

Diseño de un simulador en tiempo real de un sistema híbrido celdas de combustible/baterías para
vehículos eléctricos

Andry Yesenia Estupiñan Aparicio

Tesis de Grado para optar al título de Ingeniera Electricista

Director:

María Alejandra Mantilla Villalobos

Doctora en Ingeniería

Codirector:

Javier Enrique Solano

Doctor en ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios,

Por permitirme tener la oportunidad de realizar esta carrera por la que tanto me he esforzado,
solo él sabe todo los sacrificios que tuve que hacer para lograrlo.

A mi familia,

Por estar siempre para mí, ser mi apoyo incondicional, por motivarme y animarme a ser
siempre mejor, lograr todas las metas que me propongo, por confiar en mí recordandome todos
los días de todo lo que puedo ser capaz.

A mis profesores,

Por ser mi acompañamiento durante la carrera, por siempre estar dispuestos a escuchar y atender
mis dudas, por confiar en mí y apoyarmen.

Andry Yesenia Estupiñan Aparicio

Agradecimientos

Doy mis sinceros agradecimientos a todos los miembros que hacen parte de la Universidad Industrial de Santander porque cada uno de ellos son una pieza importante de la universidad y permiten que personas como yo puedan lograr sus sueños, agradezco a todas las personas que siempre confiaron en mí, a mi directora María Alejandra Mantilla porque a pesar de todas sus ocupaciones siempre busco un momento para ayudarme, para escucharme y para enseñarme, siempre dispuesta y motivándome a seguir cuando sentía que ya no podía con mi proyecto, por tenderme la mano cuando necesite un trabajo, a mi codirector Javier Solano porque siempre confió en mis capacidades y ofrecía su palabra en garantía de mis destrezas, también agradezco a todos mis compañeros de carrera que de una u otra forma estuvieron acompañándome en mi proceso y fueron un apoyo cuando los necesité, a mi familia, sin duda sin ustedes no estaría alcanzando este logro en mi vida, ustedes son mi motor, me impulsan cada día a seguir creciendo en todos los aspectos de mi vida, a mi amiga Pamela Mendoza con la que esta carrera me premió y que a pesar de la distancia me ha ofrecido su más sincera amistad y antes que todo, le agradezco a Dios por nunca dejarme desfallecer y siempre darme sabiduría para tomar decisiones.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.1. Objetivo General.....	13
1.2. Objetivos Específicos	13
2. Modelo del sistema.....	14
2.1. Especificaciones del vehículo	15
2.2. Ecuaciones representativas.....	16
3. Sistema de control y gestión.....	21
3.1. Sistema de almacenamiento de energía.....	23
3.2. Sistema de tracción.....	26
4. Diseño del simulador en tiempo real	28
4.1. Determinación de modelos del sistema en tiempo discreto	30
4.2. Cálculo de las constantes de los controladores y discretización	35
4.3. Diseño e implementación del sistema de envío y lectura de datos	37
4.4. Configuración de los bloques en Simulink	43
5. Análisis de resultados de simulación.....	48
6. Observaciones.....	57
7. Conclusiones.....	58
Referencias Bibliográficas	60

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Diagrama general de conexión del sistema	14
Figura 2 Esquema del vehículo pila de combustible/batería	15
Figura 3 Modelo básico de un boost chopper	17
Figura 4 Esquema del modelo de la batería.....	18
Figura 5 Mapa de eficiencia del subsistema de tracción n_tract	19
Figura 6 EMR original basado en el estudio del vehículo eléctrico y esquema de su respectivo control	22
Figura 7 Esquema de control para obtener uhfc_ref.....	24
Figura 8 Esquema que representa la ecuación para determinar el SOC	25
Figura 9 Esquema que representa la ecuación para determinar la corriente ifc_ref	25
Figura 10 Esquema representativo del control PI en Simulink	27
Figura 11 Esquema representativo de la ecuación (19)	27
Figura 12 Parámetros de la inductancia.....	31
Figura 13 Parámetros de la batería Li-ion	33
Figura 14 Parámetros para constantes de control de corriente	35
Figura 15 Parámetros para constantes del control de velocidad.....	36
Figura 16 Modelo Planta en Simulink.....	38
Figura 17 Modelo Control en Simulink.....	38
Figura 18 Configuración del bloque ePWM.....	44
Figura 19 Habilidad del puerto	45
Figura 20 Habilidad de la entrada y configuración del conteo	46
Figura 21 Configuración del bloque ADC.....	48
Figura 22 Gráfica de velocidad modelo original	49
Figura 23 Gráfica de velocidad modelo discretizado	49
Figura 24 Error de velocidad de referencia entre los modelos	50
Figura 25 Error de velocidad de simulación entre los modelos.....	50
Figura 26 Tensiones de simulación original	51
Figura 27 Tensiones de simulación discretizadas.....	51
Figura 28 Error de tensión ufc entre los modelos.....	51
Figura 29 Error de tensión ubat entre los modelos	52
Figura 30 Potencias del modelo original	52
Figura 31 Potencias del modelo discretizado	53
Figura 32 Error de Pbus entre los modelos.....	53
Figura 33 Error de Pfc entre los modelos	53
Figura 34 Error de Pbat entre los modelos	54
Figura 35 Energías del modelo original.....	54

Figura 36 Energías del modelo discretizado.....	55
Figura 37 Error de tensión Ebat entre modelos	55
Figura 38 Error de tensión Efc entre modelos	55
Figura 39 Error de tensión Ebus entre modelos.....	56
Figura 40 SOC del modelo original.....	56
Figura 41 SOC del modelo discretizado.....	56
Figura 42 Error de SOC de las baterías entre modelos.....	57
Figura 43 Error de SOC de hidrogeno entre los modelos.....	57

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Parámetros de la celda de combustible/batería y sistema en general.....	16
Tabla 2 Nomenclatura de los pines en la tarjeta	41
Tabla 3 Pines de salida y entrada de las señales de medida.....	42
Tabla 4 Pines de salida y entrada de las señales de control	43

Resumen

Título: Diseño de un simulador en tiempo real de un sistema híbrido celdas de combustible/baterías para vehículos eléctricos *

Autor: Andry Yesenia Estupiñan Aparicio **

Palabras Clave: Simulación en tiempo real, Sistema de Control, Celdas de combustible, Baterías, Vehículo eléctrico, Convertidor DC/DC elevador, Sistema de tracción.

Descripción: El siguiente trabajo de grado presenta el diseño de un simulador en tiempo real de un sistema híbrido empleado como fuente de alimentación para un prototipo de vehículo eléctrico. El diseño del simulador se plantea teniendo en cuenta su posterior implementación por medio de dos tarjetas de referencia LAUNCHXL TMS320F28379D de Texas Instruments, donde en una de ellas se ejecutaría la planta del sistema que está conformada por las fuentes de alimentación (celdas de combustible/baterías), los convertidores de potencia y el perfil del vehículo eléctrico; y en la otra tarjeta se ejecutaría el sistema de control y gestión del vehículo. Teniendo en cuenta lo anterior, el trabajo de grado presenta el diseño del sistema de envío y recepción de señales analógicas (señales de corriente, tensión, velocidad y diferentes fuerzas que se tienen en cuenta para el desarrollo normal del vehículo y el control del mismo) entre las dos tarjetas de control mencionadas. Asimismo, se determinan los modelos en tiempo discreto de los diferentes componentes del sistema para su posterior implementación en las tarjetas de control, y se realiza una comparación de los resultados de la simulación fuera de línea de estos modelos en tiempo

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Director: María Alejandra Mantilla Villalobos. Dra. en Ingeniería. Codirector: Javier Enrique Solano. Dr. en Ingeniería.

discreto, con respecto a la simulación del modelo original tomado del desafío *IEEE-VTS Motor Vehicles Challenge 2017*, verificando que el comportamiento del modelo determinado corresponde a lo esperado.

Abstract

Title: Design of a real-time simulator of a fuel cell/battery hybrid system for electric vehicles *

Author: Andry Yesenia Estupiñan Aparicio **

Key Words: Real time simulation, Control System, Fuel cells, Batteries, Electric vehicle, Boost Converter, Traction system.

Description: The following work presents the design of a real-time simulator of a hybrid system used as a power supply for an electric vehicle prototype. The simulator design is proposed taking into account its subsequent implementation by means of two Texas Instruments LAUNCHXL TMS320F28379D reference boards, where in one of them the system plant would be executed, which is formed by the power sources (fuel cells/batteries), the power converters and the electric vehicle profile; and in the other board the vehicle control and management system would be executed. Considering the above, the degree work presents the design of the system for sending and receiving analog signals (current signals, voltage, speed and different forces that are taken into account for the normal development of the vehicle and its control) between the two control cards mentioned above. Likewise, the discrete-time models of the different components of the system are determined for their subsequent implementation in the control cards, and a comparison of the results of the offline simulation of these discrete-time models is performed, with respect to the simulation of the original model taken from the IEEE-VTS Motor Vehicles Challenge 2017, verifying that the behavior of the determined model corresponds to what is expected.

* Degree Work

** Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering.
Director: María Alejandra Mantilla Villalobos. PhD in Engineering. Codirector: Javier Enrique Solano. PhD in Engineering.

Introducción

A través de los años ha sido indispensable una evolución en los softwares que permita simular los sistemas y los fenómenos que se encuentran en el entorno, con el fin de poner a prueba los mismos y tener un pronóstico de su funcionamiento en casos hipotéticos, sin tener que afectar el sistema en el mundo real. Esta herramienta también ha permitido experimentar e investigar posibles mejoras en los sistemas y tener una idea de cómo estos podrían comportarse. En resumen, la simulación permite predecir diferentes respuestas que se obtienen al hacer cambios en el sistema o introducir diferentes entradas, siendo de gran ayuda para lograr optimizar las nuevas tecnologías, para encontrar mejoras y adaptar los sistemas de manera eficiente. Un tipo de herramienta que llama la atención en la actualidad es la simulación en tiempo real, la cual busca obtener respuesta a cualquier estímulo en tiempo real, es decir, en el mismo tiempo como se espera que ocurra en un sistema real. En muchas aplicaciones, esta herramienta permite probar sistemas de control en las mismas plataformas digitales en las cuales se implementarían en un sistema real, teniendo en cuenta no solo los tiempos de retardo de los sistemas de adquisición y conversión de datos, sino también los tiempos reales de ejecución de las estrategias de control en estas plataformas. De esta manera, la simulación en tiempo real posibilita la verificación del funcionamiento de diferentes tipos de sistemas con una aproximación más cercana a la realidad (Revista ELECTRICIDAD, 2018).

Ahora bien, no solamente los softwares son los que han tenido evolución, esta evolución también puede notarse en varias ramas, como por ejemplo en los vehículos, que, debido a la preocupación global por la contaminación al medio ambiente y la reducción de la misma, se han buscado nuevos métodos para contribuir con este interés; es por ello que ahora se busca

implementar los vehículos eléctricos, como una de las estrategias que tienen los gobiernos para cumplir con la meta que la ONU ha propuesto (Quiñones, 2019)

Teniendo en cuenta lo anterior y sabiendo que los vehículos hacen parte de la problemática en el estado del arte, este proyecto tiene como objetivo diseñar un simulador en tiempo real para un vehículo eléctrico que tiene una alimentación híbrida compuesta por celdas de combustible y baterías, partiendo del modelo del sistema proporcionado por el desafío *IEEE-VTS Motor Vehicles Challenge 2017*. Cabe resaltar que las celdas de combustible son utilizadas como solución para estos vehículos gracias a su alta eficiencia, su rápida respuesta, y a que la conversión de hidrógeno en la pila de combustible no afecta al medio ambiente (Energías Renovables,2015).

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Diseñar un simulador en tiempo real de un sistema de alimentación para vehículos eléctricos con su correspondiente sistema de control.

1.2. Objetivos Específicos

Para garantizar el cumplimiento del objetivo general del proyecto se plantean los siguientes objetivos específicos:

Establecer modelos en tiempo discreto para los convertidores electrónicos de potencia, las celdas de combustible, las baterías, el vehículo eléctrico, y el sistema de control y gestión.

Implementar un sistema para envío y recepción de datos entre dos microcontroladores de referencia LAUNCHXL TMS320F28379D de Texas Instruments, con el fin de establecer el sistema de comunicación para una futura implementación del simulador en tiempo real.

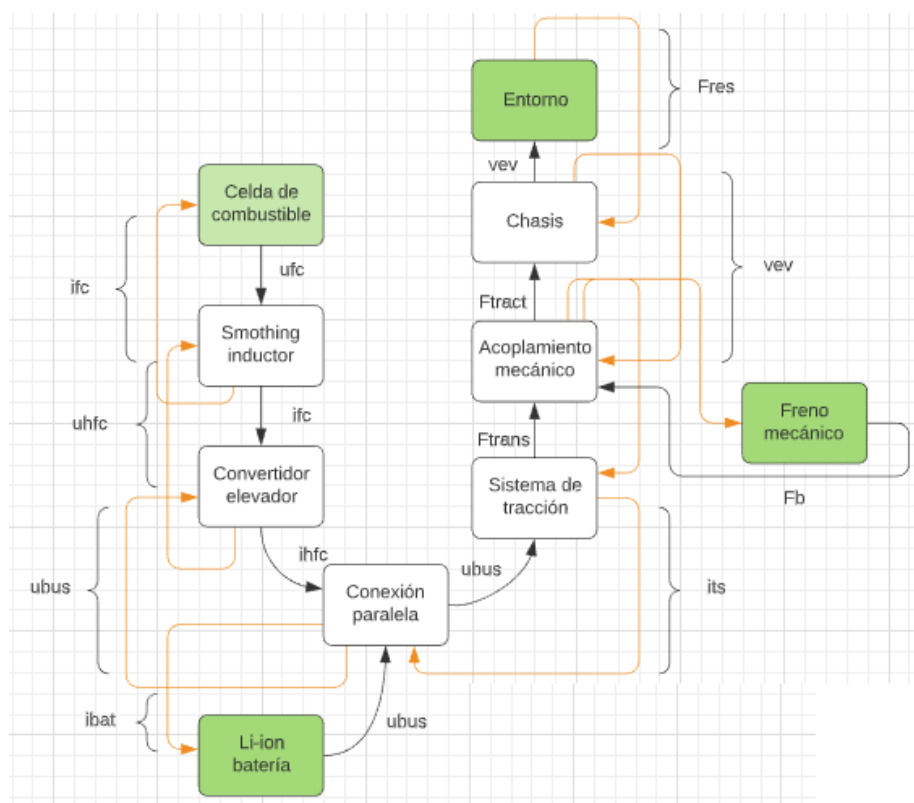
Realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos de las simulaciones fuera de línea del modelo en tiempo discreto y el modelo del sistema tomado de la IEEE-VTS Motor Vehicles Challenge 2017, mediante la herramienta MATLAB/Simulink.

2. Modelo del sistema

El sistema considerado en este trabajo de grado se basa en el modelo del desafío elaborado en el 2017 por el IEEE (Départure y otros, 2017). Los objetivos principales de este modelo es aumentar el tiempo de vida de las baterías, y a su vez minimizar el consumo de hidrogeno para la alimentación del sistema, en general, es un sistema entrelazado que se puede simplificar en la Figura 1. Tal como se observa, el modelo del vehículo eléctrico comprende varios subsistemas y elementos, descritos a continuación.

Figura 1

Diagrama general de conexión del sistema



2.1. Especificaciones del vehículo

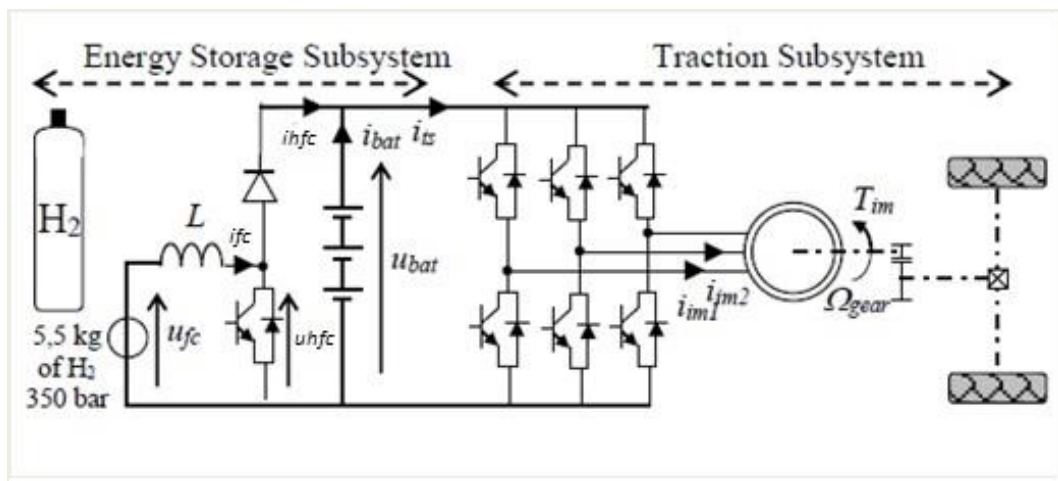
El vehículo usado para el estudio tiene una masa de 698 kg, sin contar el peso de los pasajeros, tiene una caja de cambios de una sola relación, un diferencial y dos ruedas motrices. El sistema de propulsión se conforma por una máquina de inducción de 15 kW que se alimenta por un inversor a través de una batería de 80V- 40Ah de fosfato de hierro litio (LifePO4).

La celda de combustible es de 16 kW con tensión de 40-60 V, corriente máxima de 400 A y celda tipo PEMFC que es la que mejor se ajusta a vehículos eléctricos gracias a que: tienen un menor tamaño, son más ligeras, de arranque más rápido, y con una respuesta más rápida a los cambios que otros tipos de celdas (Alaswad, Palumbo, Dassisti, Olabi,2016). El tanque para el almacenamiento del hidrógeno es de fibra de carbono/resina epoxy con un almacenamiento de 5.5 kg de H₂ a 350 bar (para conocer más sobre cómo funciona las celdas de combustible consulte (Mendoza,2017)).

El sistema está conectado de la siguiente manera: el subsistema de tracción está conectado al FC (“Fuel Cell”, celda de combustible) por medio de un convertidor elevador no reversible (boost chopper) y una inductancia de alisado, las baterías están directamente conectadas al subsistema de tracción. La Figura 2 representa de manera gráfica la anterior descripción y la Tabla 1 presenta los parámetros del sistema (Départure y otros, 2017).

Figura 2

Esquema del vehículo pila de combustible/batería



Nota: El gráfico representa un esquema general del vehículo eléctrico y sus componentes. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. Départure y otros (2017).

Tabla 1

Parámetros de la celda de combustible/batería y sistema en general

Celda de combustible	40-60 V, 16 kW
Inductancia de alisado	5.5 mΩ, 0.25 mH
Batería	80 V, 40 Ah
Máquina de inducción	15 kW
Masa del vehículo	698kg

2.2.Ecuaciones representativas

Para determinar los valores de corriente y tensión que alimentan el sistema y permiten el movimiento del vehículo, es necesario definir cómo se va a distribuir la energía en el mismo. Se debe suplir toda la energía requerida por el sistema de tracción, lo que depende de factores como la velocidad y las diferentes fuerzas mecánicas en el entorno que se interponen al movimiento y

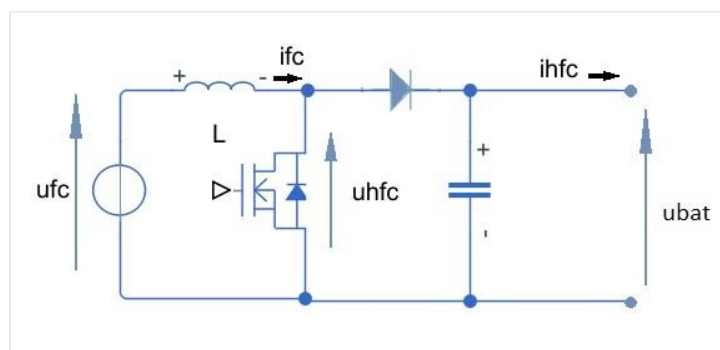
que involucran directamente un esfuerzo, por ende, esto demanda al sistema de alimentación una mayor potencia para producir el movimiento del vehículo.

Son dos las corrientes que se suman para obtener la corriente de entrada para el subsistema de tracción: una se obtiene de las baterías y la otra proviene de la FC, junto con el convertidor DC/DC elevador. Para calcularlas es necesario recurrir a las leyes de Kirchoff que se basan en la conservación de la energía, según lo anterior se calcula lo siguiente:

$$L \frac{d}{dt} i_{fc} = u_{fc} - u_{hfc} - r_L * i_{fc} \quad (1)$$

Figura 3

Modelo básico de un convertidor DC/DC elevador



Tomando como referencia la Figura 3, donde la tensión de entrada DC en este caso es la tensión de la FC, entonces las ecuaciones correspondientes para tensión y corriente de salida en este modelo de elevador son:

$$i_{hfc} = m_{hfc} * n_{hfc}^k * i_{fc} \quad k = \begin{cases} 1 & \text{si } P > 0 \\ -1 & \text{si } P < 0 \end{cases} \quad (2)$$

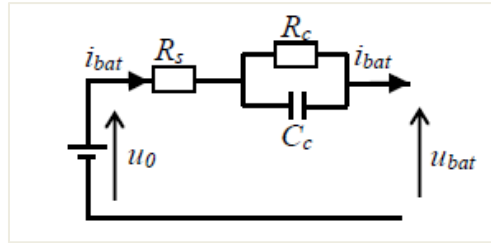
$$u_{hfc} = u_{bat} * m_{hfc} \quad (3)$$

Donde m_{hfc} es el radio de modulación del convertidor que proviene del sistema de control, $n_{hfc} = 95\%$ es la eficiencia promedio del convertidor, L y r_L son la inductancia y la resistencia de la inductancia de alisado.

La corriente de la batería se calcula a partir del modelo de la batería (Figura 4), que responde a un circuito abierto de tensión con su respectiva resistencia serie R_s seguido por una combinación en paralelo del modelo de la capacitancia R_c , C_c .

Figura 4

Esquema del modelo de la batería



Nota: El gráfico representa un esquema general del modelo de la batería y como se compone. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. Départure y otros (2017).

Aplicando la ley de Kirchhoff de tensión en la malla de la Figura 4 se obtiene:

$$-u_{bat} = u_o + i_{bat}R_s + u_c \quad (4)$$

$$u_c = u_o - i_{bat}R_s - u_{bat} \quad (5)$$

Como la corriente de la batería es la suma de la corriente que pasa por el capacitor y la que pasa por la resistencia, se procede a determinar cada una.

$$i_{bat} = i_R + i_C \quad (6)$$

$$i_R = \frac{u_o - i_{bat}R_s - u_{bat}}{R_c} \quad (7)$$

$$i_c = C_c \frac{d}{dt} u_c = C_c \frac{d}{dt} (u_o - i_{bat} R_s - u_{bat}) \quad (8)$$

Se reemplazan las ecuaciones (7) y (8) en (6) y se obtiene:

$$i_{bat} = \frac{u_o - i_{bat} R_s - u_{bat}}{R_c} + C_c \frac{d}{dt} (u_o - i_{bat} R_s - u_{bat}) \quad (9)$$

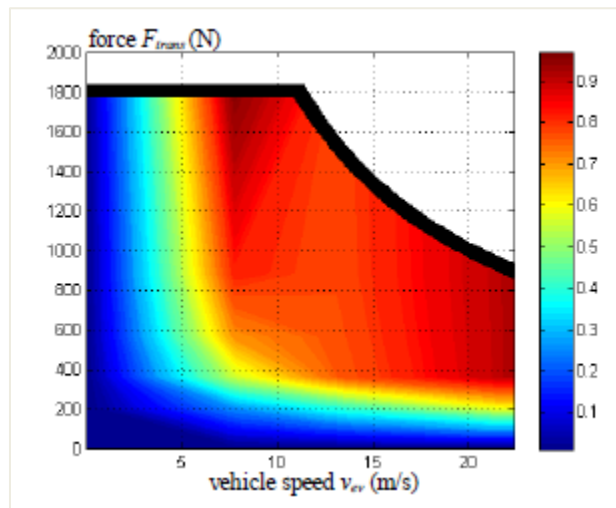
Para modelar la conexión paralela entre la FC, las baterías, y el sistema de tracción, se recurre a la ley de Kirchhoff's:

$$i_{bat} = i_{ts} - i_{hfc} \quad (10)$$

En el subsistema de tracción se utiliza un modelo estático para facilitar el estudio, se utiliza un mapa de eficiencia donde se tiene la relación entre la velocidad y la fuerza de tracción (Figura 5).

Figura 5

Mapa de eficiencia del subsistema de tracción n_{tract}



Nota: El gráfico representa un mapa de eficiencia donde se relaciona la velocidad del vehículo con la fuerza de tracción. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery

Vehicle. Départure y otros (2017).

En el sistema de tracción se tiene en cuenta: el inversor asociado a la máquina, las ruedas, la caja de cambios, la transmisión mecánica, y el algoritmo de control (Départure y otros, 2014).

El sistema está directamente controlado por una fuerza de tracción de referencia la cual se denota por F_{trans_ref} , entonces según lo anterior se tiene que:

$$F_{trans} = F_{trans_ref} \quad (11)$$

A partir de la potencia se determina la corriente en el sistema de tracción, lo que resulta:

$$i_{ts} = \frac{F_{trans}v_{ev}}{u_{bat}(n_{tract})^k} \quad k = \begin{cases} 1 & \text{si } P_{tract} > 0 \\ -1 & \text{si } P_{tract} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

La fuerza de tracción se obtiene a partir de la fuerza de frenado negativa F_b , más la fuerza de transmisión F_{trans} :

$$F_{tract} = F_{trans} + F_b \quad (13)$$

Una de las variables más importantes para determinar cuál es la potencia, y por tanto la energía que se necesita del sistema de alimentación, es la velocidad, ésta se obtiene mediante el uso de la segunda ley del movimiento de Newton, y para ello se consideran las fuerzas de tracción F_{tract} y de resistencia F_{res} y el chasis como una masa total equivalente M_{tot} , donde se suma la masa del vehículo y la masa equivalente de las piezas giratorias.

$$M_{tot} \frac{d}{dt} v_{ev} = F_{tract} - F_{res} \quad (14)$$

La fórmula que rige la fuerza de resistencia al rodamiento del vehículo se obtiene a partir de:

$$F_{res} = fM_{tot}g + 0.5\rho c_x A (v_{ev} + v_{wind})^2 + M_{tot}ga \quad (15)$$

Donde f es el coeficiente de resistencia al rodamiento, c_x es el coeficiente de resistencia del aire, A es el área frontal del vehículo, ρ la densidad del aire, y g la gravedad.

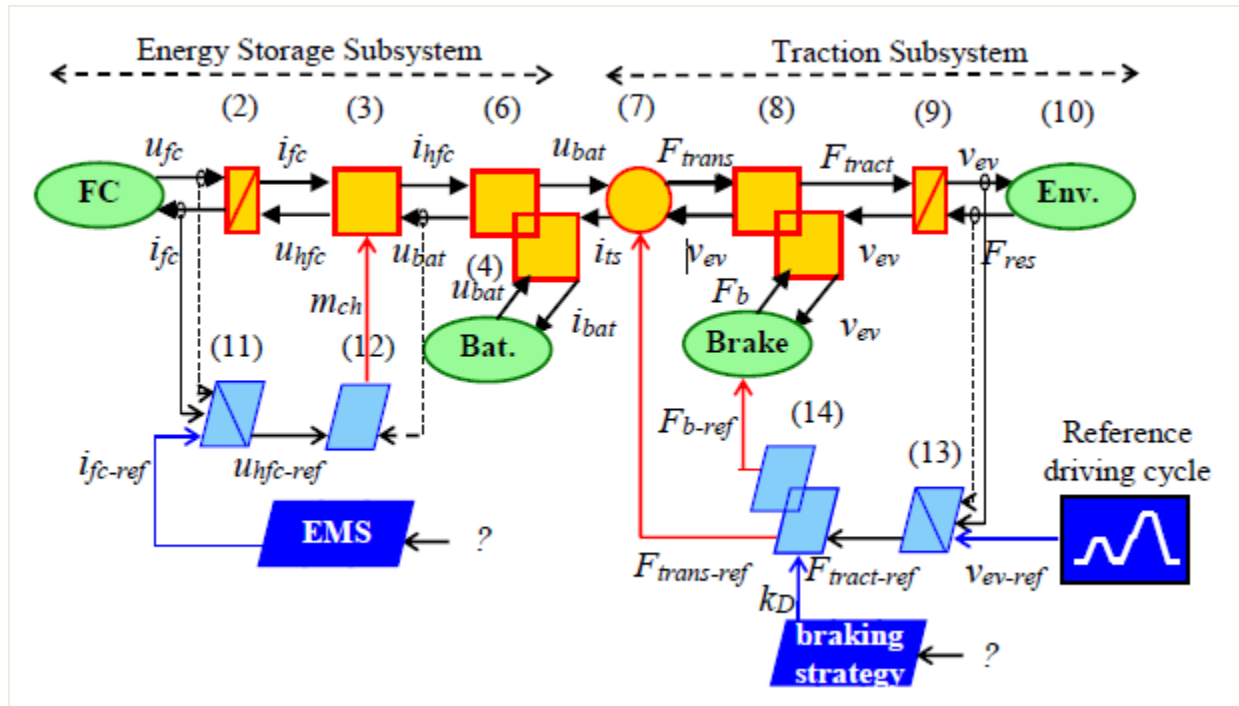
3. Sistema de control y gestión

Como primer paso se debe definir qué tipo de fuentes se tiene en el sistema, por ejemplo, el sistema FC y las baterías se consideran fuentes eléctricas, mientras que el entorno del vehículo y el freno serían las fuentes mecánicas.

El sistema de tracción se considera como un elemento de conversión multi-dominio con la tensión u_{bat} y la velocidad v_{ev} como entradas, la corriente i_{ts} y la fuerza F_{trans} como salidas, la fuerza de referencia F_{trans_ref} se toma como una entrada de ajuste. El convertidor y el chasis son elementos de acumulación, es decir que conducen al valor actual i_{fc} y la velocidad del vehículo v_{ev} como variables de estado (traducido del inglés Départure y otros, 2017, p.3). Todo este sistema se deduce de la representación energética macroscópica (EMR, Energetic Macroscopic Representation), el cual puede apreciarse en la Figura 6 y del cual este proyecto se basa para la elaboración del sistema en el software Simulink, todas las variables pueden ser medidas.

Figura 6

EMR original basado en el estudio del vehículo eléctrico y esquema de su respectivo control



Nota: El gráfico representa un esquema en bloques del modelo ejecutado en MATLAB/Simulink. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. Départure y otros (2017).

En el esquema de la Figura 6, los óvalos verdes representan las fuentes, los rectángulos amarillos con líneas que atraviesan corresponden a los elementos de acumulación, los cuadrados amarillos describe la conversión de energía sin acumulación interna, el círculo amarillo es el punto de conversión multi-dominio donde se unen el sistema de subtracción con el subsistema de energía, los dos cuadros que se interponen precisamente representan los elementos de acoplamiento entre las dos partes, por tanto, acompañan de lado y lado el punto multi-dominio, finalmente los rectángulos azules son los subsistemas donde se realiza el control del vehículo, donde se toman las variables medidas en el instante y se envían las de referencia de manera que el sistema se siga ejecutando y no se salga de control.

El control se centra en dos partes, el control para el sistema de energía y el control para el subsistema de tracción.

3.1. Sistema de almacenamiento de energía

El principal objetivo en esta parte del sistema es controlar la corriente de la FC (i_{fc}), para ello se envía una variable de ajuste que en este caso es m_{hfc} . Esta variable de salida del sistema energético también sirve como entrada para el control que envía la variable ajustada m_{hfc} , es decir, la misma señal que es controlada sirve como referencia ($i_{fc_{med}}$) medida justo un instante antes para hacer dicho control. Por otro lado, la tensión obtenida de la FC también se toma como referencia ($u_{fc_{med}}$) para el control. Con estas dos variables se obtiene $u_{hfc_{ref}}$ (tensión de referencia del convertidor DC/DC elevador) y junto con la tensión de la batería medida ($u_{bat_{med}}$) se obtiene m_{hfc} . El sistema de control que se aplica para realizar lo anteriormente explicado es:

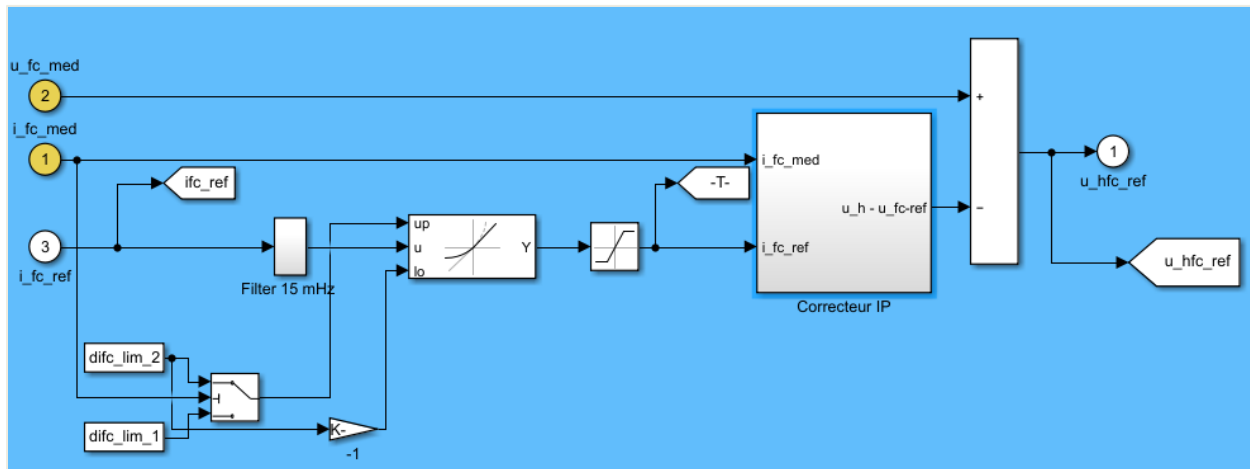
$$u_{hfc_{ref}} = -C_i(t) (i_{fc_{ref}} - i_{fc_{med}}) + u_{fc_{med}} \quad (16)$$

$$m_{hfc} = \frac{u_{hfc_{ref}}}{u_{bat_{med}}} \quad (17)$$

Se usa un controlador PI (Proporcional Integral), que en este caso está representado por $C_i(t)$, con una rampa de limitación de corriente de 6 a 20 A/sec que depende de la potencia FC para la generación de la corriente de referencia de la celda de combustible ($i_{fc_{ref}}$) y un filtro de baja frecuencia de 15 mHz, con el fin de reducir los efectos de fallos de la celda y la degradación de la misma (Figura 7).

Figura 7

Esquema de control para obtener u_{hfc_ref}



Nota: El gráfico representa el esquema de control para la corriente de la celda de combustible. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. Départure y otros (2017).

Archivo: VE_PAC_BAT, Simulink.

En la Figura 7 se observa un saturador que va de 0-inf. Dentro del bloque denominado *Correcteur IP*, está el control PI. Por otro lado, *difc_lim_2* es el límite de corriente de 20 A y *difc_lim_1* es 6 A.

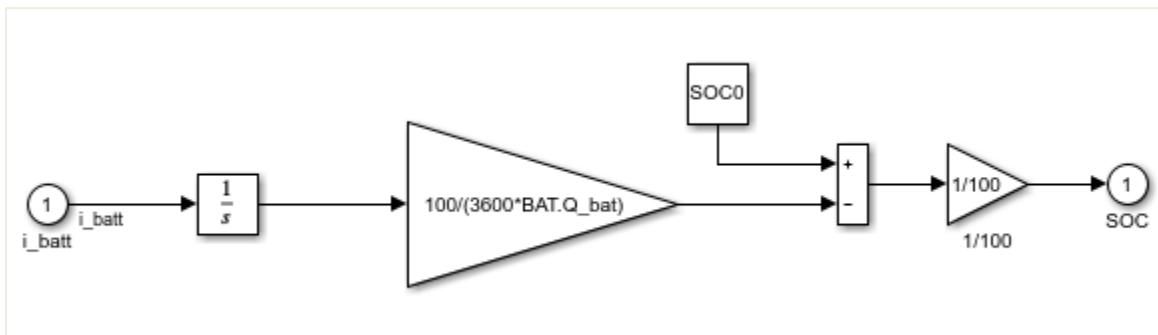
Ahora bien, para obtener la corriente de referencia de combustible (i_{fc_ref}) que se muestra en la Figura 8, primero se debe conocer el estado de la batería y de esta forma declarar si es o no necesario que la celda entre en operación por medio del control (Figura 9), con el objetivo tanto de cargar la batería como de ayudar a suplir la demanda. Para calcular el estado de carga (SOC, State of Charge) se resuelve la ecuación (18) y a partir de ahí se obtiene el valor que corresponde a la entrada para la ecuación que determina la corriente de referencia de la celda de combustible i_{fc_ref} .

$$SOC_{bat} = SOC_{init} - \frac{100}{3600 Q_{bat}} \int i_{bat} dt \quad (18)$$

Esta ecuación se deduce de un método llamado contador amperios-hora de Coulomb que consiste en integrar la intensidad suministrada y absorbida de la batería (Guembe y otros,2016).

Figura 8

Esquema que representa la ecuación para determinar el SOC



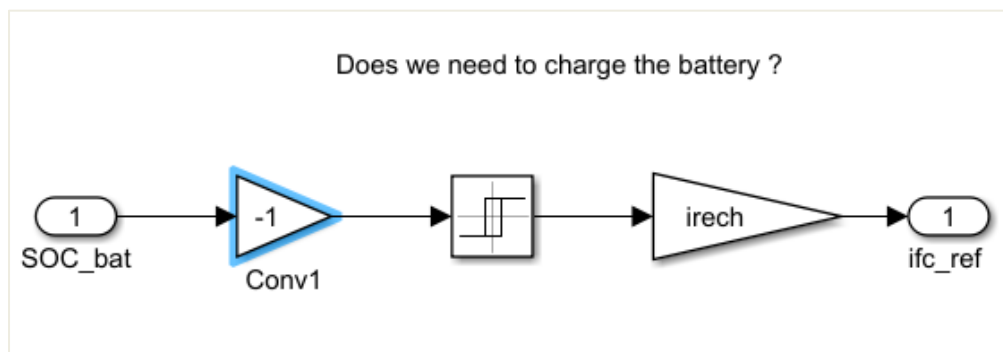
Nota: El gráfico representa los bloques que se utilizan para calcular el SOC de la batería. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. Départure y otros (2017).

Archivo: VE_PAC_BAT, Simulink.

Donde en la Figura 8 el $SOC0$ es el estado de carga inicial de la batería y $BAT.Q_{bat}$ es la capacidad de almacenamiento de la batería (40 Ah). Para este caso se supone una eficiencia del 100%.

Figura 9

Esquema que representa la ecuación para determinar la corriente ifc_ref



Nota: El gráfico representa los bloques para la obtención de la corriente de referencia a partir del SOC. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. Départure y otros (2017). Archivo: VE_PAC_BAT, Simulink.

Donde el *relé* de la Figura 9 está limitado por el $-SOC_{máx} = -0.4$ y el $-SOC_{min} = -0.7$ de la batería, e *irech* es la corriente máxima de las celdas de combustible FC (400 A).

3.2. Sistema de tracción

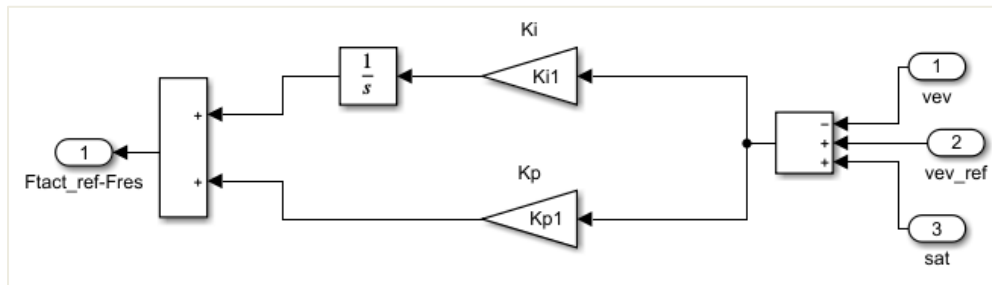
El objetivo principal en el sistema de tracción es hacer control sobre la variable velocidad (v_{ev}) y la variable que permite hacer el ajuste de control es F_{trans_ref} . Para calcular la variable de ajuste se necesitan tres componentes que son: la velocidad medida que corresponde a la velocidad justo un instante antes (v_{ev_med}), la velocidad de referencia (v_{ev_ref}) tomada del perfil de velocidad impuesto para probar el sistema, y la fuerza ambiental estimada o de resistencia (F_{res}) medida justo un instante antes. Luego de obtener estas tres variables se ejecuta el control como lo muestra la ecuación (19).

$$F_{tract_ref} = -C_v(t)(v_{ev_ref} - v_{ev_med}) + F_{res_med} \quad (19)$$

Al igual como se realizó en el control para la sección del subsistema energético de almacenamiento ESS, $C_v(t)$ corresponde al controlador PI (Figura 10). Aquí es muy importante saturar las potencias con las que se determinan la fuerza de tracción de referencia, ya que se debe limitar según la potencia máxima que puede entregar el ESS, por tanto, la máxima potencia mecánica es 15 kW y la máxima fuerza de tracción es 2000N, dicha saturación de control se tiene en cuenta para el control de la velocidad (Figura 11).

Figura 10

Esquema representativo del control PI en Simulink



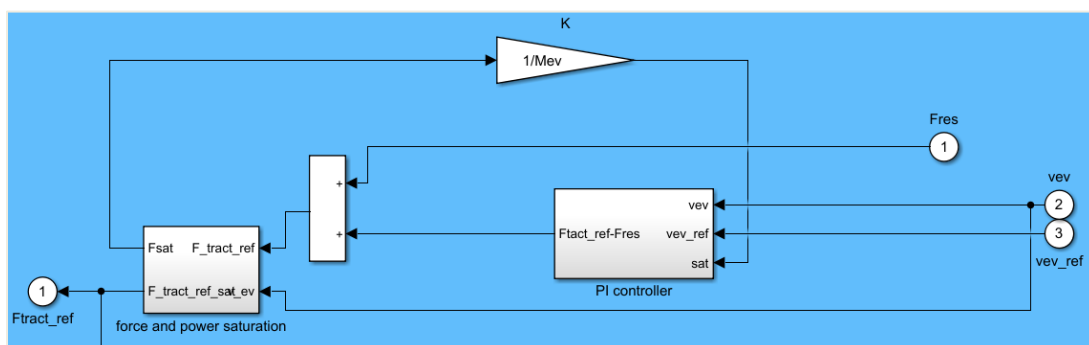
Nota: El gráfico representa el esquema de control para la velocidad del vehículo eléctrico. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. Départure y otros (2017).

Archivo: VE_PAC_BAT, Simulink.

Se puede observar en la Figura 10 las tres entradas mencionadas anteriormente y dos contantes que son: la constante proporcional K_p y la constante integral k_i . Este control está dentro del subsistema *PI controller* de la Figura 11.

Figura 11

Esquema representativo de la ecuación (19)



Nota: El gráfico representa los bloques para obtener las fuerza de tracción. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. Départure y otros (2017). Archivo:

VE_PAC_BAT, Simulink.

Donde M_{ev} representa la masa total del vehículo eléctrico.

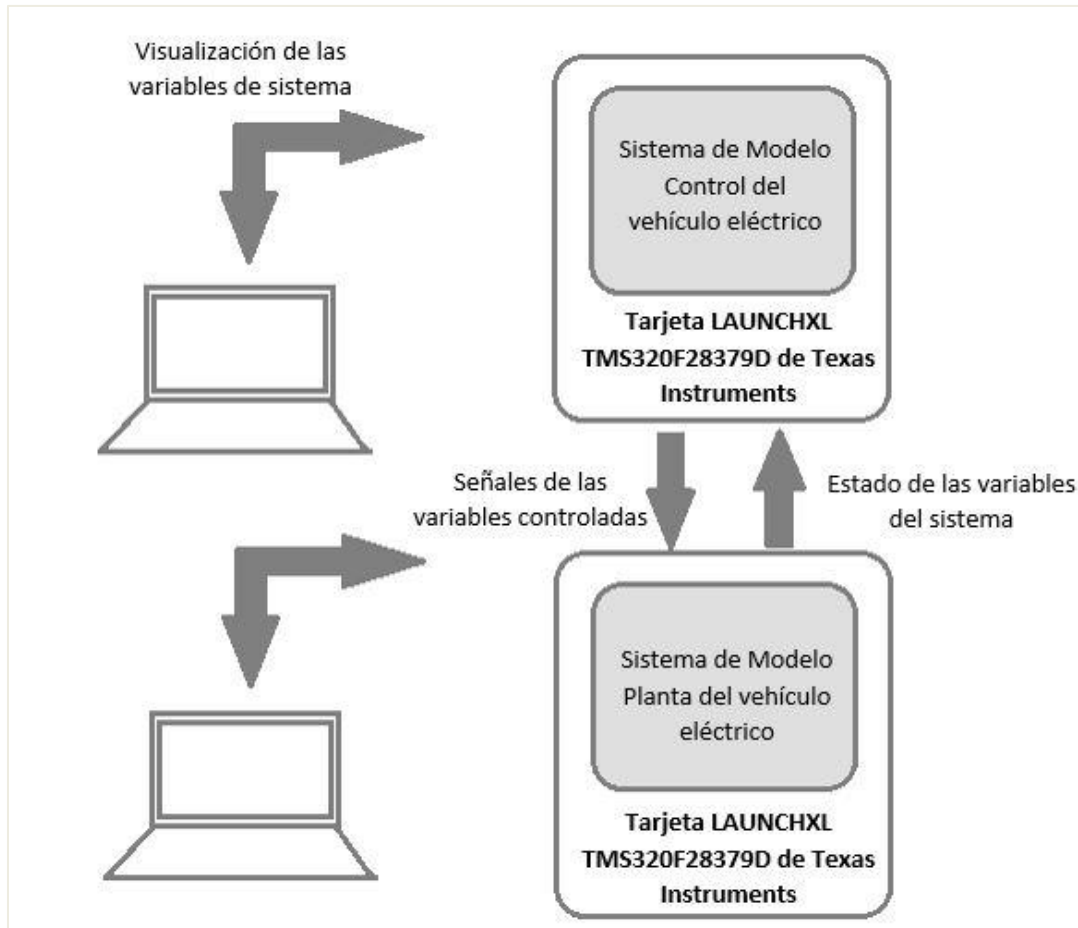
Debido a que la fuerza de tracción tiene adicionada la Fuerza de frenado (F_b) y la fuerza mecánica de transmisión (F_{trans}), estas entonces se separan usando una entrada de distribución k_D y se hace de la siguiente manera:

$$\begin{cases} F_{trans_ref} = k_D F_{tract_ref} \\ F_{b_ref} = (1 - k_D) F_{tract_ref} \end{cases} \quad (20)$$

Debido a que solo las ruedas delanteras están conectadas al sistema de tracción, la entrada de distribución k_D se debe limitar con su valor máximo 0.5 para las fases de frenado.

4. Diseño del simulador en tiempo real

El simulador en tiempo real propuesto en este trabajo de grado, plantea el uso de dos tarjetas de referencia LAUNCHXL TMS320F28379D de Texas Instruments, tal como se presenta en la Figura 12. En una de estas tarjetas, se simulará el perfil del vehículo eléctrico, junto con las fuentes de alimentación y el sistema de tracción. En la otra tarjeta, se simulará el sistema de control, tanto de la parte del sistema de almacenamiento de energía ESS, como el control para el subsistema de tracción.

Figura 12*Diagrama general del diseño*

El sistema de almacenamiento de energía ESS comprende: la celda de combustible, el *smoothing inductor* o inductor alisador, el convertidor elevador, y las baterías; mientras que el subsistema de tracción está conformado por: el sistema de tracción, el acople mecánico, el chasis del vehículo, y los componentes que se tienen en cuenta del medio ambiente para el modelo.

De manera introductoria para una futura implementación se realiza en este capítulo la descripción de cómo podrían enviarse las señales necesarias para la ejecución del sistema trabajado, esto se explicará más adelante de manera detallada, por otro lado, para tener una

visualización de los datos que se envían y se reciben se pueden usar bloques como *Scope* o *Display* pertenecientes a MATLAB/Simulink. Este envío de datos se piensa teniendo en cuenta los pines con los que se cuentan dentro de la tarjeta utilizada para este trabajo y usando Simulink con el modo *External*.

A continuación, se presentan los modelos del sistema en tiempo discreto propuestos para ser implementados en las tarjetas de Texas Instruments en una futura implementación del simulador, y posteriormente se describe el diseño e implementación del sistema de envío y recepción de datos entre las dos tarjetas mencionadas.

4.1. Determinación de modelos del sistema en tiempo discreto

En la Figura 6 se presentó el sistema implementado por medio de bloques en Matlab/Simulink tomado del desafío IEEE-VTS Motor Vehicles Challenge 2017. La mayoría de bloques de este sistema corresponden a funciones en el dominio de Laplace que involucran señales en tiempo continuo. Teniendo en cuenta que en simulador en tiempo real la implementación de estos modelos se realizará en las tarjetas digitales de Texas Instruments, se requiere realizar un proceso de discretización para determinar los modelos como funciones en el dominio de la transformada z . Una manera de lograr este cambio, es usando la transformada bilineal de la siguiente manera:

$$s = \frac{2z - 1}{Tz + 1}; \quad H_d(z) = H_a(s) \Big|_{s=\frac{2z-1}{Tz+1}} = H_a\left(\frac{2z - 1}{Tz + 1}\right) \quad (21)$$

Dentro del sistema se encuentran varios integradores y dos funciones de transferencia en el dominio de la transformada de la Laplace. Una de estas funciones de transferencia se presenta

en la ecuación (22), la cual se encuentra en el subsistema donde se desarrollan las ecuaciones del inductor alisador; y la otra función se presenta en la ecuación (29), la cual está en el subsistema de la batería Li-ion. Empleando la ecuación (21), se procede a hacer la respectiva discretización.

$$H_1(s) = \frac{k_L}{\tau_{au_L} * s + 1} \quad (22)$$

Como primer paso se procede a reemplazar las constantes por su respectivo valor, donde las constantes corresponden a parámetros del inductor alisador o smoothing inductor (Figura 12).

Figura 13

Parámetros de la inductancia

%% Smoothing inductor parameters	
Ve=65;	% boost chopper average input voltage (V)
Vs=80;	% boost chopper output voltage (V)
f_PWM=1e4;	% PWM frequency (Hz)
delta_iL=5;	% current variation limit (A)
delta_ubus=1;	% dc bus variation limit (V)
R_ch=80/300;	% equivalent maximal load resistor (ohm)
L=(Ve*(1-Ve/Vs))/(delta_iL*f_PWM);	% inductance (H)
r_L = L/(50e-3);	% winding resistance (ohm)
K_L=1/r_L;	% gain
tau_L=L/r_L;	% time constante response (s)

Nota: El gráfico muestra los parámetros para el cálculo de la inductancia. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles

Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. Départure y otros (2017). Archivo:

init_VE_PAC_BAT, MATLAB.

Resolviendo las ecuaciones que se muestran en la Figura 13, se obtienen los siguientes valores que se reemplazarán en la ecuación (22):

$$L = \left(ve * \frac{1 - \left(\frac{ve}{vs}\right)}{\delta_{iL} * f_{PWM}} \right) = 2.4375e - 4 \quad [H] \quad (23)$$

$$r_L = \frac{L}{50e - 3} = 4.875e - 3 \quad [\Omega] \quad (24)$$

$$K_L = \frac{1}{r_L} = 205.1282 \quad (25)$$

$$tau_L = \frac{L}{r_L} = 0.05 \quad [s] \quad (27)$$

Reemplazando:

$$H_1(s) = \frac{k_L}{tau_L * s + 1} = \frac{205.1282}{0.05s + 1} \quad (28)$$

La otra transformada es:

$$H_2(s) = \frac{rc}{BAT.Ceq * rc * s + 1} \quad (29)$$

En la cual las constantes corresponden a los parámetros de la batería, donde también se puede evidenciar la configuración de las baterías para este sistema (Figura 14).

Figura 14

Parámetros de la batería Li-ion

<pre> %% Li-ion battery BAT.Q_bat = 40; % storage capacity (Ah) BAT.U_cel_nom = 3.35; % nominal cell voltage (V) BAT.U_cel_min = 2.5; % minimal cell voltage (V) BAT.U_cel_max = 4.2; % maximal cell voltage (V) BAT.m_cel = 5.6; % cell weight (kg) BAT.Nbre_cel_serie = 6; % number of cells in series for a module BAT.Nbre_mod_serie = 4; % number of modules in series Mbat=BAT.m_cel*6; % equivalent weight (1/4 of the original Tazzari Zero batteries) BAT.U_nom = BAT.U_cel_nom*BAT.Nbre_cel_serie*BAT.Nbre_mod_serie; % nominal battery voltage (V) BAT.U_min = BAT.U_cel_min*BAT.Nbre_cel_serie*BAT.Nbre_mod_serie; % minimal battery voltage (V) BAT.U_max = BAT.U_cel_max*BAT.Nbre_cel_serie*BAT.Nbre_mod_serie; % maximal battery voltage (V) SOC0 = 70; % initial state of charge of the battery (%) 70 warning_limit=0; % the vehicle can't move at this state of charge BAT.Ceq = BAT.Q_bat*3600/(BAT.U_max-BAT.U_min); % equivalent capacity of the battery r_bat=0.028; % internal resistance of the battery rc=500/BAT.Ceq; % parallel resistor </pre>	
--	--

Nota: El gráfico muestra los parámetros para las baterías. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-

Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. Départure y otros (2017). Archivo: init_VE_PAC_BAT,

MATLAB.

Resolviendo las ecuaciones $BAT.U_{min}$ y $BAT.U_{max}$ de la Figura 13, para determinar $BAT.Ceq$ y rc , se tienen los siguientes valores:

$$\begin{aligned}
 BAT.U_{min} &= BAT.U_{cel_{min}} * BAT.Nbre_{cel_{serie}} * BAT.Nbre_{mod_{serie}} = 2.5 * 6 * 4 \\
 &= 60 \text{ [V]} \quad (30)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 BAT.U_{max} &= BAT.U_{cel_{max}} * BAT.Nbre_{cel_{serie}} * BAT.Nbre_{mod_{serie}} = 4.2 * 6 * 4 \\
 &= 100.8 \text{ [V]} \quad (31)
 \end{aligned}$$

$$BAT.Ceq = \frac{BAT.Q_{bat} * 3600}{BAT.U_{max} - BAT.U_{min}} = \frac{40 * 3600}{100.8 - 60} = 3529.4117 \text{ [Ah]} \quad (32)$$

$$rc = \frac{500}{BAT.Ceq} = 0.1416667 \text{ [\Omega]} \quad (33)$$

Se procede a reemplazar los valores en la ecuación (29).

$$H_2(s) = \frac{rc}{BAT.Ceq * rc * s + 1} = \frac{0.141667}{500s + 1} \quad (34)$$

Ahora el siguiente paso es reemplazar la variable s , para dejar la ecuación en términos de z . Para ello, se desarrolla la solución en términos de una ecuación general, esto gracias a que las dos ecuaciones mencionadas anteriormente conservan la misma forma de transformada.

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{a}{bs + 1} \Big|_{s=\frac{2z-1}{Tz+1}} = \frac{a}{b\left(\frac{2z-1}{Tz+1}\right) + 1} = \frac{a}{\frac{2b(z-1) + Tz + T}{T(z+1)}} \\ &= \frac{aT(z+1)}{z(2b+T) + (T-2b)} \end{aligned} \quad (35)$$

Donde T es el periodo de muestreo, que para la simulación se selecciona de $1/500$ [s], siendo 500 la frecuencia de muestreo en Hz que se toma como resultado a partir de pruebas de simulación, con el fin que se pueda garantizar que, con las funciones de transferencia en el dominio de la transformada z , se obtenga el mismo resultado que con el modelo original con las funciones de estado continuo. Es importante aclarar que a frecuencias menores el modelo no converge.

Según lo anterior, las ecuaciones (28) y (34) convertidas en términos de la transformada z y simplificadas serán:

$$H_1(z) = \frac{205.1282}{0.05s + 1} \Big|_{s=\frac{2z-1}{Tz+1}} = \frac{4.022(z+1)}{z - 0.9608} \quad (36)$$

$$H_2(z) = \frac{0.141667}{500s + 1} \Big|_{s=\frac{2z-1}{Tz+1}} = \frac{2.834e^{-7}(z+1)}{z - 1} \quad (36)$$

Para los integradores, debido a que su ecuación es distinta se tiene una conversión diferente a la realizada en (35).

$$H_i(z) = \frac{1}{s} \Big|_{s=\frac{2z-1}{Tz+1}} = \frac{1}{\left(\frac{2z-1}{Tz+1}\right)} = \frac{0.001(z+1)}{z-1} \quad (37)$$

Estas ecuaciones en el dominio de la transformada z que fueron halladas, se reemplazan en el sistema creado en Simulink, tomado y adecuado desde el modelo original del desafío IEEE.

4.2.Cálculo de las constantes de los controladores y discretización

Hay dos controladores muy importantes dentro del sistema: el control de la corriente de referencia de la celda de combustible y el control de la velocidad. Para el control de la corriente, las constantes K_i y K_p se calculan con los valores anteriormente hallados de la inductancia k_L y τ_{L} , y los siguientes parámetros que se evidencian en la Figura 15:

Figura 15

Parámetros para constantes de control de corriente

<pre> %% current loop: IP controller (pole placement) tsi=1; % damping coefficient tau_Ldes=(tau_L/3); % time response at +- 5% wn_L=4.744/tau_Ldes; % pulsation kp_L=(2*tsi*wn_L*tau_L-1)/K_L; % proportional coefficient ki_L=((wn_L*wn_L)*tau_L)/(K_L*kp_L); % integral coefficient </pre>	
---	--

Nota: El gráfico muestra los parámetros para hallar las constantes del control de la corriente. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. Départure y otros (2017).

Archivo: init_VE_PAC_BAT, MATLAB.

Resolviendo la ecuación para calcular las constantes se tiene que:

$$k_{pL} = \frac{2 * tsi * wn_L * tau_L - 1}{K_L} = \frac{2 * 1 * 284.63 * 0.05 - 1}{205.1282} = 0.133887 \quad (38)$$

$$k_{iL} = \frac{(wn_L * wn_L * tau_L)}{K_L * kp_L} = \frac{284.63^2 * 0.05}{205.1282 * 0.133887} = 147.50205 \quad (39)$$

Para el control de la corriente se usa primero un control integral y luego uno proporcional, por ello, la única discretización es la del integrador que ya se calculó en el subcapítulo anterior.

El controlador de la velocidad usa el valor total de la masa del vehículo (M_{ev}) que tiene un valor de 877.8 kg, con ella y con los parámetros mostrados en la Figura 16 se determinan las constantes del controlador.

Figura 16

Parámetros para constantes del control de velocidad

<code>%%% speed loop PI controller (pole placement)</code>	
<code>tsil=1;</code>	<code>% damping coefficient</code>
<code>tdesl=1;</code>	<code>% time response at +- 5%</code>
<code>wl=4.744/tdesl;</code>	<code>% pulsation</code>
<code>Kil=(wl^2)*Mev;</code>	<code>% proportional coefficient</code>
<code>Kpl=2*tsil*wl*Mev;</code>	<code>% integral coefficient</code>

Nota: El gráfico muestra los parámetros para hallar las constantes del control de velocidad. Tomado de IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. Départure y otros (2017).

Archivo: init_VE_PAC_BAT, MATLAB.

De la misma manera como el control anterior, se resuelven las ecuaciones para hallar las constantes:

$$K_{i1} = w_1^2 * M_{ev} = 4.744^2 * 877.8 = 19755.3595 \quad (40)$$

$$K_{p1} = 2 * ts_{i1} * w_1 * M_{ev} = 8328.5664 \quad (41)$$

Aquí se aplica un control PI con la siguiente función de transferencia en Laplace, que aplicando la ecuación (21) para discretizarla da como resultado:

$$H_3(z) = \frac{8328.56s + 19755.35}{s} \Big|_{s=\frac{2z-1}{Tz+1}} = \frac{8348z - 8309}{z - 1} \quad (42)$$

4.3. Diseño e implementación del sistema de envío y lectura de datos

El diseño del sistema de envío de datos propuesto parte de la disponibilidad de puertos que tienen las tarjetas de Texas Instruments y también de los modelos que se desean ejecutar en cada una de estas tarjetas. De acuerdo a lo anterior, se determina el número de señales a enviar y recibir entre los dos sistemas, y qué tipo de señales son: analógicas o digitales. Para determinar lo anterior, se consideran los dos sistemas a implementar en cada tarjeta, uno se denotará con el nombre de *modelo Planta*, que es donde se ubicará el ESS especificado a principio del capítulo, y el segundo se denotará con el nombre de *modelo Control*.

Según el esquema de la planta en Simulink (Figura 17) se deben enviar 6 señales que son: la tensión ufc_mes y la corriente ifc_mes de la FC, la tensión $ubus$ y la corriente $ibat$ de la batería, la Fuerza de resistencia F_res y la velocidad ve_v . Estas variables deben ser enviadas desde la planta al control (ver Figura 17) y sirven como retroalimentación para que el sistema de control calcule las señales de actuación en el siguiente paso de la simulación. En la Figura 6 se pueden observar cinco de las seis señales que se envían al control, la sexta señal corresponde a la corriente de la batería y está ubicada dentro del subsistema *Analyse* en la Figura 17.

Es muy importante tener en cuenta que debido a que los dos sistemas tienen bucles dentro de su configuración, antes de hacer la respectiva retroalimentación del bucle se debe incluir un

retardo de una muestra o “*unit delay*”, para realizar el retardo respectivo y tomar el valor justo antes del de salida.

Figura 17

Modelo Planta en Simulink

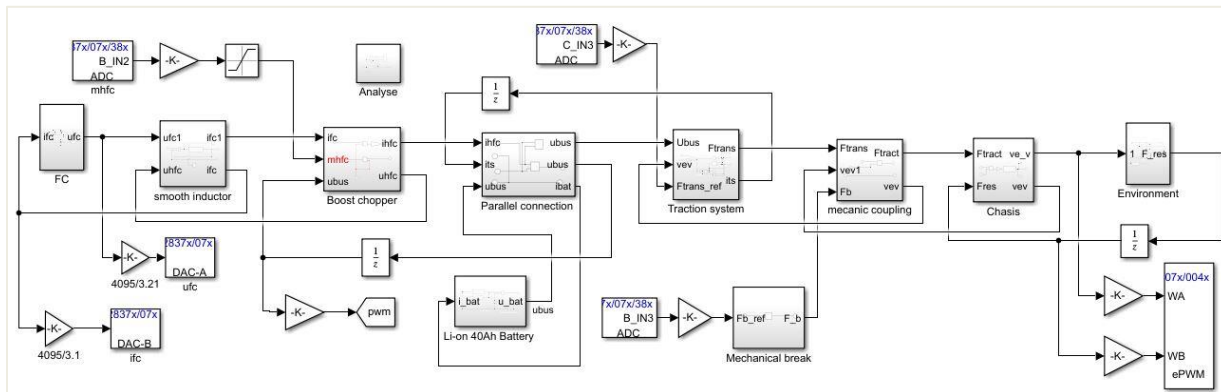
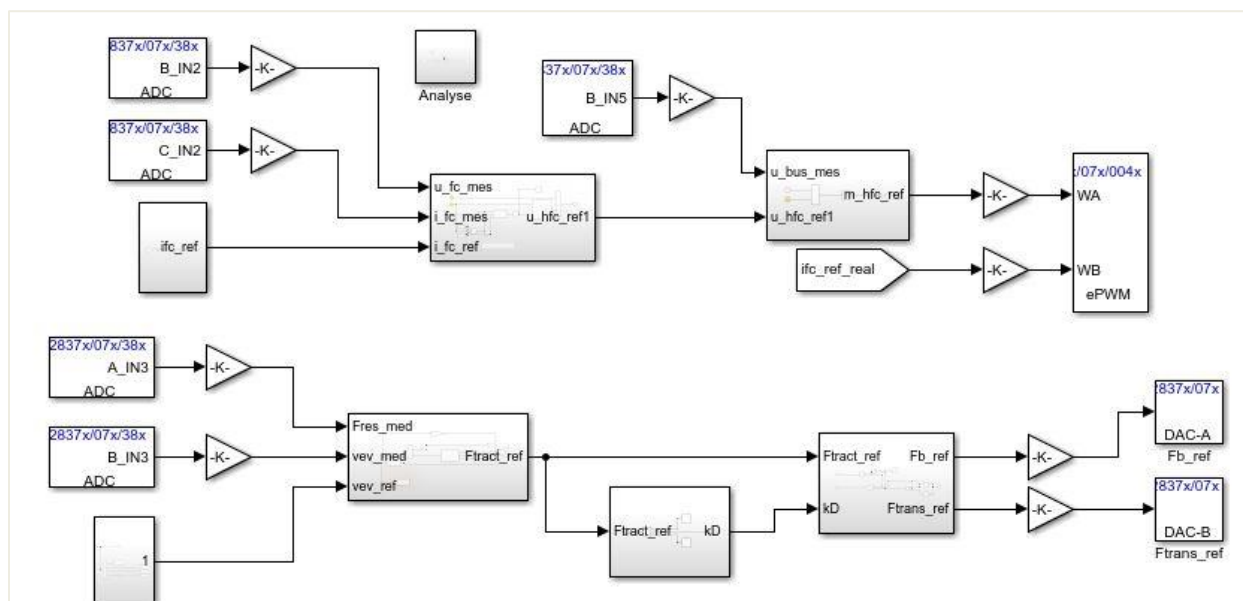


Figura 18

Modelo Control en Simulink

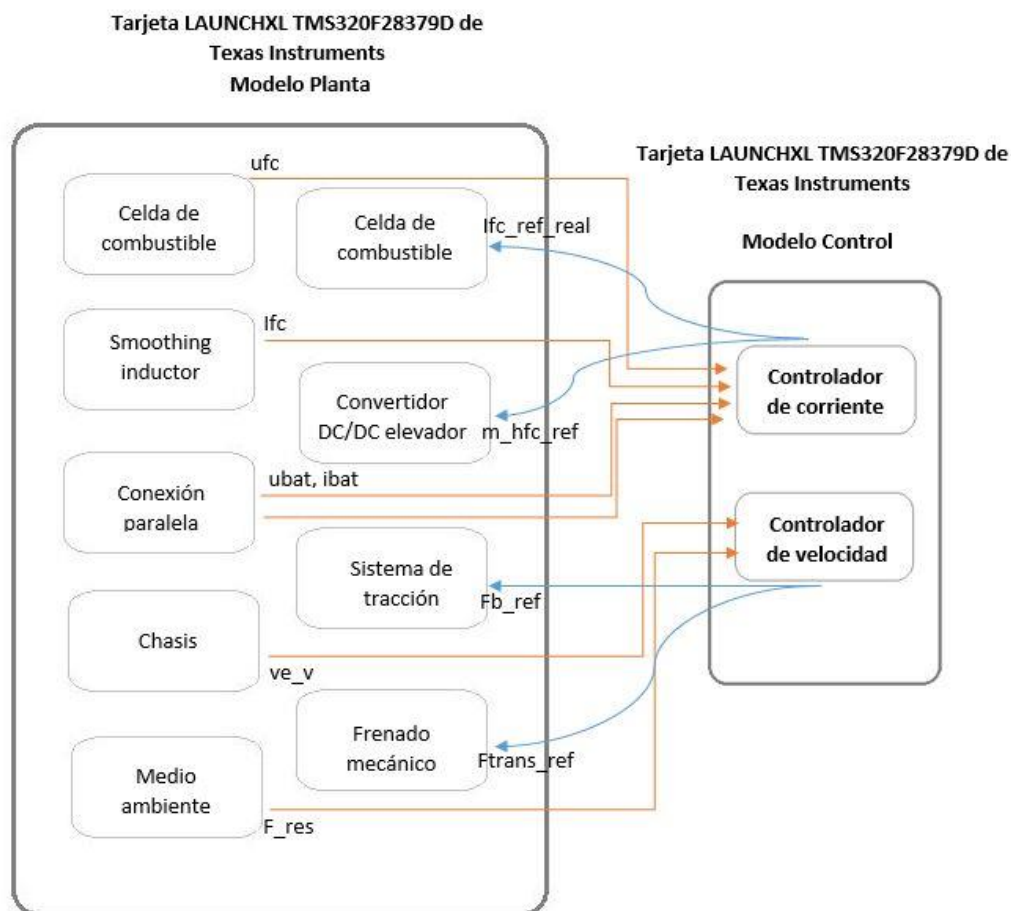


En el sistema de control se reciben las seis señales y se envían cuatro que son: la fuerza de frenado de referencia Fb_ref , la fuerza de transmisión de referencia $Ftrans_ref$, la referencia de

modulación m_{hfc_ref} y la corriente real de referencia ifc_ref_real . Para tener una idea más clara de la interacción entre los dos modelos y las señales que salen y entran en cada uno, visualice la Figura 19.

Figura 19

Esquema de interacción de señales



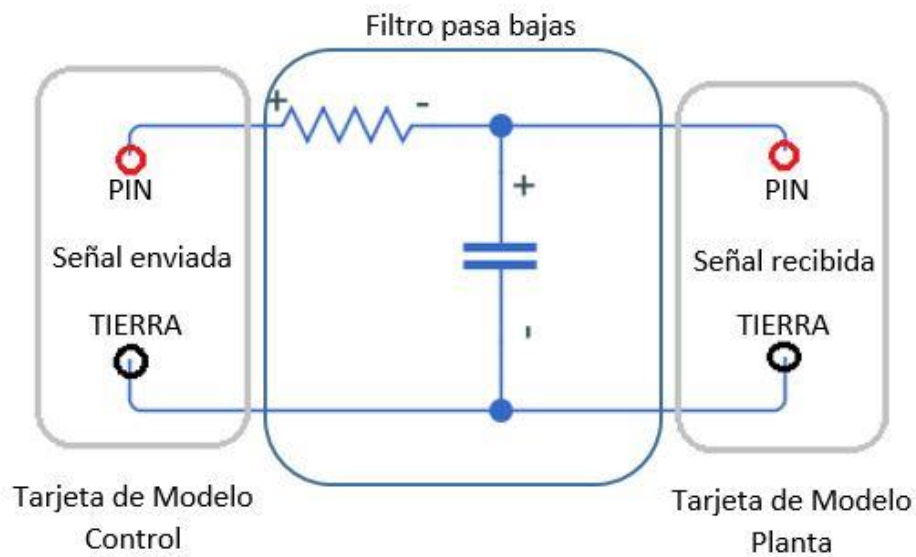
Teniendo en cuenta que el tipo de señales a enviar y recibir son todas analógicas y presentan diferentes rangos, es necesario escalar cada una de ellas. Para el envío de las señales, se emplean puertos DAC (*Digital to Analog Converter*) y PWM DAC (*Pulse Width Modulation Digital to Analog Converter*) de los microcontroladores. Para la recepción y lectura de las señales, se emplean puertos ADC (*Analog to Digital Converter*).

Para el caso de los puertos DAC, estos están diseñados para enviar señales analógicas a una resolución de 12 o 16 bits. Para este caso se elige la resolución de 12 bits (3.3/4095), ya que su configuración es una señal de conversión de un solo pin, mientras que la de 16 bits es diferencial y requiere de un par de pines de salida. Las señales a enviar se escalan para ser enviadas en el rango de 0-3.21 V, que fue la tensión real medida en los bornes de la tarjeta (a pesar de que el valor ideal estipulado es de 3.3 V, es decir, la tensión tiene un error de 0.09 V). Una vez se escala la señal, se realiza su conversión al rango entre 0 y 4095 (considerando la resolución de 12 bits seleccionada), por medio de una ganancia como muestra la Figura 17.

El otro método para envío de señales es por medio de los pines PWM DAC que contiene la tarjeta. Este método es requerido, dado que la tarjeta solo presenta dos puertos DAC con acceso físico para la interconexión. Los puertos PWM son configurados considerando una frecuencia de conmutación de 10kHz. La salida de estos puertos debe ser filtrada de modo que efectivamente se envíen los valores deseados. Para lograr que esto ocurra, se diseñan filtros pasa bajas con una frecuencia de corte que corresponde al valor de la frecuencia a la que se envían los datos, en este caso la frecuencia es de 500 [Hz]. Se escoge el filtro pasa bajas de primer orden mostrado en la Figura 20, con resistencia comercial de 39 [k Ω], y se determina el valor del condensador (la frecuencia para esta ecuación está en [rad/s]):

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \rightarrow C = \frac{1}{\omega_c * R} = \frac{1}{500 * 2\pi * 39 * 10^3} = 8.1617 [nF] \quad (43)$$

Finalmente, se escoge el valor comercial más cercanos, en este caso de 8.2 nF.

Figura 20*Esquema circuital del filtro pasa bajas*

Los pines que se usaron en las tarjetas son pines *mux*, es decir que pueden usarse de dos o más formas. En la Tabla 2 se muestra cómo están ubicados y con qué tipo de señal de la tarjeta comparten el puerto.

Tabla 2*Nomenclatura de los pines en la tarjeta*

Mux del pin	Nombre principal del pin	Número del pin
DAC_A	ADC_A0	J3_30
DAC_B	ADC_A1	J7_70
EPWM7A	DAC3	J8_72
EPWM7B	DAC4	J8_71
EPWM8A	DAC1	J4_32

EPWM8B	DAC2	J4_31
---------------	------	-------

La anterior tabla muestra cómo conectar el pin de manera externa y cómo se configura dentro de Simulink, es decir, mientras en Simulink se configura el bloque como un EPWM8A, en la tarjeta ese pin corresponde al mismo DAC1; esto sucede de la misma manera con los otros pines de la primera columna de la Tabla 2.

En lo que respecta al sistema de recepción y lectura de datos, se emplean puertos ADC de los microcontroladores. Una vez los datos son leídos (la señal se recibe en el rango entre 0 y 3.3V y el resultado de la conversión está en el rango entre 0 y 4095 según la resolución de 12 bits del ADC), se realiza la conversión inversa para obtener el valor final según el rango correspondiente de la señal.

Las señales que se envían desde la tarjeta de la planta con sus respectivos pines, y las señales recibidas por la tarjeta de control, se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3

Pines de salida y entrada de las señales de medida

Pin de salida Tarjeta de la planta	Señales enviadas	Pin de recepción Tarjeta de Control	Rangos de las señales	Factor escalar
DAC_A	ufc_mes	ADC_B2	70 [V]	$4095/(3.21*21.8)$
DAC_B	lfc_mes	ADC_C2	0-420 [A]	$4095/(3.21*130.8)$
EPWM7A	ve_v	ADC_B3	0-25[m/s]	$4095/(3.21*7.78)$
EPWM7B	F_res	ADC_A3	0-420 [N]	$4095/(3.21*130.8)$
EPWM8A	ubus	ADC_B5	0-90 [V]	$100/(3.21*28.03)$

EPWM8B	ibat	ADC_C5	(-200)-	$(ibat*0.007133+1.4266)*(100/3.21)$
250 [A]				

Nota: Estas señales son enviadas desde la tarjeta de la planta a la tarjeta de control por los pines especificados.

Las señales que van desde la tarjeta de control a la tarjeta de la planta con sus respectivos pines se muestran en la siguiente tabla, aquí se tiene en cuenta que el valor tomado en bornes de la tarjeta es de 3.3 V:

Tabla 4

Pines de salida y entrada de las señales de control

Pin de salida Tarjeta de control	Señales enviadas	Pin de recepción Tarjeta de la planta	Rango de señales	Factor escalar
DAC_A	Fb_ref	ADC_B3	(-1000)-0 [N]	-4095/(3.3*303.03)
DAC_B	Ftrans_ref	ADC_C3	0-2000 [N]	4095/(3.3*606.06)
EPWM8A	m_hfc_ref	ADC_B2	0 -1	100/3.3
EPWM8B	ifc_ref_real	ADC_C2	0 – 420 [A]	100/(3.3*130.8)

Nota: Estas señales son enviadas desde la tarjeta de control a la tarjeta de la planta por los pines especificados.

4.4. Configuración de los bloques en Simulink

La implementación del sistema de envío y recepción de datos en las tarjetas de Texas Instruments, se realizó mediante el software MATLAB/Simulink.

Antes de realizar cualquier paso, primero se deben descargar algunas librerías para la programación de las tarjetas Texas Instruments desde Simulink, la primera librería que solicita el programa es *Embedded Coder Support Package for Texas Instruments C2000 Processor*, ya

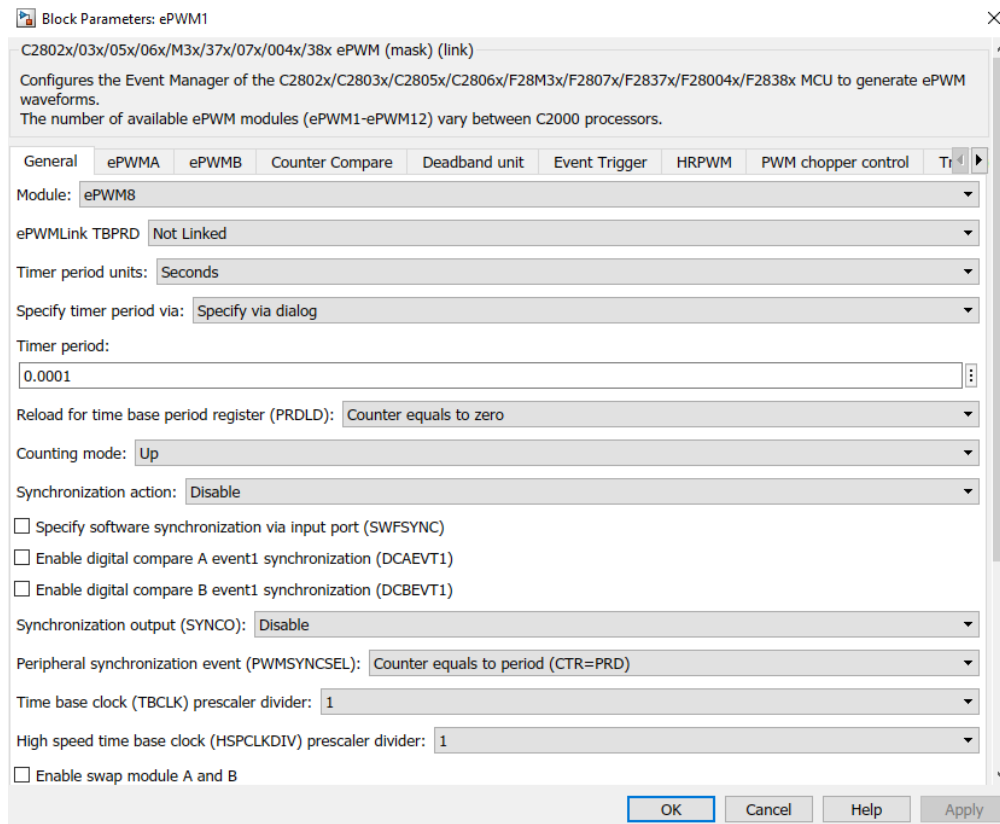
instalado se oprime en *setup* o *configuración* y aparece una pantalla donde es muy importante seleccionar la librería de la tarjeta que se va a trabajar, en este caso “*TI F2837XD*”, continuando con el proceso, el programa pide descargar las librerías *TI ControlSUITE* y *TI Code Composer Studio*, que son las últimas para poder ejecutar los bloques de Simulink en una tarjeta Texas Instruments. Dentro de *Get add-ons* de MATLAB se puede encontrar un vídeo instructivo del procedimiento completo.

Puertos PWM DAC: Para la programación de estos puertos, se emplea el bloque ePWM de Simulink que se toma de la librería *Embedded Coder Support Package for Texas Instruments C2000 Processor* carpeta *F2837xD*. Como primer paso, se establece la frecuencia de conmutación en 10 kHz, teniendo en cuenta seleccionar una frecuencia por encima de la cual se enviarán los datos (500 Hz), y pueda ser atenuada empleando el filtro pasa bajas propuesto. La frecuencia a partir de la cual se considera que comienza la banda de atenuación del filtro es de $10 \omega_c = 5000$ Hz, siendo este un valor por debajo de la frecuencia de conmutación seleccionada para las señales PWM, es decir, un valor conveniente para filtrar la señal.

La ventana de configuración para el ePWM tiene los siguientes parámetros (Figura 21):

Figura 21

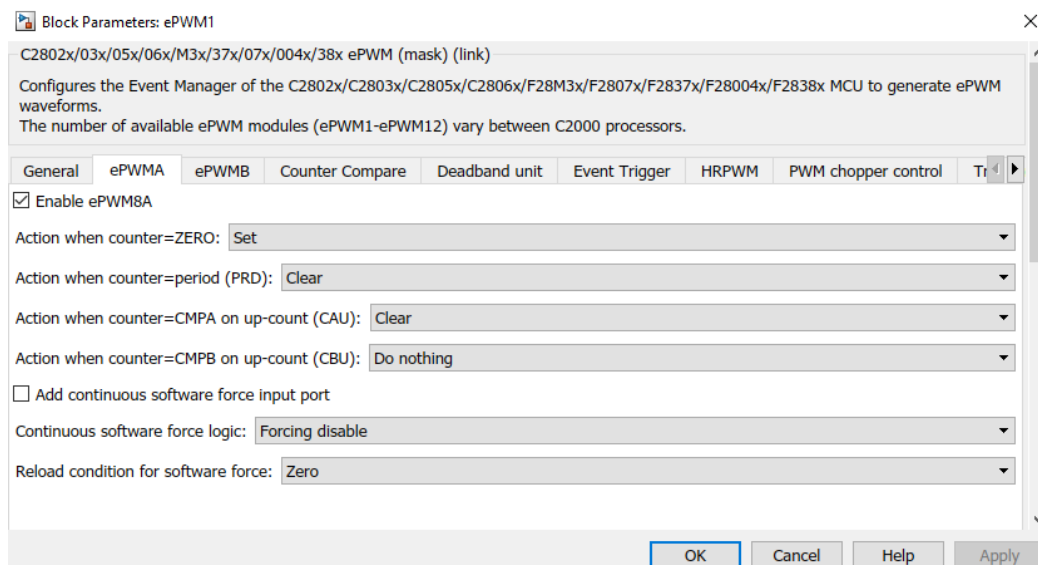
Configuración del bloque ePWM



La siguiente configuración del bloque ePWM (segunda y tercera pestaña en la Figura 22) es donde se habilitan los puertos y se configuran los contadores para los puertos configurados.

Figura 22

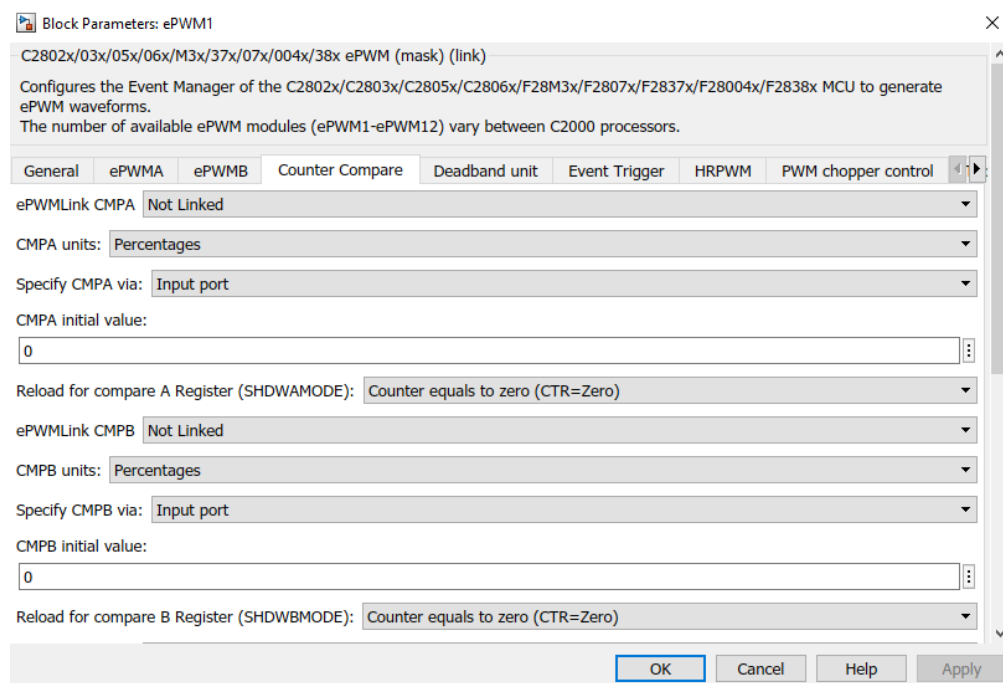
Habilitación del puerto y configuración de contadores



Finalmente, la última configuración para este bloque es en la sección *Counter Compare* (ver Figura 23). En ella se habilita la entrada al bloque en *Specify CMPA via*, y se define que será en unidad de porcentaje. El valor de inicio del registro de comparación es 0 para los dos.

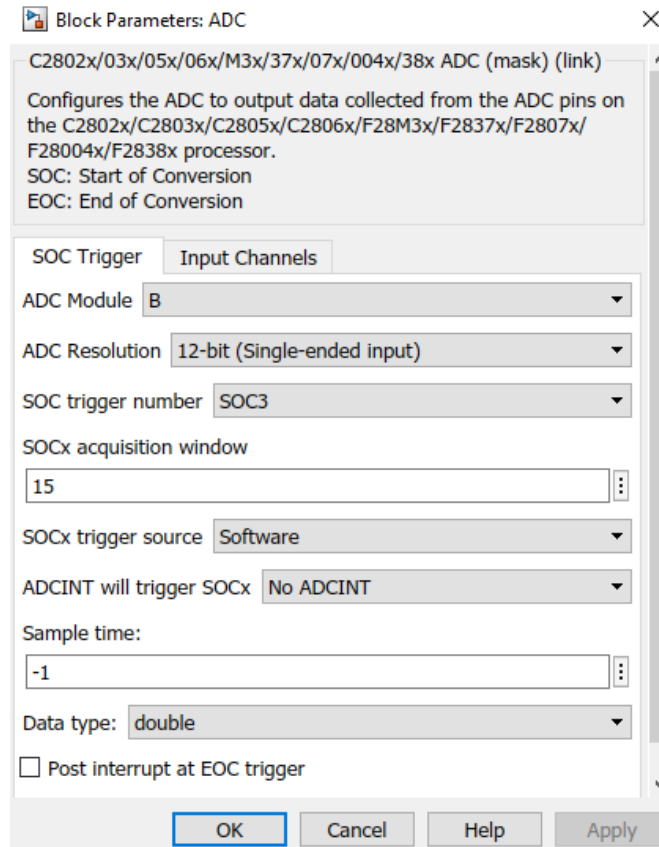
Figura 23

Habilitación de la entrada



Puertos DAC: Para la configuración de los bloques DAC A y B, solo se requiere configurar la letra del pin que se usará.

Puertos ADC: La otra configuración requerida es el bloque ADC. En la tarjeta existen 4 convertidores, cada uno diferenciado por una letra desde la A hasta la D. Para poder utilizar diferentes entradas asociadas a un mismo convertidor, es necesario aclarar cuál inicio de conversión (*SOC*) se va a utilizar. Simulink no puede diferenciar cuál de todos los canales del convertidor A, B, C o D se está utilizando, si no se elige el *SOC* según el número del puerto. Por ejemplo, como se muestra en la Figura 23, el puerto configurado sería ADC_B3. Los parámetros que se deben modificar del bloque son: *ADC Module*, *ADC Resolution*, *Input Channels*, *SOC trigger number*, *Sample time* y *Data type*.

Figura 24*Configuración del bloque ADC*

Como se especificó en el capítulo anterior, el tiempo de muestreo para toda la simulación es 1/500 s. Al poner *-1* en *Sample time* (Figura 24), se adopta el tiempo definido para todo el modelo que se configura en el *Solver*, dentro de *Configuration parameters*.

5. Análisis de resultados de simulación

Teniendo en cuenta lo estipulado en capítulos anteriores, se implementaron los modelos en tiempo discreto establecidos, con el fin de comparar los resultados respecto al modelo original obtenido del desafío del IEEE.

Las simulaciones se realizaron con el perfil de velocidad *NEDC_lim* que tomó el desafío de un diseño hecho por la comisión europea específicamente para evaluar el impacto medioambiental de los vehículos.

Figura 25

Gráfica de velocidad - modelo original

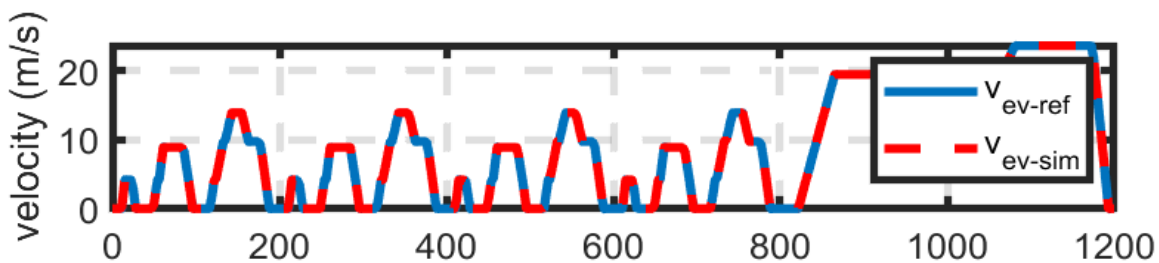
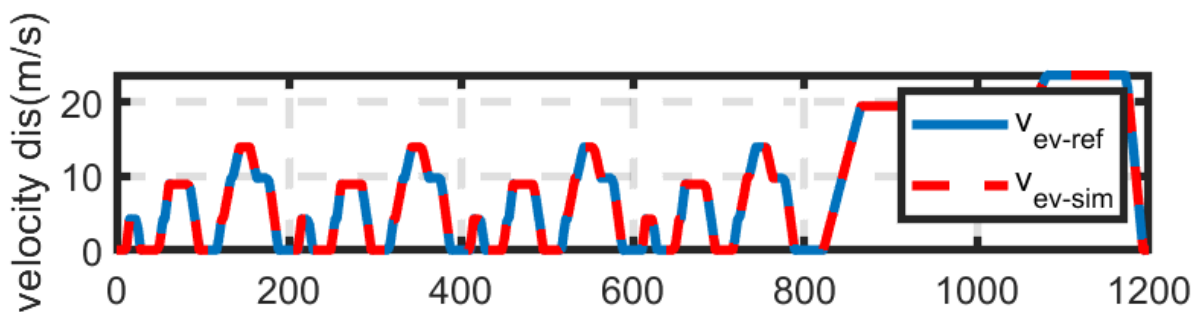


Figura 26

Gráfica de velocidad - modelo discretizado

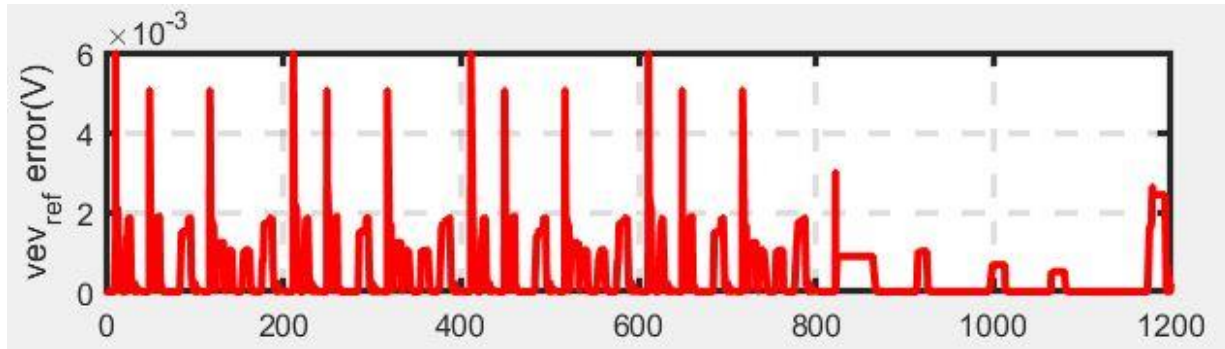


Según las gráficas anteriores Figura 25 y 26, los resultados obtenidos a partir de la simulación del modelo en tiempo discreto, corresponden con los resultados del modelo original.

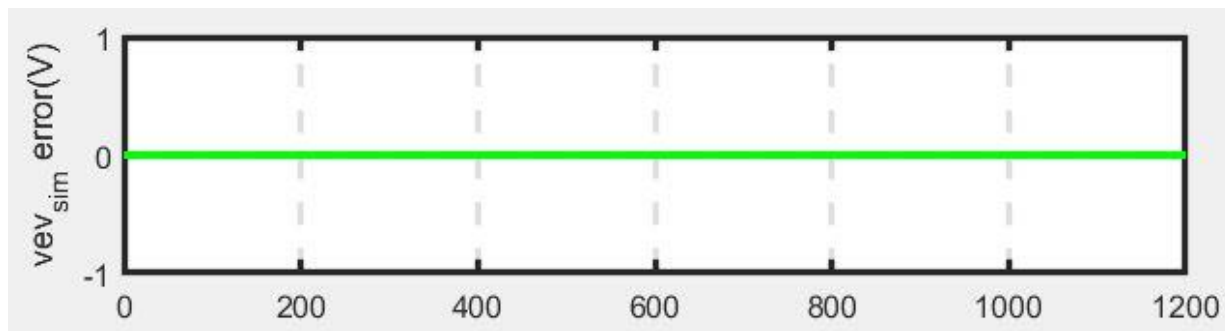
Para efectos de comparación, se calculó el valor absoluto punto a punto de las gráficas anteriores, el cual se presenta a continuación:

Figura 27

Error de velocidad de referencia entre los modelos

**Figura 28**

Error de velocidad de simulación entre los modelos

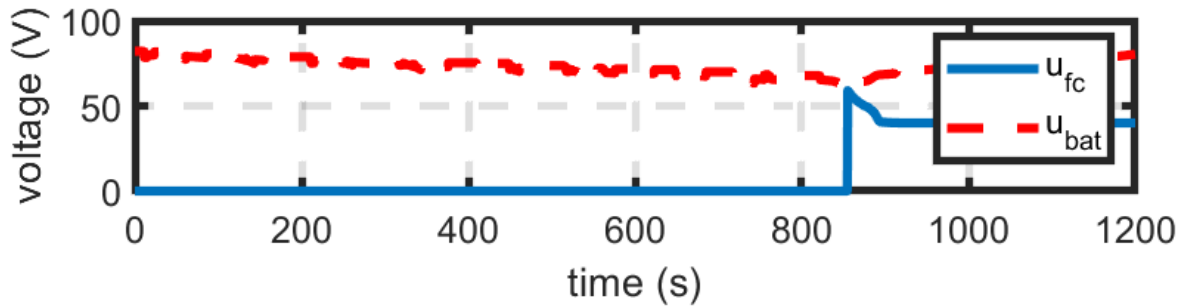


Analizando la gráfica de error en la Figura 27 se puede decir que debido al tiempo discreto hay un pequeño retardo, esto genera un error, por otro lado, la velocidad de simulación es la misma para los dos casos, el perfil de velocidad *NEDC_lim*, por ello la Figura 2 no muestra ningún error, los valores son la entrada directa al sistema que proviene de una matriz de datos.

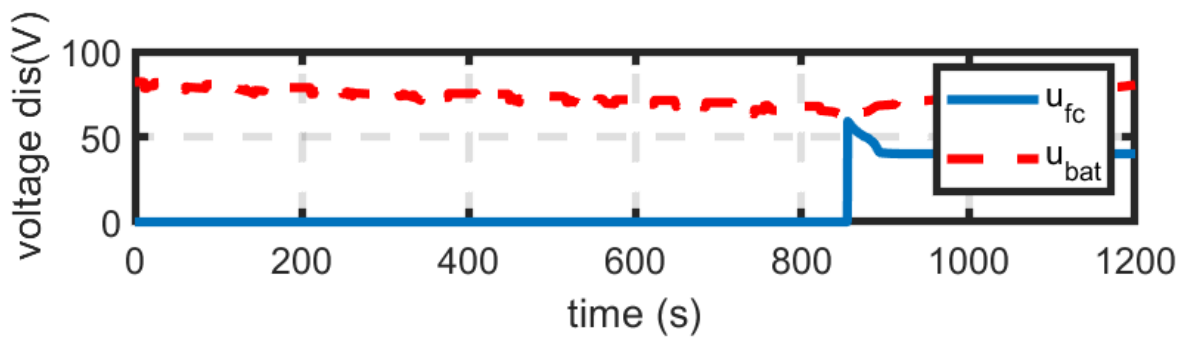
De la misma manera como se realizó para las velocidades, se presenta la comparación para las otras señales de tensión, potencia, SOC y energía de los modelos, obteniendo las gráficas mostradas a continuación:

Figura 29

Tensiones de simulación – modelo original

**Figura 30**

Tensiones de simulación - modelo discretizado

**Figura 31**

Error de tensión u_{fc} entre los modelos

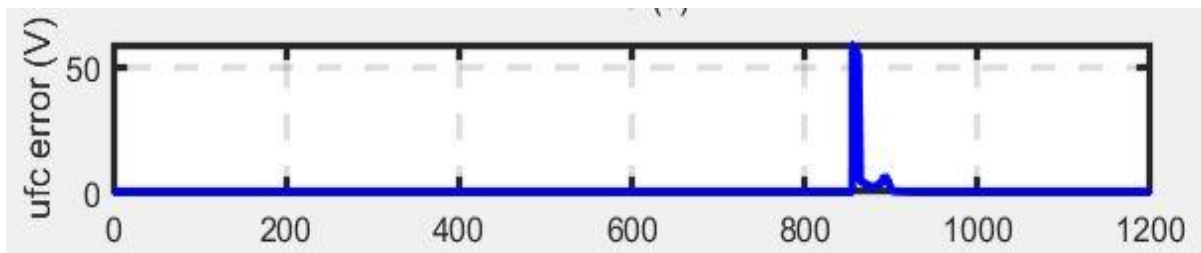
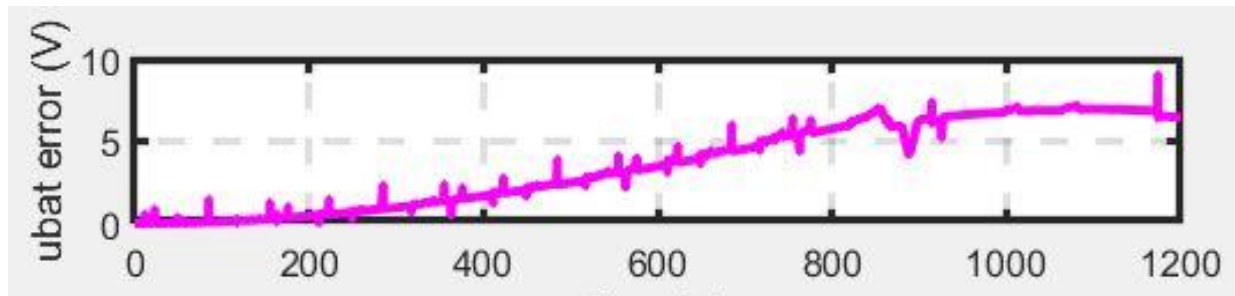


Figura 32

Error de tensión u_{bat} entre los modelos



Según la Figura 29 y 30, los datos de simulación en tiempo discreto se comportan de la misma manera como en el modelo original, sin embargo, como se aprecia en la Figura 31, la tensión de la celda tiene un pequeño error debido a un leve retardo del tiempo discreto, a diferencia de la tensión de la celda, el error de la tensión de la batería (Figura 32) se puede evidenciar que sufre un error mayor y este puede deberse a las funciones de transferencia que fueron discretizadas, a diferencia de la tensión de la celda, la tensión de la batería está ligada todo el tiempo a las funciones de transferencia ejecutadas para el control.

Figura 33

Potencias del modelo original

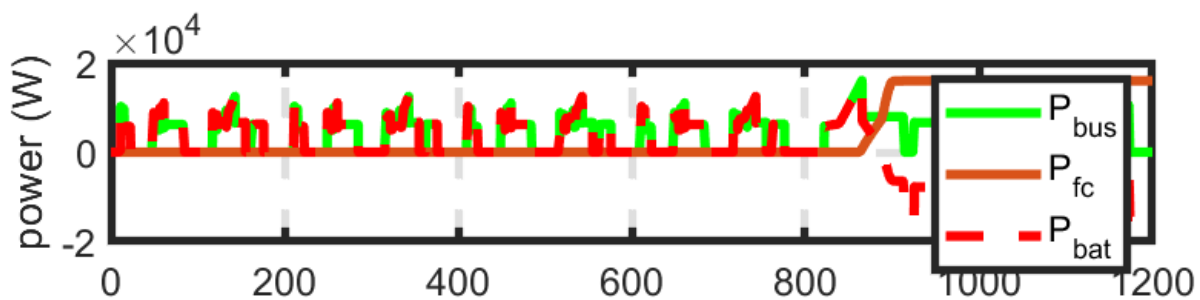
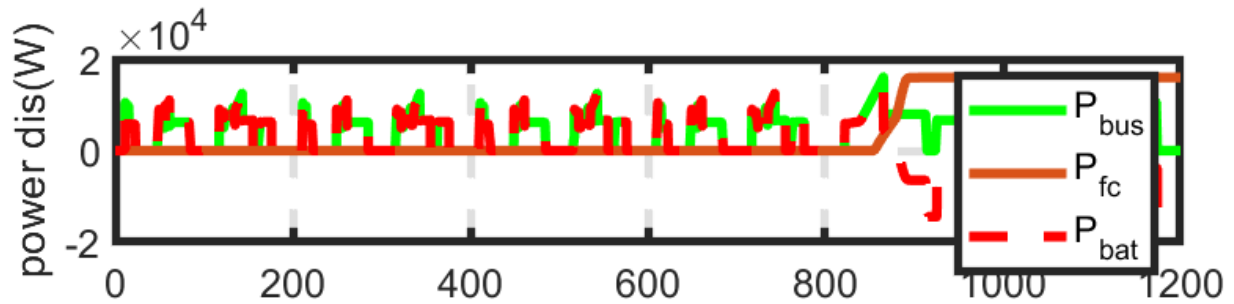
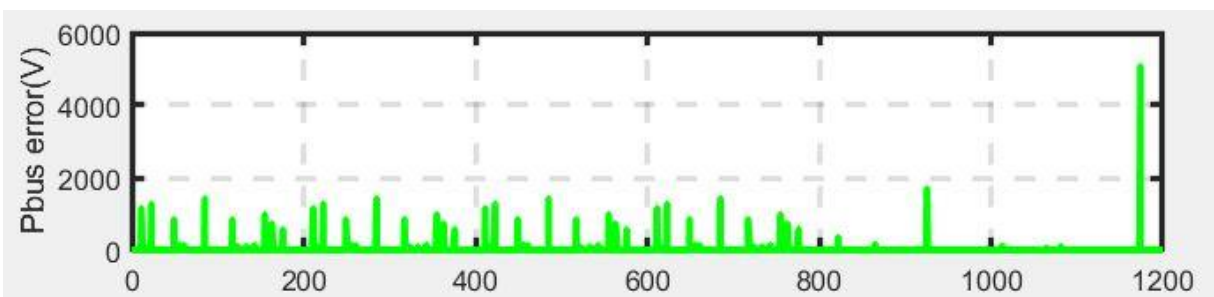


Figura 34

Potencias del modelo discretizado

**Figura 35**

Error de P_{bus} entre los modelos

**Figura 36**

Error de P_{fc} entre los modelos

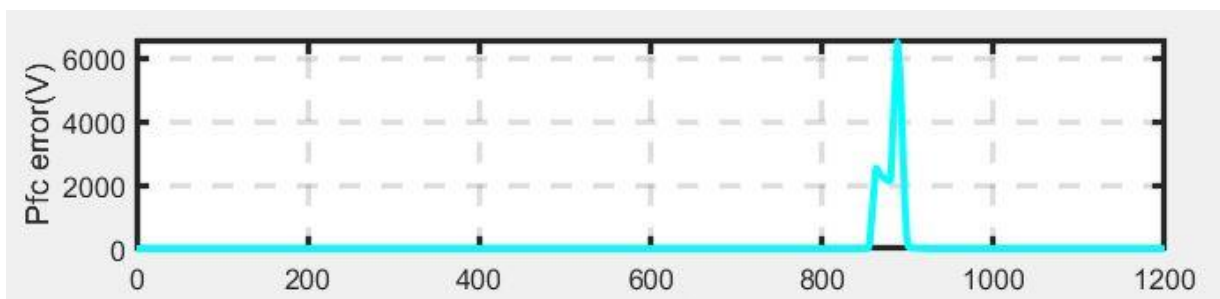
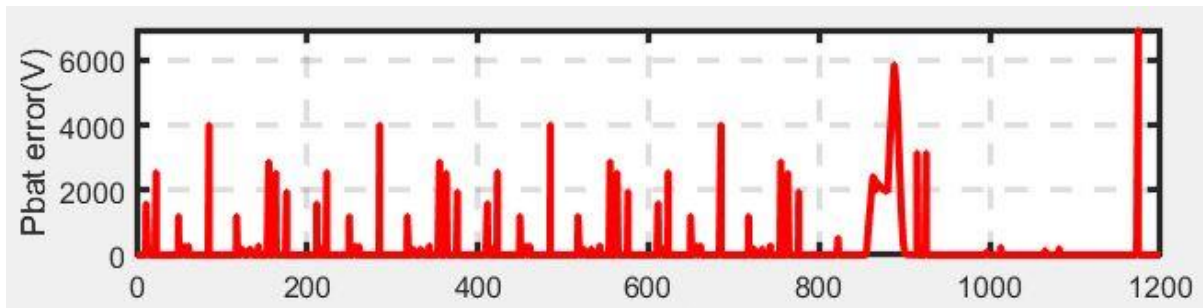


Figura 37

Error de P_{bat} entre los modelos



Visualizando la Figura 33 y 34 no se puede deducir exactamente si hay errores en los valores, para ello se toma como base las gráficas de errores donde se encuentra (a diferencia de las tensiones y las corrientes comparadas) que las potencias obtenidas en las Figuras 35, 36 y 37 tienen grandes valores de error que pueden deberse a que la discretización no es pertinente y que los retardos desvían totalmente las respuestas de control y hacen que el sistema tenga estos picos por los retrasos en milisegundos.

Figura 38

Energías del modelo original

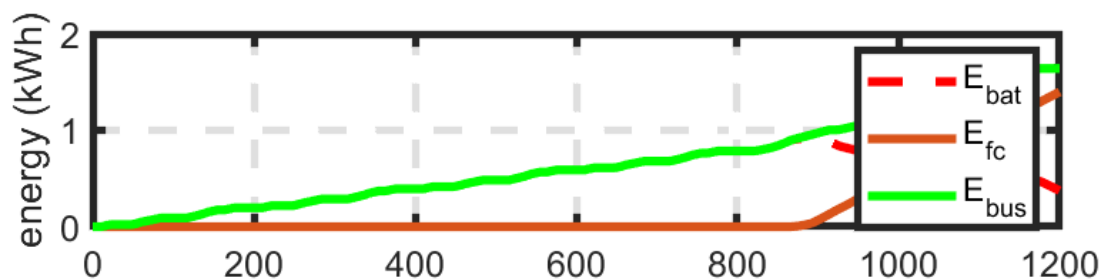


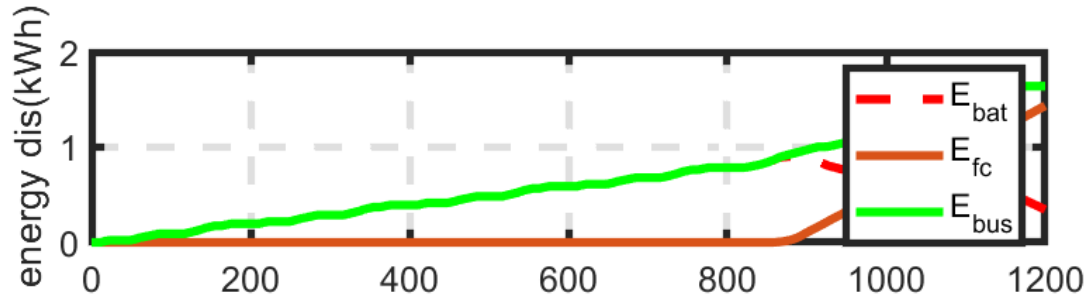
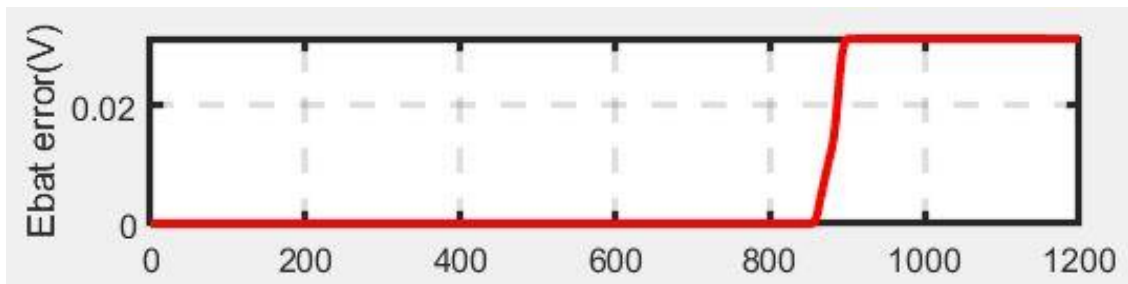
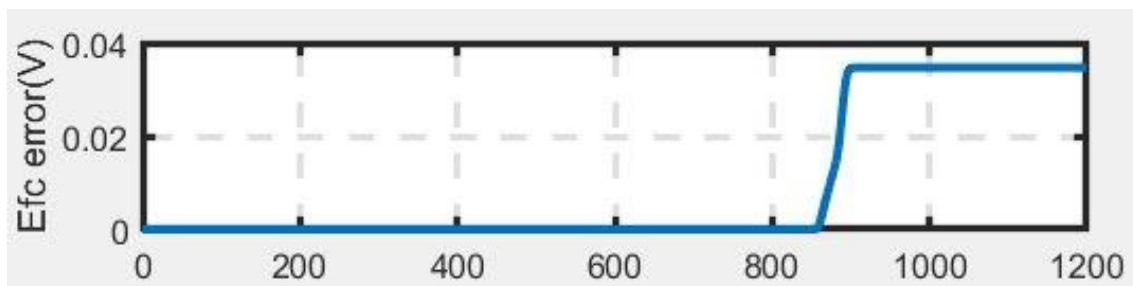
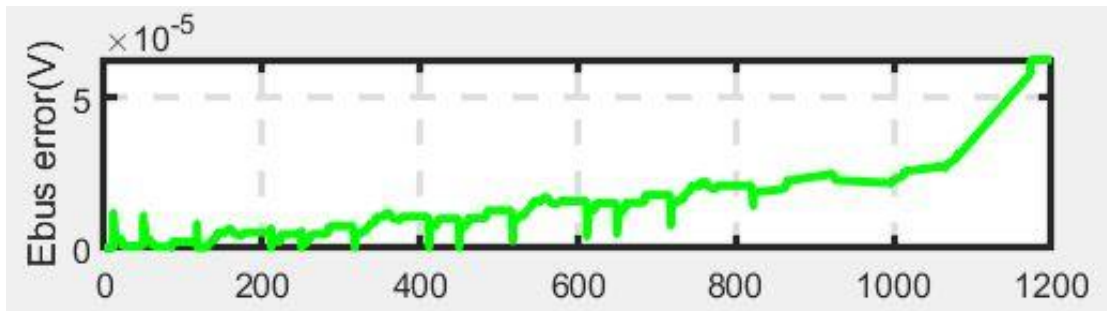
Figura 39*Energías del modelo discretizado***Figura 40***Error de tensión E_{bat} entre modelos***Figura 41***Error de tensión E_{fc} entre modelos*

Figura 42*Error de tensión E_{bus} entre modelos*

Tomando los valores de las Figuras 38 y 39, se obtienen los valores de error absoluto que se presentan en las Figuras 39, 40 y 41, de ellas se puede concluir que respecto a la energía del sistema discretizado, (Figura 39) las respuestas no están muy lejanas de los valores del modelo original, lo que quiere decir que la discretización y error de potencias no afecta estos cálculos de energías.

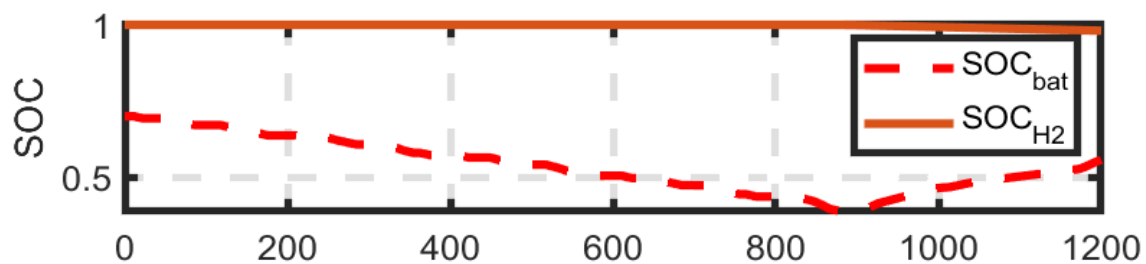
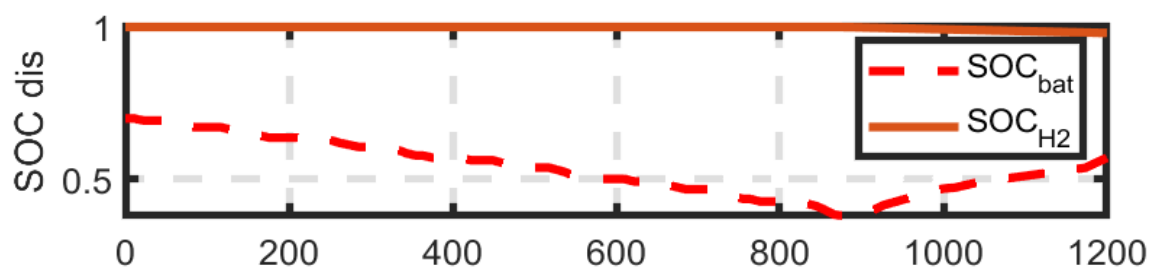
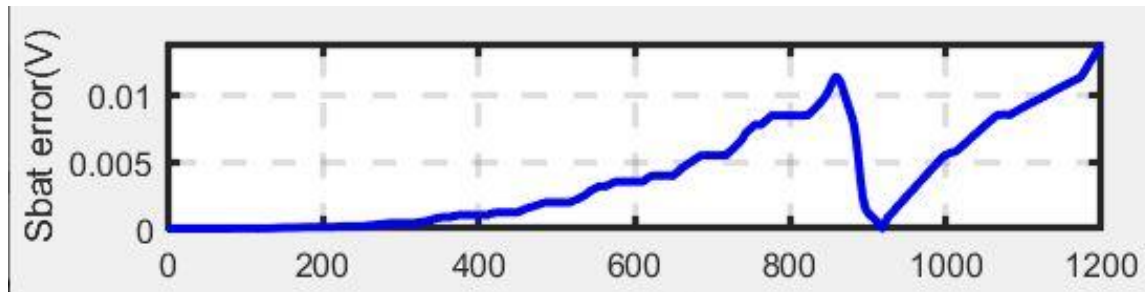
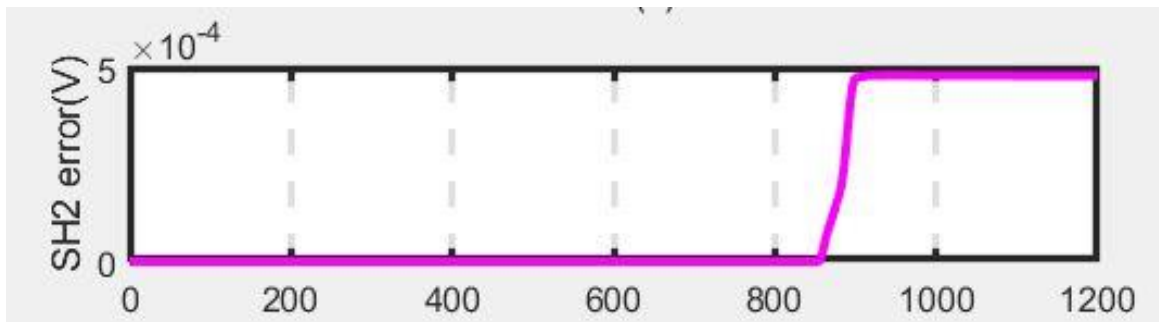
Figura 43*SOC del modelo original***Figura 44***SOC del modelo discretizado*

Figura 45

Error de SOC de las baterías entre modelos

**Figura 46**

Error de SOC de hidrógeno entre los modelos



Haciendo una comparación entre la Figura 43 del modelo original, la Figura 44 del modelo discretizado y las figuras de los errores de SOC de la batería (Figura 45) y del hidrógeno (Figura 46) se puede recalcar que al igual que con las energías, las tensiones y las corrientes, los errores efectuados por las discretización son mínimos. El problema real se encuentra en las potencias que se generan con la discretización del sistema que podrían representar una grande dificultad en el momento de hacer una futura implementación utilizando las discretizaciones de este trabajo. Se puede atribuir esta inconsistencia a los retardos creados en el sistema discretizado.

6. Observaciones

Teniendo en cuenta que el sistema estudiado está compuesto por varios subsistemas con diferentes funciones de transferencia y bucles de retroalimentación, fue necesario realizar un proceso de discretización con verificación mediante simulación por partes, con el fin de ir verificando la convergencia de los resultados en cada etapa.

Por medio de las simulaciones fuera de línea, se corroboró el funcionamiento de los modelos en tiempo discreto establecidos. Se propone como trabajo futuro la implementación de los modelos en las tarjetas, verificando de esta manera su viabilidad de implementación en esta plataforma en tiempo real.

Respecto a los puertos usados para recibir los datos, se debe considerar el *offset* que presentan los puertos ADC, y realizar la respectiva corrección. Se puede tener más información de los valores *offset* en la hoja de datos de la tarjeta.

7. Conclusiones

El diseño de un simulador en tiempo real compete un proceso de discretización que permita obtener modelos que puedan ser programados en una plataforma digital, y correspondan con los modelos del sistema de interés. Es importante ser minucioso y corroborar que las funciones de transferencia discretizadas se comporten como la función principal, y que los resultados de simulación del sistema converjan.

Durante el diseño del simulador es importante definir los modelos a implementar en cada una de las tarjetas según la funcionalidad. En esta parte se resalta que fue destinada una tarjeta para el sistema de control y gestión del sistema, de esta manera la implementación de los algoritmos de control se realizaría de una forma muy cercana a la realidad, permitiendo verificar

su viabilidad de implementación en una plataforma digital de control. La definición de modelos a implementar por tarjeta, permite también establecer los datos a enviar entre tarjetas y la definición del proceso de envío y recepción.

La inicialización de un simulador es un tema de resaltar, debido a que, si los sistemas en las dos tarjetas no inician al mismo tiempo, podrían enviarse valores entre tarjetas que no corresponden con el funcionamiento del sistema. De esta manera, es necesario sincronizar e inicializar las dos tarjetas para que el sistema de control se ejecute de manera correcta.

Referencias Bibliográficas

- Chávez, Héctor. Mendoza, Patricio. (2018, 10 de julio). Simulación en tiempo real se abre paso en el sistema eléctrico local. *Electricidad*. Obtenido de <https://www.revistaei.cl/informes-tecnicos/simulacion-en-tiempo-real-se-abre-paso-en-el-sistema-electrico-local/#>
- Quiñonez, Laura (2019, 30 de octubre). Llegar a cero emisiones netas de carbono para el 2050, ¿es posible?. *Noticias ONU*. Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2019/10/1464591>
- Pilas de combustible: ventajas e inconvenientes. (2015, 4 de Enero). n/a . *Energías Renovables*. Obtenido de <http://www.energiasrenovablesinfo.com/hidrogeno/pilas-combustible-ventajas-inconvenientes/> .
- C, Departure. Jemei, Samir. Boulon, Loic. Bouscayrol, Alain. Marx, Neigel. Morando, Simon. Castaings, Ali. (2017). IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017-Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. *IEEE Xplore*.
- Mendoza, Mario. (2017). Potencia y Energía de las celdas de combustible. *SILO.TIPS*. Obtenido de <https://silo.tips/download/potencia-y-energia-de-las-celdas-de-combustible#modals>.
- D.S, Kim., & M.D, Guiver. (2012). Polymers for a Sustainable Environment and a Green Energy . *ScienceDirect*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/proton-exchange-membrane-fuel-cells>.
- Boost Converters. (s.f). n/a. *Learnaboutelectronics*. Obtenido de <https://learnabout-electronics.org/PSU/psu32.php>.

Zabaleta, Javier. Martín, Idoia. (2004). *Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido: diseño y validación experimental*. Universidad Pública de Navarra