulsión convencional” en el entorno urbano es una contribución fundamental a una reducción significativa de la dependencia del petróleo, las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación atmosférica local y la contaminación acústica.

¹El Gt no es una unidad del sistema internacional, pero se utiliza comúnmente en la bibliografía. 1 Gt equivale a 10⁹tm; 1 tm (tonelada métrica) equivale a 1000kg, por lo que 1 Gt equivale a 10¹²kg.

²De manera habitual en la literatura, todas las emisiones de gases [GHG](#) estimadas se convierten a CO₂ equivalente/año (GtCO₂eq/año), basándose en el Potencial de Calentamiento Global en un horizonte temporal de 100 años (GWP100).

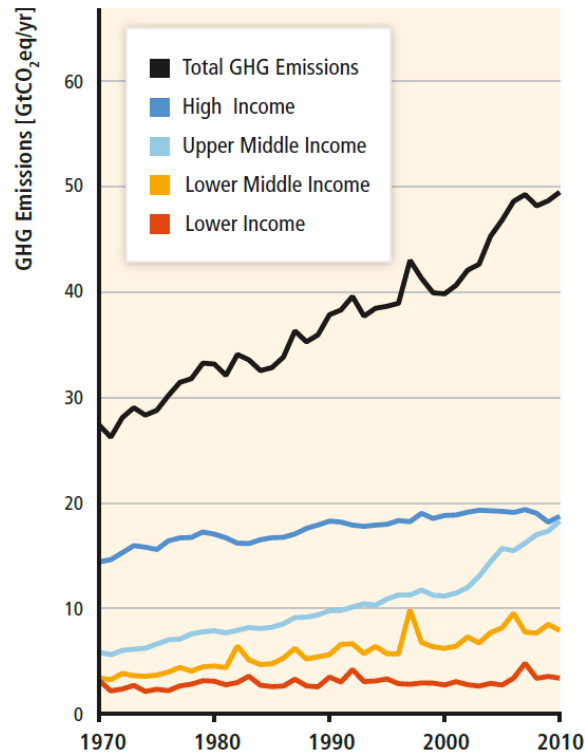


Figura 1.1

Evolución de las emisiones GHG por grupos de población según ingresos. Total anual de emisiones antropogénicas de gases GHG en el periodo desde 1970 al 2010.

Fuente IPCC-2014 [49] pag.45.

- Debe fomentarse el uso de vehículos de pasajeros más pequeños, más ligeros y más especializados en el transporte por carretera.

Más recientemente, en 2018, la Comisión Europea ha publicado su *Estrategia a largo plazo para 2050* [11], que establece “*La visión estratégica europea a largo plazo de una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra*”, para abordar la neutralidad climática y las cero emisiones netas de GHG. En ella, caben destacar dos de las vías propuestas para la transición hacia este nuevo escenario:

- Maximizar el despliegue de las energías renovables y el uso de la electricidad para descarbonizar completamente el suministro energético de Europa.
- Adoptar una movilidad limpia, segura y conectada.

El transporte ligero, fundamentalmente orientado a personas, consumió en 2006 el 47 % de la energía dedicada al transporte [9]. El parque mundial de **Light-Duty Vehicle - Vehículo Ligero (LDV)** es previsible que se triplique para el año 2050, principalmente debido al incremento en países en vías de desarrollo [8]. En la figura 1.2 se muestra en azul el parque previsto en países de la **Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE)** y en verde el parque previsto en países fuera de la **OCDE**.

Según [67], el uso de sistemas de transmisión alternativos, la reducción del tamaño de los vehículos y la utilización de materiales más ligeros pueden reducir las emisiones de CO₂ de la flota de vehículos **LDV**, si bien las mayores reducciones están limitadas por su

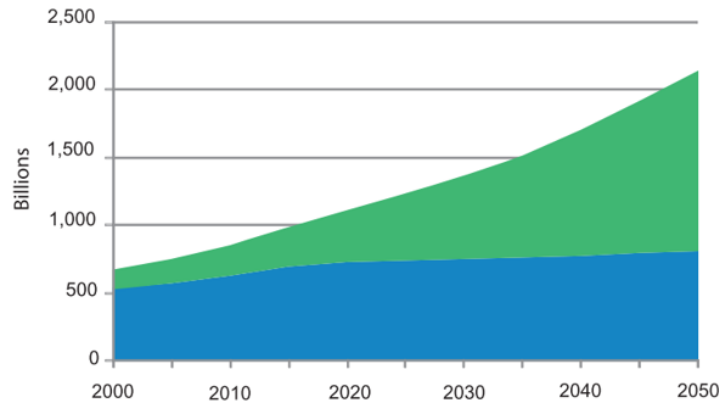


Figura 1.2

Parque mundial de vehículos ligeros en el periodo 2000-2050, dentro (azul) y fuera (verde) de la OCDE. Fuente UNEP [8] pag. 1.

futura penetración en el mercado. Presenta el desarrollo de un modelo dinámico energético-económico del parque de vehículos de pasajeros LDV, usado para el estudio del impacto de la electrificación de los sistemas de transmisión, el uso de materiales ligeros y la reducción del tamaño de los vehículos en el consumo de energía, la emisión de CO₂ y su coste de fabricación en el parque de este tipo de vehículos en Japón. Las principales conclusiones del estudio son que:

- Con el escenario actual, no se alcanzará el objetivo de reducción de emisiones de CO₂ **Tank To Wheel - Del Tanque a la Rueda (TTW)** del 50 % en 2050 respecto a los valores de 1990. Este objetivo solo es posible si se consigue la difusión de **Battery Electric Vehicle - Vehículo Eléctrico a Batería (BEV)** y **Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle - Vehículo Híbrido Eléctrico con Pila de Combustible (FCHEV)**.
- La difusión del uso de **BEV** alcanza el mayor potencial en la reducción de emisiones de CO₂. Comparado con los valores del escenario base en 2050, se consigue una reducción (**TTW**) del 61.5 % y 91.1 % en consumo energético y reducción de emisiones de CO₂ respectivamente. En el caso del uso de vehículos mini-BEV ligeros, la reducción alcanzaría el 70.6 % y 92.2 % respectivamente, lo que permitiría alcanzar el objetivo de reducción de emisiones.

En la figura 1.3, el término **TTW** se refiere a la parte de la cadena de suministro de energía que se extiende desde el punto de suministro de energía al vehículo (punto de recarga eléctrica, punto de recarga de combustible) hasta su efecto final (movimiento del vehículo). **TTW** por tanto hace referencia al uso del combustible en el vehículo y las emisiones durante el desplazamiento. El término **Well To Tank - De la Fuente al Tanque (WTT)** hace referencia a la parte de la cadena que va desde el punto de producción de la energía (petróleo, electricidad eólica, gas natural) hasta el punto de suministro al vehículo. Por su parte, el término **Well To Wheel - De la Fuente a la Rueda (WTW)** se refiere a la suma de ambos, pues cubre toda la cadena de suministro de energía, desde la fuente inicial, hasta su efecto final. Fuente [3].

De lo expuesto anteriormente, se puede concluir que uno de los focos de actuación preferentes para la consecución del objetivo de reducción de la emisión de gases de efecto invernadero está en el **transporte urbano ligero** y en el uso de **fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles**. Estas fuentes deben:

- Ser renovables para evitar su agotamiento.

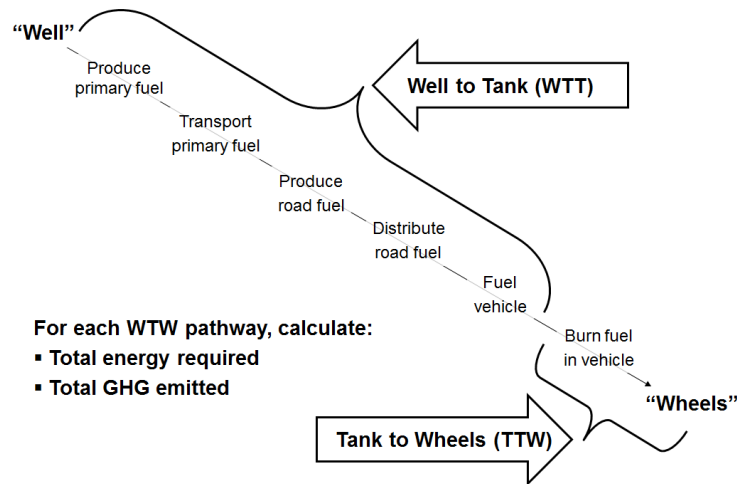


Figura 1.3

Esquema de la cadena del ciclo de energía desde la fuente a la rueda [3].

- Estar disponibles en la zona para evitar la dependencia energética de terceros.
- Ser acumulables para poder disponer de las reservas adecuadas que equilibren la capacidad de producción y la demanda.

1.1. Motivación

El trabajo de investigación presentado viene justificado por dos motivaciones diferentes y complementarias:

- La necesidad de disponer de modelos adecuados que permitan analizar y anticipar las prestaciones y comportamientos de las distintas alternativas tecnológicas en estudio para el caso de los sistemas de transporte urbano del futuro. La necesidad de disponer de sistemas de propulsión y fuentes energéticas alternativas obliga a disponer de modelos modulares, con capacidad para integrar y simular el comportamiento dinámico del sistema completo, abarcando las distintas tecnologías y desde distintos niveles de abstracción. Si bien hay un elevado número de investigadores que han desarrollado e investigado sobre modelos que analizan las posibilidades de estas nuevas tecnologías de alimentación y propulsión, en la mayoría de los casos se basan en la simple adaptación de la concepción tradicional del vehículo a esta nueva realidad.
- La necesidad de avanzar en nuevas propuestas de movilidad urbana, basadas en vehículos más ligeros, mas adaptados al uso específico para transporte ligero de corta distancia, con máximo aprovechamiento de las fuentes de energía renovable disponibles y con esquemas de uso que optimicen su capacidad.

1.2. Hipótesis

La hipótesis principal que se pretende demostrar, es la viabilidad de un nuevo concepto de movilidad urbana basado en el uso intensivo de fuentes de energía renovable, al que podremos llamar **Urban Lightweight Electric Vehicle - Vehículo Eléctrico Urbano Ligero (ULEV)**.

Como hipótesis secundaria, se pretende demostrar cómo este concepto consigue una reducción importante en el consumo de energía y en las emisiones de CO₂ a la atmósfera, además de en el consumo de combustibles fósiles y otras fuentes de energía no renovables [100].

Para lo anterior, se ha desarrollado una plataforma software, basada en el lenguaje de modelado [Modelica®](#), que permite la definición del modelo completo de un [Electric Vehicle - Vehículo Eléctrico \(EV\)](#) teniendo en cuenta las ecuaciones mecánicas, eléctricas, electrónicas, físicas del entorno y de control, desde un punto de vista multidisciplinar.

1.3. Contenido

El resto del contenido del documento de tesis se estructura en los siguientes apartados:

- [Capítulo 2](#). Se hace una revisión del estado del arte en el ámbito de conocimiento relacionado.
- [Capítulo 3](#). Se hace una revisión de los materiales y métodos utilizados, salvo de la librería [Very Light-Duty Vehicle Library - Librería para Vehículos Muy Ligeros \(VLDV\)](#), que se trata detalladamente en el siguiente capítulo.
- [Capítulo 4](#). Se presentan las principales clases base y componentes de la librería [VLDV](#), que ha sido específicamente desarrollada para el propósito del presente trabajo.
- [Capítulo 5](#). Se presentan los resultados obtenidos del modelado y simulación de los principales componentes de la librería [VLDV](#), así como del vehículo completo. En la última sección se discuten los diferentes resultados obtenidos.
- [Capítulo 6](#). Se presentan las conclusiones del trabajo de investigación realizado sobre modelado y simulación de vehículos urbanos eléctricos ligeros, así como de la optimización del uso en los mismos de las distintas fuentes de energía renovable. A continuación se presentan las aportaciones al Estado del Arte y finalmente se exponen los trabajos futuros propuestos.
- [Bibliografía](#). Se relaciona la bibliografía consultada para el desarrollo del presente trabajo de investigación.
- [Apéndice A](#). Se exponen las publicaciones que avalan el presente trabajo.
- [Apéndice B](#). Se presentan los listados de código de los componentes más representativos de la librería [VLDV](#).

Capítulo 2

Estado del Arte

En este capítulo se hace un repaso al estado del arte en lo relativo a la movilidad eléctrica del futuro en el sector del automóvil. Se comienza por las áreas relacionadas con las distintas alternativas de configuración de los vehículos automóviles, así como las distintas tecnologías de componentes disponibles y en desarrollo. Se repasan las publicaciones recientes específicamente orientadas a los mini-LDVs, se presentan las específicas de los componentes más representativos de los EVs y finalmente se presentan las relativas a la integración de los EVs en la red de distribución de energía.

Existe en la bibliografía un gran número de publicaciones en las que se proponen diversas aproximaciones a la solución de la movilidad del futuro, fundamentalmente orientadas a la movilidad eléctrica o híbrida. Dentro de este abanico de conocimiento podemos encontrar, por grupos, variadas orientaciones; en primer lugar las publicaciones más genéricas, que repasan las distintas alternativas de configuración y tecnológicas de los sistemas de generación de energía, almacenamiento, transmisión y control de los vehículos [EV](#), [Hybrid Electric Vehicle - Vehículo Híbrido Eléctrico \(HEV\)](#) y [Plug-in Hybrid Electric Vehicle - Vehículo Híbrido Eléctrico Enchufable \(PHEV\)](#); proponen además variados modelos para la determinación de parámetros específicos de la actuación de los vehículos como son el consumo, las emisiones de gases [GHG](#), aceleraciones, autonomía, etc.

En [\[58\]](#) se hace una aproximación al diseño de vehículos [EV](#) y [HEV](#). Se lleva a cabo una revisión de las distintas alternativas tecnológicas y configuraciones posibles de este tipo de vehículos para las distintas categorías que van desde los pequeños utilitarios hasta los grandes vehículos de transporte de mercancías. Finalmente se hace una revisión de las distintas tecnologías de almacenamiento de energía del vehículo como son las baterías y super-condensadores, de los motores eléctricos y sus controladores, de las [Fuel Cell - Pila de Combustible \(FCELL\)](#) y sus sistemas de control, del diseño estructural del vehículo y del uso de materiales ligeros en su concepción.

En [\[80\]](#), se hace una exhaustiva descripción de la tecnología de los vehículos [EV](#) y [HEV](#) y un repaso a su modelado y control. En los diferentes capítulos trata sobre la tecnología de los sistemas de transmisión, chasis y neumáticos, la dinámica del vehículo, el modelado y características de los componentes de la transmisión, el modelado de los sistemas de propulsión y frenado, la gestión energética del vehículo y finalmente sobre la dinámica del vehículo.

En [\[95\]](#), se exponen los resultados del programa de investigación “Agreement for Hybrid and Electric Vehicles”, financiado por la [International Energy Agency - Agencia Internacional de la Energía \(IEA\)](#). Los temas tratados se enfocan principalmente hacia las opciones tecnológicas disponibles para la optimización de los diferentes sistemas componentes de los vehículos [EV](#) y [HEV](#), así como las configuraciones de los sistemas de transmisión, con el objetivo puesto en la mejora de la eficiencia energética del vehículo y desde un punto de vista interdisciplinar.

Por su parte [\[131\]](#) se centra en la electrónica de potencia y las soluciones de motorización para los actuales y futuros vehículos [EV](#), [PHEV](#) y [FCHEV](#). En los distintos capítulos trata sobre el dimensionamiento del sistema de propulsión, las distintas arquitecturas disponibles en los vehículos [PHEV](#), las tecnologías clave de baterías y sus sistemas de gestión, los distintos tipos de convertidores para los sistemas de carga, así como la interconexión con los sistemas de distribución de energía eléctrica.

En [\[122\]](#) se presenta un estudio sobre las distintas topologías del sistema de transmisión disponibles en la literatura para los vehículos [HEV](#) y [FCHEV](#), así como las diferentes configuraciones de sus componentes. Hace una revisión de los conceptos disponibles en la bibliografía reciente sobre algoritmos de optimización y funciones objetivo en los sistemas [Energy Management Systems - Sistemas de Gestión de Energía \(EMS\)](#), propone una clasificación y realiza una comparación presentando sus ventajas e inconvenientes. Finalmente propone una serie de vías de investigación para la optimización de los sistemas de transmisión y los [EMS](#).

Tal como podemos ver en las referencias anteriores, las soluciones propuestas se orientan principalmente a la aplicación de las nuevas tecnologías de propulsión eléctricas e híbridas a los conceptos actuales de vehículos para el transporte de mercancía y personas. Falta en ellas una visión de futuro sobre nuevos conceptos de vehículos que permitan una evolución más rápida hacia la optimización del uso de energía y la reducción de emisiones de gases [GHG](#). Es por ello que numerosas publicaciones recientes, hacen referencia a estudios particulares

sobre soluciones específicas de movilidad, orientadas a los mini-LDV ligeros. De entre las disponibles, son de especial interés las siguientes:

En [117] se presentan, como parte del diseño conceptual de un nuevo micro-vehículo urbano eléctrico, los resultados del análisis de las prestaciones para un determinado caso de estudio. En la primera parte del estudio se describen brevemente las características del vehículo. En la segunda parte se lleva a cabo el estudio de evaluación de las prestaciones del vehículo con ayuda de *ADvanced VehIcle SimulatOR* [132], un conjunto de modelos, ficheros de datos y ficheros script para uso con *MATLAB*[®] - *Simulink*[®] [114], que permite el análisis rápido de prestaciones y consumo de combustible de vehículos *Internal Combustion Engine - Motor de Combustión Interna (ICE)*, *EV* y *HEV*. La simulación se lleva a cabo de acuerdo a tres diferentes ciclos de conducción normalizados (*NY-Composite Cycle*, *ECE-15* y *Constant Speed Cycle*), fundamentalmente orientados a conducción urbana y para dos tecnologías de batería diferentes (*Lead-Acid Battery - Batería de Plomo-Ácido (LA)* y *Litio Ion Battery - Batería de Iones de Litio (Li-Ion)*).

En [59] se aborda el desarrollo de un algoritmo de control del par motor, capaz de distribuir el par de forma independiente a cada una de las ruedas de un vehículo de altas prestaciones, completamente eléctrico, equipado con 4 motores-rueda independientes. El algoritmo de control se desarrolla completamente en *MATLAB*[®] y *Simulink*[®], para ser implementado posteriormente en el modelo dinámico del vehículo y co-simulado con ayuda del software de modelado y simulación en tiempo real *VI-CarRealTime* [128]. Se llevan a cabo simulaciones sobre el modelo para la sintonización de los controladores y la evaluación de su impacto en la dinámica y la eficiencia energética del vehículo. Finalmente, se llevan a cabo pruebas del modelo en un simulador estático real de *VI-Grade* para su validación y para tener una evaluación subjetiva del comportamiento dinámico del modelo.

En [101] se presenta el diseño de un triciclo solar como alternativa a los medios de transporte urbanos locales actuales. Según el autor, esta solución ofrece una alta tasa de ocupación y una velocidad y autonomía que puede satisfacer las necesidades del transporte urbano local. Se presenta el diseño, el análisis económico, de sostenibilidad y de prestaciones del nuevo concepto. Según los resultados obtenidos, con una autonomía de 37.1 km, el vehículo propuesto es capaz de dar respuesta a más del 90 % de los desplazamientos urbanos locales en EEUU, con una reducción del consumo de energía superior al 41 % y con una reducción de las emisiones de CO₂ superiores al 75 % en comparación con el transporte por ferrocarril, el mejor medio de transporte desde el punto de vista medio-ambiental.

Otro gran grupo de publicaciones se centran en el análisis y estudio de los componentes específicos de mayor interés para su aplicación en vehículos *BEV*, *HEV*, *PHEV*, etc., como son los sistemas de almacenamiento de energía, las fuentes de energía renovable y los sistemas de control de potencia. De entre los relativos a los sistemas de almacenamiento de energía y las fuentes de energía renovable, los de mayor interés para este trabajo son los siguientes:

En [18] se lleva a cabo la evaluación de cinco baterías comerciales del tipo *Lithium Iron Phosphate battery - Batería de Ion Litio FerroFosfato (LiFePo4)* bajo diferentes escenarios de prueba que incluyen el ciclo de vida, la eficiencia energética, la potencia específica, la densidad de energía o la rapidez de carga. Los resultados obtenidos se comparan con los objetivos a largo plazo del *USABC*, con el fin de validar la viabilidad de esta tecnología para su uso en *EVs*. De los resultados obtenidos se concluye que para los diversos modelos, tanto la densidad de energía como el precio final, están aún alejados de los objetivos *USABC*. Por tanto, la reducción de peso de las baterías y de su coste son las principales vías de mejora para conseguir aumentar el interés del consumidor en la comercialización de los *EVs*. Según el autor, actualmente hay seis tecnologías de batería de uso común en *EVs*: *Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide Battery - Batería de Óxido de Litio Níquel Cobalto Aluminio (NCA)*, *Lithium Cobalt Oxide Battery - Batería de Óxido de Litio Cobalto (LCO)*, *Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide Battery - Batería de Óxido de Litio Níquel Manganese*

Cobalto (NMC), Lithium Manganese Oxide Battery - Batería de Óxido de Litio Manganeso (LMO), Lithium Titanate Battery - Batería de Titanato de Litio (LTO) y LiFePo4. Si se comparan desde el punto de vista de los parámetros más significativos para su aplicación en EVs, como son, coste, densidad de energía, seguridad, prestaciones y potencia, todas cuentan con ventajas e inconvenientes en su uso, sin que ninguna de las tecnologías sobresalga de las demás. Sin embargo, las baterías LiFePo4 han ganado popularidad entre los fabricantes de automóviles y los centros de investigación y desarrollo ya que sus características las hacen adecuadas para su uso en EVs: seguridad intrínseca, estabilidad térmica, menor toxicidad medioambiental, larga duración, fiabilidad, disponibilidad de materia prima, bajo coste y curva de tensión muy plana. Su mayor inconveniente sin embargo es su baja densidad de energía.

En los trabajos de [22] y [102] se proponen, en el primer caso, un algoritmo para la estimación del State Of Health - Estado de Salud (SOH) de las baterías LiFePo4, basado en las diferencias de tensión en bornes de las curvas de descarga, y en el segundo, se demuestra cómo el método de medidas Open-Circuit Voltage - Voltaje a Circuito Abierto (OCV) incrementales es más adecuado para la aproximación del perfil del OCV de la batería en función de la carga, que el método de carga/descarga a baja intensidad. Ambos autores hacen referencia en sus estudios al comportamiento particular de la curva de carga/descarga de las baterías LiFePo4. Este comportamiento particular responde a la aparición de dos zonas de tensión extremadamente planas en sus curvas de tensión-capacidad coincidiendo con los valores de 30-60% y 80-90% de su State Of Charge - Estado de Carga (SOC) y que son debidas a los cambios de fase. Este especial comportamiento no es adecuadamente simulado por los distintos modelos de batería propuestos en la literatura consultada.

En [123] se presenta un modelo dinámico genérico de carga/descarga de baterías basado en un circuito eléctrico, que se puede parametrizar mediante datos experimentales para cuatro diferentes tecnologías de batería (LA, Li-Ion, Nickel Metal Hydride Battery - Batería de Níquel Metal-Hidruro (NiMH) y Nickel Cadmium Battery - Batería de Níquel Cadmio (NiCd)). En [47] se presenta un ejemplo de implementación mediante Object-Oriented Modeling - Modelado Orientado a Objetos (OOM) para el caso específico de una batería del tipo LA, basado en el modelo propuesto en [123] aunque con algunas simplificaciones. Se estructura el modelo como una Finite State Machine - Máquina de Estado Finito (FSM) compuesta por diferentes estados (carga, sobrecarga, saturación, descarga, sobredescarga y descarga plena) y transiciones entre éstos y se implementa en el lenguaje de modelado Modelica®. En [10] se propone un modelo genérico basado también en [123] para el caso de baterías LA y Li-Ion, donde se describe el procedimiento de extracción de parámetros del modelo a partir de los datos experimentales de la batería y establece las limitaciones del modelo. En [24] se propone un modelo genérico, también basado en [123], para el caso específico de baterías Lithium ion Polymer battery - Batería de Polímero de iones de Litio (LiPo).

En [48] se presenta un modelo de batería Li-Ion desarrollado a partir del modelo de circuito eléctrico equivalente planteado en la literatura anterior. Se muestra un método práctico para la evaluación de los parámetros del circuito eléctrico equivalente a partir de pulsos de descarga experimentales. Con estos valores experimentales se confeccionan unas tablas de consulta con la temperatura de celda y el SOC como variables independientes.

En [129], se propone un nuevo método para el modelado matemático de un PhotoVoltaic Panel - Panel Fotovoltaico (PVP). El propósito del método es la determinación de los parámetros de una ecuación matemática no-lineal intensidad-tensión, ajustando la curva resultante en tres puntos característicos del panel PVP: la tensión máxima a circuito abierto, el punto de máxima potencia y la intensidad máxima en corto-circuito. Dados estos tres valores, así como la tensión e intensidad en el punto de máxima potencia, el coeficiente de intensidad/temperatura y el coeficiente de tensión/temperatura, que están disponibles en la hoja de características de cualquier PVP comercial, el método propuesto encuentra la

ecuación matemática intensidad-tensión para el modelo de simple diodo, que se ajusta adecuadamente a la curva experimental, incluyendo el efecto de las resistencias en serie-paralelo del panel, sin necesidad de estimar ningún otro parámetro excepto la constante del diodo α , y con la garantía de que el valor de máxima potencia coincide con el del PVP real. Una vez obtenida la ecuación con sus parámetros de ajuste, es posible construir un modelo del panel PVP con ayuda de cualquier simulador de circuitos. El método de modelado y el modelo de circuito propuestos son útiles en el diseño de componentes de electrónica de potencia que necesitan de un método de modelado simple, rápido, preciso y fácil de usar para la simulación de sistemas fotovoltaicos.

En lo relativo a los sistemas de control de potencia de los distintos elementos conectados al bus de energía del vehículo, el presente trabajo se centra en los convertidores de tensión Corriente Continua (CC)-CC conmutados Pulse Width Modulation - Modulación del Ancho de Pulso (PWM), profusamente utilizados en décadas recientes en aplicaciones en las que se necesita un amplio espectro de potencia de salida. Estos convertidores son especialmente ventajosos debido a su reducido número de componentes, su alta eficiencia, frecuencia de operación constante, control relativamente simple y elevadas relaciones de conversión de tensión, tanto en convertidores elevadores como reductores de tensión. Su principal desventaja recae en las pérdidas de rendimiento asociadas con la conmutación, que limitan la frecuencia máxima a la que el convertidor puede operar. La importancia de estos componentes en el diseño y operación de los EVs reside en el hecho de que la mayoría de los componentes que consumen o generan energía en el vehículo, se conectan al bus de energía mediante un convertidor de tensión, que es el encargado de la gestión de este intercambio de energía.

En [39], se nos muestra como las prestaciones de los vehículos FCHEV están relacionadas con la eficiencia de la electrónica de potencia y su controlador asociado. Se hace una revisión del estado de desarrollo de la FCELL, batería, ultracapacitor y Flywheel Energy Storage - Almacenamiento de Energía por Volante de Inercia (FES), así como de las distintas topologías de convertidores de tensión utilizadas en los FCHEVs. Se presentan las ventajas e inconvenientes de cada una de las topologías de etapa de potencia y técnicas de control descritas. Finalmente presenta el estado de desarrollo actual de los vehículos FCHEV, así como sus perspectivas y desafíos futuros.

En [36] se describen las configuraciones más comunes de convertidores conmutados CC-CC y presenta sus respectivas ecuaciones características, que pueden ser usadas para la determinación de sus componentes. Especialmente interesantes son el convertidor básico (convertidor reductor/elevador no aislado) y el convertidor Flyback (convertidor reductor/elevador aislado en modo mono y bidireccional). En [30] se presenta el uso de convertidores con dos interruptores independientes, que permite reducir el estrés en sus componentes en comparación con su equivalente de simple interruptor, ya se trate de su versión reductor, elevador o reductor/elevador.

En [28] se comparan dos configuraciones diferentes de convertidor bidireccional (reductor/elevador bidireccional y reductor/elevador bidireccional en cascada). El estudio concluye que la que topología en cascada reduce el estrés térmico y eléctrico de sus componentes; además, su mayor número de componentes queda compensado con el hecho de necesitar de un condensador y una bobina más pequeños. El convertidor reductor/elevador bidireccional no aislado se propone también en trabajos como el de [68], que presenta un convertidor reductor/elevador bidireccional no aislado con tres conmutadores y conexión en cascada para la gestión energética de baterías en sistemas de suministro ininterrumpido de energía.

En [111] se propone un convertidor unidireccional reductor/elevador para su uso en sistemas de gestión de baterías en instalaciones solares fotovoltaica. En [73] se propone un convertidor bidireccional reductor/elevador de cuatro cuadrantes para uso específico en EVs, [71] propone un convertidor unidireccional reductor/elevador para uso en EVs alimentados mediante FCELL y en [15] se presenta una configuración similar, unidireccional, para su uso

como [Maximum Power Point Track - Seguimiento del Punto de Máxima Potencia \(MPPT\)](#) en una planta solar fotovoltaica. En [\[107\]](#) se presenta una comparativa de varias configuraciones de convertidor [CC-CC](#) bidireccional no aislado para su uso en [HEVs](#).

A lo largo del presente trabajo se propone una versión simplificada del convertidor [CC-CC](#) reductor/elevador no aislado a la que se denomina [Non-isolated Half-Bridge Bidireccional DC-DC Converter - Convertidor Bidireccional CC-CC de Medio Puente No Aislado \(NHBBC\)](#), que posee todas las ventajas del convertidor en cascada y a las que se añade además el disponer de un menor número de componentes. Esta configuración de convertidor es la que mejor se adapta a las aplicaciones en las que no es necesaria la conmutación entre los modos reductor y elevador en un determinado sentido del flujo de corriente, es decir, funciona solo como reductor de tensión en un sentido y solo como elevador en el inverso. Esta topología de convertidor es la usada en los trabajos de [\[79\]](#) y [\[78\]](#) para aplicaciones similares.

Por último, también podemos encontrar una extensa bibliografía relativa a la integración de los [EVs](#) en la red de distribución de energía, o soluciones paralelas para la captación y acumulación de energía renovable para su uso en este tipo de vehículos.

En [\[38\]](#) se hace una revisión de la situación actual del mercado de vehículos [EV](#), normas sobre carga e interconexión, redes de carga y el impacto en la red de la carga de estos vehículos. Analiza diferentes configuraciones estructurales de red en términos de control y comunicaciones. Presenta una evaluación sobre el impacto del desarrollo futuro de vehículos [EV](#) (ej.: vehículos conectados, conducción autónoma, movilidad compartida, etc.) desde el punto de vista de su integración en la red. Asimismo presenta cómo el desarrollo de la red avanza hacia el futuro “internet de la energía” y cómo los vehículos [EV](#) pueden afectar y beneficiar el desarrollo de este concepto. Finalmente se resumen los retos y sugerencias para el futuro desarrollo e integración de las redes de distribución y carga.

En [\[26\]](#) se presenta un nuevo esquema de movilidad sostenible basado en vehículos [EV](#), energía fotovoltaica y sistemas de almacenamiento de energía eléctrica. Hace un análisis del sistema propuesto, poniendo en evidencia sus ventajas respecto al sistema convencional basado en la conexión directa de los vehículos a la red eléctrica. Presenta dos casos de estudio: la flota de taxis del centro de Nápoles y las furgonetas de reparto de la ciudad de Salerno, ambas en el sur de Italia. Para cada caso se hace una estimación del consumo de potencia horario de los vehículos, basado en la distancia recorrida por día y se implementa un procedimiento preciso para la determinación de la ubicación más conveniente para la instalación de las estaciones de carga, huertos solares y sistemas de almacenamiento de energía. También se lleva a cabo una comparación entre dos tecnologías de almacenamiento de energía: baterías [LA](#) y [Li-Ion](#). Los casos de estudio se analizan mediante un modelo dinámico con ayuda del programa de simulación TRNSYS [\[125\]](#). Finalmente se lleva a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de los principales parámetros de diseño y operación (área del huerto solar, capacidad de almacenamiento del sistema, etc.) sobre la prestación general del sistema propuesto.

En [\[118\]](#) se analiza el impacto de los sistemas fotovoltaicos en las micro-redes de almacenamiento de energía compuestas por vehículos eléctricos y baterías de acumulación. Se propone una nueva estrategia de control orientada a la gestión de este tipo de micro-redes. El corazón de esta estrategia es un control basado en reglas que gestiona el flujo de potencia entre la micro-red y sus baterías de acumulación, tanto del panel fotovoltaico como del vehículo eléctrico. Los resultados obtenidos demuestran los beneficios del uso del vehículo eléctrico como un agente activo en el balance de energía que permite la reducción de los costes energéticos de una micro-red de energía.

A pesar de la numerosa bibliografía encontrada sobre el tema relacionado, en la mayoría de los casos los estudios se basan en modelos muy orientados a un determinado área de conocimiento, como puede ser la electrónica de potencia, los sistemas de control, los sistemas

de transmisión del vehículo, la tecnología de almacenamiento, las tecnologías fotovoltaicas, etc. Se echa en falta por parte del autor una aproximación más multidisciplinar al problema del modelado del sistema completo del vehículo.

En el presente trabajo se aborda esta nueva aproximación, que permite la evaluación de las actuaciones del vehículo en su conjunto y la de todos sus componentes, atendiendo a la interacción entre los mismos; asimismo, permite analizar el impacto en estas actuaciones de las diferentes concepciones y configuraciones propuestas del vehículo, ya sean desde el punto de vista estructural, del sistema de transmisión, aerodinámico, de los sistemas de control y gestión, de la electrónica de potencia elegida, de la integración de nuevos sistemas de generación de energía renovable, etc.

Capítulo 3

Materiales y Métodos

En este capítulo se presentan las aplicaciones, librerías, equipamientos e instalaciones utilizados para el desarrollo del presente trabajo de tesis. Se deja para su tratamiento en un capítulo aparte la librería [VLDV](#), que ha sido especialmente desarrollada para el propósito del presente trabajo.

3.1. Modelica[®]

Modelica[®] [62] [126] [115] es un lenguaje orientado a objetos para el modelado de grandes sistemas, complejos y heterogéneos. El lenguaje de modelado Modelica[®] es una descripción textual que sirve para definir todas las partes de un modelo y estructurar todos sus componentes en librerías, llamadas paquetes. Está particularmente adaptado para el modelado en múltiples dominios, como por ejemplo: modelos mecatrónicos en robótica; aplicaciones en automoción, aeronáutica y espacio que integran subsistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos, termo-fluidos, y de máquinas de estados; aplicaciones orientadas a proceso; aplicaciones orientadas a la generación y distribución de energía eléctrica, etc. Los modelos en Modelica[®] se describen matemáticamente mediante ecuaciones diferenciales, algebraicas y discretas de forma general, sin tener en cuenta la causalidad concreta del problema, es decir, son acausales. Ha sido diseñado de tal forma que dispone de algoritmos especializados, capaces manejar de forma eficiente sistemas complejos con más de cien mil ecuaciones. Está especialmente adaptado y es usado frecuentemente para simulaciones HIL [37] [112].

Un diagrama consiste en una serie de componentes conectados, como por ejemplo los elementos de un circuito eléctrico. Los componentes disponen de puertos (conectores) que describen el interfaz de interacción con otros componentes, como por ejemplo un conector eléctrico o una brida de conexión mecánica. Estableciendo conexiones entre los distintos conectores compatibles de los componentes, se construye el diagrama de bloques del sistema físico a modelizar. Internamente, cada componente se define también mediante un diagrama o a más bajo nivel mediante una descripción basada en ecuaciones con la sintaxis del lenguaje Modelica[®].

El lenguaje Modelica[®] está disponible de forma gratuita y está desarrollado por la Modelica Association (MA), una organización no gubernamental sin ánimo de lucro con sede en Linköping, Suecia, cuyo objetivo es el desarrollo y promoción del lenguaje Modelica[®] para el modelado, simulación y programación de sistemas y procesos físicos y técnicos. Posee los derechos sobre el lenguaje de modelado Modelica[®], las especificaciones del lenguaje, las Modelica Standard Library (MSL), etc., que están disponibles para la promoción de la investigación y desarrollo industriales [115].

La industria automovilística y energética, entre otras, está usando el lenguaje de modelado Modelica[®] y las MSL para el desarrollo basado en modelos y el diseño de vehículos eficientes, sistemas de aire mejorados, etc. Existen un variado número de entornos de simulación para Modelica[®], tanto gratuitos (OpenModelica) como comerciales (Dynamic Modeling Laboratory (Dymola[®]), MapleSim, Wolfram SystemModeler, etc.)

Existe una gran variedad de librerías para Modelica, entre las que podemos encontrar:

- Librerías desarrolladas por la MA y que cumplen completamente con las especificaciones de Modelica[®] [91].
- Otras librerías desarrolladas por la MA.
- Librerías gratuitas suministradas por usuarios de Modelica[®].
- Librerías comerciales

Pueden encontrarse librerías de Modelica[®] para diversos sectores tecnológicos:

- Librerías de componentes eléctricos, electrónicos y magnéticos.
- Librerías de componentes mecánicos.
- Librerías para componentes de fluidos y térmicos.

- Librerías para sistemas de control.
- Etc.

De entre las librerías desarrolladas por la [MA](#) que cumplen con las especificaciones de [Modelica®](#) [91], las utilizadas para el presente trabajo han sido:

- La librería estándar de Modelica, [MSL](#).
- La librería [Vehicle Interfaces Library - The Modelica Association](#) (VI).

3.2. Modelica Standard Library

Para el presente trabajo se ha utilizado la [MSL](#) versión 3.2.3 [91]. Esta versión en particular dispone de una gran número de modelos en múltiples dominios: mecánica(1D/3D), electricidad(analógica, digital, máquinas eléctricas), magnetismo, termodinámica, fluidos, sistemas de control, máquinas de estado jerarquizadas, así como funciones numéricas y funciones adicionales para manejo de entrada/salida de datos. Para dar una idea de su amplitud, esta versión dispone de:

- 1288 modelos de componentes y bloques.
- 404 modelos de ejemplo.
- 1227 funciones.

Todos estos modelos y funciones se pueden usar directamente, cumplen completamente con la especificación de Modelica versión 3.2 Revisión 2 y han sido probados en diferentes entornos de simulación gratuitos y comerciales. Se distribuye bajo Licencia BSD modificada (de 3 cláusulas) por la [MA](#).

Dentro de la [MSL](#), han sido utilizados en el presente trabajo los siguientes paquetes:

- [Modelica.Blocks](#)(Continuous, Discrete, Interfaces, Logical, Math, sources, Tables, Types, Icons)
- [Modelica.Electrical](#)(Analog)
- [Modelica.Mechanics](#)(Multibody, Rotational, Translational)
- [Modelica.Math](#)
- [Modelica.Constants](#)
- [Modelica.Icons](#)
- [Modelica.SIunits](#)

Es de destacar que uno de los aspectos más importantes de esta librería radica en la posibilidad de poder concebir modelos multifísicos en los que se combinan componentes eléctricos, electrónicos, mecánicos 1D y 3D, electroquímicos, termofluidos, etc.

3.2.1. Modelica.Mechanics

Por su frecuente uso en el desarrollo de esta tesis, se presenta una exposición más detallada del paquete de componentes mecánicos de la librería **MSL**. En este paquete se contienen los componentes necesarios para el modelado del movimiento de sistemas mecánicos unidimensionales y tridimensionales. Todos los componentes de este paquete que pueden disipar energía disponen de un conector opcional **heatPort** a través del cual la energía disipada fluye en forma de calor. La potencia disipada está disponible mediante la variable *lossPower*.

Paquete Rotational El paquete **Modelica.Mechanics.Rotational** contiene los componentes necesarios para el modelado del movimiento rotacional unidimensional de sistemas de transmisión por rotación con pérdidas por fricción. Incluye cajas reductoras, ejes con inercia, pares externos, elementos muelle/amortiguador, elementos friccionales y de holgura, elementos para la medida del ángulo, la velocidad y aceleración angulares y par transmitido por la brida de acoplamiento. En la figura 3.1 se puede ver el ejemplo de un diagrama con elementos del paquete **Rotational**.

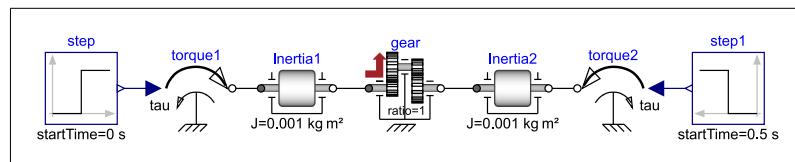


Figura 3.1

Diagrama del ejemplo **LossyGearDemo3** de la librería **Rotational**.

Paquete Translational El paquete **Modelica.Mechanics.Translational** contiene los componentes necesarios para el modelado del movimiento de traslación unidimensional de sistemas con pérdidas por fricción. Incluye masas, fuerzas externas, elementos muelle/amortiguador, elementos friccionales y del holgura elástica, elementos para la medida de la posición, la velocidad y aceleración lineales y fuerza transmitida por la brida de acoplamiento. En la figura 3.2 se puede ver el ejemplo de un diagrama con elementos del paquete **Translational**.

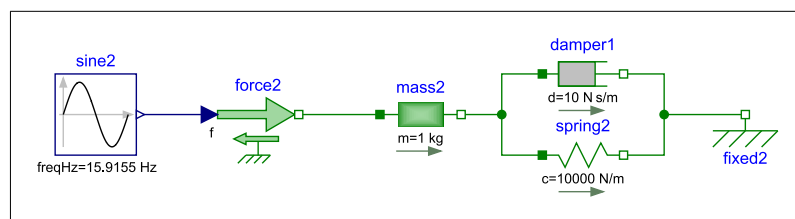


Figura 3.2

Diagrama del ejemplo **Oscillator** de la librería **Translational**.

Paquete Multibody El paquete **Modelica.Mechanics.Multibody** [99], contiene componentes mecánicos tridimensionales que permiten el modelado espacial de sistemas mecánicos complejos como robots, mecanismos tridimensionales, vehículos, etc. Una característica básica de **Multibody** es que todos sus componentes disponen de información de animación (tamaño y color), de tal forma que elementos como el sistema de coordenadas, el vector de aceleración gravitacional, los acoplamientos rotativos y los cuerpos, se visualizan en la

animación, lo que permite una verificación visual de que el modelo está correctamente construido; esta característica se puede desactivar para permitir una simulación más rápida del modelo. Las principales características de esta librería son:

- Dispone de más de 60 componentes incluyendo juntas (giratorias, esféricas y deslizantes), fuerzas, cuerpos (con masa, forma y tensor de inercia) y formas (con información de visualización 3D). Permite la aplicación de fuerzas y pares unidimensionales de los paquetes `Rotational` y `Translational` a través de componentes de interfaz (bridas) con el paquete `Multibody`.
- Dispone de más de 75 funciones para operaciones de orientación (rotación y traslación) sobre los sistemas de referencia.
- En cada modelo debe estar presente el componente `Mechanics.MultiBody.World` que define el tipo de campo gravitatorio que afecta al modelo.
- Los componentes se pueden interconectar con cierta arbitrariedad para facilitar la composición de modelos mecánicos en tres dimensiones, ya que dispone de un manejo automático de los bucles cinemáticos sin pérdida de la eficiencia en la simulación. Las ecuaciones no-lineales que puedan aparecer en parte de los bucles cinemáticos se resuelven de forma analítica, lo que resulta de especial importancia en la simulaciones en tiempo real.
- Permite añadir características de masa a componentes que aplican fuerzas lineales unidimensionales (ej.: `LineForceWithMass`)

En la figura 3.3a se puede ver el ejemplo de un diagrama con elementos del paquete `Multibody` y en la figura 3.3b la animación del sistema en el instante de simulación 0.5 s.

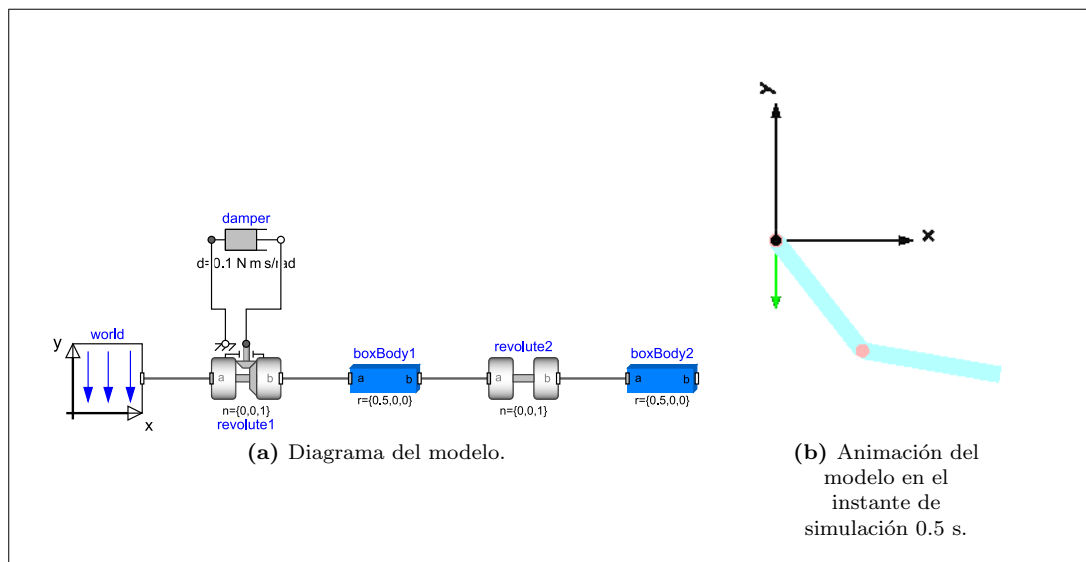


Figura 3.3

Modelo del ejemplo `DoublePendulum` de la librería `Mechanics.MultiBody`

3.3. Librería `Vehicle Interfaces`

La librería `VI` [44],[90] de la `MA` proporciona la definición de los interfaces normalizados y las arquitecturas para el modelado de vehículos y sus subsistemas. Estos interfaces han sido

desarrollados con el ánimo de promover la compatibilidad entre las distintas librerías para el sector del automóvil y proporcionar una estructura potente y flexible para el modelado de vehículos. Su principal objetivo es del de definir los interfaces necesarios para los subsistemas componentes del vehículo, además de incluir numerosos ejemplos de vehículos para facilitar su aprendizaje.

Para que una librería de automoción sea compatible con otras librerías basadas en las definiciones de interfaz de VI, es imprescindible que sus interfaces hereden (extiendan) la definición de interfaces de VI y cumplan con las normas de nomenclatura del bus de señales de control (*control signal bus*) y del bus de interacción con el conductor (*driver interaction bus*) en el caso de ser utilizados. También contiene una propuesta de nomenclatura para el conjunto de los modelos de la librería, que facilita disponer de un criterio común para las distintas librerías desarrolladas para el sector del automóvil.

Para el propósito de este trabajo se ha utilizado la versión 1.2.5 de la VI. En la figura 3.4 se puede ver uno de los ejemplos de la librería.

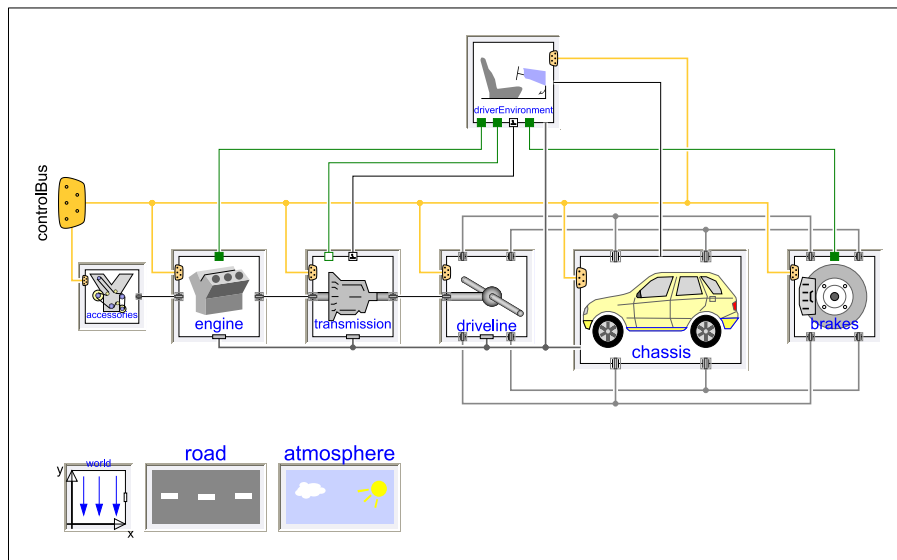


Figura 3.4

Diagrama del modelo de ejemplo `ConventionalManualVehicle` de la librería `VehicleInterfaces`

De entre las múltiples definiciones de interface de la librería VI, se deben destacar por su importancia para el presente trabajo las siguientes:

Estructura del Bus de Control - *Control Bus Structure* La estructura del bus de control se basa en la utilización de conectores expandibles, lo que proporciona un concepto flexible de bus. Permite añadir de forma simple nuevas señales al bus de control, que pueden ser compartidas por todos los elementos del modelo conectadas al interface del bus. La estructura del bus de control se implementa de una forma jerarquizada que permite localizar de forma simple las señales asociadas a los distintos subsistemas. Con este principio, como ejemplo, las señales captadas en el sistema de transmisión se ubican en un sub-bus denominado `transmissionBus` y las señales emitidas desde los bloques de control como el controlador de la transmisión, están ubicadas en un sub-bus denominado `transmissionControlBus`. Se ha definido un conjunto básico de señales a incluir en las definiciones para asegurar la compatibilidad de las distintas librerías en desarrollo basadas en VI.

Conector de buje de rueda - *WheelHub_n* Los conectores de buje de rueda *wheelHub_n* de VI están basados en el nuevo componente de interfaz *FlangeWithBearing* que podemos encontrar en el paquete `Mechanics.MultiBody.Interfaces` de [Modelica®](#). Este conector se compone del conector 1D (*Flange_a*) del paquete `Modelica.Mechanics.Rotational.Interfaces` que permite conectar componentes del paquete `Modelica.Mechanics.Rotational` y un conector opcional 3D (*Frame*) del paquete `Modelica.Mechanics.MultiBody.Interfaces` que permite definir un soporte para el elemento rotatorio y conectar elementos del paquete `Modelica.Mechanics.MultiBody`. Este conector de `MultiBody` puede ser activado/desactivado mediante un parámetro durante la definición del conector en el modelo. En el caso de subsistemas definidos mediante VI, el valor de este parámetro puede ser definido mediante un solo parámetro (*includeWheelBearings*) que se propaga a través de los componentes del subsistema.

3.4. Dymola®

[Dymola®](#) [43] [40] [41] es una herramienta para el modelado y la simulación basada en componentes, que utiliza nuevas técnicas específicamente orientadas al modelado multifísico de sistemas complejos, para su uso en diversas áreas de investigación e industria: automoción, aeronáutica, robótica, industria de procesos, industria energética, etc. Los modelos pueden estar integrados por componentes de muy diversas áreas, incluyendo mecánica, electricidad, electrónica, hidráulica, neumática, fluidos, termodinámica, control, etc.

Los componentes en [Dymola®](#) se definen mediante el lenguaje de modelado [Modelica®](#) presentado anteriormente en 3.1. [Dymola®](#) proporciona un interface completamente abierto al lenguaje de modelado [Modelica®](#), lo que proporciona al usuario la posibilidad de definir sus propios componentes. Permite el uso de la gran cantidad de librerías desarrolladas para [Modelica®](#), así como de librerías propias específicamente desarrolladas para las distintas áreas técnicas de aplicación.

Además de las características descritas anteriormente, [Dymola®](#) resulta una herramienta de modelado y simulación especialmente interesante para la investigación y desarrollo en la industria por las siguientes características:

- Modelado intuitivo. Dispone de un editor gráfico y de librerías que permiten crear modelos arrastrando y soltando los componentes en el interfaz, así como definir las conexiones entre componentes a través de los conectores.
- Abierto y flexible. El entorno de modelado y simulación es completamente abierto, lo que permite al usuario definir nuevos componentes que se adaptan específicamente a su necesidad. Se pueden definir nuevos componentes bien desde el principio o basándose en definiciones de interfaz, plantillas o componentes existentes. Su estructura abierta y flexible lo convierte en una herramienta idónea para la simulación de nuevas alternativas de diseño o tecnológicas.
- Interoperatividad. Dispone de numerosas herramientas para la integración de modelos en otras plataformas. Soporta el estándar [Functional Mock-up Interface](#), tiene la posibilidad de generar ficheros script en Python y dispone de interfaz con Simulink, entre otros.
- Manipulación simbólica. Elevadas prestaciones y robustez en el manejo de ecuaciones diferenciales algebraicas debido a la manipulación simbólica que permite además resolver los bucles algebraicos y reducir los grados de libertad generados por las restricciones. Estas técnicas, junto a los solucionadores numéricos especiales de que dispone, permiten simulaciones [HIL](#) en tiempo real.

3.5. Librería Design.Calibration

Se trata de una librería suministrada con la herramienta [Dymola®](#), desarrollada para la calibración de modelos implementados en [Modelica®](#) mediante técnicas de optimización multicriterio con restricciones. Esta librería facilita la calibración de modelos mediante una interfaz de usuario interactiva desde [Dymola®](#), a partir de los datos experimentales. Más información sobre las técnicas aplicadas en esta librería se puede encontrar en [52] [97], así como en el manual de la herramienta [40] [41].

3.6. LTSpice XVII®

[LTSpice XVII®](#) [17] es un programa para la simulación eficiente de circuitos electrónicos analógicos y digitales. Está basado en el clásico lenguaje de simulación de circuitos electrónicos [Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis - Programa de Simulación con Énfasis en Circuitos Integrados \(SPICE\)](#) [50] [94] [93] y básicamente se trata de una interfaz gráfica que permite la composición de los modelos de circuito, su simulación, la visualización en tiempo real de las señales y el registro de resultados. Ha sido desarrollado por la empresa Analog Devices, Inc. (Norwood, Massachusetts, EEUU), y está disponible para su descarga y uso gratuitos. Dispone de una importante librería de componentes y ejemplos de aplicación. Además, la mayoría de los fabricantes de componentes disponen de modelos en [SPICE](#) de sus componentes.

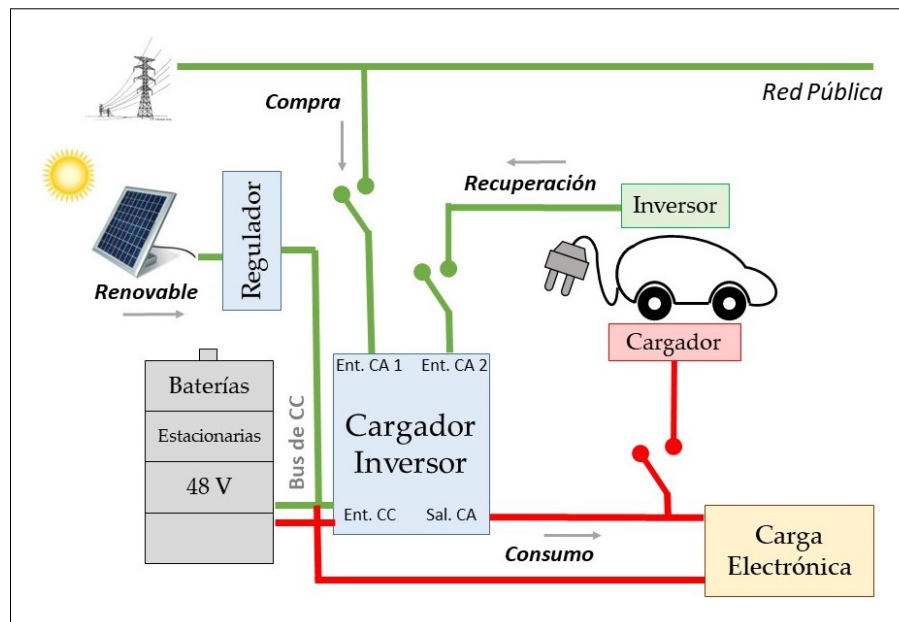
3.7. ScanIt

[ScanIt](#) [127] es un programa de uso gratuito, diseñado para la extracción de datos numéricos a partir de gráficos científicos. Ha sido desarrollado por la compañía Amsterchem (Almería, España), una consultoría independiente especializada en la simulación y modelado de procesos químicos y en el desarrollo de aplicaciones en el estándar [CAPE-OPEN](#).

3.8. Micro-red CIESOL

La micro-red utilizada para realizar experimentos está instalada en el Centro Mixto [CIESOL](#), en la [Universidad de Almería - España \(UAL\)](#) y su esquema se puede observar en la figura 3.5. Está compuesta de cuatro [PVPs](#) de 260 W de potencia nominal cada uno, conectados a un convertidor [CC-CC](#) que implementa un algoritmo [MPPT](#), entregando la potencia en forma de [CC](#) al bus [Direct Current Link - Bus de Conexión de Corriente Continua \(DC-Link\)](#). La micro-red dispone de un regulador/inversor *Quattro* de *Victron Energy* (Cargador Inversor) que controla el estado de carga de las baterías e intercambia energía eléctrica con la red de [Corriente Alterna \(CA\)](#), aportando electricidad a las cargas que se alimentan con [CA](#). El [BEV](#) que aparece en las figuras 3.5 y 3.6 puede proveer o consumir energía de la micro-red de acuerdo con una estrategia de control determinada [118].

El bloque de baterías utilizado es del modelo U3A1-50P-A, B-Box 5.0, del tipo [LiFePo4](#), con tensión nominal de salida de 51.2 Vcc y capacidad nominal de 100 Ah de *BYD Company Limited*. La batería U3A1-50P-A está compuesta por 32 celdas tipo C20 de 3.2 V - 25 Ah, conectadas en serie (S)-paralelo (P) (8S-2P-2S) [124]. El bloque de baterías B-BOX5.0 está compuesto de 2 baterías U3A1-50P-A conectadas en paralelo.

**Figura 3.5**

Esquema de la micro-red CIESOL utilizada como banco de ensayos.

3.9. eCARM

El UAL-eCARM, ver figura 3.6, es un BEV experimental utilizado con fines de investigación en automática, control y validación de modelos en la UAL [83], [14], [120], [66], [119], [65], [121].

**Figura 3.6**

Vehículo eléctrico experimental eCARM de la UAL.

Se ha partido de un BEV comercial de la marca *Changzhou Greenland Vehicle Co. Ltd.*, modelo LITA GLe2-2S [1] de 2 plazas. El modelo original es de conducción manual, con un nivel de automatización 0 según [46], [103]. El Grupo de investigación de Automática, Robótica y Mecatrónica de la Universidad de Almería - España (ARM) ha llevado a cabo sobre el vehículo diversas modificaciones tendentes a aumentar su nivel de automatización, evaluar el impacto del uso de energías renovables y su integración en la micro-red CIESOL, vista en la sección 3.8. Por ejemplo, en [83] se presenta el trabajo llevado a cabo para la automatización de los sistemas de dirección, aceleración y frenado. En [70], se presenta el trabajo realizado para el equipamiento del vehículo con un PVP.

En la tabla 3.1, se tienen los principales datos técnicos del vehículo en Octubre-2017:

Tabla 3.1
Principales datos técnicos del vehículo UAL-eCARM

Dato	Valor	Unidades
Longitud	2.680	m
Anchura	1.510	m
Altura	1.780 (sin carga)	m
Batalla	1.830	m
Vía delantera	1.285	m
Vía trasera	1.260	m
Altura libre al suelo	0.150	m
Tensión de alimentación	48	V
Baterías	LA Trojan 6V-198AH-GEL (8uds)	
Motor tracción CC	XQ-4.3 (4.3kW)	
Neumáticos	165/70 R 13	
Masa en vacío	460	kg
MMA	950	kg
Área frontal	2.23 [120]	m ²

Capítulo 4

Librería VLDV

Este es un capítulo dedicado exclusivamente a presentar la librería **VLDV**. Se trata de una librería de componentes basada en **Modelica**[®] y **VI**, que ha sido desarrollada específicamente para cumplir el objetivo del presente trabajo de tesis. Esta ha sido necesaria para poder disponer de los interfaces y modelos de componentes específicos útiles para el modelado de **LDVs**, dentro del grado de abstracción y detalle requeridos, añadiendo aquellos componentes no disponibles en la librerías **MSL** y **VI** dentro del ámbito de uso de las energías renovables y gestión energética. Se distinguen dos grandes subcapítulos, las clases base, que incluyen los interfaces, bloques funcionales y modelos parciales y los componentes, que son modelos parametrizados de un determinado componente, directamente utilizables en el modelado de los vehículos.

Es importante destacar que esta librería no solamente es utilizable para el modelado de **ULEV**, sino que es de aplicación para el modelado de cualquier tipo de vehículo, ya sea **ICE**, **BEV**, **HEV**, **PHEV**, **FCHEV**, etc. Asimismo, sus componentes pueden ser reutilizados para el modelado y simulación de sistemas de gestión de energía, instalaciones de energía renovable, etc.

Tal como se indicó en la introducción (1), para el modelado dinámico del vehículo es necesario disponer de modelos adecuados, tanto de cada uno de los componentes integrantes del vehículo como de las condiciones de contorno que afectan a la actuación del mismo. Una condición indispensable es que estos modelos se encuentren disponibles de una forma coherente y ordenada, que sean reutilizables, modulares y que dispongan del adecuado grado de abstracción al propósito para el que se desarrollan. Además de lo anterior, los modelos de un determinado componente deben ser intercambiables, de forma que se puedan aplicar diferentes soluciones tecnológicas o diferentes grados de abstracción a un mismo componente sin necesidad de alterar el modelo completo del vehículo.

Para abordar la solución a todos estos requisitos, y como resultado del trabajo presentado en [65], se ha desarrollado la librería **VLDV**. Está basada en la idea conceptual de la librería **VI** (3.3) [44] de **Modelica**[®] en la que se proponen los interfaces de cada uno de los componentes del vehículo, y se desarrolla la librería **VLDV**, añadiendo las clases base o interfaces correspondientes a los nuevos elementos no contemplados en **VI** y especializando los demás al uso específico de la misma para el modelado de vehículos **ULEV**. La librería **VLDV** contiene las clases base o interfaces, los componentes y los modelos completos que han sido necesarios para el desarrollo del presente trabajo.

Al objeto de poder mantener la compatibilidad de la presente librería con el resto de librerías automovilísticas basadas en el conjunto de definición de interfaces de **VI**, ha sido necesario heredar el interfaz de cada familia de componentes de la interfaz base de **VI** y respetar las convenciones establecidas para dar nombre al bus de señales de control (control signal bus) y al bus de interacción del conductor (driver interaction bus), en los casos de uso.

De forma general, la librería **VLDV** se ha estructurado en los siguientes paquetes: clases base, componentes y modelos, tal como se puede ver en la figura 4.1.

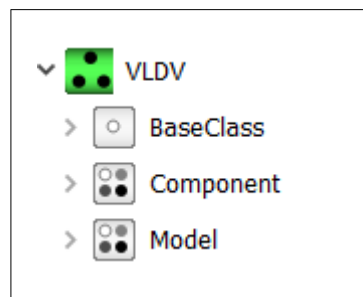


Figura 4.1

Estructura general de la librería **VLDV**.

En la tabla 4.1 se puede apreciar el contenido de la librería:

Tabla 4.1
Paquetes componentes de la librería **VLDV**.

Nombre	Descripción
BaseClass	Paquete de clases base de la librería VLDV
Component	Paquete de componentes de la librería VLDV
Model	Paquete de modelos completos simulables de la librería VLDV

En el presente documento se van a presentar algunas de las clases base y componentes de la librería **VLDV** de mayor relevancia para la mejor comprensión del comportamiento y resultados de los modelos completos. La presentación de los modelos completos simulables, junto con sus resultados, se realizará en el capítulo específico (5).

4.1. Clases Base

El paso inicial y básico en el desarrollo de la librería ha consistido en la definición de las clases base de las que se extenderán (heredarán) posteriormente los componentes. Se definen, tanto el interfaz de conexión con el resto de los elementos, como el comportamiento general del modelo.

En este paquete se han desarrollado las siguientes clases base, que se pueden apreciar en la figura 4.2:

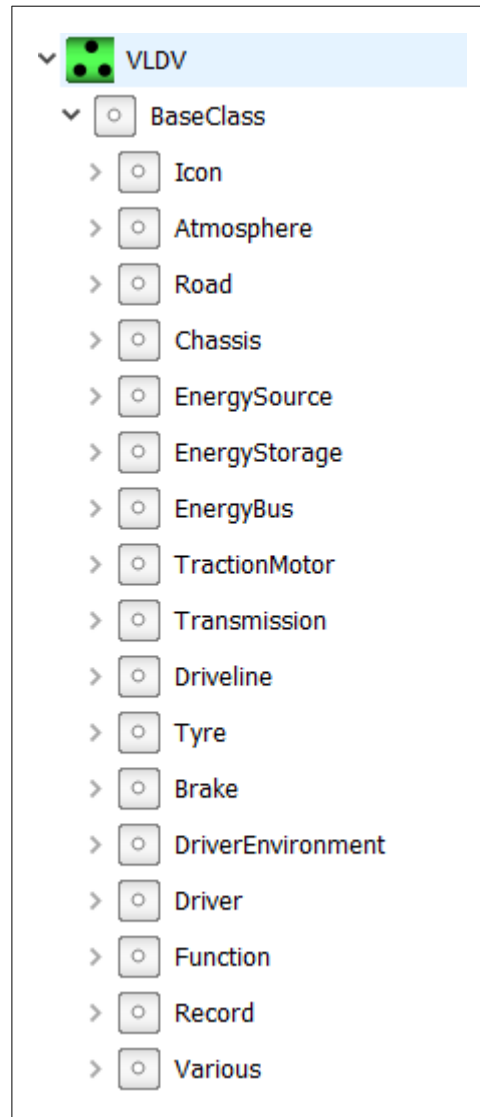


Figura 4.2
Clases base de la librería VLDV.

4.1.1. VLDV.BaseClass.Atmosphere

En este subpaquete se contienen las clases base que representan las condiciones climáticas y de entorno ambiental del vehículo. Están basadas en la capacidad de [Modelica®](#) de definir en un modelo variables globales que pueden ser accesibles por cualquier objeto perteneciente

al modelo (magnitudes físicas comunes como el vector de gravedad, temperatura ambiente, presión atmosférica, radiación solar, etc.).

La necesidad de definir esta nueva clase de atmósfera viene justificada por el hecho de que las clases base de VI no incluyen en su definición la radiación solar. Dado que la energía solar es una de las energías renovables que más interés tiene para el presente trabajo, es importante disponer de una nueva definición de atmósfera en la que se incluya la radiación solar. En la figura 4.3 se pueden ver las clases componentes.

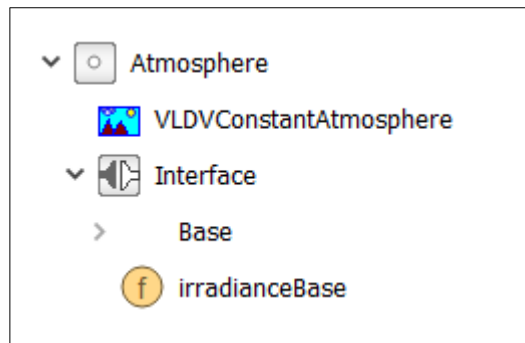


Figura 4.3
Clases base Atmosphere de la librería VLDV.

4.1.1.1. Atmosphere.Interface

En este subpaquete se contienen las clases base que definen los interfaces correspondientes a las condiciones ambientales de entorno del vehículo.

La clase `Atmosphere.Interface.Base` de VLDV es una clase extendida de la clase `Atmospheres.Interfaces.Base` de VI y especializada para añadir la función `Atmosphere.Interface.irradianceBase` de VLDV, que permite establecer el valor de la radiación solar (*Irradiance*) en cada punto de la atmósfera. En el listado B.1 se tiene el código en Modelica® de esta función, que establece una radiación constante.

4.1.1.2. Atmosphere.VLDVConstantAtmosphere

La clase base `Atmosphere.VLDVConstantAtmosphere` es una clase extendida de `Atmosphere.Interface.Base` (4.1.1.1), inicializada redeclarando las funciones que definen la densidad, temperatura, humedad y radiación solar para que estas sean constantes, independientemente de su posición en la atmósfera. Esta definición de atmósfera calcula el valor de la densidad del aire, ρ^1 , a partir de los valores de p , T_{amb} y R según la ecuación 4.1 [63].

$$\rho = 1.225 \cdot \frac{p}{101325} \cdot \frac{288.16}{273.16 + T} \quad (4.1)$$

Símbolo	Descripción
ρ	Densidad del aire $\frac{kg}{m^3}$
p	Presión atmosférica en Pa
T_{amb}	Temperatura ambiente en °C

Además, sus parámetros están inicializados con los siguientes valores:

- Temperatura ambiente = $T_{amb} = 25$ °C

¹ $\rho = 1.225 \frac{kg}{m^3}$ a la presión atmosférica de 101.325kPa y a 15 °C

- Presión atmosférica = $\mathbf{p} = 1.013$ bar
- Velocidad del aire = $\mathbf{v} = 0$ m/s
- Humedad ambiente = $\mathbf{h} = 50\%$
- Radiación solar = $\mathbf{G} = 1000 \frac{W}{m^2}$

En el listado B.2 se tiene el código en [Modelica®](#) de esta clase base.

4.1.2. VLDV.BaseClass.Chassis

En este subpaquete se han definido los interfaces correspondientes al subsistema del chasis del vehículo. Dentro de esta librería, el subsistema del chasis se utiliza para modelar el comportamiento relativo a la configuración de los ejes, las ruedas, la suspensión y cuerpo del vehículo.

La necesidad de definir esta nueva clase base viene justificada por el hecho de que en [VI](#) no se contempla una nomenclatura normalizada de la posición de las ruedas sobre el vehículo. En [VLDV](#) se incluye una nomenclatura normalizada que tiene en cuenta la posición de la rueda sobre el vehículo, es decir, si se trata eje delantero o trasero y el lado del vehículo. Se añaden dos nuevas definiciones para vehículos de 3 ruedas (con una o dos ruedas en eje delantero), no incluidos en las definiciones de [VI](#). Otra aportación de interés es la definición del modelo de resistencia al avance del vehículo que se hace en [4.1.2.2](#), que tiene en cuenta la resistencia aerodinámica y la resistencia a la rodadura. Resulta necesario además definir las clases base que contienen los conjuntos de parámetros específicos para las definiciones de chasis de la librería.

En la figura [4.4](#) se pueden ver las clases componentes.

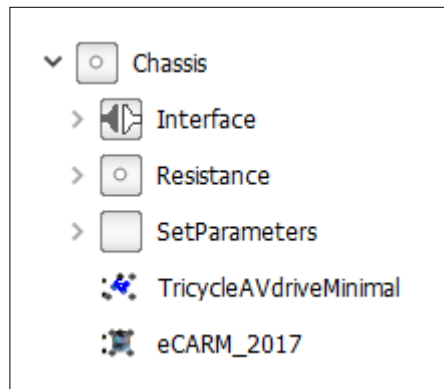


Figura 4.4
Clases base **Chassis** de la librería VLDV.

4.1.2.1. Chassis.Interface

En este subpaquete se han definido los interfaces de las distintas configuraciones de chasis que se han desarrollado en el presente trabajo. En la figura [4.5](#) se pueden ver las clases incluidas en el mismo, aunque a continuación solo se presentan las de particular interés para el presente trabajo.

Las clases base de este subpaquete contienen los siguientes conectores, algunos de los cuales son opcionales y han sido presentados en [3.3](#):

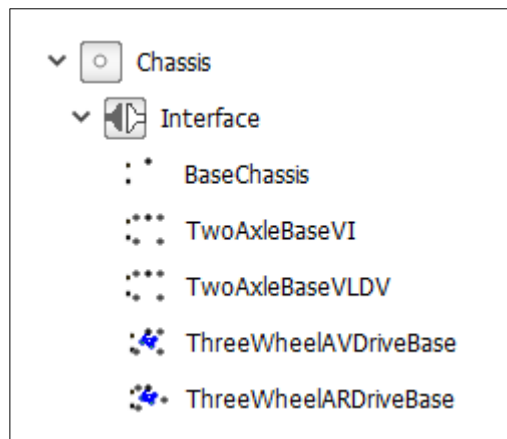


Figura 4.5

Clases base `Chassis.Interface` de la librería VLDV.

- `controlBus` Conexión al bus de señales de control.
- `wheelHub_n` Conectores del buje de rueda. Consiste en un conector rotacional 1D y un conector estructural Multibody. El número de estos conectores varía dependiendo del número de ruedas del vehículo.
- `steeringWheel` Conexión rotacional 1D para el accionamiento del volante (opcional).
- `chassisMount` Conexión Multibody, que materializa el punto de conexión con el cuerpo del vehículo.

Chassis.Interface.TwoAxleBaseVLDV Esta clase es una clase extendida de `Chassis.Interface.BaseChassis` de [VLDV](#), que incluye cuatro conectores `wheelHub_n` para una configuración de vehículo con dos ejes y cuatro ruedas, pero en la que, a diferencia de [VI](#), se ha dado la nomenclatura a las ruedas según su posición en el vehículo, tal como se indica en la tabla 4.2. En la figura 4.6 se puede ver el diagrama de este interfaz en [Dymola®](#).

Tabla 4.2

Nomenclatura de las posiciones sobre el vehículo.

Posición	Descripción
AVD	Rueda delantera derecha
AVG	Rueda delantera izquierda
ARD	Rueda trasera derecha
ARG	Rueda trasera izquierda

Siendo **AV** la posición del eje delantero y **AR** la posición del eje trasero.

Chassis.Interface.ThreeWheelAVDriveBase Esta es una clase extendida de `Chassis.Interface.BaseChassis` de [VLDV](#), especializada para una configuración de vehículo con tres ruedas (triciclo), una delantera y dos traseras. Tiene por tanto solamente tres conectores `wheelHub_n`. En la figura 4.7 se puede ver el diagrama de este interfaz en [Dymola®](#), junto a la nomenclatura de los bujes de acuerdo a la tabla 4.2. En el listado B.3 se tiene el código en [Modelica®](#) de esta clase base.

Chassis.Interface.ThreeWheelARDriveBase Al igual que la anterior, esta es una clase extendida de `Chassis.Interface.BaseChassis` de [VLDV](#), pero especializada en este caso para

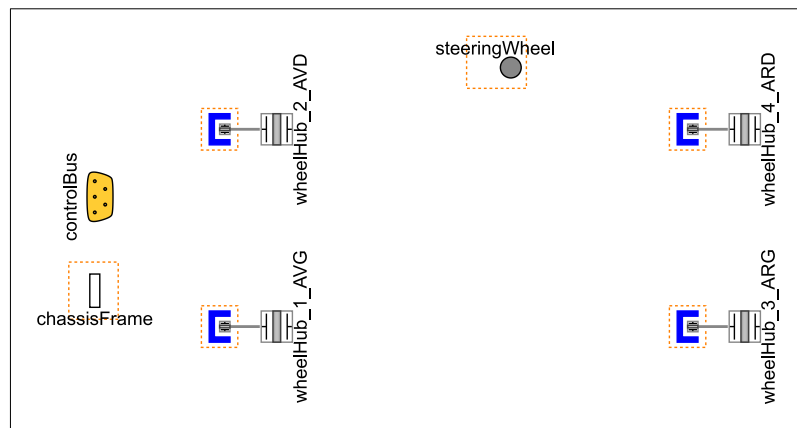


Figura 4.6

Diagrama de la clase base `Chassis.Interface.TwoAxleBaseVLDV` de la librería VLDV.

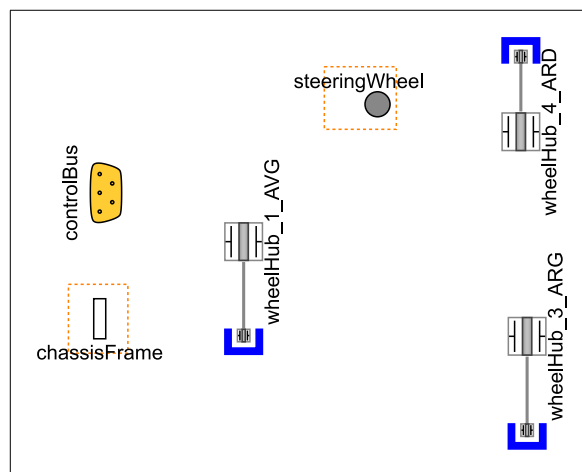


Figura 4.7

Diagrama de la clase base `Chassis.Interface.ThreeWheelAVDriveBase`.

una configuración de vehículo con tres ruedas (triciclo), dos delanteras y una trasera, con tres conectores `wheelHub_n` siguiendo la nomenclatura de la tabla 4.2. En la figura 4.8 se puede ver el diagrama de este interfaz en [Dymola®](#).

4.1.2.2. Chassis.Resistance

Este subpaquete contiene las clases base definidas para el cálculo de la resistencia al avance del vehículo, que posteriormente se han extendido a las clases base de las distintas configuraciones del subsistema del chasis. En la figura 4.9 se pueden ver las clases incluidas en el mismo.

Chassis.Resistance.ResistanceRollWind Esta clase base deriva de `Chassis.Resistance.ResistancesBase` de VLDV y modela las fuerzas de resistencia al avance del vehículo, asociadas a la penetración aerodinámica y a la rodadura del vehículo sobre la pista. Para los objetivos de evaluación energética de la prestación del vehículo, se ha abordado un modelo de desplazamiento lineal con las siguientes hipótesis simplificativas, suficientes para el caso de los ciclos normalizados que se van a utilizar y en los que no se define la pendiente:

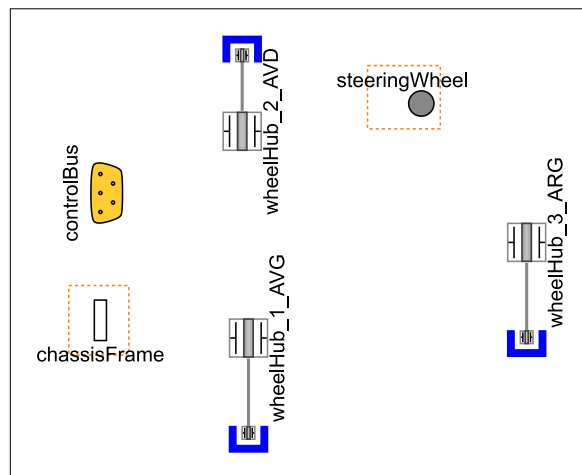


Figura 4.8

Diagrama de la clase base
`Chassis.Interface.ThreeWheelARDriveBase`.

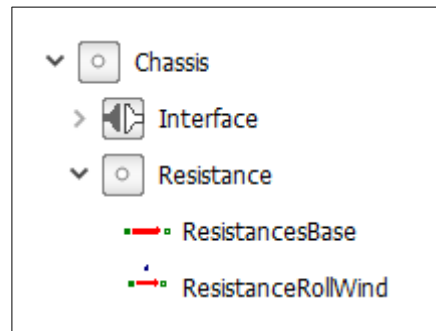


Figura 4.9

Clases base `Chassis.Resistance` de la librería VLDV.

- Desplazamiento de dirección constante y un solo sentido, circuito rectilíneo.
- Desplazamiento horizontal, el circuito no tiene pendientes.
- Condiciones atmosféricas constantes durante el recorrido del ciclo.
- Las cargas se reparten por igual en cada rueda del vehículo.
- No se consideran las transferencias de carga entre ejes durante la aceleración.
- La dirección del viento es la misma del vehículo. No se consideran los esfuerzos laterales ni verticales del viento sobre el vehículo.

En [63] se presentan las ecuaciones que permiten el cálculo de la resistencia al avance del vehículo, correspondientes a las fuerzas aerodinámicas y a la resistencia a la rodadura de los neumáticos.

Resistencia Aerodinámica Debido a que la circulación del aire alrededor del vehículo es muy compleja, se han desarrollado modelos semi-empíricos que representen este efecto. De tal forma, la resistencia aerodinámica se corresponde con la ecuación 4.2 [63].

$$D_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot C_x \cdot A_f \quad (4.2)$$

donde:

Símbolo	Descripción
D_a	Resistencia aerodinámica
ρ	Densidad del aire
v_r	Velocidad relativa del aire respecto al vehículo
C_x	Coefficiente de penetración aerodinámica del vehículo
A_f	Área frontal del vehículo

El término $1/2 \cdot \rho \cdot v_r^2$ se corresponde con la presión dinámica del aire. El valor de C_x , que es adimensional, se determina de forma experimental para cada vehículo mediante el uso de túneles de viento, por pruebas de deceleración, o estimándolo a partir de valores experimentales tabulados [76] [63]. El valor de A_f es el factor de escala que tiene en cuenta el tamaño del vehículo; dado que el tamaño del vehículo tiene una influencia directa sobre la resistencia aerodinámica, las propiedades aerodinámicas del mismo se refieren a veces por el producto $C_x \cdot A_f$. La velocidad relativa del aire se calcula a partir de la velocidad del aire y la velocidad del vehículo según la ecuación 4.3:

$$v_r = v_{veh} - v \quad (4.3)$$

siendo,

Símbolo	Descripción
v_{veh}	Velocidad de desplazamiento del vehículo respecto al sistema de referencia
v	Velocidad del aire respecto al sistema de referencia

Dado que la ecuación 4.2 no tiene en cuenta el sentido de la velocidad relativa del aire al estar elevada al cuadrado, se propone la ecuación 4.4 que sí lo tiene en cuenta, obteniendo el adecuado valor y signo de la fuerza de resistencia aerodinámica [25].

$$D_a = \frac{v_r}{|v_r|} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot C_x \cdot A_f = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{v_r^3}{|v_r|} \cdot C_x \cdot A_f \quad (4.4)$$

Resistencia a la Rodadura Otro de los factores que aportan una mayor resistencia al avance del vehículo es la resistencia a la rodadura de los neumáticos (o sus variantes tecnológicas); en el presente trabajo solamente se considera el caso de uso de conjuntos neumáticos. A bajas velocidades, sobre pavimento duro, es la principal fuerza de resistencia al avance en el vehículo [32]. De hecho, las fuerzas de resistencia aerodinámicas habitualmente solo se igualan a velocidades superiores a los 80-90 km/h de velocidad relativa del aire. En tránsito fuera de carretera sin embargo, a bajas velocidades, es el único factor de resistencia al avance relevante.

Si bien otras fuerzas de resistencia al avance solamente actúan bajo ciertas condiciones (fuerzas de aceleración, de pendiente...), la resistencia a la rodadura aparece desde el mismo momento en que se inicia el movimiento ($v_{veh} \geq 0$). Hay al menos seis mecanismos en el neumático, responsables de la pérdida de energía asociada a la resistencia a la rodadura sobre un pavimento plano [63] [32]:

- La flexión del flanco del neumático.

- La flexión de la banda de rodadura.
- La [Desradialización](#) o cizallamiento del flanco del neumático.
- El deslizamiento lateral y longitudinal del neumático.
- La deformación de la superficie de apoyo de rodadura.

Para estudios de estimación de prestaciones de vehículos, los efectos relativos a la variación dinámica del peso del vehículo y distribución de cargas sobre los ejes debidos a la transferencia de carga a causa de la aceleración y la sustentación o [Deportancia](#), complican de forma notable los cálculos, sin ofrecer una mejora significativa en la precisión de los resultados. Por tanto, para el presente trabajo como en la mayoría de los casos de uso, no se tienen en cuenta estos efectos y solamente se tiene en cuenta el peso del vehículo en estático para el cálculo de la resistencia a la rodadura [63]. La ecuación 4.5 permite el cálculo de la fuerza de resistencia a la rodadura, siendo la masa total del vehículo la obtenida de la ecuación 4.6:

$$R_x = f_r \cdot M_{tveh} \cdot g \quad (4.5)$$

$$M_{tveh} = M_{veh} + M_{con} + M_{bat} \quad (4.6)$$

donde,

Símbolo	Descripción
R_x	Fuerza de resistencia a la rodadura
f_r	Coefficiente de resistencia a la rodadura del neumático
M_{tveh}	Masa total del vehículo en estático
g	Aceleración de la gravedad terrestre
M_{veh}	Masa del vehículo
M_{con}	Masa del conductor+equipaje
M_{bat}	Masa de las baterías

El valor de f_r depende de factores como la temperatura del neumático, la presión de inflado, la carga, materiales y diseño del neumático, velocidad y deslizamiento del neumático en la aceleración y frenada. Los múltiples e interrelacionados factores que afectan a este coeficiente obligan a disponer de complejas ecuaciones para su cálculo, con coeficientes tabulados en función de la presión de inflado y la arquitectura del neumático (Instituto de Tecnología de Stuttgart / Transportation Research Institute - Universidad de Michigan) [63]. A nivel elemental y dentro del alcance del presente trabajo, se ha estimado que el coeficiente de resistencia a la rodadura es un valor constante dentro de una misma simulación, por lo que se establece como parámetro del modelo. En la figura 4.10 se puede ver el diagrama en [Dymola[®]](#) de esta clase base.

Las variables y parámetros de esta clase base se toman, mediante el mecanismo `inner`, `outer` de [Modelica[®]](#), de otras clases que contienen los valores de definición de las condiciones de contorno, como son `VLDV.BaseClass.Chassis.SetParameters` (4.1.2.3), `VLDV.BaseClass.Atmosphere` (4.1.1) y `Modelica.Mechanics.MultiBody.World` (3.2.1). Se utiliza este mecanismo a semejanza de lo que se hace en la librería VI, al objeto de mantener la compatibilidad.

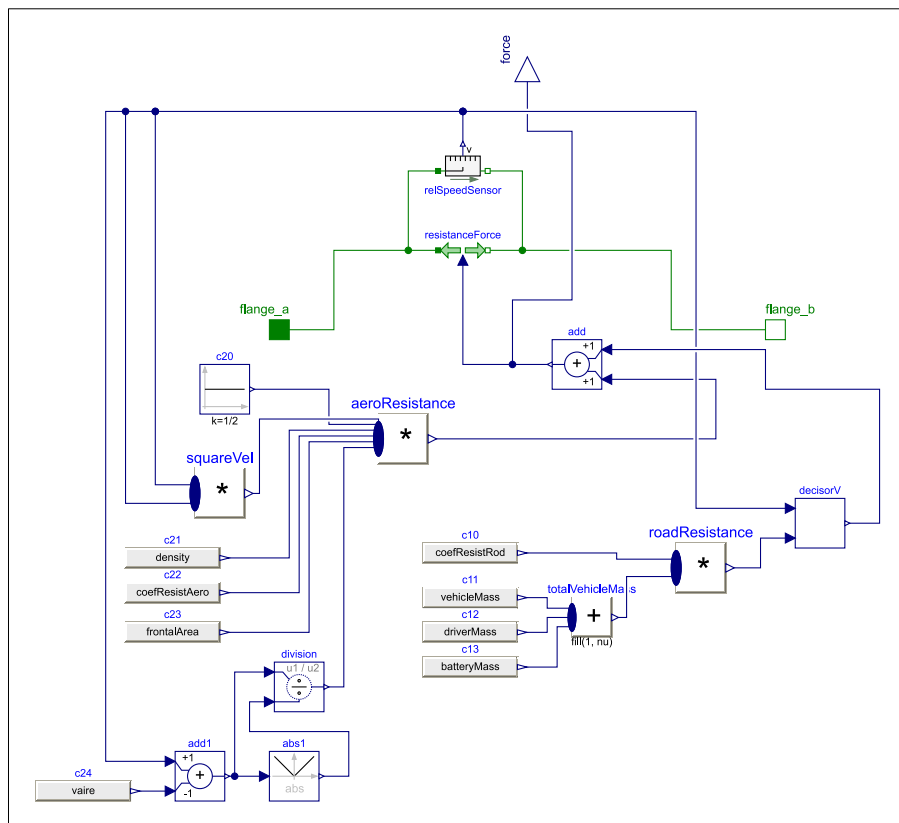


Figura 4.10

Diagrama de la clase base `Chassis.Resistance.ResistanceRollWind`.

4.1.2.3. Chassis.SetParameters

Este subpaquete contiene un conjunto de clases base, cada una de las cuales define una serie de parámetros básicos, para ser aplicados a los diferentes tipos de vehículos a analizar. Utilizando el mecanismo inner/outer de Modelica®, cada clase que modela un vehículo contendrá una instancia de una de estas superclases, pudiendo acceder tanto a los parámetros como a las variables globales definidas en ellas. Entre los parámetros básicos incluidos se pueden enumerar: masa del vehículo, conductor y batería, desarrollo de los neumáticos, etc. En la figura 4.11 se pueden ver las clases incluidas en el mismo.

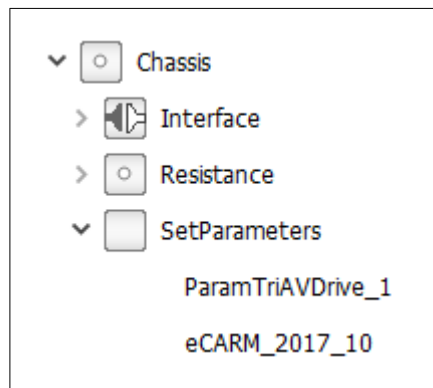


Figura 4.11

Clases base `Chassis.SetParameters` de la librería VLDV.

Chassis.SetParameters.ParamTriAVDrive_2 Esta clase contiene el conjunto de parámetros básicos de un triciclo ligero, necesarios para la completa definición del comportamiento del subsistema chasis del vehículo.

Se ha seleccionado para la rueda delantera un neumático [European Tyre and Rim Technical Organisation - Organización Técnica Europea de Neumáticos y Llantas \(ETRTO\)](#) [105] 50-559 (26" x 2"), típicamente utilizado para uso urbano y extra-urbano y certificado [ECE-R75](#) [31] para su uso en bicicletas y triciclos eléctricos con velocidades de hasta 50km/h [34]. Esta dimensión es la más apropiada para el motor-rueda eléctrico seleccionado para el triciclo [75], ya que permite un mayor par motriz y una buena maniobrabilidad por su contenido diámetro.

Para el neumático trasero se ha seleccionado la dimensión [ETRTO](#) 37-622 (28" x 1 $\frac{3}{8}$ " x 1 $\frac{5}{8}$ "), por ser una dimensión muy habitual en bicicletas urbanas, con un buen compromiso entre comodidad y capacidad de carga/peso; también está certificada [ECE-R75](#) para velocidades hasta 50km/h. Suponiendo una carga total del vehículo de: $M_{tveh} = 40 + 85 + 6 = 131\text{kg}$, que se reparte por igual en las tres ruedas (1/3 al eje AV, 2/3 al eje AR) (ver 4.1.2.1), la carga unitaria sería de 43.7kg, que se encuentra dentro de los límites de carga/presión soportados por estos neumáticos [34] [104].

La [Circunferencia de Rodadura \(CR\)](#) de un neumático se corresponde con la distancia longitudinal recorrida por el vehículo en una vuelta completa de la rueda, con tracción, en condiciones de carga y presión establecidas y está relacionada con el [Radio aplastado del neumático bajo carga en dinámico \(Rd\)](#), de acuerdo con la ecuación 4.7 [87]; la determinación más fiable de la [CR](#) es mediante la medida directa, puesto que depende de varios factores como la carga, la presión de inflado, el propio comportamiento del neumático, etc. Para este trabajo se toman los valores experimentales de los fabricantes especializados [104]. En los casos en que este valor experimental no esté disponible, se suele utilizar como aproximación válida [87], el cálculo del [CR](#) a partir del [Radio aplastado del neumático bajo carga en estático \(Rs\)](#), según la ecuación (4.8)

$$CR = 2 \cdot \pi \cdot Rd \quad (4.7)$$

$$CR = 2 \cdot \pi \cdot Rs \quad (4.8)$$

La masa del vehículo es el valor de tentativa de diseño y que tras realizar una comparativa con distintos tipos de triciclos comerciales, se establece en 40kg, sin incluir las baterías. Para el conductor + equipaje, que se corresponde con la carga de pago, se toma el valor de 85kg, que se corresponden con el peso del conductor medio estimado de 80kg, más un equipaje máximo de 5kg. Para la batería se toma el peso de un equipo comercial LiFePO4 48V 10Ah, que aunque varía según el fabricante y el formato, tiene un valor habitual de 6 kg [56] [57]. Para los parámetros aerodinámicos, se toman los valores correspondientes a un triciclo en posición recostado (Easy Racer), que es la posición más adecuada para el uso previsto del vehículo y con algunas mejoras aerodinámicas en el carenado frontal [69]. Los valores nominales seleccionados en base a la bibliografía son $C_x = 0.7$ y $A_f = 0.5 \text{ m}^2$. Según [69] [92], un valor de $f_r = 0.005$, es adecuado para neumáticos de bicicleta normales con cámara. En la tabla 4.3, se tiene el listado de parámetros definidos para esta clase base.

Los valores anteriores se han particularizado en los distintos componentes del chasis de acuerdo a la configuración final utilizada.

Tabla 4.3
Listado de parámetros de la clase base `ParamTriAVDrive_2`.

Nombre	Valor	Descripción	Unidades
<code>desarrolloAV</code>	2.075	Circunferencia de rodadura ETRTO 50-559	m
<code>desarrolloAR</code>	2.2	Circunferencia de rodadura ETRTO 37-622	m
<code>vehicleMass</code>	40	Masa del vehículo	kg
<code>driverMass</code>	85	Masa del conductor y equipaje	kg
<code>batteryMass</code>	6	Masa de las baterías	kg
<code>coefResistAero</code>	0.7	C_x	
<code>frontalArea</code>	0.5	Área frontal de vehículo	m^2
<code>coefResistRod</code>	0.005	f_r	—

Chassis.SetParameters.eCARM_2017_10 Esta clase contiene el conjunto de parámetros básicos del vehículo eCARM [83] presentado en 3.9, necesarios para la completa definición del comportamiento del subsistema chasis del vehículo. En la tabla 4.4, se tiene el listado de parámetros definidos para esta clase base.

Tabla 4.4
Listado de parámetros de la clase base `eCARM_2017_10`.

Nombre	Valor	Descripción	Unidades
<code>desarrolloAV</code>	1.714	Circunferencia de rodadura ETRTO 165/70 R 13	m
<code>desarrolloAR</code>	1.714	Circunferencia de rodadura ETRTO 165/70 R 13	m
<code>vehicleMass</code>	460	Masa del vehículo	kg
<code>driverMass</code>	150	Masa del conductor y equipaje	kg
<code>batteryMass</code>	132	Masa de las baterías(8 · 31kg)	kg
<code>coefResistAero</code>	0.45	C_x	
<code>frontalArea</code>	2.23	Área frontal de vehículo	m^2
<code>coefResistRod</code>	0.01	f_r	$\frac{N}{N}$

En [33], se ha obtenido el valor de la CR con una tolerancia de (+1.5 %, −2.5 %). De [63] [76] se ha inferido el valor del C_x para el tipo de diseño del vehículo y se toma un valor $C_x = 0.45$. El valor del $f_r = 0.01$ se toma de [63] [113] [32] para neumático radial sobre suelo duro.

4.1.2.4. Chassis.TricycleAVdriveMinimal

En esta clase base se han definido los elementos básicos del chasis de un vehículo ligero en configuración de triciclo, con un eje trasero de dos ruedas y un eje delantero motriz de una sola rueda. Se extiende de la clase base `ThreeWheelAVDriveBase` vista en 4.1.2.1. El valor de los parámetros básicos se obtiene de `ParamTriAVDrive_2`, vista en 4.1.2.3. Entre los distintos componentes que la forman, cabe destacar los siguientes:

- `Modelica.Mechanics.MultiBody.Joints.Prismatic`, instanciado de la librería `Multibody` (3.2.1), y que permite restringir el movimiento del vehículo en una trayectoria lineal a lo largo del eje x según el sistema de referencia.
- `Modelica.Mechanics.Rotational.Components.IdealRollingWheel` (3.2.1), que modeliza el comportamiento de una rueda ideal.
- `VLDV.BaseClass.Function.Rap`, que permite el cálculo del Rd a partir del parámetro CR del neumático del vehículo.
- `VLDV.BaseClass.Chassis.Resistance.ResistanceRollWind` (4.1.2.2), que modela la resistencia al avance del vehículo debido a las fuerzas aerodinámicas y de rodadura.

- `Modelica.Mechanics.MultiBody.Parts.Body`, también de la librería `Multibody` (3.2.1), que modela la masa M_{tveh} del vehículo y su tensor de inercia.

Las fuerzas de aceleración del vehículo son calculadas por `Dymola`® durante la simulación en función de la masa M_{tveh} del vehículo y de su aceleración. De esta forma, en esta clase base se tienen en cuenta las principales fuerzas de resistencia al avance sobre suelo plano, como son las de inercia, resistencia aerodinámica y resistencia a la rodadura. En la figura 4.12 se puede ver el su diagrama en `Dymola`®. En el listado B.4 se tiene parte del código de esta clase.

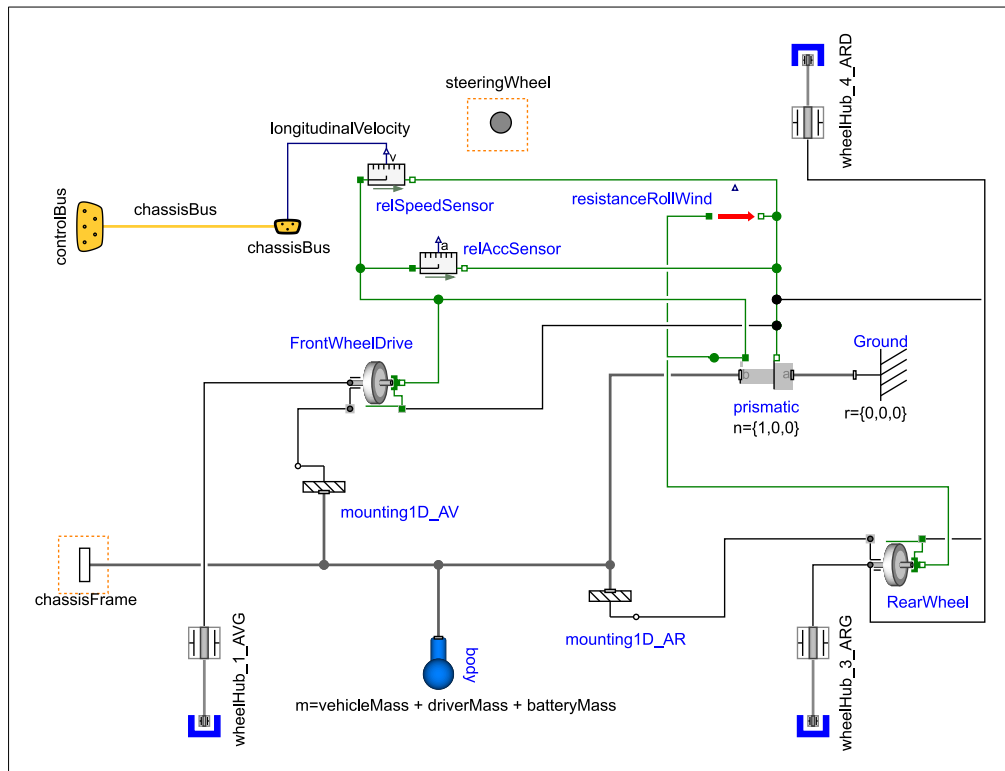


Figura 4.12

Diagrama de la clase base `Chassis.TricycleAVdriveMinimal`.

4.1.2.5. `Chassis.eCARM_2017`

En esta clase base se han definido los elementos básicos del chasis del vehículo `UAL-eCARM` de dos ejes y cuatro ruedas, presentado en 3.9. Se extiende de la clase base `TwoAxleBaseVLDV` vista en 4.1.2.1. El valor de los parámetros básicos se extiende de `SetParameters.eCARM_2017_10`, vista en 4.1.2.3. El resto de elementos componentes coinciden con los de la clase `TricycleAVdriveMinimal`, vista en la sección anterior. El diagrama de esta clase base es muy similar al anterior, salvo que dispone de dos ejes y cuatro ruedas.

4.1.3. `VLDV.BaseClass.EnergySource`

En este subpaquete se han definido los interfaces y las clases base correspondientes a los subsistemas generadores de energía eléctrica conectados al vehículo. Dentro de `VLDV`, los subsistemas de fuentes de energía se utilizan para modelizar el comportamiento de los

distintos elementos generadores de energía eléctrica, fundamentalmente renovables, que se conectan al vehículo para asegurar su movilidad.

La necesidad de crear este nuevo paquete viene justificada por el hecho de que tanto la librería **MSL**, como la **VI**, no disponen de los interfaces ni clases base para la definición de las fuentes de energía externas al vehículo. Estas fuentes externas pueden ser tanto renovables como no renovables. Sin embargo, para el propósito específico del presente trabajo se desarrollan solamente los interfaces y clases base correspondientes a energías renovables. En la figura 4.13 se pueden ver las clases incluidas en este subpaquete.

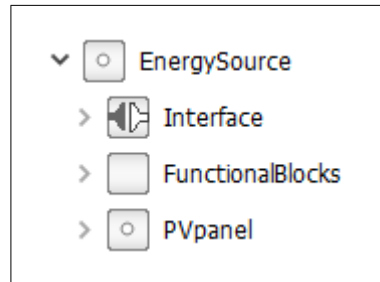


Figura 4.13

Clases base del subpaquete `BaseClass.EnergySource` de la librería VLDV.

De entre las distintas fuentes de energía renovable disponibles, para el presente trabajo se ha considerado solamente la energía solar fotovoltaica, por ser de entre las renovables disponibles, la que se puede utilizar instalada en el vehículo a mínimo coste. Se han definido por tanto solamente la clase base de los **PVPs**, implementadas a partir de los interfaces, bloques funcionales y componentes definidos anteriormente.

Un **PVP** es un sistema capaz de generar energía eléctrica en forma de **CC** a partir de semiconductores cuando estos son iluminados por fotones [74]. El elemento básico que compone un **PVP** es la célula fotovoltaica; estas células se agrupan mediante conexiones serie-paralelo para formar paneles completos; en la figura 4.14 se tiene un esquema de principio de una célula fotoeléctrica. Al objeto de poder integrar en el vehículo completo el comportamiento de este tipo de generadores de energía, es necesario disponer de los modelos dinámicos que puedan simular su comportamiento de una forma suficientemente precisa. Los **PVP** presentan una curva de respuesta no-lineal I-V con distintos parámetros que necesitan ser ajustados a partir de datos experimentales de equipos reales. En los trabajos de [47] y [129], se puede encontrar el desarrollo de un modelo matemático suficientemente preciso para el alcance del presente trabajo. Se presenta, tanto el modelo matemático, como el procedimiento para la obtención de los parámetros de funcionamiento y fue elaborado con el ánimo de servir de base para el estudio y desarrollo de equipos convertidores de tensión acoplados a los **PVP**, fundamentalmente con la ayuda de simuladores de circuitos. En la mayoría de las aplicaciones comerciales, los **PVP** se conectan a los consumidores mediante convertidores de tensión. Estos convertidores se usan para adaptar la tensión suministrada por el panel a la demandada por el consumidor, para el control del flujo de energía en sistemas conectados en red y fundamentalmente como sistemas **MPPT** del panel. En la sección 4.1.4 se han definido las clases base de los convertidores.

Una célula fotovoltaica es básicamente un diodo semiconductor cuya unión $p - n$ está expuesta a la luz. La luz incidente en la célula genera cargas eléctricas que provocan una corriente eléctrica si se cortocircuita la célula. Las células fotovoltaicas están fabricadas usando distintos materiales semiconductores y con distintas técnicas de fabricación, siendo en la actualidad el silicio monocristalino y policristalino, los materiales más utilizados en la producción comercial. La base física del funcionamiento de la célula fotovoltaica es la siguiente [74]: la célula fotovoltaica está fabricada con materiales semiconductores que tienen electrones débilmente ligados ocupando una banda de energía llamada *banda de valencia*.

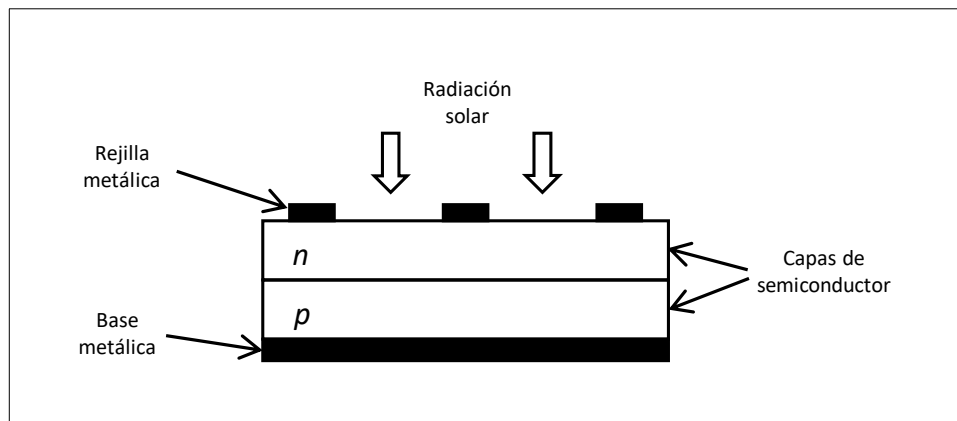


Figura 4.14

Esquema de principio de una célula fotoeléctrica [129]

Cuando un electrón de valencia es sometido a una energía superior a un cierto valor, llamado *intervalo de banda*, las ligaduras se rompen y el electrón se mueve hacia una nueva banda de energía llamada *banda de conducción* donde puede conducir la electricidad a través del material. Por tanto, los electrones libres en la *banda de conducción* están separados de la *banda de valencia* por el *intervalo de banda* (medido en eV). Esta energía necesaria para liberar los electrones es suministrada por los fotones, que son partículas mínimas de energía luminosa.

La luz solar está formada por un espectro de fotones distribuidos en un rango de valores de energía. Los fotones cuya energía es superior al *intervalo de banda*, pueden excitar los electrones de la *banda de valencia* hacia la *banda de conducción* donde pueden generar una corriente eléctrica. Los fotones cuya energía es inferior al *intervalo de banda* no son capaces de excitar a los electrones, atravesando la célula y generando calor. Por este motivo, las células fotovoltaicas expuestas a la radiación solar directa suelen estar entre 20 y 30°C por encima de la temperatura ambiente. Por tanto, los PVP pueden producir energía eléctrica sin operar a alta temperatura y sin partes móviles, lo que les permite una operación simple, segura y fiable.

El estudio del comportamiento físico de los PVP es considerablemente complejo. Para el propósito de este trabajo es suficiente con conocer las características eléctricas del PVP. Los fabricantes de equipos PVP suelen proporcionar un conjunto de datos experimentales que pueden ser usados para obtener las ecuaciones matemáticas que describen su curva I-V. Algunos fabricantes proporcionan además las curvas I-V obtenidas experimentalmente para diferentes condiciones de operación. El modelo matemático propuesto puede ser ajustado y validado tomando como referencia estas curvas, tal como se expone en [129].

La eficiencia del PVP depende del espectro de distribución de la radiación solar, de la capacidad de absorción del semiconductor y de la reflectancia de la superficie del panel. El estudio del efecto de la radiación solar en los PVP es difícil debido a que el espectro de la radiación solar en la superficie de la tierra está influenciada por factores como la temperatura del disco solar y la atmósfera. La radiación en la superficie de la tierra es aproximadamente de $1kW/m^2$. Los equipos PVP se evalúan generalmente respecto a una distribución espectral normalizada. La *American Society for Testing and Materials - Sociedad Americana para el Ensayo y los Materiales (ASTM)* define la distribución espectral terrestre global o total *AM1.5*, que se corresponde con el espectro de la radiación directa más la difusa, que es la influenciada por la atmósfera y reflejada por la superficie terrestre. El valor normalizado *AM1.5* se define para un PVP inclinado 37° respecto a la horizontal de la superficie terrestre y orientado hacia el sol. Las iniciales *AM* corresponden las siglas de Air Mass y hacen referencia a la masa de aire entre la superficie del PVP y el sol, que afecta a la distribución

espectral y a la intensidad de la luz que llega al mismo. La distribución *AM1.5* se usa como estándar en la industria de los *PVP*. Las hojas de características generalmente dan información sobre las prestaciones del *PVP* con respecto a las [Standard Test Conditions - Condiciones de Prueba Standard \(STC\)](#). Las condiciones de prueba standard *STC* se establecen para una radiación $G = 1000 \text{ W/m}^2$ con un espectro *AM1.5* a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ según la [ASTM](#).

4.1.3.1. EnergySource.Interface

En este subpaquete se han definido las clases base de los interfaces comunes a los distintos subsistemas generadores de energía.

Las clases base de este subpaquete contienen los siguientes conectores, algunos de los cuales son opcionales:

- `controlBus` Conexión al bus de señales de control.
- `pin_p` Conector eléctrico signo positivo.
- `pin_n` Conector eléctrico signo negativo.
- `heatPort` Puerto de conexión para la evacuación de calor (opcional).
- `energyPort` Puerto de conexión para el suministro de energía externa.

VLDV.BaseClass.EnergySource.Interface.SourceBase Esta clase base contiene la definición de interfaz mínimo básico de cualquier sistema de conversión de energía externa en energía eléctrica que es suministrada al vehículo. En la figura 4.15 se puede ver el diagrama en [Dymola®](#) de este interfaz.

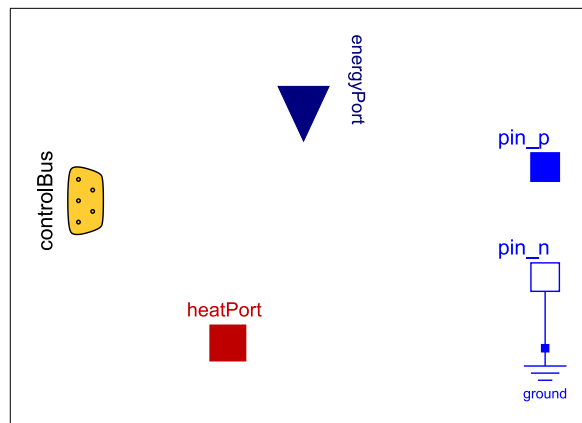


Figura 4.15

Diagrama de la clase base `EnergySource.Interface.SourceBase` de la librería `VLDV`.

4.1.3.2. EnergySource.FunctionalBlocks

En este subpaquete se han definido los bloques funcionales necesarios para la implementación de las clases base de las fuentes de energía. Los bloques funcionales corresponden a la implementación del modelo funcional de un *PVP*. En la figura 4.16 se tiene la información de las funciones que lo integran y que están basados en los trabajos de [47] y [129].

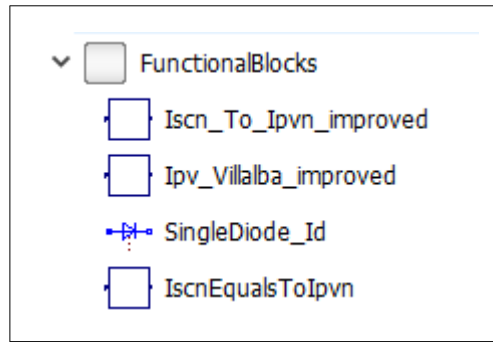


Figura 4.16

Funciones del subpaquete `BaseClass.EnergySource.FunctionalBlocks` de la librería VLDV.

FunctionalBlocks.Iscn_To_Ipvn_improved De acuerdo con [129], dado un determinado PVP, se puede establecer la relación de la ecuación 4.9, en condiciones STC:

$$I_{pv,n} = \frac{R_p + R_s}{R_p} \cdot I_{sc,n} \quad (4.9)$$

donde,

- $I_{pv,n}$ - Intensidad nominal generada en el PVP por efecto de la luz en condiciones STC.
- R_p - Resistencia equivalente de las conexiones en paralelo.
- R_s - Resistencia equivalente de las conexiones en serie.
- $I_{sc,n}$ - Intensidad nominal en cortocircuito del PVP en condiciones STC.

De esta forma, se ha podido obtener el valor de $I_{pv,n}$ de una forma más precisa, a partir de los valores de la ficha de características del PVP. En el listado B.5 se tiene el código de este bloque funcional.

En caso de no disponer de los valores de R_p y R_s en la ficha de características del panel, se puede aplicar la simplificación propuesta en [129], implementada en la función `IscnEqualsToIpvn` (Figura 4.16), y que responde a la ecuación 4.10:

$$I_{pv,n} \approx I_{sc,n} \quad (4.10)$$

FunctionalBlocks.Ipv_Villalba_improved Según el modelo utilizado, la intensidad de corriente generada en la célula fotovoltaica depende de forma no lineal de la radiación solar y está condicionada por la temperatura de la unión $p-n$ del diodo. En este bloque funcional se implementa la ecuación 4.11 propuesta en [129], que relaciona la intensidad de corriente generada por la célula fotovoltaica con la radiación solar y la temperatura de la unión $p-n$ del diodo.

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \cdot (T - T_n)) \frac{G}{G_n} \quad (4.11)$$

donde,

- I_{pv} - Intensidad nominal generada en el PVP por efecto de la radiación luminosa (A).
- $I_{pv,n}$ - Intensidad nominal generada en el PVP por efecto de la luz en condiciones STC (A).
- K_I - Coeficiente de corriente/temperatura en cortocircuito (A/K).
- T - Temperatura de la unión p - n del diodo (K).
- T_n - Temperatura nominal según condiciones STC (K).
- G - Radiación solar ($\frac{W}{m^2}$).
- G_n - Radiación solar nominal ($\frac{W}{m^2}$).

El cálculo del valor $I_{pv,n}$ se realiza con ayuda del bloque funcional `Iscn_To_Ipvn_improved` visto anteriormente.

FunctionalBlocks.SingleDiode_Id La definición de esta clase base parte del modelo `Modelica.Electrical.Analog.Semiconductors.Diode` de [Modelica®](#), en el que se ha sustituido el parámetro I_{ds} , que corresponde a la corriente de saturación del diodo, por I_0 , que se obtiene a partir de la ecuación 4.12 propuesta en [129]. De ella se obtiene la intensidad de corriente de saturación del diodo en función de la temperatura y de otros coeficientes constructivos del PVP. En el listado B.6 se tiene el código de este componente modificado.

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \cdot \Delta T}{e^{((V_{oc,n} + K_V \cdot \Delta T) / \alpha \cdot V_t)} - 1} \quad (4.12)$$

siendo,

$$\Delta T = T - T_n \quad (4.13)$$

$$V_t = \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q} \quad (4.14)$$

donde,

- I_0 - Intensidad de corriente de saturación del diodo (A).
- K_I - Coeficiente de corriente/temperatura en cortocircuito (A/K).
- T - Temperatura de la unión p - n del diodo (K).
- T_n - Temperatura nominal según condiciones STC (K).
- $V_{oc,n}$ - Tensión nominal a circuito abierto (V).
- K_V - Coeficiente de tensión/temperatura en circuito abierto (V/K).
- α - Constante de idealidad del diodo.
- V_t - Voltaje térmico.
- N_s - Número de celdas conectadas en serie.
- k - Constante de Boltzman [116] = $1.380649 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$

- q - Carga elemental del electrón [116] = $1.602176634 \cdot 10^{-19}C$

El valor de la constante del diodo (α), expresa su grado de idealidad y es empírico; se puede tomar cualquier valor de partida para el ajuste del modelo y posteriormente modificarlo para mejorar el ajuste de la respuesta del PVP a sus curvas características; esta constante afecta a la pendiente de la curva de respuesta I-V del PVP y permite mejorar la precisión del modelo. Algunos autores proponen distintas formas de obtener este valor [29]; en [42] se proponen valores basados en análisis empíricos y en [27] se presentan los valores obtenidos mediante diferentes técnicas de estimación de parámetros. Habitualmente $1 \leq \alpha \leq 1.5$ y su elección depende de otros parámetros de la curva I-V del PVP.

4.1.3.3. EnergySource.PVpanelVillalba_improved

En esta clase base se contiene la definición completa de un PVP en el que, a partir de los valores de la radiación externa definidos como una entrada, de las condiciones de contorno ambientales y de los parámetros característicos del PVP, se obtiene la tensión en bornes del panel a través del interface eléctrico compuesto por los puertos `pin_p` y `pin_n`.

Se extiende del interface `SourceBase` presentado en 4.1.3.1 e incluye como elementos más destacados, la instanciación de los bloques funcionales `Ipv_Villalba_improved` y `SingleDiode_Id` vistos en 4.1.3.2. El bloque funcional `Ipv_Villalba_improved` se conecta a una fuente de intensidad de corriente ideal para generar la intensidad del circuito correspondiente a I_{pv} . En la figura 4.17 se puede ver el diagrama en `Dymola`[®] de esta clase base. En la tabla 4.5, se tiene el listado de parámetros definidos para esta clase base.

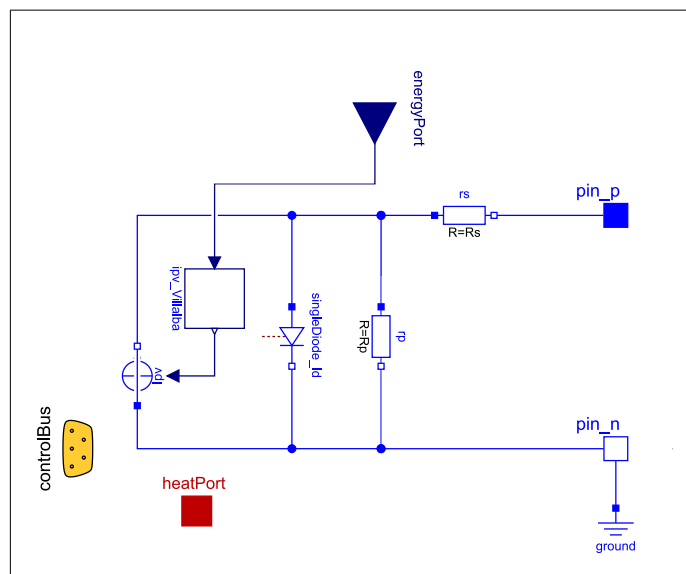


Figura 4.17

Diagrama de la clase base `EnergySource.PVpanelVillalba_improved` de la librería VLDV.

4.1.4. VLDV.BaseClass.EnergyStorage

En este subpaquete se han definido los interfaces y las clases base de los subsistemas acumuladores de energía del vehículo. Dentro de la librería VLDV, los subsistemas de acumulación de energía se utilizan para modelizar el comportamiento de los elementos capaces

Tabla 4.5
Listado de parámetros de la clase base `PVpanelVillalba_improved`.

Nombre	Descripción	Unidades
R_s	Resistencia equivalente de las conexiones en serie	Ω
R_p	Resistencia equivalente de las conexiones en paralelo	Ω
N_s	Número de celdas conectadas en serie	
α	Constante de idealidad del diodo	
$I_{sc,n}$	Intensidad nominal en cortocircuito del PVP en condiciones STC	A
K_I	Coefficiente de corriente/temperatura en cortocircuito	A/K
K_V	Coefficiente de tensión/temperatura en circuito abierto	V/K
$V_{oc,n}$	Tensión nominal a circuito abierto	V
T	Temperatura de la unión $p-n$ del diodo	K

de almacenar la energía procedente de diversas fuentes, y con las tecnologías disponibles. Este almacenamiento es necesario para asegurar la movilidad del vehículo con la autonomía necesaria en función del uso previsto del mismo.

Entre los sistemas y tecnologías disponibles para el almacenamiento de energía en vehículos, para el presente trabajo se ha considerado solamente el almacenamiento de energía eléctrica mediante el uso de baterías. Actualmente, la batería supone para los **EVs** uno de sus puntos críticos de desarrollo, debido al impacto en su autonomía, coste, peso y ciclo de vida.

La necesidad de desarrollar este nuevo subpaquete para el presente trabajo viene justificada por el hecho de que la librería **MSL** no dispone de clases base, interfaces, ni componentes definidos para los sistemas de acumulación de energía eléctrica, de acuerdo al enfoque adoptado en esta tesis. En el caso de la librería **VI**, sí dispone sin embargo del interfaz `VehicleInterfaces.EnergyStorage.Interfaces.Base`, definido para los sistemas de acumulación de energía eléctrica, pero lamentablemente, el único componente definido (`VehicleInterfaces.EnergyStorage.Battery`) se corresponde con un modelo muy simple de batería, de capacidad infinita y tensión de salida constante, basada en una fuente de tensión ideal (`Modelica.Electrical.Analog.Sources.ConstantVoltage`) de la librería **MSL**.

La batería juega un papel fundamental en la operación de los **EVs**, puesto que de ella dependen aspectos principales de las especificaciones del vehículo como son la autonomía y la potencia máxima disponible. Resulta por tanto necesario disponer de componentes basados en modelos matemáticos fiables y validados para las distintas tecnologías de batería existentes, que permitan simular su comportamiento e integración dentro del modelo multifísico completo del vehículo a través del **Smart Energy Hub - Centro de Energía Inteligente (SEH)** [65]. En la figura 4.18 se pueden ver las clases incluidas en este subpaquete.

En el presente trabajo, se propone un nuevo modelo dinámico de batería que permite simular el comportamiento de las baterías de **Li-Ion**, de uso común en **EVs**. De entre ellas, las baterías **LiFePo4** han ganado popularidad, ya que sus características las hacen especialmente adecuadas para su uso en **EVs**: seguridad intrínseca, estabilidad térmica, menor toxicidad medioambiental, larga duración, alta densidad de energía, fiabilidad, disponibilidad de materia prima, bajo coste y curva de tensión muy plana [18] [134].

El modelo propuesto es fácilmente parametrizable a partir de las curvas de descarga experimentales del equipo real y se ajusta adecuadamente al comportamiento particular de la curva de carga/descarga de las baterías **LiFePo4**. Este comportamiento particular responde a la aparición de dos zonas de tensión extremadamente planas en sus curvas de tensión-capacidad, coincidiendo con los valores de 30-60 % y 80-90 % de su **SOC**, debidas a los cambios de fase [22] [102]. Este modelo también permite la simulación del comportamiento

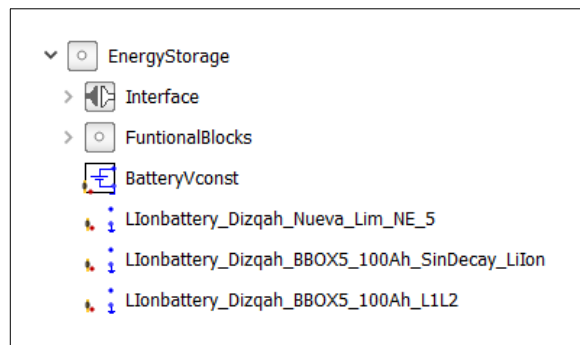


Figura 4.18

Clases base del subpaquete `BaseClass.EnergyStorage` de la librería VLDV.

de las baterías [Li-Ion](#), y con pequeñas modificaciones, de las del tipo [LA](#), [NiMH](#) y [NiCd](#) [123].

En la literatura consultada [123] [108] [130] [81], los autores hacen referencia a los modelos de baterías comúnmente utilizados y publicados, clasificándolos en matemáticos o experimentales, electro-químicos y basados en circuito eléctrico equivalente. No obstante se entiende que, de forma general, se podrían derivar modelos dinámicos cuya formulación se base en ecuaciones diferenciales ordinarias y/o ecuaciones en derivadas parciales no lineales. En este trabajo, se presenta un modelo de circuito eléctrico basado en ecuaciones diferenciales algebraicas y variables discretas. La respuesta en precisión y velocidad de cálculo del modelo presentado, lo hace adecuado para simulaciones en tiempo real, así como para el diseño de sistemas control y gestión de energía en [EVs](#). De las distintas propuestas de modelos de batería basados en circuito eléctrico que se han encontrado en la bibliografía, en este trabajo se han tomado como referencia los modelos eléctricos expuestos en [123], [47], [10] y [24].

En [123] se presenta un modelo dinámico genérico de carga/descarga de batería basado en un circuito eléctrico, que se puede parametrizar mediante datos experimentales para cuatro diferentes tecnologías de batería ([LA](#), [Li-Ion](#), [NiMH](#) y [NiCd](#)). En [47] se presenta un ejemplo de implementación en [Modelica](#)[®] [61] mediante [OOM](#), para el caso específico de una batería del tipo [LA](#), basado en el modelo propuesto en [123], aunque con algunas simplificaciones. Se estructura el modelo como una [FSM](#) compuesta por diferentes estados (carga, sobrecarga, saturación, descarga, sobredescarga y descarga plena) y transiciones entre éstos y se implementa en el lenguaje de modelado [Modelica](#)[®]. En [10] se propone un modelo genérico basado también en [123] para el caso de baterías [LA](#) y [Li-Ion](#), donde se describe el procedimiento de extracción de parámetros del modelo a partir de los datos experimentales de la batería y establece las limitaciones del modelo. En [24] se propone un modelo genérico, también basado en [123], para el caso específico de baterías [LiPo](#).

4.1.4.1. `EnergyStorage.Interface`

En este subpaquete se han definido las clases base de los interfaces comunes a los distintos subsistemas acumuladores de energía. Las clases base de este subpaquete contienen los siguientes conectores, algunos de los cuales son opcionales:

- `controlBus` Conexión al bus de señales de control.
- `pin_p` Conector eléctrico signo positivo.
- `pin_n` Conector eléctrico signo negativo.
- `heatPort` Puerto de conexión para el intercambio de calor (opcional).

EnergyStorage.Interface.StorageBase Esta clase base contiene la definición de interfaz mínimo básico de cualquier sistema de acumulación de energía eléctrica conectado al vehículo y es una clase extendida (heredada) de `VehicleInterfaces.EnergyStorage.Interfaces.Base` para poder mantener la compatibilidad con el resto de librerías desarrolladas en base a VI. En la figura 4.19 se puede ver el diagrama de este interfaz.

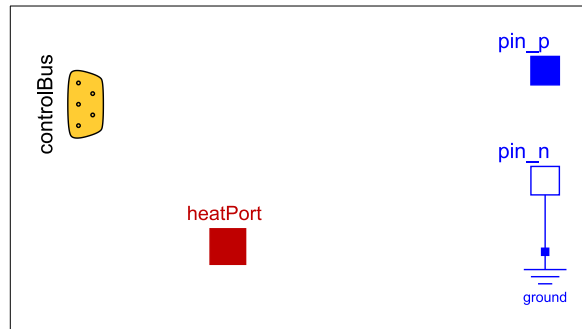


Figura 4.19

Diagrama de la clase base `EnergyStorage.Interface.StorageBase` de la librería VLDV.

4.1.4.2. EnergyStorage.FunctionalBlocks

En este subpaquete se han definido los bloques funcionales necesarios para la implementación de las clases base de los subsistemas acumuladores de energía del vehículo.

BlockDizqah_Lion_ibatCorregido_limiter_iBatFiltered_5 En este bloque funcional se implementan las ecuaciones correspondientes al comportamiento de las baterías `Li-Ion` de celda única, que se describen en 4.1.4.5.

Block_Dizqah_LiIon_BBOX5_100Ah.SinDecay En este bloque funcional se implementan las ecuaciones correspondientes al comportamiento de las baterías `Li-Ion` de múltiples celdas serie/paralelo, que se describen en 4.1.4.4. En el listado B.7 se tiene el código de este bloque funcional.

Block_Dizqah_BBOX5_100Ah.L1L2 En este bloque funcional se implementan las ecuaciones correspondientes al comportamiento de las baterías `LiFePo4`, que se describen en 4.1.4.6. En los listados B.8 y B.9 se tiene el código de este bloque funcional.

4.1.4.3. EnergyStorage.BatteryVconst

En esta clase base se contiene una definición simple de acumulador, que consiste en una batería de capacidad infinita, con tensión de salida constante, independientemente de la carga conectada. Se extiende del interface `SourceBase` presentado en 4.1.4.1. Está compuesta de un generador ideal de tensión del que se obtiene la tensión en bornes a través del interface eléctrico compuesto por los puertos `pin_p` y `pin_n`. En la figura 4.20 se puede ver el diagrama de esta clase base.

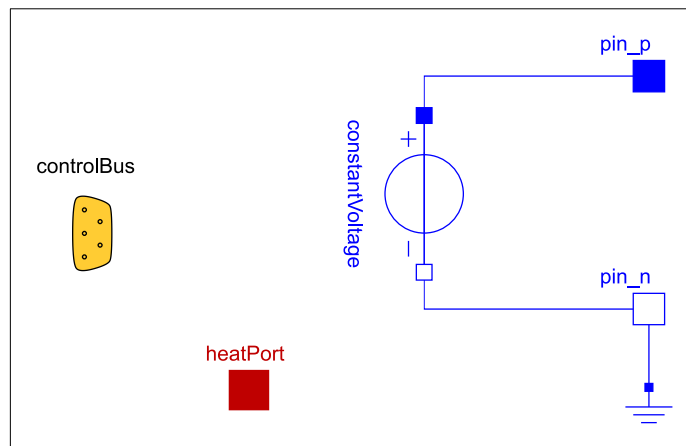


Figura 4.20

Diagrama de la clase base `EnergyStorage.BatteryVconst` de la librería VLDV.

4.1.4.4. `EnergyStorage.LiIonbattery_Dizqah_BBOX5_100Ah_SinDecay_LiIon`

En esta clase base se contiene el interfaz y la definición funcional de las baterías `Li-Ion`. En ella, a partir de sus parámetros característicos y del `SOC`, se obtiene la tensión en bornes a través del interface eléctrico compuesto por los puertos `pin_p` y `pin_n`. Se extiende del interface `SourceBase` mostrado en 4.1.4.1 e incluye como elemento más destacado el bloque funcional `Lion_blockDizqah`, instanciado del bloque funcional `Block_Dizqah_LiIon_BBOX5_100Ah_SinDecay` mostrado en 4.1.4.2. El bloque funcional descrito, se conecta a una fuente de tensión ideal para generar la tensión en bornes de la batería.

El modelo propuesto está basado en el trabajo de [123], por lo que mantiene sus mismas hipótesis y simplificaciones de modelado, compatibles con el objeto fundamental del presente trabajo, que es su utilización dentro del modelo multifísico completo del vehículo para desarrollar algoritmos de control y procedimientos de gestión de energía eficientes. Son las siguientes:

- La resistencia interna de la batería es un parámetro constante durante los ciclos de carga y descarga y no varía con la amplitud de la intensidad de corriente.
- Los parámetros obtenidos a partir de la curva de descarga de la batería, son válidos también para la curva de carga.
- La capacidad de la batería es un parámetro constante y no depende de la amplitud de la intensidad de corriente durante el experimento, no se considera que exista efecto *Peukert*. Si bien se trata de una limitación propia del modelo, es aceptable para el caso de las baterías `Li-Ion`, en las que la capacidad de la batería está poco influenciada por la intensidad de carga/descarga, tal como se puede encontrar en [72].
- La temperatura no afecta al comportamiento del modelo. Es una limitación propia del modelo que se considera aceptable para el propósito del mismo.
- El fenómeno de autodescarga de la batería no está modelado.
- No se contempla el efecto memoria de las baterías.

Una de las principales ventajas del modelo propuesto es que permite una determinación simple de sus parámetros, ya sea a partir de las características técnicas y gráficos de descarga

disponibles en la información comercial de la batería real, ya sea a partir de los experimentos en banco de pruebas sobre el componente real.

En la figura 4.21 se muestra el diagrama en *Dymola*[®] de esta clase base. El bloque funcional *Lion_blockDizqah* implementa el comportamiento propuesto, descrito en las ecuaciones (4.15) y (4.17). Este comportamiento responde a un sistema de ecuaciones *Hybrid Differential-Algebraic Equations - Sistema Híbrido de Ecuaciones Diferenciales y Algebraicas (HDAE)* (continuo-discretas), con dos (super) estados discretos representados en la FSM de la figura 4.22. Siendo i_{bat} la intensidad de corriente que fluye hacia la batería, el super-estado S_0 representa cualquiera de los subestados dentro del estado de descarga (descarga, sobredescarga y descarga plena), mientras que S_1 es el super-estado que representa cualquiera de los subestados de carga (carga, sobrecarga y saturación) [47]. Como estado inicial se asume el estado de descarga S_0 .

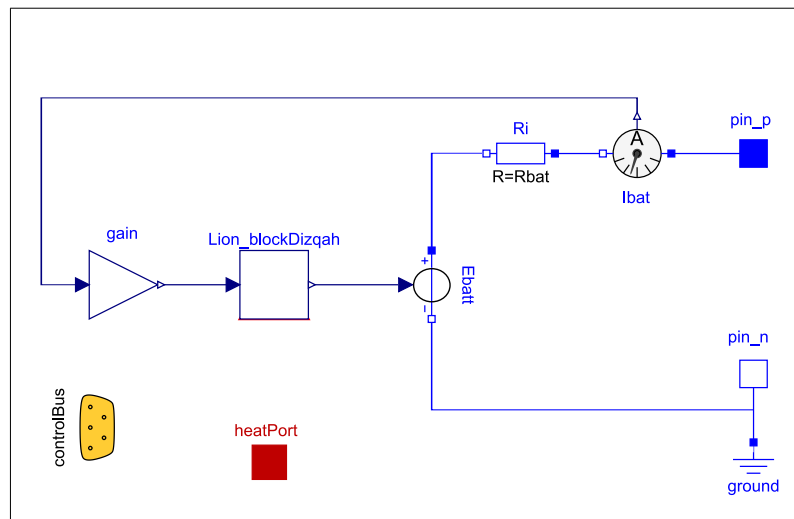


Figura 4.21

Diagrama de la clase base *LIonbattery_Dizqah_BB0X5_100Ah_SinDecay_LiIon* de la librería VLDV.

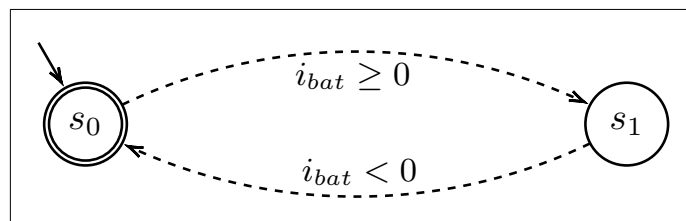


Figura 4.22

FSM que representa el comportamiento discreto de la batería. Dos estados: S_0 (descarga) y S_1 (carga) y condiciones para las transiciones.

Al implementar el sistema de ecuaciones en *Modelica*[®], resulta en un sistema *HDAE* [51] [19] con una variable de estado continua (it) y dos variables de estado discretas (S_0 y S_1). Cuando el *HDAE* se completa con una condición de contorno en forma de tensión eléctrica aplicada entre los conectores **pin_p** y **pin_n**, aparece un bucle algebraico de la forma $E_{bat}(i_{bat}) = 0$ que puede ser resuelto mediante iteración de la variable i_{bat} , a pesar del evento discreto generado por el paso por cero de la variable de iteración. El código generado por la herramienta *Dymola*[®] (3.4) resuelve este bucle algebraico sin problemas. La ecuación (4.19) permite el cálculo del valor del **SOC**.

$$E_{bat} = E_0 \cdot i_{bat} - L_1 \cdot K \frac{q_{Max}}{q_{Max} - it} \cdot it + R_p \cdot i_{bat} + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (4.15)$$

$$E_0(i_{bat}) = V_{Full} + K + R \cdot i_{bat} - A \quad (4.16)$$

$$R_p = \begin{cases} -L_2 \cdot K \frac{q_{Max}}{q_{Max} - it} & \text{si estado } S_0 \text{ (descarga)} \\ -L_2 \cdot K \frac{q_{Max}}{it - 0.1 \cdot q_{Max}} & \text{si estado } S_1 \text{ (carga)} \end{cases} \quad (4.17)$$

$$\frac{dit}{dt} = i_{bat} \quad (4.18)$$

$$SOC(\%) = 100 \frac{it}{q_{Max}} \quad (4.19)$$

Los parámetros A , B , q_{Max} y K son dependientes de otros según las ecuaciones (4.20)..(4.23), y que se detallan en la tabla 4.6. Los parámetros L_1 y L_2 se utilizan para dar coherencia dimensional a los términos de la ecuación (4.15) en que interviene K .

$$A = V_{Full} - V_{Exp} \quad (4.20)$$

$$B = \frac{3}{q_{Exp}} \quad (4.21)$$

$$q_{Max} = 1.05 \cdot rtdCap \quad (4.22)$$

$$K = \frac{(V_{Full} - V_{Nom} + Ae^{-(Bq_{Nom}-1)})(q_{Max} - q_{Nom})}{q_{Nom}} \quad (4.23)$$

Tal como se indica en [123], la determinación de los parámetros básicos de la batería (v_{Full} , v_{Exp} , q_{Exp} , v_{Nom} , q_{Nom}), se lleva a cabo mediante la identificación sobre la gráfica de descarga, de los puntos singulares correspondientes a la máxima carga, el fin de la zona exponencial y el fin de la zona nominal. En la Figura 4.23, se muestran los referidos puntos singulares y los parámetros básicos sobre la gráfica de descarga. Los parámetros básicos $rtdCap$ y R , se obtienen a partir de las especificaciones técnicas de la batería. El parámetro $SOC_{inicial}$, indica el nivel de carga de partida de la batería. El resto de parámetros (A , B , q_{Max} , K), se obtienen a partir de los parámetros básicos mediante las ecuaciones anteriores. Los parámetros de ajuste dimensional L_1 y L_2 , toman de valor la unidad. La extracción de parámetros desde las gráficas, se ha realizado con la ayuda de la herramienta *ScanIT* [127].

4.1.4.5. EnergyStorage.Lionbattery_Dizqah_Nueva_Lim_NE_5

En esta clase base se contienen el interfaz y la definición funcional de las baterías **Li-Ion** de celda única. En ella, como en la clase base anterior mostrada en 4.1.4.4, a partir de sus parámetros característicos y del **SOC**, se obtiene la tensión en bornes a través del interface eléctrico compuesto por los puertos **pin_p** y **pin_n**. Se extiende del interface **SourceBase** mostrado en 4.1.4.1 e incluye como elemento más destacado el bloque funcional **Lion_blockDizqah**, instanciado del bloque funcional **BlockDizqah_Lion_ibatCorregido_limiter_iBatFiltered_5** mostrado en 4.1.4.2. El bloque funcional descrito, se conecta a una fuente de tensión ideal para generar la tensión en bornes de la batería.

Tabla 4.6
Parámetros y variables principales del modelo de la clase base
`EnergyStorage.LIonbattery_Dizqah_BBOX5_100Ah_SinDecay_LiIon`.

Nombre	Descripción	Par. Var.	Unid.
E_{bat}	Tensión en bornes de la batería	V	V
A	Amplitud de la zona exponencial en voltios	P	V
B	Inversa de constante de tiempo de zona exponencial	P	Ah^{-1}
q_{Max}	Capacidad máxima de la batería	P	Ah
K	Tensión de polarización	P	V
E_0	Tensión de referencia de la batería	V	V
R	Resistencia interna de la batería	P	Ω
i_{bat}	Intensidad de corriente hacia la batería	V	A
it	Valor integrado de la intensidad, carga acumulada	V	Ah
R_p	Resistencia de polarización de la batería	V	Ω
SOC	Estado de carga de la batería	V	%
v_{Full}	Tensión de la batería a plena carga	P	V
v_{Exp}	Tensión de la batería al final de la zona exponencial	P	V
q_{Exp}	Carga de la batería al final de la zona exponencial	P	Ah
v_{Nom}	Tensión de la batería al final de la zona nominal	P	V
q_{Nom}	Carga de la batería al final de la zona nominal	P	Ah
$rtdCap$	Capacidad nominal de la batería	P	Ah
L_1	Ajuste dimensional tensión polarización	P	Ah^{-1}
L_2	Ajuste dimensional resistencia polarización	P	A^{-1}
$SOC_{inicial}$	Estado de carga inicial de la batería	P	%

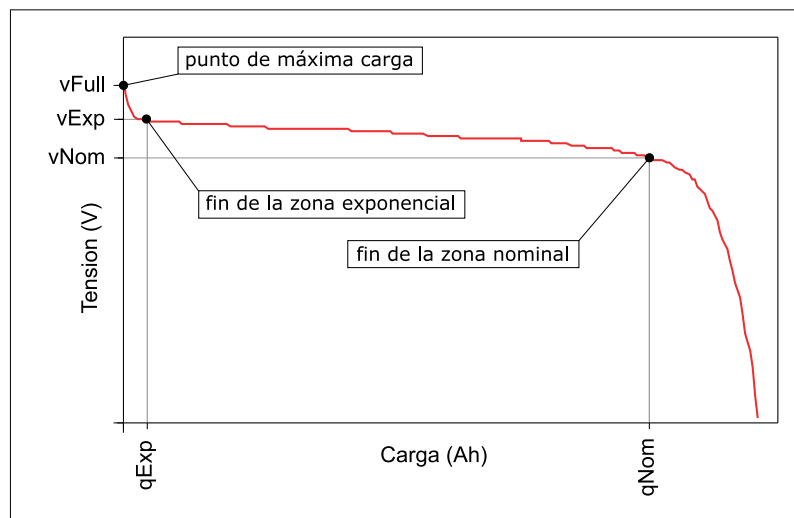


Figura 4.23

Determinación de los parámetros básicos de la batería sobre la gráfica de descarga.

4.1.4.6. `EnergyStorage.LIonbattery_Dizqah_BBOX5_100Ah_L1L2`

En esta clase base se contiene el interfaz y la definición funcional de las baterías [LiFePo4](#). Como en la clase base anterior mostrada en [4.1.4.4](#), a partir de sus parámetros característicos y del [SOC](#), se obtiene la tensión en bornes a través del interface eléctrico compuesto por los puertos `pin_p` y `pin_n`.

Se extiende del interface `SourceBase` mostrado en [4.1.4.1](#) e incluye como elemento más

destacado el bloque funcional `LiFePo_blockDizqah`, instanciado del bloque funcional `Block_Dizqah_BBOX5_100Ah_L1L2` presentado en 4.1.4.2. El bloque funcional descrito se conecta a una fuente de tensión ideal para generar la tensión en bornes de la batería. En la figura 4.24 se muestra el diagrama eléctrico de esta clase base.

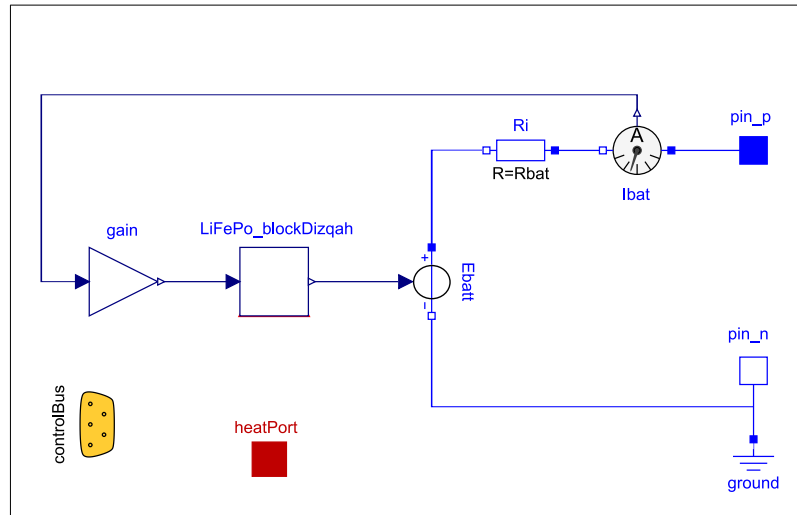


Figura 4.24

Diagrama de la clase base `LIonbattery_Dizqah_BBOX5_100Ah_L1L2` de la librería VLDV.

Esta clase base parte de las ecuaciones vistas en la anterior sección 4.1.4.4, pero complementadas y particularizadas para el comportamiento específico de las baterías `LiFePo4`.

En la bibliografía [22], [102] se hace referencia a observaciones de un comportamiento experimental particular en baterías `LiFePo4` y que el modelo genérico anteriormente presentado en 4.1.4.4 no describe. El comportamiento particular se puede apreciar en la aparición de dos zonas tensión extremadamente planas coincidiendo con los valores de 30-60% y 80-90% SOC de la batería, debidas a las fases de intercalación/desintercalación del Litio y que se encuentran separadas por una fase de decaimiento de la tensión. La forma del decaimiento sugiere una gráfica similar a la de la ecuación (4.24), que se muestra en la Figura 4.25.

$$y = \frac{-x}{\sqrt{x^2 + M}} \quad (4.24)$$

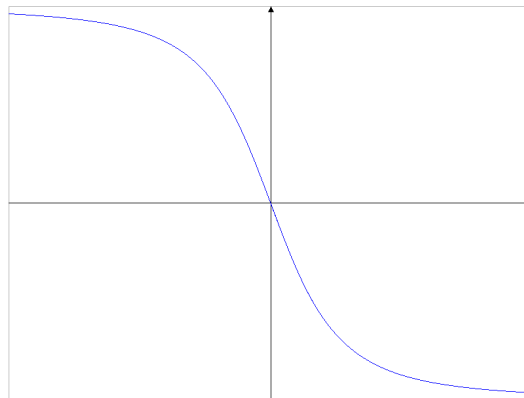


Figura 4.25

Gráfica de la ecuación (4.24).

Se propone por tanto una variación del modelo inicial basado en la ecuación (4.15), que permite modelar el comportamiento particular encontrado en las baterías LiFePo4, que responde a la ecuación (4.25) y que supone una de las contribuciones publicadas del presente trabajo.

La modificación propuesta, consiste en añadir a la ecuación (4.15) un nuevo término D , que representa el decaimiento de la tensión en bornes característico de este tipo de baterías, que responde a la ecuación (4.26), que ha sido obtenida de la manipulación de la ecuación (4.24) y que necesita de la determinación de una serie de puntos singulares sobre la curva de descarga, coincidiendo con el decaimiento.

Los puntos singulares adicionales considerados necesarios para la determinación de D se señalan en la figura 4.26, que representa la gráfica de descarga experimental del bloque de baterías B-Box 5.0 tipo LiFePo4. En la sección 3.8 se tienen los detalles del banco de ensayos utilizado.

La lista de parámetros y variables adicionales necesarios se detallan en la tabla 4.7.

Tabla 4.7
Parámetros y variables adicionales para el cálculo del decaimiento de la clase base
`EnergyStorage.LIonbattery_Dizqah_BB0X5_100Ah_lim_1_L1L2`.

Nombre	Descripción	Par. Var.	Unid.
D	Decaimiento de la tensión en bornes de las baterías LFP	V	V
v_{d0}	Tensión en bornes de la batería al inicio del decaimiento	P	V
q_{d0}	Carga de la batería al inicio del decaimiento	P	Ah
v_{d1}	Tensión en bornes de la batería al final del decaimiento	P	V
q_{d1}	Carga de la batería al final del decaimiento	P	Ah
Q	Carga restante en la batería	V	Ah

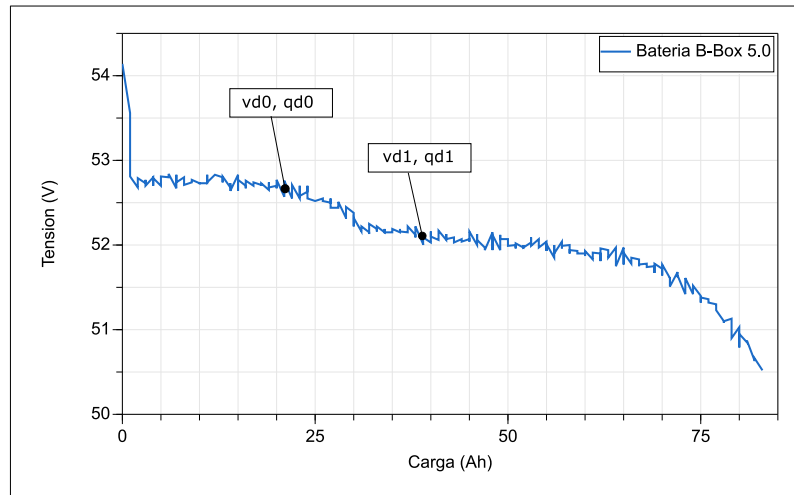


Figura 4.26

Puntos de inicio y fin del decaimiento de la gráfica de descarga para una intensidad de 20 A (0.2C).

$$E_{bat} = E_0(i_{bat}) - K \frac{q_{Max}}{q_{Max} - it} it + R_p i_{bat} + A e^{-B \cdot it} - D \quad (4.25)$$

En la que,

$$D = -N + \left(\frac{-N(Q - P)}{\sqrt{|M + (Q - P)^2|}} \right) \quad (4.26)$$

$$N = \frac{v_{d0} - v_{d1}}{2} \quad (4.27)$$

$$P = \frac{q_{d1} + q_{d0}}{2} \quad (4.28)$$

$$M = \frac{M_0 + M_1}{2} \quad (4.29)$$

$$M_0 = \left| \left(-\frac{N(q_{d0} - P)}{v_{d0} + N} \right)^2 - (q_{d0} - P)^2 \right| \quad (4.30)$$

$$M_1 = \left| \left(-\frac{N(q_{d1} - P)}{v_{d1} + N} \right)^2 - (q_{d1} - P)^2 \right| \quad (4.31)$$

4.1.5. VLDV.BaseClass.EnergyBus

En este subpaquete se han definido los interfaces y las clases base de los subsistemas que componen el bus de energía del vehículo. Dentro de la librería [VLDV](#), los subsistemas del bus de energía, se utilizan para modelizar el comportamiento de los distintos elementos componentes del bus o red de energía del vehículo. Está compuesto principalmente por los convertidores de tensión, encargados de servir de interfaz entre los distintos elementos generadores y consumidores del vehículo y la red de distribución de energía interna del mismo. Este bus de energía, que constituye la parte fundamental del [SEH](#), es el núcleo en el que se basa el control de operación del vehículo desde el punto de vista del balance energético. A él se podrán aplicar los distintos algoritmos de gestión y control energético de operación del vehículo.

Si bien la librería [MSL](#) dispone de los modelos de convertidor [ChopperStepDown](#), [ChopperStepUp](#) y [HBridge](#) dentro del subpaquete [Electrical.PowerConverters.DCDC](#), se trata de modelos extremadamente simples que no definen el comportamiento del condensador y la bobina propios de este tipo de convertidores. Estos modelos no disponen tampoco de los interfaces normalizados que propone la librería [VI](#) para asegurar la compatibilidad con otras librerías de automoción basadas en ella. La librería [VI](#) propiamente dicha, tampoco dispone de definiciones de convertidores de tensión. Se plantea por tanto la necesidad de disponer de un nuevo paquete que contenga las clases base, bloques funcionales y componentes que definan adecuadamente los diferentes tipos de convertidor que se conectan al bus y que sirven de interfaz de los diferentes sistemas fuente y sumidero de energía conectados al mismo. Estos componentes deben disponer del necesario nivel de abstracción para permitir, por una parte una rápida simulación y por otra la correcta simulación del comportamiento real de los mismos.

Tal como se expone más adelante, el tamaño de los componentes del convertidor está inversamente relacionado con la frecuencia de conmutación, lo que hace que estos equipos deban trabajar a elevadas frecuencias, provocando simulaciones extremadamente lentas a causa de la elevada carga computacional que provoca el cambio de estructura (sistema de ecuaciones) a cada conmutación. Dado que en el conjunto del vehículo se pueden tener varios convertidores, es necesario desarrollar una solución alternativa al modelo de convertidor convencional conmutado ([Switched Model in Modelica - Modelo Conmutado de Componentes](#)

en Modelica (SWM)), que permita una adecuada simulación del vehículo completo. En la figura 4.27 se pueden ver las clases incluidas en este subpaquete.

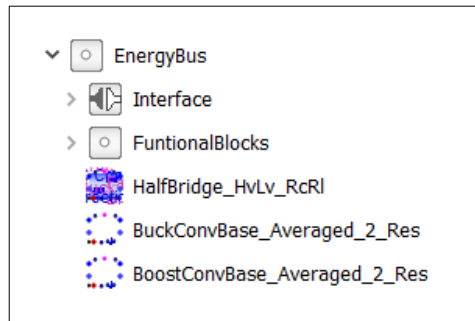


Figura 4.27

Clases base del subpaquete `BaseClass.EnergyBus` de la librería VLDV.

Partiendo de la idea de un SEH [65], que comprende todos los elementos del EV capaces de generar o consumir energía, y una vez disponibles los modelos de cada uno de ellos, se puede realizar la simulación dinámica del vehículo completo, al objeto de evaluar y optimizar los algoritmos de control y de gestión inteligente de energía implementados. Finalmente se puede analizar el balance energético y de actuaciones del vehículo bajo distintos escenarios y configuraciones. Estos resultados se pueden contrastar con los obtenidos en otras configuraciones propuestas por distintos autores. La idea del SEH se corresponde con una arquitectura descentralizada del sistema de alimentación eléctrica del vehículo, en el que los distintos subsistemas se conectan a un bus intermedio (DC-Link / Alternating Current Link - Bus de Conexión de Corriente Alterna (AC-Link)), bien directamente o a través de un convertidor de entrada, de salida o de entrada/salida; estos convertidores se ubican habitualmente junto a su componente o se integran en él para aportar modularidad. Las ventajas de esta configuración se comentan con más detalle en [88]. Como casi todos los componentes del SEH necesitan de un convertidor de tensión que adapte la tensión del bus de energía al nivel demandado por el componente o viceversa, estos juegan un papel muy importante en la operación del vehículo y en su gestión energética. Por tanto, el modelo dinámico de los convertidores además de fiable, debe permitir la simulación del vehículo completo en unos tiempos razonables.

De entre los distintos tipos de convertidores de tensión CC-CC existentes, para el presente trabajo se han elegido los del tipo PWM que han sido profusamente utilizados en las últimas décadas para amplios rangos de potencia de salida. Estos convertidores son particularmente ventajosos debido a su reducido número de componentes, alta eficiencia, operación a frecuencia constante, control relativamente simple y la posibilidad de alcanzar elevados ratios de conversión tanto en elevación como en reducción de tensión. Como desventaja principal se tienen las pérdidas de eficiencia ligadas a la conmutación, que limitan la frecuencia máxima de operación del convertidor. En [36] se describen las topologías más frecuentes de convertidor PWM CC-CC y se presentan las ecuaciones características que permiten la determinación de las especificaciones de sus componentes. De entre estas topologías cabe destacar el *basic converter* (convertidor reductor/elevador no aislado) y el *flyback* (convertidor reductor/elevador aislado, en versión mono y bidireccional). En [30] se muestra cómo el uso de convertidores con dos interruptores comandados independientemente reduce el stress en los componentes respecto a los de un solo interruptor, ya sea en su versión reductor, elevador o reductor/elevador. En [28] se comparan dos topologías diferentes de convertidor bidireccional no aislado (reductor/elevador bidireccional y reductor-elevador bidireccional en cascada); el estudio concluye que la topología en cascada tiene un menor stress térmico y eléctrico, y que a pesar de tener un mayor número de componentes, el menor tamaño requerido para la bobina y condensadores compensa sobradamente. Esta topología de convertidor bidireccional reductor/elevador no aislado en cascada es propuesta en otros trabajos

como [68], que presenta un convertidor reductor-elevador bidireccional no aislado con tres conmutadores y conexión en cascada para aplicación en la gestión energética de baterías en sistemas de alimentación ininterrumpida; [111] que propone un convertidor síncrono reductor/elevador unidireccional para su aplicación en un sistema de gestión de carga de baterías mediante energía solar; [73] que propone un convertidor reductor/elevador bidireccional de cuatro cuadrantes para su uso en EVs; [71] que propone un convertidor unidireccional reductor/elevador para uso en FCHEVs; [15] que presenta una topología similar, aunque no bidireccional para su uso como sistema MPPT en una instalación fotovoltaica. En [107] se lleva a cabo un estudio comparativo entre varias topologías de convertidor CC-CC bidireccional no aislado para su uso en HEVs.

De entre los distintos convertidores que se agrupan en el SEH, tienen una especial relevancia en las prestaciones del vehículo los utilizados por la batería y el motor de tracción, puesto que a través de ellos fluye el mayor nivel de energía durante su operación. Ambos componentes pueden funcionar como consumidores/fuentes según las condiciones de uso del vehículo, por lo que el convertidor seleccionado debe ser bidireccional. En función de la tensión nominal del bus y de la batería, la conexión de la batería al SEH puede ser directa, por lo que el presente trabajo se centra en el convertidor bidireccional del motor, si bien se presentan los modelos de convertidores de otros subsistemas conectados al SEH, como el panel fotovoltaico y los accesorios.

Para el presente trabajo se propone una versión simplificada del convertidor reductor/elevador en cascada conocida como NHBBC, que añade a las virtudes del convertidor en cascada, la ventaja de disponer de menos componentes electrónicos, siendo de aplicación para aquellos casos en los que no es necesario conmutar entre los modos reductor/elevador en un mismo sentido de flujo de energía. Esta topología es la elegida por [79] y [78] para aplicaciones similares.

Los convertidores PWM CC-CC mencionados anteriormente son sistemas conmutados, que requieren para su simulación de un mecanismo robusto para la detección de eventos y relanzamiento de simulación a cada conmutación. Este mecanismo, que está eficientemente implementado en Dymola[®], consume sin embargo una gran cantidad de recursos de computación, lo que supone unos tiempos de simulación excesivamente elevados, incluso en el caso de simular el comportamiento de solamente una o dos instancias del modelo de convertidor CC-CC conmutado SWM, de los múltiples que pueden componer el SEH. Con el objetivo de reducir estos tiempos de simulación, se han desarrollado los *modelos linealizados de tiempo continuo*.

A partir del modelo de convertidor CC-CC conmutado (SWM) del tipo NHBBC compuesto por componentes estándar de la MSL, se deriva un modelo *Linearized Model in Modelica - Modelo Linealizado en Modelica (LZM)* de tiempo continuo, promediando la dinámica variable del convertidor a lo largo del tiempo de ciclo de conmutación. Al objeto de la validación del modelo LZM, se comparan los resultados de la simulación de ambos modelos en unas mismas condiciones de contorno, tanto en condiciones estabilizadas como bajo una serie de perturbaciones en la alimentación de entrada del convertidor.

El convertidor tipo NHBBC tiene la capacidad de operar en modo bidireccional, de tal modo que en un sentido opera solamente en modo **Elevador** y en el inverso solamente en modo **Reductor**:

- Modo **Elevador** o modo **Boost**. En este modo, la tensión continua de entrada al convertidor es elevada hasta una tensión continua de mayor valor a la salida del convertidor.
- Modo **Reductor** o modo **Buck**. En este modo, la tensión continua de entrada al convertidor es reducida hasta una tensión continua de menor valor a la salida del convertidor.

4.1.5.1. EnergyBus.Interface

En este subpaquete se han definido las clases base de los interfaces comunes a los distintos subsistemas del bus de energía. Las clases base de este subpaquete contienen los siguientes conectores, algunos de los cuales son opcionales:

- `controlBus` Conexión al bus de señales de control.
- `pin_p` Conector eléctrico signo positivo.
- `pin_n` Conector eléctrico signo negativo.
- `dutyCycle` Conector de señal del valor del intervalo de tiempo D (Figura 4.30).
- `converterMode` Conector binario para cambio de modo del convertidor bidireccional (opcional).
- `heatPort` Puerto de conexión para la evacuación de calor (opcional).

EnergyBus.Interface.VoltajeConversionBase_Duty_Mode Esta clase base contiene la definición de interfaz mínimo básico de cualquier sistema de conversión de tensión bidireccional conectado al bus. También ha sido utilizada como interfaz para otros convertidores de tensión unidireccionales que implementan funciones específicas, como algoritmos **MPPT**.

EnergyBus.Interface.VoltConvBase_BuBo_Duty_Mode Esta clase base contiene una definición de interfaz similar a la anterior, que se utiliza para encapsular otras definiciones de interfaz y armonizar la definición de los conectores de alta y baja tensión del convertidor. En la figura 4.28 se puede ver el diagrama en **Dymola**[®] de este interfaz.

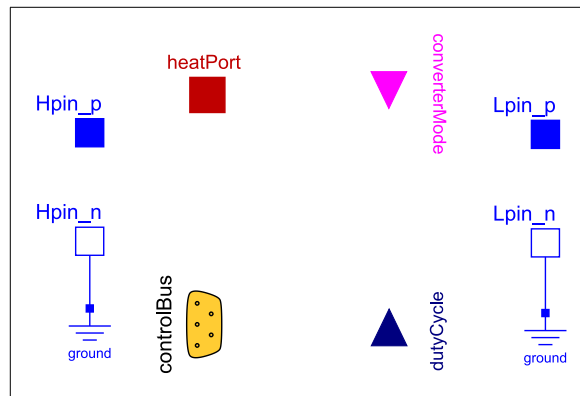


Figura 4.28

Diagrama de la clase base `EnergyBus.Interface.VoltConvBase_BuBo_Duty_Mode` de la librería VLDV.

4.1.5.2. EnergyBus.FuntionalBlocks

En este subpaquete se han definido los bloques funcionales necesarios para la adecuada implementación de las clases base de los distintos subsistemas del bus de energía.

FuntionalBlocks.BoostAveragedModel_2 En este bloque funcional se implementan las ecuaciones correspondientes a la linealización del convertidor **CC-CC** del tipo **NHBBC** en modo **Boost** que se describe en 4.1.5.4. En el listado B.10 se tiene el código en **Modelica**[®] de este bloque funcional.

FunctionalBlocks.BuckAveragedModel_2 En este bloque funcional se implementan las ecuaciones correspondientes a la linealización del convertidor **CC-CC** del tipo **NHBBC** en modo **Buck** que se describen en 4.1.5.5. En el listado B.11 se tiene el código en **Modelica**[®] de este bloque funcional.

FunctionalBlocks.dP_PandO_2 Para poder hacer un uso eficiente del **PVP** como sistema de alimentación de energía, es necesario implementar algún algoritmo **MPPT** en el control de su convertidor de salida que le permita funcionar en todo momento en su punto de máxima potencia.

De entre los distintos algoritmos disponibles [84] [54] en este bloque funcional se implementa un algoritmo **MPPT**, del tipo **Perturb and Observe - Perturba y Observa (P&O)**, por ser uno de los más comúnmente reportados en la literatura; se trata de un método de optimización matemática de **Escalada Simple** o de **Ascenso de Colinas** que permite la búsqueda de máximos locales. Su uso se ha extendido debido a que su implementación es simple, con una baja carga computacional, lo que lo hace adecuado en microcontroladores, microprocesadores y **Digital Signal Processor - Procesador Digital de Señales (DSPs)**.

Uno de los inconvenientes conocidos del algoritmo **P&O** es que se puede confundir y buscar en la dirección errónea cuando se producen cambios repentinos de radiación debidos, por ejemplo, a la aparición de nubes o al paso bajo sombras. Esto suele ocurrir cuando el cambio de radiación entre dos muestras consecutivas provoca un cambio de potencia de salida superior al provocado por el incremento de tensión del **MPPT**; en este caso el algoritmo es incapaz de decidir si el cambio es producido por el propio cambio de tensión o por el cambio de la radiación.

En [109] [110] se propone una solución simple y efectiva, con una versión optimizada del algoritmo **P&O** denominada **dP-P&O**, que consiste en separar los cambios de potencia debido a la radiación, de los debidos a la perturbación de tensión, introduciendo una medida intermedia de la potencia de salida entre dos perturbaciones consecutivas.

En este bloque funcional se implementa una versión modificada y optimizada del algoritmo **dP-P&O**. Se consigue un comportamiento aún más rápido, disminuyendo el número de muestras y una frecuencia de muestreo más baja, a costa de utilizar entradas filtradas en lugar de los valores medios del algoritmo original.

4.1.5.3. **EnergyBus.HalfBridge_HvLv_RcRl**

Tal como se ha indicado en 4.1.5, la topología seleccionada es la del convertidor **NHBBC**. Este tipo de convertidor se obtiene de la conexión en anti-paralelo de dos convertidores **CC-CC** básicos, uno **Buck** y otro **Boost** y añade la capacidad de obtener un flujo de energía bidireccional [107]. De esta manera, es posible un funcionamiento en modo **Boost** en un sentido de operación y en modo **Buck** en el contrario. Además, los convertidores no aislados son más ligeros y compactos que sus equivalentes aislados a consecuencia de la ausencia de transformador de aislamiento. En [107] se hace una comparativa entre distintas topologías concluyendo que los **NHBBC**, con respecto a sus alternativas, tienen un menor número de componentes, un menor stress en ellos y unas menores pérdidas, lo que los convierte en la mejor alternativa para su uso en **ULEVs**.

En esta clase base se contienen el interfaz y la definición funcional de este tipo de convertidores conmutados. En ella, a partir de la tensión aplicada en los bornes de entrada, del valor aplicado en el conector **dutyCycle** y del modo de funcionamiento seleccionado en el conector **converterMode**, se obtiene un valor de tensión de salida a través del interface eléctrico compuesto por los puertos **pin_p** y **pin_n**. Se extiende del interface **VoltConvBase_BuBo_Duty_Mode** mostrado en 4.1.5.1. En la figura 4.29 se puede ver el diagrama simplificado en **Dymola**[®] de esta clase base.

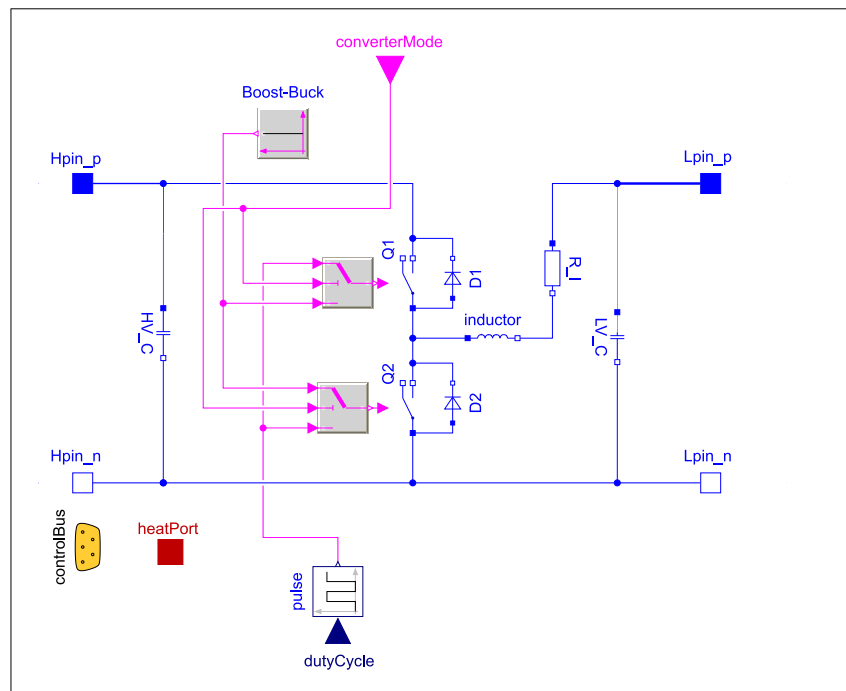


Figura 4.29

Diagrama simplificado de la clase base `EnergyBus.HalfBridge_HvLv_RcRl` de la librería VLDV.

4.1.5.4. `EnergyBus.BoostConvBase_Averaged_2_Res`

En esta clase base se contienen el interfaz y la definición funcional del convertidor **CC-CC** del tipo **NHBBC**, linealizado en configuración **Boost**, correspondiente a la clase base `HalfBridge_HvLv_RcRl` vista anteriormente en 4.1.5.3.

En esta clase, a partir de la tensión aplicada en los bornes de entrada y del valor aplicado en el conector `dutyCycle`, se obtiene un valor de tensión de salida a través del interface eléctrico compuesto por los puertos `pin_p` y `pin_n`. Se extiende del interface `VoltageConversionBase_Duty_Mode` mostrado en 4.1.5.1 e incluye como elemento más destacado el bloque `averagedModel`, instanciado del bloque funcional `BoostAveragedModel_2` presentado en 4.1.5.2 y que implementa las ecuaciones del modelo linealizado.

Tal como se expuso en 4.1.5, y según [64], la utilización de modelos **SWM** conllevan unos elevados tiempos de simulación. Es necesario disponer por tanto de modelos dinámicos equivalentes que permitan la simulación en unos tiempos razonables, con una precisión adecuada, válidos para operación en modo **Boost**.

En [89] y [35] se propone una metodología que permite el modelado de convertidores de tensión conmutados en forma de sistemas lineales representados en espacios de estados, basada en la descripción del circuito resultante en cada estado del convertidor. En la tesis de Cuk [35], parte 1: “Continuous conduction mode”, capítulo 3: “State space averaging, hybrid modeling and circuit averaging”, se obtienen las ecuaciones necesarias para la linealización. En primer lugar, se desarrolla un método general para el promediado de los sistemas de espacios de estados resultantes de cada uno de los circuitos resultantes de la conmutación para cualquier tipo de convertidor conmutado **CC-CC**, particularizándolo posteriormente para el caso específico de un convertidor **Boost**, incluyendo los efectos parásitos del condensador y de la bobina. Las ecuaciones obtenidas representan tanto el comportamiento estático como el dinámico del convertidor y de ellas se derivan las funciones de transferencia, aplicadas para el caso especial del convertidor **Boost**.

El funcionamiento básico de este tipo de convertidores conmutados **CC-CC** se basa en la rápida conmutación entre los dos circuitos resultantes de la apertura y cierre de los interruptores. Asumiendo que el convertidor funciona siempre en modo **Continuous Conduction Mode - Modo de Conducción Continua (CCM)**, en el que la intensidad instantánea del inductor nunca cae a 0 en ningún momento del ciclo, solo hay dos diferentes “estados” del circuito. En la figura 4.30 se tiene una representación en tiempo continuo del estado del interruptor a lo largo de un ciclo completo de conmutación.

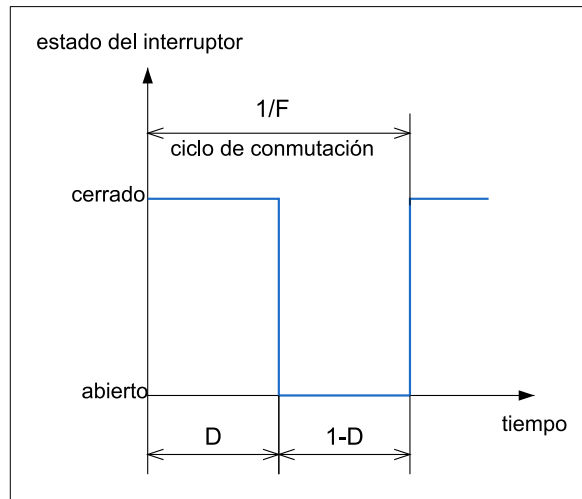


Figura 4.30

Definición de los intervalos de conmutación D y $1-D$.

A cada uno de estos tiempos corresponde una configuración del circuito y por tanto sus propias ecuaciones de estado, que serán, para el intervalo (D) las ecuaciones (4.32, 4.33) y para el intervalo ($1 - D$) las ecuaciones (4.34, 4.35):

$$\dot{x} = A_1 \cdot x + b_1 \cdot V_{in} \quad (4.32)$$

$$y_1 = c_1^T \cdot x \quad (4.33)$$

$$\dot{x} = A_2 \cdot x + b_2 \cdot V_{in} \quad (4.34)$$

$$y_2 = c_2^T \cdot x \quad (4.35)$$

donde,

- V_{in} , tensión en bornes de entrada

Se toman como variables de estado, la tensión en bornes del condensador (V_c) y la intensidad de corriente que fluye por la bobina (i_L). El número total de elementos capaces de almacenar energía determinan el orden del sistema, por lo que el convertidor **NHBBC** es un sistema de segundo orden tanto en su configuración **Boost** como en **Buck**.

Una vez obtenidas las descripciones en el espacio de estados correspondientes a cada uno de los dos estados posibles del convertidor durante el ciclo de funcionamiento en modo **CCM**,

se reemplazan por una única descripción del espacio de estados que representa, de forma aproximada, el comportamiento del circuito a lo largo de todo el tiempo de ciclo. Esto se consigue obteniendo un circuito equivalente que presenta un comportamiento promediado según el procedimiento indicado en [64].

El convertidor **NHBB** propuesto, funciona en un sentido del flujo de potencia como convertidor **Boost** y en el sentido contrario como **Buck**, por lo que será necesario disponer de dos modelos linealizados, uno para cada una de las configuraciones.

Linealización en modo Boost. Partiendo de la configuración del circuito en modo **Boost** de la figura 4.36, en [89], [35] y [64] se pueden obtener las ecuaciones en el espacio de estados promediadas (4.36), correspondientes al convertidor **Boost**:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A \cdot x + b \cdot V_{in} \\ x &= \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \\ y &= c^T \cdot x \\ y &= [V_o] \end{aligned} \quad (4.36)$$

donde,

- V_o , tensión en bornes de salida.
- i_L , intensidad de corriente a través de la bobina.
- V_c , tensión en bornes del condensador.

Los coeficientes promediados son:

$$\begin{aligned} A &= D \cdot A_1 + (1 - D) \cdot A_2 \\ b &= D \cdot b_1 + (1 - D) \cdot b_2 \\ c^T &= D \cdot c_1^T + (1 - D) \cdot c_2^T \end{aligned} \quad (4.37)$$

que se obtienen a partir de los coeficientes de cada estado del circuito:

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} -\frac{R_l}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{(R+R_c)C} \end{bmatrix} \\ A_2 &= \begin{bmatrix} -\frac{R_l+R_c \parallel R}{L} & -\frac{R}{L(R+R_c)} \\ \frac{R}{(R+R_c)C} & -\frac{1}{(R+R_c)C} \end{bmatrix} \\ b_1 = b_2 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \\ c_1^T &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{R}{R+R_c} \end{bmatrix} \\ c_2^T &= \begin{bmatrix} R \parallel R_c & \frac{R}{R+R_c} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.38)$$

donde:

$$\frac{1}{R_c \parallel R} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R} \quad (4.39)$$

En [35] y [13] se encuentra la ecuación (4.40) que relaciona la intensidad de corriente en bornes de entrada (I_{in}) y salida (I_o) del convertidor:

$$I_{in} = D \cdot I_o \quad (4.40)$$

Las ecuaciones anteriores han sido agrupadas en el bloque funcional **Boost**, instanciado del bloque funcional **BoostAveragedModel_2** expuesto en 4.1.5.2. En la figura 4.31 se puede ver el diagrama simplificado de esta clase base.

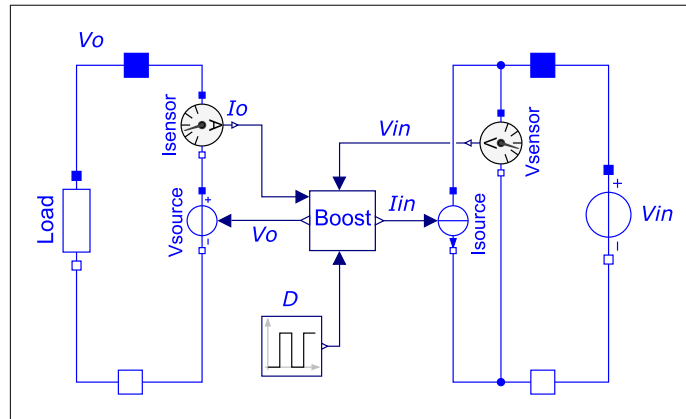


Figura 4.31

Diagrama de la clase base `EnergyBus.BoostConvBase_Averaged_2_Res` de la librería VLDV.

4.1.5.5. `EnergyBus.BuckConvBase_Averaged_2_Res`

En esta clase base se contienen el interfaz y la definición funcional del convertidor CC-CC tipo **NHBBC**, linealizado en configuración **Buck**, correspondiente a la clase base `HalfBridge_HvLv_RcRl` vista anteriormente en 4.1.5.3.

En esta clase, a partir de la tensión aplicada en los bornes de entrada y del valor aplicado en el conector `dutyCycle`, se obtiene un valor de tensión de salida a través del interfaz eléctrico compuesto por los puertos `pin_p` y `pin_n`. Se extiende del interface `VoltajeConversionBase_Duty_Mode` mostrado en 4.1.5.1 e incluye como elemento más destacado el bloque `averagedModel`, instanciado del bloque `BuckAveragedModel_2` expuesto en 4.1.5.2 y que implementa las ecuaciones del modelo linealizado.

Tal como se expuso en 4.1.5, y según [64], la utilización de modelos **SWM** conllevan unos elevados tiempos de simulación. Es necesario disponer por tanto de modelos dinámicos equivalentes que permitan la simulación en unos tiempos razonables, con una precisión adecuada, válidos para operación en modo **Buck**.

Linealización en modo Buck. En este caso, partiendo de la configuración del circuito en modo **Buck** de la figura 4.37, en [60] se pueden obtener los coeficientes para cada estado del circuito (4.41), añadiendo el efecto de las resistencias parásitas como en el caso del modo **Boost**. A continuación se pueden obtener los coeficientes promediados (4.37) y las ecuaciones de estados promediadas (4.36) correspondientes al convertidor **Buck** [64]:

$$\begin{aligned}
 A_1 = A_2 &= \begin{bmatrix} -\frac{R_l + R_c \parallel R}{L} & -\frac{R}{L(R + R_c)} \\ \frac{R}{(R + R_c)C} & -\frac{1}{(R + R_c)C} \end{bmatrix} \\
 b_1 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \\
 b_2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 c_1^T = c_2^T &= \left[R \parallel R_c \quad \frac{R}{R + R_c} \right]
 \end{aligned} \tag{4.41}$$

Tal como en el caso del modelo linealizado en modo **Boost**, estas ecuaciones han sido agrupadas en el bloque funcional **Buck**, instanciado del bloque funcional **BuckAveragedModel_2** presentado en 4.1.5.2. En la figura 4.32 se puede ver el diagrama simplificado de esta clase base.

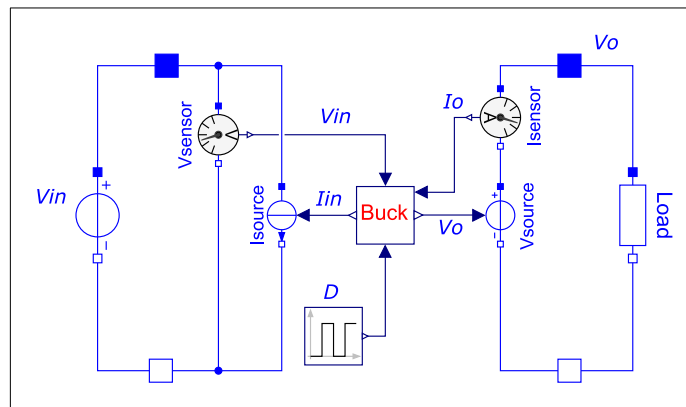


Figura 4.32

Diagrama de la clase base `EnergyBus.BuckConvBase_Averaged_2` de la librería VLDV.

4.1.6. VLDV.BaseClass.TractionMotor

En este subpaquete se han definido los interfaces, las clases base y los subcomponentes correspondientes a los motores de tracción y recuperación de energía del vehículo. Para el propósito del presente trabajo ha sido necesario definir el modelo de motor correspondiente al vehículo ligero a simular. La librería **MSL** de **Modelica**[®] no dispone de los modelos de motor **CC** necesarios para simular el tipo de motor usado en el vehículo ligero presentado en 5.4, ni tiene definido el interfaz normalizado de **VI**. Por su parte, la librería **VI** dispone del modelo `VehicleInterfaces.ElectricDrives.SimpleMotorDC` que incorpora el componente `Electrical.Analog.Basic.EMF` de la **MSL**, que no da el resultado esperado, puesto que define una sola constante común para relacionar la velocidad de giro con la tensión en bornes y la intensidad consumida con el par en el eje de salida. Se plantea por tanto la necesidad de definir para este trabajo las clases base y componentes necesarios para la simulación del tipo de motor utilizado (o a utilizar en otros vehículos), teniendo en cuenta de forma independiente tanto la relación entre tensión de alimentación y velocidad de giro, como la relación entre intensidad de alimentación y par de salida en el eje motor.

4.1.6.1. TractionMotor.Interface

En este subpaquete se han definido las clases base de los interfaces comunes a las distintas tecnologías de motor utilizadas. Para el caso que nos ocupa, referente al motor **CC**, el interfaz de interés es el **BaseDCMotor_MB**, compuesto por los siguientes conectores, algunos de los cuales son opcionales:

- **controlBus** Conexión al bus de señales de control.
- **pin_p** Conector eléctrico signo positivo.
- **pin_n** Conector eléctrico signo negativo.
- **FlangeWithBearing** de la librería **Multibody** (3.2.1) de la **MSL**.
- **heatPort** Puerto de conexión para la evacuación de calor (opcional).

4.1.6.2. TractionMotor.EMF_kT_kE_Revised

Esta clase base define el generador de fuerza electromotriz interno del motor, encargado de transformar la energía eléctrica en sus bornes en energía mecánica en el eje y viceversa. Se parte de la definición de fuerza electromotriz del componente **Electrical.Analog.Basic.EMF** de la **MSL**, modificando las ecuaciones que relacionan la tensión en bornes con la velocidad de giro del eje y la intensidad en bornes con el par motriz del eje. De esta manera se dispone de la clase base de un motor **CC** que puede ser utilizado como motor o generador para la recuperación de energía cinética del vehículo en la frenada. La modificación del componente original de la **MSL** ha consistido en la definición de distintos coeficientes para relacionar, tanto la tensión en bornes con la velocidad de salida, como el par de salida con la intensidad de alimentación, tal y como se puede ver en las ecuaciones 4.42. De esta forma se mejora el comportamiento del modelo, acercándolo al del motor real. Estos coeficientes se pueden tomar de la hoja de especificaciones del motor o mediante pruebas en banco del mismo.

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{d\phi}{dt} \\ e &= k_E \cdot \omega \\ \tau &= k_T \cdot i\end{aligned}\tag{4.42}$$

donde,

- ω , Velocidad de giro del eje del motor.
- ϕ , Ángulo de giro del eje del motor.
- e , Tensión en bornes del motor.
- k_E , Coeficiente constante de tensión-velocidad de giro.
- τ , Par de giro en el eje del motor.
- k_T , Coeficiente constante de intensidad-par de giro.
- i , Intensidad de corriente en bornes del motor.

En el listado B.14 se tiene el código de esta clase base.

4.1.6.3. TractionMotor.DCMotor_Rotational_EMFkTke_MB

Esta clase base hereda la definición de interface `BaseDCMotor_MB` (4.1.6.1) y contiene entre otros elementos el generador de **Fuerza Electro Motriz (FEM)** instanciado de la clase `TractionMotor.EMF_kT_kE_Revised` vista en el apartado anterior. En la figura 4.33 se puede ver el diagrama en `Dymola`[®] de esta clase base.

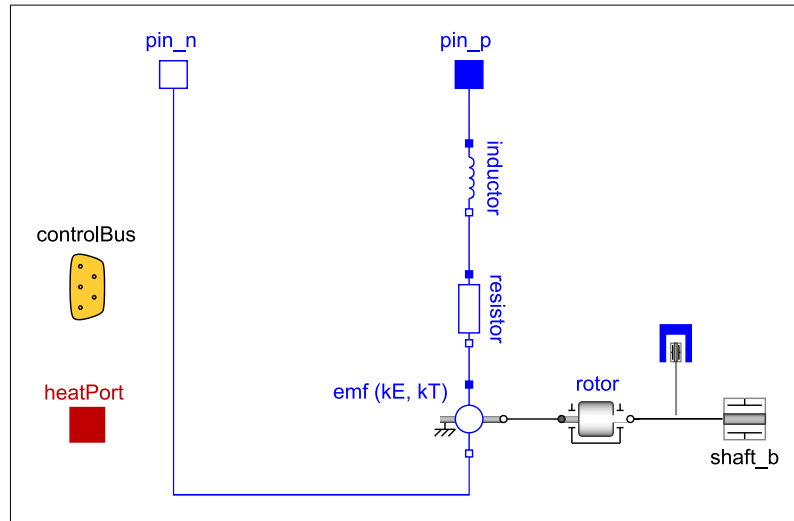


Figura 4.33

Diagrama de la clase base `TractionMotor.DCMotor_Rotational_EMFkTke_MB` de la librería VLDV.

4.2. Componentes

En esta sección de la librería se encuentran los componentes heredados de las clases base definidas en 4.1, parametrizados adecuadamente de acuerdo a los valores de los componentes reales o valores finales requeridos. Solamente se relacionan aquellos de relevancia para el presente trabajo.

4.2.1. VLDV.Component.Atmosphere

En este subpaquete se contienen los componentes heredados de las clases base descritas en 4.1.1, parametrizados de acuerdo a las condiciones ambientales particulares de cada componente.

4.2.1.1. Atmosphere.VLDVConstantAtmosphere

Este componente hereda de la clase base `VLDVConstantAtmosphere` vista en 4.1.1.2, y está parametrizado para los siguientes valores ambientales constantes:

- Temperatura ambiente = 25 °C
- Presión atmosférica = 1.013 bar
- Velocidad del aire = 0 m/s

- Humedad ambiente = 50 %
- Radiación solar = $1000 \frac{W}{m^2}$

En el listado [B.12](#) se tiene el código de este componente.

4.2.2. VLDV.Component.Chassis

En este subpaquete se contienen los componentes heredados de las clases base descritas en [4.1.2](#), parametrizados y especializados de acuerdo a las necesidades particulares de cada componente. En la figura [4.34](#) se pueden ver las clases componentes.

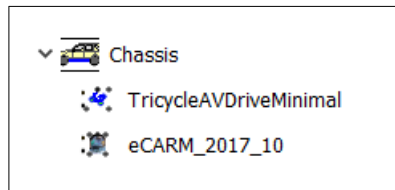


Figura 4.34

Componentes del subpaquete `Component.Chassis` de la librería VLDV.

4.2.2.1. Chassis.TricycleAVDriveMinimal

Este componente hereda de la clase base `TricycleAVdriveMinimal` vista en [4.1.2.4](#), está parametrizado según el conjunto de parámetros definido en el componente `ParamTriAVDrive_2` mostrado en [4.1.2.3](#) y está especializado para disponer de la medida de velocidad de rotación del eje trasero y la rueda delantera del triciclo a través del `controlBus`.

4.2.2.2. Chassis.eCARM_2017_10

Este componente hereda de la clase base `eCARM_2017` vista en [4.1.2.5](#), está parametrizado según el conjunto de parámetros definido en el componente `eCARM_2017_10` expuesto en [4.1.2.3](#) y también está especializado para disponer de la medida de velocidad de rotación de los ejes delantero y trasero del vehículo a través del `controlBus`.

4.2.3. VLDV.Component.EnergySource

Este subpaquete contiene los componentes especializados de las distintas fuentes de energía definidas en [4.1.3](#).

4.2.3.1. EnergySource.PVpanel.PV_Vill_KC200GT_improved

Este modelo es una clase heredada de la clase base `PVpanelVillalba_improved` vista en [4.1.3.3](#), especializada con los parámetros del `PVP Kyocera KC200GT` [[82](#)]. En la tabla [4.8](#), se tiene el listado de parámetros y sus valores para este componente.

Para el parámetro α se toma el valor de 1.3 en base a los resultados obtenidos en [[129](#)] y [[27](#)]. En el listado [B.13](#) se tiene el código de este componente parametrizado.

4.2.4. VLDV.Component.EnergyStorage

Este subpaquete contiene los componentes especializados de las clases base de los sub-sistemas de almacenamiento de energía definidas en [4.1.4](#).

Tabla 4.8
Listado de parámetros del componente PV_Vi11_KC200GT_improved.

Nombre	Descripción	Valor	Unid.
R_s	Resistencia equivalente de las conexiones en serie	0.221	Ω
R_p	Resistencia equivalente de las conexiones en paralelo	415.405	Ω
N_s	Número de celdas conectadas en serie	54	
α	Constante de idealidad del diodo	1.3	
$I_{sc,n}$	Intensidad nominal en cortocircuito del PVP en condiciones STC	8.21	A
K_I	Coefficiente de corriente/temperatura en cortocircuito	0.00318	A/°K
K_V	Coefficiente de tensión/temperatura en circuito abierto	0.123	V/°K
$V_{oc,n}$	Tensión nominal a circuito abierto	32.9	V
T	Temperatura de la unión p-n del diodo	298	°K

4.2.4.1. EnergyStorage.LIonbatDizqah_LiIon_BBOX5_NoDec_L1L2

Este modelo es una clase heredada de la clase base LIonbattery_Dizqah_BBOX5_100Ah_SinDecay_LiIon vista en 4.1.4.4, especializada con los parámetros del bloque de baterías B-BOX5.0 de la micro-red CIESOL vista en 3.8. Este componente modela el comportamiento de las baterías Li-Ion de múltiples celdas en serie-paralelo. En la tabla 4.9, se tiene el listado de parámetros y sus valores para este componente.

Tabla 4.9
Listado de parámetros del componente LIonbatDizqah_LiIon_BBOX5_NoDec_L1L2.

Nombre	Descripción	Valor	Unid.
v_{Nom}	Tensión de la batería al final de la zona nominal	53.58	V
q_{Nom}	Carga de la batería al final de la zona nominal	54.01	Ah
$rdCap$	Capacidad nominal de la batería	100	Ah
v_{Full}	Tensión de la batería a plena carga	53.83	V
v_{Exp}	Tensión de la batería al final de la zona exponencial	51.92	V
q_{Exp}	Carga de la batería al final de la zona exponencial	0.90	Ah
$SOC_{inicial}$	Estado de carga inicial de la batería	100	%

4.2.4.2. EnergyStorage.LIonbatDizqah_A123_26650

Este modelo es una clase heredada de la clase base LIonbattery_Dizqah_Nueva_Lim_NE_5 vista en 4.1.4.5, especializada con los parámetros de la batería Li-Ion ANR26650M de 2500 mAh de A123 Systems [12] de una sola celda. En la tabla 4.10, se tiene el listado de parámetros y sus valores para este componente.

Tabla 4.10
Listado de parámetros del componente LIonbatDizqah_A123_26650.

Nombre	Descripción	Valor	Unid.
v_{Full}	Tensión de la batería a plena carga	3.25	V
v_{Exp}	Tensión de la batería al final de la zona exponencial	2.89	V
q_{Exp}	Carga de la batería al final de la zona exponencial	0.03	Ah
v_{Nom}	Tensión de la batería al final de la zona nominal	3.2	V
q_{Nom}	Carga de la batería al final de la zona nominal	2.35	Ah
$rdCap$	Capacidad nominal de la batería	2.5	Ah
$SOC_{inicial}$	Estado de carga inicial de la batería	100	%

4.2.4.3. EnergyStorage.LIonbatDizqah_LFP4_BBOX5_L1L2

Este modelo es una clase heredada de la clase base `LIonbattery_Dizqah_BBOX5_100Ah_L1L2` vista en 4.1.4.6, especializada con los parámetros del bloque de baterías *B-BOX5.0* de la micro-red `CIESOL` vista en 3.8. Este componente modela el comportamiento específico de las baterías `LiFePo4` de múltiples celdas en serie-paralelo. En la tabla 4.11, se tiene el listado de parámetros y sus valores para este componente.

Tabla 4.11
Listado de parámetros del componente `LIonbatDizqah_LFP4_BBOX5_L1L2`.

Nombre	Descripción	Valor	Unid.
v_{Nom}	Tensión de la batería al final de la zona nominal	53.37	V
q_{Nom}	Carga de la batería al final de la zona nominal	54.00	Ah
$rtdCap$	Capacidad nominal de la batería	100	Ah
v_{Full}	Tensión de la batería a plena carga	53.55	V
v_{Exp}	Tensión de la batería al final de la zona exponencial	51.80	V
q_{Exp}	Carga de la batería al final de la zona exponencial	0.90	Ah
$vd0$	Tensión en bornes de la batería al inicio del decaimiento	52.97	V
$vd1$	Tensión en bornes de la batería al final del decaimiento	52.58	V
$qd0$	Carga de la batería al inicio del decaimiento	17.60	Ah
$qd1$	Carga de la batería al final del decaimiento	22.97	Ah
$SOC_{inicial}$	Estado de carga inicial de la batería	100	%

4.2.5. VLDV.Component.EnergyBus

Este subpaquete contiene los componentes especializados de las clases base de los sub-sistemas componentes del bus de energía del vehículo definidas en 4.1.5.

4.2.5.1. EnergyBus.HalfBridge_DCMotor_100k_RcRl

Este modelo es una clase heredada de la clase base `HalfBridge_HvLv_RcRl` vista en 4.1.5.3, parametrizado con los valores de los componentes calculados de acuerdo a los valores de tensión del bus y del motor conectado.

De entre los distintos convertidores que componen el `SEH`, en el presente trabajo se presta especial atención al que se encarga de la alimentación del motor de tracción del vehículo. Este convertidor debe funcionar en modo bidireccional, de tal forma que en un sentido alimenta al motor desde el `DC-Link` y en el sentido opuesto recupera energía del motor, que es devuelta al `DC-Link`. Ver Figura 4.35.

Para el dimensionamiento del convertidor se ha elegido un motor de uso corriente en `ULEVs`, como bicicletas y triciclos, adecuado para un uso en desplazamientos urbanos e interurbanos con pendientes ligeras [92]. Se toman como referencia las características técnicas del motor rueda para bicicletas eléctricas *Heinzmann Classic RN 120*, con una potencia nominal de 250W y una tensión nominal de alimentación de 36VDC [75]. Este motor se corresponde con el componente `DCMotorRN120_1D_RevisedkE`, presentado en 4.2.6.1.

Se toma una tensión nominal para el `DC-Link` de 48 Vcc, considerada como muy baja tensión de seguridad de acuerdo con la Low Voltage Directive (LVD) (2014/35/EU) de la Unión Europea, pero suficientemente elevada como para permitir el uso de conductores de menor sección y peso para el vehículo. Con esta tensión de alimentación, el convertidor bidireccional funciona en modo **Buck** cuando alimenta al motor desde el `DC-Link`. Se toma este modo de funcionamiento porque el convertidor permite un rango de regulación más amplio a la salida, prácticamente desde 0 Vcc hasta la tensión de alimentación del convertidor.

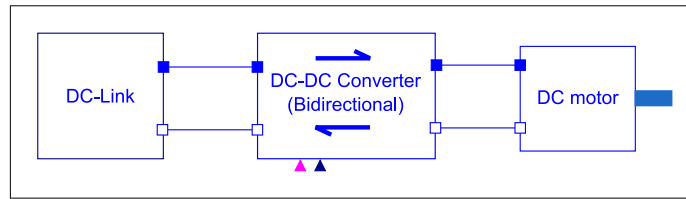


Figura 4.35

Diagrama esquemático de la conexión entre el motor y el *DC-Link*.

El rango de variación de tensión admisible en el *DC-Link* se establece entre 38-48 Vcc. Este rango es lo suficientemente amplio para permitir estrategias de control de energía por niveles de tensión [106], en la que el modo de operación de los distintos convertidores que componen el SEH varía en función de la tensión del *DC-Link*, así como con la conexión directa de la batería al *DC-Link*, sin llegar a su voltaje de corte.

En el funcionamiento del convertidor en modo **Boost**, el motor actúa como freno regenerativo, devolviendo energía al *DC-Link*. Para el cálculo del convertidor, se establece un rango de tensión a la salida del motor entre 6 y 36 Vcc. Esto significa que el convertidor sólo regenerará energía para tensiones de salida del motor a partir de 6 Vcc, que equivalen a una velocidad de 4.3 km/h para un neumático de 26" - ETRTO 47-559, como el seleccionado para el vehículo del componente `TricycleAVDriveMinimal` mostrado en 4.2.2.1. Dado que la tensión de salida del motor es proporcional a su velocidad de giro, para velocidades más bajas la energía cinética residual del vehículo es también muy baja y no se compensa el aumento del tamaño de los componentes (inductancia) necesario para recuperar energía por debajo de este valor.

La conmutación entre los modos de alimentación de energía al motor y el de regeneración de energía desde el motor se realiza al soltar el pedal de aceleración o aplicar freno, para tensiones en bornes del motor superiores a 6 Vcc. El límite de intensidad-par es el nominal del motor para maximizar la recuperación de energía en la frenada.

Para el **Maximum Inductor Current Ripple Ratio - Relación de Ondulación de Corriente Máxima de la Bobina (MICRR)** se toma un valor del 40 % y para el **Maximum Output Voltage Ripple - Ondulación Máxima del Voltaje de Salida (MOVVR)** del 5 %, tomando como referencia lo indicado en [86] y [107]. La frecuencia de conmutación se establece en 100 kHz, de acuerdo a la bibliografía consultada [36], [85] y [77] para equipos convertidores **CC-CC** de pequeña potencia con conmutación dura (Hard Switching); mayores frecuencias de conmutación suponen bobinas más pequeñas, aunque también menores eficiencias, mayores pérdidas de potencia, así como mayor ruido **Radio Frequency - RadioFrecuencia (RF)** y **ElectroMagnetic Interference - Interferencia ElectroMagnética (EMI)**. Para el cálculo de los elementos componentes del convertidor se toman las ecuaciones propuestas en [86], [15] y [107].

Modo Boost. La configuración en modo Boost se puede ver en la Figura 4.36. En este caso, el interruptor $Q1$ está permanentemente abierto y es el interruptor $Q2$ el encargado de la conmutación del circuito a la frecuencia F de diseño del convertidor. La tensión de entrada V_{in} es elevada a un determinado valor a la salida V_o en función de la relación del tiempo de activación del conmutador sobre el tiempo de ciclo (D , duty cycle) del interruptor $Q2$.

En la tabla 4.12 se tienen las especificaciones de diseño del convertidor seleccionado en modo Boost.

En este modo, el caso más desfavorable [86], es para $V_{imin}=6$ Vcc. Las ecuaciones de

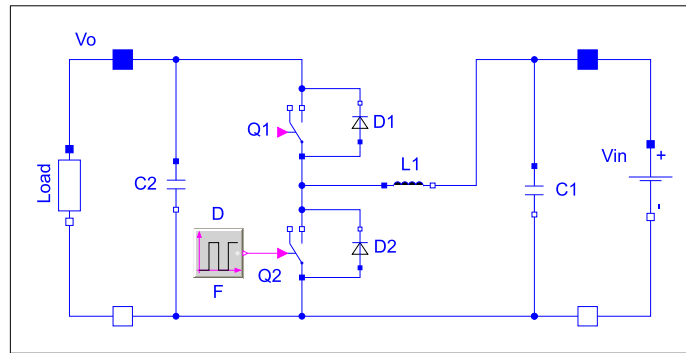


Figura 4.36
Convertidor *NHBBC* en modo *Boost*.

Tabla 4.12
Especificaciones de diseño del convertidor del motor en modo *Boost*.

Var.	Descripción	Unidad	Valor
P_o	Potencia continua Max. de salida	W	250
V_o	Tensión de salida CC (Tensión Alta)	V	48
V_i	Rango de tensión de entrada CC (Tensión Baja)	V	6-36
r_I	Relación de Ondulación de Corriente Máxima de la Bobina	-	0.40
r_V	Ondulación Máxima del Voltaje de Salida	-	0.05
F	Frecuencia de conmutación	kHz	100

cálculo utilizadas para el dimensionamiento de los componentes son las siguientes:

$$V_i = V_{imin} \quad (4.43)$$

$$V_{on} = V_i \quad (4.44)$$

$$D = \frac{(V_o - V_i)}{V_o} \quad (4.45)$$

$$I_L = \frac{I_o}{(1 - D)} \quad (4.46)$$

$$L_{min} = \frac{V_{on} \cdot D}{(r_I \cdot I_L \cdot F)} \quad (4.47)$$

$$C_{min} = \frac{I_o \cdot D}{(F \cdot r_V \cdot V_o)} \quad (4.48)$$

Que aportan los siguientes resultados:

- $L_{minBoost} = 3.15 \cdot 10^{-6}$ H
- $C_{minBoost} = 1.8989 \cdot 10^{-5}$ F

Donde,

- V_{imin} , tensión de entrada mínima.
- V_{on} , tensión en bornes de la bobina con el conmutador cerrado.

- D , duty cycle. Relación del tiempo de activación del conmutador sobre el tiempo de ciclo.
- I_L , intensidad de corriente media a través de la bobina.
- I_o , intensidad de corriente media de la carga.
- L_{min} , tamaño mínimo de la bobina (en modo Boost o Buck).
- C_{min} , tamaño mínimo del condensador (en modo Boost o Buck).
- L , tamaño de la bobina.
- C , tamaño del condensador.
- R_l , DCR para bobinas.
- R_c , ESR para condensadores.

Modo Buck. La configuración en modo Buck se puede ver en la Figura 4.37. En este caso, el interruptor $Q2$ está permanentemente abierto y es el interruptor $Q1$ el encargado de la conmutación del circuito a la frecuencia F de diseño del convertidor. La tensión a la entrada V_{in} es reducida a un determinado valor a la salida V_o en función de la relación del tiempo de activación del conmutador sobre el tiempo de ciclo (D) del interruptor $Q1$.

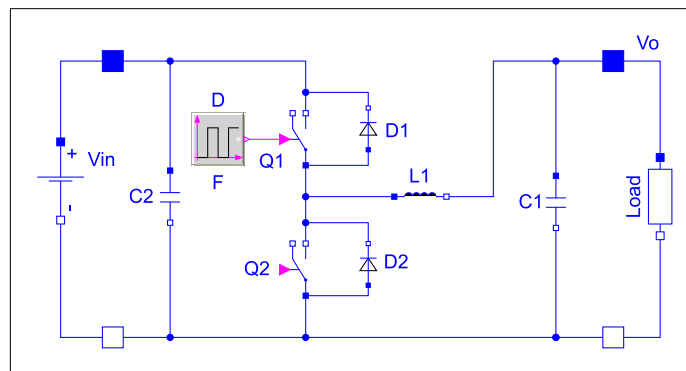


Figura 4.37

Convertidor *NHBC* en modo *Buck*.

En la tabla 4.13 se tienen las especificaciones de diseño del convertidor seleccionado en modo Buck.

Tabla 4.13

Especificaciones de diseño del convertidor del motor en modo *Buck*.

Var.	Descripción	Unidad	Valor
P_o	Potencia continua Max. de salida	W	250
V_o	Rango de tensión de salida CC (Tensión Baja)	V	6-36
V_i	Rango de tensión de entrada CC (Tensión Alta)	V	38-48
r_I	Relación de Ondulación de Corriente Máxima de la Bobina	-	0.40
r_V	Ondulación Máxima del Voltaje de Salida	-	0.05
F	Frecuencia de conmutación	kHz	100

En modo Buck, el caso más desfavorable de operación (para el dimensionamiento de la bobina y el condensador) es para $V_{imax} = 48 \text{ Vcc}$ [86]. Las ecuaciones de cálculo utilizadas

para el dimensionamiento de los componentes son las siguientes:

$$V_i = V_{imax} \quad (4.49)$$

$$V_{on} = V_i - V_o \quad (4.50)$$

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad (4.51)$$

$$I_L = \frac{I_o}{(1 - D)} \quad (4.52)$$

$$L_{min} = \frac{V_{on} \cdot D}{(r_I \cdot I_L \cdot F)} \quad (4.53)$$

$$C_{min} = \frac{I_o \cdot D}{(F \cdot r_V \cdot V_o)} \quad (4.54)$$

Que aportan los siguientes resultados:

- $L_{minBuck} = 8.1052 \cdot 10^{-6}$ H
- $C_{minBuck} = 2.8917 \cdot 10^{-5}$ F

Cálculo y selección de la Bobina y del Condensador. Tanto para la selección de la talla de la bobina como para la del condensador, se toma el mayor valor encontrado en el cálculo para ambos modos de funcionamiento y a continuación se busca la talla normalizada superior más próxima.

De este modo, para la **bobina**:

$$\begin{aligned} L &= \max[L_{minBoost}, L_{minBuck}] \\ &= \max[3.15 \cdot 10^{-6}, 8.1052 \cdot 10^{-6}] \\ &= 8.1052 \cdot 10^{-6} \text{ H} \end{aligned} \quad (4.55)$$

El valor comercial estándar superior más aproximado es de $8.2 \cdot 10^{-6}$ H, [6], que es el que se toma. Ejemplos de inductores comerciales con estas características son el *CWS E70340-013* y el *CWS HF467-260M-45AH* [2].

Los valores de **DCR** para este tipo de bobinas oscila normalmente entre 2 y 3 mΩ. Se toma por tanto $R_l = 0.003 \Omega$.

Para el **condensador**:

$$\begin{aligned} C &= \max[C_{minBoost}, C_{minBuck}] \\ &= \max[1.8989 \cdot 10^{-5}, 2.8917 \cdot 10^{-5}] \\ &= 2.8917 \cdot 10^{-5} \text{ F} \end{aligned} \quad (4.56)$$

El valor comercial estándar superior más aproximado es $56 \cdot 10^{-6}$ F, que es el que se toma. Ejemplos de condensadores comerciales con estas características son el *Panasonic EEHAZF1H560*, [5] y el *Kemet A767*, [4].

Los valores de **ESR** para este tipo de condensadores oscilan entre 0.029 y 0.035Ω a 100 kHz. Se toma por tanto $R_c = 0.035 \Omega$.

4.2.5.2. EnergyBus.BoostAveraged_100k_DCmotor_RcRl_2_Res

Este modelo es una clase heredada de la clase base `BoostConvBase_Averaged_2_Res` vista en 4.1.5.4. Los valores calculados para los componentes en el modelo conmutado `HalfBridge_DCmotor_100k_RcRl` expuesto en 4.2.5.1 son los utilizados para la parametrización del modelo linealizado del convertidor. Dado que las ecuaciones (4.38) y (4.41) tienen en cuenta las resistencias parásitas del condensador y de la bobina, se toman los mismos valores de R_l y R_c que en el modelo del convertidor `NHBBC`. En la tabla 4.14 se tienen los parámetros del modelo:

Tabla 4.14
Parámetros de los modelos
`EnergyBus.BoostAveraged_100k_DCmotor_RcRl_2_Res` y
`EnergyBus.BuckAveraged_100k_DCmotor_RcRl_2_Res` de la librería VLDV.

Par.	Descripción	Valor	Unid.
L	Inductancia de la bobina	$8.2 \cdot 10^{-6}$	H
C	Capacidad del condensador	$56 \cdot 10^{-6}$	F
R_l	DCR	$3 \cdot 10^{-3}$	Ω
R_c	ESR	$3,5 \cdot 10^{-2}$	Ω

4.2.5.3. EnergyBus.BuckAveraged_100k_DCmotor_RcRl_2_Res

Este modelo es una clase heredada de la clase base `BuckConvBase_Averaged_2_Res` vista en 4.1.5.5. Como en el caso anterior, los parámetros se toman de los obtenidos para el modelo conmutado `HalfBridge_DCmotor_100k_RcRl` expuesto en 4.2.5.1 y se tienen en la tabla 4.14.

4.2.5.4. EnergyBus.BuBoAveraged_100k_DCmotor_RcRl_2_Res_Cond

Este modelo es una clase heredada de la clase base `VoltConvBase_BuBo_Duty_Mode` vista en 4.1.5.1, que define el interfaz del componente. En él se han instanciado los componentes `BoostAveraged_100k_DCmotor_RcRl_2_Res` (4.2.5.2) que define el comportamiento del convertidor linealizado en modo Boost y `BuckAveraged_100k_DCmotor_RcRl_2_Res` (4.2.5.3) que define el comportamiento del convertidor linealizado en modo Buck. Se interconectan mediante interruptores pilotados por el conector booleano `converterMode` para definir el comportamiento bidireccional deseado, funcionando en un sentido del flujo de energía como convertidor **Boost** y en el inverso como **Buck**. De esta forma se dispone de un modelo de convertidor bidireccional que, conectado por un lado al `SEH` y por el otro al motor de tracción, permite la operación en modo motor o generador, recuperando la energía cinética del vehículo durante las frenadas en forma de energía eléctrica. En la figura 4.38 se puede ver el diagrama en `Dymola`[®] de este componente.

4.2.5.5. EnergyBus.BoostAveraged_15k_PVpanel_RcRl_2_Res

Este modelo es una clase heredada de la clase base `BoostConvBase_Averaged_2_Res` mostrada en 4.1.5.4. Los valores de los parámetros utilizados son los obtenidos para el modelo conmutado equivalente. El procedimiento de cálculo seguido para la obtención de los parámetros del modelo conmutado es el expuesto en 4.2.5.1 para el convertidor `NHBBC` tipo Boost del motor, particularizado en este caso para las condiciones de entrada y salida correspondientes al `PVP Kyocera KC200GT` [82] presentado en 4.2.3.1. En la tabla 4.15 se tienen los parámetros del modelo:

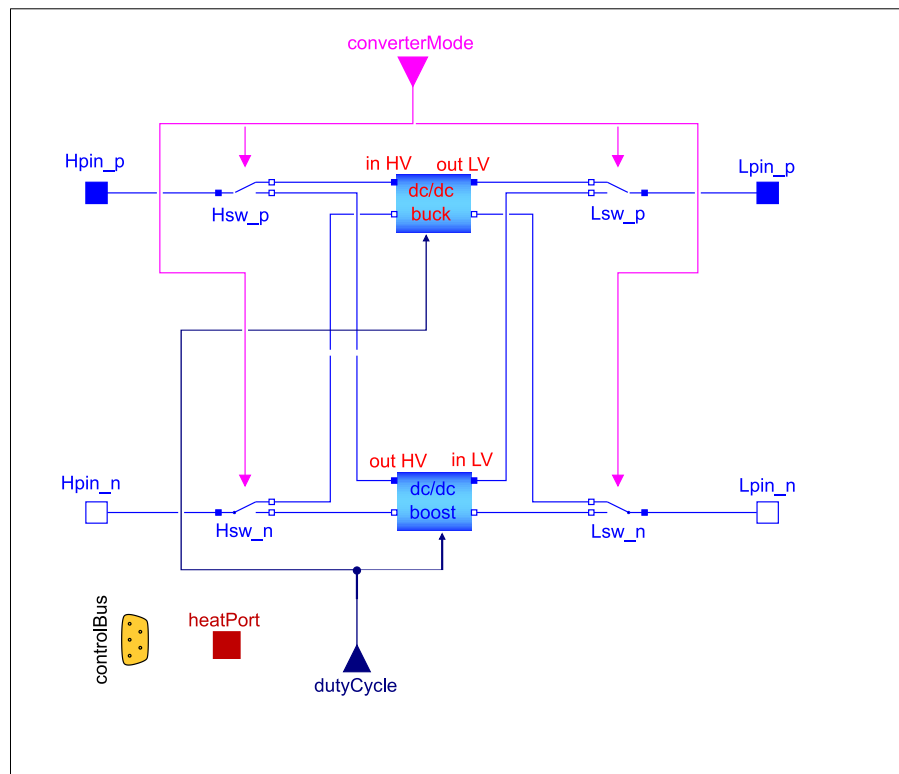


Figura 4.38

Diagrama del componente

EnergyBus.BuBoAveraged_100k_DCmotor_RcRl_2_Res_Cond de la librería VLDV.

Tabla 4.15

Parámetros del modelo EnergyBus.BoostAveraged_15k_PVpanel_RcRl_2_Res de la librería VLDV.

Par.	Descripción	Valor	Unid.
L	Inductancia de la bobina	$6.8 \cdot 10^{-5}$	H
C	Capacidad del condensador	$1.0 \cdot 10^{-4}$	F
Rl	DCR	$1 \cdot 10^{-5}$	Ω
Rc	ESR	$1 \cdot 10^{-5}$	Ω

4.2.5.6. EnergyBus.BuckAveraged_15k_Acc_RcRl_2_Res

Este modelo es una clase heredada de la clase base BuckConvBase_Averaged_2_Res vista en 4.1.5.5. Los valores de los parámetros utilizados son los obtenidos para el modelo conmutado equivalente. El procedimiento de cálculo seguido para la obtención de los parámetros del modelo conmutado es el expuesto en 4.2.5.1 para el convertidor NHBBC tipo Buck del motor, particularizado en este caso para las condiciones de entrada y salida correspondientes a la carga estimada de los accesorios, alimentados a 12V CC. En la tabla 4.16 se tienen los parámetros del modelo:

4.2.6. VLDV.Component.TractionMotor

Este subpaquete contiene los componentes especializados de las clases base para los motores de tracción del vehículo definidas en 4.1.6.

Tabla 4.16

Parámetros del modelo `EnergyBus.BuckAveraged_15k_Accesories_RcRl_2_Res` de la librería VLDV.

Par.	Descripción	Valor	Unid.
L	Inductancia de la bobina	$4.7 \cdot 10^{-5}$	H
C	Capacidad del condensador	$3.3 \cdot 10^{-4}$	F
Rl	DCR	$1 \cdot 10^{-5}$	Ω
Rc	ESR	$1 \cdot 10^{-5}$	Ω

4.2.6.1. TractionMotor.DCMotorRN120_MB_RevkE

Este modelo es una clase heredada de la clase base `DCMotor_Rotational_EMFkTkE_MB` vista en 4.1.6.3, especializado con los parámetros del motor de buje de rueda para bicicletas eléctricas *Heinzmann Classic RN-120* en su versión para tamaño de rueda de 26" y clase de servicio *S1* [75]. En la tabla 4.17, se tiene el listado de parámetros y sus valores para este componente.

Tabla 4.17

Listado de parámetros del componente `TractionMotor.DCMotorRN120_MB_RevkE`.

Nombre	Descripción	Valor	Unidades
L	Inductancia de la bobina del rotor	$6.0 \cdot 10^{-5}$	H
R	Resistencia de la bobina del rotor	0.25	Ω
J	Momento de inercia del rotor	$9.0 \cdot 10^{-2}$	$kg \cdot m^2$
k_T	Constante de par del generador FEM	11.4/9.5	Nm/A
k_E	Constante de velocidad de giro del generador FEM	1.6449	$V \cdot s/A$

4.3. Sumario

A lo largo de este capítulo se ha hecho una exposición detallada de los elementos de la librería VLDV, desarrollada específicamente para el objeto del presente trabajo de tesis. Dada su extensión, solamente se han presentado aquellos elementos de especial relevancia, por ser los utilizados en los análisis y publicaciones relacionados. En una primera parte se han presentado las clases base, interfaces y bloques funcionales que contienen la definición genérica de los componentes. En la segunda parte se han presentado los componentes y su parametrización.

Capítulo 5

Resultados y Discusión

En el presente capítulo se hace una presentación de los resultados obtenidos del modelado y simulación de los principales componentes desarrollados para la librería [VLDV](#), utilizados para su validación y que han sido publicados para el caso de la batería y el convertidor. A continuación se presentan los resultados de la simulación del vehículo completo, implementando las diferentes soluciones tecnológicas que permiten la recuperación de energía y el uso de energías renovables bajo un ciclo propuesto. Los resultados obtenidos avalan la presente tesis y sus publicaciones asociadas.

5.1. Modelo de Panel Fotovoltaico

En la figura 5.1 se tiene del diagrama en [Dymola®](#) que permite el experimento de simulación de la instancia del componente `PV_Vi11_KC200GT_improved` de la librería `VLDV` presentado en 4.2.3.1 y que modela el comportamiento del `PVP` comercial *Kyocera KC200GT* [82].

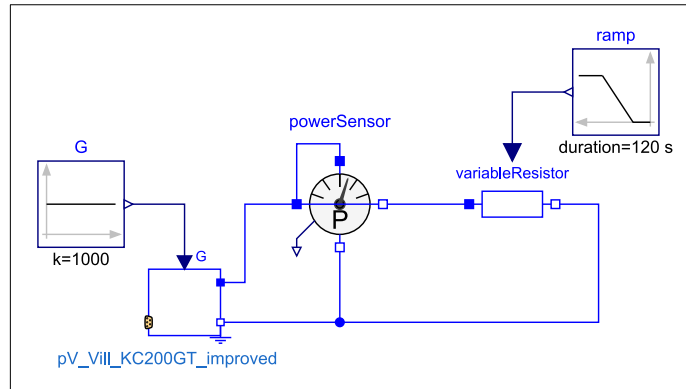


Figura 5.1

Diagrama del experimento de simulación de la instancia del componente `PV_Vi11_KC200GT_improved` de la librería `VLDV`.

Para reproducir la curva de respuesta I-V del `PVP`, se conecta la salida del panel a una resistencia que varía su valor de 0 a 40000Ω (valor suficientemente alto), mediante una rampa de 120 s. Se intercala un sensor de potencia que incluye un captor de tensión y otro de intensidad. Se realizan varias simulaciones, sometiendo el panel a radiaciones solares constantes de 200, 400, 600, 800 y 1000 W/m^2 .

En la figura 5.2 se tienen los resultados obtenidos de graficar la respuesta I-V del componente `PV_Vi11_KC200GT_improved` (figura 5.2a), en comparación con los resultados de la ficha de características del panel comercial *Kyocera KC200GT* (figura 5.2b).

Para poder comparar los resultados gráficamente, con ayuda de la herramienta *ScanIT* [127], se captura la serie de datos correspondientes a la curva de radiación 1000 W/m^2 de la figura 5.2b. En la figura 5.3 se tiene la gráfica en la que se pueden comparar los resultados de la curva I-V del modelo y del equipo comercial, para el nivel de radiación de 1000 W/m^2 . Debido a que el gráfico comercial no es suficientemente preciso, se aprecian diferencias que no corresponden con la realidad, puesto que en el gráfico comercial, la tensión nominal a circuito abierto ($V_{oc,n} = 33.122\text{ V}$) no se corresponde con la indicada en sus especificaciones técnicas, que es de $V_{oc,n} = 32.9\text{ V}$, valor que sí que coincide con el arrojado por el modelo.

En la figura 5.4 [82] se presenta un extracto de las especificaciones del `PVP` en condiciones `STC`.

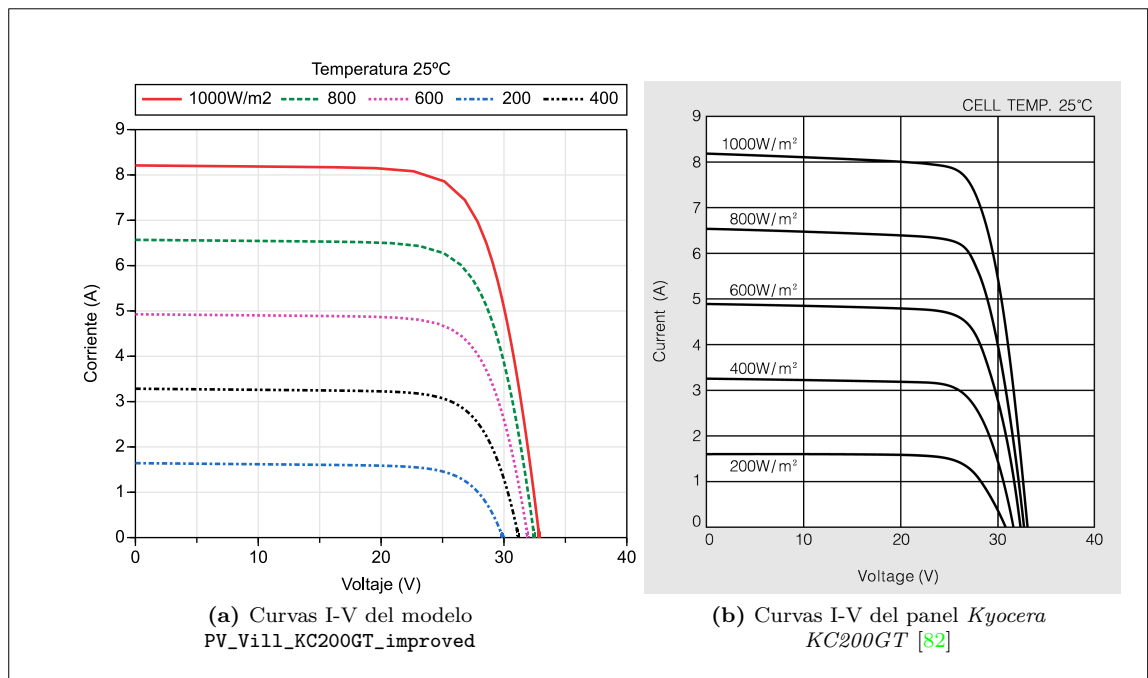


Figura 5.2
 Comparación de los resultados de curvas I-V del modelo PV_Vill_KC200GT_improved con los del panel *Kyocera KC200GT* [82].

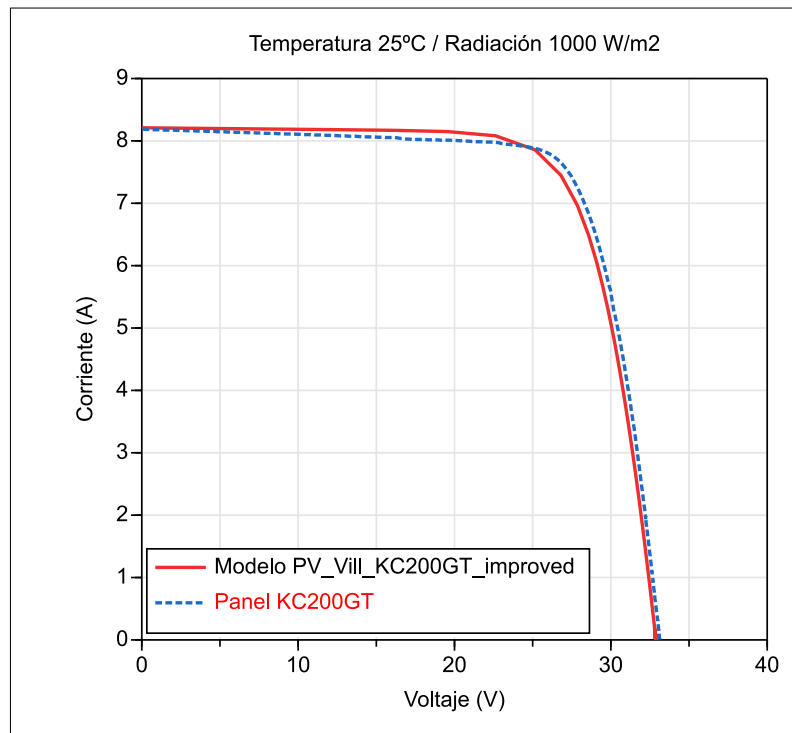


Figura 5.3
 Comparación de respuesta I-V para $G = 1000 \frac{W}{m^2}$ entre el componente PV_Vill_KC200GT_improved y los datos proporcionados por el fabricante del panel *Kyocera KC200GT* [82].

■ Specifications	
■ Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (Pmax)	200W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (Vmpp)	26.3V
Maximum Power Current (Impp)	7.61A
Open Circuit Voltage (Voc)	32.9V
Short Circuit Current (Isc)	8.21A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	-1.23×10^{-1} V/°C
Temperature Coefficient of Isc	3.18×10^{-3} A/°C

*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperature 25°C

Figura 5.4

Especificaciones técnicas del panel Kyocera KC200GT [82]

En la figura 5.5 se muestra el gráfico con la curva de respuesta de potencia de salida en función de la tensión en bornes del componente PV_Vi11_KC200GT_improved para condiciones STC, en el que se aprecia cómo la potencia máxima en bornes del modelo ($P_{max} = 200.16$ W para $V_{mpp} = 26.39$ V), prácticamente coincide con las especificaciones del fabricante ($P_{max} = 200$ W (+10% / -5%) para $V_{mpp} = 26.3$ V). El gráfico de respuesta es continuo, parte desde una tensión nula, que corresponde al funcionamiento en cortocircuito del panel, alcanza el valor de máxima potencia (P_{max}), que se corresponde con la tensión de máxima potencia (V_{mpp}) y termina en el punto de funcionamiento a circuito abierto, que se corresponde con la tensión nominal a circuito abierto ($V_{oc,n} = 32.88$ V).

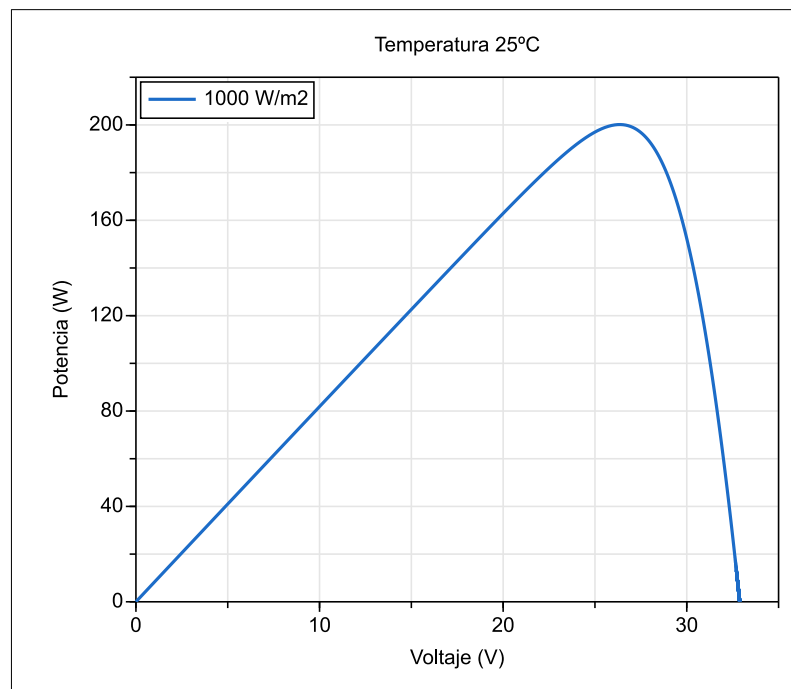


Figura 5.5

Curva P-V del componente PV_Vi11_KC200GT_improved en condiciones STC.

En la figura 5.6 se muestra el gráfico con la curva de respuesta de potencia de salida en función de la intensidad de corriente en bornes del componente PV_Vi11_KC200GT_improved para condiciones STC, en el que se aprecia cómo la potencia máxima en bornes del modelo ($P_{max} = 200.16$ W para $I_{mpp} = 7.59$ A), también coincide con las especificaciones del fabricante ($P_{max} = 200$ W (+10% / -5%) para $I_{mpp} = 7.61$ A). El gráfico de respuesta es

continuo, parte desde una intensidad nula, que corresponde al funcionamiento a circuito abierto del panel, alcanza el valor de máxima potencia (P_{max}), que se corresponde con la intensidad de máxima potencia (I_{mpp}) y termina en el punto de funcionamiento del panel en cortocircuito, que se corresponde con la intensidad nominal en cortocircuito ($I_{sc,n} = 8.21$ A).

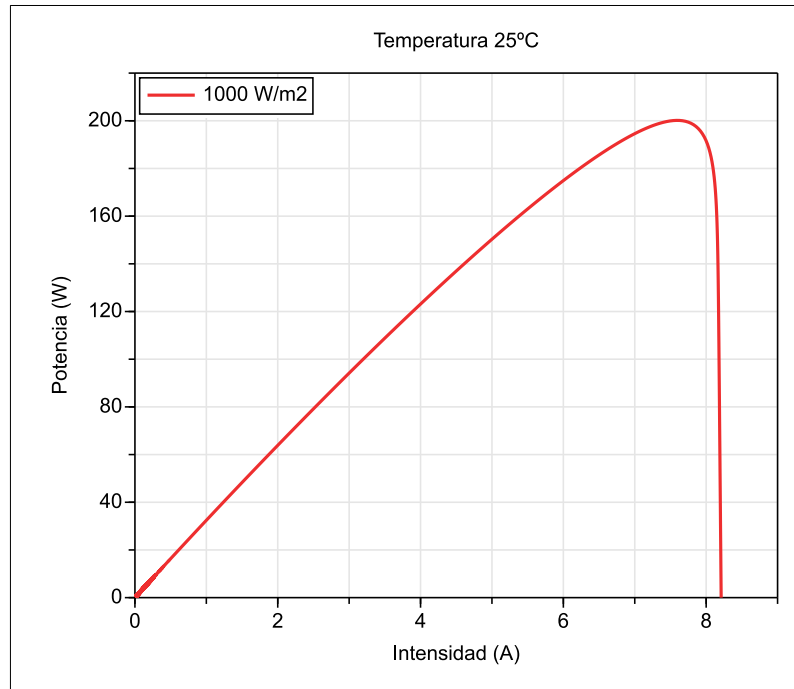


Figura 5.6

Curva P-I del componente PV_Vill_KC200GT_improved en condiciones STC.

Los resultados obtenidos arrojan una muy buena correlación entre el modelo propuesto y las especificaciones del fabricante. Se puede confirmar que, la respuesta del modelo se ajusta a los valores característicos del PVP comercial en lo referente a: tensión nominal a circuito abierto ($V_{oc,n}$), intensidad nominal en cortocircuito ($I_{sc,n}$), potencia máxima (P_{max}), tensión de máxima potencia (V_{mpp}) e intensidad de máxima potencia (I_{mpp}). En la tabla 5.1 se comparan los resultados obtenidos para condiciones STC (4.1.3).

Tabla 5.1

Tabla comparativa de los resultados obtenidos en la simulación del panel fotovoltaico para condiciones STC.

	Equipo real	Modelo
$V_{oc,n}$	32.9 V	32.88 V
$I_{sc,n}$	8.21 A	8.21 A
P_{max}	200 W (+10 % / -5 %)	200.16 W
V_{mpp}	26.3V	26.39 V
I_{mpp}	7.61 A	7.59 A

5.2. Modelos de Batería

En esta sección, se presentan los resultados de la simulación de dos de los componentes de batería anteriormente expuestos en 4.2.4.

En el primer caso, se expone el proceso de calibración y validación de un modelo de batería LiFePo4, partiendo de los datos experimentales obtenidos en ensayos realizados en la Micro-red CIESOL, mostrada en 3.8, con baterías LiFePo4. El ajuste a los datos experimentales se ha realizado con la librería `Design.Calibration` (3.5), que utiliza un método de optimización multicriterio con restricciones, para la obtención de parámetros en el proceso de calibración y del que se pueden encontrar más detalles en [52] [97]. La librería `Design.Calibration` viene incorporada en la herramienta de modelado `Dymola`® 3.4.

En el segundo caso, se exponen los resultados de la simulación de un modelo de batería `Li-Ion` de celda única, comparados con los resultados experimentales disponibles en información comercial del componente.

5.2.1. Batería LiFePo4 BBOX5 100Ah

La validación y calibración del componente `LIonbatDizqah_LFP4_BBOX5_L1L2` de la librería `VLDV` mostrado en 4.2.4.3, se han realizado con la librería `Design.Calibration`, vista en 3.5 y que viene integrada en la herramienta `Dymola`®.

Para la obtención de los datos experimentales, se realizaron dos ensayos en la micro-red CIESOL, presentada en 3.8, siguiendo la siguiente secuencia en cada uno de ellos:

1. Desde un estado de carga inicial, las baterías fueron descargadas hasta el 10% de su capacidad nominal.
2. A continuación, se realizó un ciclo de carga a una intensidad de corriente de 10 A hasta completar su carga, con una etapa de flotación posterior.
3. Finalmente, desde el estado de carga alcanzado en el paso anterior, se realizó una descarga a una intensidad de corriente 20 A (0.2C) hasta alcanzar de nuevo el 10% de su capacidad nominal.

La determinación de los parámetros básicos de la batería (v_{Full} , v_{Exp} , q_{Exp} , v_{Nom} , q_{Nom} , $rtdCap$ y R), se ha llevado a cabo siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.1.4.4, a partir de la gráfica de descarga representada en la figura 5.7 y de las especificaciones técnicas del fabricante [124]. El valor del $SOC_{inicial}$ es del 100% pues partimos de batería completamente cargada. Partiendo de los parámetros básicos, se han obtenido los parámetros dependientes (A , B , q_{Max} , K).

La determinación de los parámetros correspondientes al decaimiento característico de este tipo de baterías (v_{d0} , q_{d0} , v_{d1} y q_{d1}) se lleva a cabo siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.1.4.6, a partir de la gráfica de descarga representada en la figura 5.7.

En la tabla 5.2 se describen los parámetros del componente `EnergyStorage.LIonbatDizqah_LFP4_BBOX5_L1L2` a modo de recordatorio.

La gráfica representada en la Figura 5.7 se corresponde con un ensayo de descarga, realizada a intensidad constante de 20 A (0.2C), partiendo de un estado de carga completa ($SOC = 100\%$) y finalizando cuando el SOC llegaba al 10%. Se ha obtenido como estimación inicial para los parámetros, el siguiente conjunto de valores: $A = 0.075V$, $K = 0.0059V$, $B = 120Ah^{-1}$, $q_{Max} = 105Ah$, $v_{d0} = 53.05V$, $v_{d1} = 52.50V$, $q_{d0} = 16Ah$, $q_{d1} = 25Ah$, $SOC_{inicial} = 100\%$.

En el procedimiento de calibración se han aplicado los registros experimentales obtenidos en el banco de ensayos. Previamente se ha realizado una validación del modelo propuesto.

Tabla 5.2

Parámetros del componente `EnergyStorage.LIonbatDizqah_LFP4_BB0X5_L1L2`.

Nombre	Descripción
A	Amplitud de la zona exponencial en voltios
B	Inversa de constante de tiempo de zona exponencial
q_{Max}	Capacidad máxima de la batería
K	Tensión de polarización
R	Resistencia interna de la batería
v_{Full}	Tensión de la batería a plena carga
v_{Exp}	Tensión de la batería al final de la zona exponencial
q_{Exp}	Carga de la batería al final de la zona exponencial
v_{Nom}	Tensión de la batería al final de la zona nominal
q_{Nom}	Carga de la batería al final de la zona nominal
$rtdCap$	Capacidad nominal de la batería
v_{d0}	Tensión en bornes de la batería al inicio del decaimiento
q_{d0}	Carga de la batería al inicio del decaimiento
v_{d1}	Tensión en bornes de la batería al final del decaimiento
q_{d1}	Carga de la batería al final del decaimiento
$SOC_{inicial}$	Estado de carga inicial de la batería

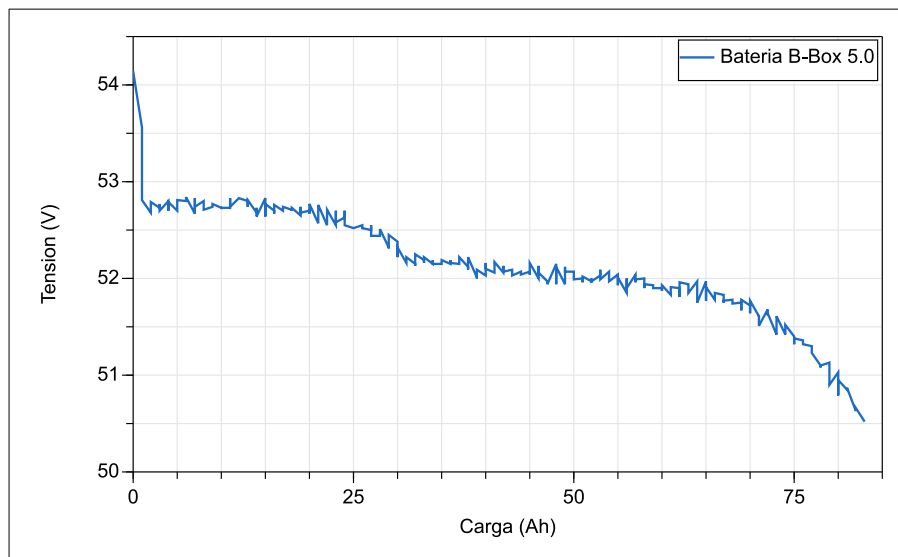


Figura 5.7

Gráfica de descarga a 20 A (0.2C) del equipo B-Box 5.0

5.2.1.1. Validación Previa

La validación previa ha consistido en comparar los resultados experimentales, con el resultado del modelo propuesto basado en la ecuación 4.25, utilizando los valores de los parámetros inicialmente determinados según la sección anterior. El modelo se ha sometido a las condiciones de contorno registradas en el experimento real, definidas por una intensidad eléctrica de descarga idéntica a la impuesta a la batería. En la figura 5.8 se muestra el modelo del experimento con componentes de la *MSL*, donde se observa el generador dependiente de intensidad eléctrica (`signalCurrent`), instanciado de la *MSL*, definiendo la condición de contorno al modelo de la batería y que toma los valores de la intensidad de descarga del experimento real.

En la figura 5.9 se muestra el resultado de la simulación del modelo, comparado con los

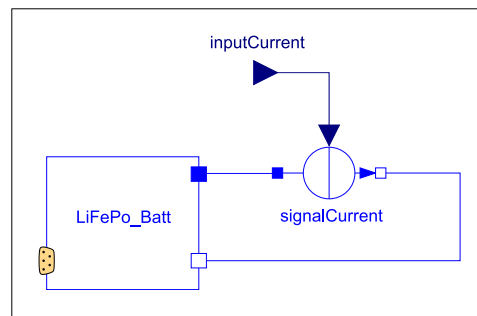


Figura 5.8

Diagrama en Dymola del experimento de validación, con entrada para el valor de la intensidad de descarga.

valores del registro experimental del ensayo. Tal como se puede apreciar, la gráfica del modelo con los parámetros inicialmente determinados sigue la forma de la curva del equipo real, aunque con una desviación que varía con el tiempo. Esta desviación, motivó el planteamiento de recalibrar el vector de parámetros independientes del modelo.

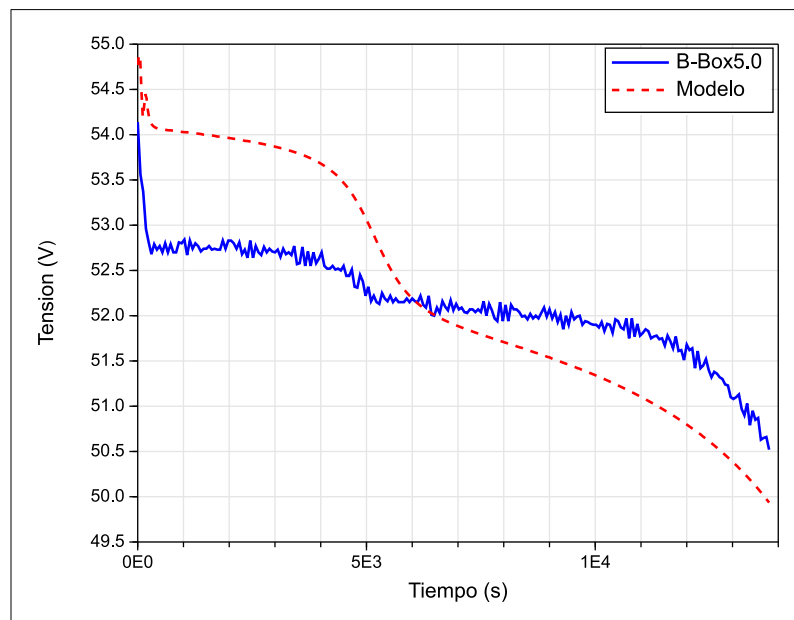


Figura 5.9

Resultados del experimento de validación previa.

5.2.1.2. Calibración con Design.Calibration

El objetivo de la calibración consiste en obtener el vector de parámetros del modelo que proporcione el mejor ajuste entre el comportamiento real de la batería y el comportamiento simulado por el modelo. El primer paso consiste en determinar cuáles son los parámetros a elegir para el ajuste. Para identificar dichos parámetros a ajustar, se realizó un análisis de sensibilidad sobre un conjunto extendido de parámetros, utilizando las rutinas implementadas en `Design.Calibration` (3.5) para esta tarea. Fueron seleccionados aquellos parámetros que presentaron un mayor nivel de sensibilidad sobre el comportamiento del modelo: v_{Full} , v_{Exp} , q_{Exp} , v_{Nom} , q_{Nom} , v_{d0} , v_{d1} , q_{d0} , q_{d1} , $rtdCap$ y $SOC_{inicial}$.

El procedimiento de calibración realizado por `Dymola`[®] consiste en la resolución de un

problema de optimización multicriterio con restricciones, en el que la función de coste se define como una medida de la diferencia entre los datos experimentales y el resultado de la simulación para un vector de parámetros determinado. El vector de parámetros es la *variable* sobre la que se itera, partiendo de un valor inicial y hasta encontrar una solución.

En la figura 5.10, se compara el resultado del registro experimental con el resultado del modelo propuesto, parametrizado con los resultados obtenidos por *Design.Calibration* de *Dymola*[®] para el vector de parámetros seleccionado y que se tiene en la tabla 5.3, columna II. Esta solución se ha encontrado tras 401 iteraciones, a partir del valor inicial indicado en la tabla 5.3 columna I, con un tiempo de procesamiento necesario de 48 segundos.

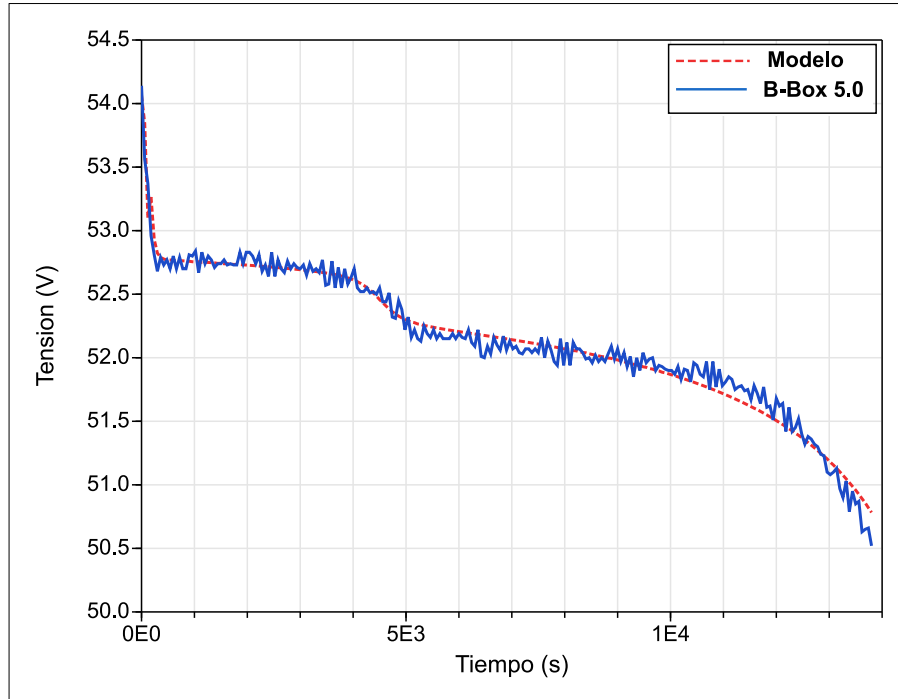


Figura 5.10

Gráfica del resultado de la calibración del modelo según ecuación (4.25)

Tabla 5.3

Parámetros obtenidos tras la calibración del modelo según ecuación (4.25) en columna II y según ecuación (4.15) en columna III.

Parámetro	I Valor inicial	II Valor final ecuación (4.25)	III Valor final ecuación (4.15)
V_{Nom}	52.60	53.37	53.58
q_{Nom}	54.00	54.00	54.01
$rtdCap$	100.00	90.00	100.00
V_{Full}	52.70	53.55	53.83
V_{Exp}	51.50	51.80	51.92
q_{Exp}	1.00	0.90	0.90
$vd0$	53.05	52.97	No aplica
$vd1$	52.50	52.58	No aplica
$qd0$	16.00	17.60	No aplica
$qd1$	25.00	22.97	No aplica
$SOC_{inicial}$	100.00	99.49	100.00

Observando los resultados de la figura 5.10 se puede apreciar como el modelo propuesto en el presente trabajo de acuerdo a la ecuación 4.25, una vez calibrado, simula adecuadamente el comportamiento particular de las baterías LiFePo4.

5.2.1.3. Comparación de Resultados

En esta sección se muestra la mejora en los resultados obtenida por el componente `LIonbatDizqah_LFP4_BBOX5_L1L2` (4.2.4.3) propuesto en el presente trabajo, con respecto al modelo original de partida propuesto en la bibliografía consultada para las baterías Li-Ion e implementado en el componente `LIonbatDizqah_LiIon_BBOX5_NoDec_L1L2` (4.2.4.1).

El procedimiento para la determinación de los parámetros básicos y la selección del vector de parámetros para la calibración es el mismo visto anteriormente, a excepción de los parámetros relativos al decaimiento que no están modelados en este caso, con lo que el vector de parámetros a calibrar es el siguiente: v_{Full} , v_{Exp} , q_{Exp} , v_{Nom} , q_{Nom} , $rtdCap$ y $SOC_{inicial}$. Los valores iniciales de estos parámetros son los indicados en la tabla 5.3, columna I. En la tabla 5.3, columna III, se tienen los valores resultantes de la calibración y en la figura 5.11 se muestran las gráficas del modelo original con el vector de parámetros calibrado y del experimento real.

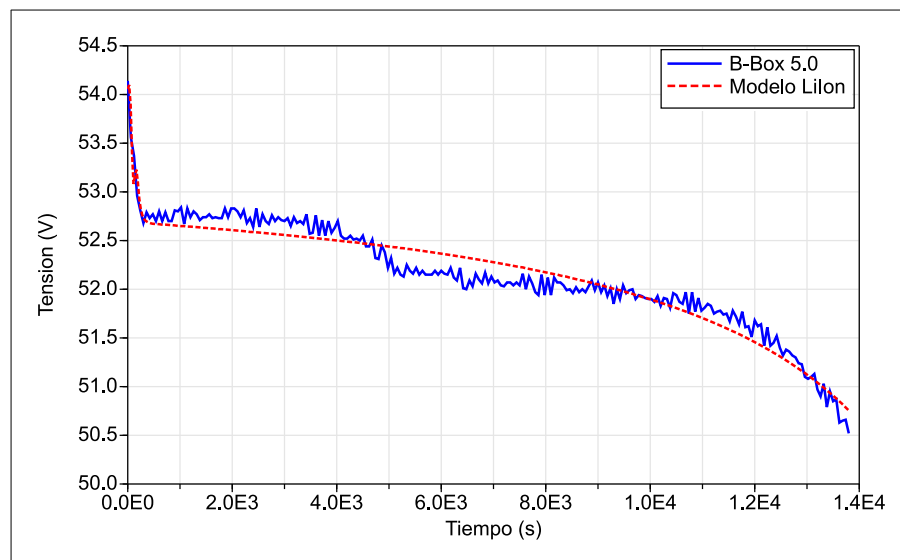


Figura 5.11

Gráfica del resultados del componente `LIonbatDizqah_LiIon_BBOX5_NoDec_L1L2` calibrado y del equipo real.

En la figura 5.12 se tiene la comparación gráfica de la simulación de los componentes, el original `LIonbatDizqah_LiIon_BBOX5_NoDec_L1L2` (Li-Ion) y el propuesto en el presente trabajo `LIonbatDizqah_LFP4_BBOX5_L1L2` (LiFePo4), con respecto al resultado experimental del grupo de baterías B-Box5.0 del CIESOL para una intensidad de descarga de 20 A.

Para la cuantificación de la bondad del ajuste de ambos modelos respecto a los resultados experimentales, se utiliza el indicador de ajuste **Normalized Root Mean Square Error - Raíz Normalizada del Error Cuadrático Medio (NRMSE)**, implementado en **Modelica®** en base al módulo de cálculo del NRMSE según [133]. Se ha obtenido un valor de $NRMSE = 2.98\%$ para el modelo propuesto en el presente trabajo (LiFePo4), respecto a $NRMSE = 4.93\%$ del modelo de partida (Li-Ion).

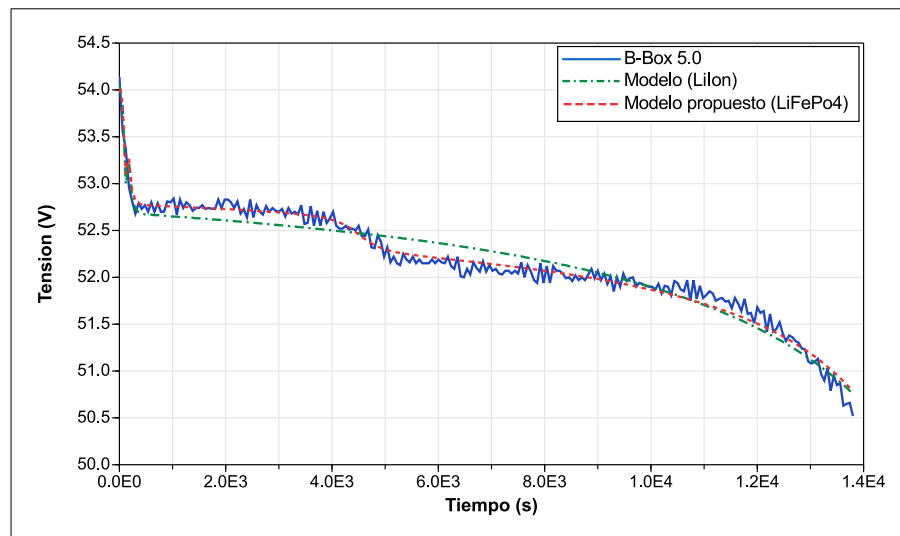


Figura 5.12

Gráfica con la comparación de resultados de los componentes `LIonbatDizqah_LiIon_BB0X5_NoDec_L1L2` y `LIonbatDizqah_LFP4_BB0X5_L1L2`, con respecto a los valores experimentales del equipo real.

El modelo propuesto en el presente trabajo para las baterías del tipo [LiFePo4 4.1.4.6](#) supone una de sus aportaciones principales y forma parte de las publicaciones asociadas [\[66\]](#). Permite una determinación simple de sus parámetros, ya sea a partir de las gráficas de descarga disponibles en la información comercial, o a partir de los experimentos en banco de pruebas sobre los componentes reales. La aportación principal del mismo es que, al tener en cuenta en sus ecuaciones el particular comportamiento de las baterías [LiFePo4](#), se obtiene un mejor ajuste respecto a los datos experimentales para este tipo de baterías ($NRMSE = 2.98\%$), que los modelos genéricos para baterías [Li-Ion \(4.1.4.4\)](#) encontrados en la bibliografía ($NRMSE = 4.93\%$). El modelo es válido igualmente para baterías [Li-Ion](#), y con ligeras modificaciones, para otras tecnologías de acumulador habitualmente utilizadas en los [EV](#), como [LA](#), [NiMH](#), [LiPo](#) y [NiCd](#).

5.2.2. Batería Li-Ion A123-26650

El modelo, mostrado anteriormente en [4.2.4.2](#), responde adecuadamente al comportamiento de las baterías [Li-Ion](#), tal como se expone en la bibliografía consultada [\[24\]](#) [\[10\]](#) [\[16\]](#) y se demuestra en la figura [5.13](#), en la que se presenta la evolución de la tensión en bornes respecto a la capacidad suministrada por la batería, comparándola con el modelo del componente `LIonbatDizqah_A123_26650` de la librería [VLDV](#). Los parámetros del modelo y la gráfica de descarga corresponden con los valores experimentales de una batería [Li-Ion ANR26650M](#) de 2500 mAh [\[12\]](#) [\[16\]](#) para una intensidad de descarga de 5 A (2C). La extracción de los valores de la gráfica de descarga de la batería se ha realizado con ayuda de la aplicación *ScanIT* [\(3.7\)](#) [\[127\]](#) a partir de la hoja de características comercial.

5.3. Modelo de Convertidor CC-CC Linealizado

Tal como se expuso anteriormente en [4.1.5](#), casi todos los componentes del [SEH](#) necesitan del uso de un convertidor de tensión capaz de adaptar la tensión del [DC-Link](#) al nivel demandado por el componente y/o viceversa. El número de convertidores que componen el

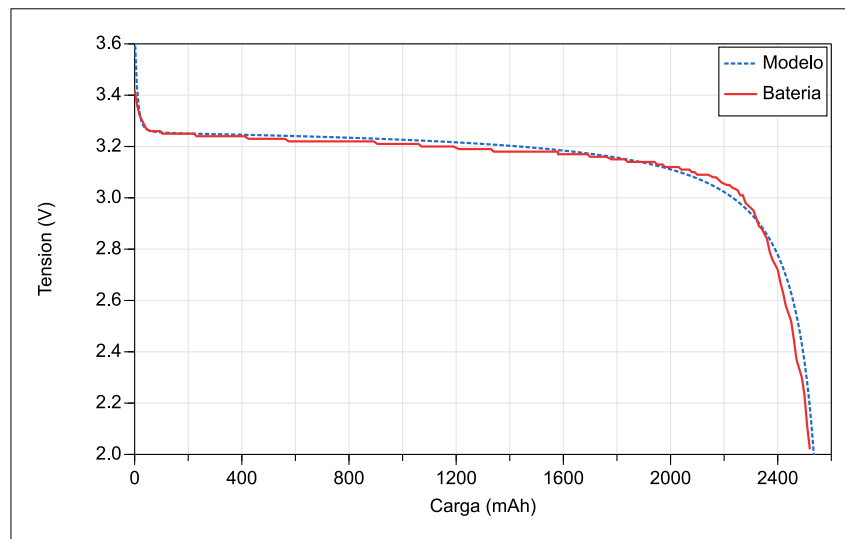


Figura 5.13

Gráficas de descarga del componente `LIonbatDizqah_A123_26650` y de la batería comercial `ANR26650M`, para una intensidad de 5 A (2C).

[SEH](#), puede igualar o incluso superar (en el caso de disponer de varios convertidores en serie para un mismo componente), al número de componentes que aportan y/o consumen energía. Esto puede suponer una carga computacional muy elevada en el caso de la simulación del vehículo completo, si no se dispone de los modelos adecuados.

En esta sección se llevan a cabo varias comparaciones y validaciones. En primer lugar, se han comparado los resultados obtenidos de la simulación de los modelos de convertidores [SWM](#) y [LZM](#) en [Dymola](#)[®], bajo las mismas condiciones de contorno: durante la fase de arranque y estabilización de tensión y bajo perturbaciones de tensión de entrada. Posteriormente se han comparado y validado los resultados obtenidos del modelo [LZM](#) en [Dymola](#)[®], con los obtenidos de la simulación de los modelos [LTSpice switched models - Modelos conmutados de componentes en LTSpice \(LTS\)](#) en [LTSpice XVII](#)[®], utilizados como referencia. Los modelos [LTS](#) son el resultado de la implementación en [LTSpice XVII](#)[®] de los modelos [SWM](#) de [Dymola](#)[®] en configuración **Boost** y **Buck**.

A los resultados de la simulación en [Dymola](#)[®] y [LTSpice XVII](#)[®] se ha aplicado un tratamiento estadístico que permite evaluar la bondad de ajuste entre los distintos modelos. El estadístico elegido en este caso es el [NRMSE](#), implementado en [Modelica](#)[®] en base al módulo de cálculo del [NRMSE](#) propuesto en [133].

Para cada una de las distintas configuraciones, la comparación se lleva a cabo entre los resultados obtenidos en [LTSpice XVII](#)[®] tomados como referencia y los obtenidos en [Dymola](#)[®] para el modelo de componentes conmutados [SWM](#) y el modelo linealizado [LZM](#) propuesto, que supone una de las aportaciones principales del presente trabajo y que ha dado lugar a una de las publicaciones asociadas [64]. Los resultados han demostrado que el comportamiento del modelo linealizado [LZM](#) es muy similar al del modelo de referencia [LTS](#), pero con unos tiempos de simulación hasta 4450 veces más rápido que su equivalente [SWM](#).

5.3.1. Medida de Tiempos de Simulación del Convertidor CC-CC

Para la determinación de los tiempos de simulación en [Dymola](#)[®] (3.4) de los distintos modelos propuestos, se ha utilizado un ordenador personal portátil con procesador [Intel](#)[®] *Core™ i5-430M* y memoria *4GB DDR3*.

5.3.1.1. Tiempos de Simulación del Modelo SWM

Puesto que la estructura del circuito del modelo SWM del tipo NHBBC (4.1.5.3) se modifica cada vez que cambia el estado de los conmutadores $Q1$ o $Q2$, es necesario durante la simulación reinicializar el conjunto de ecuaciones algebraicas y diferenciales del modelo al doble de la frecuencia de conmutación F de los conmutadores, lo que da una idea de la carga computacional necesaria.

Para la evaluación de los tiempos de simulación se han utilizado dos modelos distintos, uno con el convertidor en configuración **Boost** y otro en configuración **Buck**. Ambos modelos están compuestos de una fuente ideal de tensión a la entrada, del convertidor bidireccional del componente `EnergyBus.HalfBridge_DCmotor_100k_RcRl` expuesto en 4.2.5.1 en configuración **Boost/Buck** respectivamente y de una resistencia variable de carga a la salida.

Se ha tomado como referencia una simulación de 1 s de operación en tiempo real del modelo, que es suficientemente representativa y no implica tiempos de cálculo excesivamente largos.

Configuración Boost En la Figura 5.14, se puede apreciar la configuración de funcionamiento en modo Boost. Se han seleccionado las condiciones de operación más desfavorables para este modo, que corresponden a $V_{in}=6$ V y $V_{out}=48$ V. Se ha seleccionado una carga de salida de 10Ω que proporciona una potencia de 230 W para $V_{out}=48$ V, inferior a la potencia nominal del convertidor (250 W). El valor del intervalo de conmutación D se calcula en (5.1) a partir de la ecuación (4.45).

$$D = \frac{48 - 6}{48} = 0.875 \quad (5.1)$$

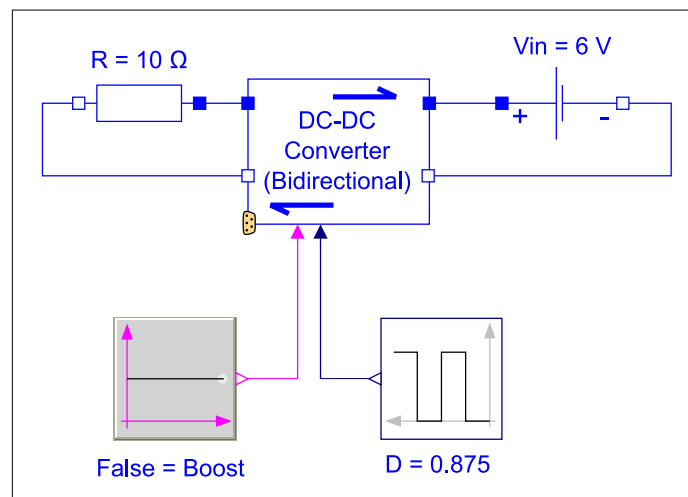


Figura 5.14

Diagrama simplificado del experimento con el convertidor SWM en modo Boost.
 $V_{in}=6$ V, $V_{out}=48$ V.

Con la herramienta `Dymola`[®], utilizando el método de integración `DASSL`, se lanza la

simulación del modelo propuesto durante 1 s y se obtienen los siguientes resultados:

```

Integration started at T = 0 using integration method DASSL
Integration terminated successfully at T = 1
CPU-time for integration : 48.5 seconds
...
Number of result points : 400502
...
Number of accepted steps : 2298718
Number of f-evaluations (dynamics) : 2697841
...

```

Una simulación de 1 s tarda en ejecutarse 48.5 s en el equipo descrito en 5.3.1. El resto de resultados da una idea de la carga computacional requerida por la simulación, en la que:

- *Number of result points* - Indica el número total de pasos de la simulación registrados por Dymola® en el fichero de resultados.
- *Number of accepted steps* - Indica el número total de pasos resueltos por el solver en la simulación. Los *result points* se extrapolan a partir de estos pasos.
- *Number of f-evaluations* - Indica el número de veces que se ejecutan las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los gradientes entre los estados.

Configuración Buck En la Figura 5.15, se puede apreciar la configuración de funcionamiento en modo Buck. Las condiciones de funcionamiento más desfavorables en este modo se corresponden con $V_{in} = 48$ V, $V_{out} = 36$ V. Se ha seleccionado una carga de salida de 6Ω , que proporciona una potencia de 216 W para $V_{out}=36$ V, inferior a la potencia nominal del convertidor. El valor del intervalo de conmutación D se calcula en (5.2) a partir de la ecuación (4.51).

$$D = \frac{36}{48} = 0.75 \quad (5.2)$$

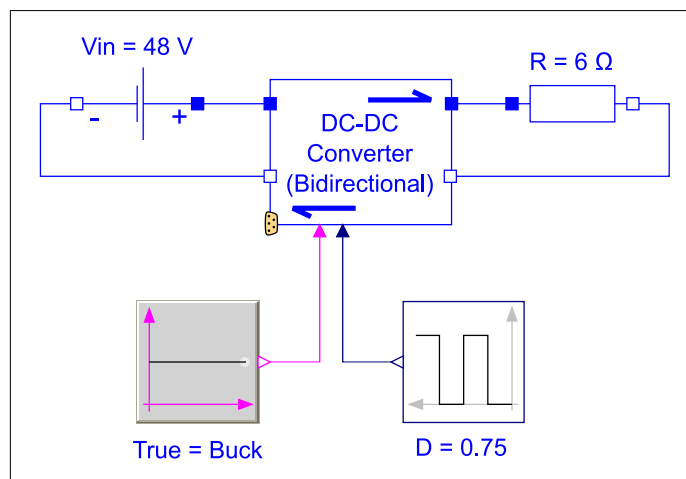


Figura 5.15

Diagrama simplificado del experimento con el convertidor SWM en modo Buck.
 $V_{in}=48$ V, $V_{out}=36$ V.

De nuevo se lanza la simulación de 1 s del modelo propuesto en [Dymola®](#), utilizando el método de integración [DASSL](#) y se obtienen los siguientes resultados:

```

Integration started at T = 0 using integration method DASSL
Integration terminated successfully at T = 1
CPU-time for integration : 53.4 seconds
...
Number of result points : 400502
...
Number of accepted steps : 3697301
Number of f-evaluations (dynamics) : 5396364
Number of crossing function evaluations : 4740200
...

```

Se obtiene una duración superior a la del modo *Boost*. Una simulación de 1 s tarda en ejecutarse 53.4 s en el equipo descrito en [5.3.1](#). Se comprueba como también en este caso hay una carga computacional importante.

5.3.1.2. Tiempos de Simulación del Modelo LZM

Como en la sección anterior, para la evaluación de los tiempos de simulación se han utilizado dos modelos distintos, uno del convertidor [LZM](#) en configuración **Boost** y otro en configuración **Buck**. Ambos modelos están compuestos de una fuente ideal de tensión a la entrada, del componente del convertidor linealizado en configuración **Boost/Buck** respectivamente y de una resistencia variable de carga a la salida.

Configuración Boost Se toma el modelo de convertidor linealizado ([LZM](#)) en configuración Boost del componente `BoostAveraged_100k_DCmotor_RcR1_2` mostrado en [4.2.5.2](#) y se le aplican las mismas condiciones de contorno que al modelo [SWM](#) vistas en [5.3.1.1](#):

- $V_{in} = 6 \text{ V}$
- $V_{out} = 48 \text{ V}$
- $R = 10 \text{ } \Omega$
- $D = \frac{48 - 6}{48} = 0.875$

Con la herramienta [Dymola®](#), utilizando el método de integración [DASSL](#), se lanza la simulación del modelo propuesto durante 1 s y se obtienen los siguientes resultados:

```

Integration started at T = 0 using integration method
DASSL
Integration terminated successfully at T = 1
CPU-time for integration : 0.014 seconds
...
Number of result points : 502
...
Number of accepted steps : 176
Number of f-evaluations (dynamics) : 346
...

```

El modelo [LZM](#) en configuración Boost propuesto, necesita solamente 0.014 s para realizar una simulación de 1 s. Es decir, que simula 3464 veces más rápido que su modelo [SWM](#) equivalente. Se comprueba como en este caso, se ha reducido de forma considerable la carga computacional.

Configuración Buck Se toma el modelo de convertidor linealizado (**LZM**) en configuración Buck del componente **BuckAveraged_100k_DCmotor_RcRl_2** mostrado en 4.2.5.3 y se le aplican las mismas condiciones de contorno que al modelo **SWM** vistas en 5.3.1.1:

- $V_{in} = 48 \text{ V}$
- $V_{out} = 36 \text{ V}$
- $R = 6 \Omega$
- $D = \frac{36}{48} = 0.75$

De nuevo, se lanza la simulación durante 1 s del modelo propuesto, con la herramienta **Dymola**[®], utilizando el método de integración **DASSL** y se obtienen los siguientes resultados:

```

Integration started at T = 0 using integration method
DASSL
Integration terminated successfully at T = 1
CPU-time for integration : 0.012 seconds
...
Number of result points : 502
...
Number of accepted steps : 338
Number of f-evaluations (dynamics) : 676
...

```

El modelo **LZM** en configuración Buck propuesto, necesita solamente 0.012 s para realizar una simulación de 1 s. Es decir, que simula 4450 veces más rápido que su modelo **SWM** equivalente. Se comprueba como también en este caso, se ha reducido de forma considerable la carga computacional.

5.3.2. Comparación y Validación del Comportamiento del modelo LZM

Una vez demostrada en la sección anterior, la considerable reducción del tiempo de simulación que ofrece el modelo **LZM** respecto al **SWM**, es necesario comparar sus respuestas. Además, es preciso validar los resultados de ambos modelos respecto a una referencia válida. En el presente trabajo se ha propuesto como referencia, los resultados obtenidos de la simulación del circuito equivalente implementado en la herramienta **LTSpice XVII**[®] (3.6).

En esta sección se lleva a cabo la comparación y validación del comportamiento de los modelos propuestos **LZM** en configuración Boost/Buck, con respecto a sus modelos **SWM** en configuración Boost/Buck equivalentes. La comparación de los resultados se realiza tanto en condiciones de arranque y estabilización, como en condiciones de funcionamiento dinámico para observar el comportamiento frente a perturbaciones.

Para la comparación de resultados entre los modelos de componentes **SWM** y los modelos linealizados **LZM**, se han aplicado las mismas condiciones de contorno, en una misma simulación. Para la validación de los modelos **LZM**, se han utilizado los datos resultantes de la simulación en la herramienta **LTSpice XVII**[®] de los modelos **LTS** (equivalentes a los modelos **SWM**). Se decidió utilizar la herramienta **LTSpice XVII**[®] como referencia por la fiabilidad de sus resultados en el ámbito de los circuitos electrónicos.

En la **fase de arranque y estabilización** se comparan los resultados de los modelos **SWM** (Boost, Buck) presentados en las Figuras 5.14 y 5.15, con los modelos **LZM** (Boost,

Buck), bajo las mismas condiciones de contorno y parámetros (tensión de entrada, resistencia de carga y tiempo de activación del ciclo, D), con ayuda de la herramienta **Dymola**[®]. La validación de los resultados de los modelos **LZM** (Boost, Buck) en **Dymola**[®] se hace con respecto a los resultados de simulación de los modelos **LTS** (Boost, Buck) en **LTSpice XVII**[®] presentados en las Figuras 5.17 y 5.21, también bajo las mismas condiciones (tensión de entrada, resistencia de carga y tiempo de activación del ciclo, D).

En condiciones de **funcionamiento dinámico**, el convertidor de tensión se ve sometido a oscilaciones en la tensión de alimentación, en la carga aplicada y en el tiempo de activación del ciclo, D (que es modificado por el sistema de control para la regulación de la tensión/intensidad de salida del convertidor). La comparación de los resultados en funcionamiento dinámico se ha realizado para los modelos en configuración Boost y para perturbaciones en la tensión de entrada V_{in} , especialmente crítica en el caso del funcionamiento del motor como generador en la recuperación de energía en la frenada.

5.3.2.1. Comparación y Validación en la Fase de Arranque y Estabilización

Configuración Boost Para la comparación de los modelos **SWM** y **LZM** en configuración Boost se utiliza el diagrama simplificado en **Dymola**[®] de la Figura 5.16. Se realiza una simulación de 0.03 s, con una tensión de entrada de 0 a 6 V con una rampa lineal de 0.01 s, una carga resistiva de 10 Ω y un valor fijo de $D = 0.875$ para ambos modelos.

La validación del modelo **LZM** se hace tomando como referencia los resultados de la simulación del modelo **LTS** de la Figura 5.17, almacenados en la tabla **LTSpicetable** en el diagrama de la Figura 5.16.

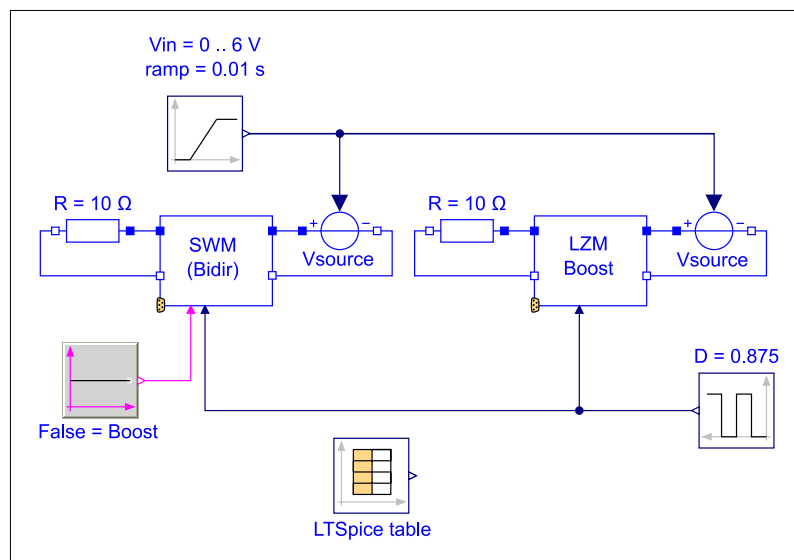


Figura 5.16

Diagrama simplificado en **Dymola**[®] para la comparación y validación de prestaciones entre los modelos **SWM**, **LZM** y **LTS** en configuración Boost durante la fase de arranque y estabilización.

La tensión de salida en los modelos de componentes **SWM** y **LTS**, fluctúa a la frecuencia propia de conmutación del convertidor, tal como se aprecia en la Figura 5.18. Para una adecuada comparación de resultados entre los modelos conmutados **SWM**, **LTS** y el modelo linealizado **LZM**, es necesario aplicar a esta tensión de salida un cálculo de su valor promedio. Se ha utilizado para este fin la función **RectifiedMean** [98] de **Modelica**[®], que realiza el

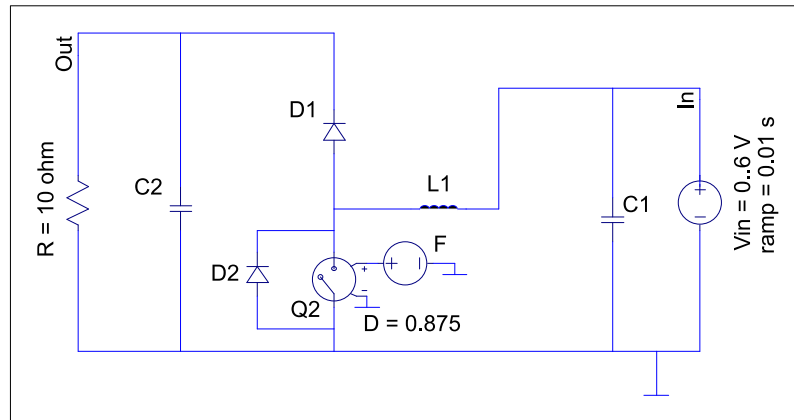


Figura 5.17

Modelo LTS en LTSpice XVII® en configuración *Boost* para simulación de la fase de arranque y estabilización.

cálculo del valor **Average Rectified Value - Valor Rectificado Medio (ARV)**, que representa el valor medio absoluto de la señal durante un periodo completo del ciclo [23]. El cálculo se realiza de forma continua para un tiempo de ciclo de $1 \cdot 10^{-5}$ s.

El cálculo del **NRMSE** se ha realizado sobre el valor **ARV**, para el periodo de simulación comprendido entre los 0.01 y 0.03 s y para una frecuencia de muestreo de $1 \cdot 10^5$ Hz. Se ha seleccionado esta frecuencia al objeto de obtener un suficiente número de muestras para el cálculo, resultando para el intervalo seleccionado un total de $2 \cdot 10^3$ muestras. Se aplica este mismo criterio para los cálculos sucesivos del **NRMSE**.

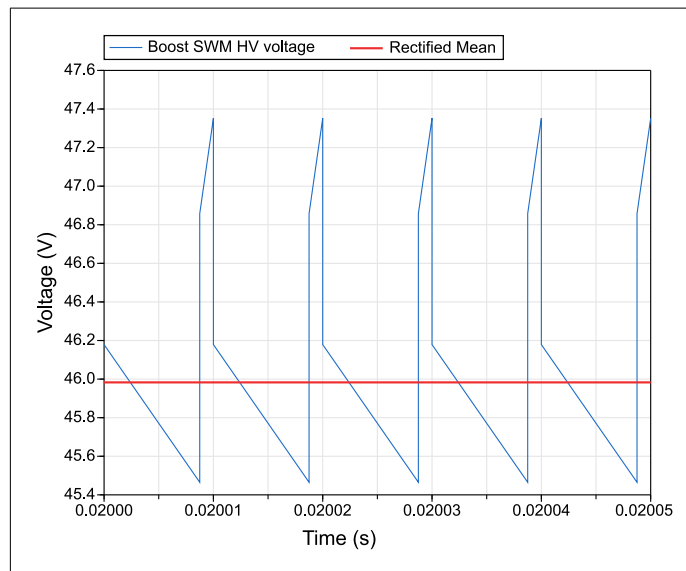


Figura 5.18

Valor ARV calculado de la tensión de salida en condiciones estabilizadas para el convertidor SWM (Boost).

Los resultados gráficos de la comparación se tienen en la Figura 5.19. En el primer gráfico (a), se observa el comportamiento de los tres modelos en todo el rango de tiempo. En el segundo gráfico (b), se observa el resultado de las diferencias entre las señales **SWM-LZM** y **LTS-LZM**:

- (SWM-LZM) Una vez estabilizada la tensión de salida del convertidor (LZM, 45.994 V $t = 0.03$ s), se observa una diferencia de 9.55 mV (0.021 %) entre ambos modelos. El NRMSE alcanza un valor de 0.001115 en el instante $t = 0.03$ s.
- (LTS-LZM) Una vez estabilizada la tensión de salida del convertidor (LZM, 45.994 V $t=0.03$ s), se observa una diferencia de 844 mV (1.923 %) entre ambos modelos. El NRMSE alcanza un valor de 0.8665 en el instante $t = 0.03$ s.

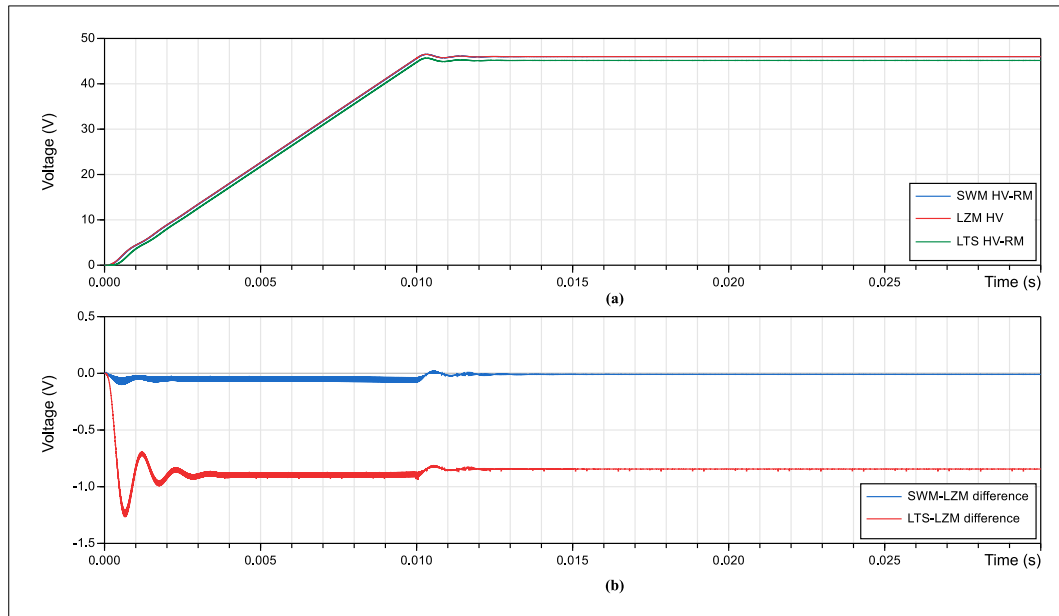


Figura 5.19

Comparación de la tensión de salida de los convertidores SWM, LZM y LTS en configuración Boost durante la fase de arranque y estabilización: (a) Valor ARV de la tensión de salida. (b) Diferencias entre SWM-LZM y LTS-LZM.

Estos resultados muestran que durante las fases de arranque y estabilización, las diferencias entre los modelos SWM y LZM son despreciables. Las diferencias entre los modelos LZM and LTS son también pequeñas, si bien existe un ligero decalaje de la señal que se mantiene prácticamente constante a lo largo del tiempo de simulación. Además, en el transitorio de la puesta en tensión, la respuesta de los tres modelos es muy similar.

Configuración Buck Para la comparación de los modelos SWM y LZM en configuración Buck se utiliza el modelo de la Figura 5.20. Se realiza una simulación de 0.03 s, con una tensión de entrada de 0 a 48 V con una rampa lineal de 0.01 s, una carga resistiva de 6Ω y un valor fijo de $D = 0.75$ para ambos modelos.

La validación del modelo LZM se hace tomando como referencia los resultados de la simulación del modelo LTS de la Figura 5.21, almacenados en la tabla LTSpicetable en el diagrama de la Figura 5.20.

Como en el caso anterior de la configuración Boost, la tensión de salida en los modelos de componentes SWM y LTS fluctúa a la frecuencia propia de conmutación del convertidor, por lo que es necesario obtener su valor promedio. Se ha utilizado igualmente la función RectifiedMean [98] de Modelica[®], para el cálculo del valor ARV [23]. El cálculo se realiza de forma continua para un tiempo de ciclo de $1 \cdot 10^{-5}$ s.

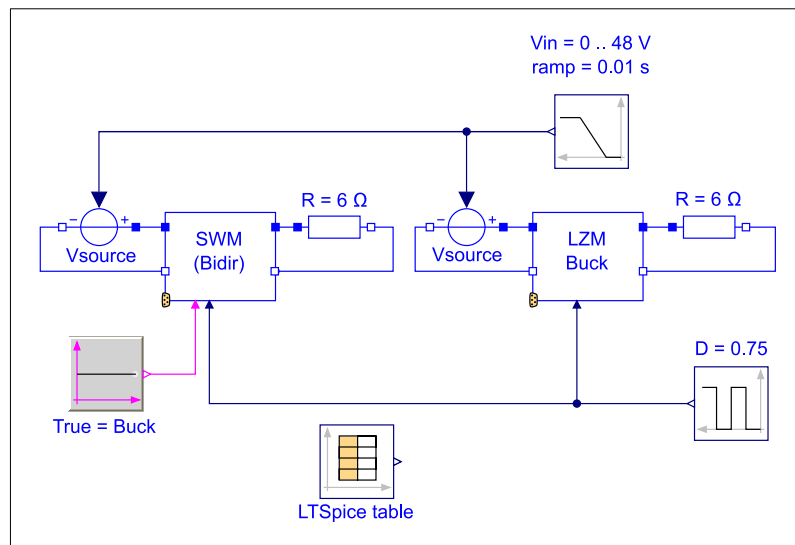


Figura 5.20

Diagrama simplificado en Dymola[®] para la comparación y validación de prestaciones entre los modelos SWM, LzM y LTS en configuración Buck durante la fase de arranque y estabilización.

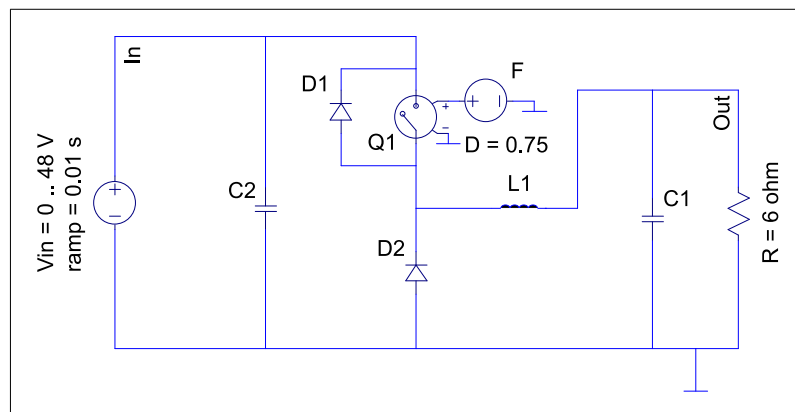


Figura 5.21

Modelo LTS en LTSpice en configuración Buck para simulación de la fase de arranque y estabilización.

El cálculo del **NRMSE** se ha realizado sobre el valor **ARV** para el periodo de simulación comprendido entre los 0.01 y 0.03 s y para una frecuencia de muestreo de $1 \cdot 10^5$ Hz.

Los resultados gráficos de la comparación se tienen en la Figura 5.22. En el primer gráfico (a), se observa el comportamiento de los tres modelos en todo el rango de tiempo. En el segundo gráfico (b), se observa el resultado de las diferencias entre las señales **SWM-LzM** y **LTS-LzM**:

- (**SWM-LzM**) Una vez estabilizada la tensión de salida del convertidor (**LzM**, 35.982 V, $t = 0.03$ s), se observa una diferencia de $6.68 \cdot 10^{-5}$ V (0.000185 %) entre ambos modelos. El **NRMSE** alcanza un valor de 0.001026 en el instante $t = 0.03$ s.
- (**LTS-LzM**) Una vez estabilizada la tensión de salida del convertidor (**LzM**, 35.982 V, $t = 0.03$ s), se observa una diferencia de 197 mV (0.548 %) entre ambos modelos. El

NRMSE alcanza un valor de 0.1973 en el instante $t = 0.03$ s.

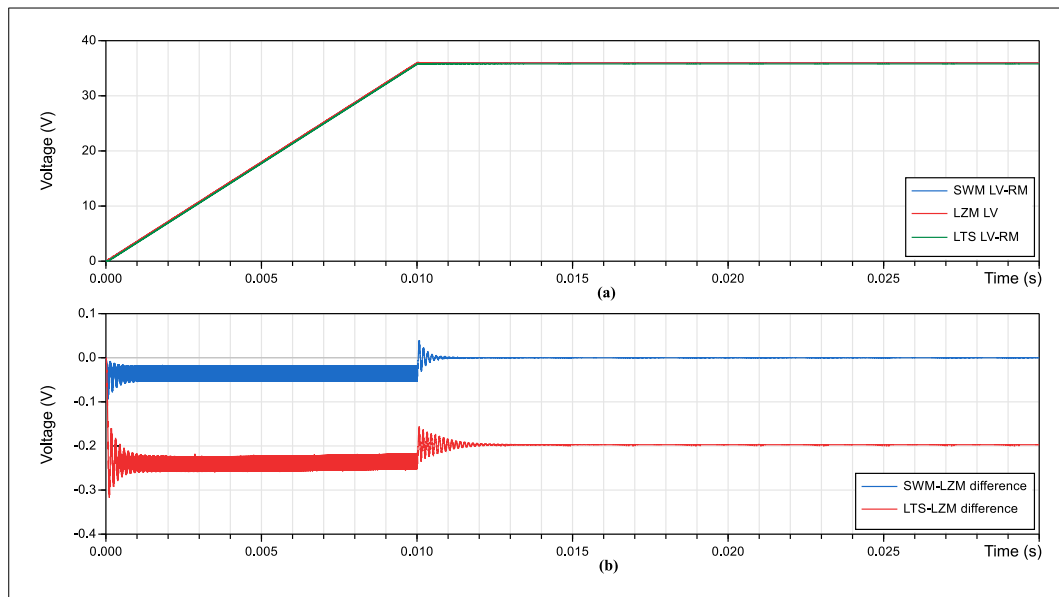


Figura 5.22

Comparación de la tensión de salida de los convertidores SWM, LZM y LTS en configuración *Buck* durante la fase de arranque y estabilización: (a) Valor ARV de la tensión de salida. (b) Diferencias entre SWM-LZM y LTS-LZM.

Los resultados obtenidos muestran que las diferencias en las respuestas de los tres modelos son despreciables durante la fase de arranque y estabilización. Se observa además que la respuesta de todos los modelos durante el arranque es muy similar.

5.3.2.2. Comparación y Validación Bajo Perturbaciones Sinusoidales

En esta sección se comparan los resultados en la tensión de salida de los modelos **SWM**, **LZM** y **LTS** en configuración Boost, al inducir perturbaciones en la tensión de entrada. Esta variación de la tensión de entrada al convertidor, pretende emular lo que sucede durante la recuperación de energía del motor en la frenada. La variación de la tensión de entrada se hace de acuerdo a una función sinusoidal con un valor nominal de 7 V, frecuencia de 10 Hz y una amplitud de ± 1 V. La variación de tensión se aplica a partir del instante $t = 0.01$ s para evitar las oscilaciones de la puesta en tensión al inicio de la simulación. Se ha realizado una simulación de 0.3 s en **Dymola**[®], con un valor constante de $D = 0.875$ y con una carga resistiva de 10 Ω . Para la validación del comportamiento dinámico del convertidor linealizado **LZM** en configuración Boost, se han utilizado los datos resultantes de la simulación del modelo **LTS** en **LTSpice XVII**[®] de la Figura 5.23 bajo las mismas condiciones de contorno.

Tal como en 5.3.2.1, se ha utilizado la función **RectifiedMean** [98] de **Modelica**[®] para el cálculo del valor **ARV** [23] de la tensión de salida de los modelos de convertidor **SWM** y **LTS**, lo que permite su comparación con los resultados del modelo linealizado **LZM**. El cálculo se realiza de forma continua para un tiempo de ciclo de $1 \cdot 10^{-5}$ s.

El cálculo del **NRMSE** se ha realizado sobre el valor **ARV**, para el periodo de simulación comprendido entre los 0.01 y 0.03 s y para una frecuencia de muestreo de $1 \cdot 10^5$ Hz.

En la Figura 5.24 se tiene el diagrama simplificado en **Dymola**[®] del modelo utilizado para la comparación y validación de resultados. Los resultados de la simulación del modelo

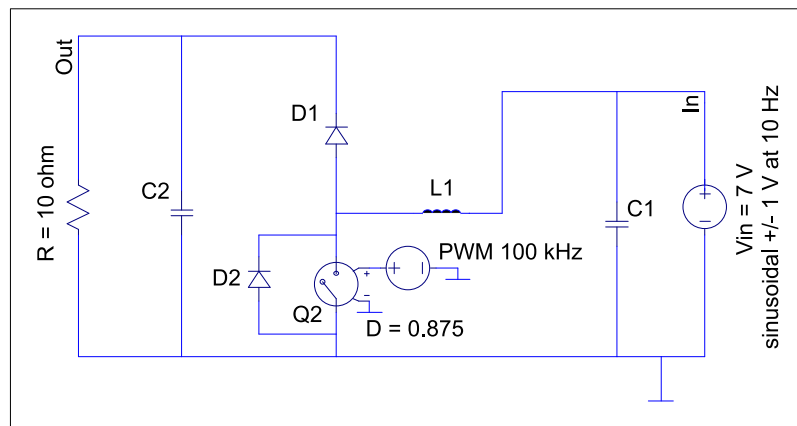


Figura 5.23

Modelo LTS en LTSpice en configuración *Boost* para simulación con variaciones sinusoidales de la tensión de entrada.

LTS en LTSpice XVII[®] de la Figura 5.23 están almacenados en la tabla LTSpicetable en el diagrama de la Figura 5.24.

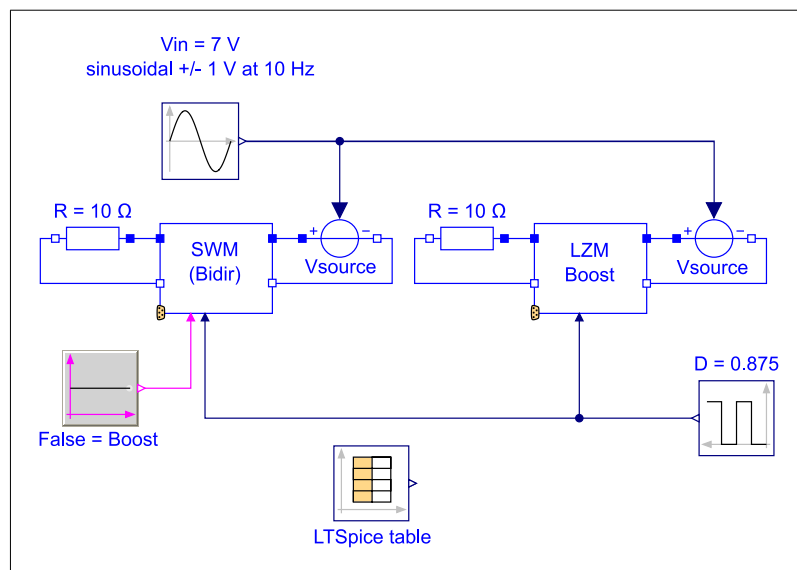


Figura 5.24

Diagrama simplificado en Dymola[®] para la comparación y validación de prestaciones entre los modelos SWM, LZM y LTS en configuración *Boost* bajo variaciones sinusoidales de la tensión de entrada.

Los resultados gráficos de la comparación se tienen en la Figura 5.25 para el intervalo de tiempo de 0.01 a 0.3 s. En el primer gráfico (a), se observa el comportamiento de los tres modelos SWM, LZM y LTS. En el segundo gráfico (b), se observa el resultado de las diferencias entre las señales SWM-LZM y LTS-LZM:

- (SWM-LZM) Las diferencias en la tensión de salida oscilan entre -4.9 mV y -23.4 mV para el intervalo 0.01 a 0.3 s, lo que resulta en una diferencia máxima de -0.0435 % para un valor de tensión de salida ARV de 53.7 V. El NRMSE alcanza un valor de 0.003165 en el instante $t = 0.03$ s.

- (**LTS-LZM**) Las diferencias en la tensión de salida oscilan entre -858 mV and -877 mV para el intervalo 0.01 a 0.3 s, lo que resulta en una diferencia máxima de -1.633 % para un valor de tensión de salida **ARV** de 53.7 V. El **NRMSE** alcanza un valor de 0.2153 en el instante $t = 0.03$ s.

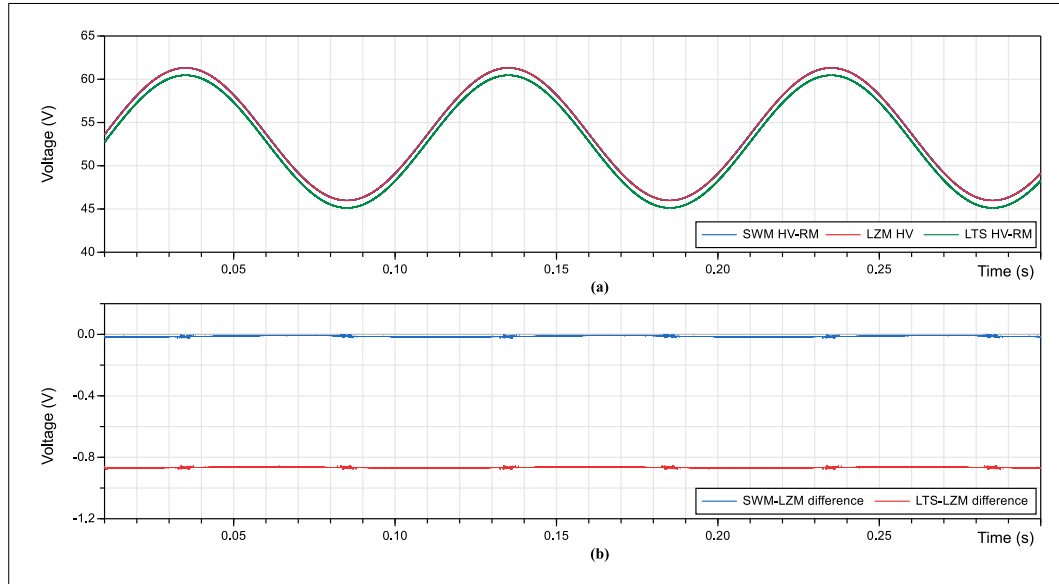


Figura 5.25

Comparación de la tensión de salida de los convertidores SWM, LZM y LTS en configuración *Boost* bajo variaciones sinusoidales de la tensión de entrada: (a) Valor ARV de la tensión de salida. (b) Diferencias entre SWM-LZM y LTS-LZM.

Estos resultados muestran que las diferencias entre los modelos en funcionamiento dinámico son despreciables, incluso para fluctuaciones significativas en la tensión de entrada. En condiciones dinámicas, bajo perturbaciones sinusoidales, las diferencias entre los modelos **SWM** y **LZM** son ligeramente superiores a las obtenidas en la fase de arranque y estabilización. Al contrario, las diferencias entre los modelos **LTS** y **LZM** son ligeramente inferiores bajo estas perturbaciones que las obtenidas en la fase de arranque y estabilización.

En conclusión, los resultados muestran que el comportamiento del modelo linealizado **LZM** es muy similar al del modelo de referencia **LTS**, pero con unos tiempos de simulación hasta 4450 veces más rápido que su equivalente **SWM**.

5.3.3. Convertidor Bidireccional

Tal como se ha mencionado anteriormente en este trabajo, se ha propuesto un modelo de convertidor bidireccional linealizado **NHBBC** para su uso en la alimentación del motor de tracción y la recuperación de energía en la fase de frenado del vehículo. En la sección anterior (5.3.2), se han comparado y validado los resultados del convertidor **LZM** en funcionamiento unidireccional para configuraciones Boost y Buck.

En este apartado, se demuestra la capacidad del modelo linealizado **LZM** de operar en modo bidireccional bajo un ciclo de funcionamiento que alterna entre las configuraciones Boost y Buck.

Se puede obtener un modelo de convertidor bidireccional conmutable Boost-Buck como el del componente **HvLvAvgBuBo** de la Figura 5.26, combinando los modelos linealizados **LZM**

en configuración Boost-Buck propuestos en 4.1.5.4 y 4.1.5.5 respectivamente. El modelo resultante, expuesto en 4.2.5.4, ha sido utilizado para la simulación del comportamiento bidireccional.

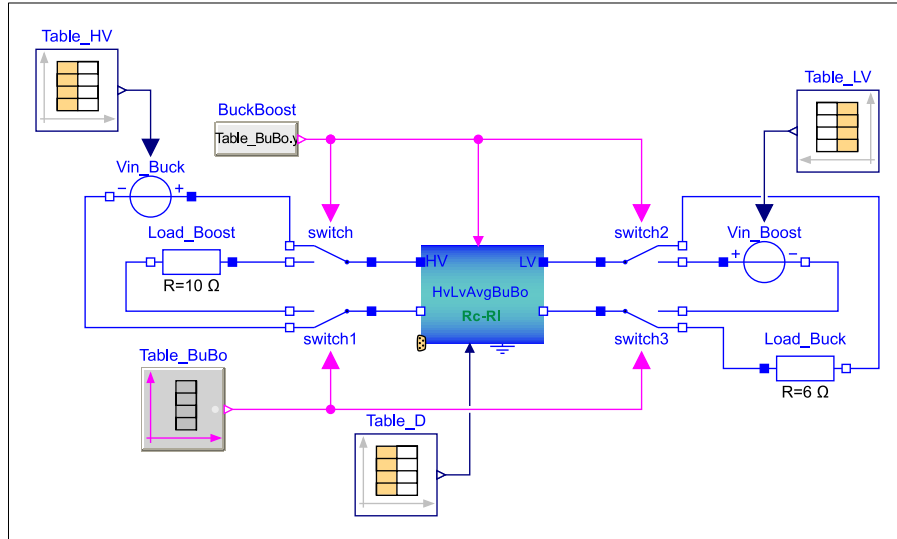


Figura 5.26

Diagrama en Dymola del experimento para la simulación del convertidor bidireccional linealizado Boost-Buck.

Durante la operación en configuración Buck, se aplica una tensión de entrada constante de 48 V que corresponde con la tensión nominal del DC-Link, una resistencia de carga constante de 6 Ω y un valor variable de D , de acuerdo con la ecuación 4.51, para obtener la tensión de salida deseada.

Durante la operación en configuración Boost, la tensión de salida debe coincidir siempre con la tensión nominal del DC-Link, por tanto el valor de D debe ajustarse continuamente de acuerdo a la ecuación 4.45, en función de la tensión de entrada, para una carga de salida constante de 10 Ω . En la tabla 5.4 se resume el ciclo de operación propuesto.

Tabla 5.4

Ciclo de operación del convertidor bidireccional Buck-Boost

Tiempo (s)	Modo	D	HV (V)	LV (V)
0	Buck	0.5	48	–
2	Buck	0.75	48	–
4	Boost	0.625	–	18
6	Boost	0.75	–	12
8	Boost	0.875	–	6
10	Buck	0.75	48	–

En la Figura 5.27 se muestran los resultados de la simulación. En el gráfico (a), se tienen las tensiones High voltage - Voltaje Alto (HV) y Low Voltaje - Baja Tensión (LV) del convertidor a lo largo del ciclo. En el gráfico (b), se tiene la evolución del valor de D . En el gráfico (c), se tiene el modo de operación (Boost/Buck) en cada fase del ciclo de operación.

A continuación se muestra cómo la simulación en Dymola® del ciclo completo de 12 s de duración necesita solamente de 1 s, lo que demuestra la posibilidad de utilizar varias instancias de este componente en un modelo completo del SEH o del vehículo, manteniendo unos tiempos de simulación reducidos.

*Integration started at $T = 0$ using integration
method DASSL*

...

*Integration terminated successfully at $T = 12$
CPU-time for integration : 1 seconds*

...

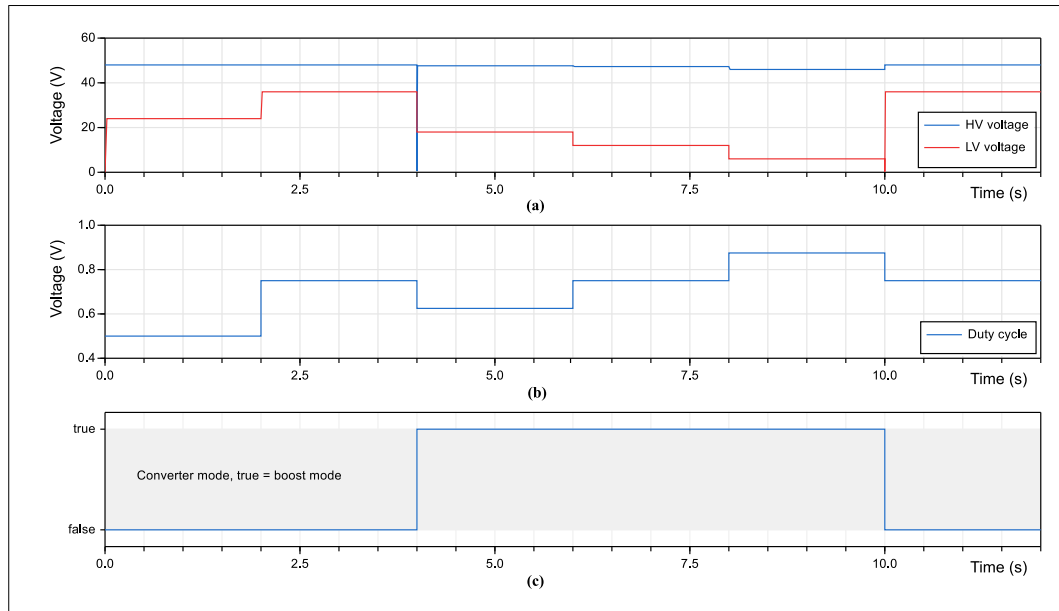


Figura 5.27

Simulación del convertidor bidireccional Boost/Buck para el ciclo de operación propuesto en la Tabla 5.4: (a) Tensiones LV y HV del convertidor. (b) Ciclo de trabajo D . (c) Modo de operación del convertidor (True = modo Boost, False = modo Buck).

5.3.4. Discusión de Resultados

En este apartado se discuten los resultados obtenidos de la comparación y validación del comportamiento del modelo LZM propuesto, que supone una de sus aportaciones principales y forma parte de las publicaciones asociadas [64].

Los resultados obtenidos en el apartado 5.3.1.2, demuestran cómo los tiempos de simulación en Dymola® se reducen desde los 48.5 s para el modelo SWM, hasta solamente 0.014 s para el modelo LZM en una simulación de 1 s en configuración **Boost**. En la configuración **Buck** los tiempos caen desde 53.4 s para el modelo SWM hasta los 0.012 s para el modelo LZM. Por tanto, el modelo linealizado LZM propuesto permite simulaciones entre 3464 y 4450 veces más rápidas que su equivalente SWM.

Como resultado de lo anterior, las simulaciones en Dymola® del modelo LZM propuesto son entre 71.4 y 83.3 veces más rápidas que en tiempo real respectivamente, para el equipo utilizado para el presente trabajo (Procesador Intel® Core™ i5-430M, Memoria 4 GB DDR3). Extrapolando los resultados obtenidos se tiene que, para completar la simulación de un ciclo normalizado ECE15 [21](195 s), se necesitan solamente entre 2.73 y 2.34 s según el modo de funcionamiento del convertidor.

Los resultados vistos en el apartado 5.3.2 muestran cómo el comportamiento del modelo LZM es muy similar al del modelo de referencia LTS, tanto durante la fase de arranque y

estabilización, como bajo perturbaciones en la tensión de alimentación del convertidor.

Durante las simulaciones de la fase de arranque y estabilización, se han obtenido los resultados siguientes (apartado 5.3.2.1):

- En configuración **Boost**, los modelos **LZM** y **LTS** muestran una respuesta muy similar en el transitorio del arranque, con un ligero decalaje de tensión durante la simulación. Una vez alcanzada la estabilización de la tensión de salida (**LZM**, 45.994 V en $t = 0.03$ s), se tiene un diferencia de 844 mV (1.923 %) entre ambos modelos. En esta simulación se tiene un **NRMSE** = 0.8665 para $t=0.03$ s.
- En configuración **Buck**, los modelos **LZM** y **LTS** muestran de nuevo una respuesta muy similar durante el transitorio de arranque, también con un ligero decalaje de tensión a lo largo de la simulación. Una vez alcanzada la estabilización de la tensión de salida (**LZM**, 35.982 V en $t=0.03$ s), este decalaje se mantiene en 197 mV (0.548 %) entre ambos modelos. En esta simulación se tiene un **NRMSE** = 0.1973 para $t=0.03$ s.

Durante las simulaciones en configuración **Boost** bajo perturbaciones sinusoidales en la tensión de entrada (amplitud 1 V, frecuencia 10 Hz), se han obtenido los siguientes resultados (apartado 5.3.2.2):

- La respuesta dinámica de los modelos **LTS** y **LZM** ha sido muy similar, con un decalaje muy pequeño de la tensión de salida durante toda la simulación. Esta diferencia fue menor que la encontrada durante la simulación de la fase de arranque y estabilización.
- El decalaje observado osciló entre los -858 mV y -877 mV para el intervalo de $t = 0.01$ a 0.3 s, que arroja una diferencia máxima entre modelos de -1.633 % para **ARV** = 53.7 V. En esta simulación se tiene un **NRMSE** = 0.2153 para $t=0.03$ s.

En el apartado 5.3.3 se demuestra la capacidad de operación bidireccional en configuración Boost-Buck del modelo linealizado **LZM** durante una simulación de un ciclo de trabajo. Esta capacidad para operar en configuración Boost en un sentido y Buck en el inverso en caso necesario, junto con su rapidez y precisión, lo hacen especialmente adecuado para la simulación del vehículo completo equipado con varios convertidores del tipo **NHBBC**.

5.4. Modelo del Vehículo Completo

5.4.1. Descripción del Modelo

Al objeto de simular el funcionamiento del vehículo completo, se ha creado el modelo **VehicleAvDrive_PV** en el subpaquete **Model** de la librería **VLDV**, cuyo diagrama en **Dymola**[®] se puede ver en la figura 5.28.

El vehículo propuesto es un **ULEV** alimentado por batería, con motor eléctrico capaz de recuperar energía en las frenadas y equipado con un **PVP** como principal fuente de energía renovable. El **SEH** está compuesto por los elementos anteriores y sus respectivos convertidores de tensión en el caso del motor, **PVP** y accesorios (alumbrado, alimentación de elementos de control y mando), así como de la batería, que para este caso se conecta directamente el **SEH**. Los componentes principales del modelo, alguno de los cuales han sido referenciados en los capítulos anteriores, son los siguientes:

- **Atmósfera**. Instanciado del componente **VLDVConstantAtmosphere**, mostrado en 4.2.1.1.

- **Sistema de Coordenadas.** Instanciado del componente `World` de la [MSL](#), mostrada en [3.2.1](#).
- **Parámetros del Vehículo.** Instanciado de la clase `ParamTriAVDrive_2`, mostrada en [4.1.2.3](#).
- **Panel Fotovoltaico.** Instanciado del componente `PV_Vill_KC200GT_improved`, mostrado en [4.2.3.1](#).
- **Batería.** Instanciada del componente `LIonbatDizqah_LFP4_BBOX5_L1L2`, mostrado en [4.2.4.3](#). Parametrizada para una capacidad nominal de 10 Ah.
- **Motor de Tracción.** Instanciado del componente `DCMotorRN120_1D_RevisedkE_MB`, mostrado en [4.2.6](#).
- **Convertidor PV.** Instanciado del componente `BoostAveraged_15k_PVpanel_RcRl_2_Res`, mostrado en [4.2.5.5](#).
- **Convertidor Bidireccional Motor.** Instanciado del componente `BuBoAveraged_100k_DCMotor_RcRl_2_Res_Cond`, mostrado en [4.2.5.4](#).
- **Convertidor Accesorios.** Instanciado del componente `BuckAveraged_15k_Acc_RcRl_2_Res`, mostrado en [4.2.5.6](#).
- **Chasis.** Instanciado del componente `TricycleAVDriveMinimal`, mostrado en [4.2.2.1](#).
- **Frenos.** Instanciado del componente `Brake.ThreeWheelAVDriveMinimal` de la librería [VLDV](#).
- **Bus de Control.** Instanciado del componente `Interfaces.ControlBus` de la librería [VI](#), presentada en [3.3](#).
- **Puesto de Conducción.** Instanciado del componente `External_Driver_Freno`, incluido en el subpaquete `DriverEnvironment` de la librería [VLDV](#).
- **Conductor.** Instanciado del componente `Cond_C3600_v3`, incluido en el subpaquete `Driver` de la librería [VLDV](#).
- **Controlador del Convertidor del PV.** Instanciado del componente `Converter_PV_Contr`, incluido en el subpaquete `Driver` de la librería [VLDV](#).
- **Controlador del Convertidor Bidireccional del Motor.** Instanciado del componente `Controller.ConverterMotorControllerTable` de la librería [VLDV](#).
- **Controlador del Convertidor de los Accesorios.** Instanciado del componente `Controller.ConverterAccesoriesController` de la librería [VLDV](#).

5.4.2. Ciclos de Conducción

Los resultados de la simulación del vehículo van a depender de las condiciones solicitadas y de su duración, por tanto, es necesario partir de ciclos de conducción que permitan comparar los resultados obtenidos para las distintas configuraciones o soluciones técnicas propuestas.

Los ciclos de conducción son utilizados principalmente como base para los test de emisiones de gases y consumo en vehículos. Las actuales normativas a nivel mundial obligan a la realización de este tipo de test en los nuevos vehículos comercializados. Un ciclo de conducción es un plan de operación fijo del vehículo, que permite la realización de los test

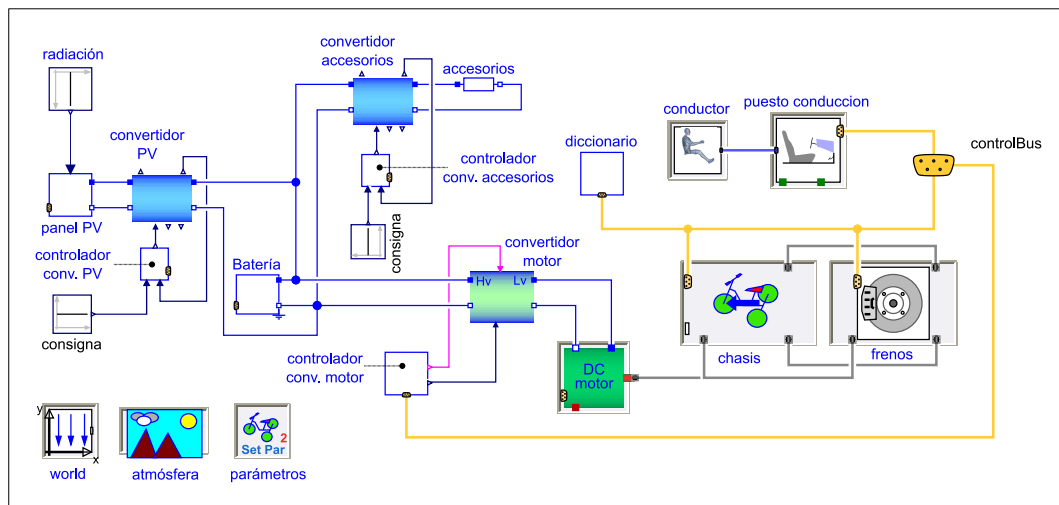


Figura 5.28

Diagrama del modelo del vehículo completo *VehicleAvDrive_PV*.

de emisiones y consumo bajo condiciones reproducibles; habitualmente está definido como una secuencia de consignas de velocidad del vehículo en función del tiempo.

En la bibliografía [21] se pueden encontrar multitud de ciclos de conducción normalizados, para distintas categorías de vehículos (motocicletas, coches, camiones, autobuses, etc.) y condiciones de uso (ciclos urbanos, extraurbanos, autopista, mixtos, etc.), definidos por las distintas administraciones y centros de investigación. Dado que para el caso concreto del presente trabajo, el vehículo propuesto tiene una velocidad máxima de 25km/h, no le son de aplicación la gran mayoría de los ciclos urbanos ya definidos, que suelen llegar a los 50km/h o bien tienen perfiles o duraciones no adecuadas al mismo.

Se han definido para el presente trabajo dos nuevos ciclos de conducción, adaptados a las limitaciones del vehículo, a su uso principalmente urbano y con una duración suficiente para un adecuado análisis energético. Partiendo de la idea base del ciclo urbano [New European Drive Cycle - Nuevo Ciclo de Conducción Europeo \(NEDC\)](#), [21], [45], se limita el valor máximo de velocidad a 25 km/h y se prolonga su duración para acercarla a los valores reales de uso en desplazamientos urbanos. Los dos nuevos ciclos definidos y con los que se lleva a cabo el análisis de actuaciones del vehículo, se denominan *VLDV3600-U1* para una duración de 3600 s y *VLDV4200-U1* para una duración de 4200 s, que complementa el anterior con una fase de reposo del vehículo de 600 s.

En el ciclo *VLDV3600-U1*, se pretenden simular las condiciones habituales de un desplazamiento urbano-periurbano con una duración de 1 h y recorriendo una distancia de 14.717 km. Está compuesto por un periodo inicial de reposo de 10 s, seguido por 6 subciclos idénticos, separados entre ellos por una parada de 50 s y con un periodo final de reposo de otros 10 s. Cada subciclo tiene una duración de 555 s y está compuesto por una sucesión de aceleraciones, deceleraciones y velocidades mantenidas según el siguiente esquema:

1. Aceleración de 0 a 15 km/h en 15 s.
2. Velocidad constante de 15 km/h durante 150 s.
3. Aceleración de 15 a 25 km/h en 10 s.
4. Velocidad constante de 25 km/h durante 60 s.
5. Deceleración de 25 a 20 km/h en 5 s.

6. Velocidad constante de 20 km/h durante 150 s.
7. Deceleración de 20 a 10 km/h en 10 s.
8. Velocidad constante de 10 km/h durante 145 s.
9. Deceleración de 10 a 0 km/h en 10 s.

El ciclo *VLDV3600-U1* se muestra en la figura 5.29.

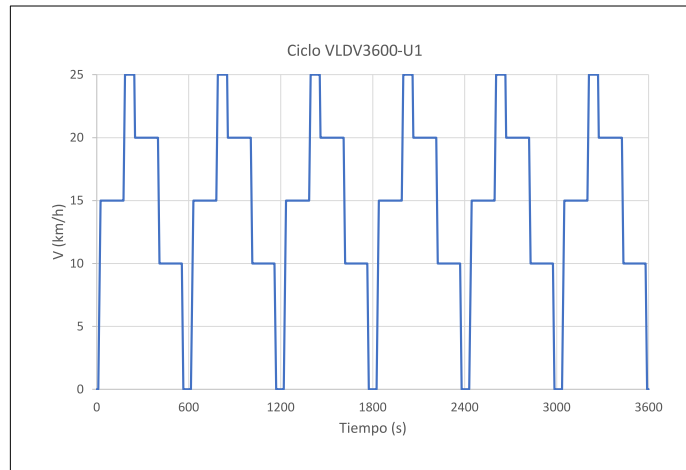


Figura 5.29

Ciclo de conducción urbano *VLDV3600-U1*.

El ciclo anteriormente propuesto, como la gran mayoría de ciclos urbanos estandarizados [21], solo prevén cortas paradas del vehículo, simulando las frecuentes paradas de corta duración que se dan en ese tipo de uso. No tiene sentido para vehículos convencionales, ya sean ICE, BEV o cualquiera de sus variaciones (BEV, HEV, HEV ...) incluir largas paradas que no representan un funcionamiento real.

En el presente trabajo sin embargo, se propone un nuevo ciclo denominado *VLDV4200-U1*, basado en *VLDV3600-U1*, y en el que se sustituye el periodo final de reposo de 10 s por una parada prolongada de 610 s y que se muestra en la figura 5.29. Se trata de una aportación del presente trabajo, que tiene por objeto permitir una adecuada evaluación energética de la operación de vehículos en los que se hace uso de energías renovables, como la solar, eólica, etc. En este tipo de vehículos, durante el tiempo en el que permanecen parados o estacionados, se puede estar recuperando energía, hasta el punto de conseguir incluso, la recuperación de toda la energía consumida en su operación, esto es, evitar el consumo de energía proveniente de fuentes no renovables y por consecuencia las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Este tipo de vehículos hipocarbónicos que optimizan el uso de energías renovables, pueden colaborar de forma significativa en alcanzar los objetivos establecidos por la Comisión Europea en su *Estrategia a largo plazo para 2050* [11], en relación con la neutralidad climática y las cero emisiones netas de GHG. La implementación de estos ciclos en el vehículo se realiza mediante la instanciación del componente `Blocks.Sources.CombiTimeTable` de la `MSL` dentro del componente `conductor`, cuya función es el pilotaje del vehículo. Su diagrama se puede ver en la figura 5.31.

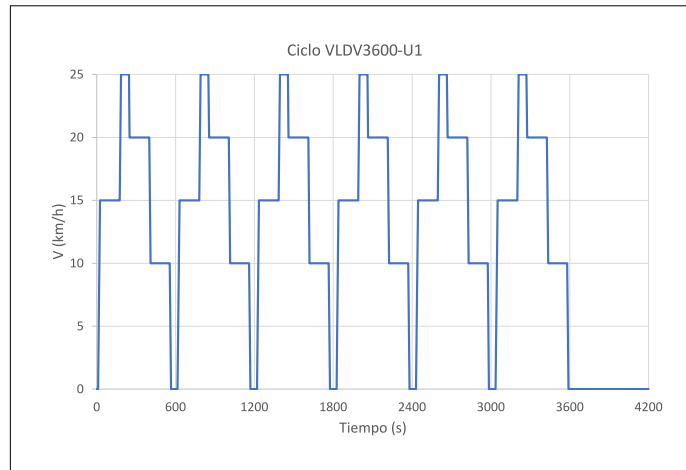


Figura 5.30
Ciclo de conducción urbano *VLDV4200-U1*.

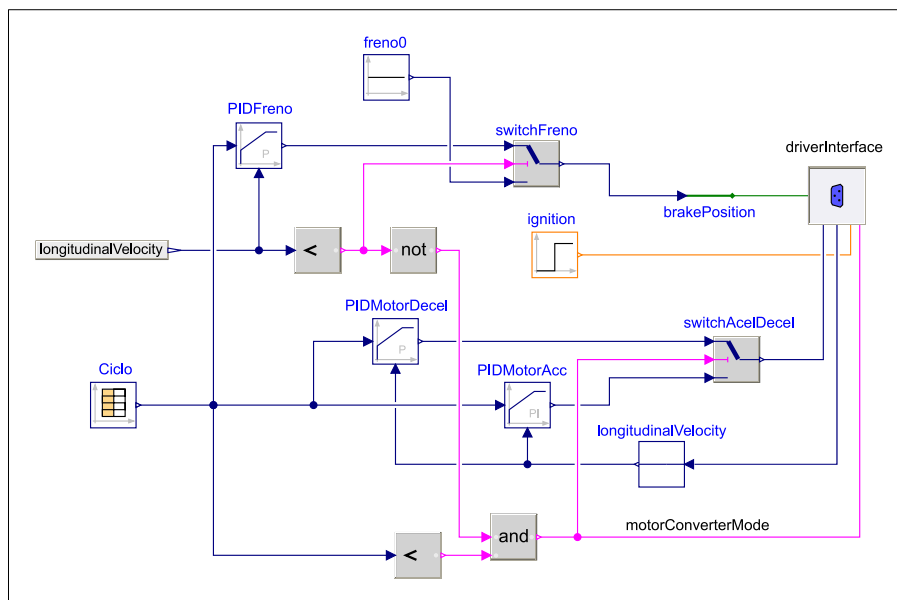


Figura 5.31
Diagrama en Dymola[®] del componente conductor del vehículo.

5.4.3. Simulación y Resultados del Modelo

El experimento de simulación del modelo completo del vehículo se ha llevado a cabo con ayuda de la herramienta Dymola[®], para el ciclo elegido, mediante el método de integración DASSL, con 1000 intervalos de salida.

Ciclo VLDV3600-U1 Para este ciclo se han obtenido las siguientes estadísticas de simulación:

```

Integration started at T = 0 using integration method DASSL
...
Integration terminated successfully at T = 3600
CPU-time for integration : 5.09 seconds
...
Number of grid points : 1001
Number of accepted steps : 45885
Number of f-evaluations (dynamics) : 95044
...

```

Por tanto, se necesitan 5.09 s para realizar una simulación de 3600 s de duración. Estos datos confirman los resultados de tiempos de simulación obtenidos en 5.3, ya que a pesar de disponer en el modelo completo de 3 convertidores, uno de ellos bidireccional, los tiempos de simulación y la carga computacional, son razonables desde un punto de vista práctico.

En la figura 5.32, se tiene la comparación entre la consigna de velocidad-tiempo definida por el ciclo VLDV3600-U1 y la respuesta en velocidad del vehículo. Se puede apreciar como el vehículo sigue el perfil de velocidad impuesto por el ciclo.

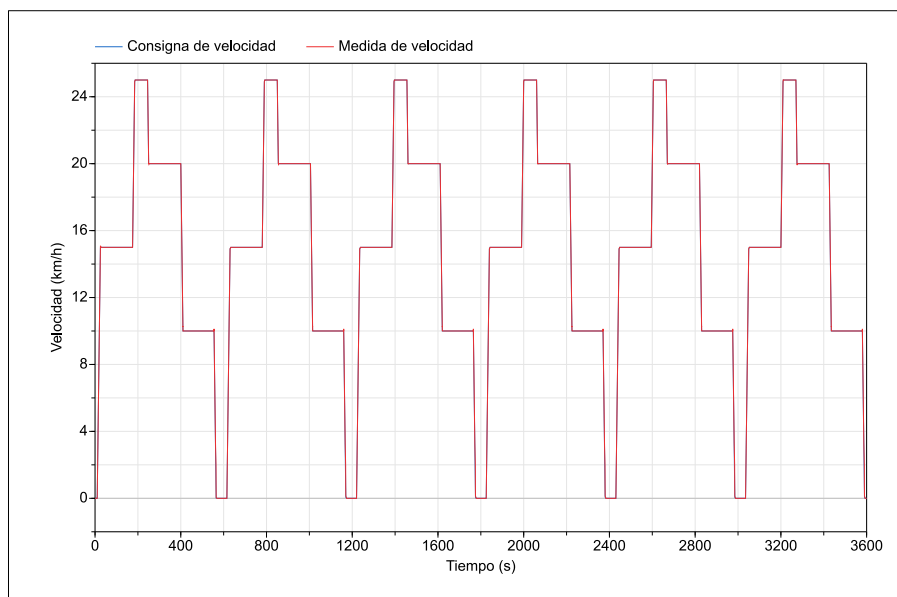


Figura 5.32

Comparación entre la consigna de velocidad-tiempo del ciclo de conducción urbano VLDV3600-U1 y la velocidad real del vehículo.

Ciclo VLDV4200-U1 Para este ciclo se han obtenido las siguientes estadísticas de simulación:

```

Integration started at T = 0 using integration method DASSL ...
Integration terminated successfully at T = 4200
CPU-time for integration : 5.69 seconds
...
Number of grid points : 1001
Number of accepted steps : 45035
Number of f-evaluations (dynamics) : 93074
...

```

Para este ciclo se necesitan 5.69 s para realizar una simulación de 4200 s de duración. Con las mismas consideraciones que para el ciclo anterior.

De entre los múltiples datos que nos permite obtener la simulación, para el caso concreto que nos ocupa, nos interesan fundamentalmente los relativos a la evaluación energética de la actuación del vehículo en su conjunto, así como la de los distintos componentes de más interés como son la batería y el motor, que a continuación se presentan.

5.4.3.1. Evaluación Energética de la Batería

Tal como se ha indicado en 5.4.1, se ha parametrizado el modelo para una batería de 10Ah de capacidad. En la figura 5.33, se tiene la evolución de la carga de la batería a lo largo del ciclo *VLDV3600-U1*, y en la figura 5.34 la correspondiente al ciclo *VLDV4200-U1*.

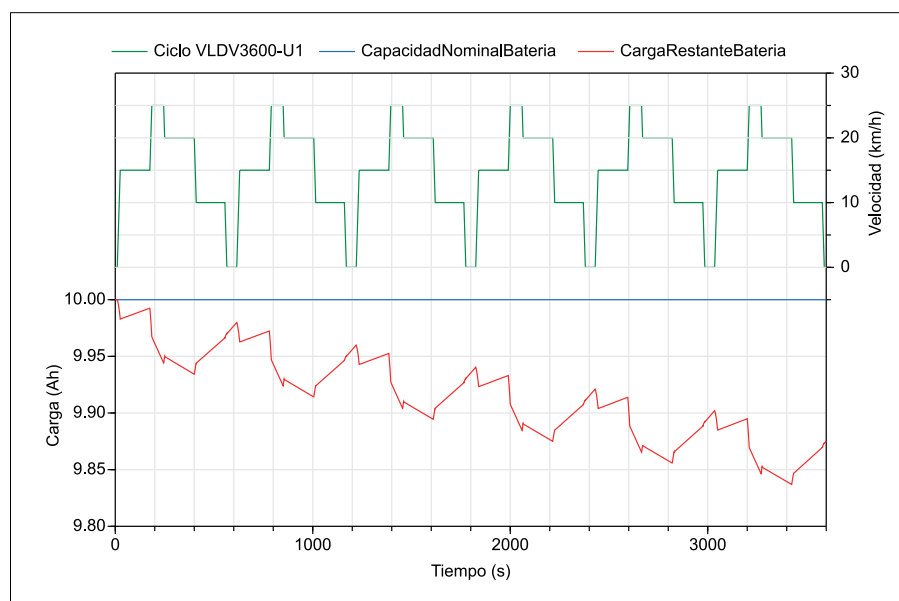


Figura 5.33

Evolución de la carga de la batería durante el ciclo *VLDV3600-U1*.

En la figura 5.35, se tiene el análisis del intercambio de energía de la batería a lo largo del ciclo *VLDV3600-U1* y en la figura 5.36 el correspondiente al ciclo *VLDV4200-U1*. Tal como se puede apreciar en las figuras anteriores, a lo largo de ambos ciclos se tiene un consumo de energía fundamentalmente relacionado con los ciclos de aceleración, una recuperación de energía proveniente del PVP y una recuperación de energía a través del motor durante los periodos de deceleración del vehículo.

En el ciclo *VLDV3600-U1*, se obtienen los siguientes valores al final de la simulación ($t = 3600$ s):

- Nivel de carga = 9.88 Ah (SOC = 98.8%)
- Energía total suministrada por la batería = 95.48 kJ
- Energía de recarga de la batería = 71.61 kJ
- Energía neta suministrada por la batería = 23.87 kJ

Igualmente, para el ciclo *VLDV4200-U1* ($t = 4200$ s):

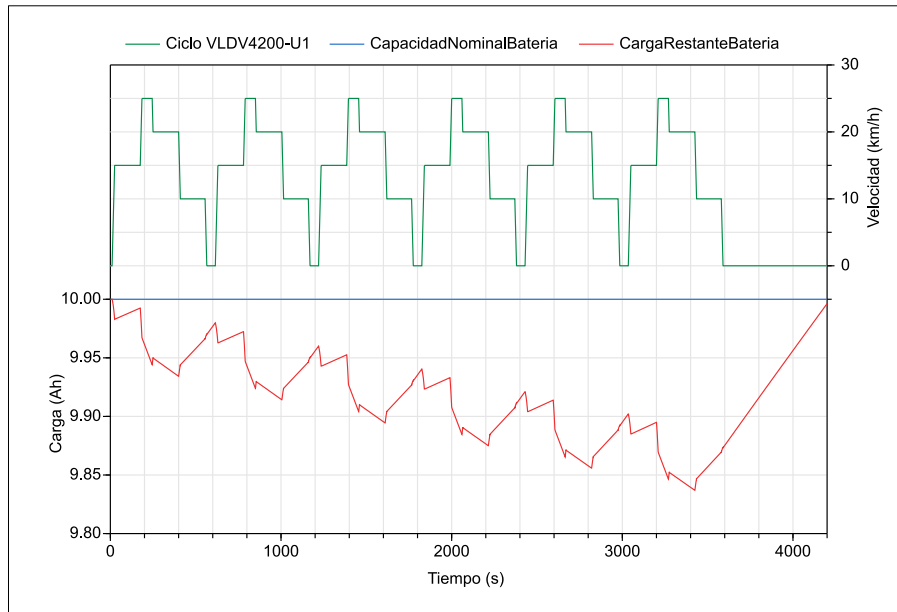


Figura 5.34

Evolución de la carga de la batería durante el ciclo *VLDV4200-U1*.

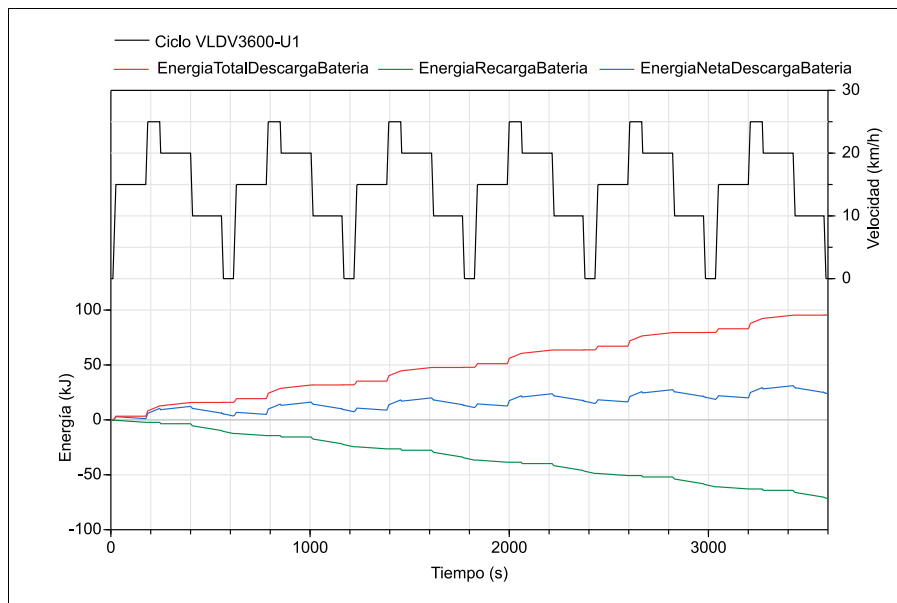


Figura 5.35

Análisis del intercambio de energía de la batería durante el ciclo *VLDV3600-U1*.

- Nivel de carga = 9.996 Ah (SOC = 99.96 %)
- Energía total suministrada por la batería = 95.48 kJ
- Energía de recarga de la batería = 94.74 kJ
- Energía neta suministrada por la batería = 0.74 kJ

En el ciclo *VLDV4200-U1* se observa como la recuperación de energía debida al PVP, con el vehículo parado y durante solamente 600 s, es suficiente para la recarga casi completa de la batería y con una energía de descarga neta de la batería prácticamente nula.

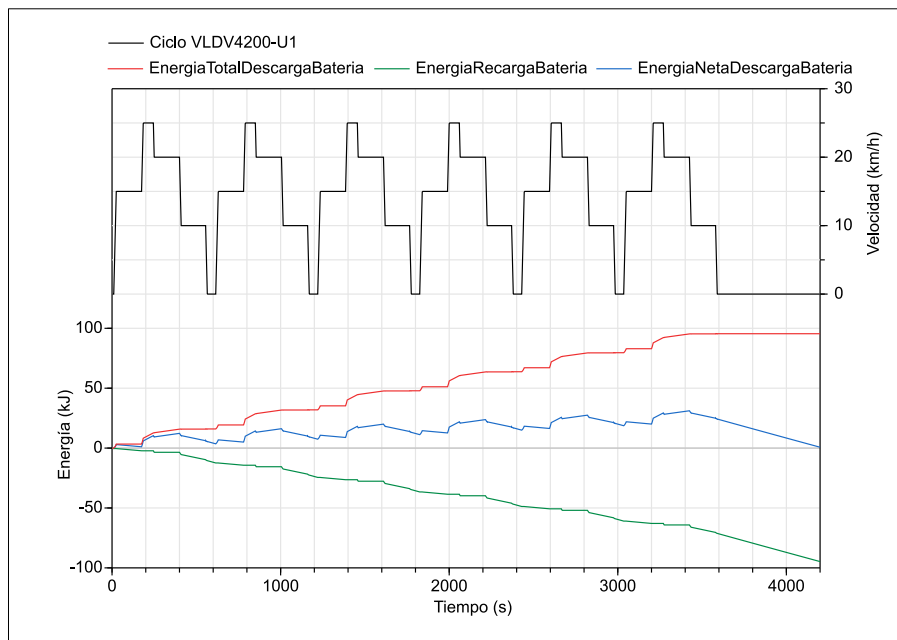


Figura 5.36

Análisis del intercambio de energía de la batería durante el ciclo *VLDV4200-U1*.

5.4.3.2. Evaluación Energética del Motor

En la figura 5.37, se tiene el análisis del intercambio de energía del motor a lo largo del ciclo *VLDV3600-U1* y en la 5.38 el correspondiente al ciclo *VLDV4200-U1*. En ellas se muestra cómo, a lo largo de ambos ciclos, el motor consume energía durante las fases de aceleración y velocidad constante, recuperando energía en las fases de frenado del vehículo.

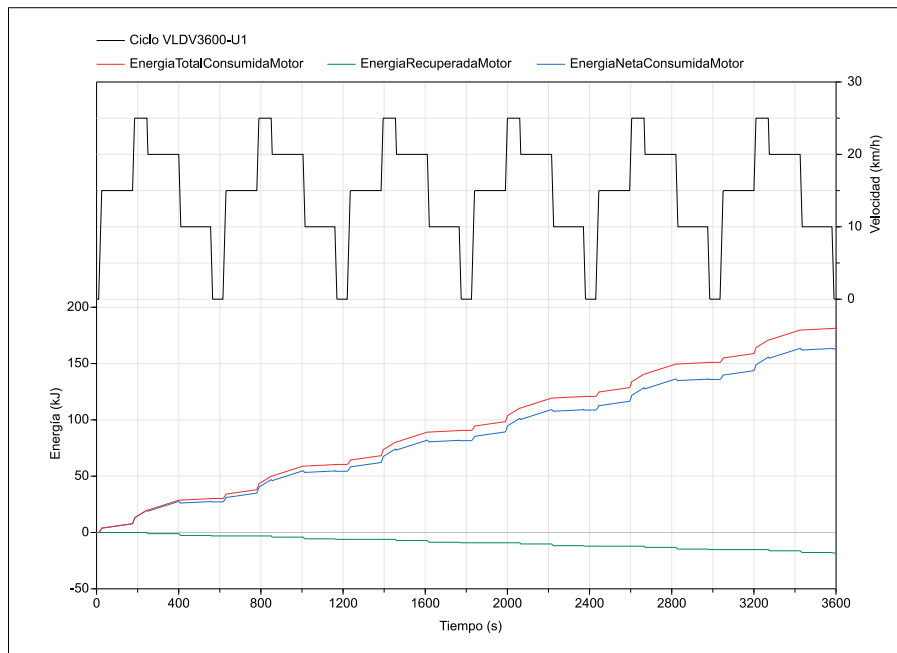
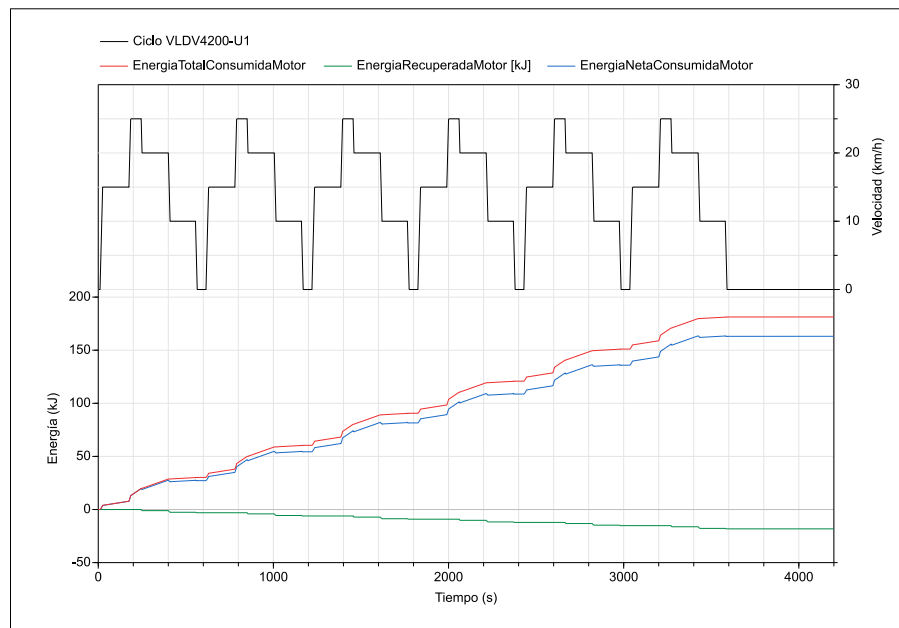


Figura 5.37

Análisis del intercambio de energía del motor durante el ciclo *VLDV3600-U1*.

**Figura 5.38**

Análisis del intercambio de energía del motor durante el ciclo *VLDV4200-U1*.

En ambos ciclos se obtienen los mismos resultados al final de la simulación, ya que el motor ni consume ni recupera energía con el vehículo parado:

- Energía total consumida por el motor = 181.29 kJ
- Energía recuperada por el motor = 18.22 kJ
- Energía neta consumida por el motor = 163.07 kJ

Para los ciclos propuestos, la recuperación de energía del motor en las deceleraciones supone un ahorro energético del 10.05 % sobre su consumo total.

5.4.3.3. Evaluación Energética del Vehículo Completo

En esta sección, se presenta una evaluación energética de la actuación del vehículo completo a lo largo de los dos ciclos de conducción propuestos. Se han tenido en cuenta para ello los flujos de energía de los componentes del SEH (motor, batería, panel fotovoltaico y accesorios). Parte de estos resultados se han comentado anteriormente en los apartados 5.4.3.1 y 5.4.3.2.

Ciclo VLDV3600-U1 En la figura 5.39, se tienen las gráficas de resultados a lo largo del ciclo.

En la parte superior de la figura se muestra la gráfica de velocidad. En la parte inferior, se muestran las gráficas correspondientes a la evolución de las distintas energías consumidas y recuperadas por el vehículo:

- EnergíaTotalConsumida - Indica la energía total consumida por el vehículo para su operación, incluye la consumida por el motor en el desplazamiento y los accesorios.

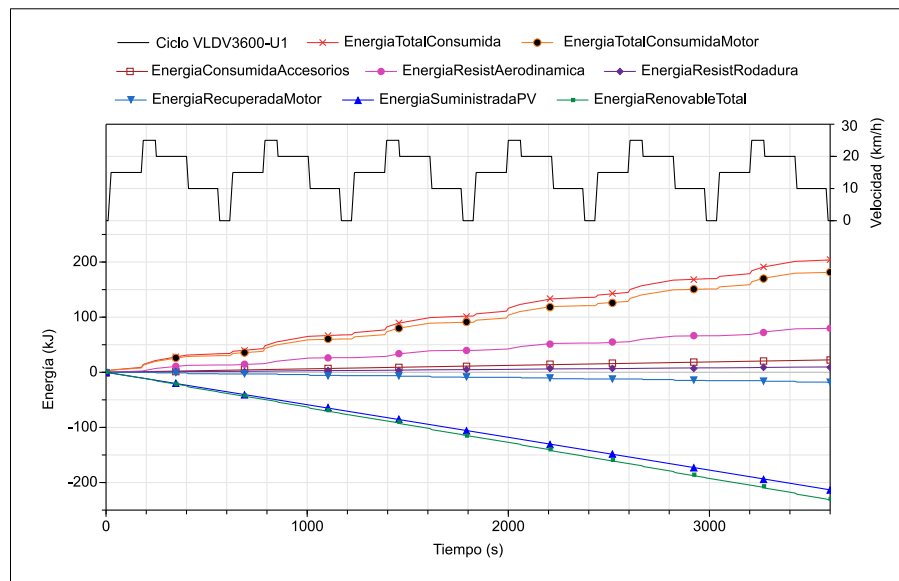


Figura 5.39

Evaluación energética del vehículo durante el ciclo *VLDV3600-U1*.

- **EnergíaTotalConsumidaMotor** - Indica la energía total consumida por el motor en el desplazamiento.
- **EnergíaConsumidaAccesorios** - Indica el consumo de energía asociado a los distintos accesorios (alumbrado, alimentación de elementos de control y mando).
- **EnergíaResistAerodinamica** - Indica la parte de energía consumida debida a la resistencia aerodinámica.
- **EnergíaResistRodadura** - Indica la parte de energía consumida debida a la resistencia a la rodadura.
- **EnergíaRecuperadaMotor** - Indica la energía recuperada por el motor durante las fases de deceleración.
- **EnergíaSuministradaPV** - Indica la energía aportada al vehículo por el **PVP**.
- **EnergíaRenovableTotal** - Indica la suma de energía recuperada por el motor y el **PVP** y que supone el total de energía renovable disponible.

Los resultados obtenidos al final del ciclo *VLDV3600-U1* son los siguientes, teniendo en cuenta los obtenidos anteriormente para la batería (5.4.3.1) y el motor (5.4.3.2):

- La energía total consumida por el vehículo asciende a 203.79 kJ, de los cuales 22.50 kJ corresponden a los accesorios, y el resto (181.29 kJ) al motor de tracción, que es el principal consumidor.
- De la energía total consumida por el motor para animar el vehículo, la consumida por la resistencia aerodinámica asciende a 79.55 kJ y la consumida por la resistencia a la rodadura a 9.64 kJ. Se demuestra que las fuerzas aerodinámicas son de un orden superior a las de rodadura, a pesar de la baja velocidad media del vehículo (14.717 km/h) y de que su velocidad máxima solo alcanza los 25 km/h. El resto de la energía corresponde a la consumida para la aceleración del vehículo y a los rendimientos del convertidor del motor.

- La energía total obtenida de fuentes renovables asciende a 231.50 kJ, de los cuales 213.28 kJ corresponden a la energía obtenida por el PVP y 18.22 kJ a la energía recuperada por el motor en las frenadas.
- La carga restante en la batería asciende a 9.88 Ah, con una pérdida de carga de 0.12 Ah. La energía neta aportada por la batería asciende a 23.87 kJ.
- La evaluación energética, se ha realizado teniendo en cuenta las energías aportadas y consumidas desde el SEH a través de los bornes de la batería y de los convertidores del motor, PVP y los accesorios. No se han evaluado las pérdidas energéticas debidas a los convertidores, la carga/descarga de la batería y a los conductores eléctricos, que será objeto de trabajos futuros.

Teniendo en cuenta que, al final de ciclo de conducción, la energía no renovable consumida es únicamente la debida a la pérdida de carga de la batería, se puede concluir que para el ciclo *VLDV3600-U1*, se ha tenido un consumo energético de 23.87 kJ (5.4.3.1).

De los resultados anteriores se concluye que, durante el ciclo *VLDV3600-U1*, para un consumo de energía total para la operación del vehículo de 203.79 kJ, se ha tenido un consumo neto de energía no renovable de 23.87 kJ. El ahorro energético debido al uso de energías renovables asciende a 179.92 kJ (88.3%), equivalente una reducción de 0.035 kg en las emisiones de CO₂ [53].

Ciclo VLDV4200-U1 En la figura 5.40, se tienen las gráficas de resultados a lo largo del ciclo.

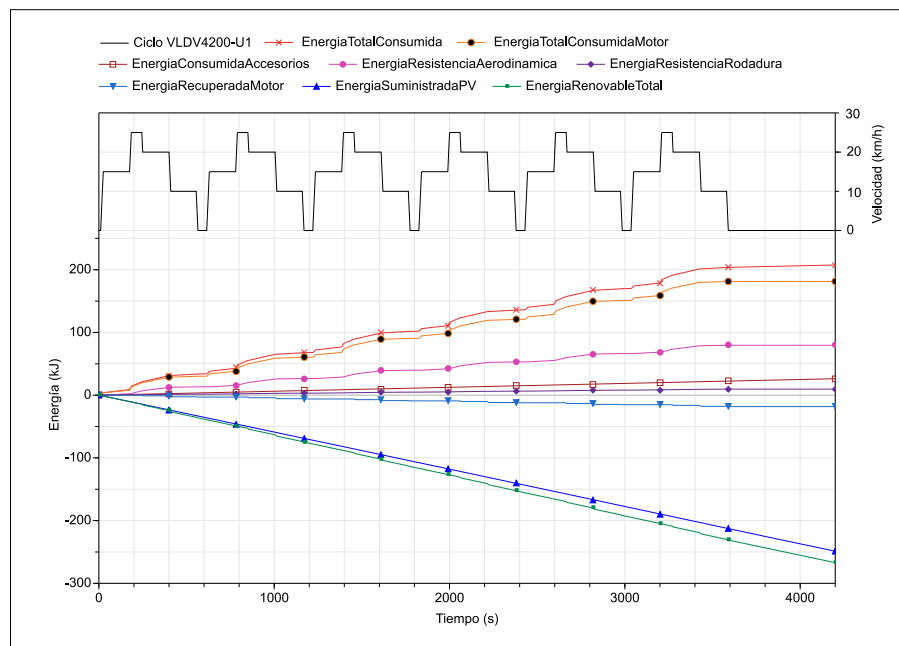


Figura 5.40

Evaluación energética del vehículo durante el ciclo *VLDV4200-U1*.

Los resultados obtenidos al final del ciclo *VLDV4200-U1* son los siguientes, teniendo en cuenta los obtenidos anteriormente para la batería (5.4.3.1) y el motor (5.4.3.2):

- La energía total consumida por el vehículo asciende a 207.56 kJ, de los cuales 26.27 kJ corresponden a los accesorios, y el resto (181.29 kJ) al motor de tracción, que es el principal consumidor.

- Como en el ciclo anterior, de la energía total consumida por el motor de tracción para animar el vehículo, la consumida por la resistencia aerodinámica asciende a 79.55 kJ y la consumida por la resistencia a la rodadura a 9.64 kJ, con las mismas consideraciones.
- La energía total obtenida de fuentes renovables asciende a 266.96 kJ, de los cuales, 248.74 kJ corresponden al PVP y 18.22 kJ a la energía recuperada por el motor en las frenadas.
- La carga restante en la batería asciende a 9.996 Ah, con una pérdida de carga de 0.004 Ah. La energía neta aportada por la batería asciende a 0.74 kJ.
- Como en el ciclo anterior, la evaluación energética se ha realizado teniendo en cuenta las energías aportadas y consumidas desde el SEH a través de los bornes de la batería y de los convertidores del motor, PVP y los accesorios.

Teniendo en cuenta que, al final de ciclo de conducción, la energía no renovable consumida es únicamente la debida a la pérdida de carga de la batería, se puede concluir que para el ciclo *VLDV4200-U1*, se ha tenido un consumo energético de 0.74 kJ (5.4.3.1).

De los resultados anteriores se concluye que, durante el ciclo *VLDV4200-U1*, para un consumo de energía total para la operación del vehículo de 207.56 kJ, se ha tenido un consumo neto de energía no renovable de 0.74 kJ. El ahorro energético debido al uso de energías renovables asciende a 206.82 kJ (99.6%), equivalente una reducción de 0.041 kg en las emisiones de CO₂ [53]. La principal diferencia con el ciclo anterior, reside en el hecho de que el PVP del vehículo continúa la recuperación de energía y la carga de la batería durante el tiempo de parada al final del mismo.

5.4.4. Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos de la simulación del vehículo completo en el apartado 5.4.3.3, demuestran cómo el concepto de vehículo eléctrico urbano ligero equipado de sistemas que permiten el uso de energías renovables, obtiene una reducción significativa de la energía necesaria para su operación. En consecuencia, consigue una reducción en las emisiones de CO₂.

Para el ciclo *VLDV3600-U1* se consigue un ahorro energético de 179.92 kJ, que supone un 88.3% de la energía total consumida en el mismo y que equivale a una reducción de 0.035 kg en las emisiones de CO₂.

Para el ciclo *VLDV4200-U1* se consigue un ahorro energético de 206.82 kJ, que supone un 99.6% de la energía total consumida en el mismo y que equivale a una reducción de 0.041 kg en las emisiones de CO₂.

Partiendo de un plan de uso de dos ciclos de funcionamiento diarios, durante 20 días al mes y 11 meses al año, el ahorro energético debido al uso de energías renovables en el vehículo propuesto para el presente trabajo, es de entre 219.9 y 252.8 kWh, que equivalen a una reducción de emisiones de CO₂ de entre 156 y 179 kg. Para el caso más favorable, la reducción de emisiones de CO₂ es el equivalente al consumo de 76.47 litros de gasolina, o a recorrer 724.2 km con un vehículo de pasajeros de tamaño medio [53].

Los resultados anteriores demuestran cómo el concepto de vehículo ULEV, corresponde al de un vehículo hipocarbónico, cuyo uso generalizado puede apoyar la *Estrategia a largo plazo para 2050* de la Comisión Europea [11], en relación con la neutralidad climática y las cero emisiones netas de GHG.

Capítulo 6

Conclusiones, Aportaciones al Estado del Arte y Trabajos Futuros

En este capítulo se presentan las conclusiones finales del trabajo de investigación realizado sobre modelado y simulación de vehículos urbanos eléctricos ligeros, así como de la optimización mediante el uso de las distintas fuentes de energía renovable. Se destaca la aportación relativa al modelado multifísico. En una primera parte se abordan las conclusiones sobre el trabajo y las aportaciones al estado del arte. Finalmente se exponen los trabajos futuros propuestos.

6.1. Conclusión y Aportaciones al Estado del Arte

En el presente trabajo se ha partido de la idea principal de un **SEH**, un concepto en el que se agrupan los distintos componentes del **EV** (o sus variantes tecnológicas: **HEV**, **PHEV**, **FCHEV**, ...), que aportan o consumen energía. Una vez disponibles los modelos de los componentes que lo conforman, así como los del entorno con el que interactúa el vehículo, se ha realizado la simulación dinámica de los subsistemas de mayor importancia (**PVP**, batería, convertidor y motor) y del vehículo completo.

Se destaca la aportación que supone el presente trabajo en lo relativo a la orientación multifísica de los modelos, en los que se pueden encontrar ecuaciones provenientes de la mecánica, electricidad, electrónica, física del entorno y de control, que permiten simular el comportamiento completo del vehículo en una misma plataforma, formada por el lenguaje de modelado **Modelica**[®] y la herramienta **Dymola**[®].

Los resultados obtenidos de las simulaciones de los distintos elementos componentes, se han comparado con los obtenidos por otros autores en distintas configuraciones existentes en la literatura o con los de los equipos comerciales correspondientes. Se han utilizado además las simulaciones para llevar a cabo los análisis de sensibilidad, que han permitido la evaluación del impacto de los distintos parámetros de diseño sobre la actuación de los componentes y del vehículo completo.

En la literatura se pueden encontrar numerosos ejemplos de modelos de los distintos elementos componentes del vehículo. Estos modelos se encuentran implementados de forma diversa, bajo diferentes lenguajes de modelado, en aplicaciones distintas, la mayor parte de las veces incompatibles entre sí, lo que les hace difícilmente reutilizables de un modo directo. Además de lo anterior, el nivel de abstracción de estos modelos depende en gran medida del objetivo final del estudio en el que se encuadran, siendo en casos o excesivamente simples, o excesivamente complejos para el objetivo del presente trabajo.

A lo largo del presente trabajo se ha desarrollado la librería de componentes **VLDV**, basada en el lenguaje de modelado **Modelica**[®], que incluye los diferentes elementos del vehículo y su entorno. Especialmente orientada al concepto de vehículos **ULEV**, cumple con las especificaciones de la librería **VI**, lo que permite su reutilización e integración con otras librerías desarrolladas bajo estas mismas especificaciones y con la herramienta **Dymola**[®]. El grado de abstracción de los diferentes modelos es el adecuado al propósito del presente estudio, y pueden ser reutilizados a propósito de nuevos estudios sobre vehículos o sobre sistemas de producción y distribución de energía.

Como resultado del proceso de investigación llevado a cabo, se han publicado los resultados más significativos en tres publicaciones científicas: dos en revistas indexadas en JCR, [66] y [64], y una en un congreso internacional [65]. Suponen una aportación al estudio y desarrollo de los actuales sistemas de movilidad, y pueden ser utilizados como base para posteriores estudios y desarrollos, aplicados no solamente a la movilidad urbana, sino a la movilidad eléctrica en general y a otros sistemas de almacenamiento y distribución de energía.

En [65], se muestran las aproximaciones matemáticas necesarias para el modelado dinámico de una **Red de Distribución de Energía Inteligente (Smart-Grid)**, de uso en un vehículo ligero movido por energía solar, al objeto del desarrollo de los algoritmos de control del vehículo. La publicación presenta los principios y aproximaciones matemáticas necesarias de cada uno de los componentes de la **Smart-Grid**, principalmente: **PVP**, otras fuentes de energía renovable, batería, convertidor **CC-CC**, accesorios, motor y freno regenerativo. Se hace uso del lenguaje de modelado **Modelica**[®] (3.1) dado que ofrece una serie de capacidades bien reflejadas en la bibliografía. Se utiliza también la **MSL** (3.2), ya que proporciona una importante cantidad de modelos fiables, que pueden ser reutilizados y adaptados a las necesidades particulares de cada caso. Para el desarrollo de las simulaciones se utiliza la herramienta de modelado y simulación **Dymola**[®] (3.4).

En [66], se presenta un modelo dinámico de batería, que tiene por objeto simular el comportamiento de los distintos tipos de batería de uso común en ULEVs. La motivación es la de su utilización dentro del modelo multifísico del vehículo completo, que permita el desarrollo de los algoritmos de control y gestión energética del mismo, si bien su uso se puede extender a otras áreas de aplicación. El modelo propuesto es parametrizable a partir de las curvas de descarga obtenidas de la información técnica o de bancos de prueba experimentales con el equipo real y se adapta de forma precisa al comportamiento específico de las baterías LiFePo_4 , es válido igualmente para baterías **Li-Ion**, y con ligeras modificaciones, para otras tecnologías de acumulador habitualmente utilizadas en los EV, como **LA**, **NiMH**, **LiPo** y **NiCd**. Para la calibración y validación del modelo se han utilizado los datos experimentales obtenidos en la micro-red del Centro Mixto CIESOL. El modelado, simulación, calibración y validación se llevan a cabo con ayuda de la herramienta **Dymola**[®] (3.4), basada en el lenguaje de modelado orientado a objetos **Modelica**[®] (3.1), con la librería **MSL** (3.2) y con la librería **Design.Calibration** (3.5) de **Dymola**[®].

En [64], se presenta un nuevo modelo linealizado de convertidor **CC-CC** para su uso en unidades de suministro y recuperación de energía, aplicadas fundamentalmente en ULEVs. La topología propuesta es la de un convertidor **NHBBC**. Debido al uso de convertidores en casi todos los componentes que aportan o consumen energía dentro del vehículo, y al consumo de tiempo de computación para la simulación de los modelos conmutados, se propone un modelo linealizado equivalente. Se utiliza el entorno de modelado y simulación **Dymola**[®] (3.4), basado en el lenguaje de modelado orientado a objetos **Modelica**[®] (3.1), para el modelado, simulación y comparación de resultados. Se utilizan componentes y clases base de las librerías **MSL** (3.2) y **VI** (3.3) al objeto de asegurar la reutilización y compatibilidad de los componentes desarrollados. Finalmente, se llevan a cabo una serie de test de validación entre el modelo linealizado propuesto en **Dymola**[®] y el modelo conmutado de referencia **NHBBC** implementado en **LTSpice XVII**[®], un paquete **SPICE** de altas prestaciones, de propósito específico para la simulación de circuitos electrónicos analógicos y conmutados. Se demuestra mediante los resultados de dichos experimentos, que los modelos linealizados del convertidor **CC-CC** reducen los tiempos de ejecución entre 3464 y 4450 veces, manteniendo una precisión suficiente. Se ha alcanzado el objetivo de obtener modelos continuos que pueden instanciarse para los diferentes componentes del **SEH**, obteniendo tiempos de simulación del vehículo completo razonables a efectos prácticos.

Con ayuda del material desarrollado y los resultados obtenidos, se ha definido el modelo completo de un vehículo eléctrico ligero de uso urbano, alimentado por batería, equipado con un **PVP** y con un sistema de recuperación de energía en las frenadas.

Se han definido dos ciclos de conducción específicos (*VLDV3600-U1* y *VLDV4200-U1*), basados en las condiciones y características propias del transporte urbano y periurbano, adaptado a las limitaciones de velocidad impuestas por el vehículo ($V_{\max} = 25$ km/h), con una duración suficiente para un adecuado análisis energético y que pueden servir de ciclo normalizado para comparar los resultados de distintas propuestas de vehículos de cualquier tipo. El ciclo *VLDV4200-U1* se basa en el *VLDV3600-U1*, añadiendo 600 s de parada del vehículo al final del ciclo. Supone una aportación original del presente trabajo, y tiene por objeto permitir una adecuada evaluación energética de la operación de vehículos que utilizan energías renovables, como la solar, capaces de seguir aportando energía aún con el vehículo estacionado.

De la simulación del modelo del vehículo en ambos ciclos, se obtienen una serie de resultados que confirman que el concepto de vehículo propuesto consigue una reducción del consumo de energía por ciclo de entre 179.92 y 206.82 kJ. Asociada a esta reducción en el consumo de energía, está la reducción en las emisiones de CO_2 de entre 0.035 y 0.041 kg por ciclo. El consumo de energía no renovable del vehículo ha sido de 23.87 kJ para el ciclo *VLDV3600-U1* y de 0.74 kJ para el *VLDV4200-U1*. Suponiendo un plan de uso de dos ciclos de funcionamiento diarios, durante 20 días al mes y 11 meses al año, el consumo energético

total anual del vehículo sería de entre 2.917 kWh (10502.8 kJ) y 0.090 kWh (325.6 kJ) dependiendo del ciclo, lo que equivale a entre 8.4 y 0.26 km recorridos por un vehículo de pasajeros promedio [53]. El ahorro energético anual debido al uso de energías renovables en el vehículo sería de entre 219.9 y 252.8 kWh, que equivalen a una reducción de emisiones de CO₂ de entre 156 y 179 kg. [53].

Los resultados del presente trabajo demuestran cómo el concepto de vehículo urbano eléctrico ligero basado en la optimización del uso de energías renovables corresponde al de un vehículo hipocarbónico. Su desarrollo y uso generalizado para los desplazamientos urbanos y periurbanos puede suponer un avance en la *Estrategia a largo plazo para 2050* de la Comisión Europea [11], en relación con la neutralidad climática y las cero emisiones netas de GHG.

6.2. Trabajos Futuros

Como continuación al presente trabajo se proponen los siguientes trabajos de investigación futuros, que permitirán avanzar en el desarrollo y validación de nuevas propuestas de aplicación y uso de energías renovables en vehículos e industrias.

1. Desarrollo de modelos biomecánicos, para la integración del efecto de la propulsión humana como fuente de energía renovable en vehículos urbanos ligeros. Los vehículos ligeros para desplazamiento urbano se pueden aprovechar de la energía desarrollada por el conductor a través del pedaleo. No solamente supone un beneficio energético sino una motivación para el uso de esta alternativa de movilidad, por los beneficios en la salud física.
2. Desarrollo de modelos de FCELL de las distintas tecnologías disponibles (combustibles sólidos renovables, pilas de hidrógeno, ...). Una de las vías de la *Estrategia a largo plazo para 2050* de la Comisión Europea [11], consiste en “*Combatir el resto de emisiones de CO₂ con captura y almacenamiento de carbono*”. Una de sus consecuencias será la disponibilidad de combustibles sintéticos neutros en carbono. Otra de las vías propuestas en la estrategia (“*Adoptar una movilidad limpia, segura y conectada*”), propone la investigación y desarrollo de los combustibles descarbonizados y pilas de combustible.
3. Desarrollo de modelos de distintos sistemas de almacenamiento de energía alternativos, como acumuladores mecánicos (volante de inercia), eléctricos (capacitores) o químicos (hidrógeno). Para avanzar en la movilidad sostenible es necesario avanzar paralelamente en los sistemas de almacenamiento de energía. Su desarrollo permitirá prolongar la autonomía y mejorar las prestaciones del vehículo.
4. Desarrollo de modelos para la integración en red de energía de los diferentes micro-productores (aparcamientos eólico-solares, vehículos solares, ...) y micro-consumidores (recarga de batería de vehículos). El uso intensivo de energía renovable en los vehículos permite que estos se puedan convertir en suministradores netos de energía de la red eléctrica aprovechando el exceso de energía recuperada. También resulta interesante avanzar en el desarrollo de nuevos conceptos de áreas de estacionamiento de vehículos que hagan uso de energías renovables, para apoyar la recarga de los vehículos durante el tiempo fuera de operación y retorno de energía a la red eléctrica.
5. Modelado y simulación de conceptos alternativos de vehículo para el transporte de mercancías y personas en el entorno urbano y periurbano. Se ha visto muy interesante analizar la viabilidad de extender el concepto propuesto en el presente estudio a otros vehículos de transporte de personas y mercancías en el área urbana, periurbana e interurbana.

6. Extensión de los modelos para el estudio del balance energético completo del vehículo. Con objeto de permitir un balance energético completo de la operación del vehículo, es necesario extender los modelos para tener en cuenta las pérdidas generadas por los convertidores, conductores eléctricos, carga/descarga de la batería, etc.

Bibliografía

- [1] Changzhou Greenland Vehicle Co., Ltd. <http://www.gl-ev.com>. 23
- [2] Coil Winding Specialist, Inc. CA (USA). <http://www.coilws.com>. 71
- [3] JEC - Well-to-Wheels Analyses. <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/activities/wtw>, EU Science Hub, European Commission. Accedido el 15-03-2020. xxv, 4, 5
- [4] KEMET Electronics Corporation. www.kemet.com. 71
- [5] Panasonic Corporation - Polymer Electrolytic Capacitors. <https://industrial.panasonic.com>. 71
- [6] RFCafe - Standard Inductor Values. <http://www.rfcafe.com/references/electrical/inductor-values.htm>. 71
- [7] A sustainable future for transport - Towards an integrated, technology-led and user-friendly system. Technical report, European Commission, Luxembourg, 2009. DOI 10.2768/13118. 2
- [8] Hybrid Electric Vehicles: And overview of current technology and its application in developing and transitional countries. Technical report, United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya, September 2009. v, vii, xxv, 3, 4
- [9] IEA Response System for Oil Supply Emergencies 2012. Technical Report EPPD Brochure English 2012 02, International Energy Agency (IEA), Paris, 2012. v, v, vii, vii, 2, 3
- [10] Technoeconomic Modeling of Battery Energy Storage in SAM. Technical Report NREL/TP-6A20-64641, NREL, September 2015. 10, 45, 85
- [11] A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE, THE COMMITTEE OF THE REGIONS AND THE EUROPEAN INVESTMENT BANK. COM(2018) 773 final, EUROPEAN COMMISSION, Brussels-Belgium, 2018. 3, 103, 112, 116
- [12] A123 Systems. Nanophosphate High Power Lithium Ion Cell ANR26650M1-B, 2012. Data Sheet. 66, 85
- [13] H Abaali. Design Modelling Control and Simulation of DC / DC Power Buck Converter. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 9(10):1229 – 1235, 2015. 60

- [14] Francisco Acuña Prieto. Diseño y Construcción de un Banco de Ensayo para la Caracterización del Motor de un Vehículo Eléctrico. Master's thesis, Universidad de Almería, 2015. [22](#)
- [15] Khandker Tawfique Ahmed, Mithun Datta, and Nur Mohammad. A Novel Two Switch Non-inverting Buck-Boost Converter based Maximum Power Point Tracking System. *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, 3(4):467–477, may 2013. [11](#), [55](#), [68](#)
- [16] Munadir Ahmed. Modeling Lithium-ion Battery Chargers in PLECS®. Technical Report Application Example ver 02-16, Plexim Inc., Cambridge, MA, USA, 2016. [85](#)
- [17] Analog Devices Inc. LTspice. <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>, 2020. Norwood, MA - USA. [21](#)
- [18] David Anseán, Manuela González, Juan Carlos Viera, Juan Carlos Álvarez, Cecilio Blanco, and Víctor Manuel García. Evaluation of LiFePO₄batteries for Electric Vehicle applications. In *2013 Int. Conf. New Concepts Smart Cities Foster. Public Priv. Alliances*, page 8, Gijon, Spain, 2013. IEEE. [9](#), [44](#)
- [19] Bernhard Bachmann, Peter Aronsson, and Peter Fritzson. Robust Initialization of Differential Algebraic Equations. In *Proceedings of the 5th International Modelica Conference*, volume 1, page 8, Vienna, Austria, 2006. The Modelica Association. [48](#)
- [20] Soumitro Banerjee. *Dynamics for Engineers*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England, 2005. ISBN 978-0-470-86843-0.
- [21] T J Barlow, S Latham, I S Mccrae, and P G Boulter. A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. Technical Report Project PPR354, Department for Transport, Cleaner Fuels & Vehicles 4, Berkshire, United Kingdom, 2009. ISBN 978-1-84608-816-2. [99](#), [102](#), [103](#)
- [22] Maitane Berecibar, Maitane Garmendia, Iñigo Gandiaga, Jon Crego, and Igor Villareal. State of health estimation algorithm of LiFePO₄battery packs based on differential voltage curves for battery management system application. *Energy*, 103:784–796, 2016. [10](#), [44](#), [51](#)
- [23] J.A. Blackburn. *Modern Instrumentation for Scientists and Engineers*. Springer Nature Book Archives Millennium. Springer New York, 2001. ISBN 9780387950563. [92](#), [93](#), [95](#)
- [24] Marcia De Fatima Brondani, Airam Teresa Zago Romcy Sausen, Paulo Sérgio Sausen, and Manuel Osório Binelo. Battery Model Parameters Estimation Using Simulated Annealing. *TEMA (São Carlos)*, 18(1):127, 2017. ISSN 2179-8451. [10](#), [45](#), [85](#)
- [25] Stefan Bröyn. Optimization of Modelica Models Utilizing Design of Experiments and Robust Design Methods. Master's thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2014. [32](#)
- [26] Francesco Calise, Francesco Liberato Cappiello, Armando Carteni, Massimo Dentice d'Accadia, and Maria Vicidomini. A novel paradigm for a sustainable mobility based on electric vehicles, photovoltaic panels and electric energy storage systems: Case studies for Naples and Salerno (Italy). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111:97–114, 2019. [12](#)
- [27] Leonardo Callegaro, Mihai Ciobotaru, and Vassilios Agelidis. Analysis and Comparison of Electrical PV Modeling Techniques Based on Datasheet Values. In *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pages 2006 – 2011, Hamburg - Germany, sep 2015. EU PVSEC. [43](#), [65](#)

- [28] F. Caricchi, F. Crescimbeni, F. Giulii Capponi, and L. Solero. Study of bi-directional buck-boost converter topologies for application in electrical vehicle motor drives. *Proc. Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, pages 287 – 293 vol.1, 1998. 11, 54
- [29] C. Carrero, J. Amador, and S. Arnaltes. A single procedure for helping PV designers to select silicon PV modules and evaluate the loss resistances. *Renewable Energy*, 32(15):2579–2589, dec 2007. 43
- [30] Jingquan Chen, D. Maksimovic, and R. Erickson. Buck-boost PWM converters having two independently controlled switches. *2001 IEEE 32nd Annu. Power Electron. Spec. Conf. (IEEE Cat. No.01CH37230)*, 2, 2001. 11, 54
- [31] Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE). ECE-R75 Reglamento n^o 75 - Disposiciones uniformes relativas a la homologación de neumáticos para motocicletas y ciclomotores. Technical Report ECE-R75, Marzo 2011. Diario Oficial de la Unión Europea. 35
- [32] Committee for the National Tire Efficiency Study. Transportation Research Board Special Report 286. Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy. Technical report, NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES, Washington, D.C., 2006. ISBN 0309094216. 32, 36
- [33] Continental AG. 2016-2017 Technical Databook Car > 4 x 4 > Van. www.continental-tires.com, 2016. 36
- [34] Continental Reifen Deutschland GmbH. Continental Bicycle Top CONTACT II. <https://www.continental-tires.com/bicycle/tires/urban-tour/top-contact2>. 35
- [35] Slobodan M. Cuk. *Modelling, Analisis and Desing of Switching converters*. PhD thesis, California Institute of Technology, 1977. 58, 60
- [36] Dariusz Czarkowski. DC-DC converters. In Muhammad H. Rashid, editor, *Power Electronic Handbook*, chapter 10, pages 275–288. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, fourth edition, 2018. ISBN978-0-12-811407-0. 11, 54, 68
- [37] M Dargahi, A Ghosh, G Ledwich, and F Zare. Studies in power hardware in the loop (PHIL) simulation using real-time digital simulator (RTDS). In *PEDES*, pages 1–6. IEEE, 2012. ISBN 978-1-4673-4506-4. 15
- [38] H S Das, M M Rahman, S Li, and C W Tan. Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120:109618, 2020. 12
- [39] Himadry Shekhar Das, Chee Wei Tan, and A.H.M. Yatim. Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76:268–291, sep 2017. 11
- [40] Dassault Systèmes AB. *Dymola - Dynamic Modeling Laboratory - User Manual*. Lund - Sweden, 2017. volumen 1. 20, 21
- [41] Dassault Systèmes AB. *Dymola - Dynamic Modeling Laboratory - User Manual*. Lund - Sweden, 2017. volumen 2. 20, 21
- [42] W. De Soto, S. A. Klein, and W. A. Beckman. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 80(1):78–88, jan 2006. 43
- [43] Mike Dempsey. Dymola for multi-engineering modelling and simulation. *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2006*, pages 1–6, 2006. 20

- [44] Mike Dempsey, Magnus Gäfvert, Peter Harman, Christian Kral, Martin Otter, and Peter Treffinger. Coordinated automotive libraries for vehicle system modelling. In *5th Modelica Conference 2006*, pages 33–41, Vienna, Austria, 2006. The Modelica Association. 18, 25
- [45] Diario Oficial de la Unión Europea. Reglamento n^o 83 - Disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos en lo que respecta a la emisión de contaminantes según las necesidades del motor en materia de combustible (2015/1038). Technical report, Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE), 2006. 102
- [46] Dirección General de Tráfico. Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general. INSTRUCCIÓN 15/V-113, Dirección General de Tráfico - Subdirección General de Gestión de la Movilidad - Ministerio del Interior - Gobierno de España, 2015. 23
- [47] Arash M Dizqah, Krishna Busawon, and Peter Fritzson. Acausal modeling and simulation of the standalone solar power systems as hybrid DAEs. In *The 53rd International Conference of the Scandinavian Simulation Society (SIMS)*, pages 1–7, 2012. 10, 38, 40, 45, 48
- [48] Florin Dragomir, Otilia Elena Dragomir, Adrian Oprea, Liviu Olteanu, Nicolae Olariu, and Viorel Ursu. Simulation of lithium-ion batteries from a electric vehicle perspective. In *2017 Electric Vehicles International Conference, EV 2017*, volume 2017-Janua, pages 1–5. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., dec 2017. 10
- [49] Ottmar et al. Edenhofer. Technical Summary. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical report, The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - United Nations Environment Programme (UNEP) - World Meteorological Organization (WMO)*, 2014. Cambridge University Press, Cambridge-UK New York-USA. xxv, 2, 3
- [50] EECS Department of the University of California at Berkeley. The Spice Page. <http://bwrcs.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/>. 21
- [51] Hilding Elmqvist, Sven Erik Mattsson, and Martin Otter. Object-oriented and hybrid modeling in modelica. *Journal Européen des systèmes automatisés*, 35(4):395–404, July 2001. 48
- [52] Hilding Elmqvist, Hans Olsson, Sven Erik Mattsson, Dag Brück, Christian Schweiger, Dieter Joos, and Martin Otter. Optimization for design and parameter estimation. In *In 4th International Modelica Conference*, 2005. 21, 80
- [53] EPA - Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Calculador de equivalencias de gases de efecto invernadero. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculador-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero>, 2021. Accedido el: 11/04/2021. 111, 112, 116
- [54] Trishan Eswam. *Modeling and Control of an Alternating-Current Photovoltaic Module*. PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010. 57
- [55] Masson-Delmotte et al. Calentamiento global de 1,5 °C. Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales. Technical report, The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019. ISBN 9789291693535. v, vii, 2
- [56] EV ASSEMBLE. EVA LiFePO4 48V 10Ah battery pack. <http://www.evassemble.com/index.php>. Accedido el: 06/06/2020. 35

- [57] EV Components. Headway LiFePO4 48V 10Ah Battery Pack. <https://www.evcomponents.com/headway-lifepo4-48v-10ah-battery-pack.html>. Accedido el: 06/06/2020. [35](#)
- [58] John. Fenton. *Lightweight Electric/Hybrid Vehicle Design [electronic resource]*. Automotive Engineering Series. Elsevier Science, Oxford, 2001. ISBN 0-08-053551-8. [8](#)
- [59] A Ferraris, H d. C Pinheiro, E Galanzino, A G Airale, and M Carello. All-Wheel Drive Electric Vehicle Performance Optimization: From Modelling to Subjective Evaluation on a Static Simulator. In *2019 Electric Vehicles International Conference (EV)*, pages 1–6, Bucharest, Romania, 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. [9](#)
- [60] Enric Fossas and G. Olivar. Study of chaos in the buck converter. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Fundam. Theory Appl.*, 43(1):13–25, 1996. [61](#)
- [61] P Fritzson. *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3: A Cyber-Physical Approach*. Wiley, 2 edition, 2015. ISBN 9781118859162. [45](#)
- [62] Peter Fritzson and Vadim Engelson. Modelica - A unified object-oriented language for system modeling and simulation. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, volume 1445, pages 67–90. Springer Verlag, 1998. [15](#)
- [63] Thomas D. Gillespie. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA, 1992. ISBN 9781560911999. [27](#), [31](#), [32](#), [33](#), [36](#)
- [64] F. J. Gómez Navarro, L. J. Yebra, F. J. Gómez Medina, and A. Giménez-Fernandez. DC-DC Linearized Converter Model for Faster Simulation of Lightweight Urban Electric Vehicles. *IEEE Access*, 8(1):85380–85394, 2020. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2992558. [VI](#), [VII](#), [58](#), [60](#), [61](#), [86](#), [99](#), [114](#), [115](#)
- [65] F.J. Gomez, L.J. Yebra, and A. Giménez. Modelling a Smart-Grid for a Solar Powered Electric Vehicle. In Technische Universität Wien, editor, *9th Vienna Conference on Mathematical Modelling*, volume 55, pages 5–6, Vienna, Austria, 2018. ARGESIM Publisher, Vienna. DOI 10.11128/arep.55.a55113. [VI](#), [VII](#), [22](#), [25](#), [44](#), [54](#), [114](#)
- [66] F.J. Gómez, L.J. Yebra, A. Giménez, and J.L. Torres-Moreno. Modelado de baterías para aplicación en vehículos urbanos eléctricos ligeros. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 16(4):459, sep 2019. DOI 10.4995/riai.2019.10609. [VI](#), [VII](#), [22](#), [85](#), [114](#), [115](#)
- [67] Juan C. González Palencia, Tsukasa Sakamaki, Mikiya Araki, and Seiichi Shiga. Impact of powertrain electrification, vehicle size reduction and lightweight materials substitution on energy use, CO2 emissions and cost of a passenger light-duty vehicle fleet. *Energy*, 2015. DOI 10.1016/j.energy.2015.10.017. [3](#)
- [68] Marcela Gonzalez Valencia and Alfonso Alzate Gomez. Diseño estático de un convertidor DC / DC reductor-elevador bidireccional. *Tecnura*, 14(26):7–14, 2010. [11](#), [55](#)
- [69] Albert C Gross, Chester R Kyle, and Douglas J Malewicki. The Aerodynamics of Human-powered Land Vehicles. *Scientific American*, 249(6):142–153, 1983. [35](#)
- [70] Francisco Guerrero Cabezas. ANÁLISIS E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA FOTO-VOLTAICO EN EL VEHÍCULO ELÉCTRICO UAL-eCARM. Trabajo fin de grado, Universidad de Almería, 2016. [23](#)

- [71] Qiao Haibo, Zhang Yicheng, Yao Yongtao, and Wei Li. Analysis of buck-boost converters for fuel cell electric vehicles. *2006 IEEE Int. Conf. Veh. Electron. Safety, ICVES*, pages 109–113, 2006. 11, 55
- [72] Austin Hausmann and Christopher Depcik. Expanding the Peukert equation for battery capacity modeling through inclusion of a temperature dependency. *J. Power Sources*, 235:148–158, 2013. 47
- [73] Magnus Hedlund. *Design and construction of a bidirectional DCDC converter for an EV application*. PhD thesis, Uppsala University, 2010. 11, 55
- [74] Steven Hegedus and Antonio Luque. *Achievements and Challenges of Solar Electricity from Photovoltaics*. Wiley Online Books. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England, second edi edition, dec 2010. 38
- [75] Heinzmann GmbH & Co. KG. Heinzmann Classic RN 120. Data Sheet. https://www.heinzmann.com/jdownloads/electric-and-hybrid-drives/wheel-hub-motors/DS_RN-120_Wheel-hub-motor_e.pdf, 2012. 35, 67, 74
- [76] W Hucho and G Sovran. Aerodynamics of Road Vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25(1):485–537, jan 1993. 32, 36
- [77] Shailendra Jain and Lalit Kumar. Fundamentals of Power Electronics Controlled Electric Propulsion. In Muhammad H. Rashid, editor, *Power Electron. Handb.*, pages 1023–1065. Butterworth-Heinemann, fourth edi edition, jan 2018. 68
- [78] Mahendra Chandra Joshi, Susovon Samanta, and Gopalakrishna Srungavarapu. Battery ultracapacitor based DC motor drive for electric vehicles. In *TENSYMP 2017 - IEEE Int. Symp. Technol. Smart Cities*. IEEE, 2017. 12, 55
- [79] Yu-Lung Ke, Ying-Chun Chuang, and Hung-Shiang Chuang. Energy Recovery Electric Bicycle with Two-Quadrant DC Motor Drivers. In *2009 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet.*, pages 1–7. IEEE, oct 2009. 12, 55
- [80] Amir Khajepour, M. Saber Fallah, and Avesta Goodarzi. *Electric and hybrid vehicles : technologies, modeling, and control : a mechatronic approach*. Wiley Desktop Editions. Wiley, Chichester, England, 2014. ISBN 1-118-40311-8. 8
- [81] Ryan C. Kroeze and Philip T. Krein. Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations. In *2008 IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, pages 1336–1342, Rhodes, Greece, 2008. IEEE. 45
- [82] KYOCERA Corporation. Kyocera KC200GT High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module. <https://www.energymatters.com.au/images/kyocera/KC200GT.pdf>. LIE/I09M0703-SAGKM. xxvi, xxvii, xxviii, 65, 72, 76, 77, 78
- [83] Francisco José Mañas Álvarez, José Luis Blanco Claraco, José Luis Torres Moreno, and Antonio Giménez Fernández. Modelado y control multivariable del vehículo urbano eléctrico UAL-eCARM. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 17(2), dec 2020. 22, 23, 36
- [84] Maged Mahrous Abdelsattar Mahrous. *Modelica models of PV elements For system-level Simulation and Control studies*. PhD thesis, Politecnico di Milano, 2015. 57
- [85] Stefanos N. Manias and Stefanos N. Manias. DC–DC Converters. In Stefanos N. Manias, editor, *Power Electron. Mot. Drive Syst.*, chapter 7, pages 501–611. Academic Press, 2017. 68

- [86] Sanjaya Maniktala. *Switching Power Supplies A to Z*. Elsevier, Burlington, MA, USA, 2006. ISBN 9780750679701. 68, 70
- [87] Luis Márquez. Neumáticos Agrícolas. Capacidad de Carga y Limitación de Velocidad. *Agrotécnica. Cuadernos de Agronomía y Tecnología*, pages 46–52, 2020. 35
- [88] L. Martinez Salamero, A. Cid-Pastor, A. El Aroudi, R. Giral, and J. Calvente. Modelado y Control de Convertidores Conmutados Continua-Continua: Una perspectiva Tutorial. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 6(4):5–20, 2009. 54
- [89] R.D. Middlebrook and Slobodan Cuk. A general unified approach to modelling switch-converter power stages. *Int. J. Electron.*, 42(6):521–550, 1977. 58, 60
- [90] Modelica Association. VehicleInterfaces Library (Version 1.2.4) Reference Guide. <https://build.openmodelica.org/Documentation/VehicleInterfaces.html>, 2011. 18
- [91] Modelica Association. Modelica Standard Library - Version 3.2.3. <https://www.modelica.org/documents/ModelicaSpec32Revision2.pdf>, 2013. 15, 16
- [92] Annette Muetze and Ying C. Tan. Electric bicycles - A performance evaluation. *IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE*, 13(4):12–21, 2007. 35, 67
- [93] L.W. Nagel. *SPICE2: A Computer Program To Simulate Semiconductor Circuits*. PhD thesis, University of California, Berkeley, CA, Berkeley, CA, USA, 1975. 21
- [94] L.W. Nagel and D.O. Pederson. SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). In *16th Midwest Symp. Circuit Theory*, page 66, Waterloo, Ontario, Canada, 1973. University of California, Berkeley, CA. 21
- [95] Michael Nikowitz. *Advanced Hybrid and Electric Vehicles: System Optimization and Vehicle Integration*. Lecture Notes in Mobility. Springer International Publishing, Berlin, Germany, 1st ed. 20 edition, 2016. 8
- [96] Joan M. Ogden and Lorraine Anderson. Sustainable Transportation Energy Pathways: A Research Summary for Decision Makers. Technical report, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, 2011. v, vii, 2
- [97] Hans Olsson, Sven Erik Mattsson, and Hilding Elmqvist. Calibration of Static Models using Dymola. In *Proceedings of the 5th International Modelica Conference*, pages 615–620, Vienna, Austria, 2006. The Modelica Association (<http://www.modelica.org/>) and arsenal research (<http://www.arsenal.ac.at/>). 21, 80
- [98] Martin Otter. Rectifiedmean. https://doc.modelica.org/Modelica_3.2.3/Resources/helpDymola/Modelica_Blocks_Math.html#Modelica.Blocks.Math.RectifiedMean. Modelica Association and contributors. 91, 93, 95
- [99] Martin Otter, Hilding Elmqvist, Sven Erik Mattsson, Bernhard Bachmann, Fachhochschule Bielefeld, Dynasim Ab, and Peter Fritzson. The New Modelica MultiBody Library. In Peter Fritzson, editor, *Proceedings of the 3rd International Modelica Conference*, pages 311–330, Linköping, 2003. 17
- [100] Guzay Pasaoglu, Michel Honselaar, and Christian Thiel. Potential vehicle fleet co2 reductions and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in europe. *Energy Policy*, 40(C):404–421, 2012. 6
- [101] Ananda Mani Paudel and Philipp Kreutzmann. Design and performance analysis of a hybrid solar tricycle for a sustainable local commute. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41:473–482, jan 2015. 9

- [102] Mathias Petzl and Michael A. Danzer. Advancements in OCV measurement and analysis for lithium-ion batteries. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 28(3):675–681, 2013. [10](#), [44](#), [51](#)
- [103] Susanne Pillath. Automated vehicles in the EU Briefing European Parliamentary Research Service (EPRS). Briefing PE 573.902, European Parliamentary Research Service (EPRS) - European Union, 2016. [23](#)
- [104] Ralf Bohle GmbH. Tire Dimensions - Schwalbe Professional Bike Tires. <https://www.schwalbe.com/en/reifenmasse>. Accedido el 21-03-2020. [35](#)
- [105] S. Falcioni. *ETRTO - Standards Manual - 2015*. European Tyre and Rim Technical Organisation, Brussels, 2015. [35](#)
- [106] John Schönberger, Richard Duke, and Simon D. Round. DC-bus signaling: A distributed control strategy for a hybrid renewable nanogrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(5):1453–1460, 2006. [68](#)
- [107] R.M. Schupbach and J.C. Balda. Comparing DC-DC converters for power management in hybrid electric vehicles. In *IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. 2003. IEMDC'03.*, volume 3, pages 1369–1374. IEEE, 2003. [12](#), [55](#), [57](#), [68](#)
- [108] Aden Seaman, Thanh-Son Dao, and John McPhee. A survey of mathematics-based equivalent-circuit and electrochemical battery models for hybrid and electric vehicle simulation. *J. Power Sources*, 256:410–423, jun 2014. [45](#)
- [109] D Sera, T Kerekes, R Teodorescu, and F Blaabjerg. Improved MPPT method for rapidly changing environmental conditions. In *2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, volume 2, pages 1420–1425, 2006. [57](#)
- [110] D Sera, R Teodorescu, J Hantschel, and M Knoll. Optimized Maximum Power Point Tracker for Fast-Changing Environmental Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(7):2629–2637, 2008. [57](#)
- [111] Jaw-Kuen Shiau and Chien-Wei Ma. Li-Ion Battery Charging with a Buck-Boost Power Converter for a Solar Powered Battery Management System. *Energies*, 6(3):1669–1699, 2013. [11](#), [55](#)
- [112] Kati Sidwall and Paul Forsyth. Advancements in Real-Time Simulation for the Validation of Grid Modernization Technologies. *Energies (Basel)*, 13(16):4036, 2020. [15](#)
- [113] Société de Technologie Michelin. Le pneu: Resistance au roulement et basse consommation. Technical report, Manufacture Française des Pneumatiques Michelin, Clermont-Ferrand, France, 2003. [36](#)
- [114] The MathWorks Inc. MATLAB[®] - Simulink[®]. <https://www.mathworks.com/>. Natick, Massachusetts. [9](#)
- [115] The Modelica Association. <https://www.modelica.org/>. Accedido el: 26-01-2021. [15](#)
- [116] The National Institute of Standards and Technology (NIST). CODATA Internationally recommended 2018 values of the Fundamental Physical Constants. <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>. Accedido el: 31-03-2020. [42](#), [43](#)
- [117] Mehmet Murat Topaç, Levent Bilal, Merve Karaca, and Mert Çakir. Performance Assessment of an Electric Microcar for Various Urban Driving Conditions. In *2019 Electric Vehicles International Conference, EV 2019*, Bucharest, Romania, oct 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. [9](#)

- [118] Jose Torres-Moreno, Antonio Gimenez-Fernandez, Manuel Perez-Garcia, and Francisco Rodriguez. Energy Management Strategy for Micro-Grids with PV-Battery Systems and Electric Vehicles. *Energies*, 11(3):522, 2018. 12, 21
- [119] Jose Torres-Moreno, Antonio Gimenez-Fernandez, Manuel Perez-Garcia, and Francisco Rodriguez. Energy Management Strategy for Micro-Grids with PV-Battery Systems and Electric Vehicles. *Energies*, 11(3):522, 2018. 22
- [120] Jose Luis Torres Moreno. *Multi-domain analysis of electric vehicles*. PhD thesis, Universidad de Almeria, Spain, 2014. 22, 23
- [121] José Luis Torres-Moreno, Galo Heredia, Antonio Giménez-Fernández, and Antonio Visioli. Banco de ensayo para motores de vehículos eléctricos. In *XL Jornadas de Automática: Ferrol, 4-6 de septiembre de 2019*, pages 450–457, El Ferrol - La Coruña - España, sep 2019. Universidade da Coruña. 22
- [122] Dai-Duong Tran, Majid Vafaeipour, Mohamed El Baghdadi, Ricardo Barrero, Joeri Van Mierlo, and Omar Hegazy. Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119:109596, mar 2020. 8
- [123] Olivier Tremblay and LA Dessaint. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World Electr. Veh. J.*, 3:1–10, 2009. 10, 45, 47, 49
- [124] TÜV SÜD Certification and Testing (China) Co. Ltd. Test Report IEC-62619A BYD B-Box, 2016. 21, 80
- [125] University of Wisconsin–Madison. Solar Energy Laboratory. TRNSYS18, a TRAnsient SYstem Simulation Program. <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/features.html>, April 2017. 12
- [126] Alfonso Urquía and Carla Martín. *Modeling and Simulation in Engineering Using Modelica*. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Madrid, Digital edition, 2012. ISBN 978-84-362-7309-0. 15
- [127] Jasper van Baten and Richard Baur. ScanIt. <https://www.amsterchem.com/scanit.html>, 2017. AmsterCHEM. 21, 49, 76, 85
- [128] VI-grade GmbH. VI-CarRealTime. <https://www.vi-grade.com/en/products/vi-carrealtime/>. Darmstadt, Alemania. 9
- [129] M.G. Villalva, J.R. Gazoli, and E.R. Filho. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5):1198–1208, may 2009. xxv, 10, 38, 39, 40, 41, 42, 65
- [130] Wenguan Wang, Henry Shu Hung Chung, and Jun Zhang. Near-real-time parameter estimation of an electrical battery model with multiple time constants and SoC-dependent capacitance. *2014 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2014*, 29(11):3977–3984, 2014. 45
- [131] Sheldon S Williamson. *Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. Springer New York, New York, NY, 1st ed. 20 edition, 2013. 8
- [132] K Wipke, M Cuddy, D Bharathan, S Burch, V Johnson, A Markel, and S Sprik. Advisor 2.0: A Second-Generation Advanced Vehicle Simulator for Systems Analysis. Technical Report NREL/TP-540-25928, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, EEUU, 1999. 9

-
- [133] Mauricio Zambrano-Bigiarini. hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series.
<http://hzambran.github.io/hydroGOF/>. DOI:10.5281/zenodo.839854. [84](#), [86](#)
- [134] Wei-Jun Zhang. Structure and performance of LiFePO₄ cathode materials: A review.
J. Power Sources, 196(6):2962–2970, mar 2011. [44](#)

Apéndices

Apéndice A

Publicaciones

-
- A.1. Modelling a Smart-Grid for a Solar Powered Electric Vehicle, MATHMOD 2018 Extended Abstract Volume, 9th Vienna Conference on Mathematical Modelling, Vienna, Austria, February 21-23, 2018**

Modelling a Smart-Grid for a Solar Powered Electric Vehicle ^{*}

F.J. Gómez ^{*} Luis J. Yebra ^{**} Antonio Giménez ^{*}

^{*} CIESOL, Joint Centre of the University of Almería-CIEMAT. 04120, Almería, Spain (e-mail:fgn891@inlumine.ual.es, agimfer@ual.es).

^{**} CIEMAT Research Centre. Plataforma Solar de Almería, 04200 Tabernas, Almería, Spain (e-mail: luis.yebra@psa.es).

Keywords: Object oriented modelling, electric vehicles, dynamic modelling, automatic control.

1. INTRODUCTION

Mathematical approximations for dynamic modelling of a Smart-Grid used in a electric solar powered small vehicle are developed for model based control purposes. The objective of this paper is to present the first principles and mathematical approximations behind the systems from which the Smart-Grid is composed of, that are mainly: photovoltaic (PV) panel, other renewable sources, battery, DC/DC converter, accessories, motor and regenerative brake. For this objective, the Modelica modelling language offers a complete set of capabilities well known so far and spread in the literature, and the main ideas behind it and, its evolution and description are detailed in (Cellier (1991); Åström et al. (1998); Fritzson P. (2004)). The Modelica Standard Library (MSL) provides an important quantity of proven models to be reused, some of which have been applied in the models presented in this work. For the simulations, the Modelica tool Dymola© (Elmqvist (2012)) has been used. This work is inspired in Dizqah et al. (2012).

Fig. 1 shows the experimental electrical vehicle eCARM used for model validation, developed in the University of Almería for research in Automatic Control.



Fig. 1. eCARM: electrical vehicle used as test rig.

2. DESCRIPTION OF THE SMART-GRID

This section presents the Smart-Grid composition for the solar powered small vehicle. The main components are shown in Fig. 2, where the electric power flows are represented by arrows.

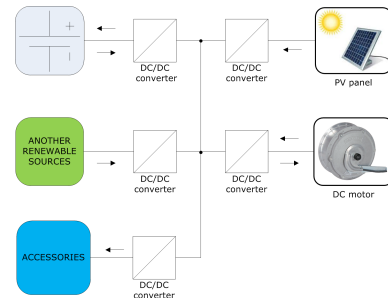


Fig. 2. Schematic diagram of the Smart-Grid modelled.

The bus *receives* power from battery, PV module and DC motor (when working as regenerative brake); and *sends* power to DC motor (when working as motor) and other unidirectional accessories. Please, note that the exchange of power between the battery and the bus is bidirectional. The interface to all devices from the bus is implemented by a DC/DC converter working in unidirectional or bidirectional configurations, so special care has been taken in the selection of this component, and its model features are discussed in the context of the whole Smart-Grid model. All these model devices have been modelled and parameters from commercial solutions have been used in the presented simulations.

3. DYNAMIC MODELLING AND SIMULATION OF THE SMART-GRID

This section presents the main model developed that is composed of the different submodels forming the Smart-Grid. All the models are implemented in the Modelica modelling language. Some of them are formulated in steady state conditions by the use of algebraic equations, p.e.: PV model. Others are formulated by differential and algebraic equations (DAE): the battery, the motor, the load and the DC-DC converter. The models of the components are not presented due to space availability in this document.

^{*} The authors thanks to the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness and ERDF funds for partially funding this work.

-
- A.2. Modelado de baterías para aplicación en vehículos urbanos eléctricos ligeros, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 16 (2019) 459-466**

Modelado de baterías para aplicación en vehículos urbanos eléctricos ligeros

F.J. Gómez^{a,*}, L.J. Yebra^{b,a}, A. Giménez^a, J.L. Torres-Moreno^a

^aCIESOL, Centro Mixto Universidad de Almería-CIEMAT. 04120, Almería, España.

^bCIEMAT. Plataforma Solar de Almería, 04200 Tabernas, Almería, España.

Resumen

En este artículo se propone un modelo dinámico de batería que permite simular el comportamiento de distintos tipos de baterías para su aplicación en vehículos eléctricos urbanos ligeros. El objeto fundamental de este modelo es su utilización dentro del modelo multifísico completo del vehículo, que permita desarrollar algoritmos de control y procedimientos de gestión de energía eficientes en vehículos eléctricos urbanos ligeros. El modelo es fácilmente parametrizable a partir de las curvas de descarga experimentales del equipo real y se ajusta adecuadamente al comportamiento particular de la curva de carga/descarga de las baterías de Litio-Ferrosulfato ($LiFePo_4$). Se han utilizado los datos obtenidos sobre una instalación experimental para la calibración del modelo propuesto y se presentan resultados de la validación del mismo. El modelo se ha implementado en el lenguaje de modelado orientado a objetos Modelica[®] reutilizando clases de su librería estándar *Modelica Standard Library*. La calibración y validación se han realizado con la herramienta de modelado Dymola[®].

Palabras Clave:

Lenguajes de simulación, Modelado de sistemas de eventos discretos e híbridos, Simulación de sistemas, Gestión energética y de almacenamiento de energía en vehículos, Identificación de sistemas y estimación de parámetros.

Modelling of batteries for application in light electric urban vehicles

Abstract

In this paper a dynamic model of a battery that lets simulate different types of batteries in light electric urban vehicles applications is proposed. The aim of this model is being used as part of the vehicle's whole multiphysics model in order to develop efficient control algorithms and energy management procedures for light urban electric vehicles. The model is directly parameterizable from discharging experimental curves in test facilities. It properly fits to the particular behaviour observed in the charging/discharging curves in $LiFePo_4$ batteries. For the calibration of the proposed model experimental data from an experimental facility have been used and validation results are presented. The model is implemented in the object oriented modelling language Modelica[®] reusing classes from the Modelica Standard Library. The calibration and the validation has been performed with Dymola[®] modelling tool.

Keywords:

Simulation languages, Discrete-event dynamic systems, Systems simulation, Storage and management of energy, System identification and Parameter estimation.

1. Introducción

Con el fin de desarrollar algoritmos de control y procedimientos de gestión de energía eficientes en vehículos eléctricos urbanos ligeros alimentados de distintas fuentes de energía renovable, es necesario disponer de modelos matemáticos

dinámicos fiables y validados de los distintos componentes del vehículo automóvil. Un modelo de centro de energía inteligente (*SEH – SmartEnergyHub*) que agrupe los diferentes elementos componentes del vehículo que aportan o consumen energía, permite la simulación dinámica del vehículo completo, su control y el análisis del balance energético de su actua-

*Autor para correspondencia: fgn891@inlumine.ual.es

To cite this article: F.J. Gómez, L.J. Yebra, A. Giménez, J.L. Torres-Moreno. 2019. Modelling of batteries for application in light electric urban vehicles.

Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 16, 459-466. <https://doi.org/10.4995/riai.2019.10609>

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4,0 International (CC BY-NC-ND 4,0)

-
- A.3. DC-DC Linearized Converter Model for Faster Simulation of Lightweight Urban Electric Vehicles, IEEE Access, vol. 8, pp. 85380-85394, 2020**

Received April 7, 2020, accepted April 26, 2020, date of publication May 6, 2020, date of current version May 19, 2020.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.2992558

DC-DC Linearized Converter Model for Faster Simulation of Lightweight Urban Electric Vehicles

FRANCISCO J. GÓMEZ NAVARRO¹, LUIS J. YEBRA², FRANCISCO J. GÓMEZ MEDINA³,
AND ANTONIO GIMÉNEZ-FERNÁNDEZ¹

¹Centro Mixto CIESOL, Universidad de Almería, 04120 Almería, Spain

²CIEMAT, Plataforma Solar de Almería, 04200 Almería, Spain

³Department of Engineering, Institute for Manufacturing, University of Cambridge, Cambridge CB3 0FS, U.K.

Corresponding author: Francisco J. Gómez Navarro (fgn891@inlumine.ual.es)

This work was supported in part by the Spanish Ministry of Economy, Industry, and Competitiveness (National R + D + i Plan Project) under Grant DPI2017-85007-R, and in part by the European Regional Development Fund (ERDF).

ABSTRACT The aim of this paper is to present a new bidirectional DC-DC linearized converter model for use in power demand and recovery units mainly used in Lightweight Electric Vehicle applications. The model significantly reduces the simulation time of the experiments performed, with up to a 4450-fold decrease in simulation times with respect to the original switched DC-DC topology. The study begins with a literature review of available switched converters, after which the presented topology is selected. The object-oriented modeling language Modelica[®] is used to implement the converter in the Dymola[®] modeling environment. Components and base classes from the Modelica Standard Library and VehicleInterfaces library are mainly used for better interoperability. Because of the intensive use of converters in the whole vehicle and the time consumed by the converter simulations due to high frequency commutation, a linearized DC-DC converter model is proposed. Comparison tests are performed between the reference switched models and the proposed linearized models in Dymola[®] tool to validate the linearized model behaviour. Nearly identical responses are obtained for both models, while simulation times are reduced as much as 1/4450 for the linearized converter. Furthermore, validation tests are carried out between the proposed linearized model in Dymola[®] and a reference switched model in LTspice[®] specific purpose simulation package for switched electronic circuits. Excellent agreement in the responses of both models is observed.

INDEX TERMS Computer simulation, continuous time systems, discrete-time systems, DC-DC power converters, energy efficiency, energy management, smart grids.

I. INTRODUCTION

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) states that CO₂ global emissions must be halved by 2050 with respect to 2000 levels, by which time as much as 80% of the total energy consumption is expected to result from transport alone [1], [2]. The European Commission has also established the foundations for the creation of competitive and sustainable transport policies, among which stand out the progressive reduction of Internal Combustion vehicles in urban settings and encouraging the use of smaller, lighter passenger vehicles specifically designed for urban transport [3].

A Smart Energy Hub (SEH) [4] comprising all elements of the Electric Vehicle (EV) that generate or consume energy would enable dynamic simulation of the full vehicle, as well

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Huazhu Fu¹.

as evaluation and optimization of control algorithms and smart energy management systems, once suitable models have been created for each of the elements comprising the SEH. This would ultimately allow analysis of energy flows and vehicle behaviour under various scenarios and configurations. Simulation results could also be contrasted with those of other authors. The concept of SEH is based on a decentralized architecture of the vehicle's electrical system, where each electrical subsystem connects to an intermediate DC-link. Each electrical subsystem acts as a standalone unit, which connects to the DC-Link via either an input converter, an output converter, or both. The advantages of this configuration are discussed in more detail in [5]. Given the role of converters to adjust the power flow demands of each subsystem, these play a key role in vehicle behaviour and management of energy demands. Therefore, the dynamic models of these converters must be reliable and allow for reasonable simulation timeframes.

Apéndice B

Listados de Código de la Librería *VLDV*

En este apéndice, se muestran los listados de código de las clases base y componentes de la librería *VLDV* que son de interés en el presente trabajo.

Listado de código B.1: BaseClass.Atmosphere.Interface.irradianceBase

```

partial function irradianceBase
  extends Modelica.Icons.Function;
  input Modelica.SIunits.Position [3] r=zeros(3);
  output SI.Irradiance G=1000;
end irradianceBase;

```

Listado de código B.2: BaseClass.Atmosphere.VLDVConstantAtmosphere

```

model VLDVConstantAtmosphere
  import SI = Modelica.SIunits;
  extends BaseClass.Icon.Atmosphere;
  extends BaseClass.Atmosphere.Interface.Base(
    redeclare final function windVelocity = constantWindVelocity (
      windVelocity=v),
    redeclare final function density = constantDensity (density=rho),
    redeclare final function temperature = constantTemperature (T0=T),
    redeclare final function humidity = constantHumidity (h0=h),
    redeclare final function irradiance = constantIrradiance (G0=G));
  constant Real R=Modelica.Media.IdealGases.Common.SingleGasesData.Air.R;
  parameter SI.Velocity [3] v=zeros(3);
  parameter SI.AbsolutePressure ambientPressure=101300;
  parameter SI.Temperature T=298.15;
  parameter Real h=0.5;
  parameter SI.Irradiance G=1000;
  protected
  parameter Modelica.SIunits.Density rho=ambientPressure/(R*T);
  function constantWindVelocity
    extends VehicleInterfaces.Atmospheres.Interfaces.windVelocityBase;
    input Modelica.SIunits.Velocity [3] windVelocity={0,0,0};
  algorithm v := windVelocity;
  end constantWindVelocity;
  function constantDensity
    extends VehicleInterfaces.Atmospheres.Interfaces.densityBase;
    input Modelica.SIunits.Density density=1.18;
  algorithm rho := density;
  end constantDensity;
  function constantTemperature
    extends VehicleInterfaces.Atmospheres.Interfaces.temperatureBase;
    input Modelica.SIunits.Temperature T0=293;
  algorithm T := T0;
  end constantTemperature;
  function constantHumidity
    extends VehicleInterfaces.Atmospheres.Interfaces.humidityBase;
    input Real h0=0.5;
  algorithm h := h0;
  end constantHumidity;
  function constantIrradiance
    extends BaseClass.Atmosphere.Interface.irradianceBase;
    input Real G0=1000;
  algorithm G := G0;
  end constantIrradiance;
end VLDVConstantAtmosphere;

```

Listado de código B.3: BaseClass.Chassis.Interface.ThreeWheelAVDriveBase

```
partial model ThreeWheelAVDriveBase
extends BaseClass.Chassis.Interface.BaseChassis ;
extends BaseClass.Icon.Tricycle ;
public
  Modelica.Mechanics.MultiBody.Interfaces.FlangeWithBearing
    wheelHub_1_AVG(final includeBearingConnector=includeWheelBearings
      or usingMultiBodyDriveline) ;
  Modelica.Mechanics.MultiBody.Interfaces.FlangeWithBearing
    wheelHub_3_ARG(final includeBearingConnector=includeWheelBearings
      or usingMultiBodyDriveline) ;
  Modelica.Mechanics.MultiBody.Interfaces.FlangeWithBearing
    wheelHub_4_ARD(final includeBearingConnector=includeWheelBearings
      or usingMultiBodyDriveline) ;
  VehicleInterfaces.Mechanics.MultiBody.MultiBodyEnd multiBodyEnd_1(
    final includeBearingConnector=includeWheelBearings or
    usingMultiBodyDriveline) ;
  VehicleInterfaces.Mechanics.MultiBody.MultiBodyEnd multiBodyEnd_3(
    final includeBearingConnector=includeWheelBearings or
    usingMultiBodyDriveline) ;
  VehicleInterfaces.Mechanics.MultiBody.MultiBodyEnd multiBodyEnd_4(
    final includeBearingConnector=includeWheelBearings or
    usingMultiBodyDriveline) ;
equation
  connect(multiBodyEnd_1.flange, wheelHub_1_AVG) ;
  connect(multiBodyEnd_4.flange, wheelHub_4_ARD) ;
  connect(multiBodyEnd_3.flange, wheelHub_3_ARG) ;
end ThreeWheelAVDriveBase ;
```

Listado de código B.4: BaseClass.Chassis.TricycleAVdriveMinimal

```

model TricycleAVdriveMinimal
  extends Interface.ThreeWheelAVDriveBase(includeChassisFrame=true);
  import VLDV_0_37A.BaseClass.Function.Rap;
  final parameter Modelica.SIunits.Length desarrolloAV=
    parameters.desarrolloAV;
  final parameter Modelica.SIunits.Length desarrolloAR=
    parameters.desarrolloAR;
  final parameter Modelica.SIunits.Mass vehicleMass=parameters.vehicleMass;
  final parameter Modelica.SIunits.Mass driverMass=parameters.driverMass;
  final parameter Modelica.SIunits.Mass batteryMass=parameters.batteryMass;
protected
  outer BaseClass.Chassis.SetParameters.ParamTriAVDrive_1 parameters;
  Modelica.Mechanics.MultiBody.Parts.Fixed Ground;
  Modelica.Mechanics.MultiBody.Joints.Prismatic prismatic(useAxisFlange=
    true, stateSelect=StateSelect.prefer, s(fixed=true, start=0));
  Modelica.Mechanics.Rotational.Components.IdealRollingWheel FrontWheelDrive
    (useSupportR=true,
     useSupportT=true, radius=Rap(desarrolloAV));
  Modelica.Mechanics.MultiBody.Parts.Mounting1D mounting1D_AV;
public
  BaseClass.Chassis.Resistance.ResistanceRollWind resistanceRollWind;
protected
  Modelica.Mechanics.Rotational.Components.IdealRollingWheel RearWheel(
    useSupportR=true,
    useSupportT=true, radius=Rap(desarrolloAR));
  Modelica.Mechanics.MultiBody.Parts.Mounting1D mounting1D_AR;
  Modelica.Mechanics.MultiBody.Parts.Body body(animation=true, r_CM={0,0,0},
    m=vehicleMass + driverMass + batteryMass);
  VehicleInterfaces.Chassis.Interfaces.StandardBus chassisBus;
public
  Modelica.Mechanics.Translational.Sensors.RelAccSensor relAccSensor;
  Modelica.Mechanics.Translational.Sensors.RelSpeedSensor relSpeedSensor;
  Modelica.Blocks.Math.Gain gain(k=-1);
equation
  connect(prismatic.frame_a, Ground.frame_b);
  connect(prismatic.axis, FrontWheelDrive.flangeT);
  connect(chassisFrame, prismatic.frame_b);
  connect(mounting1D_AV.flange_b, FrontWheelDrive.supportR);
  connect(mounting1D_AV.frame_a, chassisFrame);
  connect(mounting1D_AR.frame_a, chassisFrame);
  connect(mounting1D_AR.flange_b, RearWheel.supportR);
  connect(RearWheel.supportT, prismatic.support);
  connect(body.frame_a, chassisFrame);
  connect(FrontWheelDrive.flangeR, wheelHub_1_AVG.flange);
  connect(prismatic.axis, RearWheel.flangeT);
  connect(resistanceRollWind.flange_a, prismatic.axis);
  connect(prismatic.support, resistanceRollWind.flange_b);
  connect(RearWheel.flangeR, wheelHub_3_ARG.flange);
  connect(RearWheel.flangeR, wheelHub_4_ARD.flange);
  connect(prismatic.support, relAccSensor.flange_b);
  connect(prismatic.axis, relAccSensor.flange_a);
  connect(FrontWheelDrive.supportT, prismatic.support);
  connect(relSpeedSensor.flange_b, prismatic.support);
  connect(relSpeedSensor.flange_a, prismatic.axis);
  connect(relSpeedSensor.v_rel, gain.u);
  connect(gain.y, chassisBus.longitudinalVelocity);
  connect(chassisBus, controlBus.chassisBus);
end TricycleAVdriveMinimal;

```


Listado de código B.5: BaseClass.EnergySource.FunctionalBlocks.Iscn_To_Ipvn_improved

```

block Iscn_To_Ipvn_improved
  extends Modelica.Blocks.Icons.Block;
  Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput u;
  Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput y;
  parameter SI.Resistance Rs;
  parameter SI.Resistance Rp;
  equation
    y = u*((Rp + Rs)/Rp);
end Iscn_To_Ipvn_improved;

```

Listado de código B.6: BaseClass.EnergySource.FunctionalBlocks.SingleDiode_Id

```

model SingleDiode_Id
  extends Modelica.Electrical.Analog.Interfaces.OnePort;
  import SI = Modelica.SIunits;
  constant Real k=Modelica.Constants.k;
  constant SI.ElectricCharge q=1.60217646*(10-19);
  parameter Integer Ns;
  parameter Real a;
  parameter Real Ki;
  parameter Real Kv;
  parameter SI.Temp_K Tn=298;
  parameter SI.Voltage Voc_n;
  parameter SI.Temp_K T=298;
  parameter Real Isc_n;
  parameter SI.Resistance Rs;
  SI.Voltage Vt;
  SI.Current Io;
  parameter Real Maxexp(final min=Modelica.Constants.small) = 100;
  parameter SI.Resistance R=1.e8;
  equation
    Vt = Ns*k*T/q;
    Io = (Isc_n + (Ki*(T - Tn)))/((exp((Voc_n + Kv*(T - Tn))/(a*Vt))) - 1);
    i = smooth(1, (if (v/(Vt*a) > Maxexp) then Io*(exp(Maxexp)*(1 + v/(Vt*a) -
      Maxexp) - 1) + v/R else Io*(exp(v/(Vt*a)) - 1) + v/R));
end SingleDiode_Id;

```

Listado de código B.7: BaseClass.EnergyStorage.FuntionalBlocks.Block_Dizqah_LiIon_BBOX5_100Ah_SinDecay

```

model Block_Dizqah_LiIon_BBOX5_100Ah_SinDecay
  extends Modelica.Blocks.Interfaces.SISO(u(start=u_start),
  y(start=y_start));
  import SI = Modelica.SIunits;
  constant Real e=Modelica.Math.exp(1.0);
  parameter Integer nSC=16, nPC=20, nSB=1, nPB=2;
  parameter Real ratedVoltage=51.2, ratedCapacity=100, responseTime=30;
  parameter Real vFull=56.5, vExp=52.71, vNom=51.69, qExp=2, qNom=72;
  parameter Real socStart=100, u_start=0, y_start=ratedVoltage, IBC=10;
  Real cell_ratedVoltage=ratedVoltage/(nSC*nSB);
  Real cell_ratedCapacity=ratedCapacity/(nPC*nPB);
  Real cell_vFull=vFull/(nSC*nSB), vExp=vExp/(nSC*nSB);
  Real cell_vNom=vNom/(nSC*nSB), cell_qExp=qExp/(nPC*nPB);
  Real cell_qNom=qNom/(nPC*nPB);
  Real Ebat, cell_Ebat, A, K, cell_E0, B;
  SI.Resistance cell_R;
  Real iBat, cell_iBat, iFilter, cell_iFilter, ixFilter, it(start=0);
  Real cell_it(start=0), SOC, qMax, cell_qMax;
  discrete Boolean chargeState;
  Real initCharge(start=ratedCapacity);
  Real batteryCharge, cell_batteryCharge;
  Real batteryChargeMin, batteryChargeMax, batteryChargeLtd;
  Modelica.Blocks.Continuous.FirstOrder firstOrder_Filter(k=1, T=
  responseTime);
  Modelica.Blocks.Sources.RealExpression realExpression(y=iBat);
  Modelica.Blocks.Continuous.FirstOrder firstOrder_xFilter(k=1, T=1);
  parameter Integer Nsb=16;
equation
  A = cell_vFull - cell_vExp;
  B = (3/cell_qExp);
  cell_R = 0.01*cell_ratedVoltage*cell_ratedCapacity;
  qMax = ratedCapacity*1.05;
  cell_qMax = cell_ratedCapacity*1.05;
  K = ((cell_vFull - cell_vNom + A*(e^(-(B*cell_qNom - 1))))*(cell_qMax -
  cell_qNom))/(cell_qNom);
  cell_E0 = cell_vFull + K + cell_R*cell_iBat - A;
  u = iBat;
  y = Ebat;
  cell_iBat = iBat/(nPC*nPB);
  Ebat = cell_Ebat*(nSC*nSB);
  iFilter = firstOrder_Filter.y;
  cell_iFilter = iFilter/(nPC*nPB);
  ixFilter = firstOrder_xFilter.y;
  initCharge = qMax*0.01*socStart;
  batteryCharge = initCharge - it;
  cell_batteryCharge = batteryCharge/(nPC*nPB);
  batteryChargeMin = 0.01*IBC*qMax;
  batteryChargeMax = qMax;
  batteryChargeLtd = BaseClass.Function.yLimiter(batteryChargeMin,
  batteryChargeMax, batteryCharge);
  chargeState = if ixFilter <= 0 then true else false;
  der(it) = if (chargeState and (batteryCharge < batteryChargeMax)) or
  (not chargeState and (batteryCharge > batteryChargeMin)) then iBat/3600
  else 0;
  cell_it = it/(nPC*nPB);
  SOC = 100*(batteryChargeLtd/qMax);
  cell_Ebat = if chargeState then (cell_E0 - K*(cell_qMax/(cell_qMax -
  cell_it))*cell_it - K*(cell_qMax/(cell_it - 0.1*cell_qMax))*
  cell_iFilter + A*e^(-B*cell_it)) else (cell_E0 - K*(cell_qMax/(
  cell_qMax - cell_it))*cell_it - K*(cell_qMax/(cell_qMax - cell_it))
  *cell_iFilter + A*e^(-B*cell_it));
  connect(realExpression.y, firstOrder_Filter.u);
  connect(realExpression.y, firstOrder_xFilter.u);
end Block_Dizqah_LiIon_BBOX5_100Ah_SinDecay;

```

Listado de código B.8: BaseClass.EnergyStorage.FuntionalBlocks.Block_Dizqah_BB0X5_100Ah_L1L2(parte1)

```

model Block_Dizqah_BB0X5_100Ah_L1L2
  extends Modelica.Blocks.Interfaces.SISO(u(start=u_start),
    y(start=y_start));
  import SI = Modelica.SIunits;
  constant Real e=Modelica.Math.exp(1.0);
  parameter Real L1=1, L2=1, L3=0.01;
  parameter Real cell_R=L3*cell_ratedVoltage*cell_ratedCapacity;
  parameter Real cell_ratedVoltage=ratedVoltage/(nSC*nSB);
  parameter Real cell_ratedCapacity=ratedCapacity/(nPC*nPB);
  parameter Integer nSC=16, nPC=20, nSB=1, nPB=2;
  parameter Real ratedVoltage=51.2, ratedCapacity=100, responseTime=30;
  parameter Real vFull=56.5, vExp=52.71, vNom=51.69, qExp=2, qNom=72;
  parameter Real vd0=52.65, vd1=52.07, qd0=19, qd1=40;
  parameter Real socStart=100, u_start=0, y_start=ratedVoltage, lBC=10;
  Real cell_vFull=vFull/(nSC*nSB), cell_vExp=vExp/(nSC*nSB);
  Real cell_vNom=vNom/(nSC*nSB), cell_qExp=qExp/(nPC*nPB);
  Real cell_qNom=qNom/(nPC*nPB), cell_vd0=vd0/(nSC*nSB);
  Real cell_vd1=vd1/(nSC*nSB);
  Real cell_qd0=(ratedCapacity - qd0)/(nPC*nPB);
  Real cell_qd1=(ratedCapacity - qd1)/(nPC*nPB);
  Real Ebat, cell_Ebat, A, K, cell_E0, B;
  Real iBat, cell_iBat, iFilter, cell_iFilter, ixFilter, it(start=0);
  Real cell_it(start=0), SOC, qMax, cell_qMax;
  discrete Boolean chargeState;
  Real initCharge(start=ratedCapacity);
  Real batteryCharge, cell_batteryCharge;
  Real batteryChargeMin, batteryChargeMax, batteryChargeLtd;
  Real M, M0, M1, N, P, decay;
  Modelica.Blocks.Continuous.FirstOrder firstOrder_Filter(k=1, T=
    responseTime);
  Modelica.Blocks.Sources.RealExpression realExpression(y=iBat);
  Modelica.Blocks.Continuous.FirstOrder firstOrder_xFilter(k=1, T=1);
  parameter Integer Nsb=16;

```

Listado de código B.9: BaseClass.EnergyStorage.FuntionalBlocks.Block_Dizqah_BBOX5_100Ah_L1L2(parte2)

```

equation
  A = cell_vFull - cell_vExp;
  B = (3/cell_qExp);
  qMax = ratedCapacity*1.05;
  cell_qMax = cell_ratedCapacity*1.05;
  K = ((cell_vFull - cell_vNom + A*(e^(-(B*cell_qNom - 1))))*(cell_qMax -
    cell_qNom))/(cell_qNom);
  cell_E0 = cell_vFull + K + cell_R*cell_iBat - A;
  N = (cell_vd0 - cell_vd1)/2;
  P = (cell_qd1 + cell_qd0)/2;
  M0 = abs((-N*(cell_qd0 - P)/(cell_vd0 + N))^2 - (cell_qd0 - P)^2);
  M1 = abs((-N*(cell_qd1 - P)/(cell_vd1 + N))^2 - (cell_qd1 - P)^2);
  M = (M0 + M1)/2;
  decay = -N + ((-N*(cell_batteryCharge - P))/(abs(M +
    (cell_batteryCharge - P)^2))^0.5);
  u = iBat;
  y = Ebat;
  cell_iBat = iBat/(nPC*nPB);
  Ebat = cell_Ebat*(nSC*nSB);
  iFilter = firstOrder_Filter.y;
  cell_iFilter = iFilter/(nPC*nPB);
  ixFilter = firstOrder_xFilter.y;
  initCharge = qMax*0.01*socStart;
  batteryCharge = initCharge - it;
  cell_batteryCharge = batteryCharge/(nPC*nPB);
  batteryChargeMin = 0.01*IBC*qMax;
  batteryChargeMax = qMax;
  batteryChargeLtd = BaseClass.Function.yLimiter(batteryChargeMin,
    batteryChargeMax, batteryCharge);
  chargeState = if ixFilter <= 0 then true else false;
  der(it) = if (chargeState and (batteryCharge < batteryChargeMax)) or
    (not chargeState and (batteryCharge > batteryChargeMin)) then iBat/3600
    else 0;
  cell_it = it/(nPC*nPB);
  SOC = 100*(batteryChargeLtd/qMax);
  cell_Ebat = if chargeState then (cell_E0 - L1*K*(cell_qMax/(cell_qMax -
    cell_it))*cell_it - L2*K*(cell_qMax/(cell_it - 0.1*cell_qMax))*
    cell_iFilter - decay + A*e^(-B*cell_it)) else (cell_E0 - L1*K*(
    cell_qMax/(cell_qMax - cell_it))*cell_it - L2*K*(cell_qMax/(cell_qMax
    - cell_it))*cell_iFilter - decay + A*e^(-B*cell_it));
  connect(realExpression.y, firstOrder_Filter.u);
  connect(realExpression.y, firstOrder_xFilter.u);
end Block_Dizqah_BBOX5_100Ah_L1L2;

```

Listado de código B.10: BaseClass.EnergyBus.FuntionalBlocks.BoostAveragedModel_2

```

block BoostAveragedModel_2
  extends BaseClass.Various.SI3SO2;
  parameter Modelica.SIunits.Inductance L;
  parameter Modelica.SIunits.Resistance Rl;
  parameter Modelica.SIunits.Capacitance C;
  parameter Modelica.SIunits.Resistance Rc;
  parameter Modelica.SIunits.Resistance R;
  Modelica.SIunits.ElectricCurrent i_L(start=0);
  Modelica.SIunits.ElectricCurrent i_in(start=0);
  Modelica.SIunits.ElectricCurrent i_out(start=0);
  Modelica.SIunits.ElectricPotential vg(start=0);
  Modelica.SIunits.ElectricPotential v_C(start=0);
  Modelica.SIunits.ElectricPotential v_out(start=0);
  Real d(start=0);
  Real[2, 1] xPoint;
  Real[2, 2] A;
  Real[2, 1] x;
  Real[2, 1] b;
  Real y[1, 1];
  Real[1, 2] cT;
  Real[2, 2] A1={{-Rl/L,0},{0,-1/((R + Rc)*C)}};
  Real[2, 2] A2={{-(Rl + RcR)/L,-R/(L*(R + Rc))},
  {R/((R + Rc)*C),-1/((R + Rc)*C)}};
  Real[2, 1] b1={{1/L},{0}};
  Real[2, 1] b2;
  Real[1, 2] c1T={{0,R/(R + Rc)}};
  Real[1, 2] c2T={{RcR,R/(R + Rc)}};
  Modelica.SIunits.Resistance RcR;
equation
  u1 = d;
  u2 = vg;
  y1 = i_in;
  u3 = i_out;
  y2 = v_out;
  1/RcR = 1/R + 1/Rc;
  b2 = b1;
  A = d*A1 + (1 - d)*A2;
  b = d*b1 + (1 - d)*b2;
  cT = d*c1T + (1 - d)*c2T;
  xPoint = A*x + b*vg;
  der(x) = xPoint;
  y = cT*x;
  v_C = x[2, 1];
  i_L = x[1, 1];
  v_out = y[1, 1];
  i_in = i_out/(1 - d);
end BoostAveragedModel_2;

```

Listado de código B.11: BaseClass.EnergyBus.FuntionalBlocks.BuckAveragedModel_2

```

block BuckAveragedModel_2
  extends BaseClass.Various.SI3SO2;
  parameter Modelica.SIunits.Inductance L;
  parameter Modelica.SIunits.Resistance Rl;
  parameter Modelica.SIunits.Capacitance C;
  parameter Modelica.SIunits.Resistance Rc;
  parameter Modelica.SIunits.Resistance R;
  Modelica.SIunits.ElectricCurrent i_L(start=0);
  Modelica.SIunits.ElectricCurrent i_in(start=0);
  Modelica.SIunits.ElectricCurrent i_out(start=0);
  Modelica.SIunits.ElectricPotential vg(start=0);
  Modelica.SIunits.ElectricPotential v_C(start=0);
  Modelica.SIunits.ElectricPotential v_out(start=0);
  Real d(start=0);
  Real[2, 1] xPoint;
  Real[2, 2] A;
  Real[2, 1] x;
  Real[2, 1] b;
  Real y[1, 1];
  Real[1, 2] cT;
  Real[2, 2] A1={{-(Rl + RcR)/L,-R/(L*(R + Rc))},
  {R/((R + Rc)*C),-1/((R + Rc)*C)}};
  Real[2, 2] A2={{-(Rl + RcR)/L,-R/(L*(R + Rc))},
  {R/((R + Rc)*C),-1/((R + Rc)*C)}};
  Real[2, 1] b1={{1/L},{0}};
  Real[2, 1] b2={{0},{0}};
  Real[1, 2] c1T={{RcR,R/(R + Rc)}};
  Real[1, 2] c2T={{RcR,R/(R + Rc)}};
  Modelica.SIunits.Resistance RcR;
equation
  u1 = d;
  u2 = vg;
  u3 = i_out;
  y1 = i_in;
  y2 = v_out;
  1/RcR = 1/R + 1/Rc;
  A = d*A1 + (1 - d)*A2;
  b = d*b1 + (1 - d)*b2;
  cT = d*c1T + (1 - d)*c2T;
  xPoint = A*x + b*vg;
  der(x) = xPoint;
  y = cT*x;
  v_C = x[2, 1];
  i_L = x[1, 1];
  v_out = y[1, 1];
  i_in = d*i_out;
end BuckAveragedModel_2;

```

Listado de código B.12: Component.Atmosphere.VLDVConstantAtmosphere

```

model VLDVConstantAtmosphere
  extends BaseClass.Atmosphere.VLDVConstantAtmosphere(
    G=1000,
    h=0.5,
    T=298.15,
    ambientPressure=101300,
    v=0
  );
end VLDVConstantAtmosphere;

```

Listado de código B.13: `Component.EnergySource.PVpanel.PV_Vill_KC200GT_improved`

```

model PV_Vill_KC200GT_improved
  extends BaseClass.EnergySource.PVpanel.PVpanelVillalba_improved(
    singleDiode.Id(v(start=24)),
    Rs=0.221,
    Rp=415.405,
    Ns=54,
    a=1.3,
    Isc_n=8.21,
    Ki=0.00318,
    Kv=-0.123,
    Voc_n=32.9,
    T=298
  );
end PV_Vill_KC200GT_improved;

```

Listado de código B.14: `BaseClass.TractionMotor.EMF_kT_kE_Revised`

```

model EMF_kT_kE_Revised
  import SI = Modelica.SIunits;
  parameter Boolean useSupport=false;
  parameter SI.ElectricalTorqueConstant kT(start=1);
  parameter Real kE(start=1);
  SI.Current i;
  SI.Angle phi;
  SI.AngularVelocity w;
  Modelica.Electrical.Analog.Interfaces.PositivePin p;
  Modelica.Electrical.Analog.Interfaces.NegativePin n;
  Modelica.Mechanics.Rotational.Interfaces.Flange_b flange;
  Modelica.Mechanics.Rotational.Interfaces.Support support if useSupport;
protected
  Modelica.Mechanics.Rotational.Components.Fixed fixed if not useSupport;
  Modelica.Mechanics.Rotational.Interfaces.InternalSupport internalSupport(
    tau=-flange.tau);
equation
  e = p.v - n.v;
  0 = p.i + n.i;
  i = p.i;
  phi = flange.phi - internalSupport.phi;
  w = der(phi);
  e = kE*w;
  flange.tau = -kT*i;
  connect(internalSupport.flange, support);
  connect(internalSupport.flange, fixed.flange);
end EMF_kT_kE_Revised;

```

