



Universidad
Carlos III de Madrid

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Escuela Politécnica Superior

Departamento de Ingeniería Eléctrica

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Estudio y análisis de formalismos gráficos EMR en sistemas electromecánicos

Autor:

Sergio de Miguel Sala

Tutor:

Miguel Eduardo Montilla D'Jesús

Leganés, Octubre 2016



Estudio y análisis de formalismos gráficos EMR en sistemas electromecánicos

Sergio de Miguel Sala



Resumen

Los sistemas electromecánicos son sistemas complejos cuyo análisis y estudio entraña cierta dificultad. En este trabajo se proponen los formalismos gráficos como una herramienta que ayuda a comprender mejor dichos sistemas mediante los flujos de energía que en ellos se producen. Estos formalismos constituyen una etapa previa a la simulación, y organizan de una forma óptima y natural el modelo siguiendo una serie de especificaciones.

Entre los diversos formalismos gráficos existentes destaca la Representación Energética Macroscópica (EMR), gracias a una dualidad de enfoques estructural y funcional para el modelado de sistemas y a una ley de control basada en la inversión que saca a relucir sus grados de libertad. Una vez expuestos sus principios y fundamentos teóricos, se estudiará esta técnica de una forma práctica mediante la simulación de la transmisión mecánica de un embrague, y un vehículo eléctrico simplificado sometido a un determinado ciclo de conducción.

Finalmente, con los resultados obtenidos, se podrán sacar conclusiones a cerca de la validez y utilidad de esta herramienta.



Abstract

Electromechanical systems are complex systems whose analysis and study involves some difficulty. In this paper graphical formalisms are proposed as a tool that helps to better understand such systems through energy flows that occur in them. These graphical formalisms are a pre-simulation stage and they organize the model in an optimal and natural way, following a series of specifications.

Among the different existing graphical formalisms, the Energy Macroscopic Representation (EMR) stands out, due to a duality of structural and functional approaches to system modeling and a control law based on inversion that brings out its degrees of freedom. After presenting the principles and theoretical fundamentals, this technique will be studied in a practical way by simulating the mechanical transmission of a clutch, and a simplified electric vehicle with a specific driving cycle.

Finally, with the results, it will be possible to draw conclusions about the validity and usefulness of this tool.



ÍNDICE

Índice de figuras.....	VII
Índice de tablas.....	XI
Capítulo 1. Introducción.....	1
• 1.1 Motivación.....	1
• 1.2 Objetivos del proyecto.....	1
✓ 1.2.1Objetivos específicos.....	2
• 1.3 Estructura del documento.....	2
Capítulo 2. Estado del Arte.....	4
• 2.1 Aspectos teóricos del modelado.....	4
✓ 2.1.1 Definición y objetivos del modelado.....	4
✓ 2.1.2 Principios básicos.....	5
• 2.2 Modelado de Sistemas Electromecánicos.....	6
• 2.3 Formalismos de modelado para la gestión de la energía.....	9
✓ 2.3.1 Formalismos tradicionales matemáticos.....	9
✓ 2.3.2 Formalismos Gráficos.....	10
▪ 2.3.2.1 Bond Graph.....	11
▪ 2.3.2.2 Causal Ordering Graph.....	13
✓ 2.3.3 Evaluación de los diversos formalismos.....	16
Capítulo 3. EMR. Representación Macroscópica Energética.....	17



- 3.1 Etapa de modelado 17
 - ✓ 3.1.1 Principios básicos. 17
 - ✓ 3.1.2 Tipos de elementos. 19
- 3.2 Etapa de control. MCS “Maximum Control Structure”. 21
 - ✓ 3.2.1 Principio de Inversión..... 21
 - ✓ 3.2.2 Inversión de los distintos elementos. 22
- 3.3 Revisión Crítica 26

- Capítulo 4. Modelado y simulación de la transmisión de un embrague. 28**
 - 4.1 Introducción. 28
 - 4.2 Modelo de los estados del embrague..... 29
 - ✓ 4.2.1 Modelo 1: Embrague abierto o deslizando..... 30
 - ✓ 4.2.2 Modelo 2: Embrague bloqueado o cerrado..... 31
 - ✓ 4.2.3 Selector de conmutación 32
 - 4.3 Simulación y resultados 33

- Capítulo 5. Modelado y simulación de un vehículo eléctrico simplificado 39**
 - 5.1 Introducción. 39
 - ✓ 5.1.1 Historia del coche eléctrico..... 39
 - ✓ 5.1.2 Principales tipos de vehículo eléctrico 40
 - ✓ 5.1.3 Ventajas y desventajas del motor eléctrico..... 41
 - 5.2 Batería del coche eléctrico. 42
 - 5.3 Tipos de modelos de representación de vehículos 47
 - 5.4 Modelado y control de un coche eléctrico 48



✓ 5.4.1 Modelado EMR del vehículo eléctrico.	48
✓ 5.4.2 Control MCS del vehículo eléctrico	54
• 5.5 Simulación y resultados	58
• 5.6 Nueva conexión del motor	65
Capítulo 6. Conclusión y futuros trabajos	74
• 6.1 Conclusión.	74
• 6.2 futuros trabajos.....	76
Capítulo 7. Presupuesto del trabajo	78
Capítulo 8. Planificación del Proyecto	79
Anexo	80
• Parámetros del proyecto.....	81
Bibliografía.....	85



ÍNDICE DE FIGURAS

<u>Figura 1.</u> Modelado una máquina de corriente continua con un gráfico Bond Graph [5]	12
<u>Figura 2.</u> Principales elementos del COG [16]	14
<u>Figura 3.</u> Causal Ordering Graph de una máquina de corriente continua [5]	15
<u>Figura 4.</u> Principio de Interacción [20].....	18
<u>Figura 5.</u> Principio de Causalidad Integral [20].....	19
<u>Figura 6.</u> Elementos de (a) distribución y (b) acoplamiento [23].....	20
<u>Figura 7.</u> Elementos básicos de modelado del EMR [18].....	20
<u>Figura 8.</u> Principio de inversión [19].....	21
<u>Figura 9.</u> Ejemplo de una carga R-L. Esquema eléctrico, EMR y MCS [7]	23
<u>Figura 10.</u> Modelado y control de un elemento de distribución	24
<u>Figura 11.</u> Elementos de control MCS. [7].....	25
<u>Figura 12.</u> Elementos de estrategia y estimación [19].	26
<u>Figura 13.</u> Embrague y componentes [25].....	28
<u>Figura 14.</u> Esquema de la transmisión del embrague [25].....	30



<u>Figura 15.</u> EMR del embrague en posición abierta (modelo 1) [25].....	31
<u>Figura 16.</u> EMR del embrague en posición cerrada (modelo 2) [25].....	32
<u>Figura 17.</u> Red de Petri del selector de conmutación [25]	32
<u>Figura 18.</u> Elemento selector EMR [25].	33
<u>Figura 19.</u> Esquema completo EMR del embrague [25]	34
<u>Figura 20.</u> Modelado del Embrague en Simulink	34
<u>Figura 21.</u> Posición del embrague	35
<u>Figura 22.</u> Modelo usado en cada instante	36
<u>Figura 23.</u> Par de embrague y par de embrague máximo.....	36
<u>Figura 24.</u> Velocidades angulares.	37
<u>Figura 25.</u> Coeficiente de fricción.....	37
<u>Figura 26.</u> Curva característica de la capacidad de la batería respecto al número de ciclos (a), temperatura (b), corriente de la batería (c) y el tiempo (d) [31].	43
<u>Figura 27.</u> Curva característica relación entre SOC y VOC [31].	45
<u>Figura 28.</u> Circuito equivalente de la batería [28].	46
<u>Figura 29.</u> Relación temperatura-tiempo para distintos tipos de baterías [32].	46
<u>Figura 30.</u> Esquema de tracción del vehículo estudiado [18].	49
<u>Figura 31.</u> Esquema EMR del vehículo eléctrico estudiado [18]	50



<u>Figura 32.</u> <i>Chopper de cuatro cuadrantes [33].</i>	50
<u>Figura 33.</u> <i>Esquema máquina de corriente continua</i>	51
<u>Figura 34.</u> <i>Representación del giro del vehículo</i>	53
<u>Figura 35.</u> <i>Fuerzas exteriores involucradas en el sistema</i>	54
<u>Figura 36.</u> <i>Cadena de control</i>	55
<u>Figura 37.</u> <i>Esquema completo EMR y MCS del sistema [18]</i>	55
<u>Figura 38.</u> <i>Desarrollo en Simulink del modelado y control del coche eléctrico</i>	58
<u>Figura 39.</u> <i>Ciclo de conducción urbana europeo ECE-15</i>	59
<u>Figura 40.</u> <i>Velocidad lineal del vehículo</i>	59
<u>Figura 41.</u> <i>Velocidad lineal de cada rueda</i>	60
<u>Figura 42.</u> <i>Ciclo de trabajo del chopper</i>	61
<u>Figura 43.</u> <i>Tensión a la salida del chopper</i>	61
<u>Figura 44.</u> <i>Intensidad que recorre la máquina de c.c.</i>	62
<u>Figura 45.</u> <i>Par de la máquina de cc y de la caja de cambios</i>	62
<u>Figura 46.</u> <i>Comparativa VOC y SOC teórica y real</i>	63
<u>Figura 47.</u> <i>Análisis del SOC de la batería</i>	64
<u>Figura 48.</u> <i>Velocidad del motor</i>	65
<u>Figura 49.</u> <i>Región de Par constantes y Potencia constante [33].</i>	66
<u>Figura 50.</u> <i>Mapa de eficiencia motor eléctrico 30 Kw [28].</i>	66
<u>Figura 51.</u> <i>Esquema motor con excitación independiente [33].</i>	67



<u>Figura 52.</u> <i>EMR y MCS con excitación independiente.....</i>	68
<u>Figura 53.</u> <i>Modificación flujo variable EMR.....</i>	69
<u>Figura 54.</u> <i>Modificaciones flujo variable MCS.....</i>	70
<u>Figura 55.</u> <i>Nueva velocidad del vehículo</i>	71
<u>Figura 56.</u> <i>Ciclo de trabajo del segundo chopper.....</i>	71
<u>Figura 57.</u> <i>Intensidad de campo.....</i>	72
<u>Figura 58.</u> <i>Comparación de pares</i>	73



ÍNDICE DE TABLAS

<u>Tabla 1.</u> Pares de variables usadas para describir flujos de energía.	10
<u>Tabla 2.</u> Señales análogas de BG en distintos dominios ingenieriles [10].....	11
<u>Tabla 3.</u> Resumen de las características de los diferentes formalismos.	27
<u>Tabla 4.</u> Parámetros de simulación embrague [25].....	35
<u>Tabla 5.</u> Características de BEV, HEV y FCV [1]	41
<u>Tabla 6.</u> Presupuesto del proyecto	78
<u>Tabla 7.</u> Planificación del proyecto.....	79
<u>Tabla A.1.</u> Parámetros simulación embrague	81
<u>Tabla A.2.</u> Principales parámetros batería NIMH	82
<u>Tabla A.3.</u> Principales parámetros máquina de corriente continua	83
<u>Tabla A.4.</u> Principales parámetros del vehículo eléctrico	84



Estudio y análisis de formalismos gráficos EMR en sistemas electromecánicos

Sergio de Miguel Sala



Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

La motivación para realizar este trabajo surge de las múltiples ramas de la ciencia ingenieril estudiadas durante el Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales. Este grado abre la posibilidad de realizar un trabajo que incluye conceptos de varias ramas, tal y como ocurre en la industria. Esto fue posible gracias a mi tutor, quien ofreció la posibilidad de hacer un estudio de una técnica relativamente moderna llamada EMR (*“Energetic Macroscopic Representation”*) para el modelado y posterior control de sistemas electromecánicos. Esta técnica, como se expondrá posteriormente, permite entender de una forma más sencilla cómo funcionan dichos sistemas, por lo que también tiene una importante aplicación didáctica para la enseñanza, ya que para los alumnos muchas veces no es fácil entender cómo funciona el sistema como un todo. Esta herramienta gráfica puede ser de gran utilidad para comprender mejor como se transfiere la energía entre los distintos elementos que componen el sistema y cómo funciona éste globalmente, por lo que suscita gran interés y fue elegida como tema principal de este trabajo de fin de grado.

1.2 Objetivos del proyecto

El objetivo general de este proyecto es explicar y analizar de una forma clara y detallada la técnica EMR. Se quiere llevar a cabo un trabajo compacto en el que se expliquen las técnicas predecesoras hasta llegar a la ya citada, analizar ésta en profundidad y comprobar su validez de una forma práctica.



1.2.1 Objetivos específicos

- Estudio de las técnicas predecesoras al EMR observando sus diferencias y particularidades para determinar si el EMR es más completo.
- Lograr exponer de forma sencilla los principios que rigen el EMR así como todos sus elementos.
- Realizar dos simulaciones mediante el software Matlab y la herramienta Simulink para observar los resultados tanto de la parte de modelaje como de la de control de dicha técnica.
- Sacar conclusiones y determinar la validez de la técnica así como sus ventajas y desventajas.

1.3 Estructura del Documento

- **Capítulo 1. Introducción:** En este capítulo se expone la motivación y los objetivos generales y específicos que persigue el proyecto.
- **Capítulo 2. Estado del arte:** Al comienzo de este capítulo se explica en que consiste el modelado de un sistema y cuáles son sus principios básicos. A continuación se limita el estudio a los sistemas electromecánicos y a los distintos formalismos para la gestión de la energía, tanto tradicionales como gráficos. Se hace una evaluación de las características de cada uno, hasta llegar a la técnica EMR.
- **Capítulo 3. EMR. Representación Macroscópica Energética:** En este capítulo se hace un estudio teórico de la técnica EMR, indicando las dos partes en las que se divide el desarrollo de su metodología. Se analizan los distintos tipos de elementos y principios básicos que rigen cada etapa y se hace una evaluación crítica para analizar si esta técnica es mejor que sus predecesoras.
- **Capítulo 4. Modelado y simulación de la transmisión de un embrague:** Con este capítulo se deja de lado el enfoque teórico para pasar al práctico de la simulación. Tras una introducción se exponen los posibles estados en los que se puede encontrar un embrague, las ecuaciones que rigen cada uno de ellos y como conmutar de uno a otro. Se elabora una simulación del modelado del sistema sin



control, para observar la validez de la técnica, buscando sus ventajas y observar si los resultados son correctos.

- **Capítulo 5. Modelado y simulación de un vehículo eléctrico:** Al inicio de este capítulo se elabora una introducción a cerca de la historia del coche eléctrico, así como los diferentes tipos de vehículos eléctricos que existen y cuáles son sus ventajas. A continuación se exponen algunas nociones básicas a cerca de las baterías de este tipo de vehículos y se elige una justificadamente. Posteriormente se lleva a cabo una simulación más completa que la del capítulo anterior, modelando un coche eléctrico simplificado y estableciendo su control, para comprobar de una forma completa la validez de la técnica EMR. Finalmente se lleva a cabo una nueva conexión del motor del vehículo, para observar si dicha técnica es susceptible a cambios o no.
- **Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros:** Se concluye el trabajo con una conclusión sobre los principales temas de los que trata el trabajo, así como la consecución de los diversos objetivos. De igual modo se aportan líneas de trabajo futuras.
- **Capítulo 7. Presupuesto:** En este capítulo se establece un presupuesto para el trabajo desarrollado.
- **Capítulo 8. Planificación del proyecto:** En este último capítulo se hace un desglose de todas las tareas llevadas a cabo para la realización del proyecto, y el tiempo que ha sido requerido en cada una de ellas.

Se concluye el trabajo con un Anexo donde se detallan los valores numéricos de los principales parámetros que han sido necesarios para desarrollar ambas simulaciones.



Capítulo 2

Estado del Arte

2.1 Aspectos teóricos del modelado

2.1.1 Definición y objetivos del modelado.

Un modelo es una representación diseñada para mostrar y analizar los objetivos y funciones principales de un sistema o proceso [1]. Un mismo sistema se puede representar utilizando distintos modelos, y según el caso de estudio se requerirá uno u otro nivel de precisión. La validez de dicho modelo depende entre otros factores de dicho nivel de precisión, que está condicionado por las hipótesis y simplificaciones realizadas.

Son muchos los objetivos que se consiguen a través del modelado [2], [3]:

- Los modelos ayudan a visualizar cómo es o se quiere que sea un sistema. Es muy difícil visualizar un sistema solo con referencias textuales.
- Permiten especificar la estructura y el comportamiento deseado de un sistema.
- Proporcionan plantillas que sirven de guía en la construcción de un sistema.
- Documentan las decisiones que se han tomado, lo cual puede ser muy útil a largo plazo.
- Ayudan a controlar el riesgo y conceptualizar la solución.

En definitiva un modelo es una simplificación de la realidad, cuya construcción sirve para comprender mejor el sistema que se está desarrollando.



2.1.2 Principios básicos.

El modelado tiene una larga historia en todas las disciplinas de la ingeniería, y con dicha experiencia se sugieren cuatro principios básicos [2]:

1. *“La elección acerca de qué modelo crear tiene una profunda influencia sobre cómo se acomete un problema y cómo se da forma a una solución.”.*

Es decir, es necesario elegir bien el modelo a realizar. Escoger el modelo adecuado puede ser de inestimable ayuda para solucionar el más difícil de los problemas, mientras que uno erróneo desorientará llevándonos a cuestiones irrelevantes. Según como se enfoque el problema serán distintos los recursos y herramientas a utilizar.

2. *“Todo modelo puede ser expresado con diferentes niveles de precisión”.*

En todo modelo será necesaria una vista general del sistema y luego una mucho más concreta y exacta de cada uno de los componentes. Los mejores modelos son los que permiten elegir el grado de detalle, según quién esté viendo el modelo y su intención. Es de gran validez poder ver un sistema a distintos niveles de detalle en momentos diferentes.

3. *“Los mejores modelos están ligados a la realidad”.*

La idea es tener modelos que tengan una clara conexión con la realidad, y saber dónde se alejan más del mundo real. Todos los modelos tienen simplificaciones de la realidad pero hay que asegurarse que esas simplificaciones no oculten ningún detalle importante.

4. *“Un único modelo o vista no es suficiente. Cualquier sistema no trivial se aborda mejor a través de un pequeño conjunto de modelos casi independientes con múltiples puntos de vista”.*

Este principio defiende el tener modelos que puedan ser construidos y estudiados separadamente, pero que estén interrelacionados entre sí.

Todos los sistemas útiles e interesantes con el paso del tiempo se vuelven complejos, así que aunque al principio parezca que no hace falta, es muy recomendable modelarlos.



2.2 Modelado de Sistemas Electromecánicos.

Es evidente que cuanto mayor sea la complejidad de un sistema mayor importancia adquiere el modelado, por lo que éste es de especial interés en los sistemas electromecánicos [4].

La mayoría de los sistemas electromecánicos se consideraron inicialmente lineales, continuos, estacionarios y de parámetros conocidos [5]. Esta visión ideal ha desembocado en estructuras de control relativamente simples. Para conseguir un mejor rendimiento, estas simplificaciones deben ser revisadas, dado que por ejemplo los convertidores estáticos se basan en operaciones discretas y no lineales (aperturas y cierres de interruptores), o que las máquinas eléctricas tienen no linealidades debido a sus características magnéticas.

Los sistemas electromecánicos como los accionamientos eléctricos son sistemas multidisciplinares donde entra en juego la electrónica de potencia, la ingeniería eléctrica, mecánica, automática, informática industrial (microprocesadores para la implementación), entre otros. Esta yuxtaposición de disciplinas hace que sea más complicado obtener un sistema eficiente, para lo cual es necesario establecer vínculos entre las distintas partes que garanticen un funcionamiento consistente.

Es por ello que se tiene la visión de un sistema como el conjunto de todos los subsistemas interconectados entre sí que lo componen, organizados para un objetivo común en interacción con el medio ambiente [6]. Dichos subsistemas a su vez pueden ser descritos como propios sistemas: Las entradas estarán producidas por los subsistemas previos (aguas arriba), impuestas a los subsistemas para su debida evolución, y las salidas serán la consecuencia de dicha evolución y estarán impuestas a los siguientes subsistemas (aguas abajo).

Llegados a este punto se pueden definir dos enfoques [1], [6]: El enfoque cartesiano (enfoque clásico) determina que el estudio independiente de los subsistemas es suficiente para determinar el comportamiento del sistema completo. Este enfoque contrasta con el enfoque sistémico, que defiende que el sistema debe ser estudiado como un todo. Esta propiedad holística [5] sugiere que de la interacción entre subsistemas pueden surgir nuevas características del sistema y cancelarse otras características locales. Dentro del enfoque sistémico se diferencian dos vertientes: El enfoque cibernético, donde el sistema se estudia sin conocimiento interno, por eso también se le llama de caja negra, y el enfoque cognitivo donde el sistema se estudia con conocimiento previo, y se basa en la construcción del modelo a partir de las leyes físicas de los dispositivos. En este enfoque el control del sistema



se puede desarrollar usando una metodología de inversión (como veremos posteriormente, el EMR pertenecería a este enfoque).

Para acabar con los tipos de modelado de estos sistemas es importante distinguir entre modelos estructurales y funcionales y entre modelos causales y no causales [1], [7], [8], [9]:

- **Modelos estructurales:** Una descripción estructural organiza el modelo basándose en la topología del sistema y en su estructura física. Es fácil de usar, ya que se basa en conectar los dispositivos como en el sistema real. Con esta estrategia los sistemas se visualizan usando imágenes o símbolos que hacen referencia a las componentes del sistema. Hoy en día existen muchos paquetes de software estructural como SimPower, SimMechanics o PSIM donde el usuario debe elegir entre los componentes disponibles y arrastrarlos a su modelo siguiendo una arquitectura adecuada. Este tipo de modelos se usan sobre todo para el diseño, concepción y análisis del sistema, y usan solucionadores de gran alcance para simular de forma eficiente sistemas complejos. El modelo como tal está oculto (implícito). El método Bond Graph, que se expondrá en el siguiente apartado, es una descripción gráfica estructural.
- **Modelos funcionales:** La descripción funcional se centra en las funciones del sistema y está orientada hacia el diseño de control. Está caracterizado por funciones matemáticas interconectadas, cada una asociada a su dispositivo físico. Por esta razón, se pierde la visión física del sistema que caracteriza el enfoque estructural, pero el análisis del mismo se hace más fácil. Aquí el modelo sí es visible (explícito). Estos modelos son más generales que los estructurales y se pueden usar numerosos softwares matemáticos como Modelica o Matlab con su herramienta gráfica Simulink (con la que está realizada la parte de simulación de este trabajo). La Representación macroscópica energética (EMR), es una descripción gráfica funcional que permite encontrar de manera sistemática los esquemas de control para sistemas energéticos complejos. El enfoque funcional pone de relieve las limitaciones holísticas de las que se ha hablado anteriormente.

Estas son las dos grandes categorías en las que se asignan las distintas estrategias de modelado de sistemas electromecánicos. Ambas descripciones se pueden usar para simular vehículos eléctricos (principal simulación de este trabajo), pero en el capítulo 5 se expondrá por qué se sigue un modelo funcional como es la técnica EMR.

La causalidad del sistema es la relación física entre la causa y el efecto, y como ya se ha mencionado previamente es necesario diferenciar entre modelos causales y no causales.



- **Modelos causales:** Un modelo causal es un modelo que utiliza el principio de causa y efecto para describir el comportamiento del sistema. La energía acumulada en el interior del sistema no puede cambiar instantáneamente, sino que hay un retardo entre la entrada y la salida para pasar de un estado estacionario a otro. Este comportamiento transitorio está representado por una integración. En estos modelos algunos dispositivos tienen las entradas y las salidas fijas, lo que puede llevar a problemas de asociación entre los debidos componentes.
- **Modelos no causales:** En estos modelos no se tiene en cuenta la causalidad de los sistemas. Las entradas y salidas no son fijas, y sus valores pueden ser elegidos en base a la asociación entre componentes, por esta razón se utilizan a menudo con un software estructural.

Una vez que el sistema ha sido modelado y listo para la simulación, en este tipo de sistemas complejos suelen aparecer muchos problemas tales como tiempos de simulación enormes, no linealidades o diversos tipos de inestabilidades y picos (aun reduciendo el paso de simulación) [6]. Para no perder mucho tiempo depurando esta simulación lo mejor que se puede hacer es volver al modelo e introducir una etapa intermedia entre el modelado y la simulación. Esta será una etapa de representación o descripción gráfica, para organizar el modelo buscando resaltar unas propiedades determinadas, en este caso respetando las propiedades físicas y los flujos de energía. Esta etapa es de vital importancia ya que una representación precisa, conlleva un gran impacto en la exactitud de la simulación (tiempos de simulación, estabilidad, etc.).

Así definimos el concepto de formalismo de modelado, como la organización de las ideas, conceptos o modelos de acuerdo a unas reglas y convenciones específicas [1]. Básicamente, un formalismo es una forma determinada de organizar el modelo, ya que éste se puede organizar de múltiples formas. Cada formalismo de modelado tiene su propia filosofía, nociones de representación y reglas de optimización. El objetivo final es la gestión de toda la energía del sistema, lo que significa el control de los subsistemas y la supervisión del sistema globalmente.



2.3 Formalismos de modelado para la gestión de la energía.

A continuación se estudiarán los principales formalismos de modelados tradicionales hasta llegar a la técnica más novedosa que es el EMR. En este trabajo solo se analizan aquellos formalismos relacionados con la gestión y dirección de la energía.

2.3.1 Formalismos tradicionales matemáticos.

Los enfoques tradicionales comienzan a partir de un modelado matemático siguiendo las leyes de la física que rigen los componentes del sistema. Es decir, se busca una forma de representar las diversas ecuaciones matemáticas siguiendo la asociación de los respectivos componentes [5], [1].

Modelo de estado: Para sistemas complejos, es usual usar el llamado formalismo de estado. Este formalismo proporciona una descripción funcional que representa una organización específica de las relaciones matemáticas. De esta forma se consigue resaltar las variables de estado del sistema, es decir, las variables que hacen de relación entre entradas y salidas, y que al estar asociadas con la energía gobiernan su comportamiento dinámico. Además, al expresar las variables de estado como una consecuencia de las entradas, también proporciona una descripción causal. Este formalismo de estado es muy útil para resaltar las propiedades del sistema, como la dinámica o estabilidad. Su principal ventaja es que el sistema se considera como una entidad completa y que todos los acoplamientos se tienen en cuenta. El inconveniente de este formalismo es que los subsistemas desaparecen, a la par que hay un alto nivel de abstracción de la realidad física de los dispositivos y un cierto nivel de subjetividad por parte del modelador al implementarlo.

Función de transferencia: Para entender y visualizar mejor el sistema a menudo se usan diagramas de bloques. La representación por función de transferencia se basa en la transformada de Laplace. Con dicha herramienta matemática se manipula de forma sencilla la relación entre variables, representando las ecuaciones diferenciales con el fin de estudiar las interacciones y desarrollos de los subsistemas. La noción de variable de estado no es tan importante, pero sigue estando muy presente la causalidad, y a diferencia de la representación de estado está más relacionada con los enfoques locales de cada subsistema que con el sistema como un todo. Cabe destacar que existen relaciones para pasar de modelo de estado a función de transferencia y viceversa, siendo solo válido para sistemas



lineales continuos. El inconveniente es que no hay ninguna regla definida para verificar la coherencia del modelo respecto al sistema que se está modelando, por lo que tienden a ser usados en sistemas en los que el usuario tiene experiencia.

A pesar de que los formalismos tradicionales se han utilizado con éxito para describir y modelar sistemas “monofísicos” conocidos, tienen limitaciones cuando se enfrentan a los nuevos sistemas “multifísicos” donde entran en juego distintas ramas de la ingeniería como por ejemplo los vehículos eléctricos.

2.3.2 Formalismos Gráficos.

Los formalismos gráficos fueron desarrollados para superar las limitaciones mencionadas anteriormente, y poder estructurar de una forma más óptima sistemas complejos. Además su faceta gráfica, como también se explicó previamente, tiene una importancia vital previa a la simulación, pues soluciona muchos problemas y ayuda a comprender mejor el sistema y los flujos de energía que en él se producen. En algunos casos la importancia es aún mayor pues es el medio de diseño de leyes de control, como se verá posteriormente con el EMR [4].

En la mayoría de los casos los modelos utilizan una combinación de dos variables diferentes para describir un flujo de energía [7]. Dichas variables se denominan de forma distinta según la estrategia que estemos utilizando, por ejemplo acción y reacción (EMR), o flujo y esfuerzo (Bond Graph). Un gran número de sistemas de diferentes dominios pueden ser descritos por la conexión de este tipo de variables (Ver Tabla1). El producto de estas dos variables indica el flujo de energía intercambiado.

Tabla 1. Pares de variables usadas para describir flujos de energía [7].

Mechanical	Force (F)	Velocity (v)
	Torque (Γ)	Angular velocity (ω)
Electrical	Voltage (V)	Current (i)
Hydraulic	Pressure (p)	Volume flow rate (dq/dt)
Thermal	Temperature (T)	Entropy change rate (ds/dt)
	Pressure (p)	Volume change rate (dV/dt)
Chemical	Chemical potential (μ)	Mole flow rate (dN/dT)
	Enthalpy of Formation (h)	Mass flow rate (dm/dt)
Magnetic	Magneto-motive force (m_m)	Magnetic flux (Φ)



2.3.2.1 Bond Graph

En los años 1940 y 1950 Henry Paynter del MIT (Massachusetts Institute of Technology), trabajó en proyectos de ingeniería interdisciplinarios tales como plantas hidroeléctricas o computación analógica y digital [10]. A través de esta experiencia observó que las ecuaciones de dichos sistemas dinámicos son similares en una gran variedad de dominios (por ejemplo dominio eléctrico, mecánico y fluidos), dicho de otra forma que estos sistemas son análogos.

De esta forma el método Bond Graph fue desarrollado en la década de 1960 para organizar el flujo de potencia en los sistemas de energía [11], [12]. Es un potente y unificado formalismo para describir sistemas multifísicos, donde los puertos de energía de los componentes están conectados por enlaces que especifican la transferencia de energía entre ellos. Estos enlaces que tienen forma de flechas (Ver figura 1) indican la dirección de esta transferencia de energía.

En esta terminología existen cuatro tipos de señales: Señales de esfuerzo, de flujo, de esfuerzo integrado y de flujo integrado. La tabla 2 recoge ejemplos de estas señales en cuatro dominios de la ingeniería. Una idea clave de este método es que el producto de las señales de esfuerzo y flujo es igual a la potencia transmitida, es decir, esfuerzo x flujo = potencia.

Tabla 2: Señales análogas de BG en distintos dominios ingenieriles [10].

Bond Graph	Translation	Rotation	Electrical	Hydraulic
Effort e	Force F N	Torque τ N-m	Voltage V V	Pressure P Pa
Flow f	Velocity v m/s	Angular velocity Ω rad/s	Current I A	Flow Q m ³ /s
Integrated effort $p = \int e dt$	Momentum p kg-m/s	Angular momentum h kg-m ² /s	Lines of flux λ V-s	Momentum per unit area p kg-m/s
Integrated flow $q = \int f dt$	Position x m	Angle θ rad	Charge q C	Volume V m ³

El método Bond Graph consta de una serie de elementos básicos [1], [5], como elementos disipativos (R, elemento de resistencia), elementos de almacenamiento de energía (C como condensador o L como inductancia), fuentes (Se o Sf fuente de tensión o corriente ideal respectivamente) y elementos de conversión (TF transformador o GY girador donde cambia

la naturaleza de las variables). La estructura del sistema se define mediante uniones básicas: 0 es una función de esfuerzo común (como una conexión en paralelo de un voltaje común a varias ramas) y 1 es una función de flujo común (conexión en serie con una corriente común).

Las flechas horizontales indican el flujo de potencia y las verticales la causalidad que puede ser tanto integral como derivada.

En este método se permite la causalidad derivativa ya que muchas propiedades físicas se pueden derivar.

La Figura 1 es un ejemplo de la técnica Bond Graph aplicada a las relaciones de la máquina de corriente continua [5]. Se observa que hay dos elementos de almacenamiento de energía cinética a través de la inductancia L y la constante de inercia J y también dos elementos de disipación, la resistencia del inducido R y la fricción viscosa f. El gráfico no solo informa sobre el intercambio de energía entre los componentes del sistema, sino también su intercambio con el medio ambiente (disipación de energía).

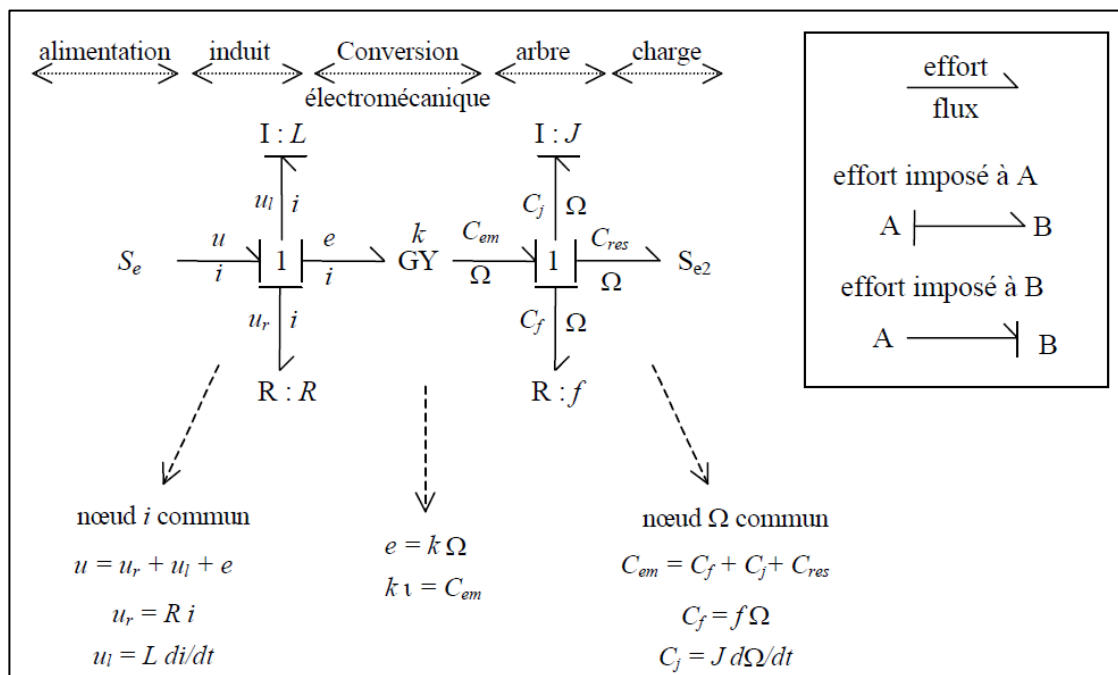


Figura 1: Modelado una máquina de corriente continua con un gráfico Bond Graph [5]

Existen muchas herramientas software que van más allá de los softwares de diagramas de bloques tradicionales [10], pues incluyen la generación de representaciones simbólicas,



identificación paramétrica y la capacidad de producir simulaciones, así como otras ayudas de diseño.

Sin embargo como los componentes están localizados y la topología se acerca más al sistema físico, Bond Graph es un método estructural [5] y se ha desarrollado para el diseño y modelado de sistemas, sin el objetivo de entrar en la parte de control. Además la causalidad derivativa genera problemas, ya que aunque el software la admite el tiempo de cálculo está condicionado a la solución de esta derivada, que no es natural.

Este tipo de representación se encuentra principalmente en el campo de la mecánica. Si se tiene interés en la técnica, existen libros dedicados exclusivamente a su análisis [13].

2.3.2.2 Causal Ordering Graph

El gráfico de ordenamiento causal (COG) es un formalismo gráfico desarrollado en la década de 1990 con el que se puede describir un sistema desde un enfoque funcional y causal [14], [15].

Con este gráfico las entradas y salidas de cada dispositivo se definen por su propia causalidad [4] y por su asociación con otros dispositivos, proporcionando una visión global más sintética. En este método solo se acepta la causalidad física (causalidad integral) y no la derivativa [7]. Tras la representación gráfica es posible deducir fácilmente una metodología de control basada en la inversión, siguiendo una serie de especificaciones que se explicarán posteriormente. Estas especificaciones se basan en buscar la variable de entrada adecuada para una determinada salida.

La construcción de un COG se basa en el estricto cumplimiento del principio de causalidad de los sistemas físicos [5]. Los dispositivos físicos (subsistemas) se caracterizan por una relación de entrada-salida, representados por un “procesador” (elemento virtual con forma de burbuja). Las relaciones utilizadas se clasifican en dos categorías: las relaciones rígidas y las relaciones causales (Ver Figura 3). Los principales elementos del COG se presentan a continuación (Ver Figura 2).


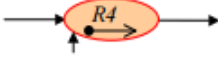
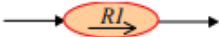
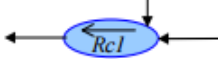
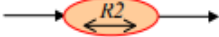


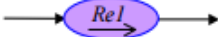
	Kinetic or potential variable		sequential processor
	Causal processor (energy storage)		indirect inversion (closed-loop control)
	Rigid processor (dissipation or operation)		Direct inversion (open-loop control)
	gyrator or modulator (conversion without loss)		estimation or sensor (causal in that case)

Figura 2: Principales elementos del COG [16]

Se llama relación rígida cuando la relación entrada-salida es independiente del tiempo, y a priori no hay causa y efecto. La representación elegida para esta relación consta de una doble flecha en su interior caracterizando su naturaleza reversible. En estos casos la causalidad es externa, impuesta por los otros dispositivos a los que esté conectado.

Una relación será causal cuando la relación entrada-salida depende del tiempo. Estas entradas y salidas se corresponderán respectivamente con la causa y el efecto.

La causalidad natural para sistemas físicos es la causalidad integral, inducida por acumulación de energía (concepto de variable de estado). La representación en este caso tiene una sola flecha y caracteriza el carácter irreversible de la causalidad interna, independiente de la interconexión entre los objetos del sistema. Estos dispositivos son los que imponen la causalidad a aquellos caracterizados por relaciones rígidas.

Cada entidad física se describe mediante la concatenación de procesadores. Existen diversas normas para la construcción del COG de un sistema y se pueden concatenar varias relaciones físicas en un solo procesador con el fin de mejorar la legibilidad del gráfico. Este método consigue una representación global simplificada y homogénea del proceso y de su control, independientemente de la naturaleza de la relación que caracteriza cada dispositivo (no lineal, no estacionarias, discreta, secuencial...). Las variables al igual que en el Bond Graph son o bien de naturaleza potencial (equivalente al esfuerzo) o de naturaleza cinética (equivalente al flujo), y también existen elementos giradores y moduladores (transformador en Bond Graph).

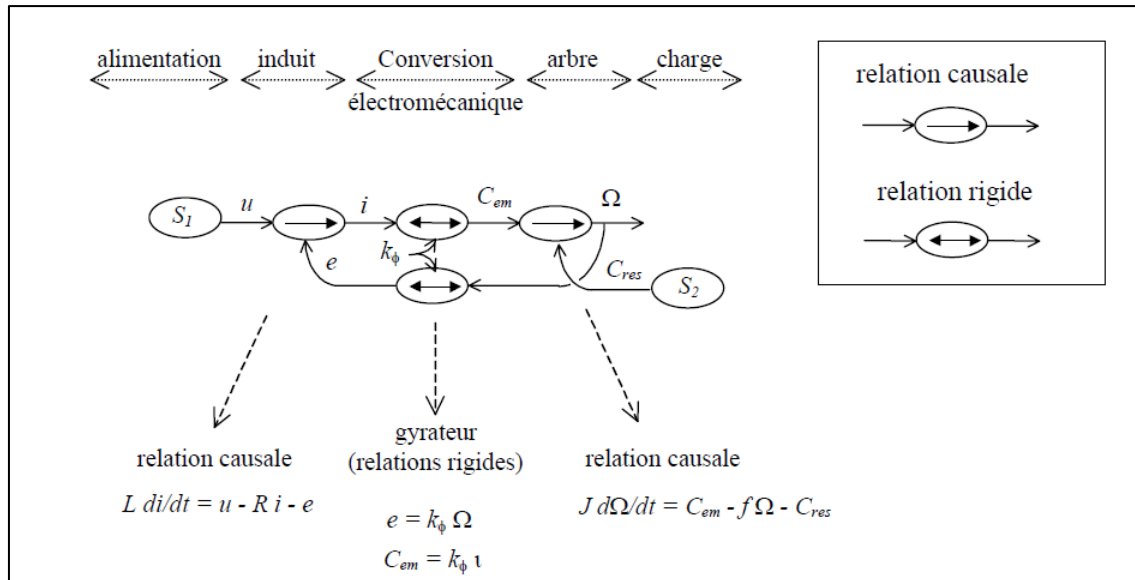


Figura 3: Causal Ordering Graph de una máquina de corriente continua [5]

En la Figura 3 se da un ejemplo de aplicación del COG para una máquina de corriente continua, como ya se hizo en el apartado anterior. En comparación con el Bond Graph, ya no se indica la dirección de la transferencia de potencia, por lo que se supone una posible reversibilidad de energía. Otra diferencia a observar son los circuitos de retroalimentación que aparecen entre los componentes del sistema, cosa que no ocurría en el Bond-Graph. Sin embargo, las operaciones de energía (tipo de almacenamiento y disipación) no se explican de manera clara, y la naturaleza de las variables (potenciales o cinética) no se explica y dependen del conocimiento intrínseco del modelador.

Esta técnica es utilizada para el modelado y control de convertidores estáticos, maquinaria eléctrica, actuadores piezoeléctricos etc. Si se quiere aumentar los conocimientos o ahondar más en la metodología de control de esta técnica existen muchos artículos donde se realizan estudios más complejos [17].



2.3.3 Evaluación de los diversos formalismos.

El interés y validez de los enfoques matemáticos tradicionales para el estudio de sistemas simples está más que demostrado. En el pasado se hicieron muchos trabajos con estas herramientas proporcionando reglas de análisis y estudios sobre los casos más variados, con la ventaja de obtener información tanto cualitativa como cuantitativa [5].

En el caso de sistemas heterogéneos más complejos es más interesante usar formalismos gráficos, que reflejen de una forma más sencilla el intercambio de energía entre sus componentes. Estos formalismos aportan información cualitativa de gran interés para comprender mejor el sistema en un primer estudio antes de simularlo. Con el Bond Graph se ponen en evidencia las conversiones y transferencias de energía, mientras que el COG es más una herramienta de control.

Tras el análisis global del sistema, de sus flujos de energía y sus cadenas de causa y efecto se puede recurrir a herramientas más tradicionales para explotar también la parte cuantitativa de la información. Estos enfoques que son complementarios e inseparables para el análisis completo de un sistema, buscan un alto grado de finura en sus modelaciones y constituyen la base de la metodología EMR (Energetic Macroscopic Representation).



Capítulo 3

EMR. Representación Macroscópica Energética.

Para cumplir con las nuevas exigencias del estudio de los sistemas electromecánicos más complejos y poner de relieve sus propiedades energéticas, se desarrolló una nueva representación sintética. Esta herramienta no pretende sustituir a otras convencionales, sino más bien complementarlas aportando una visión global de acuerdo con el enfoque sistémico [5].

La representación energética macroscópica se desarrolló en el año 2000 con el objetivo de avanzar en la investigación de este tipo de sistemas, especialmente en los sistemas multi-unidades aportando un control válido para estos sistemas que mezclan conocimientos y componentes de varios campos científicos. Desde el año 2002 se ha usado como herramienta gráfica para enseñar “drive control”, es decir, accionamientos eléctricos en países como Francia Canadá y Suiza [18], [19]. Como se verá a continuación es una herramienta muy útil pues ayuda a entender mejor el sistema, aporta una organización concreta de un modelo dado y puede proporcionar su control mediante mecanismos de inversión relativamente sencillos.

Al desarrollar esta técnica se distinguen dos partes claras: La etapa de modelado y la etapa de control. Es por ello que se ha decidido estructurar así el capítulo.

3.1 Etapa de modelado

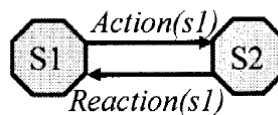
El EMR comparte con el COG nociones básicas para su desarrollo (como el principio de causalidad), pero como se va a demostrar, entre las ventajas de esta técnica encontramos que los elementos son mucho más visuales y representativos.

3.1.1 Principios básicos.

El EMR respeta las reglas de dos principios básicos: El principio de interacción y el principio de causalidad.

- **Principio de Interacción (Acción-Reacción):** Se basa en que el sistema está dividido en subsistemas que interactúan entre sí y con el medio ambiente. Es decir, cualquier acción de un subsistema sobre otro o sobre el medio ambiente induce una reacción de éste sobre el primero. Todos los elementos están conectados de acuerdo a este principio usando variables de intercambio (flechas), siendo el producto de dichas variables de acción-reacción la potencia instantánea intercambiada [18] (Ver figura 4).

Un ejemplo claro es cuando un generador de tensión alimenta a una carga pasiva y ésta induce un flujo de corriente entre los dos elementos. La potencia será el producto de dicha corriente por la tensión.



$$\text{Power} = \text{Action} \times \text{Reaction}$$

Figura 4: Principio de Interacción [20]

- **Principio de Causalidad:** Al igual que en COG la única causalidad permitida es la causalidad integral, lo que quiere decir que la salida de un subsistema con dependencia temporal (elemento de acumulación de energía) será una función integral de la entrada o una relación directa causa-efecto si no depende del tiempo (Ver figura 5).

En este método no se permite la causalidad derivativa, es decir, la salida del subsistema no puede ser una derivada de la entrada. El motivo es que la derivada de una función implica tener conocimiento de sus futuras evoluciones lo cual no es un proceso natural y es por ello que no está permitido en el EMR. En otras técnicas como el Bond Graph si se permite este tipo de causalidad por ser un poco tedioso expresar todos los elementos acorde a la causalidad integral, pero da lugar a tiempos de computación muy grandes [20].

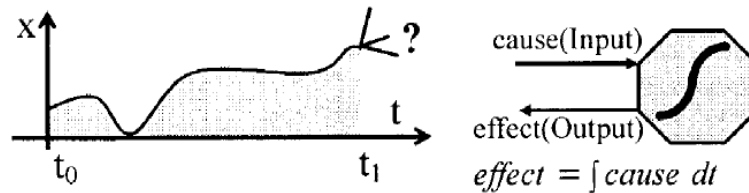


Figura 5: Principio de Causalidad Integral [20]

3.1.2 Tipos de elementos.

El EMR es una descripción gráfica de un sistema de conversión de energía. Por ello los diversos elementos serán descritos con símbolos específicos conectados por flechas que simbolizan sus intercambios de energía [5]. Para que sea una aplicación válida en sistemas complejos, será necesario tener una serie de elementos definidos a la perfección, pues esta técnica en su conjunto debe permitir localizar rápidamente las partes clave del sistema.

Los principales elementos se definen a continuación [7], [21], [22] y se representan con su simbología pertinente (Ver figura 7):

- **Fuentes de energía:** No son solo generadores sino también elementos que hacen de conexión del sistema a su entorno. A través de estos elementos, los flujos de energía pueden entrar y salir del sistema. Están representados por un óvalo de color verde claro con el borde más oscuro.
- **Elementos de conversión:** Estos elementos calculan todo tipo de conversiones, y se pueden dividir en dos tipos: los que establecen conversiones sin variar la naturaleza de la variable y los que establecen conversiones entre distintos campos. Un ejemplo ideal para los del primer tipo (conversión del mismo dominio energético) sería un transformador, y un elemento de calentamiento sería ejemplo del segundo tipo (dominio eléctrico a térmico). Su representación varía según el tipo de conversión, pero es un polígono naranja con borde rojo (cuadrado para eléctrica, triangular para mecánica o circular para electromecánica). Pueden incorporar un parámetro de ajuste que defina dicha conversión.

- Elementos de acoplamiento o distribución:** Estos elementos se usan para describir el acoplamiento o distribución de dos o más flujos o corrientes de energía (Ver figura 6). Pueden llevar un parámetro de ajuste para regular en qué medida se distribuyen dichos flujos. Se representa con dos polígonos naranjas solapados con el borde rojo.

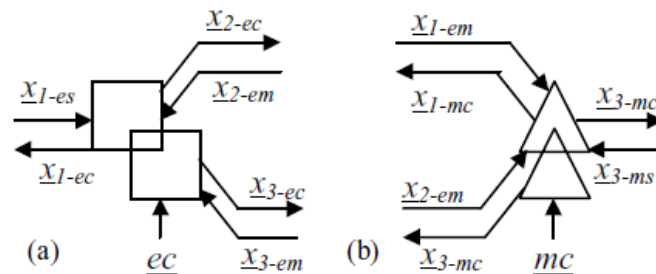


Figura 6: Elementos de (a) distribución y (b) acoplamiento [23].

- Elementos de acumulación:** Sirven para representar el almacenamiento de energía, sin haber ninguna diferencia si ésta tiene carácter potencial o cinético. Es el único elemento capaz de representar el comportamiento provocado por la dependencia temporal. Solo se pueden representar dependencias de tiempo de carácter integral, para respetar el principio de causalidad y su símbolo es un rectángulo naranja con una recta atravesada.

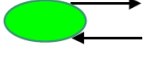


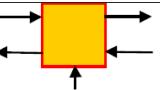
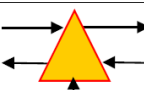
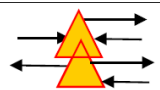
	Source of energy		Element with energy accumulation		Electromechanical converter (without energy accumulation)
	Electrical converter (without energy accumulation)		Mechanical converter (without energy accumulation)		Mechanical coupling device (energy distribution)

Figura 7: Elementos básicos de modelado del EMR [18].

3.2 Etapa de control. MCS “Maximum Control Structure”.

Como ya se ha dicho, la metodología EMR está orientada al control de sistemas complejos. La estructura de control se deduce directamente de dicho EMR usando reglas de inversión, que llevan a localizar los puntos del sistema en los que hacen falta sensores o reguladores. Esta estructura de control se denomina MCS (Maximum Control Structure) porque establece un número máximo de operaciones de mediciones y control. Posteriormente en una segunda etapa hay que elegir de qué tipo serán dichos reguladores y ajustarlos debidamente [18].

Esta metodología requiere la inversión de todos los elementos del sistema, bloque a bloque, sin necesidad de hallar una función de transferencia global. En algunos casos particulares también se pueden incluir diversas estrategias para optimizar el control [7].

3.2.1 Principio de Inversión.

La estructura de control llevada a cabo es un modelo de inversión del sistema estudiado, por lo que ahora la información fluye de derecha a izquierda y no de izquierda a derecha como antes. Este principio se basa en que el control tiene que definir la entrada apropiada que aplicar al sistema para producir la salida deseada, y se aplica a todos y cada uno de los subsistemas (Ver figura 8).

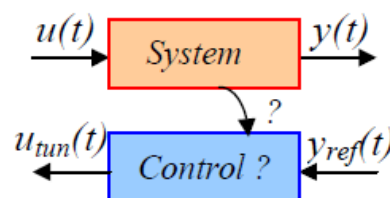


Figura 8: Principio de inversión [19]



Para definir la estructura de control es necesario encontrar un algoritmo adecuado y las mediciones que hacer en el sistema. Existen tres reglas básicas de inversión [15]:

- **Entrada única con relación rígida:** En este caso se puede invertir directamente la relación entre las variables. Por ejemplo:

$$y(t) = ku(t) \rightarrow u_{tun}(t) = \frac{1}{K} y_{ref}(t)$$

- **Múltiples entradas y relación rígida:** En este caso se debe elegir una entrada sobre la que actuar para imponer una determinada salida. Las otras entradas deberán ser medidas o estimadas.

$$y(t) = u_1(t) + u_2(t) \rightarrow u_{1tun}(t) = y_{ref}(t) - u_{2mes}(t)$$

- **Entrada única con relación causal:** Si esta relación se invierte directamente el resultado es una función derivada, que no está permitida al no ser causalidad física. Para solucionar este problema lo que se hace es una inversión indirecta usando un regulador (depende del caso habrá que usar distintos tipos de reguladores). En el ejemplo se usa un regulador de tipo P con ganancia K_p .

$$y(t) = \int u(t)dt + y(0) \rightarrow u_{tun}(t) = K_p [y_{ref}(t) - y_{mes}(t)]$$

La gran mayoría de las relaciones existentes se pueden descomponer en estas tres relaciones básicas. Para casos con no linealidades, o que no estén bien definidas las relaciones entre las variables, también pueden usarse reguladores.

3.2.2 Inversión de los distintos elementos.

Al igual que en la etapa de modelado, los elementos de control tienen una estructura y simbología concreta que se muestra a continuación (Ver figura 11). En primer lugar hay que definir una cadena de acción (control), que es una sucesión de variables que enlazan la variable que nos interese imponer al control (líneas amarillas Figura 9). Con la ayuda de un ejemplo gráfico se va a explicar la inversión de los distintos elementos [7]:

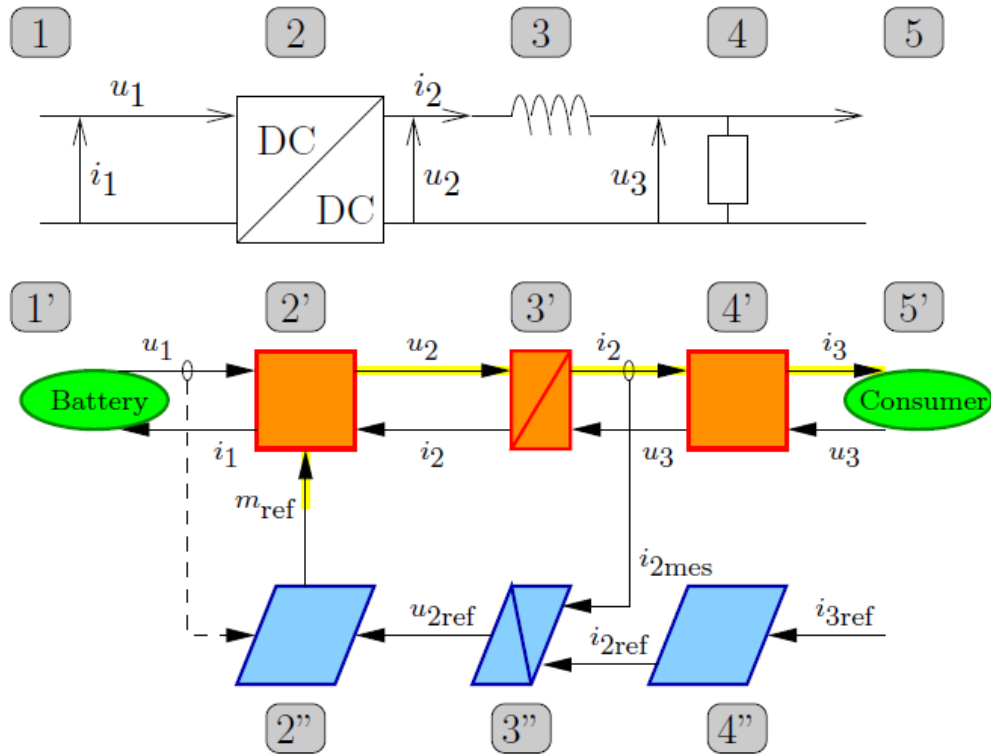


Figura 9: Ejemplo de una carga R-L. Esquema eléctrico, EMR y MCS [7].

- **Inversión de fuentes:** Los elementos fuentes no se invierten. Se corresponde a los elementos 1 y 5 de la Figura 9.
- **Inversión de elementos de conversión:** Estos elementos se pueden invertir directamente invirtiendo matemáticamente la función que relaciona las distintas variables. De la Figura 9 serían los elementos 2'' y 4''. En algunos se puede necesitar un parámetro extra de conversión en función de la cadena de control. Están representados con un paralelogramo de color azul claro con el borde oscuro.
- **Inversión de elementos de acoplamiento o distribución:** La inversión de los elementos de acoplamiento da lugar a elementos de distribución en la estructura de control. Esta inversión tiene el problema de tener varias entradas que conllevan la evolución de una sola salida. Por ello en la etapa de control será necesario una

entrada extra para definir el criterio de repartición deseado de los flujos de energía entre las salidas (entradas en la etapa de modelado).

El problema de invertir un elemento de distribución es justo el contrario, hay que ser capaz de controlar la evolución de múltiples salidas desde una sola entrada. Estos elementos en la etapa de control se vuelven elementos de acoplamiento (varias entradas, una salida) y de nuevo se añade una entrada extra que es un criterio de ponderación para indicar que entrada influye más en la salida. Para verlo más claro se pone un ejemplo [23] en la Figura 10.

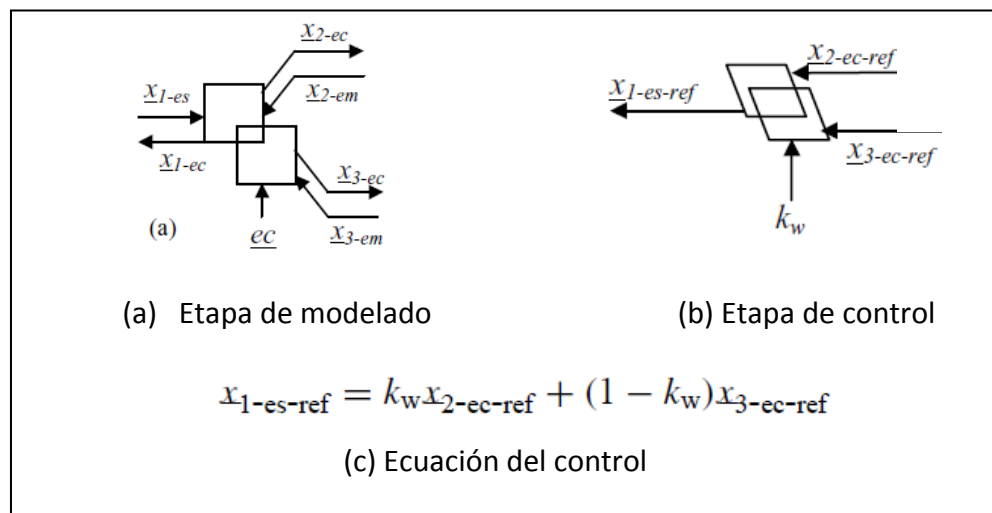


Figura 10: Modelado y control de un elemento de distribución.

Como se observa la entrada k_w es un criterio de ponderación. Si vale 1 ó 0 la salida solo será función de una de las entradas mientras que si su valor fuese de 0.5 éstas tendrían exactamente la misma influencia.

Estos elementos se representan con una pareja de paralelogramos azules superpuestos.

- **Inversión de elementos de acumulación:** Los elementos de acumulación no se pueden invertir directamente respetando la causalidad integral, por lo que habrá que usar un regulador. Con este método se puede deducir en que parte del esquema de control es necesario introducir un regulador, pero no de que tipo será éste, aspecto que ya queda a decisión del usuario. Al ajustar los parámetros del regulador hay que intentar que el valor medido y el de referencia (entradas al bloque) sean iguales. En la Figura 9 se puede observar la inversión de un elemento

de acumulación (elemento 3"). Se representan con un rectángulo azul con borde oscuro y una línea recta diagonal.

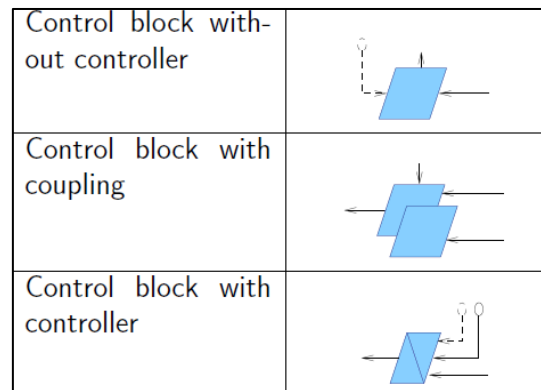


Figura 11: Elementos de control MCS [7].

De esta forma el MCS establece un número máximo de elementos de control y reguladores. Pero uno de los principales supuestos de esta estructura de control es que todas las variables se consideran como medibles en un primer paso y eso no es siempre así [7], [15]. Es por ello que en algunos casos es conveniente derivar de la MCS un segundo paso llamado PCS (*“Practical Control Structure”*) donde poder solucionar estos problemas de variables no medibles mediante simplificaciones y estimaciones. También es muy recomendable esta estructura práctica de control cuando existen tiempos de computación grandes y se necesita reorganizar mejor el modelo para reducirlos.

- **Elementos estratégicos:** En algunas ocasiones se podrá reducir la cadena de control para obtener la variable deseada. Esto es posible mediante los llamados elementos de estrategia de control, que tienen en su interior una función estacionaria. Se representan con un paralelogramo de color azul oscuro (Ver figura 12).
- **Elementos de estimación:** Si los valores representados en el MCS no son medibles (sea por razones físicas o económicas) será necesario realizar estimaciones mediante la medición de otro elemento más sencillo en la estructura de control. Se representa con un paralelogramo morado.

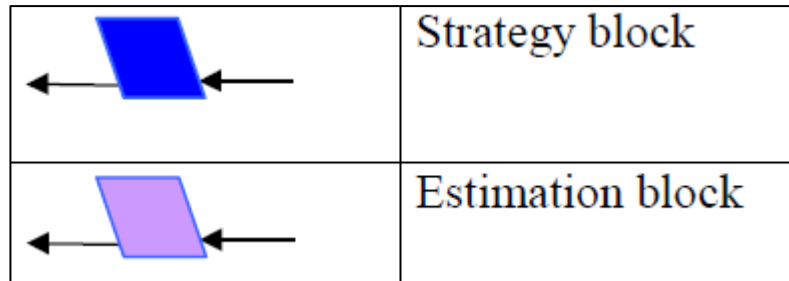


Figura 12: Elementos de estrategia y estimación [19].

El desarrollo de esta metodología de control está ligado a la causalidad física del sistema, respetando sus principios invirtiendo los elementos uno a uno. También será necesario tener en cuenta otros aspectos más globales y limitaciones que variarán según el caso de estudio para lograr controlar el sistema como un todo.

Por último es necesario mencionar que esta técnica saca a relucir los grados de libertad del sistema, por ejemplo, las distintas maneras de repartir los flujos de energía en los elementos de distribución. Esta es una ventaja fundamental, ya que a simple vista estos grados de libertad son difíciles de detectar si no eres una mente experta en las distintas materias, y de esta forma salen a relucir naturalmente [24]. De esta forma al identificar los grados de libertad del sistema, se pueden trazar diferentes estrategias de control buscando resaltar diferentes aspectos y propiedades del sistema.

3.3 Revisión Crítica

Como ya se ha expuesto, los formalismos gráficos pueden ser de gran utilidad a la hora de modelar adecuadamente sistemas electromecánicos de cualquier tipo. Estos formalismos siguen una serie de reglas que ayudan al usuario a respetar las propiedades físicas de los sistemas, dando una descripción unificada de estos.

El Bond Graph es un método estructural que carece de metodología de control. Causal Ordering Graph está más enfocado al control, dejando un poco de lado la representación física del sistema. El EMR por el contrario, es al mismo tiempo una representación funcional y estructural del sistema (con sus propios elementos) que cuenta con una metodología de control. Se rige por los principios básicos de causalidad, interacción y distribución de la



energía, y está claramente orientada al control siguiendo el principio de inversión. Se puede ver la comparación entre dichos formalismos de una forma más visual en la Tabla 3.

Tabla 3: Resumen de las características de los diferentes formalismos.

Metodología	Bond Graph	COG	EMR
Dominios	Múltiples	Múltiples	Múltiples
Causalidad física	Usualmente	Siempre	Siempre
Acción-reacción	Sí	No	Sí
Modelo	Estructural	Funcional	Funcional- Estructural
Visualización	Gráfica	Gráfica	Gráfica
Software	20-sim	Matlab-Simulink	Matlab-Simulink
Control	Función de transferencia global.	Sí. Inversión	Sí. Inversión

Se observa claramente que la metodología EMR es la más potente y completa de todas, especialmente por su dualidad funcional-estructural y por contar con una metodología de control asociada a su técnica. En los dos siguientes capítulos se van a llevar a cabo unas simulaciones para comprobar todo lo expuesto hasta ahora de una manera práctica, y comprobar así la validez de su metodología.

Capítulo 4

Modelado y simulación de la transmisión de un embrague.

4.1 Introducción.

El objetivo de este capítulo es tener una primera toma de contacto con la técnica EMR y llevar a cabo una sencilla simulación desarrollando un modelo de embrague, en este caso de un coche híbrido [25]. Este capítulo solo va a incidir en la parte de modelado del EMR, entendiendo como funcionan los componentes, valorando sus características gráficas, observando cómo funciona el sistema y determinando si su comportamiento es el adecuado. En este capítulo no se va a realizar la etapa de MCS para controlar el sistema, que se hará de una forma detallada en el capítulo 5 con una simulación de mayor envergadura.

Un embrague es un mecanismo que permite acoplar o desacoplar el eje de cambio de velocidades de un vehículo, permitiendo o interrumpiendo de forma voluntaria la transmisión de energía (Ver figura 13). Un elemento a priori tan sencillo no está exento de problemas a la hora de modelar, debido a que es un elemento de fricción y tiene comportamiento no lineal.

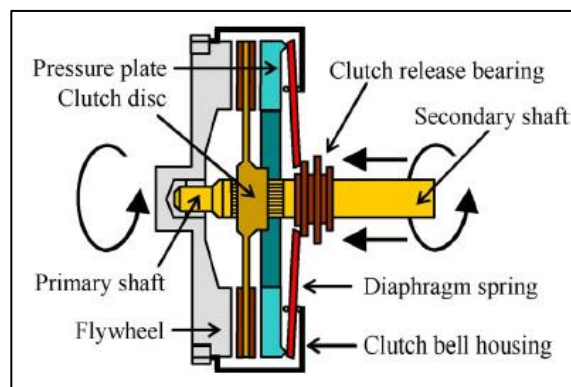


Figura 13: Embrague y componentes [25].



El embrague está dentro de los elementos llamados de fricción seca, ya que provoca interacciones entre dos superficies carentes de líquido lubricante. En un vehículo convencional permite que la energía se transmita desde el motor a las ruedas para cambiar la relación de velocidad usando la caja de cambios. Entre sus otras funciones está eliminar el consumo de energía de los componentes que se mueven cuando está accionado, reducir los esfuerzos de contacto de la caja de cambios en un cambio de relación, o eliminar parte de la vibración producida por el motor con sus amortiguadores [25], [26].

Debido al hecho de que se utilizan para conectar o desconectar partes mecánicas, las velocidades de rotación primarias y secundarias del embrague pueden ser iguales o diferentes. De esta forma definimos los dos estados que hay que tener en cuenta para modelar con alto grado de precisión un embrague: cerrado o abierto (deslizándose).

Se han llevado a cabo muchos estudios y trabajos para modelar estos sistemas, usando la técnica del Bond Graph o en su mayoría ecuaciones matemáticas y matrices de gran complejidad [27]. Estos modelos presentan las mismas ecuaciones para los dos estados del embrague, sin ningún tipo de conmutación y teniendo en cuenta dos inercias todo el tiempo (inercias de los ejes), lo cual no es del todo correcto.

Con la técnica EMR se va a modelar de manera causal, y diseñando un modelo de ecuaciones distinto según el estado del embrague. Posteriormente dichos modelos se conectarán siguiendo unos criterios necesarios para asegurar un correcto flujo de energía durante la conmutación.

4.2 Modelo de los estados del embrague.

A la hora de modelar un sistema es necesario hacer una serie de simplificaciones de la realidad. En este caso no se tiene en cuenta los amortiguadores de vibración, ni la abrasión de la placa de presión o del disco del embrague, ni cualquier efecto de la temperatura.

Como se ha expuesto previamente, un embrague tiene comportamiento no lineal y por ello se consideran dos estados diferentes. Cuando el embrague está abierto (o deslizándose) se deben tener en cuenta dos inercias, mientras que si está bloqueado (cerrado) se debe considerar una inercia equivalente (Ver figura 14).

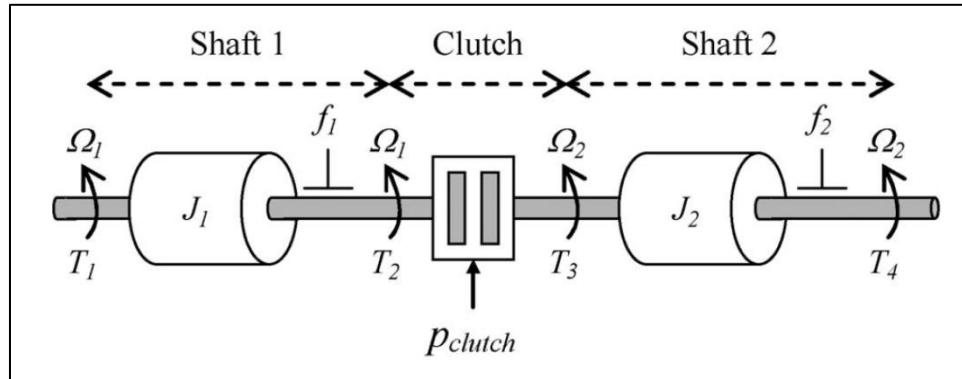


Figura 14: Esquema de la transmisión del embrague [25]

4.2.1 Modelo 1. Embrague abierto o deslizando.

Cuando el embrague está abierto, es decir, presionado, las ecuaciones diferenciales relacionan las distintas velocidades angulares y los pares de la siguiente manera:

$$J_1 \frac{d}{dt} \Omega_1 + f_1 \Omega_1 = T_1 - T_2 \quad (4.1)$$

$$J_2 \frac{d}{dt} \Omega_2 + f_2 \Omega_2 = T_3 - T_4 \quad (4.2)$$

$$T_2 = T_3 = 2F_n R_{clutch} \mu \text{sign}(\Omega_1 - \Omega_2) \quad (4.3)$$

$$F_n = F_{n_max} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{p_{clutch}}{100} - 1 \right)^2} \right] \quad (4.4)$$

$$\mu = \mu_{stat} - \alpha_{dyn} |\Omega_1 - \Omega_2| \quad (4.5)$$

Donde T_1 y T_4 son los pares de torsión al principio y final de la transmisión; T_2 y T_3 son los pares producidos por el embrague; Ω_1 y Ω_2 son las velocidades primaria y secundaria del embrague; f_1 , f_2 y J_1 , J_2 son los coeficientes de fricción y las inercias de los ejes; μ es el coeficiente de fricción del embrague; μ_{stat} es el coeficiente de fricción estática del embrague; α_{dyn} es un parámetro para el coeficiente de fricción dinámica del embrague;

R_{clutch} es el radio medio del plato de fricción del embrague; y F_n es la fuerza normal actuante.

A la hora de representar el modelo mediante el EMR (Ver figura 15) las ecuaciones (4.1) y (4.2) deberán ir colocadas dentro de un elemento de acumulación ya que tienen dependencia temporal de carácter integral. Las ecuaciones (4.3), (4.4) y (4.5) se corresponden a una conversión de energía sin acumulación (conversión de energía mecánica, por lo que se usará el triángulo).

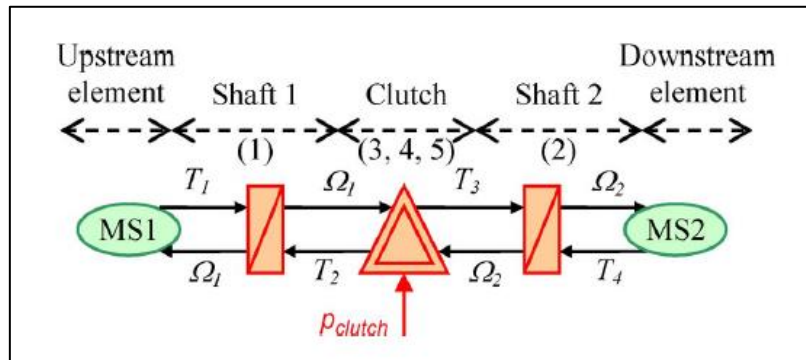


Figura 15: EMR del embrague en posición abierta (modelo 1) [25].

4.2.2 Modelo 2. Embrague bloqueado o cerrado.

Cuando el embrague está bloqueado, es decir sin presionar, el plato de fricción se acopla a los platos primario y secundario rígidamente. Por ello en esta ocasión las ecuaciones diferenciales del modelo anterior no pueden ser independientes porque ahora las velocidades Ω_1 y Ω_2 son iguales. Tenemos el siguiente sistema de ecuaciones [25]:

$$J_{lock} \frac{d}{dt} \Omega_2 + f_{lock} \Omega_2 = T_1 - T_4 \quad (4.6)$$

$$\begin{cases} f_{lock} = f_1 + f_2 \\ J_{lock} = J_1 + J_2 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\begin{cases} T_{lock} = T_1 \\ \Omega_1 = \Omega_2 \end{cases} \quad (4.8)$$

Donde f_{lock} y J_{lock} son respectivamente el coeficiente de fricción y el momento de inercia del eje equivalente.

En esta ocasión la ecuación (4.6) se corresponderá a un elemento de acumulación de energía mientras que las (4.7) y (4.8) serán un elemento convertidor de energía sin acumulación (de nuevo energía mecánica). La representación resultante se puede apreciar en la Figura 16.

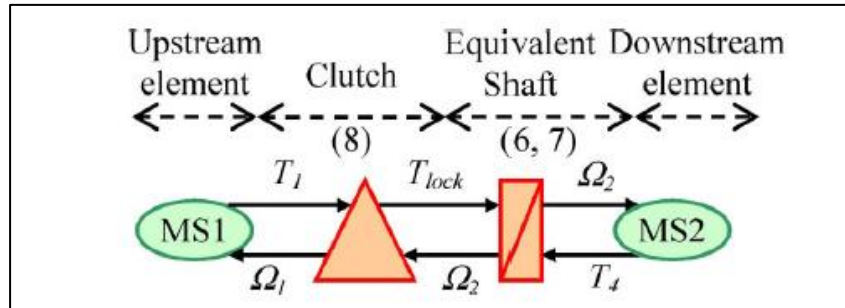


Figura 16: EMR del embrague en posición cerrada (modelo 2). [25]

4.2.3 Selector de conmutación

Es necesario definir un elemento que seleccione el modelo adecuado en función del estado del embrague. Esto se representa mediante una red de Petri en la Figura 17.

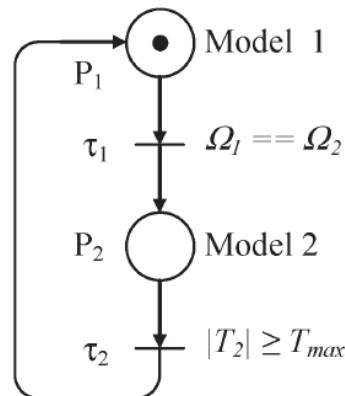


Figura 17: Red de Petri del selector de conmutación [25]

Partimos la simulación desde el modelo 2, es decir, el embrague sin presionar. El modelo 1 se activará cuando se cumpla la condición de que el par de embrague T_2 sea superior al par máximo T_{max} , definidos de la siguiente forma:

$$T_2 = T_3 = \frac{J_2 T_1 + J_1 T_4 + (J_1 f_2 - f_1 J_2) \Omega_2}{J_{lock}} \quad (4.9)$$

$$T_{max} = 2F_n R_{clutch} \mu = 2F_n R_{clutch} \mu_{stat} \quad (4.10)$$

La ecuación (4.9) es resultado de las (4.1) y (4.2) igualando las velocidades Ω_1 y Ω_2 , que es la condición para activar este modelo. Si está funcionando el modelo 1 se activará al modelo 2 cuando se hayan igualado dichas velocidades.

Ambos modelos estarán conectados con este selector, representado en la técnica EMR con su elemento correspondiente (Ver figura 18). Los modelos pueden ser conectados así porque tienen las mismas salidas y entradas (T_1 , Ω_1 y T_4 , Ω_2).

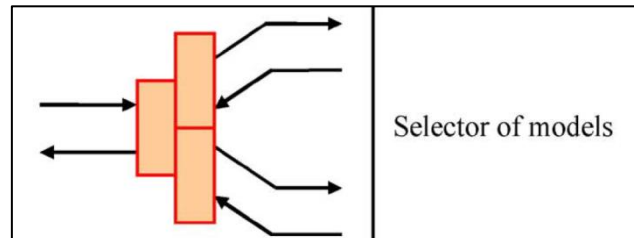


Figura 18: Elemento selector EMR [25].

4.3 Simulación y resultados.

Una vez caracterizados los dos estados del convertidor con sus debidos elementos y ecuaciones, y definido el proceso de conmutación que deberá realizar el selector obtenemos el esquema de la Figura 19 y se puede proceder a la simulación.

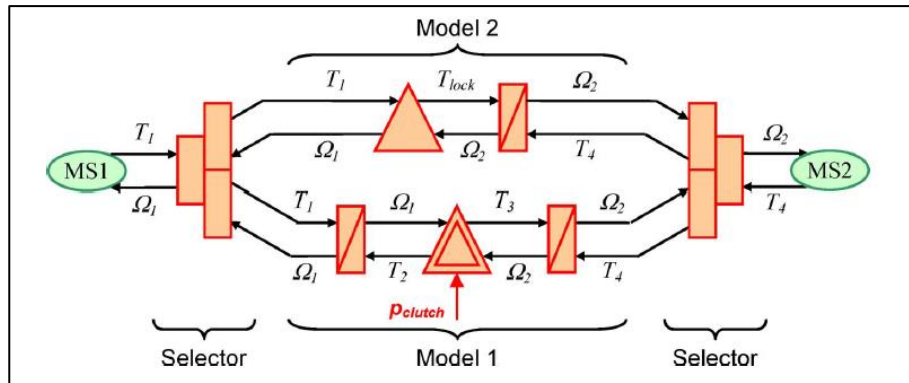


Figura 19: Esquema completo EMR del embrague [25]

En la librería proporcionada en la página web oficial de esta metodología [16] faltan algunos elementos (como el del selector), por ello al realizar la simulación en Simulink (Ver Figura 20) se han usado otros en su lugar. Este hecho por supuesto no altera el resultado de la simulación.

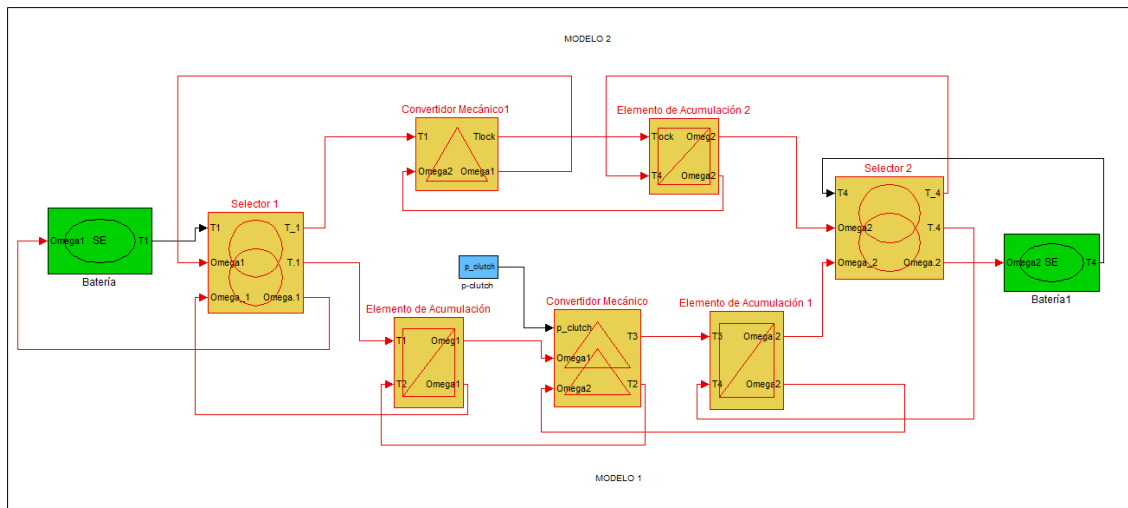


Figura 20: Modelado del Embrague en Simulink

Los parámetros para la simulación se muestran en la Tabla 4 y se va a simular un proceso de accionamiento de embrague de duración 2 segundos (Ver Figura 21).

Tabla 4: Parámetros de simulación embrague [25].

$T_1 = 40 \text{ N.m}$	$T_4 = 25 \text{ N.m}$
$J_1 = 0.2 \text{ Kg.m}^2$	$J_2 = 0.6 \text{ Kg.m}^2$
$f_1 = 10^{-3} \text{ N.m.s}$	$f_2 = 2 \times 10^{-3} \text{ N.m.s}$
$\mu_{stat} = 0.28$	$R_{clutch} = 0.1 \text{ m}$
$\alpha_{dyn} = 10^{-3} \text{ s/rad}$	$F_{n_max} = 4000 \text{ N}$

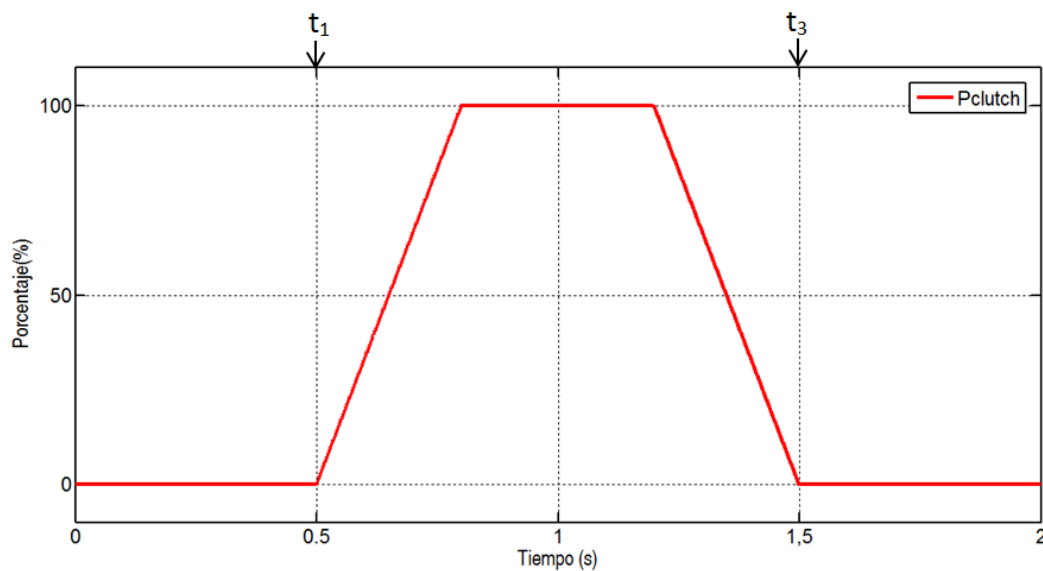


Figura 21: Posición del embrague.

Se puede ver que se ha programado de tal forma que a los 0.5 segundos se empieza a pisar el embrague, instante de tiempo conocido como t_1 . En torno a otros 0.5 segundos se encuentra presionado del todo y a los 1.5 segundos del inicio de la simulación ya no está accionado, instante de tiempo llamado t_3 .

Como la simulación empieza con el embrague sin presionar, se debe usar el modelo 2 (Ver Figura 22).

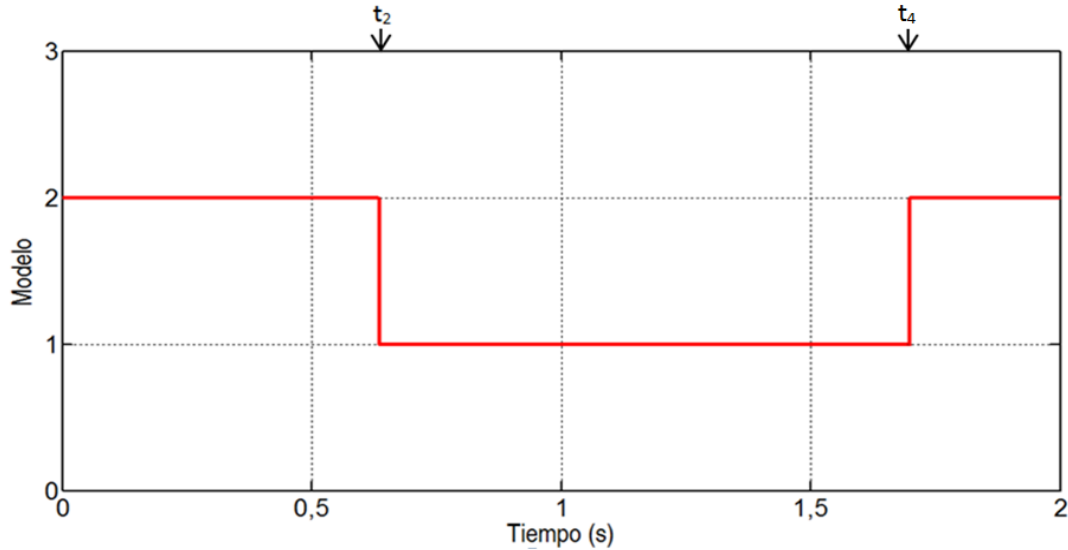


Figura 22: Modelo usado en cada instante

Con este modelo 2 las velocidades son iguales. Cuando se empieza a presionar el embrague en el segundo 0,5 (t_1) el par máximo empieza a descender hasta llegar al valor del par del embrague (Ver Figura 23), momento en el que las velocidades dejan de tener el mismo valor (Ver Figura 24), y se activa el modelo 1 en el instante de tiempo t_2 .

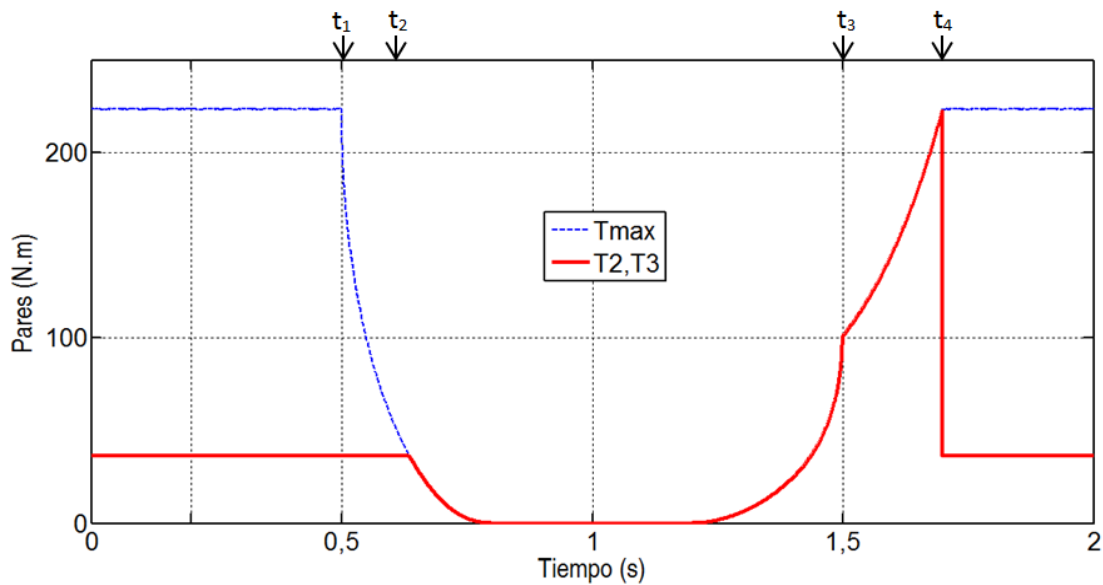


Figura 23: Par de embrague y par de embrague máximo

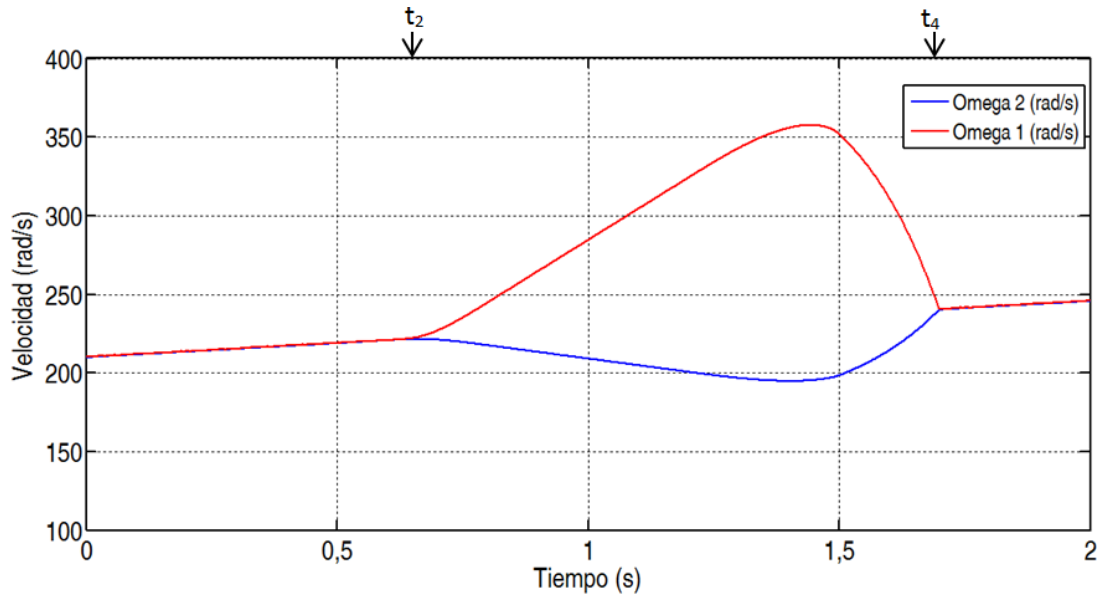


Figura 24: Velocidades angulares

En ese mismo instante se puede observar como el coeficiente de fricción μ deja de ser estático, pues las velocidades de la ecuación (5) ahora son distintas y por ello debe variar (Ver Figura 25). De esta forma permanece este modelo 1 en funcionamiento hasta que después de que se empieza a soltar el embrague, en el instante t_4 las velocidades vuelven a ser iguales y de nuevo el que funciona es el modelo 2 (Ver Figura 22).

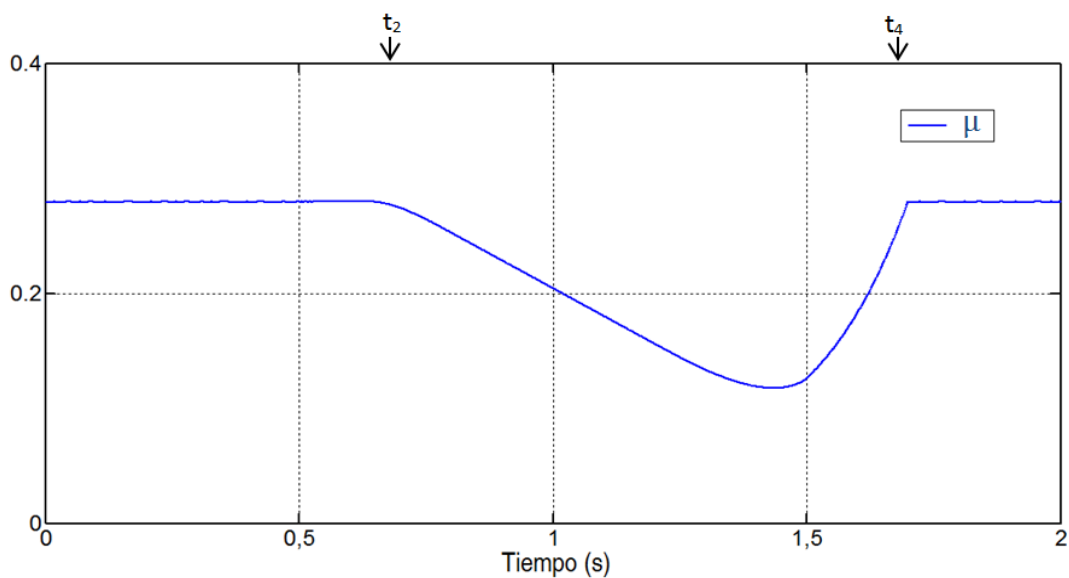


Figura 25: Coeficiente de fricción



Con este primer ejemplo queda demostrado que el modelado mediante EMR funciona perfectamente, representando un sistema con varios estados de una forma estructurada, respetando la causalidad integral y los flujos de energía, y siendo sencillo a la hora de elaborar la simulación. En dicha simulación se han obtenido los resultados esperados en un muy bajo tiempo de computación y las gráficas carecen de picos no deseados.

De todas formas esta simulación no es tan visual porque las partes de un embrague no son muy conocidas. En el capítulo siguiente se va a realizar una simulación simplificada de un coche eléctrico donde se verán las verdaderas ventajas de esta técnica, como identificar las distintas partes de modelo muy rápido visualmente (batería, ruedas, etc.) y sobretodo elaborar un control de velocidad para un ciclo urbano.



Capítulo 5

Modelado y simulación de un vehículo eléctrico simplificado.

5.1 Introducción.

5.1.1 Historia del coche eléctrico.

Los primeros vehículos eléctricos datan de la década de 1830, cuando todavía carecían de baterías recargables. Esto siguió así hasta finales del siglo 19, que gracias a la producción en masa de este tipo de baterías, los vehículos eléctricos se hicieron ampliamente utilizados. Pero esta evolución se truncó de golpe con la disponibilidad de grandes cantidades de petróleo a buen precio que paró en seco la comercialización de vehículos eléctricos [28]. El sistema de producción en cadenas de montaje de forma masiva y barata implantado por Henry Ford desde 1908, siguió contribuyendo a la caída del vehículo eléctrico; y las mejoras se sucedían en los vehículos de combustión interna dando más de lado a los vehículos eléctricos. Al llegar a 1920 la industria del automóvil eléctrico desapareció casi por completo, quedando tan solo relegada a entornos eléctricos tales como almacenes (montacargas, toros elevadores...) o carros de campos de golf donde no se tolera el ruido o la contaminación [29].

Ya a finales del siglo 20 se han producido cambios que hacen que los vehículos eléctricos sean propuestas mucho más atractivas. Entre estos cambios hay que incluir todo tipo de avances técnicos en motores eléctricos, controladores y especialmente en baterías que aumentan la autonomía de dichos vehículos.

Pero el factor decisivo que impulsa el desarrollo de vehículos eléctricos, es la creciente preocupación por el medio ambiente y los problemas como el efecto invernadero que están directamente relacionados con las emisiones de vehículos de combustión, y que han provocado esfuerzos en investigación y desarrollo de sistemas energéticos más eficientes. Se han llevado a cabo numerosos congresos internacionales, y agencias gubernamentales y asociaciones han desarrollado normas estrictas de combustible y emisiones, llegando a



haber algunos intentos para forzar la introducción de vehículos eléctricos de emisiones cero. Todos estos factores hacen del vehículo eléctrico una solución más que interesante y han propulsado su desarrollo notablemente.

5.1.2 Principales tipos de vehículo eléctrico.

Los vehículos eléctricos alimentados por baterías (BEVs) son a priori la solución ideal para hacer frente a la crisis energética y al calentamiento global. Estos vehículos son alimentados exclusivamente por baterías u otras fuentes de energía eléctrica, no consumen nada de petróleo y por tanto carecen de emisiones a la atmósfera. Sin embargo aspectos como un alto coste inicial, poca autonomía y grandes tiempo de repostaje (recarga eléctrica) dificultan su uso, lo que provoca que se están desarrollando BEV como coches de pequeño tamaño dedicados principalmente a viajes urbanos de corta distancia [1]. Aun así las nuevas corrientes tratan de impulsar nuevas soluciones y arquitecturas de BEV que utilizan conjuntamente varias fuentes de energía, tales como baterías, supercondensadores y pilas de combustible, que conectados al mismo bus de continua reducen el tiempo de recarga, reducen el precio y aumentan su autonomía [30].

Para superar las limitaciones expuestas de los BEVs y vehículos de combustión interna, se desarrollaron los vehículos eléctricos híbridos (HEV), que combinan un sistema de propulsión de combustión con un sistema de almacenamiento de energía y una máquina eléctrica. De este modo cuando están en modo eléctrico tampoco generan contaminación, ahorrando así combustible. El coche híbrido, como indica el mercado, es una de las ideas más prometedoras del ámbito de los vehículos eléctricos y una alternativa real a los vehículos de combustión, teniendo aún mucho desarrollo futuro. Un ejemplo de ello es el Toyota Prius, que ha duplicado el número de coches eléctricos en las carreteras [28]. Cabe destacar que los hay de varios tipos, como vehículos híbridos en serie, en paralelo o mezcla de ambos modelos.

La tercera alternativa son los vehículos de pila de combustible (FCV) que, como su nombre indica, utilizan pilas de combustible para generar electricidad a partir de hidrógeno y aire [1]. Esta energía se usa para hacer funcionar el vehículo o para ser almacenada en algún dispositivo como paquetes de baterías o supercondensadores. Estos vehículos solo emiten vapor de agua y tienen la peculiaridad de ser altamente eficientes. En contraposición, este tipo de vehículos necesitan de una serie de características específicas tales como un almacenamiento de hidrógeno que requiere una mejor densidad de energía, una distribución adecuada de dicho hidrógeno y la construcción de una estructura para la



recarga del combustible. Además de que su precio es elevado, están limitados por el ciclo de vida de las pilas de combustible y muchas de sus propiedades teóricas aún deben ser demostradas, por lo que pueden ser una solución de futuro pero aún les falta desarrollo.

Las principales características de estos vehículos se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5: Características de BEV, HEV y FCV [1].

	BEV	HEV	FCV
Propulsion	<ul style="list-style-type: none"> • Electric motor drives 	<ul style="list-style-type: none"> • Electric motor drives • Internal combustion engines 	<ul style="list-style-type: none"> • Electric motor drives
Energy storage subsystem (ESS)	<ul style="list-style-type: none"> • Battery • Supercapacitor 	<ul style="list-style-type: none"> • Battery • Supercapacitor • Fossil or alternative fuels 	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrogen tank • Battery / supercapacitor needed to enhance power density.
Energy source & infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> • Electrical grid charging facilities 	<ul style="list-style-type: none"> • Gasoline stations • Electrical grid charging facilities (for Plug-In Hybrid) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrogen • Hydrogen production and transportation infrastructure
Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • Zero local emissions • High energy efficiency • Independent of fossil fuel • Relatively short range • High initial cost • Commercially available 	<ul style="list-style-type: none"> • Low local emissions • High fuel economy • Long driving range • Dependence on fossil fuels • Higher cost than ICE vehicles • Commercially available 	<ul style="list-style-type: none"> • Zero low local emissions • High energy efficiency • Independent of fossil fuels (if not using gasoline to produce H₂) • High cost • Under development
Major issues	<ul style="list-style-type: none"> • Battery sizing and management • Charging facilities • Cost • Battery Lifetime 	<ul style="list-style-type: none"> • Battery sizing and management • Control, optimization and management of multiple energy sources. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuel cell cost, life cycle and reliability • Hydrogen production and distribution infrastructure • Cost

5.1.3 Ventajas y desventajas del motor eléctrico.

Los motores eléctricos tienen una serie de ventajas y desventajas muy claras que se indican a continuación [29]. Entre sus principales ventajas se encuentran:

- Como los motores eléctricos no queman combustible no emiten gases a la atmósfera.
- Apenas hacen ruido al funcionar y sus vibraciones son imperceptibles.
- Teóricamente el motor eléctrico puede desarrollar un par máximo desde 0 rpm, por lo que se puede arrancar desde cero a velocidad máxima.
- No necesita cambio de marchas y al eliminar la caja de cambios se abre la posibilidad de descentralizar la generación del movimiento, situando un pequeño motor en cada rueda en vez de uno central, lo que supone una nueva distribución del espacio del coche.



- Respecto a la eficiencia está situada alrededor del 90%, mientras que las de los motores diésel se sitúa tan solo en torno al 40% debido a cuestiones termodinámicas. Además los motores eléctricos son más sencillos y baratos de construir.
- Se puede recuperar energía durante las frenadas, por lo que el motor puede funcionar también como generador eléctrico.

Por supuesto los coches eléctricos presentan una serie de desventajas frente a los de combustión interna:

- La más obvia y fundamental es que la autonomía que presenta el coche eléctrico es muy inferior, estando entre los 100 o 120 kilómetros.
- Los vehículos eléctricos por lo general son caros y el tiempo de repostaje es elevado ya que se requieren varias horas para una carga completa.
- Por último se ha de mencionar que las baterías eléctricas tienen fecha de caducidad, se degeneran con el uso. Suelen tener una vida limitada a 5 años, lo que implica una fuerte inversión periódica para renovarlas.

5.2 Batería del coche eléctrico.

A la hora de simular un coche eléctrico simplificado, previamente es necesario definir los principales parámetros que explican el funcionamiento de la batería, ya que es quizás el componente más transcendental de este vehículo al limitar su autonomía. No se ha llevado a cabo un estudio complejo de los tipos de baterías o las reacciones que se producen en ellas ya que queda fuera del ámbito de este trabajo, solo se quiere hacer un breve estudio para tener una visión general de su funcionamiento.

Algunos de los principales parámetros que definen el comportamiento de la batería se definen a continuación [28], [31]:

a) Voltaje de célula y batería.

Las células de la batería tienen un voltaje nominal que da la tensión aproximada con la que funcionará cuando estén entregando energía eléctrica. Dichas células suelen ir conectadas en serie para proporcionar la tensión adecuada, por lo que suele ser interesante tener células de alto potencial para disminuir el número de elementos que hay que colocar

seguidos. También pueden ir en paralelo aumentando así la capacidad de la batería (explicada en el apartado b). A efectos prácticos nunca es un valor fijo sino que va cambiando en función de otros factores, como la intensidad que recorre la batería.

b) Capacidad de carga específica.

La capacidad de carga es uno de los parámetros más importantes de las baterías, ya que indica la cantidad aproximada de energía que es capaz de acumular y entregar. Su unidad de medida es el SI es el Coulomb equivalente a un amperio por segundo pero al ser una medida demasiado pequeña es más común utilizar el Amperio-hora. De nuevo este parámetro no es constante, se va debilitando con el tiempo, y suelen estar limitadas a un máximo de 5 horas. En la Figura 26 se observa como varía este parámetro en función del número de ciclos de la batería (que es otro parámetro fundamental, que indica el número de ciclos carga-descarga que se pueden realizar), la temperatura, la intensidad y el tiempo respectivamente.

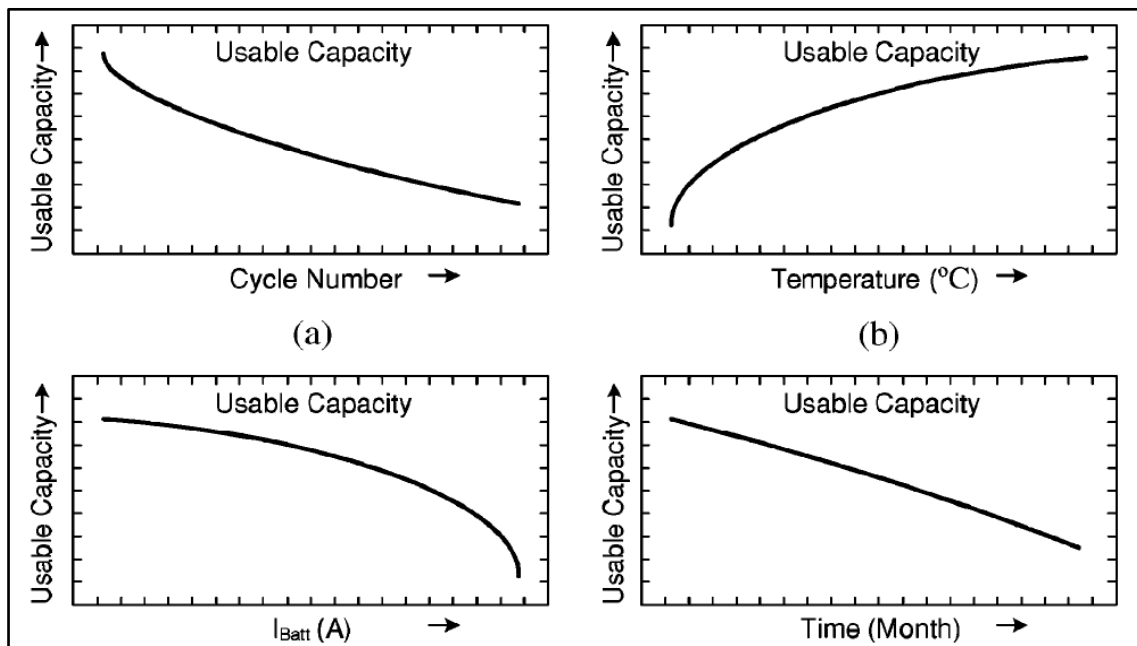


Figura 26: Curva característica de la capacidad de la batería respecto al número de ciclos (a), temperatura (b), corriente de la batería (c) y el tiempo (d) [31].



c) Energía almacenada.

La función de la batería es almacenar y entregar energía, y este hecho depende de la tensión y de la carga almacenada en el momento según la relación: Energía= Tensión x Carga. Su unidad en el SI es el Julio pero al ser demasiado pequeña a menudo se usa el Watt-hora (Wh) equivalente a 3600 Julios, lo que permite por otro lado trabajar con Amperios-hora en la carga.

d) Energía específica y densidad de energía.

La energía específica se asocia a la cantidad de energía eléctrica almacenada por cada kilogramo de masa de la batería y se mide en Wh.kg⁻¹. Sirve de orientación para saber el tamaño de batería que se requiere, y solo de orientación porque varía notablemente según otros factores como la temperatura o el grado de descarga.

Análogamente la densidad de energía es la cantidad de energía eléctrica que puede almacenar una batería por unidad de volumen, por lo que sus unidades son Wh.m⁻³. Este parámetro ayuda a la hora de dimensionar, ya que indica el volumen de batería requerido, o bien si tenemos espacio limitado poder saber de una forma aproximada la cantidad de energía que tendremos disponible realizando la operación inversa.

e) Potencia específica.

Es la cantidad de potencia que podemos obtener por cada kilogramo de batería. De nuevo es una especificación muy variable ya que depende más de la carga conectada al sistema que de la propia batería. Además no es recomendable hacer funcionar una batería en un rango cercano a su potencia máxima ya que durarán poco tiempo y operarían de manera ineficiente. Se mide en W.kg⁻¹ y también sirve para dar una idea de la velocidad con la que se entrega la energía.

f) Eficiencia

En un entorno ideal la batería debería cargarse una y otra vez al completo y su eficiencia sería del 100%. Pero esto no es así, ninguna batería tiene una eficiencia tan alta y varía según el tipo de modelo, la temperatura o el estado de carga.

g) Estado de carga (SOC) y profundidad de descarga (DOD).

El SOC o estado de carga (“state of charge”) es un valor porcentual que como su nombre indica hace referencia al nivel de carga de la batería respecto a la capacidad máxima que tiene. Es un parámetro de gran importancia porque multitud de parámetros de la batería dependen de él. El DOD es justo el parámetro inverso al estado de carga, es decir, la cantidad de energía que se puede extraer de la batería en un instante determinado y también se expresa de manera porcentual. Evidentemente cuando uno aumente el otro descenderá.

h) Tensión de circuito abierto (VOC).

El VOC (“open circuit voltage”) es la tensión existente entre los terminales de la batería cuando no hay ninguna carga conectada al circuito eléctrico. En estas condiciones no circula corriente alguna, y este valor de tensión depende del tipo de batería y una vez más del estado de carga mediante una relación no lineal como se muestra en la Figura 27.

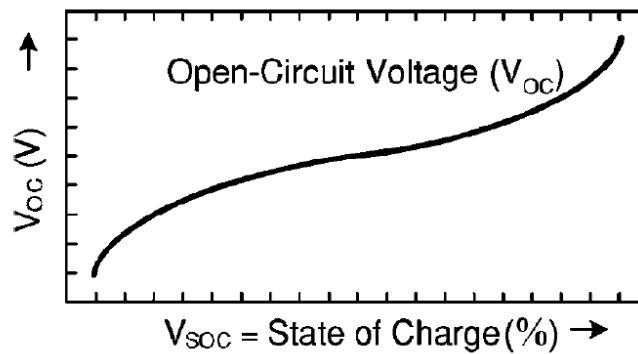


Figura 27: Curva característica relación entre SOC y VOC [31].

El circuito equivalente que modela de una forma aproximada el comportamiento dinámico de la batería se presenta en la Figura 28.

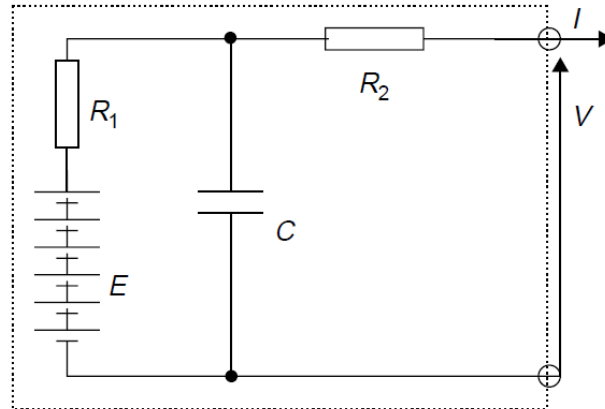


Figura 28: Circuito equivalente de la batería [28].

Aunque el circuito equivalente es bastante simple cabe recordar que sus parámetros no son constantes, ya que por ejemplo el parámetro E (VOC) varía con el estado de carga como se acaba de demostrar. Para calcular dicho valor se usan fórmulas complejas que varían según el tipo de batería.

Una vez definidos los parámetros más importantes de las baterías y un circuito equivalente, es necesario elegir un tipo de batería para la posterior simulación. De todos los nuevos sistemas de baterías, las baterías de níquel-metal hidruro (NiMH) son consideradas como una de las más avanzadas, contando con numerosas ventajas respecto a otras como un menor sobrecalentamiento (Ver figura 29). Este tipo de baterías se han utilizado en multitud de vehículos, como el Toyota Prius, que ha sido el vehículo eléctrico más exitoso de la historia [28]. Es por ello que es el tipo de batería que será usada en la simulación, además de ser una de las más prometedoras de cara al futuro.

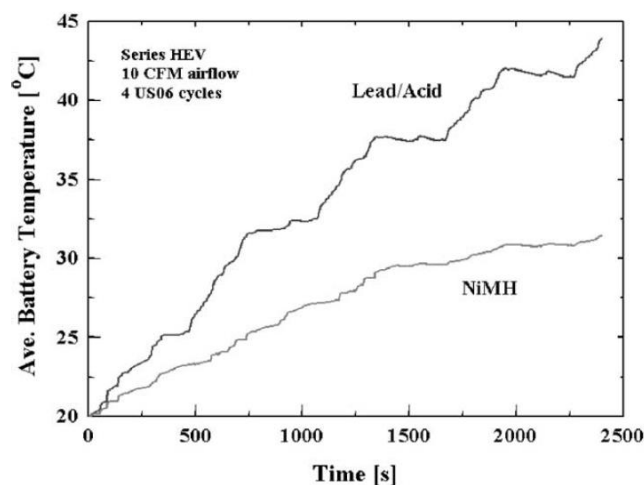


Figura 29: Relación temperatura-tiempo para distintos tipos de baterías [32].



5.3 Tipos de modelos de representación de vehículos.

Por todo lo explicado a cerca de los presentes planteamientos de conservación del medio ambiente y la energía, el desarrollo de vehículos eléctricos se ha acelerado. En función de cuál sea el objetivo de estudio, existen diferentes métodos para modelar este tipo de vehículos, tales como sus componentes de diseño o la evaluación de su contaminación. Pero sin duda una de las cuestiones más importantes a la hora de desarrollar un vehículo eléctrico, y de la que se habla en este trabajo, es una gestión de energía eficiente.

Si en vez de hablar de sistemas electromecánicos en general, se concreta el rango a vehículos, es necesario hablar de dos tipos de modelos más aparte de estructurales/funcionales y causales/no causales [1]:

- **Modelos hacia delante y hacia atrás:** Esta clasificación se establece dependiendo de la dirección en la que se establece el cálculo. El modelo de atrás hacia delante también es conocido como del motor a la rueda, pues empieza en el motor u otra fuente de energía y trabaja “hacia delante” a través del par que se transmite. En cambio un modelo hacia atrás, también conocido como de la rueda al motor, se inicia con el esfuerzo de tracción necesario en las ruedas y trabaja “hacia atrás” hasta el motor o la fuente de energía primaria. Estos modelos hacia atrás requieren de un ciclo de velocidades impuesto para calcular las fuerzas que actúan sobre las ruedas, permitiendo que la energía se transmita a las fuentes primarias. Además representan mejor el sistema y son muy útiles para implementar algoritmos de control, necesitando algún tipo de regulador para ello, ya que la reproducción de un perfil de velocidades no es posible sin un regulador de velocidad.

Para una correcta gestión de la energía se suelen establecer dos niveles de control [1]. El primer nivel se corresponde con la gestión energética local a tiempo real de cada uno de los subsistemas, mientras que el segundo nivel hace referencia a la gestión global de la energía y de los flujos de potencia entre subsistemas.

Para la gestión local de energía es necesario un control en tiempo real de los distintos flujos que pasan por cada subsistema. Como los modelos hacia delante permiten que la energía sea gestionada a través de un flujo de potencia físico (real), estos modelos son muy útiles para gestionar la energía de una forma rápida a nivel local. Sin embargo, para la gestión global de la energía es necesario un modelo capaz de coordinar los flujos de energía entre distintos subsistemas, y en este caso un modelo hacia atrás será más útil pues es idóneo



para desarrollar el nivel de control necesario para la administración de toda la energía del sistema.

En definitiva, el objetivo final es la gestión de energía de todo el sistema, lo que implica el control de cada subsistema por separado y la supervisión de todo el sistema en conjunto. Para ello es vital conocer la función de cada subsistema dentro del todo que forman, por lo tanto un modelo funcional es más apropiado que un modelo estructural. Y debido también a que el objetivo es la gestión de energía un modelo causal es más apropiado que uno no causal, ya que una mala interpretación de la causalidad física puede conducir a una gestión de la energía irreal, reduciendo la eficiencia del sistema y aumentando el riesgo de daño.

Debido a que los vehículos eléctricos son sistemas multidisciplinares, es evidente que un buen modelado es vital para una gestión de energía eficiente, ya que no podrán dar un rendimiento satisfactorio sin un control eficiente del sistema. Pero son sistemas muy complejos debido por ejemplo a la cantidad de subsistemas que hay interconectados, y por ello el uso de herramientas como los formalismos gráficos es de gran utilidad para organizar correctamente dichos subsistemas respetando sus propiedades físicas. Estos formalismos proporcionan una descripción unificada del sistema y ponen de relieve sus propiedades energéticas.

De entre todos los formalismos gráficos el idóneo para desarrollar una simulación de un vehículo eléctrico es el EMR. Esta técnica proporciona el modelo sintético, funcional y causal deseado, y aporta al mismo tiempo una perspectiva global del sistema y una mejor comprensión de las interacciones entre sus componentes. Además consta de una primera etapa de modelado hacia delante y después un control global del sistema hacia atrás con un perfil de velocidades. Por todo ello el EMR es la técnica utilizada para la simulación de este trabajo.

5.4 Modelado y control de un coche eléctrico.

5.4.1 Modelado EMR del vehículo eléctrico.

La presente simulación es un vehículo eléctrico basado en el "Peugeot 106" que consta de una batería que alimenta a una máquina de corriente continua a través de un chopper [18]. Para simplificar el estudio se ha escogido una máquina de corriente continua de imanes permanentes en vez de una máquina síncrona de imanes permanentes. Tras dicha máquina el coche está equipado con una caja de cambios, un diferencial y dos ruedas motrices (Ver Figura 30). Este estudio presenta otras simplificaciones de la realidad como focalizar toda la masa del coche en su centro de gravedad, reduce los elementos como la caja de cambios a

sus principios básicos, solo considera las ruedas motrices, etc. Lo que se busca es analizar la técnica de modelado y su posterior control. Si se corrobora su validez tras dicho análisis, se podrá aplicarla a otros estudios científicos exhaustivos a cerca de las características de un determinado vehículo, pero eso ya queda para futuros trabajos.

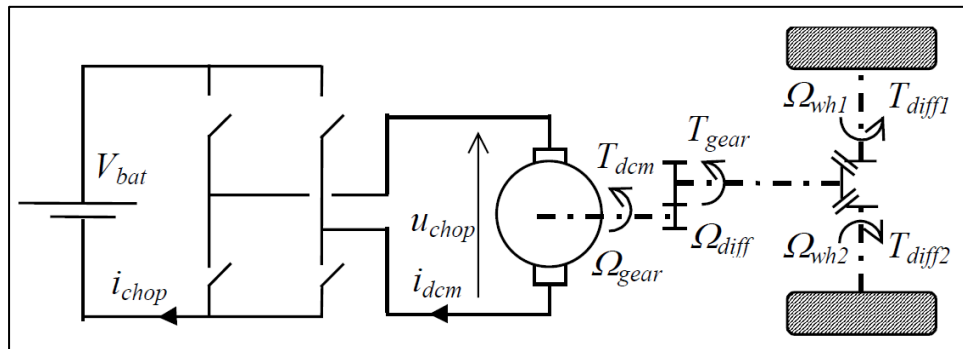


Figura 30: Esquema de tracción del vehículo estudiado [18].

Al igual que en la simulación del embrague del capítulo 4, el software elegido es Matlab-Simulink. Por todo lo mencionado anteriormente sobre las limitaciones de los vehículos eléctricos referentes a su autonomía, el objetivo final de este estudio será evaluar el comportamiento del coche eléctrico simulado en un ciclo de conducción urbano, concretamente el ECE-15 que es el que se utiliza a nivel europeo [28]. Para ello habrá que ir desarrollando todos y cada uno de los componentes con su posterior control y ajuste de reguladores.

A diferencia del capítulo anterior, en esta ocasión se expone primero un esquema general del EMR desarrollado durante el estudio, obtenido a partir de las relaciones entre los subsistemas correspondientes. Este EMR contiene el nombre de todos sus componentes y la ubicación de las distintas ecuaciones para que sea más sencilla su comprensión (Ver figura 31). Posteriormente se detallan las ecuaciones que dan lugar al modelado de dicho vehículo, y a que elementos del EMR final hacen referencia.

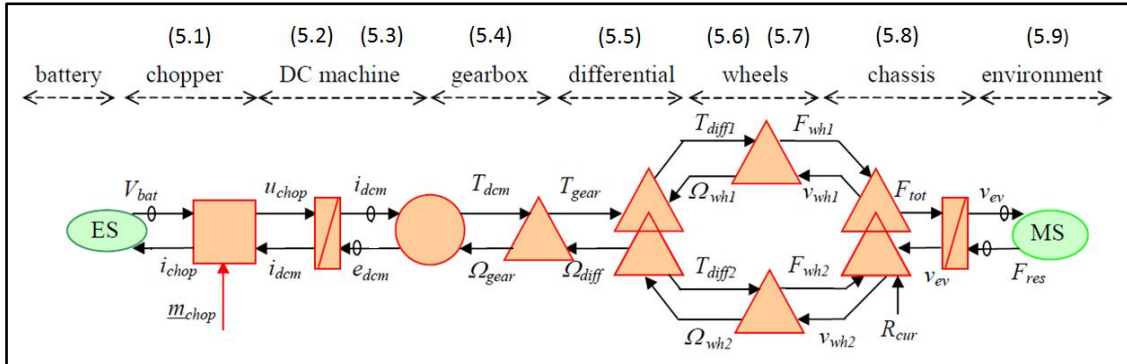


Figura 31: Esquema EMR del vehículo eléctrico estudiado [18]

La batería se corresponde evidentemente con un elemento fuente (óvalo verde), cuya función es suministrar un voltaje constante para que funcione la máquina de corriente continua. Pero como para nuestro sistema necesitamos una tensión de c.c. variable (ya que los coches cambian de velocidad) será necesario conectar estos elementos a través de un chopper.

Un chopper es un convertidor eléctrico de corriente continua a corriente continua, por lo que no cambia la naturaleza de la electricidad. Sirve para regular el voltaje transmitido desde la fuente, por lo que es un elemento vital para posteriormente regular la velocidad, a través de su ciclo de trabajo m_{chop} que es el cociente entre el tiempo que está activo respecto a un periodo [33]. Para esta simulación se utiliza un chopper de cuatro cuadrantes, fruto de la combinación de choppers reductores y elevadores (Ver Figura 32).

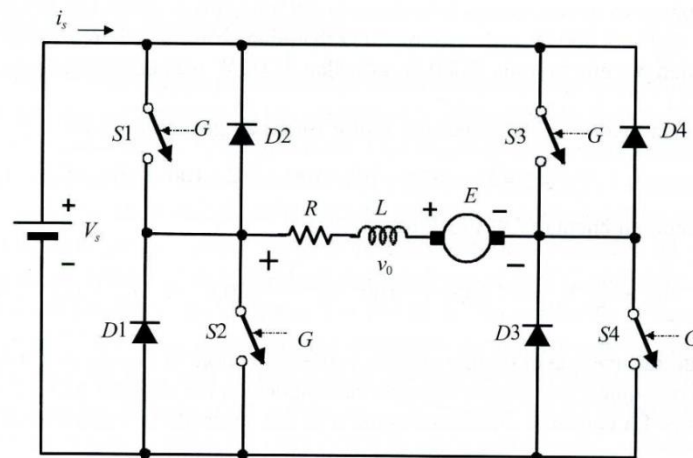


Figura 32: Chopper de cuatro cuadrantes [33].

De esta forma el chopper proporciona la tensión de chopper u_{chop} a partir de la tensión de la batería V_{bat} ; y la intensidad i_{chop} a partir de la intensidad de la máquina de corriente continua i_{dcm} siguiendo la siguiente relación:

$$\begin{cases} u_{chop} = m_{chop} V_{bat} \\ i_{chop} = m_{chop} i_{dcm} \end{cases} \quad (5.1)$$

Siendo m_{chop} el ciclo de trabajo del chopper. La máquina de corriente continua se define en varias partes y su esquema se presenta en la Figura 33.

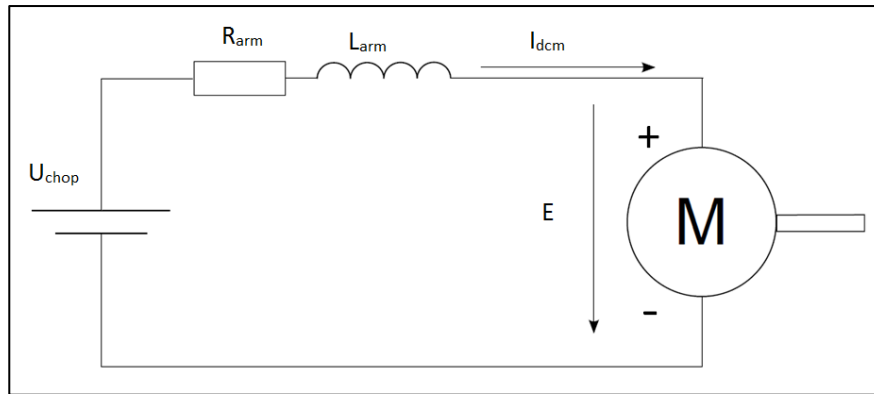


Figura 33: Esquema máquina de corriente continua

Por un lado el devanado inducido acumula energía (debido a su inductancia) y por ello va representado en un elemento de acumulación (rectángulo naranja). Se representa mediante la conocida ecuación diferencial donde se halla la corriente de armadura i_{dcm} como variable de estado a partir de la fuerza electromotriz y al voltaje del chopper, siendo L_{arm} y R_{arm} la inductancia y resistencia de los devanados:

$$L_{arm} \frac{d}{dt} i_{dcm} = u_{chop} - e_{dcm} - R_{arm} i_{dcm} \quad (5.2)$$

A continuación el par de la máquina de c.c. T_{dcm} se obtiene a partir de la intensidad de dicha máquina i_{dcm} , y su fuerza electromotriz e_{dcm} está vinculada a la velocidad de rotación Ω_{gear} según la ecuación 5.3. El parámetro k_{dcm} es el coeficiente de la conversión electromecánica (elemento representado por un círculo naranja al haber una conversión de energía eléctrica a mecánica) donde va incluido el flujo de la máquina que se toma constante:



$$\begin{cases} T_{dcm} = k_{dcm} i_{dcm} \\ e_{dcm} = k_{dcm} \Omega_{gear} \end{cases} \quad (5.3)$$

En este punto en el modelo ya se ha representado hasta la máquina de c.c., es decir, lo que se corresponde a la parte eléctrica del esquema de la Figura 30. Una vez desarrollada esta parte, se llega a la parte del sistema relacionada con la mecánica.

Como el modelo que se está realizando es dinámico es necesario tener en cuenta la ley de contacto entre las ruedas y la carretera. Pero analizar este fenómeno de deslizamiento de las ruedas debidamente es muy complejo, por lo que para este estudio se harán algunas simplificaciones. Todas las inercias se toman como una masa equivalente que se incluye en la masa del vehículo. De esta forma el siguiente elemento del sistema es la caja de cambios caracterizada en la ecuación 5.4 por su par T_{gear} y la velocidad de rotación Ω_{gear} mediante el par de la máquina de c.c. T_{dcm} y la velocidad de rotación del eje del diferencial Ω_{diff} . En esta ecuación k_{gear} es el coeficiente de reducción de la caja reductora.

$$\begin{cases} T_{gear} = k_{gear} T_{dcm} \\ \Omega_{gear} = k_{gear} \Omega_{diff} \end{cases} \quad (5.4)$$

A continuación, en el diferencial (representado con doble triángulo naranja al ser un elemento de distribución) se produce una repartición equitativa del par generado en los engranajes T_{gear} y si fuera necesario, permite diferentes velocidades de rotación en cada rueda, como en el caso de la Figura 34 donde la rueda de fuera deberá girar más rápido que la interior para seguir la trayectoria adecuada:

$$\begin{cases} T_{diff1} = T_{diff2} = \frac{1}{2} T_{gear} \\ \Omega_{diff} = \frac{\Omega_{wh1} + \Omega_{wh2}}{2} \end{cases} \quad (5.5)$$

Las ruedas (triángulos naranjas) convierten su movimiento de rotación en el movimiento lineal que sigue el vehículo. La fuerza de tracción de las ruedas $F_{wh(i)}$ se obtiene a partir del par del diferencial, y la velocidad de rotación de las ruedas a partir de su velocidad lineal usando el tamaño del radio:

$$\begin{cases} F_{wh(i)} = \frac{1}{R_{wh}} T_{diff(i)} \\ \Omega_{wh(i)} = \frac{1}{R_{wh}} v_{wh(i)} \end{cases} \quad \text{con } i \in \{1,2\} \quad (5.6)$$

El chasis está representado mediante dos elementos. El primero es de nuevo un doble triángulo naranja, que conduce a la fuerza de tracción total F_{tot} a partir de la suma de las fuerzas de las ruedas. Además las velocidades lineales de las ruedas se obtienen a partir de la velocidad del vehículo. En esta ecuación l_{ev} es el ancho del vehículo y R_{curv} es el radio de la curva y como a simple vista puede parecer un poco confusa se adjunta una figura para ayudar a su comprensión.

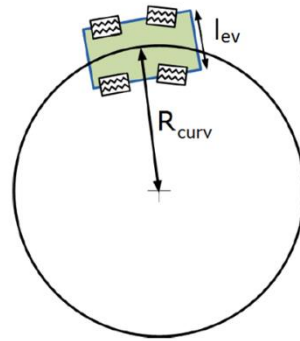


Figura 34: Representación del giro del vehículo

$$\begin{cases} v_{wh1} = \frac{R_{curv} + l_{ev}/2}{R_{curv}} v_{ev} \\ v_{wh2} = \frac{R_{curv} - l_{ev}/2}{R_{curv}} v_{ev} \\ F_{tot} = F_{wh1} + F_{wh2} \end{cases} \quad (5.7)$$

El otro elemento que compone el chasis es un elemento de acumulación, donde se obtiene la velocidad del vehículo (variable de estado) usando la ecuación diferencial típica de la dinámica en su formato lineal, tomando M como la masa total del vehículo, con la fuerza de tracción y la fuerza resistente al medio:

$$M \frac{d}{dt} v_{ev} = F_{tot} - F_{res} \quad (5.8)$$

Con esta metodología también se representa el medio ambiente mediante un elemento fuente (óvalo verde). El medio ambiente produce una fuerza resistente al vehículo que se

representa en la ecuación (5.9) y se muestra en la Figura 35 para una mejor comprensión de las fuerzas que actúan en el sistema.

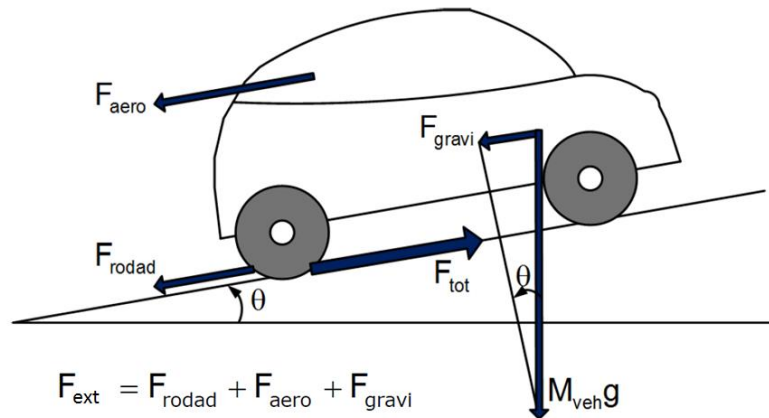


Figura 35: Fuerzas exteriores involucradas en el sistema

$$F_{res} = F_0 + a v_{ev} + b v_{ev}^2 + Mg \sin \alpha \quad (5.9)$$

Siendo F_0 la fuerza inicial que hay que vencer para arrancar el vehículo, a y b coeficientes de rodadura y arrastre, α el ángulo de la pendiente y g la gravedad.

Con esa ecuación 5.9 acaba la etapa de modelado del EMR de este sistema. Tras esta etapa el modelo está organizado de tal forma que se identifican claramente las distintas partes del sistema y los distintos flujos de energía intercambiados.

5.4.2 Control MCS del vehículo eléctrico.

Una vez finalizada la etapa de modelado se debe usar ese EMR para elaborar un control adecuado del sistema. Para ello es necesario aplicar el principio de inversión en todos los elementos siguiendo la cadena de control especificada en la Figura 36, de atrás hacia delante, localizando los grados de libertad del sistema y las distintas partes que necesitan un regulador.

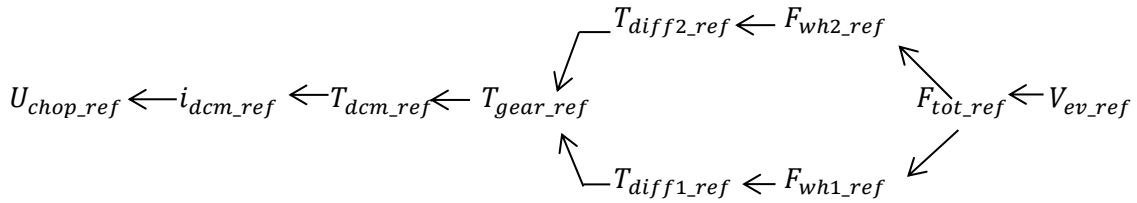


Figura 36: Cadena de control

Al igual que en el apartado anterior, en primer lugar se adjunta el resultado final de la inversión (Ver figura 37) y posteriormente se van a ir definiendo uno a uno como se ha establecido el control sobre cada uno de los elementos.

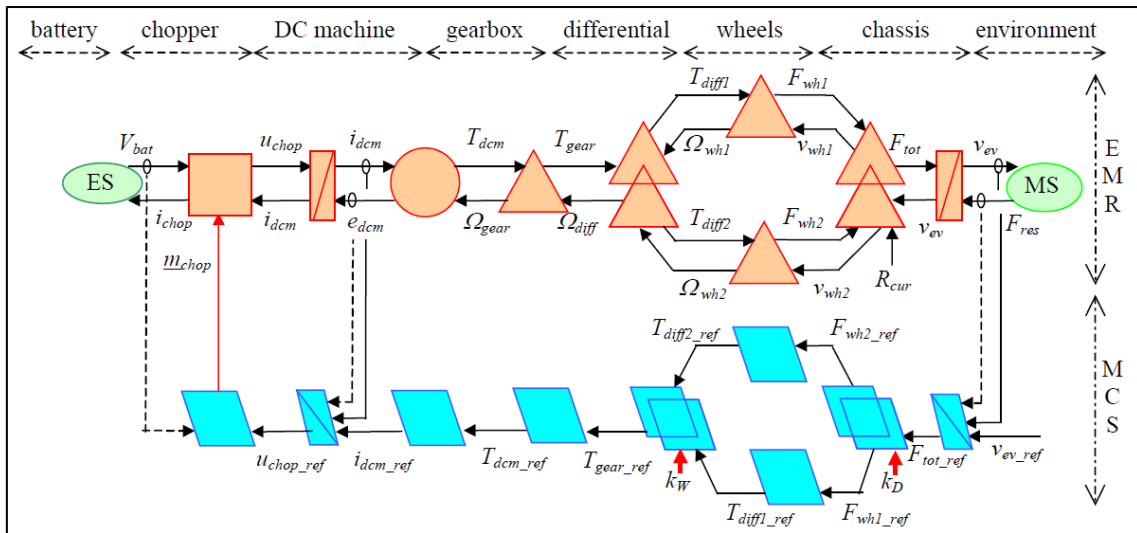


Figura 37: Esquema completo EMR y MCS del sistema [18]

El primer elemento a invertir es un elemento de acumulación. En esta ocasión el control debe definir la fuerza de tracción total adecuada F_{tot_ref} a partir de una velocidad de referencia (ciclo de velocidad urbano impuesto) y de la medición de la velocidad lineal del vehículo seguida en la etapa de modelado (se observan las flechas desde la etapa EMR al MCS). Para respetar la causalidad integral, que es uno de los principios fundamentales del EMR, será necesario un controlador para invertir esta relación integral, ya que la causalidad derivativa no está permitida.



$$F_{tot} = Cont [v_{ev_ref} - v_{ev_mes}] + F_{res_mes} \quad (5.10)$$

Donde $Cont [X_{ref}-X_{mes}]$ es un regulador a definir por el usuario (P, PI, PID u otro tipo).

A continuación es necesario invertir un elemento de acoplamiento. Para ello como se explicó en el capítulo 3, se puede hacer inversión directa al no tener dependencia temporal, pero será necesaria una entrada extra con un parámetro de distribución que especifique el reparto de energía:

$$\begin{cases} F_{wh1_ref} = K_D F_{tot_ref} \\ F_{wh2_ref} = (1 - K_D) F_{tot_ref} \end{cases} \quad (5.11)$$

Con $0 \leq K_D \leq 1$. Esta entrada es un grado de libertad del sistema y se puede variar según se quiera representar unas condiciones u otras. En este caso, así como en la mayoría de sistemas de tracción, su valor será de 1/2 para tener un reparto equitativo de fuerzas, igual que en la etapa de modelado.

El siguiente elemento a invertir corresponde a las ruedas. Este elemento no realiza ninguna conversión ni almacenamiento de energía, y como carece de dependencia temporal de nuevo se podrá realizar la inversión de manera directa. Los números 1 y 2 hacen referencia a si es la rueda izquierda o derecha, que como se observa tienen la misma ecuación.

$$T_{diff(i)_ref} = R_{wh} F_{whf(i)_ref} \quad \text{con } i \in \{1,2\} \quad (5.12)$$

A continuación hay que invertir el diferencial. El diferencial es un elemento de distribución, por lo que tras su inversión resultará un elemento acumulador. Por ello al igual que en el chasis, se necesita de una entrada extra que esta vez definirá cuál de las dos entradas influye más en la salida, es decir ejerce de criterio de ponderación.

$$T_{gear_ref} = 2k_w T_{dif1_ref} + 2(1 - K_w) T_{dif2_ref} \quad (5.13)$$

Con $0 \leq K_w \leq 1$. Este parámetro K_w representa otro grado de libertad del sistema que se podrá variar a petición del usuario. Si este parámetro vale 1 ó 0 solo tendrá influencia una de las entradas, es decir una rueda. De nuevo su valor en este sistema será 1/2 para que ambas entradas tengan la misma influencia en la salida final. Nótese que para este caso si no existiese este parámetro ambas entradas estarían igualmente ponderadas, lo que lleva a



pensar que este parámetro es inútil. Esto no es así ya que en muchas aplicaciones de tracción se usa para desarrollar distintas estrategias [21].

La relación de la caja de cambios al ser un convertidor mecánico también se puede invertir directamente. Esta inversión da como resultado el par de referencia de la máquina de corriente continua T_{dcm_ref} a partir del par de referencia de la caja de cambios T_{gear_ref} obtenido en la ecuación anterior.

$$T_{dcm_ref} = \frac{1}{k_{gear}} T_{gear_ref} \quad (5.14)$$

De esta forma se ha completado el control de la parte mecánica y falta por realizar las inversiones oportunas en la máquina de corriente continua y en el chopper. Siguiendo el orden establecido, la siguiente es una inversión electromecánica con la que se obtiene la corriente de referencia i_{dcm_ref} a partir de una inversión directa de su relación con el par T_{dcm_ref} .

$$i_{dcm_ref} = \frac{1}{k_{dcm}} T_{dcm_ref} \quad (5.15)$$

Por supuesto también es necesario invertir el otro elemento de la máquina de c.c. correspondiente a los devanados. Como es un elemento de acumulación, y por tanto tiene dependencia temporal, su inversión requiere un regulador para respetar el principio de causalidad. De esta forma obtenemos el voltaje de referencia del chopper a través de las mediciones y referencias de la máquina de c.c.

$$u_{chop_ref} = Cont[i_{dcm_ref} - i_{dcm_mes}] + e_{dcm} \quad (5.16)$$

Por último para acabar con las conexiones y cerrar el sistema, se deduce el ciclo de trabajo del chopper, a través de una inversión directa y la medida del voltaje de la batería.

$$m_{chop_ref} = \frac{1}{V_{bat_mes}} u_{chop_ref} \quad (5.17)$$

De esta forma la etapa de control está finalizada, y el sistema se puede estudiar como una simulación global completa con todas las partes conectadas entre sí correctamente y un

sistema de control adecuado. A continuación se presenta en la Figura 38 el sistema desarrollado en Simulink.

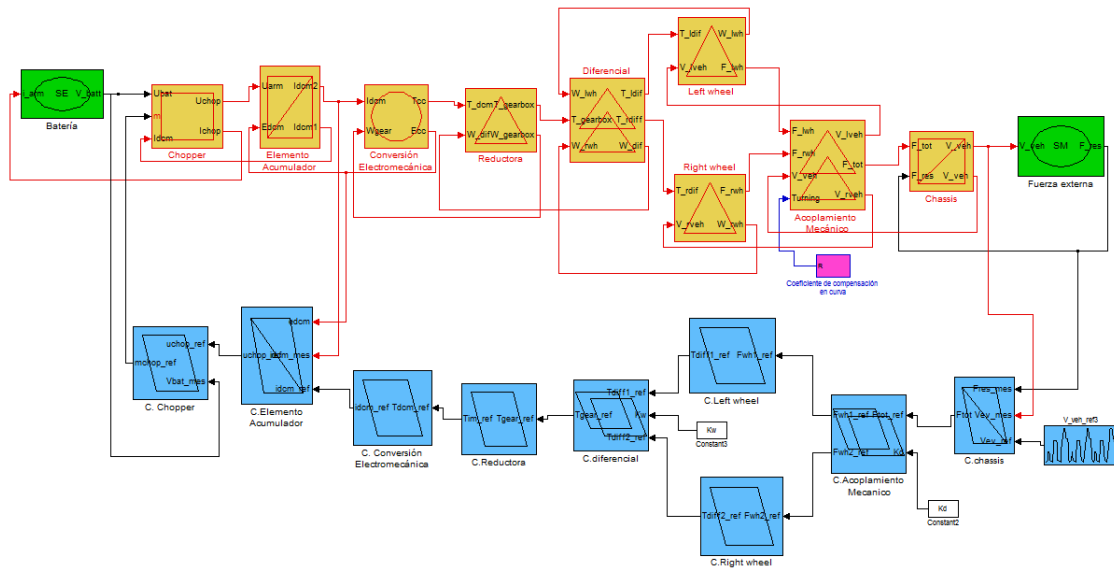


Figura 38: Desarrollo en Simulink del modelado y control del coche eléctrico.

5.5 Simulación y resultados.

Tras haber completado de una forma detallada el EMR y el MCS del sistema, ya debería estar todo organizado de una forma óptima para poder llevar a cabo la simulación. Los datos usados para dicha simulación se han extraído de [34].

Para analizar y comprobar la validez del modelo será necesario imponer un ciclo de velocidades. Al tratarse de un coche eléctrico, que están muy limitados por su autonomía, se va a imponer el ciclo de velocidades urbano ya que es en la ciudad donde se les da un mayor uso. El que se utiliza en este trabajo es el más convencional a nivel europeo, el ECE-15, que se muestra en la Figura 39.

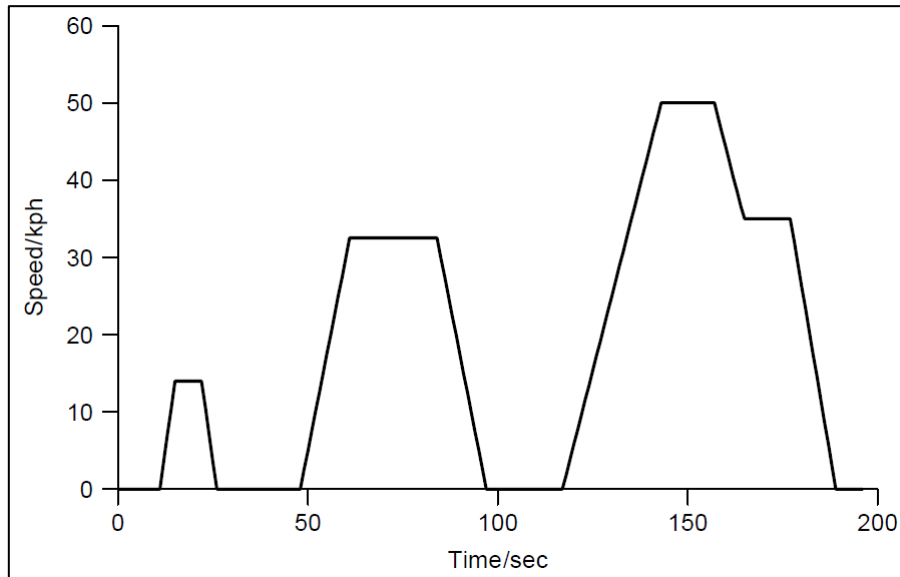


Figura 39: Ciclo de conducción urbana europeo ECE-15 [28]

En primer lugar vamos a comprobar cómo se comporta el vehículo implementado ante este ciclo de conducción, para saber si el control de velocidad es correcto.

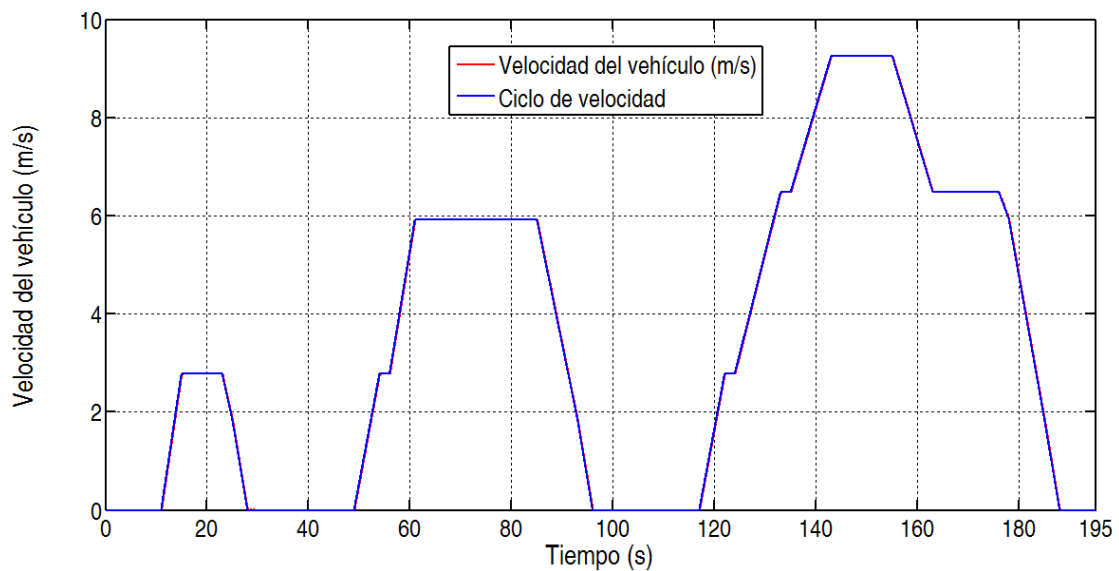


Figura 40: Velocidad lineal del vehículo

Como se observa en la Figura 40, el vehículo sigue de una forma prácticamente perfecta el ciclo de velocidad impuesto, ya que ambas gráficas se solapan, por lo que se puede afirmar que el control de velocidad es óptimo. A continuación en la Figura 41 se analiza la velocidad lineal de las ruedas, con la particularidad de un giro del coche a la izquierda.

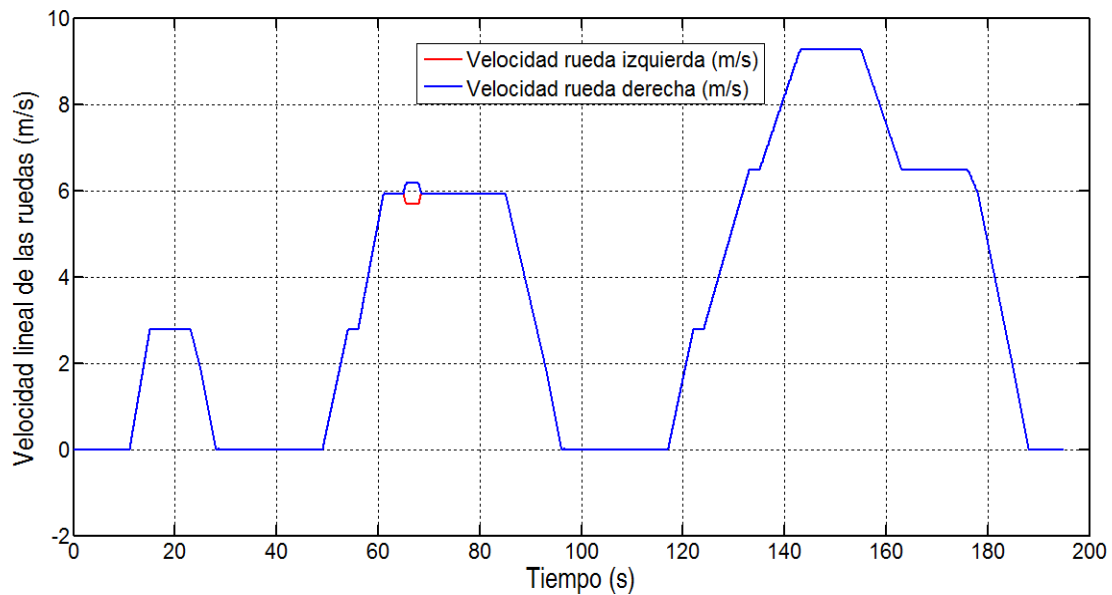


Figura 41: Velocidad lineal de cada rueda

Se puede observar que, durante la maniobra de giro, las velocidades de las ruedas son diferentes. La rueda derecha al seguir una trayectoria de mayor radio deberá tener mayor velocidad para que la velocidad del vehículo se mantenga igual a la velocidad de referencia.

A continuación se analiza cómo funciona el chopper (Ver figura 42) y qué tensión suministra a la máquina de corriente continua (Ver figura 43). Ya sabemos que funciona correctamente pues el vehículo sigue la velocidad que se ha establecido.

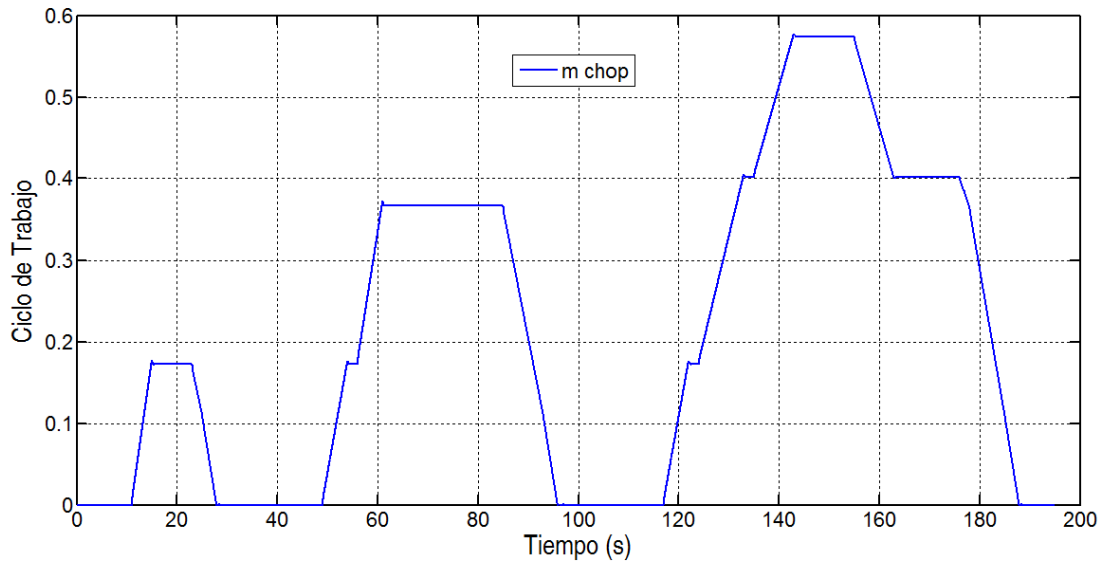


Figura 42: Ciclo de trabajo del chopper.

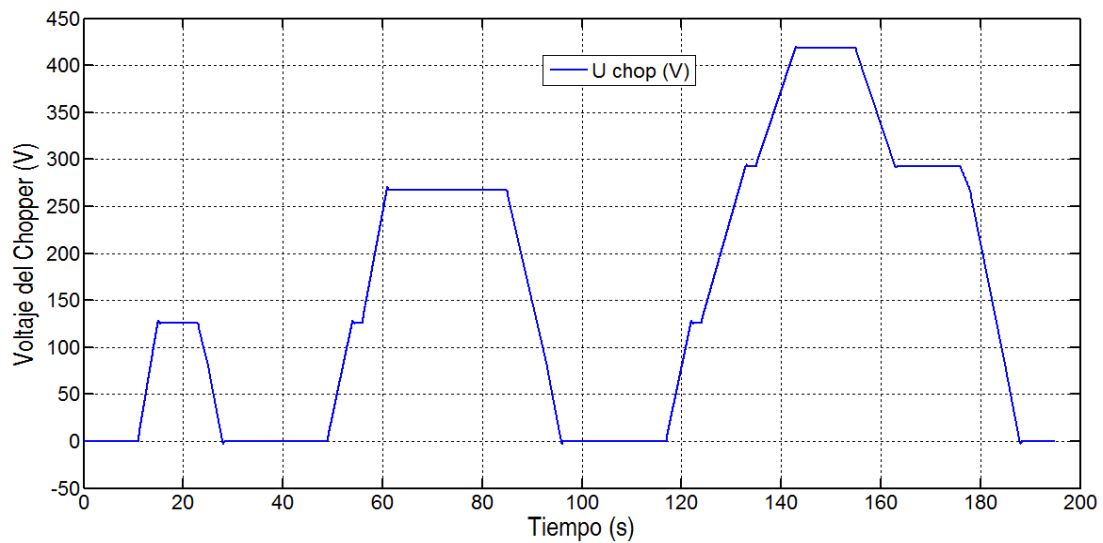


Figura 43: Tensión a la salida del chopper

Vemos que el ciclo de trabajo del chopper es el adecuado, al estar siempre entre 0 y 1 adecuándose a los diversos valores requeridos para seguir una velocidad determinada. Del mismo modo se observa que la tensión que proporciona al motor es la correcta, y no se superan el valor nominal de armadura (450 V) que podría derivar en múltiples pérdidas y desgaste de los devanados.

A continuación se adjunta una gráfica correspondiente a la intensidad en la máquina de corriente continua (Ver figura 44), así como el par que suministra esta máquina y el de la caja de cambios (Ver figura 45).

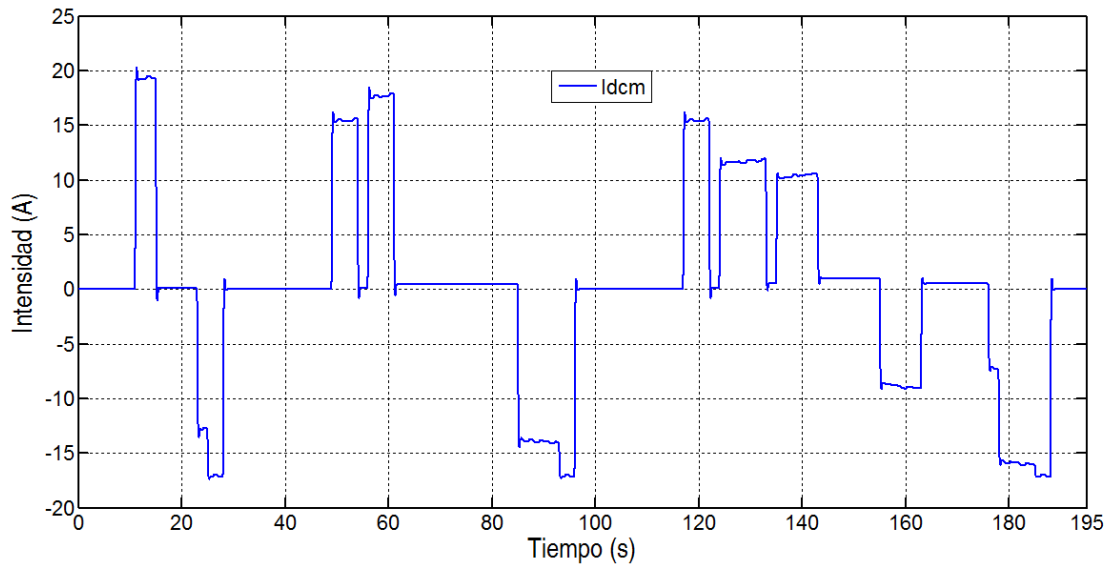


Figura 44: Intensidad que recorre la máquina de c.c.

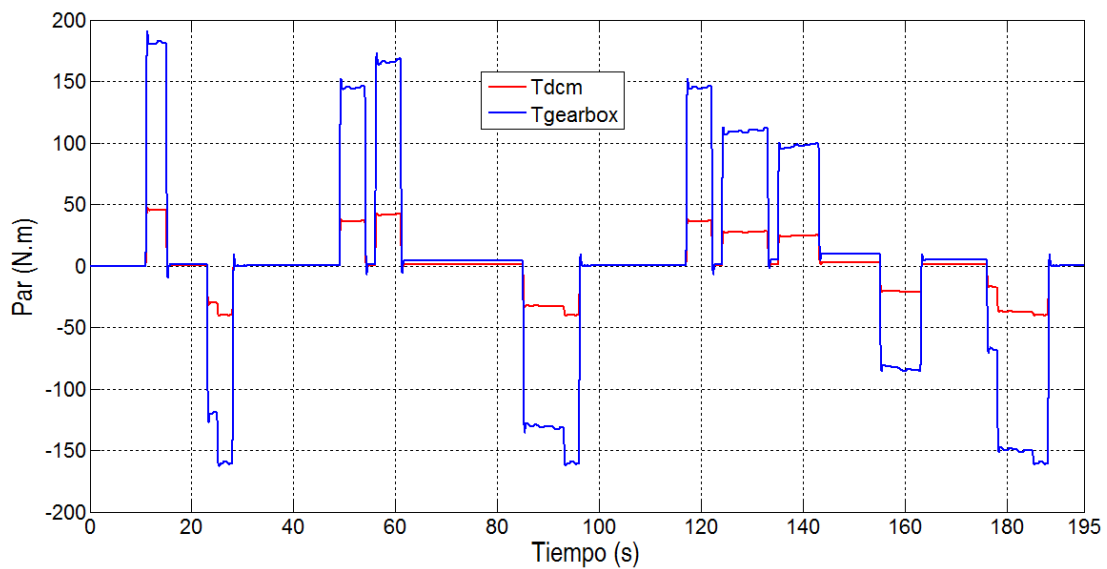


Figura 45: Par de la máquina de cc y de la caja de cambios.

Por último se analiza si la batería utilizada es adecuada. En primer lugar se observa que la relación entre su VOC y su SOC es muy parecida al valor teórico en la Figura 46.

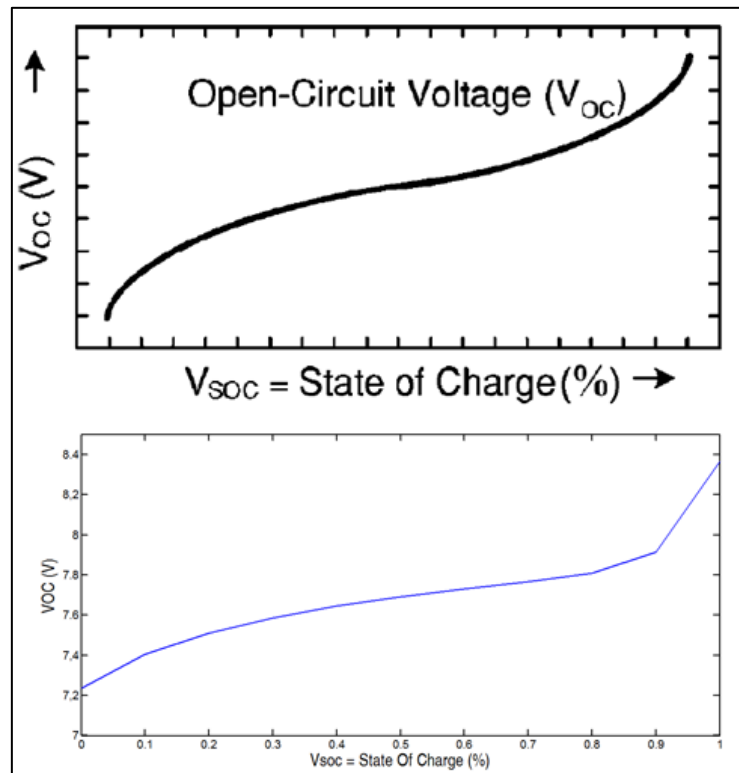


Figura 46: Comparativa VOC y SOC teórica y real.

Y en segundo lugar es válida porque suministra una tensión suficiente para el buen funcionamiento del coche, y sigue una dinámica adecuada como se muestra en la Figura 47, descargándose cuando el vehículo está acelerando y cargándose cuando éste frena. No se entra a valorar si es la mejor batería para este modelo o si su funcionamiento es óptimo, solo que es válida para este modelo y cumple sus principios básicos.

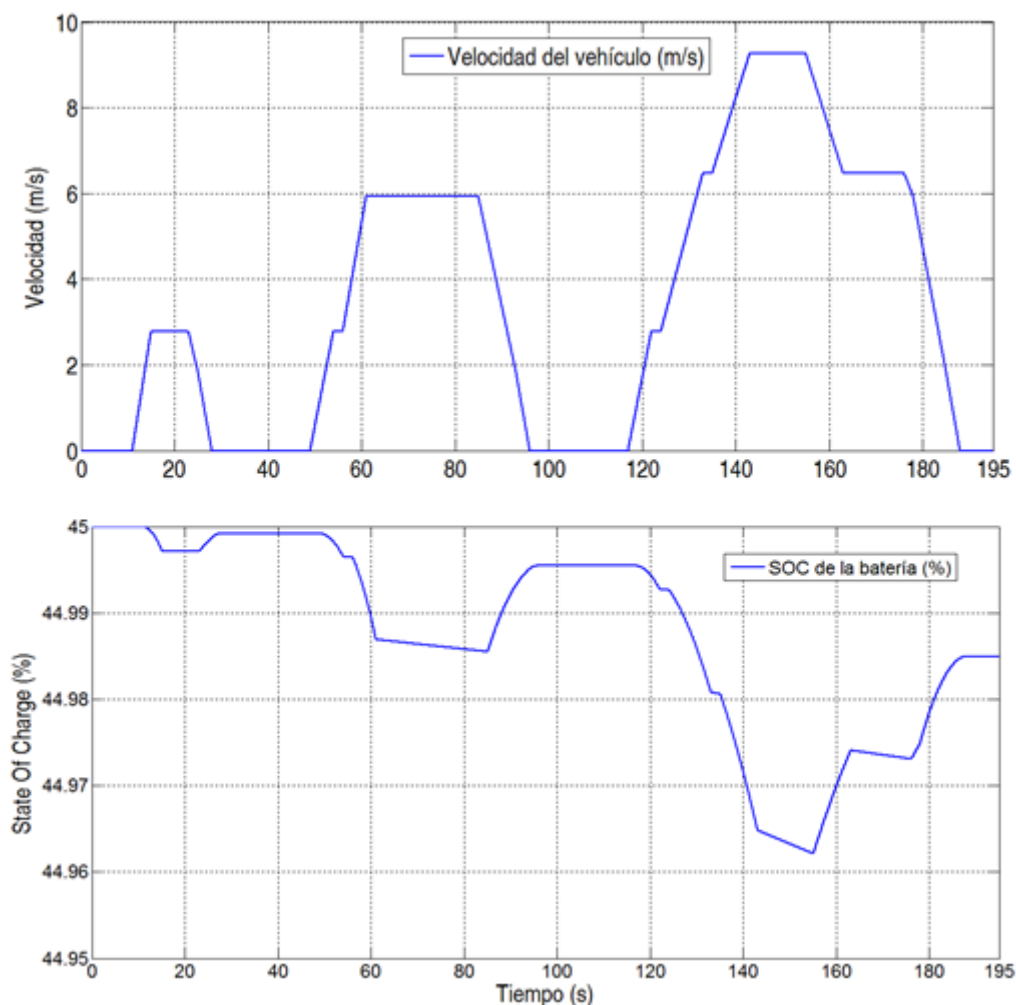


Figura 47: Análisis del SOC de la batería.

En vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que el modelo desarrollado funciona a la perfección. El modelo está organizado respetando todos los flujos de energía del sistema, locales y el global, y los distintos elementos permiten entender cuál es la función de cada subsistema dentro del todo global (acumular energía, distribuir, etc.) e identificarlos con una simple mirada sin necesidad de análisis. Además se ha verificado que la técnica de control de inversión desarrollada en esta metodología funciona muy satisfactoriamente, una vez que se asimilan los distintos tipos de inversión de cada uno de los elementos. Además tiene la característica de que siguiendo este patrón los grados de libertad del sistema surgen de una forma natural, pudiendo así desarrollar distintas estrategias de control. Las gráficas adjuntadas reflejan los resultados esperados, y tras el debido ajuste están carentes de sobre oscilaciones que pudieran traducirse en daños en el sistema. Por todo lo mencionado y tras

las debidas demostraciones se considera la técnica EMR una gran herramienta para la simulación, análisis y estudio de sistemas electromecánicos.

5.6 Nueva conexión del motor.

Hay un parámetro de gran importancia que no se ha analizado en el apartado anterior, y es la velocidad a la que gira el motor, que se adjunta en la Figura 48.

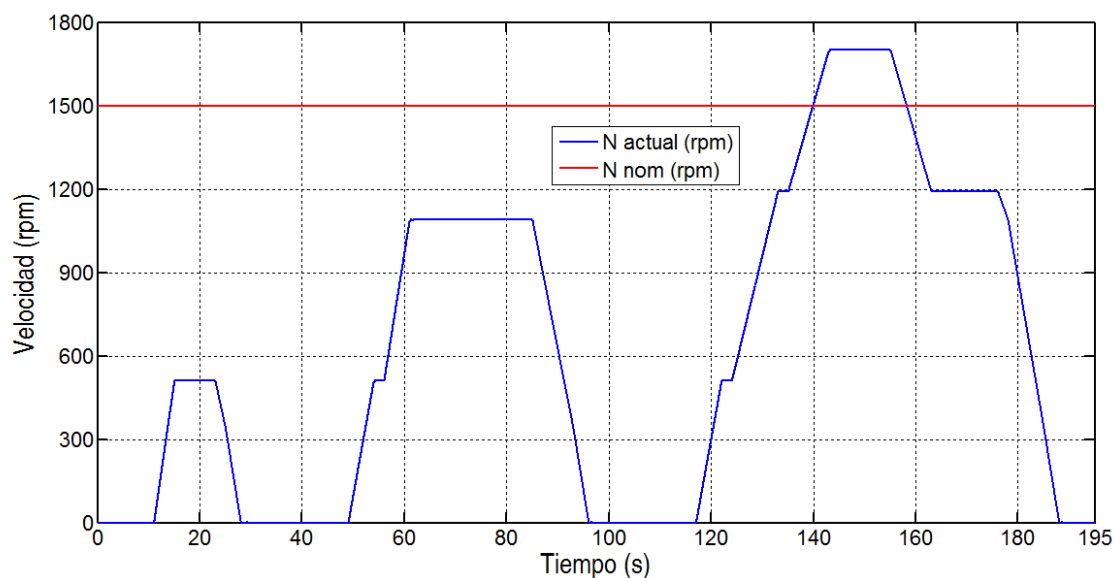


Figura 48: Velocidad del motor.

El motor usado en la simulación tiene 32 Kw de potencia y una velocidad nominal de 1500 rpm. Como se observa en la Figura 48 hay un punto en que el motor supera dicha velocidad nominal durante aproximadamente 20 segundos, lo que quiere decir que se sitúa en un punto de trabajo a potencia constante en vez de par constante como estaba antes (Región 2 de la Figura 49):

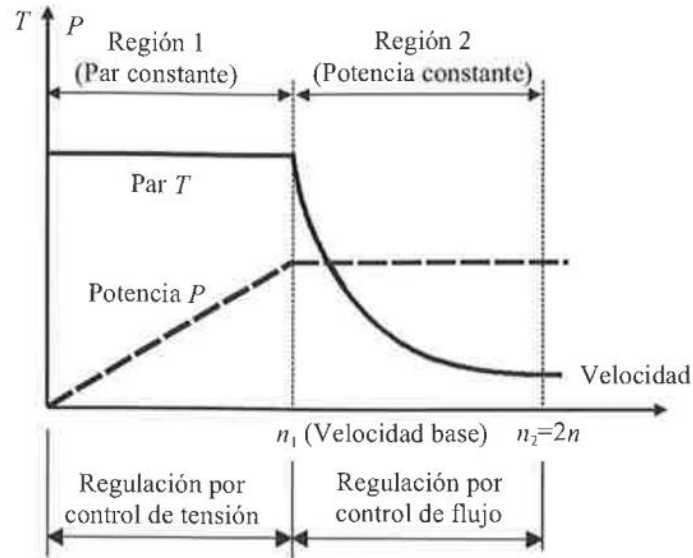


Figura 49: Región de Par constantes y Potencia constante [33].

De esta forma entramos a una zona donde el flujo deja de ser constante, para a través de él reducir el par manteniendo la potencia constante.

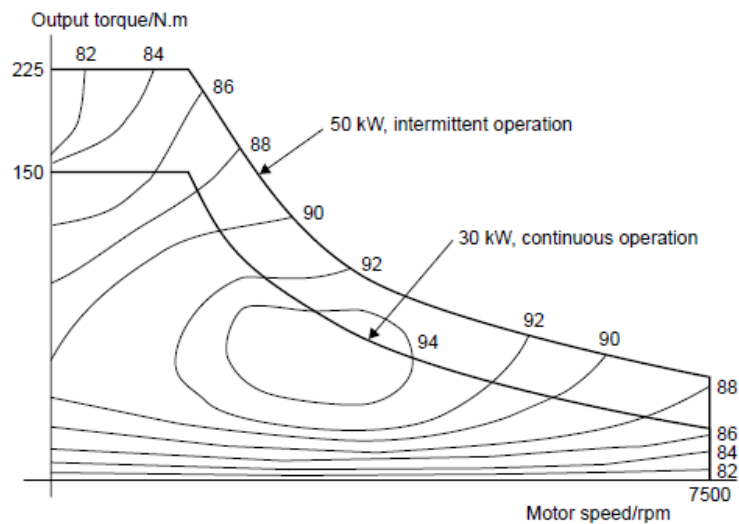


Figura 50: Mapa de eficiencia motor eléctrico 30 Kw [28].

Además como se ve en la Figura 50, estos motores son más eficientes cuando trabajan en esta región, lo cual también es un dato a tener muy en cuenta.

Hasta el momento durante la simulación este hecho no había sido tomado en cuenta en ningún momento, se había considerado que el motor solo trabajaba en la zona de par constante y el flujo había sido tomado como una constante. Una buena forma de acabar de confirmar la validez de la técnica EMR puede ser variar la simulación anterior de tal forma que podamos controlar por separado el inductor y el inducido de la máquina de corriente continua, para observar si el sistema responde adecuadamente cuando se supera la velocidad nominal.

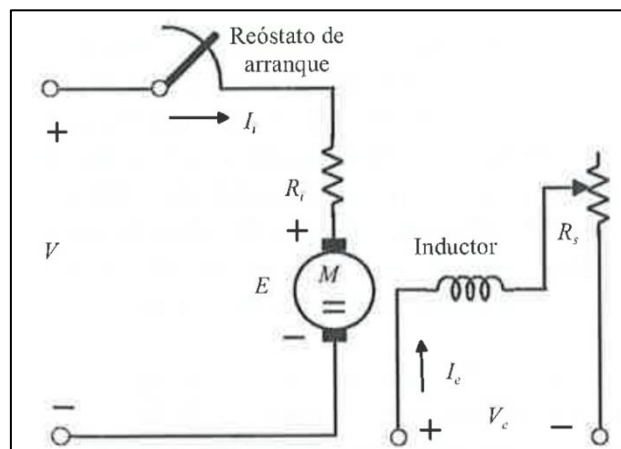


Figura 51: Esquema motor con excitación independiente [33].

Así en esta ocasión tendremos un motor con excitación independiente (Ver figura 51), donde poder controlar más variables que en el modelo simplificado del primer caso. Entre dichas variables está la intensidad del inductor, asociada al flujo.

Para realizar el esquema de conexión de la Figura 51 esta vez serán necesarios dos choppers en vez de uno, y al ser el sistema estudiado un vehículo con una sola batería, ambos choppers estarán conectados a la misma fuente de tensión. El nuevo desarrollo llevado a cabo se muestra en la figura 52.

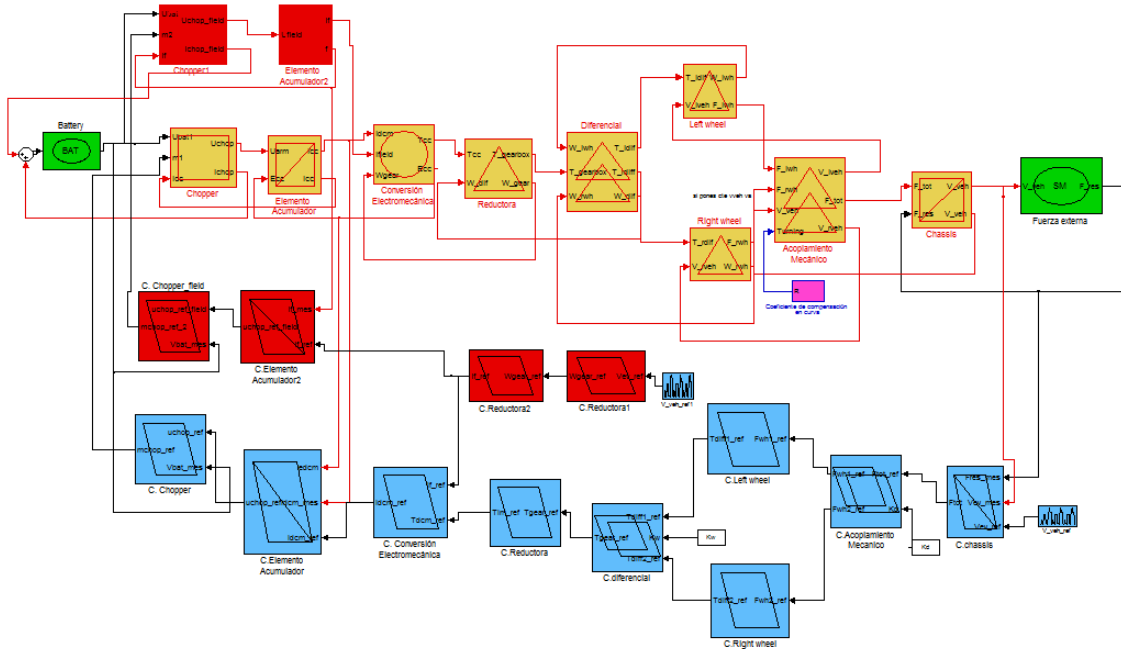


Figura 52: EMR y MCS con excitación independiente.

Al igual que en el apartado anterior el control se realiza de atrás hacia delante, y las modificaciones se presentan en color rojo para facilitar su visualización. En esta ocasión ha sido necesario seguir una cadena de control adicional a la expuesta en el apartado 5.4, que nos lleve a una intensidad de excitación adecuada a partir del mismo ciclo de conducción. De esta forma la ecuación 5.3 que se recuerda a continuación, varía al no estar ya presente el flujo dentro de la constante K_{dcm} ; por lo que para esta nueva simulación habrá que tener en cuenta dos intensidades dando lugar a la ecuación 5.18.

$$\begin{cases} T_{dcm} = k_{dcm} i_{dcm} \\ e_{dcm} = k_{dcm} \Omega_{gear} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\begin{cases} T_{dcm} = k_c i_{dcm} i_{field} \\ e_{dcm} = k_c \Omega_{gear} i_{field} \end{cases} \quad (5.18)$$

En esta ecuación 5.18 i_{field} tendrá un valor nominal constante que multiplicado por k_c de lugar a la constante K_{dcm} del apartado anterior, salvo cuando se supere la velocidad nominal del motor, que entonces i_{field} dejará de estar en su valor nominal, disminuirá, y con ella el par. A continuación se da un esquema ampliado de donde se realiza esta modificación, tanto en la parte de modelado (Ver Figura 53) como en la de control (Ver Figura 54). Cabe destacar que ahora entran a la batería dos corrientes en vez de una y que los dos choppers están alimentados por dicha batería.

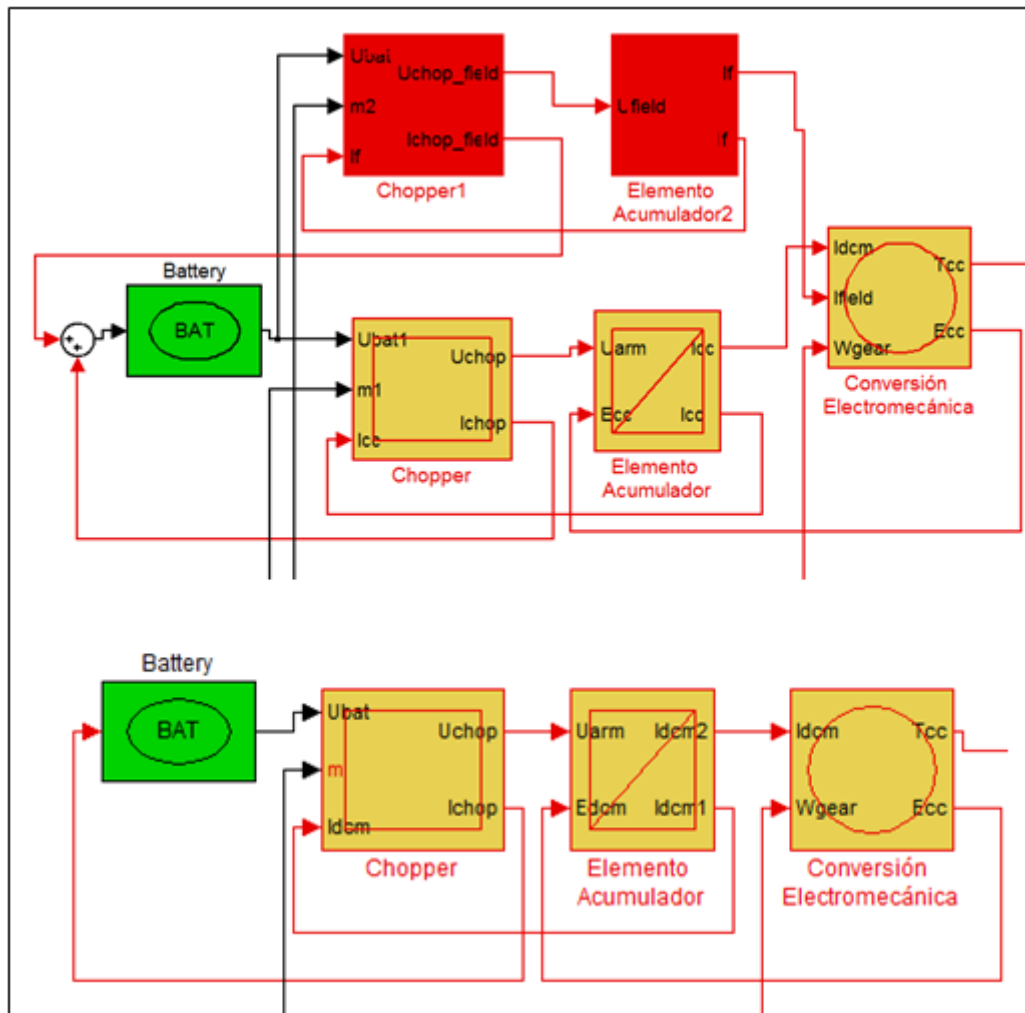


Figura 53: Modificación flujo variable EMR.

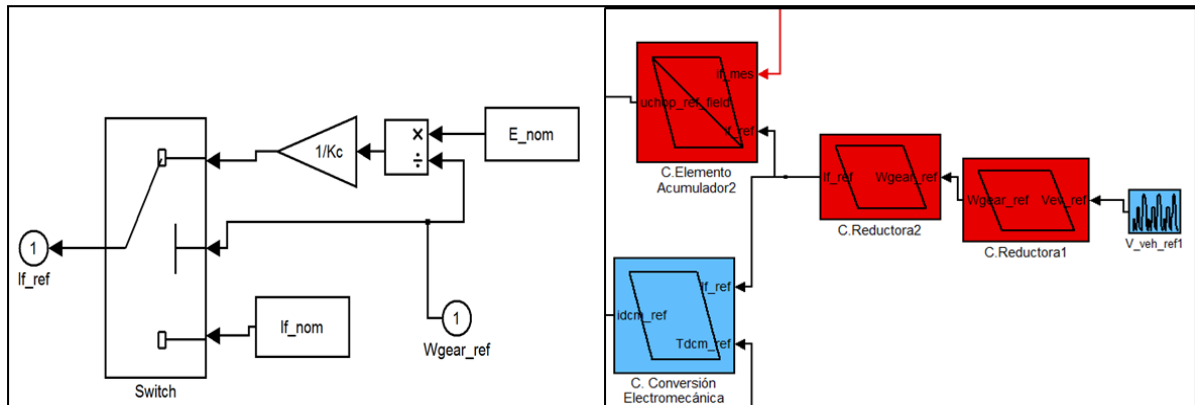


Figura 54: Modificaciones flujo variable MCS.

En la Figura 54 se ha adjuntado también el diagrama de bloques implementado en la parte de control, que define cuándo la intensidad de campo es constante y cuándo debe variar en función de que la velocidad sea superior o inferior a la nominal (condición impuesta en el interior del selector).

Como se ve todo cambio que se hace en la etapa de modelado, conlleva también una serie de variaciones en la etapa de control. De nuevo se invierten los debidos elementos igual que en el apartado anterior, y con el modelo organizado se procede a comprobar si la simulación da resultados coherentes.

En primer lugar se comprueba si el vehículo sigue adecuadamente el ciclo de conducción, al igual que en el apartado anterior. En la Figura 55 se observa que sigue adaptándose muy bien a las velocidades impuestas, dado que existe un retraso a la hora de frenar pero es prácticamente despreciable.

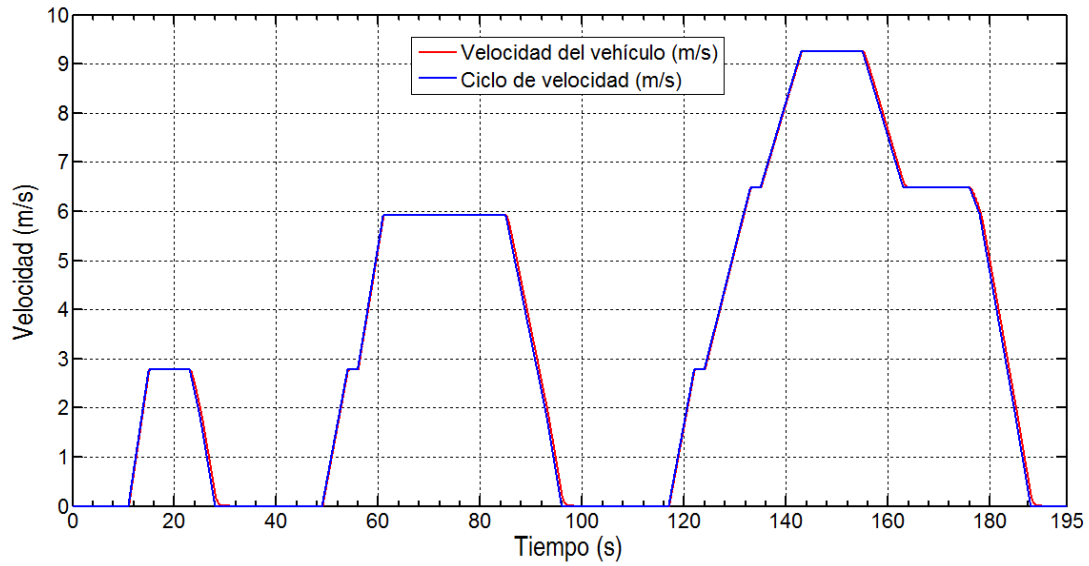


Figura 55: Nueva velocidad del vehículo

Como en esta ocasión hay dos choppers, será necesario comprobar que el nuevo chopper implementado funciona correctamente.

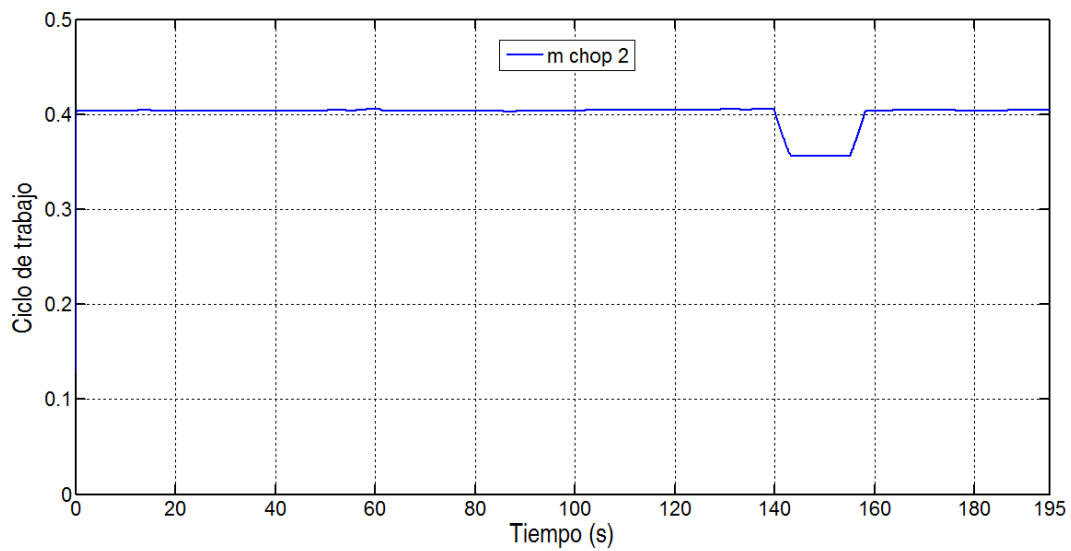


Figura 56: Ciclo de trabajo del segundo chopper.

Tras ver la Figura 56 se observa que su funcionamiento es el adecuado ya que da un valor prácticamente constante, hasta el segundo 140 que cae. En este segundo es cuando se supera la velocidad nominal del motor y por ello como habíamos planteado desciende la intensidad de campo (Ver Figura 57).

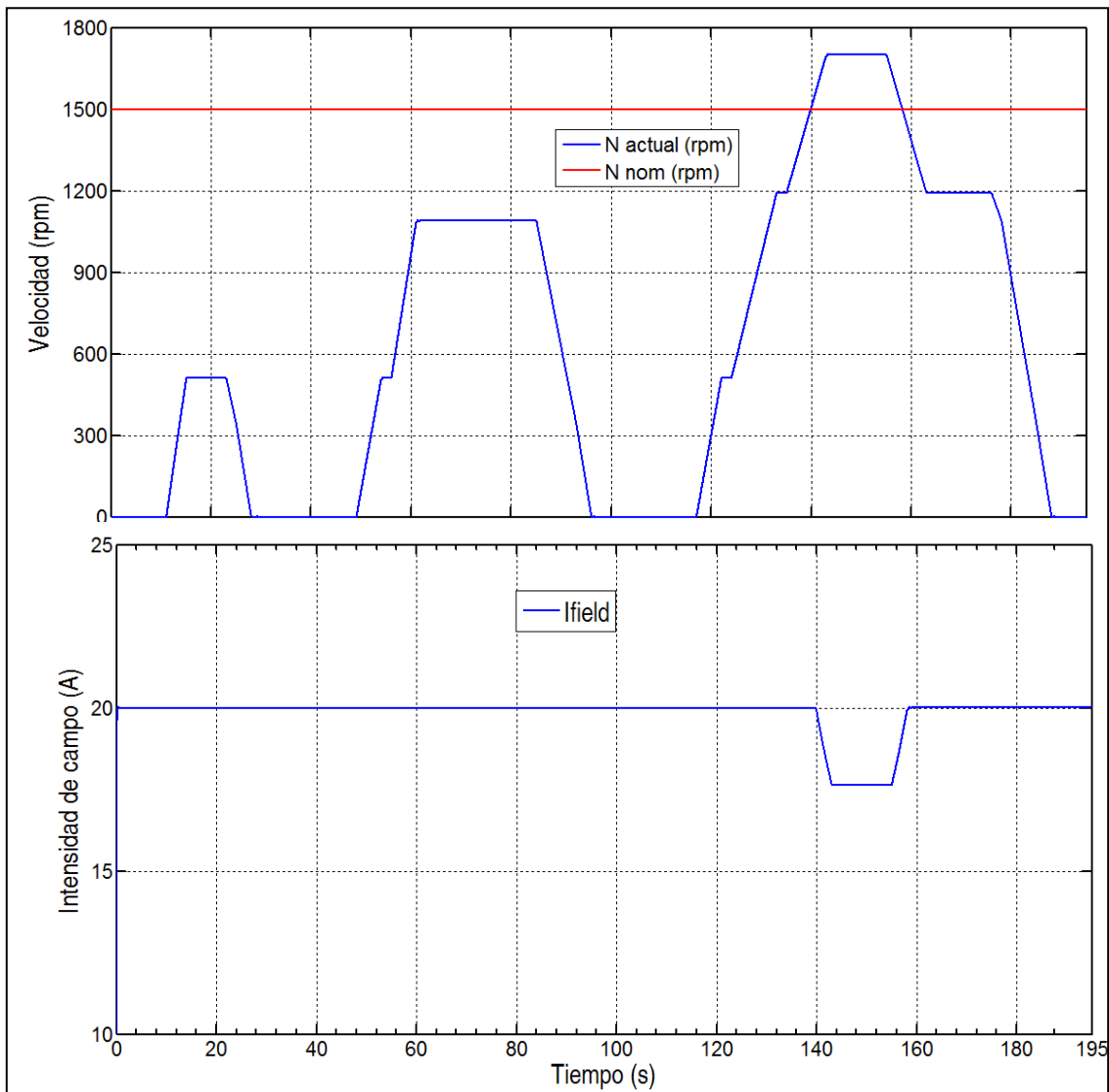


Figura 57: Intensidad de campo.

Finalmente se hace una comparación de pares para ver si realmente decae en ese intervalo al estar en zona de potencia constante:

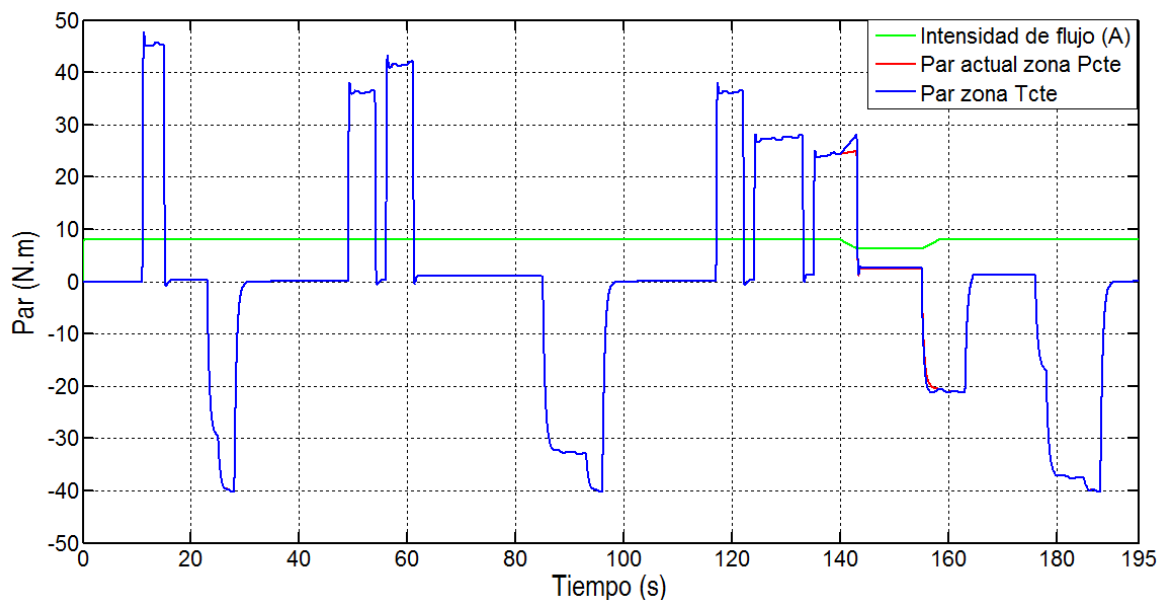


Figura 58: Comparación de pares.

Así se observa claramente en la Figura 58 cómo al decaer el flujo, se reduce también el par hasta que la velocidad vuelve a ser inferior a la nominal, la intensidad de flujo es constante y el par es el mismo que en el apartado anterior.

Con esta última simulación queda demostrado que usando esta metodología se pueden hacer cambios en el sistema a gusto del usuario de una forma muy intuitiva y ordenada, siguiendo una serie de principios y reglas. Estas reglas sirven de guía hacia una organización óptima de los elementos y permiten elaborar un control perfecto del sistema basado en la inversión.



Capítulo 6

Conclusión y futuros trabajos.

6.1 Conclusión.

Este trabajo fin de grado se ha llevado a cabo para destacar de una forma teórica y práctica, la utilidad de los distintos formalismos gráficos a la hora de representar sistemas electromecánicos. Estos formalismos suponen una etapa intermedia entre el modelado y la simulación, y aunque a menudo se ignoran por motivos como la falta de tiempo para realizar el trabajo o porque el usuario ya es experto en el tema, tras la realización de este trabajo se recomiendan utilizar ya que sirven para organizar dichos modelos de acuerdo a unas reglas específicas, buscando resaltar diversas propiedades concretas. En este trabajo el objetivo de estudio de los formalismos gráficos es la gestión de energía, para poner en evidencia las conversiones y transferencias de ésta, así como los diversos flujos de energía mediante la combinación de dos variables que determinan la potencia instantánea. Según cuál de estos formalismos se utilice se hará desde un enfoque funcional (COG) o estructural (Bond Graph). De entre todos estos formalismos desarrollados hasta la fecha se concluye que el óptimo es el EMR pues consta de ambos enfoques, y permite el control de los distintos subsistemas y la supervisión del sistema globalmente.

La filosofía del EMR es clara. Consiste en dividir un sistema en subsistemas más simples, clasificando estos subsistemas en los distintos elementos establecidos en la metodología, buscando que sean representativos según sus propiedades energéticas (distribución de energía, fuentes, conversión, almacenamiento, etc.). De esta forma, una vez conocida la metodología, es posible observar de una forma muy rápida y visual lo que ocurre realmente en el sistema. Tras esta división y clasificación en subsistemas, es posible observar cómo interactúan éstos no solo entre sí, sino también con el medio ambiente y cómo funciona el sistema como un todo. Cada subsistema puede pertenecer a un área distinta de la ciencia por ejemplo a la mecánica o la electrónica, por lo que esta técnica es especialmente útil para ayudar al usuario a conectar sistemas de diferentes dominios de una forma intuitiva, mejorando así la concepción que se tiene de éste.

EL EMR consta de dos etapas claramente definidas (modelado y control) y sigue las reglas de tres principios básicos para su funcionamiento. El principio de interacción, que se basa en cómo interaccionan los subsistemas entre sí y con el medio ambiente, la forma en que una acción de un subsistema sobre otro induce por parte de éste una reacción, y cómo



mediante su producto se obtiene la potencia instantánea intercambiada. El principio de causalidad, en donde solo es válida la causalidad integral y que implica que la salida de un subsistema con dependencia temporal será una función integral de la entrada, o una relación causa efecto si no depende del tiempo.

El tercer principio es el principio de inversión, y es el que da especial atractivo a esta técnica ya que siguiendo una serie de reglas, se va invirtiendo uno a uno los distintos elementos permitiendo un control eficiente del sistema respetando sus propiedades físicas. Además de esta forma podemos encontrar de una forma natural los grados de libertad del sistema que nos permiten llevar a cabo distintas estrategias de estudio, así como la localización de los distintos reguladores. El control debe definir la entrada apropiada que aplicar al sistema para producir la salida deseada.

Se han realizado dos simulaciones para comprobar de una manera práctica cómo funciona la técnica así como los principios en los que se basa. Se han concluido dichas simulaciones con un resultado realmente favorable, comprobando la validez de la técnica y la de todas sus ventajas formuladas, tales como un correcto modelo integral físico, una organización visual de los elementos que ayuda a una mejor concepción del sistema, una mayor facilidad para encontrar grados de libertad, ausencia de sobre oscilaciones, tiempos de simulación relativamente bajos, un mejor análisis de los flujos de energía y potencia intercambiados o un correcto control del sistema basado en la inversión.

Además de todas sus ventajas expuestas en el trabajo que concluyen con su validez para el campo de la investigación, también se intuye una importante aplicación didáctica. El EMR puede tener una importante contribución a la enseñanza, en especial de la ingeniería eléctrica, y su uso permitirá al estudiante entender mejor los sistemas eléctricos como elementos en interacción para una aplicación determinada. Sin una metodología clara, si se conectan todos los bloques en la misma ventana es común caer en errores de modelado difíciles de encontrar, lo que implica gastar mucho tiempo en su búsqueda. Esto en el EMR no ocurre pues todo elemento debe ser revisado antes de ser conectado al siguiente, reduciendo así las posibilidades de fallo y facilitando su búsqueda en caso de haberlos.

Tras la realización del trabajo se puede afirmar que han alcanzado los objetivos que se perseguían desde un principio, explicando la utilidad de los distintos formalismos gráficos para la gestión de la energía, determinando contrastadamente que el EMR es el más completo. De esta forma se exponen con detalle las características, elementos y principios en los que se fundamenta el EMR, de una forma teórica y práctica que permite determinar con seguridad la validez y las ventajas de esta metodología al obtener resultados satisfactorios. Se concluye diciendo que su principal ventaja es ayudar a modelar y controlar sistemas multidisciplinares, y su dualidad funcional-estructural es la base de su atractivo.



6.2 Trabajos futuros.

Una vez finalizada la realización de este proyecto, en el que se expone la metodología EMR, se descarta emplear otros formalismos gráficos en las líneas de trabajo futuras pues se considera que seguir trabajando con el EMR puede aportar resultados más satisfactorios. De esta forma la línea de trabajos futuros que se recomienda seguir una vez asimilados los conceptos de esta técnica de una forma teórica y práctica, sería llevar la técnica EMR a sistemas de mayor complejidad o con menos simplificaciones de la realidad, donde se pueda realizar una nueva validez o poner de relieve carencias de la técnica que hay que mejorar.

Sin duda una importante aplicación a seguir desarrollando en trabajos futuros es la de los vehículos eléctricos, ahora que su mercado está evolucionando. Es evidente que aquí entran en juego otros factores como preocupaciones comerciales, o el tipo de arquitectura que tenga el vehículo, pero sin duda la gestión eficiente de la energía tiene una importancia vital para dar un rendimiento satisfactorio al sistema. El EMR puede ayudar a una mejor distribución de esta energía, respetando las propiedades físicas del sistema y aportando una visión global de todos los elementos que lo forman.

De igual forma sería interesante desarrollar trabajos relacionados con las energías renovables, ya que es un extenso campo en constante desarrollo y el EMR también podría ser de utilidad al poner de relieve grados de libertad que manifiesten nuevas estrategias de actuación sobre los sistemas.

De todas formas el EMR no es una herramienta universal capaz de resolver todos los problemas, está todavía en su infancia y le queda un largo camino por recorrer, por lo que será necesario también trabajos para desarrollar y mejorar algunos aspectos de la técnica. Aunque los principios que formula son interesantes, puede no estar aún preparada para representar grandes sistemas como redes eléctricas.

Su aparente simplicidad oculta que a menudo es difícil construir el EMR de un sistema. No siempre es fácil asociar debidamente los elementos y determinar sus entradas y salidas, siendo también necesario definir el grado de simplificaciones e hipótesis aceptadas, ya que de ello dependerá que el mismo componente pueda estar representado por varios elementos. Es necesario conocer las leyes físicas que los rigen y por ello a menudo se necesita un experto en el tema sobre el que se esté elaborando el EMR, por lo que sería interesante trabajar en establecer nuevas reglas y especificaciones que ayudasen a encontrar el modelo de sistema más complejos así como sus entradas y salidas de una forma más sencilla para el usuario.



Además, el EMR no es una herramienta de modelado detallado al uso, pues por ejemplo, aunque indica la ubicación de los reguladores necesarios para controlar el sistema no detalla que tipo de regulador será necesario ni sus parámetros de ajuste, por lo que se necesitan conocimientos en automática para llevarlo a cabo correctamente. Por ello también sería interesante trabajar en una mejora futura para este aspecto de la metodología.



Capítulo 7

Presupuesto del trabajo.

En este capítulo se estima el coste del proyecto desarrollado. El trabajo ha consistido en el análisis y validez de una técnica de modelado y control de sistemas, y por ello no se ha desarrollado ningún dispositivo o aparato físico. Esta es la razón por la que el presupuesto se basa en el trabajo que desarrolla el ingeniero, así como el equipo que utiliza, ya que tampoco se ha llevado a cabo subcontratación de tareas.

En el sueldo del ingeniero se incluyen costes de electricidad, comida y transporte, y éste se establece por horas debido a que el desarrollo de este trabajo no ha requerido una jornada laboral completa.

Tras futuros trabajos, en los que se lleve esta técnica a la aplicación de sistemas de mayor complejidad, se elabore un nuevo análisis y con los conocimientos de ambos proyectos, se podrían llevar a cabo charlas en universidades con simulaciones prácticas que impulsasen el desarrollo y uso del EMR, pero eso queda fuera de este trabajo y por ello en el presupuesto no aparecen estas variables de costes de viajes o mayor número de equipos.

Tabla 6: Presupuesto del proyecto

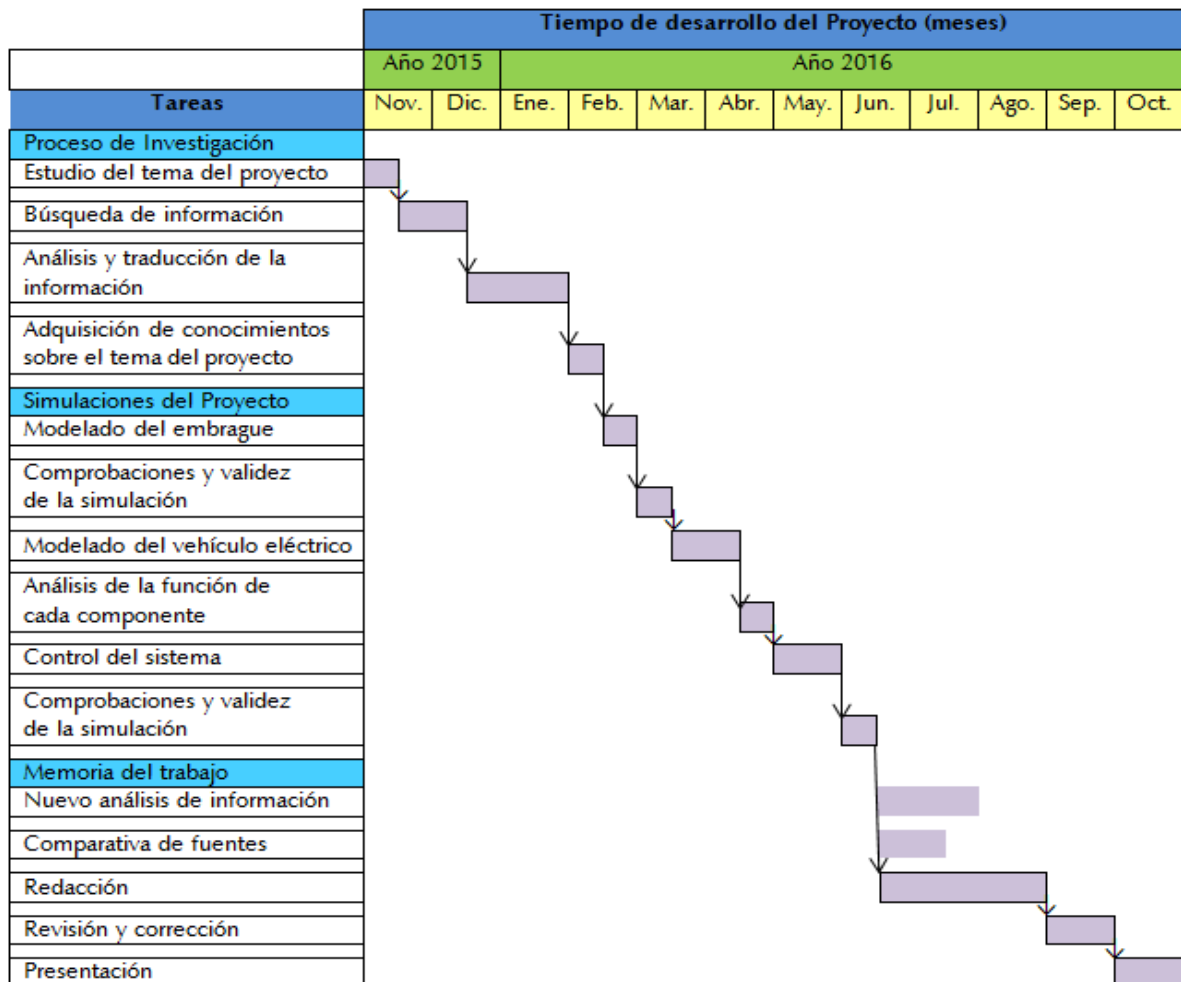
<i>Tipo coste</i>	<i>Concepto</i>	<i>Horas</i>	<i>€/h</i>	<i>Total (€)</i>
<i>Personal</i>	Ingeniero	500	15	7500
<i>Material</i>	Ordenador portátil Amortización 60 meses. Uso estimado 5 meses.			80
	Licencia Microsoft Office 2016			150
	Licencia Matlab Student R2016a			135
<i>Total</i>				7865 €

Capítulo 8

Planificación del proyecto.

A continuación se detallan todas las tareas realizadas necesarias para la consecución del proyecto, así como los distintos tiempos de desarrollo de cada una de ellas y la duración total del proyecto.

Tabla 7: Planificación del proyecto.





ANEXO

Tablas de Parámetros



Tabla A.1: Parámetros simulación embrague

Parámetro	Valor	Unidades
Par de torsión al inicio de la transmisión. T_1	40	N.m
Par de torsión al final de la transmisión. T_4	25	N.m
Momento de inercia eje primario. J_1	0,2	Kg.m ²
Momento de inercia eje secundario. J_2	0,6	Kg.m ²
Coeficiente de fricción eje primario. f_1	10^{-3}	N.m.s
Coeficiente de fricción eje secundario. f_2	$2 \cdot 10^{-3}$	N.m.s
Coeficiente de fricción estático del embrague. μ_{stat}	0,28	-----
Radio medio del plato de fricción. R_{clutch}	0,1	m
Coeficiente de fricción dinámica. α_{dyn}	10^{-3}	s/rad
Fuerza normal actuante. $F_{n,max}$	4000	N



Tabla A.2: Principales parámetros batería NIMH

Parámetro	Valor	Unidades
<i>Voltaje nominal de celda</i>	1,2	V
<i>Número total de celdas</i>	120	-----
<i>Voltaje nominal</i>	144	V
<i>Capacidad</i>	6,5	Ah
<i>Estado de carga inicial (SOC)</i>	45%	-----
<i>número de módulos en serie</i>	55	-----
<i>número de módulos en paralelo</i>	4	-----
<i>Constante de tiempo</i>	0,1	s



Tabla A.3: Principales parámetros máquina de corriente continua.

Parámetro	Valor	Unidades
<i>Tensión nominal de la armadura</i>	400	V
<i>Corriente de armadura nominal</i>	89,5	A
<i>Velocidad nominal</i>	2.840	r.p.m.
<i>Velocidad máxima</i>	6.000	r.p.m.
<i>Potencia eléctrica de entrada nominal</i>	35.800	W
<i>Potencia útil nominal</i>	32e3	W
<i>Momento de inercia</i>	0,12	Kg.m ²
<i>Resistencia de armadura</i>	0,35	Ohm
<i>Inductancia de armadura</i>	6,5e-3	H
<i>Coefficiente de par K_{dcm}</i>	1,24	----



Tabla A.4: Principales parámetros del vehículo eléctrico

Parámetro	Valor	Unidades
Rueda		
<i>Diámetro</i>	0,52	m
<i>Momento de inercia</i>	4,3	Kg.m ²
Reductora y diferencial		
<i>Coefficiente de reducción</i>	5	-----
<i>Eficiencia de la reductora y diferencial</i>	0,8	-----
Chasis		
<i>Ancho del coche eléctrico</i>	1,6	m
<i>Masa equivalente total del vehículo</i>	1000	Kg
<i>Área frontal</i>	2	m ²
Medio ambiente		
<i>Gravedad</i>	9,81	m/s ⁻²
<i>Coefficiente de arrastre</i>	0,35	-----
<i>Densidad del aire</i>	1,223	kg/m ⁻³
<i>Constante aerodinámica</i>	0,428	-----
<i>Grado de inclinación</i>	0	º



Bibliografía

- [1] Chan, C., Bouscayrol, A. and Chen, K. Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 59(2), pp.589-598, 2010.
- [2] Booch, G., Rumbaugh, J., Jacobson, I. and Garca' Molina, J. El lenguaje unificado de modelado. Madrid: Pearson Educacin, 2006.
- [3] Jiménez López, R. Análisis y Diseño Orientado a Objetos de un Framework para el Modelado Estadístico con MLG. Tesis Doctoral. Universitat de les Illes Balears, 2003.
- [4] Pierquin, J. Contribution a la commande des systemes multimachines multiconvertisseurs. Docteur. L'universite des sciences et technologies de Lille, 2016.
- [5] Bouscayrol, A. Formalismes de representation et de commande appliques aux systemes electromecaniques multimachines multiconvertisseurs. Docteur. L'universite des sciences et technologies de Lille, 2003.
- [6] Bouscayrol, A., Chan, C. and Barrade, P. System, Energy and Causality. (Joint Summer School EMR'2012).
- [7] Chrenko, D. Tesis. Energetic Macroscopic Representation Modeling and Control of a Low Temperature Fuel Cell System Fed by Hydrocarbons. Docteur de l'Université de Franche-Comté, 2008.
- [8] Formalismes graphiques de modélisation et de commande de systèmes électromechaniques. École d'été, July 2005.
- [9] Silva, L., Bouscayrol, A., De Angelo, C. and Lemaire-Semail, B. Coupling Bond Graph and Energetic Macroscopic Representation for Electric Vehicle Simulation. *Mechatronics*, 24(7), pp.906-913, 2014.
- [10] Gawthrop, P. and Bevan, G. Bond-graph modeling. *IEEE Control Syst. Mag.*, 27(2), pp.24-45, 2007.
- [11] D. Karnopp and R. Rosenberg, *System Dynamics: A Unified Approach*. New York: Wiley, 1975.



- [12] H. Paynter, Analysis and Design of Engineering Systems. Cambridge, MA: MIT Press, 1961.
- [13] Borutzky, W. Bond graph modelling of engineering systems. New York: Springer, 2011.
- [14] Béarée R., Barre P.J., Hautier J.P., "Control structure synthesis for electromechanical systems based on the concept of inverse model using Causal Ordering Graph", 2006.
- [15] Barre P. J., Bouscayrol A. "Inversion-based control of electromechanical systems using causal graphical descriptions" University of Lille, 2006.
- [16] <http://www.emrwebsite.org>
- [17] J. P. Hautier, P. J. Barre, "The causal ordering graph – A tool for modelling and control law synthesis", *Studies in Informatics and Control Journal*, vol. 13, no. 4, December 2004, pp. 265-283.
- [18] A. Bouscayrol, A. Bruyère, P. Delarue, F. Giraud, B. Lemaire-Semail, Y. Le Menach, W. Lhomme, F. Locment, "Teaching drive control using Energetic Macroscopic Representation - initiation level", EPE'07, Aalborg (Denmark), September 2007.
- [19] A. Bouscayrol, P. Delarue, F. Giraud, X. Guillaud, X. Kestelyn, B. Lemaire-Semail, W. Lhomme, "Teaching drive control using Energetic Macroscopic Representation - expert level", 2009.
- [20] Chen, K., Bouscayrol, A. and Lhomme, W. Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based Control: Application to an Electric Vehicle with an Electrical Differential. *IAEV*, 6(1), pp.1097-1102, 2008.
- [21] J. N. Verhille, A. Bouscayrol, P.J. Barre, J.C. Mercieca, J.P. Hautier, E. Semail. "Torque tracking strategy for anti-slip control in railway traction systems with common supplies", 2004.
- [22] W. Lhommel, A. Bouscayrol, P. Barrade "Simulation of a Series Hybrid Electric Vehicle based on Energetic Macroscopic Representation", 2004.
- [23] Bouscayrol, A., Davat, B., de Fornel, B., François, B., Hautier, J., Meibody-Tabar, F., Monmasson, E., Pietrzak-David, M., Razik, H., Semail, E. and Benkhoris, F. "Control structures for multi-machine multi-converter systems with upstream coupling". *Mathematics and Computers in Simulation*, 63(3-5), pp.261-270, 2003.



- [24] Bouscayrol, A., Davat, B., de Fornel, B., François, B., Hautier, J., Meibody-Tabar, F., Monmasson, E., Pietrzak-David, M., Razik, H., Semail, E. and Benkhoris, F. Control structures for multi-machine multi-converter systems with upstream coupling. *Mathematics and Computers in Simulation*, 63(3-5), pp.261-270, 2003.
- [25] Lhomme, W., Trigui, R., Delarue, P., Jeanneret, B., Bouscayrol, A. and Badin, F. Switched Causal Modeling of Transmission With Clutch in Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 57(4), pp.2081-2088, 2008.
- [26] LuK Clutch Course, *An Introduction to Automotive Clutch Technology*, AS autoteile service GMBH & CO. March 2006.
- [27] A. Serrarens, M. Dassen, and M. Steinbuch, "Simulation and control of an automotive dry clutch," in *Proc. IEEE-ACC*, Boston, MA, Jun.–Jul. 2004, vol. 5, pp. 4078–4083.
- [28] Larminie, J. and Lowry, J. *Electric vehicle technology explained*. West Sussex, England: J. Wiley, 2003.
- [29] <http://www.endesaeduca.com>
- [30] Ferreira, A., Pomilio, J., Spiazzi, G. and de Araujo Silva, L., Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(1), pp.107-115, 2008.
- [31] M. Chen and G.A. Rincón-Mora, "An Accurate Electrical Battery Model Capable Of Predicting Runtime and I-V Performance", *IEEE Georgia Tech Analog and Power IC Design Lab*, 2005.
- [32] Pesaran, A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 110(2), pp.377-382, 2002.
- [33] Fraile Mora, J. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw Hill Interamericana de España, 2008.
- [34] Silva, L., Bouscayrol, A., De Angelo, C. and Lemaire-Semail, B. Coupling Bond Graph and Energetic Macroscopic Representation for Electric Vehicle Simulation. *Mechatronics*, 24(7), pp.906-913, 2014.