



Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Modelización del sistema de
almacenamiento de energía y de su
regulador de un vehículo solar de fines
experimentales.

Titulación: Grado en Ingeniería Eléctrica

Alumno: Sergio Mendoza Zaplana

Director: Francisco de Asís Ruz Vila

Cartagena, 28 de Octubre de 2013

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	5-7
1.3 Estructura del proyecto.....	6
1.3.1 Capítulo 2: Estado del arte.....	6
1.3.2 Capítulo 3: Caso del estudio.....	6
1.3.3 Capítulo 4: Descripción del simulador.....	6
1.3.4 Capítulo 5: Adaptación de los modelos y simulaciones.....	7
1.3.5 Capítulo 6: Conclusiones.....	7
<hr/>	
2. ESTADO DEL ARTE.....	8-13
2.1 Bibliografía de referencia.....	9
2.2 Caso propuesto por los artículos tomados como referencia en este proyecto.....	9
2.3 Modelo propuesto en el artículo dónde se realizan una serie de simulaciones con el bloque motor alimentado por una fuente de intensidad controlada.....	10-13
2.4 Modelos de acumuladores propuestos en la bibliografía consultada.....	13-15
<hr/>	
3. DEFINICIÓN DEL CASO DEL ESTUDIO.....	16-38
3.1 Introducción al caso del estudio.....	17-19
3.2. Bloque motor.....	19-24
3.2.1. Introducción al motor para vehículo eléctrico.....	19-20
3.2.2 Máquina utilizada en el sistema.....	20-23
3.2.3 Ecuaciones que definen el comportamiento del sistema.....	23-24
3.3 Panel fotovoltaico.....	25-38
3.3.1 Introducción al panel fotovoltaico.....	25-26
3.3.2. Modelo de la célula fotovoltaica desarrollado en Matlab-Simulink usados en el proyecto.....	26-29
3.4.1 Introducción al sistema de acumulación.....	29-30
3.4.2 Sitemas de acumulación.....	30
3.4.2.1 Elementos que constituyen el sistema de almacenamiento.....	30-32

3.4.2.2 Clasificación/ tipos de sistemas de acumulación.....	32-33
3.5 Sistema de regulación de carga.	33-38
3.5.1 Introducción al sistema de regulación.	33-38
<hr/>	
4. DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR.....	38-62
4.1 Bloque motor de Matlab-Simulink.	39-44
4.1.2 Esquema de partida del bloque PMDC motor en Matlab-Simulink.	42-44
4.2 Bloque de control en Matlab-Simulink aplicado al motor.	44-51
4.2.1. Saturation (limitador).....	47-48
4.2.2 Relay.	48
4.2.3 IGBT (transistor de compuerta aislada).	48
4.2.3.1 Transistor IGBT en saturación.	49
4.2.3.2 Transistor IGBT en corte.....	50
4.2.4 Bloque 'Diode' de Matlab-Simulink.	50-51
4.3 Modelo de sistema de almacenamiento desarrollado en Matlab-Simulink.	51-62
<hr/>	
5. ADAPTACIÓN DE LOS MODELOS Y SIMULACIONES.....	62-83
5.1 PRIMERA SIMULACION.	63-65
5.2 SEGUNDA SIMULACIÓN.....	66-67
5.3 TERCERA SIMULACIÓN.	68-70
5.4 CUARTA SIMULACIÓN.	71-73
5.5 QUINA SIMULACIÓN.	74-77
5.6 SEXTA SIMULACIÓN.	77-83
<hr/>	
6. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.....	84-88
6.1 Modelo de control de carga comparación intensidad de la batería.	85-87
6.2 Modelo de control de carga comparación velocidad del bloque motor.	88

- BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Objeto del proyecto.

En este proyecto, se pretende modelizar con el programa 'Matlab-Simulink' un sistema de acumulación y regulación para un vehículo solar de fines experimentales. Compuesto este por un motor de corriente continua de imanes permanentes de características similares a las que presenta el prototipo del vehículo Aníbal, desarrollado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Cartagena. Con el objetivo de modelizar un sistema de acumulación y regulación además de averiguar cómo se comporta el sistema en función del tiempo y los distintos parámetros que influyen en el comportamiento.

De forma que el objeto principal del proyecto, será realizar diferentes simulaciones con 'Matlab-Simulink' para el modelo de batería que se vaya a usar hasta conseguir implementar la regulación adaptación de esta al caso del proyecto, para los parámetros escogidos en el proyecto de Inmaculada Martínez Vidal, 'Modelización del sistema de tracción eléctrica y de alimentación de un vehículo solar de fines experimentales'. Donde además de establecer el control de la carga y descarga del sistema de acumulación, podamos detallar parámetros como SOC, tensión, intensidad de la carga y descarga con respecto del tiempo.

1.1 Alcance del proyecto.

El presente proyecto trata sobre la simulación de un sistema de acumulación y regulación en Matlab-Simulink diseñado para el almacenamiento de energía eléctrica de un vehículo solar con fines experimentales.

Para la elaboración de un modelo final del mismo estructuraremos el trabajo en tres partes.

Se citan los pasos previos a la obtención del modelo final:

- Realizar una serie de simulaciones en Matlab-Simulink, con el modelo de batería propuesto de menor a mayor complejidad, tratando de regular la carga y descarga de esta.
- Aplicar un regulador de carga a la batería para posteriormente ajustarlo a las necesidades propuestas.
- Una vez desarrollado el regulador, se aplica el resultado final de la simulación al modelo final del proyecto 'Modelización del sistema de tracción eléctrica y de alimentación de un vehículo solar de fines experimentales'.

Para la elaboración del modelo de batería, se ha consultado principalmente la siguiente bibliografía, [1] y [2], dada la proximidad al caso del estudio.

Así, mientras que el motor de imanes permanentes se alimenta por 200 V en bornes de la batería, en el caso presentado en la bibliografía, el motor del coche Aníbal es alimentado por 32 V. En consecuencia, se han tomado los datos presentados en dichos documentos para la recreación del modelo, pues tratan un motor con condiciones muy próximas a las del vehículo 'Aníbal'.

1.3 Estructura del proyecto.

El presente proyecto se estructura de la siguiente forma:

- Análisis de los casos planteados en la bibliografía consultada.
- Planteamiento del caso del estudio y descripción del mismo.
- Desarrollo del bloque de la batería en Matlab-Simulink, junto al esquema de control y modelos que definen el comportamiento de la batería.
- Estudio de los casos obtenidos en Matlab-Simulink, y representación de los resultados obtenidos en las simulaciones.
- Obtención de las conclusiones finales.

A continuación, vamos a nombrar los capítulos que componen este proyecto y el objetivo de cada uno de ellos.

1.3.1 Capítulo 2: Estado del arte.

En el capítulo 2 se analiza la principal bibliografía consultada para llevar a cabo el presente proyecto. Los artículos [1] y [2] tomados como referencia, estudian un caso de batería del tipo NiMH a 200 V y 6.5 Ah, con similares características a la que estudiaremos en nuestro proyecto. El modelo de batería, será aplicado en el proyecto a los modelos de panel fotovoltaico y motor de imanes permanentes modelizados y desarrollados en el proyecto realizado anteriormente por Inmaculada Martínez Vidal, al cual hacemos referencia en el estudio del presente proyecto.

1.3.2 Capítulo 3: Caso del estudio.

Primeramente se plantea en este capítulo el caso del estudio junto con la descripción de los tipos y modelos de sistemas de acumulación eléctrica. Además de una introducción y descripción a los tipos de células fotovoltaicas y motor de corriente continua, ya estudiados en el anterior proyecto, a los que se le aplicará el modelo de batería desarrollado.

1.3.3 Capítulo 4: Descripción del simulador.

En este capítulo, se estudia el esquema básico del bloque 'Battery' en Matlab-Simulink. Para ello se utiliza el bloque 'battery' y otra serie de bloques en Matlab-Simulink.

Como primer paso al estudio del modelo de batería desarrollamos los modelos propuestos por Karden [3] el cual presentaba un modelo de batería electroquímico representado por conjuntos de ecuaciones diferenciales, también se aplica el estudio de otros autores como: Thele [4], Salameh [5], Huet, Van Mierl et al, los cuales desarrollaban su modelo a partir de un circuito equivalente.

Describimos el bloque motor de imanes permanentes que se utilizará en el proyecto, además de su sistema de control y los bloques que lo componen en Matlab-Simulink.

Desarrollamos seguidamente las ecuaciones que determinaban la carga y descarga en los diferentes tipos de baterías propuestos. Así como el comportamiento de estas frente a carga y descarga, ficha técnica y curva de carga.

1.3.4 Capítulo 5: Adaptación de los modelos y simulaciones.

En el capítulo 5 se exponen los esquemas desarrollados con el bloque 'battery' de Matlab-Simulink de menor a mayor complejidad junto con los resultados obtenidos de las simulaciones.

Los primeros esquemas propuestos, están basados en el ejemplo que nos detalla Matlab-Simulink '*Implement generic battery model*' del artículo [2]. A partir de este esquema se va adaptando la simulación al caso del estudio.

En las simulaciones realizadas, utilizaremos para la descarga una resistencia y para la carga de la batería una fuente de intensidad. Después serán sustituidos estos elementos por un motor de corriente continua e imanes permanentes y por el panel fotovoltaico que fueron estudio del anterior proyecto ya mencionado.

Para concluir este capítulo se expondrá el esquema final de carga y descarga de la batería y su lazo de regulación, junto con el motor de corriente continua y el panel fotovoltaico, ya diseñados para el caso del estudio.

1.3.5 Capítulo 6: Conclusiones.

En el capítulo final del proyecto, se establecen una serie de conclusiones a través del caso del estudio y de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en el capítulo anterior.

CAPÍTULO 2.

ESTADO DEL ARTE

2. ESTADO DEL ARTE.

2.1 Bibliografía de referencia.

En este capítulo se analizará la bibliografía utilizada para la realización del presente proyecto.

La bibliografía utilizada para elaborar el modelo final de batería y regulación de carga, adaptado al vehículo solar se basa en dos artículos ya nombrados en la introducción que aparecen con la referencia bibliográfica [1] y [2].

Los primeros pasos realizados en el diseño de la batería y regulación de carga en Matlab-Simulink se han basado en el uso del bloque 'battery' Matlab-Simulink, realizando la descarga a través de una resistencia y la carga mediante una fuente de corriente constante.

Posteriormente al diseño de batería y sistema de regulación se le añadirá el modelo de batería y panel solar diseñado en el anterior proyecto 'Modelización del sistema de tracción eléctrica y de alimentación de un vehículo solar de fines experimentales' diseñados a partir de los artículos propuestos.

2.2 Caso propuesto por los artículos tomados como referencia en este proyecto.

El modelo propuesto por los artículos [1] y [2], aparece modelizado en Simulink, a continuación se procede a la exposición detallada del modelo de batería.

El modelo de batería sobre el que se trabaja en este proyecto viene dado por el bloque 'battery' de la librería 'SimPowerSystems' de Matlab-Simulink.

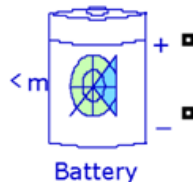
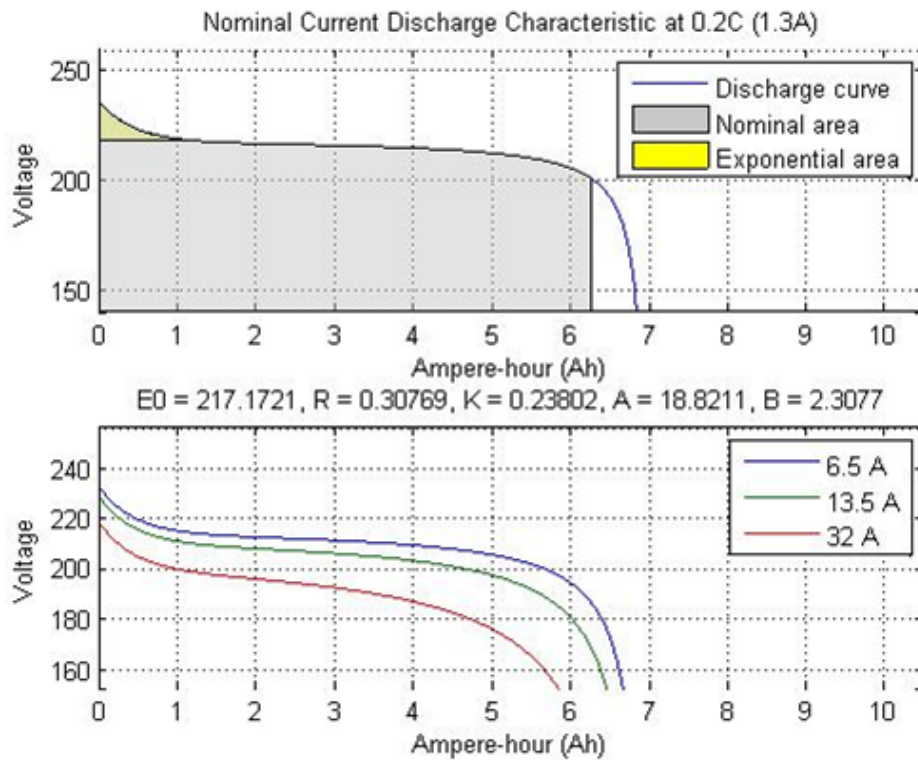


Figura 2.1. Bloque 'battery' Matlab-Simulink.

Las curvas características de descarga aparecen en la Figura 2.2, se aprecia una similitud para distintas corrientes de descarga. La tensión durante la descarga está compuesta por dos áreas que aparecen distinguidas en la figura área exponencial y área nominal.



Curvas características del modelo de batería usado en este proyecto.

Figura 2.2. Curvas de descarga del modelo de batería bloque 'battery'.

2.3 Modelo propuesto en el artículo dónde se realizan una serie de simulaciones con el bloque motor alimentado por una fuente de intensidad controlada.

El sistema propuesto en este caso en Matlab-Simulink por la bibliografía de referencia [1] y [2] para la carga y descarga de la batería, aparece implementado con algunos bloques de la librería 'SimPowerSystems' Matlab-Simulink. Compuesto por una fuente controlada de intensidad 'Controlled Current Source' con una intensidad constante de 50 A, una máquina de continua bloque 'DC Machine' controlada la carga y descarga del bloque 'battery' a través del par electromagnético de la máquina.

En la siguiente figura, se observa el esquema de bloques del modelo a seguir para el control del sistema de acumulación que llevamos a cabo en el proyecto.

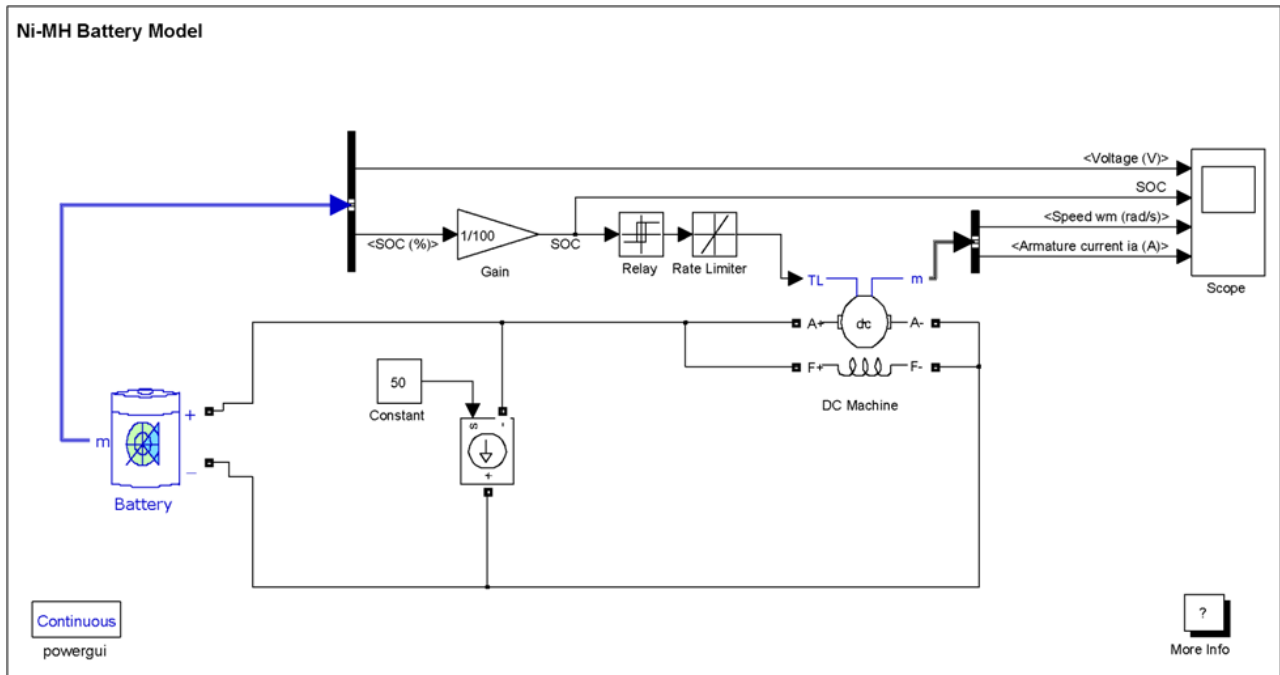


Figura 2.3. Esquema modelo, según los artículos tomados como referencia, de un regulador de carga de un sistema de acumulación en Matlab-Simulink.

Los parámetros del bloque 'battery' tomados del modelo y que serán los que usaremos en el proyecto, vienen expresados en la tabla siguiente.

Parametros	Valor
Rated capacity	6.5 Ah
Internal Resistance	2 mΩ
Nominal Voltage ^(a)	1.18 V
Rated Capacity	6.5 Ah
Maximum Capacity ^(b)	7 Ah (5.38h * 1.3A)
Fully Charged voltage ^(c)	1.39 V
Nominal Discharge Current ^(d)	1.3 A
Capacity @ Nominal Voltage ^(a)	6.25 Ah
Exponential Voltage ^(e)	1.28 V
Exponential Capacity ^(e)	1.3 Ah

En el apartado 4.3 "Modelo del sistema de almacenamiento desarrollado en Matlab-Simulink", procederemos a explicar la inserción de los parámetros en las tablas del bloque 'battery' de Matlab-Simulink.

Una batería de 200 V y 6.5 Ah de NiMH, conectada a una fuente de intensidad controlada de 50 A y a un motor de corriente continua en paralelo sin ningún par de carga. Cuando el estado de carga (SOC) cae por debajo de 0.4 (40%), se le aplica a la máquina un par de carga negativo de 200 Nm que actúa como generador para cargar la batería, de forma que 50 A son destinados a cargar la batería y otros 50 A están destinados al motor. Cuando el valor del SOC es superior a 0.8 (80%) el par de carga se elimina de forma que la batería suministra los 50 A. De forma cíclica se representa en las siguientes figuras el proceso de carga y descarga durante un tiempo de 3600 s.

En los gráficos que aparecen a continuación, podemos observar el comportamiento del motor dc.

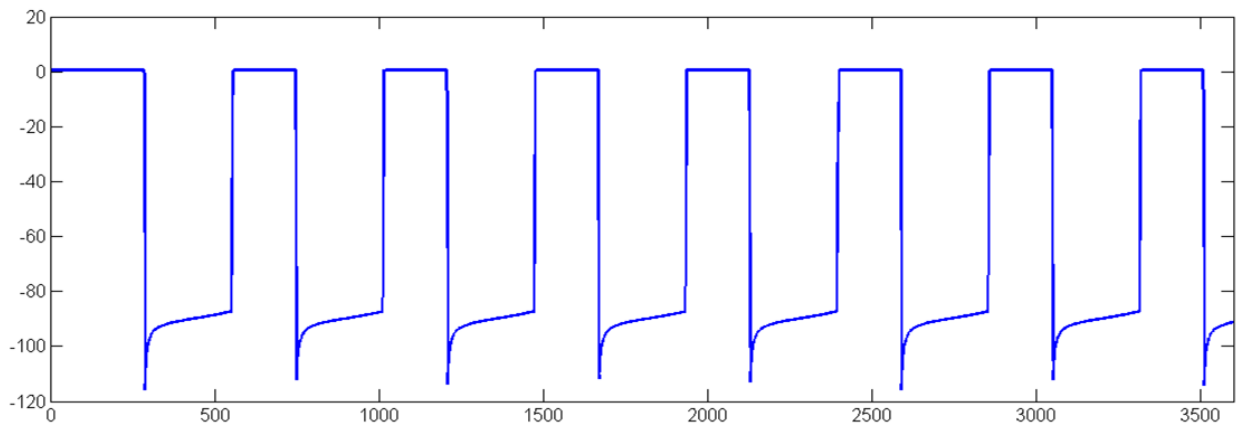


Figura 2.4. Intensidad en la armadura máquina dc del modelo propuesto.

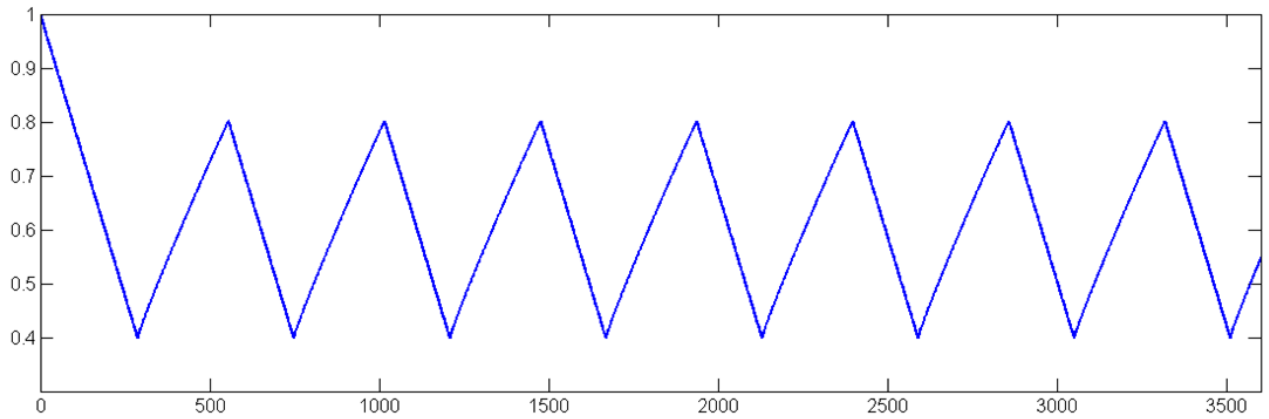
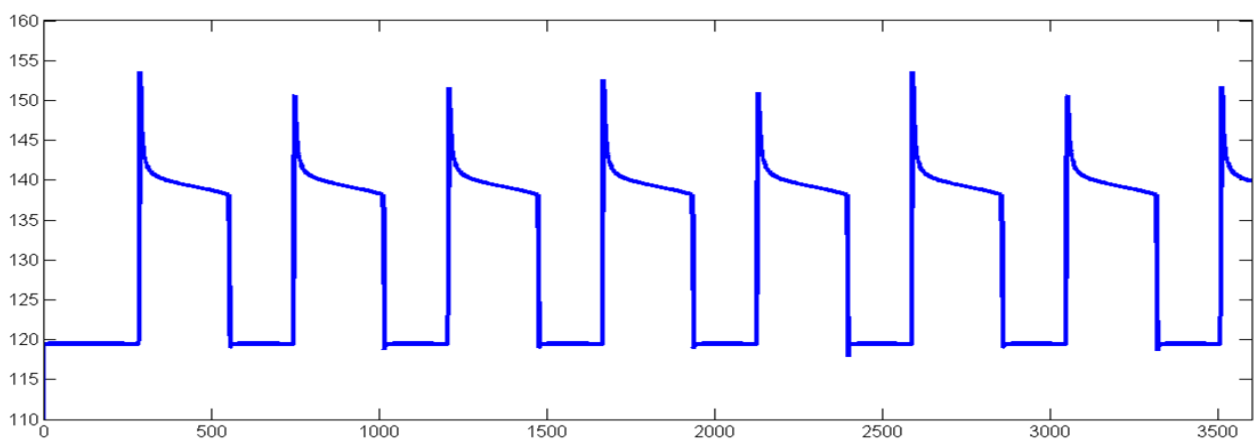


Figura 2.5. Estado de carga del sistema de almacenamiento, modelo propuesto.



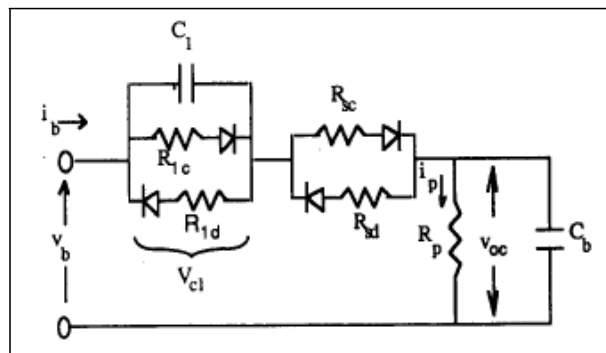
2.6. Velocidad (rad/s) de la máquina dc, modelo propuesto.

2.4 Modelos de acumuladores propuestos en la bibliografía consultada.

Las baterías son elementos electroquímicos, de forma que su modelado tiene que hacerse desde ese punto de vista. Karden [3], desarrolla un modelo para baterías compuesto por cinco ecuaciones diferenciales, en las que se representa el transporte de carga en el electrolito, en los electrodos, cinética de la reacción de carga/descarga, transporte en el electrolito y cambios estructurales en los electrodos porosos. El impedimento que presenta es su carácter altamente electroquímico.

No obstante existen otros modelos que pueden resultar más interesantes, basados en el comportamiento eléctrico de forma que se interacciona con el resto de elementos de la simulación. Entre algunos de los autores que desarrollan este tipo de modelo eléctrico podemos encontrar autores como Thele [4], Salameh [5], Huet , Van Mierlo , etc., cuyos modelos se describen a continuación.

- ❖ Salameh [5] presenta un modelo de batería eléctrica, en el que el acumulador está compuesto por elementos activos y pasivos. Cada elemento como podemos observar en la figura, representa las reacciones que ocurren en la batería. Este modelo está bastante extendido, expresa muy bien los elementos eléctricos de carga y descarga además de tener en cuenta la auto descarga. Alguno de sus inconvenientes más destacados aunque relevantes, residen en el valor constante de las resistencias y condensadores además de no especificar una fuente de tensión interna variable para reflejar la tensión interna de la batería, elemento que es de alta importancia en el modelo.



En la figura 2.7. Circuito equivalente por Salameh.

- ❖ Karden [8] otro autor de modelo, lo presenta en dominio de la frecuencia. Karden realiza estudios de la espectroscopia de la impedancia para detallar el modelo. Es un modelo más exacto que el resto de los descritos ya que la espectroscopia realiza varios ensayos a diferentes tipos de frecuencia y condiciones de operación para calcular los parámetros del circuito equivalente que diseña y que represento en la figura. Los ensayos se realizan en un amplio rango de frecuencias 35 μ Hz a 6 kHz. Realiza la espectroscopia en microciclos para obtener un funcionamiento real de los ciclos de la batería y observar la difusión del electrolito, esto produce el inconveniente de que no es preciso si el proceso simulado es en régimen permanente, la difusión del electrolito es apreciable.

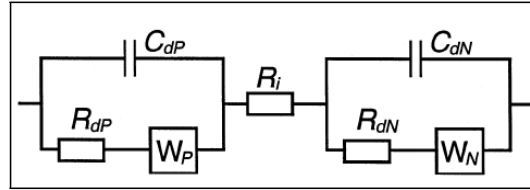


Figura 2.8. Circuito equivalente Karten.

- ❖ Thele [4], presenta un modelo basado en una síntesis entre el modelo de impedancias descrito por Randles y un modelo de transporte de ácido sulfúrico a través del electrolito. El modelo de impedancias está basado en un circuito diseñador por Randles como el de la figura y una ecuación diferencial de primer orden que muestra el transporte a través del electrolito.

El estado de carga de la batería durante el funcionamiento de esta se calcula a través de diferentes métodos, explicamos algunos de ellos según su relevancia a continuación.

- ❖ Piller [6], estudio realizado con el objetivo de obtener el estado de carga (SoC %) de la batería. La forma de llevar a cabo el cálculo es obteniendo la tensión y amperios hora de la entrada y la salida de la batería de forma exhaustiva además de tener en cuenta las pérdidas, para no tener errores en el cálculo del SoC.

$$SoC = SoC_0 + \frac{1}{C_N} \times \int_{t_0}^t (I_{bat} - I_{perd}) d\tau \quad (2.4.1)$$

Siendo C_N la capacidad nominal, I_{bat} la corriente que circula por la batería e I_{perd} la corriente de pérdidas.

Es un cálculo sencillo, el problema reside en que el cálculo se realiza durante todo el ciclo por lo que puede ir acumulando errores.

Otro método comúnmente usado, es la medida de la tensión en bornes de la batería a circuito abierto (función de la concentración de ácido en los electrodos). El SoC es linealmente dependiente de la tensión a circuito abierto. El inconveniente es que para medir la tensión a circuito abierto, la batería tiene que estar sin carga durante varias horas para poder estabilizarla lo que presenta un inconveniente cuando se usan en vehículos o sistemas móviles.

- ❖ Tseng [7], realiza un modelo matemático en el que el SoC depende de la profundidad de la descarga (DoD) y de la intensidad de la batería. A través del método Newton-Raphson.
- ❖ Delaille [9] que calcula el SoC en a través del método conocido como “coup de fouet” (latigazo), caída de tensión que se produce al inicio de la descarga (representada en el gráfico) su valor varía entre 10 y 30 mV en un periodo de unos minutos. La amplitud del “coup de fouet” varía según el SoC, a mayor SoC, menor valor de la amplitud. Más comúnmente usado en instalaciones de telecomunicaciones que en vehículos, ya que la batería debe encontrarse completamente cargada.

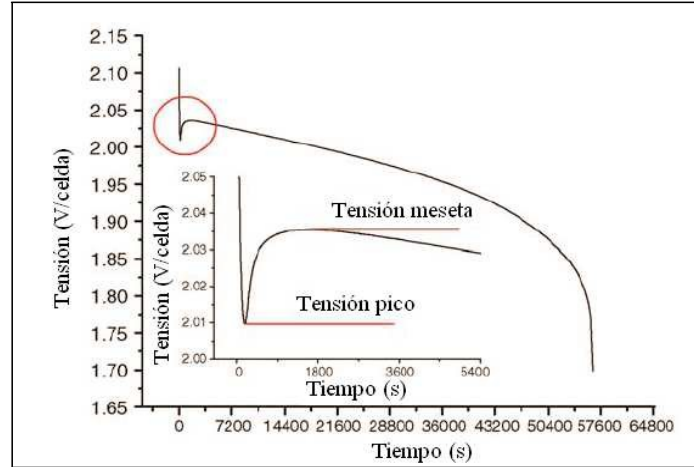


Figura 2.9.Coup de fouet de la tensión.

CAPÍTULO 3.

DEFINICIÓN DEL CASO DEL ESTUDIO

3. DEFINICIÓN DEL CASO DEL ESTUDIO.

3.1 Introducción al caso del estudio

Previamente explicado en el apartado primero, el objeto de modelizar un sistema de acumulación y regulación es poder alimentar de forma autónoma las necesidades energéticas que necesite en cada momento el vehículo para el que se está realizando el estudio, con características similares al vehículo “Aníbal”.

El vehículo “Aníbal” es un coche solar, propulsado por un motor eléctrico alimentado por energía solar, de paneles fotovoltaicos dispuestos en la parte superior del vehículo. Las celdas fotovoltaicas, convierten directamente la energía solar en energía eléctrica, puede ser utilizada directamente por el motor o bien almacenada en batería (caso del estudio).



Figura 3.1. Vehículo solar, prototipo “Aníbal”.

El motor de corriente continua de imanes permanentes (PMDC), es uno de los motores de continua que se usa con más frecuencia en vehículos solares. El circuito equivalente de un motor PMDC se muestra en la figura 3.2.

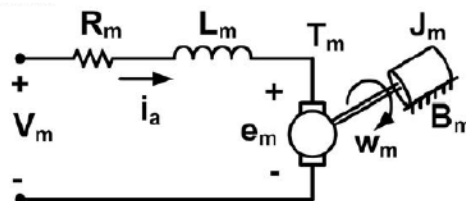


Figura 3.2. Circuito equivalente de un motor de continua.

Cada uno de los parámetros y símbolos que aparecerán en la simulación del sistema objeto del estudio, aparecen en la tabla 3.1. Estos datos han sido extraídos de la bibliografía que se ha tomado como referencia en este proyecto, por ser similares a las características de nuestro motor.

Tensión de fuente	Vm	36 V
Inductancia	Lm	3 m
Resistencia	Rm	0,15 Ω
Constante de tensión	Ke	0,2 V s/rad
Par electromagnético	Te	Nm
Factor de ponderación de la velocidad del motor	YW	10
Factor de ponderación de la corriente del motor	YI	0.1
Factor de ponderación de la potencia del motor	YP	1
Constante proporcional	GP	150
Constante integral	G	5
Constante derivativa	Gd	2
Constante del par de la carga	K0	0.9
	K1	3,9 10^{-3}
	K2	66 10^{-6}
Constante de fricción viscosa	B0	5,7 10^{-3}
	B1	25 10^{-6}
	B2	0,423 10^{-6}
Constante de momento de inercia del motor	J0	14,44 10^{-3}
	J1	62,6 10^{-6}
	J2	1,06 10^{-6}
Número de celdas en serie	NS	2
Número de celdas en paralelo	NP	1
Nivel de irradiación solar	Sx	102,9493 mW cm^{-2}
Nivel de temperatura	Tx	15,9908 °

Tabla 3.1. Parámetros del sistema del estudio.

En los siguientes apartados se explicaran detalladamente el funcionamiento del motor de continua de imanes permanentes, del panel fotovoltaico y del sistema de acumulación (caso del estudio), junto con las ecuaciones que definen el comportamiento de de los sistemas.

3.2. Bloque motor.

3.2.1. Introducción al motor para vehículo eléctrico.

En un vehículo un elemento principal es el motor, encargado de suministrar par de forma suficiente, contralada y eficiente. Para satisfacer esta necesidad existe una amplia gama de alternativas. Entre las mismas se incluyen los motores DC, de inducción, síncronos, de reluctancia y paso a paso, los que a su vez tienen sus variantes particulares.

En la figura 3.2.1 se encuentran las variedades expuestas anteriormente.

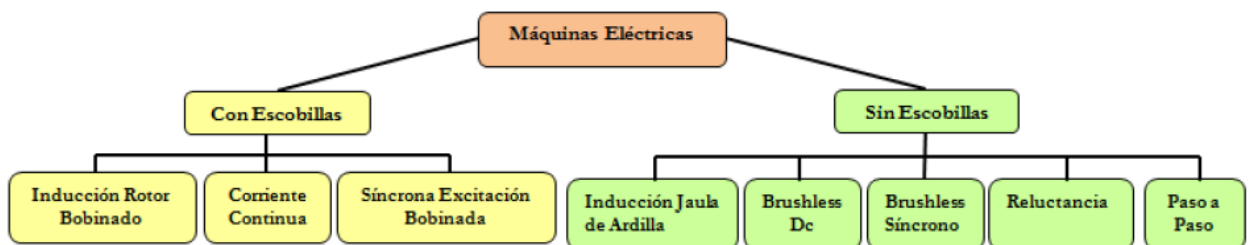


Figura 3.3. Tipos de máquinas eléctricas.

Más frecuentemente se utilizan en la mayoría de aplicaciones las máquinas sin escobillas, siendo ventajosas con respecto a las que están compuestas por escobillas en aspectos como robustez, altos torques, amplio rango de velocidad y bajo mantenimiento.

Dentro de la categoría sin escobillas, se encuentran las máquinas de inducción jaula de ardilla, imanes permanentes y de reluctancia. De estos tres tipos maquina sin escobillas, las de imanes permanentes (PMDC) se presentan como las más atractivas.

Las características que señalan a las PMDC como destacada frente al resto de motores sin escobillas son:

- Eficiencias muy buenas que llegan a sobrepasar el 95% (superiores al resto).
- Relación potencia-peso mayor con respecto a los motores señalados.
- Inercia más baja, lo que es proporcional a una respuesta más rápida en los cambios de par.
- Requiere inversores más pequeños al no precisar de corriente de magnetización.

Por otra parte, el motor de inducción presenta algunas ventajas sobre las máquinas de imanes permanentes.

- Amplio rango de debilitamiento de campo.
- Torque muy constante.
- Menor costo.
- Mayor capacidad de sobrecarga y sobrecalentamientos.

El motor que utilizamos en nuestro proyecto es el de imanes permanentes (PMDC), por las ventajas que nos aporta al utilizarlo en un vehículo eléctrico. Este motor de corriente continua.

3.2.2 Máquina utilizada en el sistema.

En el apartado anterior señalamos el motor de continua de imanes permanentes, es decir, aquel motor donde la excitación se consigue a través de un imán permanente.

No posee bobinas de excitación en el rotor, siendo estas cambiadas por imanes permanentes.

Como ya se menciona al principio de este apartado, este motor no está constituido de anillo ni de escobillas, lo cual supone una ventaja, ya que no necesitara la mantención. Además este tipo de motor, es menos susceptible a sufrir recalentamientos ya que los enrollados se encuentran solo en la parte externa del motor (es decir en el estator). Por ello, la refrigeración será más simple pudiendo ser enfriado simplemente por aire.

Para controlar un motor de continua de imanes permanentes, los únicos métodos disponibles para el control de la velocidad son la variación de la tensión del inducido y la resistencia del inducido.

Los motores PMDC son muy comunes en tamaños pequeños de caballaje fraccional y subfraccional, en los cuales no puede justificarse el costo y espacio de un circuito separado de campo. Sin embargo, los motores PMDC tienen algunas desventajas debido a que los imanes permanentes no pueden producir tan alta densidad de flujo, como la de un campo externo en derivación. En consecuencia, el motor PMDC tendrá un par inducido por amperio de corriente en el inducido, menor que el de un motor en derivación del mismo tamaño y construcción.

Se ha observado una mejora en este tipo de máquina, debido al desarrollo de imanes permanentes más evolucionados y mejores.

Características esenciales de los imanes permanentes:

- Densidad de flujo remanente B_r .

La densidad de flujo remanente, es una medida de la fuerza de atracción o repulsión que ejerce el imán. Este parametro es medido en Tesla o kiloGauss (1 Tesla = 10 kiloGauss).

- Coercitividad

La coercitividad corresponde a la capacidad de resistir la desmagnetización. Esta se mide a través de la fuerza coercitiva H_c y sus unidades de medida son los kiloOersted.

- Temperatura de Curie T_C

La temperatura de Curie es aquella a la que el imán pierde sus propiedades magnéticas.

- Producto de energía máximo BH_{max}

El producto de la energía máximo se representa por el rectángulo más grande que puede escribirse en el cuadrante B+ H- de la curva de magnetización del imán.

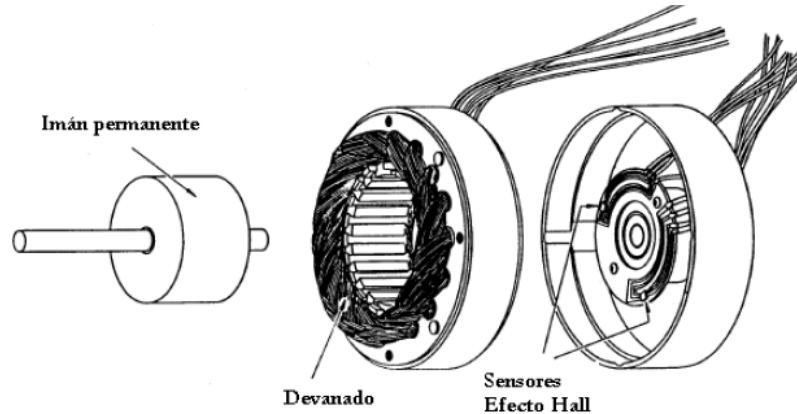


Figura 3.4. Motor de corriente continua de imanes permanentes (*Brushless*).

En la figura 3.4, se muestra la curva de magnetización para un material ferromagnético típico. Es un dibujo de la densidad de flujo B contra la intensidad de campo H. Cuando se aplica a este material una fuerza magnetriz externa fuerte y luego se quita, un flujo residual B_{res} permanecerá en el material. Para que el flujo residual sea cero, es necesario aplicar una intensidad magnetizante coercitiva H_c con una polaridad opuesta a la polaridad de la intensidad magnetizante H que al principio origino el campo magnético.

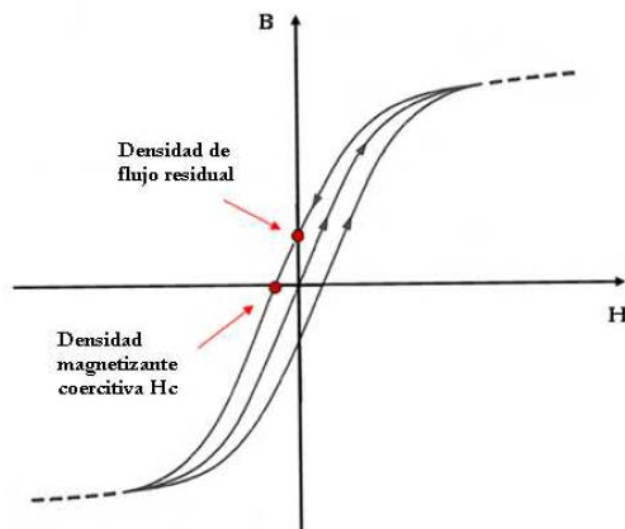


Figura 3.5. Curva de magnetización de un material ferromagnético típico.

Por otra parte, un buen material para fabricar los polos de un motor PMDC deberá tener tanto mayor densidad de flujo residual (B_{res}) posible como la mayor intensidad magnetizante coercitiva (H_c) posible. La curva de magnetización de este material se muestra en la figura 3.6.

La Bress grande produce un gran flujo en la máquina, mientras que la Hc grande indica que se requerirá una gran corriente para desmagnetizar los polos.

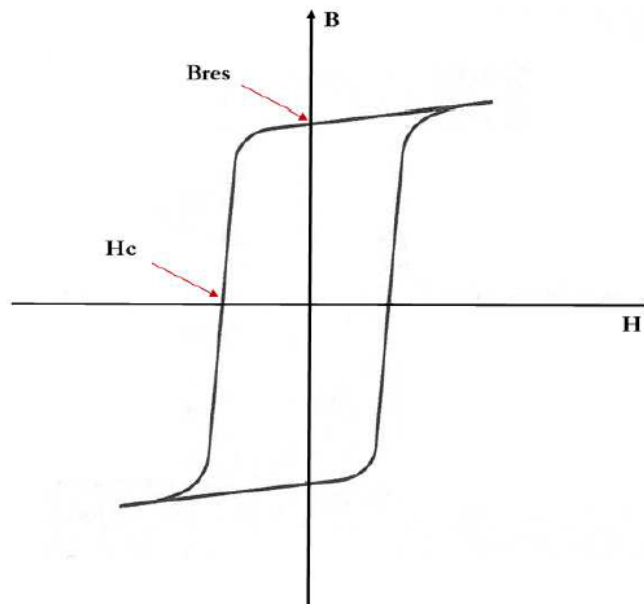


Figura 3.6. Curva de magnetización de un material ferromagnético adecuado para ser utilizado en materiales de imanes permanentes.

Los REPMs (Rare Earth Permanet Magnet) o “imanes de Tierras Raras”, son los más utilizados para los imanes permanentes de los motores usados para vehículos con fines solares. Magneticamente muy poderosos y livianos de peso y tamaño. Dentro de los imanes REPM existen dos tipos de familias, los en base a Samario y los en base a Neodimio. Estos dos elementos pertenecen a la familia de los Lantánidos o “Tierras Raras”.

El Samario forma imanes muy poderosos con el Cobalto, en tanto que el Neodimio lo hace con el Hierro y el Boro.

Familia	Tc (°C)	Br (kG)	Hc (kOe)	Bhmax (MGOe)	Temp. Oper. (°C)
Alnico					
Alnico 2	700-850	7.2	0.54	1.6	300
Alnico 5	700-850	13.5	0.75	7.5	300
Alnico 8	700-850	7.5	1.9	5	300
Ferritas					
Ceramic 8	350	3.8	2.9	4	150
REPM					
1-5	650	5-10	5-25	6-26	250
2-17	800	9-12	6-25	20-31	350
2-14-1	350	8-12	8-24	12-14	150

Tabla 3.2. Características de los diferentes imanes permanentes.

3.2.3 Ecuaciones que definen el comportamiento del sistema.

Usando la ley de Kirchhoff para la tensión en el circuito eléctrico de la figura 3.2, nos permite obtener una primera ecuación diferencial.

$$V_m(t) = R_m \times I_a(t) + L_m \times \frac{dI_a(t)}{dt} + E_m(t) \quad (3.1)$$

$$E_m(t) = K_e \times \omega_m(t) \quad (3.2)$$

$K_e = K_t$, al ser un motor de imanes permanentes la excitación será constante.

La suma de los pares del motor tiene que ser igual a 0 según la siguiente ecuación:

$$0 = T_e(t) - J \times \frac{d\omega_m(t)}{dt} - B \times \omega_m(t) - T_l(t) \quad (3.3)$$

El par electromagnético es proporcional a la intensidad de la armadura, de forma que:

$$T_e = K_t \times I_a \quad (3.4)$$

El par de carga:

$$T_l = K_0 + K_1 \times \omega_m(t) + K_2 \times \omega_m(t)^2 \quad (3.5)$$

B y J son funciones no lineales de la velocidad y su expresión es:

$$B = B_0 + B_1 \times \omega_m(t) + B_2 \times \omega_m(t)^2 \quad (3.6)$$

$$J = J_0 + J_1 \times \omega_m(t) + J_2 \times \omega_m(t)^2 \quad (3.7)$$

Dónde $K_0, K_1, K_2, B_0, B_1, B_2, J_0, J_1, J_2$, son coeficientes conocidos.

3.3 Panel fotovoltaico.

3.3.1 Introducción al panel fotovoltaico.

El panel solar, está formado por células solares conectadas en serie o paralelo que convierten la energía que irradia el sol en energía eléctrica. La reacción es producida mediante el fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico, genera una fuerza electromotriz, cuando la superficie de la célula está expuesta a la irradiación solar. La tensión que genera depende del tipo de material usado, la temperatura de utilización de la célula y el envejecimiento-deterioro que se produzca en la célula.

Las células que se utilizan actualmente son del tipo de unión P-N están construidas en base de silicio monocristalino. Se fabrican con dos capas de silicio, una con dopado P (boro) del tipo portador y la otra con dopado del tipo N (fósforo) dador.

Los fotones, son absorbidos por la unión de forma que estos transmiten la energía a la unión P-N, los electrones de los átomos de la unión se liberan dejando huecos, de modo que generan la conducción y una diferencia de potencial en la unión P-N.

En la tabla 3.3.1 se diferencian los distintos tipos de células según el silicio que lo compone. Estas células son la de silicio policristalino, amorfo y monocristalino. El tipo depende de la forma en que estén dispuestos los átomos de silicio en la estructura cristalina. Buscando la mayor eficiencia, la eficiencia quiere decir el porcentaje de luz solar que se convierte en energía eléctrica. Las células de silicio policristalino y monocristalino son más eficientes que las de estructura de silicio amorfo.

Una celda solar típica está compuesta de capas. Primero hay una capa de contacto posterior y, luego, dos capas de silicio. En la parte superior se encuentran los contactos de metal frontales con una capa de antireflexión, que da a la celda solar su típico color azul.

Durante la última década debido al uso de la tecnología fotovoltaica, se han desarrollado células fotovoltaicas con otro tipo de materiales como son, las células de película delgada, CIS (diseleniuro de indio de cobre) y CdTe (teluriuro de cadmio).

TIPOS DE CÉLULAS	CARACTERÍSTICAS
Célulasde silicio policristalino	<p>Son aquellas obtenidas a partir de procesos que no necesitan un control exhaustivo de la temperatura en la solidificación del material de silicio, ni tampoco un crecimiento controlado en su red cristalina.</p> <p>El rendimiento obtenido se encuentra en un 12%, pudiendo llegar al 14% con células refinadas.</p> <p>Una gran ventaja en la fabricación de células de silicio policristalino es la posibilidad de producirlas directamente en forma cuadrada, lo que facilita la fabricación de paneles solares compactos sin posteriores mecanizaciones de célula.</p>
Célulasdesilicio amorfo:	<p>La gran ventaja de la utilización del silicio amorfo para la fabricación de células fotovoltaicas es el espesor del material (50 veces más fino que el equivalente de silicio monocristalino)</p> <p>Alto coeficiente de absorción (utilización de espesores de material activo muy pequeños)</p> <p>Uno de los inconvenientes es la degradación que sufren al ser expuestas al sol después de un determinado tiempo de trabajo.</p> <p>Estas células tienen el menor rendimiento del mercado (eficiencia 8%)</p> <p>El coste de fabricación de las células es mucho menor que el resto de tecnologías (por el poco material que se emplea)</p>
Célulasdesilicio monocristalino:	<p>Son las más utilizadas en la actualidad, pues la industria del silicio es la base de fabricación de todos los semiconductores.</p> <p>La eficiencia de estas células oscila entre el 14% y el 18% , y son las de mayor rendimiento del mercado en la actualidad.</p> <p>El proceso al cual a de someterse al silicio para reunir las características adecuadas para realizar la conversión fotovoltaica, conlleva un aumento del coste final de la célula fotovoltaica.</p>

Tabla 3.3. Clasificación de las células según el tipo de silicio.



Figura 3.7. Tipos de células fotovoltaicas según la estructura del silicio.

3.3.2. Modelo de la célula fotovoltaica desarrollado en Matlab-Simulink usados en el proyecto.

En el proyecto desarrollado por Inmaculada Martínez Vidal sobre el que estamos trabajando, encontramos dos modelos desarrollados de panel fotovoltaico.

Los parámetros que se utilizaran en las células solares aparecen en la siguiente tabla:

Parámetros	Valor
e (C)	$1,602 \times 10^{-19}$
K (J/ K)	$1,38 \times 10^{-23}$
A	6,2
I_{ph} (A)	5
I_0 (A)	0,0002
R_s (Ω)	0,001
T_C ($^{\circ}C$)	20
S_C (W/m^2)	100
S_x (W/m^2)	102,9493
β_C	1
α_S	0,38
γ_T	2
T_x ($^{\circ}C$)	15,6092

Tabla 3.4. Valores de los parámetros de las ecuaciones que definen el primer modelo de panel fotovoltaico que usaremos en nuestro proyecto.

El bloque que usaremos en Matlab-Simulink del primer modelo se denomina '*Modelo panel fotovoltaico*', en la figura 3.8 observamos la etapa que utilizaremos como primer modelo de panel fotovoltaico (Matlab-Simulink) en el proyecto.

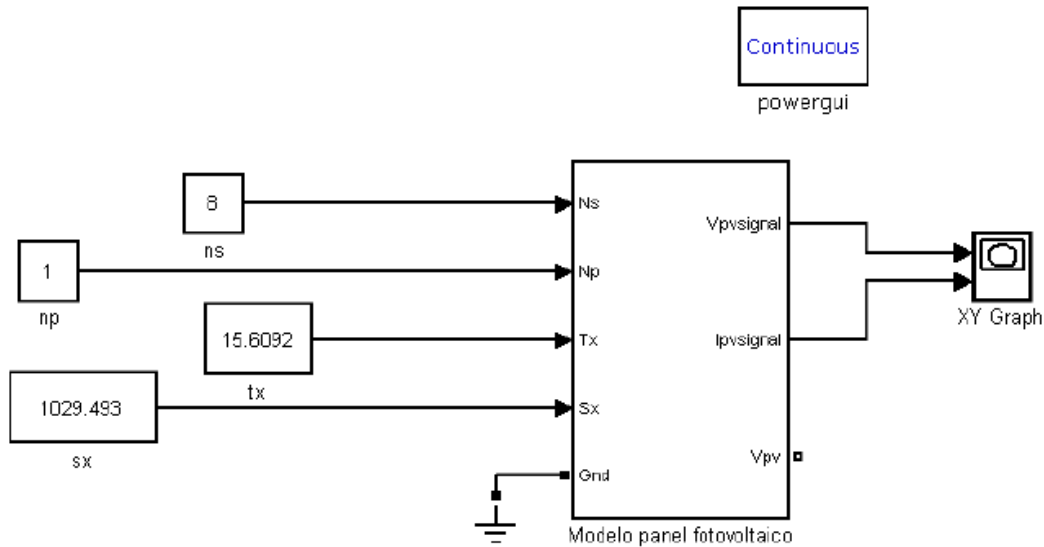


Figura 3.8. Etapa primer modelo que define el panel fotovoltaico (Matlab-Simulink).

El bloque de panel fotovoltaico que aparece en la figura 3.8 corresponde al bloque 'Fcn Matlab' de la biblioteca 'User-Defined Functions' dentro de la categoría Simulink. Se distinguen en él cinco entradas y tres salidas.

Las entradas corresponden al número de células en serie, número de células en paralelo, nuevo valor de temperatura, nuevo nivel de radiación solar y entrada de tierra, (N_s , N_p , T_x , S_x , GND) respectivamente. Como se observa en la figura 3.8, los valores numéricos de estas entradas introducidos mediante una serie de bloques 'Constant' de la librería 'Sources'.

Las salidas de esta última etapa de modelo fotovoltaico, corresponden a los valores finales de tensión e intensidad, (I_{pv} , V_{pv}) respectivamente.

Debe este modo, mediante elementos 'Fcn Matlab' se crea el conjunto de sistemas que constituyen el sistema final, empezando con la construcción de la etapa final y terminando en el subsistema de partida que corresponde a la primera etapa.

El panel fotovoltaico a considerar, consiste en ocho células fotovoltaicas conectadas en serie para así obtener a la salida la tensión deseada. Depende de la potencia en carga requerida, el número de células conectadas en paralelo puede variar entre dos o más.

Los valores de nivel de irradiación y temperatura pueden ser variados según las condiciones de partida que se den en cada momento, y éstas pueden ser modificadas a partir de los bloques 'Constant' donde se definen cada uno de esos valores numéricos.

El segundo modelo de panel fotovoltaico que usaremos en Matlab-Simulink, parte de un bloque 'Matlab-Function' de la librería 'Simulink' dentro de la opción 'User-Defined Functions'.

Este bloque de Matlab-Simulink, consta de dos entradas (V_{pv} , Insolation) y de dos salidas (I_{pv} , P_{pv}). Finalmente mediante los bloques 'XYGraph' se visualizarán las gráfica V-I y P-V.

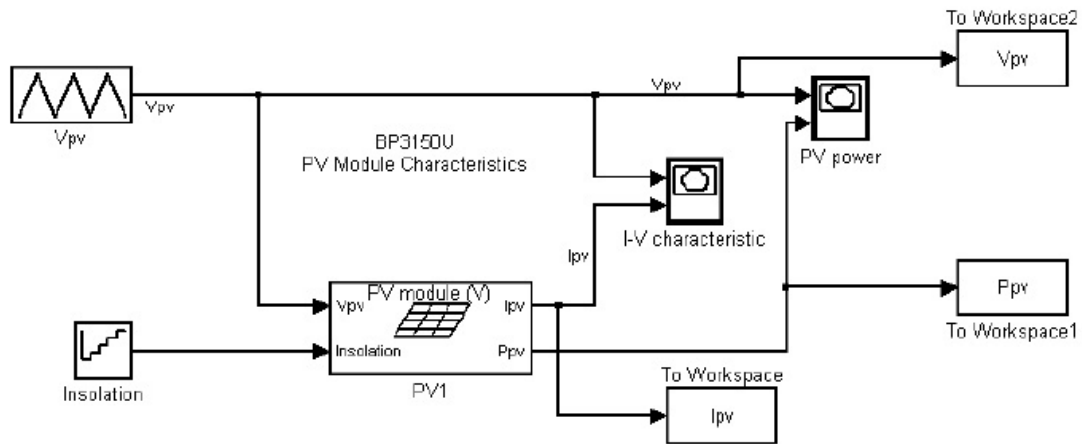


Figura 3.9. Etapa final del segundo modelo que define el panel fotovoltaico a usar en este proyecto (Matlab-Simulink).

El esquema de la Figura 3.9, corresponde a la etapa final del modelo, el cual se compone de un único subsistema. De modo que, una vez definida la etapa final del modelo, seleccionado el bloque PV1 y pulsando el botón derecho del ratón, se elige la opción 'Create Subsystem'. Una vez creado el subsistema, se procederá a seleccionar 'Mask subsystem' dentro de la opción 'Edit'.

Al seleccionar 'Mask Subsystem', se está de forma detallada, algunos de los parámetros necesarios para describir cualquier modelo de un panel fotovoltaico. Así, los parámetros a introducir en el modelo en función del panel de que se trate, se detallan en la Figura 3.10.

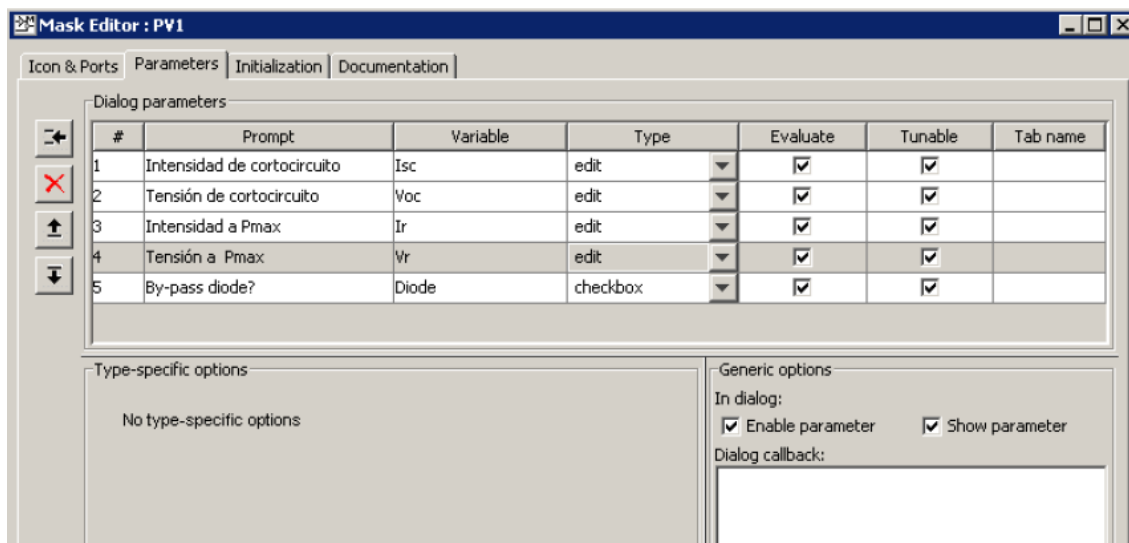


Figura 3.10. Parámetros a introducir en el modelo en función el panel fotovoltaico (Matlab-Simulink).

Los parámetros introducidos en este segundo modelo de panel, siguen las especificaciones del panel BP3150U (Anexo I), según la figura siguiente:

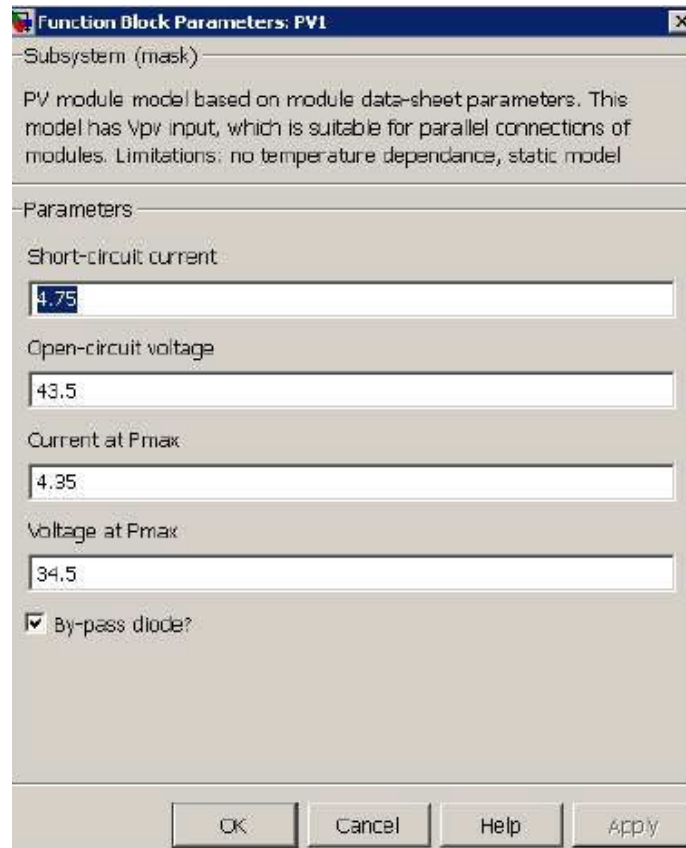


Figura 3.11. Parámetros introducidos en el segundo modelo de panel fotovoltaico desarrollado con Matlab-Simulink en este proyecto, para las especificaciones del panel BP3150U (Anexo I).

3.4.1 Introducción al sistema de acumulación.

En cuanto a las baterías, es un dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas con la capacidad de devolver esta energía prácticamente en su totalidad.

Los acumuladores son un elemento altamente utilizado de forma comercial. A pesar de esto es uno de los elementos más difíciles de regular. El comportamiento que sucede dentro de ellas debido a una reacción electroquímica las dota de una gran complejidad. Se han creado diferentes artículos con el modelado de baterías a través de ensayos, cargas y descargas. Los ensayos no reflejan el comportamiento dinámico que sufre una batería frente a las cargas y descargas.

3.4.2 Sistemas de acumulación.

3.4.2.1 Elementos que constituyen el sistema de almacenamiento.

La estructura de una batería es la que se muestra en la siguiente figura.

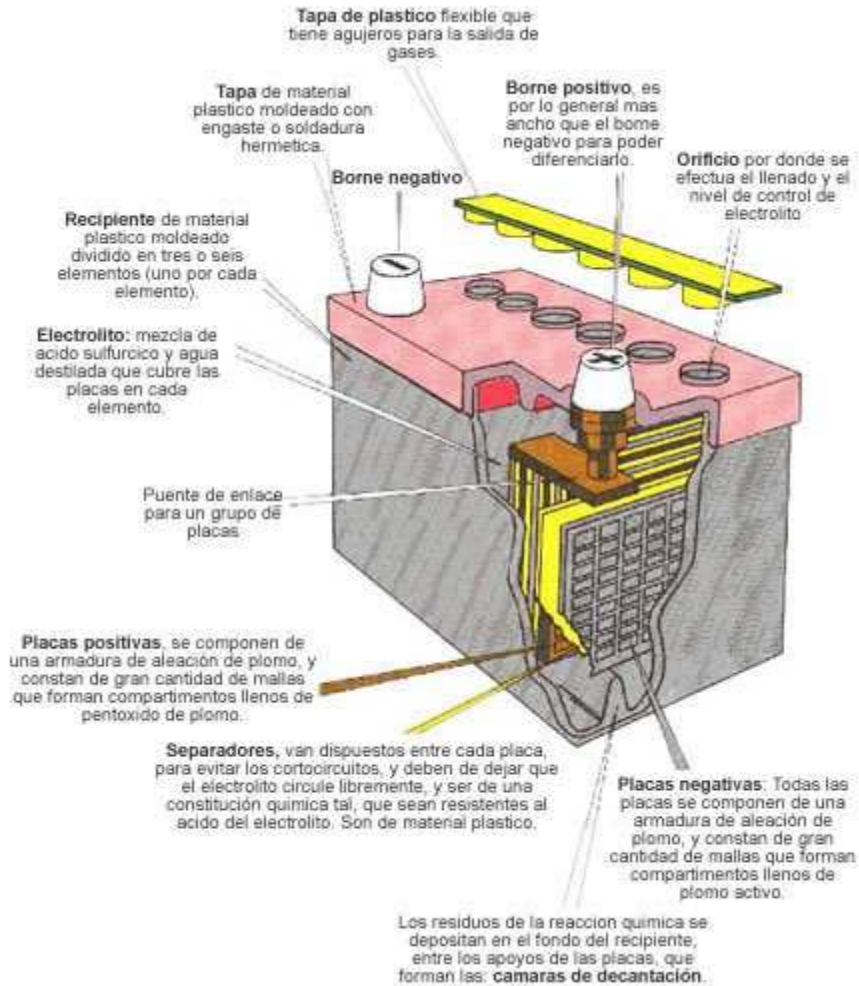


Figura 3.12. Estructura interna de una batería.

Las láminas bipolares, están formadas por un ánodo y un cátodo. Se forman reacción electroquímicas en cada uno de los electrodos cuando la batería está en funcionamiento.

El electrolito es el medio de transporte de electrones entre los electrodos.

En la siguiente figura, observamos los pasos que transcurren en el funcionamiento de descarga de una batería.

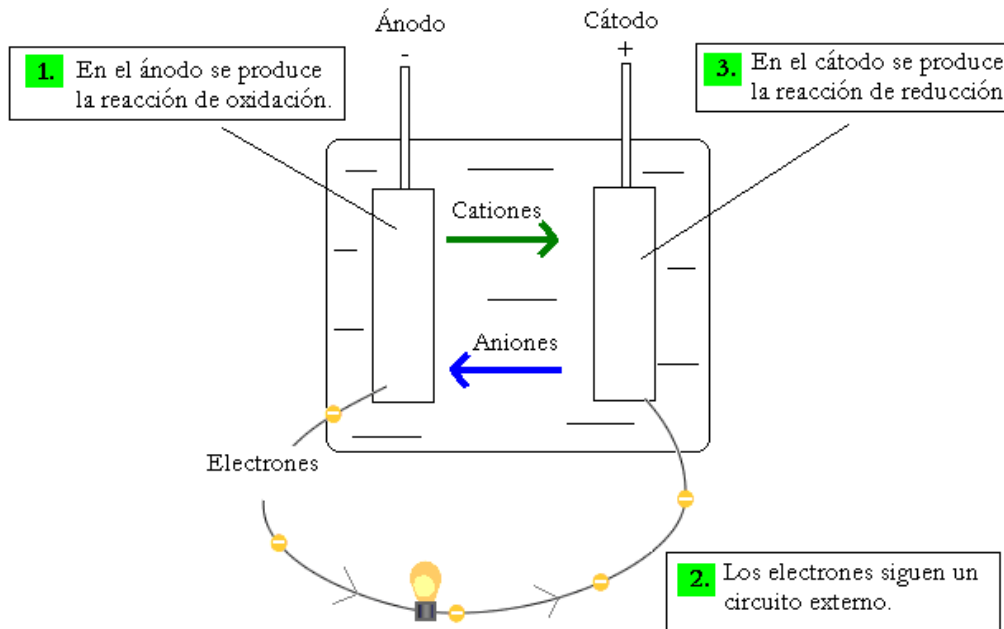


Figura 3.13. Reacción química de Oxidación-Reducción que da lugar en la descarga de una batería.

Se ha representado el funcionamiento durante el proceso de descarga, en el que el transporte de cationes es de ánodo a cátodo, el transporte de aniones es de cátodo a ánodo y la circulación de electrones es de ánodo a cátodo.

En el proceso de carga las reacciones se invierten, los cationes van de cátodo a ánodo y los aniones van de ánodo a cátodo y el flujo de electrones se transfiere en dirección cátodo-ánodo.

Observamos la curva tensión-intensidad en la figura 3.14, es decreciente y está formada de zonas lineales y no lineales. La caída de tensión inicial, zona no lineal, es debida a las pérdidas por activación, mientras que la región lineal de la curva representa las pérdidas debido a conducción iónica y se denomina zona óhmica. La caída de tensión final, zona no lineal, es debida a pérdidas debido al transporte de masa [10].



Figura 3.14. Curva característica tensión-corriente de una batería.

3.4.2.2 Clasificación/ tipos de sistemas de acumulación.

Algunos de los tipos de baterías usados son: Plomo-Ácido, NaS, Ni-Cd, Mi-Mh, Lio-ión y otras varias. Entre estos tipos, las baterías de Plomo-Ácido han sido las más desarrolladas para sistemas de potencia, el resto son más comunes en elementos donde el tamaño y el peso son las características principales.

- **Plomo-Ácido**

También llamado sistema húmedo la primera opción para sistemas del tipo UPS es un sistema de acumulación muy fiable tiene una duración de $2/3$ a $3/4$ de los 20 años. La avería más común es la apertura de un bloque, lo que produce el derrame del dieléctrico y el fallo de la batería. Son sistemas grandes y pesados, necesitan de una zona habilitada con especial mantenimiento.

Dentro de las baterías de plomo-ácido encontramos las del tipo selladas, no necesitan mantenimiento y la vida útil de esta batería varía entre unos 5 y 10 años, el rendimiento de esta se empieza a ver afectado a los 3 años. Son para abastecer menores consumos que las húmedas, mitad de peso y tamaño.

Durante la electrolisis de carga y descarga, el hidrogeno es generado, atrapado y recombinado con el oxigeno generado para formar el agua necesaria. Este proceso es eficiente pero no un 100%. Los gases producidos son eliminados a través de una válvula de sobre presión [11].

- **Níquel-Cadmio (NiCd)**

Son mucho más caras que las de plomo-ácido, pero trabajan mejor en ciclos, temperatura, densidad de energía, predictividad y confiabilidad.

El mayor problema asociado a estas es la composición de cadmio, un elemento etiquetado por la OHSAS (Occupational Health and Safety Management Systems, Sistemas de Gestión de Salud y Seguridad Laboral) como extremadamente tóxico.

Otra cuestión es su efecto memoria, que hacen de su rápido desgasten ciclos cortos de descarga [11].

- **Níquel e Hidruro Metálico (NiMH)**

Han sido utilizadas en vehículos híbridos, son mucho más caras que el resto de baterías. La temperatura no les afecta y pueden hacer un número indeterminado de ciclos de cargas y descargas sin que sus características se vean afectadas [11].

- **Baterías de Ión Litio o de Polímero de litio (Li-Ion)**

Son casi “libres de mantenimiento” soportan grandes ciclos de trabajo y no generan hidrógeno. Se utilizan para dispositivos electrónicos, la vida útil está entre un cuarto y la mitad que las de NiMH. El Litio en contacto con el aire produce explosiones.

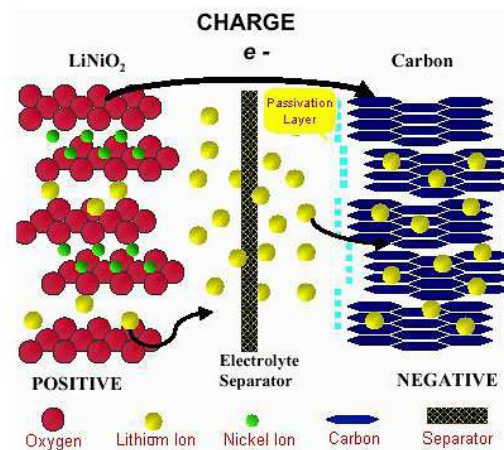


Figura 3.15. Reacción que se produce en la carga de una batería Li-Ion.

3.5 Sistema de regulación de carga.

3.5.1 Introducción al sistema de regulación.

El sistema de regulación de carga, trata de proteger a la batería frente a situaciones de riesgo como pueden ser sobrecargas o sobredescargas, además de controlar la carga y la descarga de la batería. El sistema presenta grandes dificultades a la hora del diseño, dadas las discontinuidades que se producen con la comparación de otros modelos.

3.5.2 Sistema de regulación.

El modelo de regulación de carga que utilizamos como referencia mostrado en apartados anteriores 3.16 “Modelo propuesto en el artículo donde se realizan una serie de simulaciones con el bloque motor alimentador por una fuente de intensidad controlada”.

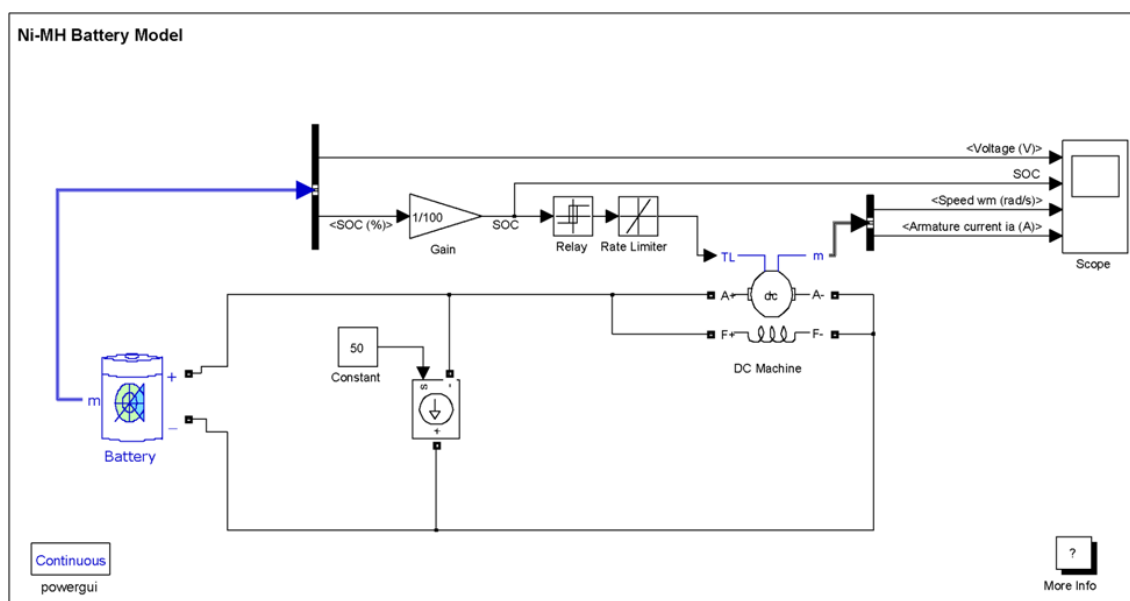


Figura 3.16. Esquema modelo, según los artículos tomados como referencia, de un regulador de carga de un sistema de acumulación en Matlab-Simulink.

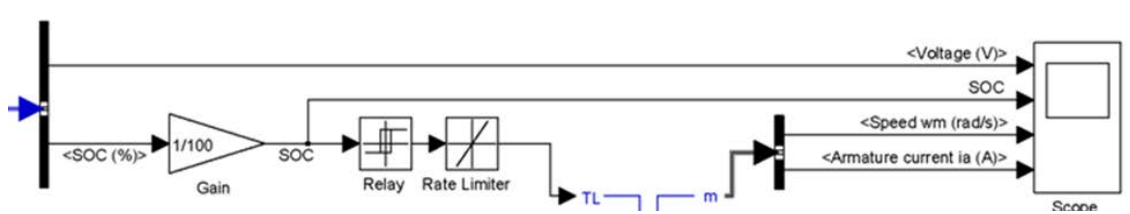


Figura 3.17. Esquema de bloques del control que se ha tomado como modelo.

El sistema de regulación que se ha desarrollado en este proyecto, está basado en el control sobre las variables de intensidad de la batería y el estado de carga. El control se realizará para un SOC (%) máximo de 100% y un mínimo de 20%, siendo este parámetro variable según las necesidades de la carga y exigencias de la batería.

El control que se realiza en este proyecto está diseñado y ejecutado a través de Simulink, el entorno gráfico de bloques que trabaja sobre Matlab, está basado en el uso de bloques lógicos que se explican a continuación.

Comparador con una constante.

En la siguiente figura aparece el bloque 'compare to constant' de la biblioteca 'simulink' y del bloque 'Logic and Bits Operations' de Simulink.



Figura 3.18. Bloque 'Compare To Constant' biblioteca 'simulink' y del bloque 'Logic and Bits Operations'.

Este bloque compara la señal de entrada con el valor de una constante dado. Si la comparación es verdadera en la salida tendremos una señal lógica '1' si es falsa la salida será una señal lógica '0'.

Se pueden realizar diferentes tipos de comparaciones:

- == Valor de entrada igual a la constante.
- ~= Valor de entrada distinto a la constante.
- <= Valor de entrada menor e igual a la constante.
- >= Valor de entrada mayor e igual a la constante.
- > Valor de entrada mayor que la constante.
- < Valor de entrada menor que la constante.

La salida del bloque puede ser unit8 o boolean, según la selección de parámetro en la casilla Output data type mode.

Comparador a cero.

En la figura que aparece a continuación se muestra el bloque 'Compare To Zero' de la biblioteca 'simulink' y del bloque 'Logic and Bits Operations' de Simulink.

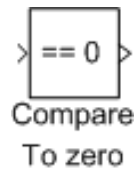


Figure 3.19. Bloque 'Compare To Zero' biblioteca 'simulink' y del bloque 'Logic and Bits Operations'.

Este bloque tiene un funcionamiento similar al bloque 'Compare To Constant'. Se puede usar con los siguientes tipos de señal de entrada:

- Floating point.
- Built-in integer.
- Fixed point.
- Boolean.

La salida del bloque puede ser unit8 o boolean, según la selección de parámetro en la casilla Output data type mode.

En este bloque si los datos de la entrada no pueden representar a cero se produce un desbordamiento, para detectarlo hay que dirigirse a parámetros de configuración y establecer los parámetros 'Detectar desbordamiento de advertencia o error'.

Operador Lógico.

En la figura que se muestra a continuación, aparece el bloque 'Logical Operator' perteneciente a la biblioteca 'simulink' y al bloque 'Logic and Bits Operations' de Simulink.

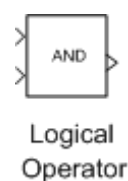


Figura 3.20. Bloque 'Logical Operator' de la biblioteca 'simulink' y del bloque 'Logic and Bits Operations' de Simulink.

El bloque 'Logical Operator', realiza la operación lógica especificada entre sus entradas. Siendo VERDADERO el valor '1' en la entrada y FALSO el valor '0'.

Se selecciona la operación lógica que se requiera y en la entrada se conectan los parámetros lógicos. Se puede elegir la apariencia del bloque mediante una opción llamada 'Icon shape', de forma cuadrada con el nombre del operador, o con la forma que se establece según IEEE Standard Graphic Symbols for Logic Functions.

El número de puertos de entrada se especifica en la opción 'Number of input ports'.

Este bloque por defecto establece el comparador AND, aunque se pueden usar los siguientes:

- AND verdad si todas las entradas son verdad
- OR verdad si al menos una entrada es verdad
- NAND verdad si al menos una entrada es falsa
- NOR verdad si ninguna entrada es verdad
- XOR verdad si un número impar de entradas son verdad
- NXOR verdad si un número par de entradas son verdaderas
- NOT verdad si la entrada es falsa

Producto.

La figura que aparece a continuación muestra el bloque 'Product' de la biblioteca 'Simulink' 'Commonly used blocks' de Matlab-Simulink.

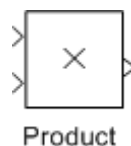


Figura 3.21. Bloque 'Product' de la biblioteca 'Simulink' 'Commonly used blocks' de Matlab-Simulink.

Este bloque realiza el producto entre un número seleccionado de entradas. El producto entre dos escalares, un escalar y un no escalar y dos no escalares que tienen la misma dimensión.

La conexión y desconexión de la carga será controlada a través de un elemento de potencia, en este caso será un transistor que funciona como un interruptor activado a través de un pulso de tensión.

En la figura que se muestra a continuación se observa el bloque 'IGBT' de la librería 'SimPowerSystems' 'Power Electronics'.

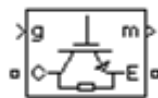


Figura 3.22. Bloque 'IGBT' de la librería 'SimPowerSystems' 'Power Electronics'.

El punto de conexión gate (g) es la puerta de activación. A través de un pulso de tensión se activa el interruptor pasando de saturación a modo de conducción.

El puerto de conexión m (measure), es el punto de conexión para la medida de los parámetros del interruptor (tensión, intensidad, conducción, saturación). En la casilla 'Show measurement port' se puede desconectar esta salida. Por último C es el colector y E el emisor, sobre los que atraviesa el flujo de corriente. En el apartado 4.2.3 "IGBT (transistor de compuerta aislada)" se explica con mayor precisión el funcionamiento del IGBT.

En la figura que aparece a continuación se muestra el esquema inicial que se llevó a cabo en este proyecto para el control y la regulación de carga del modelo de batería. Se realizó a través del bloque 'battery' un elemento pasivo (resistencia) de 10 ohm y una fuente controlada de intensidad con una constante de intensidad de 5 A.

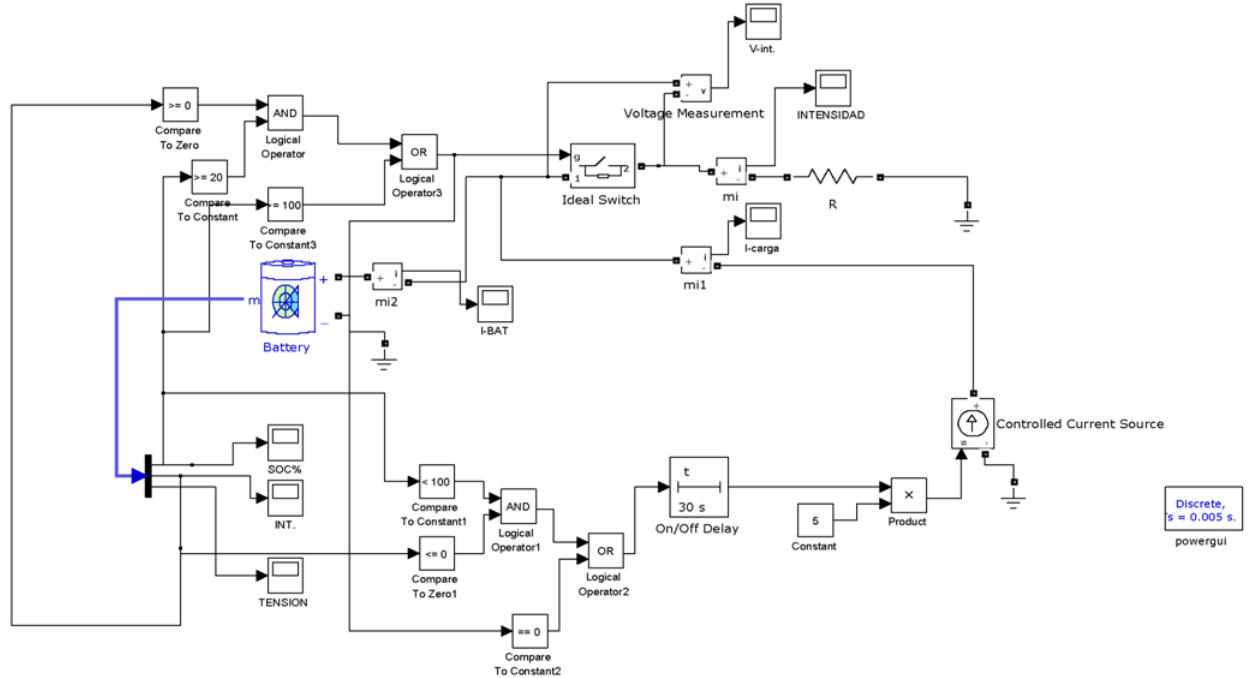


Figura 3.23. Primer modelo de regulador de carga realizado en Matlab-Simulink.

CAPÍTULO 4.

DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR

4. DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR.

4.1 Bloque motor de Matlab-Simulink.

El bloque “DC Machine” de Matlab-Simulink, describe un motor de continua, basado en las ecuaciones descritas en el apartado 3. En los siguientes apartados, se explicará el bloque “DC Machine”, su programación y el esquema básico realizado con Matlab-Simulink.

4.1.1. Programación del bloque ‘DC Machine’ en Matlab-Simulink.

Las ecuaciones que definen el comportamiento de un motor de continua de imanes permanentes (PMDC), son empleadas en el modelo establecido de Matlab-Simulink de la biblioteca ‘simpower-System’ en la opción ‘DC Machine’.

En la figura 4.1 observamos el bloque ‘DC Machine’ utilizado para el caso del estudio.

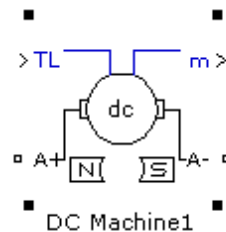


Figura 4.1. Bloque ‘DC Machine’ (Matlab-Simulink).

En la figura 4.1 observamos, que la maquina dispone de una señal de entrada (Par de la carga **TL**) y una salida marcada con el índice ‘**m**’, esta salida viene referida a un vector que posee tres señales de salida. Velocidad angular, intensidad en la armadura y par eléctrico son las señales referidas al estudio.

El circuito de la armadura [A+,A-], está formado por una inductancia de devanado de la armadura (L_a) y una resistencia de devanado de la armadura (R_a) en serie con una fuerza contra electromotriz.

Si se selecciona la opción ‘DC Machine’, aparece por defecto seleccionada una máquina de corriente continua de excitación independiente. Por tanto, como el sistema de estudio se basa en un motor de continua de imanes permanentes, habrá que seleccionar en ‘field type (tipo de campo)’ la opción ‘permanent magnet (imanes permanentes)’ y en ‘mechanical input (entrada mecánica)’ se ha elegido el par **TI** figura 4.2.

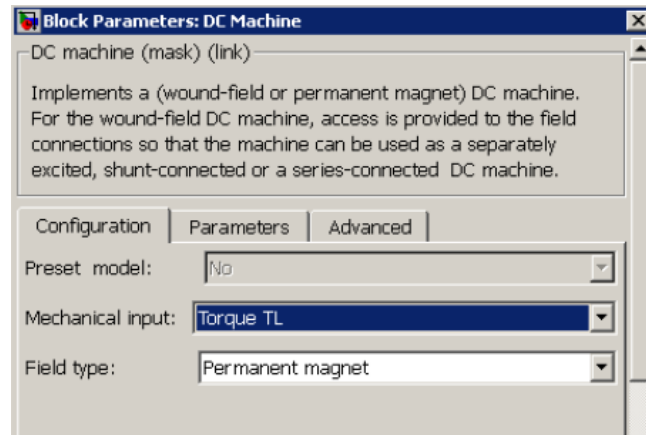


Figura 4.2. Elección del tipo de máquina de corriente continua (imanes permanentes) y de la entrada mecánica (par), en la opción 'DC Machine' de la biblioteca 'Sim-Powersystem' ('Matlab-Simulink').

Una vez seleccionada el tipo de máquina y la entrada mecánica, se introducen los parámetros del modelo definidos en la Tabla 3.1.

Los parámetros a introducir en el bloque 'DC Machine' son los siguientes:

- Resistencia e inductancia de la armadura (**0,15 Ω , 0,003 H**).
- La constante de tensión **Kt** :

$$Kt = 0.2 \times \frac{s}{rad} \times 1min/60 s \times 2\pi/1 rev = 0.0209439 V/rpm \quad (4.1)$$

- El momento de inercia del motor J , se calcularía a partir de la ecuación (3.17) y tomando una velocidad de referencia $156 rad/sg$.

$$J = 14.44 \times 10^{-3} + 62.6 \times 10^{-6} \times 156 + 1.06 \times 10^{-6} \times 156^2 = 0.05 Kg * m^2 \quad (4.2)$$

- La constante de fricción viscosa calculada mediante la ecuación (3.16) y para una velocidad angular de $156 rad/sg$.

$$B_m = 5.7 \times 10^{-3} + 25 \times 10^{-6} \times 156 + 0.423 \times 10^{-6} \times 156^2 = 0,01989413 N * m * s \quad (4.3)$$

En la figura 4.3 se muestran los datos a introducir en el bloque modelo DC Machine.

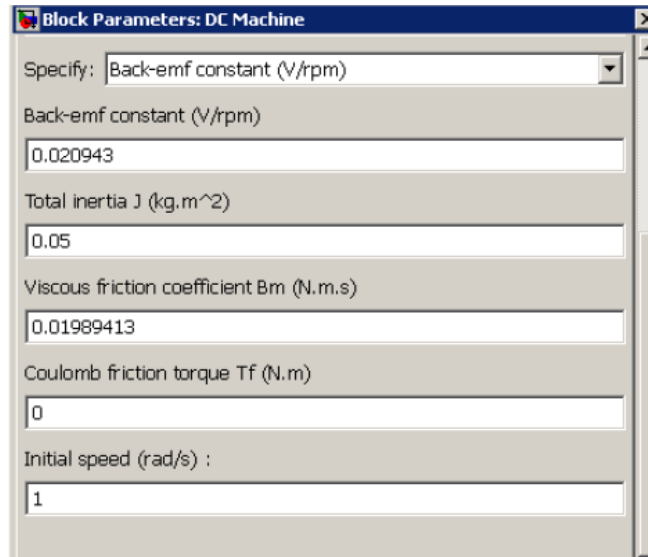


Figura 4.3. Parámetros a introducir en el modelo DC Machine. Resistencia e inductancia de la armadura, constante de tensión, inercia total, coeficiente de fricción viscosa, par de fricción de Coulomb y velocidad inicial.

El modelo funcional que implementa el bloque 'DC Machine' en forma de diagrama de bloques, se muestra en la figura 4.4.

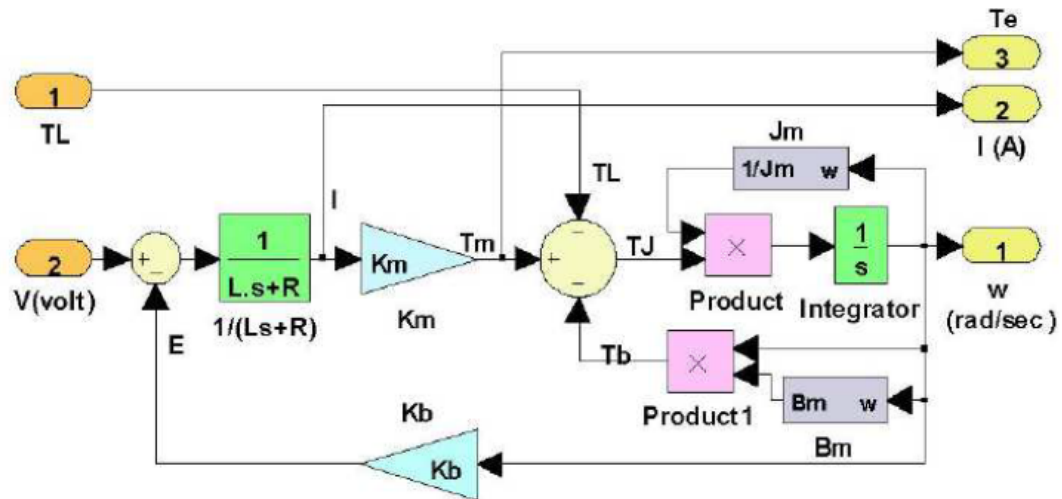


Figura 4.4. Modelo funcional del PMDC motor (Matlab-Simulink).

4.1.2 Esquema de partida del bloque PMDC motor en Matlab-Simulink.

Para completar el bloque 'DC Machine', haremos uso de los elementos que observamos en la figura 4.5.

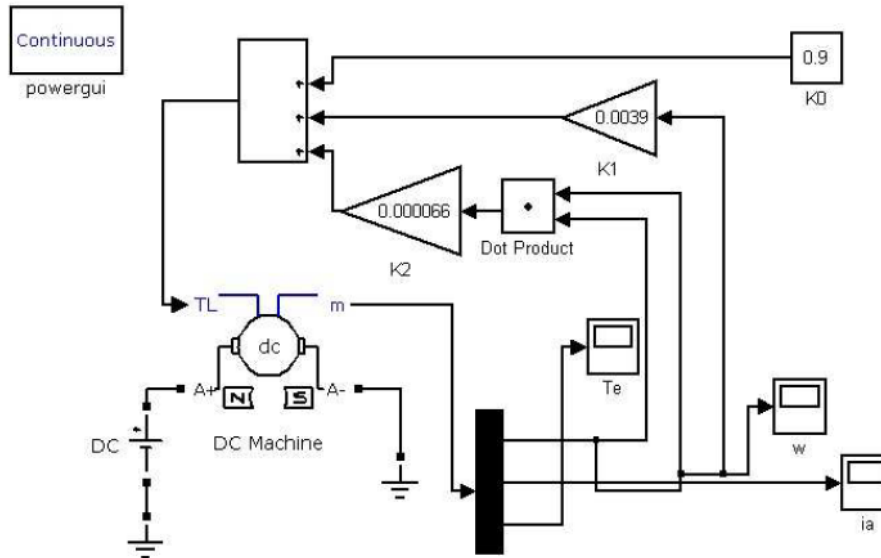


Figura 4.5. Esquema del bloque de la máquina de corriente continua de imanes permanentes. Matlab-Simulink.

Se hace la explicación de forma detallada, los elementos que aparecen en el bloque motor de la figura 4.5.

Los elementos que aparecen en el esquema:

- a) Ganancia (Gain).

Se han utilizado tres ganancias denominadas **K0**, **K1** y **K2** correspondientes a las constantes del par de carga. Dichos valores especificados en el enunciado del problema de estudio (tabla 3.1).

Este elemento se encuentra en el entorno de Matlab-Simulink, denominado como 'Gain' dentro de la librería 'Math-Operations'. El símbolo que lo representa Figura 4.6.



Figura 4.6. Bloque 'Gain' (Matlab-Simulink).

b) Demultiplexor (Demux).

El bloque 'Demux' extrae las componentes de una señal de entrada y provee los componentes en señales separadas. El bloque acepta tanto señales vectoriales como buses de señal.

El parámetro 'Number of outputs' permite especificar el número y dimensión de cada puerto de salida. Si no se configura la dimensión de las salidas, el bloque lo determina automáticamente.

En este caso, saldrán tres señales diferentes del bloque 'Demux velocidad angular, intensidad de la armadura y par eléctrico.

En la opción 'Display option' se puede elegir entre las opciones siguientes:

- BAR (por defecto). En esta opción se muestra el símbolo como una barra sólida del mismo color.
- None (ninguno). En esta opción el símbolo aparece como una caja vacía que contiene el nombre del bloque.

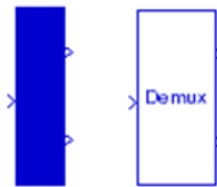


Figura 4.7. Bloque 'Demux'. Display options: Bar/ None (Matlab-Simulink).

c) Osciloscopio (Scope).

En el esquema que aparece en la figura 4.5, se han empleado tres elementos 'Scope', para visualizar las señales de salida en el tiempo. Intensidad de la armadura, velocidad angular y par del motor con respecto al tiempo.

Este elemento 'Scope' se encuentra dentro de la librería 'Sinks' de 'Matlab-Simulink'.

El símbolo del bloque lo podemos observar en la siguiente figura.

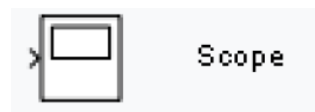


Figura 4.8. Bloque 'Scope' (Matlab-Simulink)

d) Dot product (doble producto) y Sum (suma).

Como se observa en el esquema de la figura 4.5, dos de las tres ganancias son multiplicadas por la velocidad angular de salida $K1$ una vez, $K2$ dos veces.

El bloque utilizado para hacer el cuadrado se denomina 'Dot product' y procede de la librería 'Math Operations' Matlab-Simulink.

La suma de la ganancia $K0$ por la ganancia $K1$, multiplicada una vez por la velocidad angular, más la suma de la ganancia $K2$ por el cuadrado de la velocidad, da lugar a la señal Tl que se le suministra al bloque DC Machine.

La suma se realiza con el elemento 'Sum' que pertenece a la misma librería.

e) DC Voltage Source.

El bloque 'DC Voltage Source', representa una fuente de tensión constante y se encuentra en la librería 'Electrical Source (fuente eléctrica)' del apartado 'SimPowerSystem' de Simulink.

En la siguiente figura observamos el símbolo de este bloque. La amplitud utilizada 36 V.

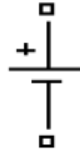


Figura 4.9. Esquema del bloque 'DC Voltage Source' (Matlab-Simulink).

4.2 Bloque de control en Matlab-Simulink aplicado al motor.

El esquema de control aplicado al bloque motor definido en el anterior apartado, está basado en los documentos de la principal bibliografía consultada (*An Efficient Tri-Loop Controller for Photovoltaic Powered Four-Wheel Electric Vehicle* y *A Hybrid Photovoltaic PV Array-Battery Powered EV-PMDC Drive Scheme*). Las simulaciones llevadas a cabo con este bloque de control aparecen en el capítulo siguiente esquema de control es el de la Figura 4.2.1.

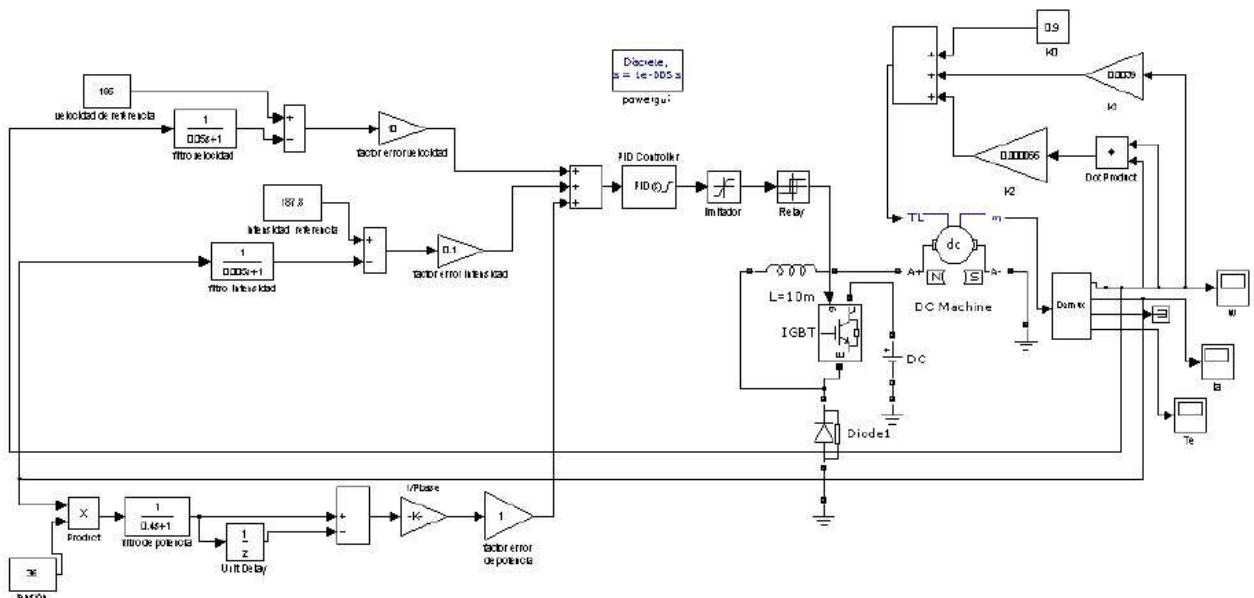


Figura 4.10. Esquema de control final motor en Matlab-Simulink.

En la figura 4.11 observamos la parte dedicada al control de la figura anterior.

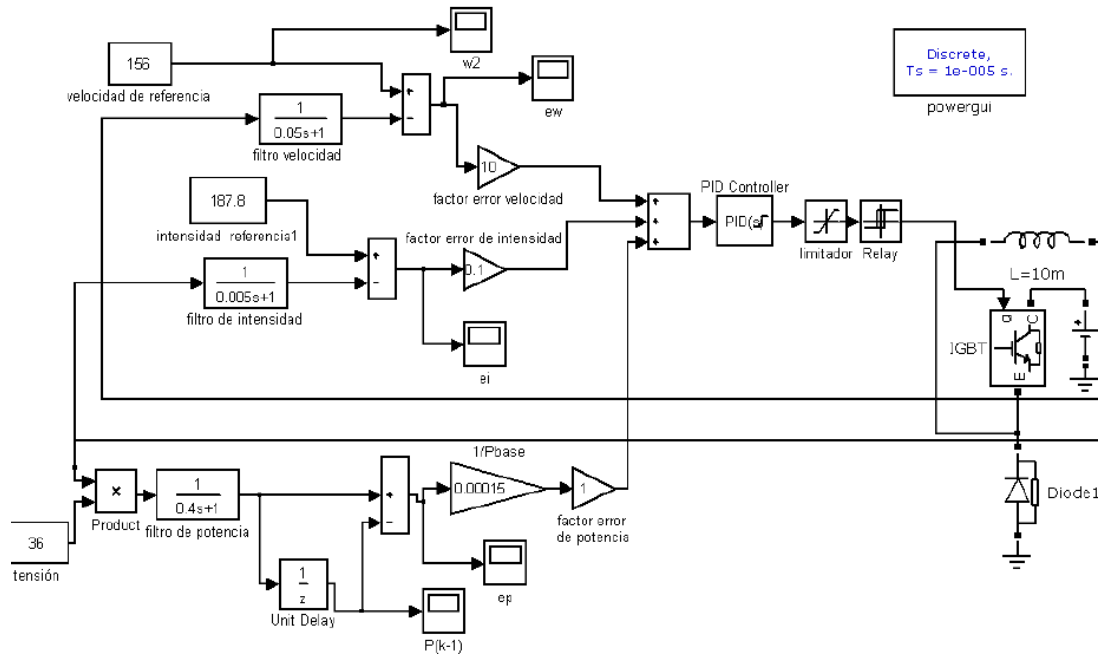


Figura 4.11. Parte del control de la Figura 4.2.1.

Como se puede observar, se controlan tres variables (velocidad, intensidad y potencia). Para ello se calculan los errores de velocidad, intensidad y potencia, que multiplicados por los factores de ponderación de error correspondientes a cada variable y sumados, darán como resultado la señal error total aplicada al sistema de control (Controlador PID).

En la Figura 4.2.3 se representa el esquema de control de cualquier sistema. Como se puede observar, la señal error se obtiene mediante la diferencia entre la señal de referencia del sistema menos el valor medido. Luego la señal error es aplicada al sistema de control (Controlador PID). Esta estructura es la que se sigue en el esquema de control del estudio, pero con la salvedad de que estamos controlando tres variables a la vez. El error total calculado según la expresión (2.1) es el aplicado al sistema de control.

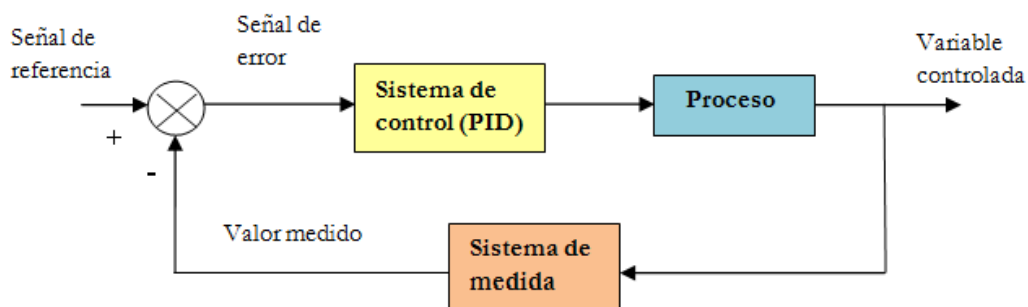


Figura 4.12. Esquema general de control de un sistema.

Como se ha mencionado ya en capítulos anteriores, se toman los datos de los artículos de referencia por la similitud con el caso de estudio. En este caso, los valores numéricos de los factores de ponderación del error de velocidad, intensidad y potencia junto a los periodos de

cada uno de los filtros utilizados para filtrar cada una de las señales de velocidad, intensidad y potencia del motor medidas, se dan en la tabla siguiente.

Yw	YI	Yp	Tw (s)	Ty (s)	Tp (s)
10	0,1	1	0,05	0,005	0,4

Tabla 4.1. Tabla de datos del control.

A diferencia de los bucles de cálculo de los errores de velocidad e intensidad, se ha procedido de manera diferente en el cálculo del error de potencia. Este error es calculado a partir de la expresión siguiente:

$$ep = [P(k) - P(k - 1)]/P_{base} \quad (4.4)$$

Siendo:

$$P_{base} = 36 \times 187.8 = 6760.8 \text{ w}$$

$P(k)$ es el producto de la señal intensidad por 36 V.

$P(k - 1) = z^{-1} \times P(k)$, por la definición de la transformada de Z.

El sistema de control utilizado se trata de un controlador PID definido por la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = K_p \times \left(1 + \frac{1}{T_i \times s} + T_d \times s\right) \quad (4.5)$$

Donde K_p , T_d y T_i son las constantes, proporcional, integral y derivativa del controlador PID. Los valores de dichas constantes corresponden a los valores dados en los artículos de referencia (Tabla 3.1). Dichas constantes están dadas en la Tabla 4.2.

K_p	T_d	T_i
150	5	2

Tabla 4.2. Constantes del PID.

El esquema de la Figura 4.10 está constituido por una serie de elementos específicos de Matlab Simulink además de por los bucles de cálculo de los errores y controlador PID. Estos elementos son:

- Saturation
- Relay
- IGBT
- Diode

En los apartados siguientes describiremos los bloques utilizados en la Figura 4.10.

4.2.1. Saturation (limitador).

El bloque 'Saturation' de la librería 'Discontinuities' impone límite superior e inferior a una señal de entrada.

Cuando los parámetros 'Limit Lower' y 'Limit Upper' tienen el mismo valor, la salida del bloque es ese valor.

La figura siguiente, muestra el bloque del elemento 'Saturation' Matlab-Simulink.

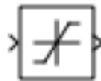


Figura 4.13. Bloque 'Saturation' de la librería 'Discontinuities' (Matlab-Simulink).

El panel principal de la caja de diálogo del bloque 'Saturation' aparece en la Figura 4.14.

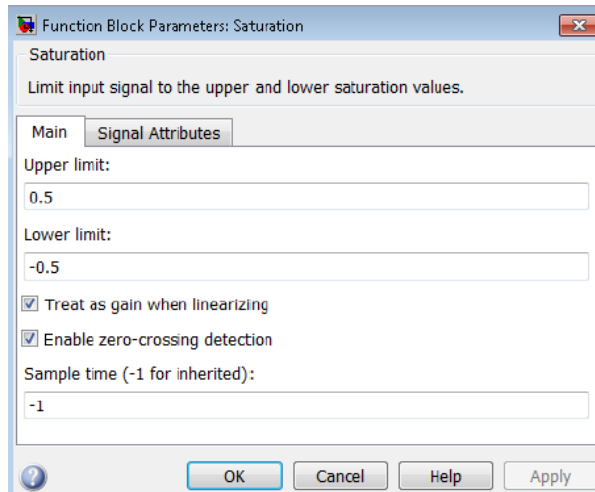


Figura 4.14. Caja de diálogo del bloque 'Saturation' (Matlab-Simulink).

En la caja de diálogo de dicho bloque aparecen los siguientes parámetros:

- **Upper limit** (límite superior)

En esta opción se especifica el límite superior de la señal de entrada. Por defecto aparece seleccionado el valor 0.5.

Cuando la señal de entrada al bloque de saturación, está por encima de este valor, la salida del bloque se recorta a este valor.

- **Lower limit** (límite inferior)

En esta opción se especifica el límite inferior de la señal de entrada. Por defecto aparece seleccionado el valor -0.5. Cuando la señal de entrada al bloque de saturación es inferior a este valor, la salida del bloque se recorta a este valor.

4.2.2 Relay.

El bloque 'Relay' de la librería de Simulink denominada 'Discontinuities', permite su salida para cambiar entre los valores especificados. Cuando el relé está activado, permanece encendida parámetro 'Switch off point'. Cuando el relé está apagado, permanece a pagado hasta que la entrada supera el valor del parámetro 'Switch on point'. El bloque acepta una entrada y genera una salida.

El valor 'Switch on point' tiene que ser mayor o igual que 'Switch off point'.

En la figura siguiente viene representado el bloque 'Relay' en Matlab-Simulink.



Figura 4.15. Bloque 'Relay' de la librería 'Discontinuities'(Matlab-Simulink).

El panel principal de la caja de diálogo del bloque 'Relay' aparece en la Figura 4.16.

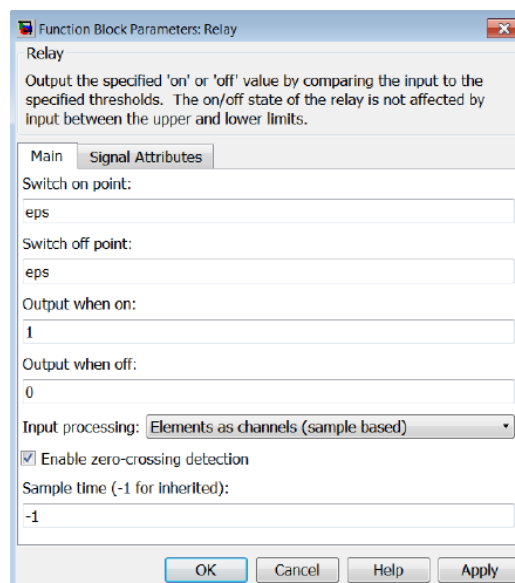


Figura 4.16. Caja de diálogo del bloque 'Relay' (Matlab-Simulink)

4.2.3 IGBT (transistor de compuerta aislada).

Los transistores IGBT, combinan las características de alta impedancia en la compuerta de los transistores MOSFET, con la capacidad de manejo de alta corriente de los transistores BJT o bipolares. Esto se logra combinando una compuerta aislada como las de los transistores MOSFET, que funcionan como la base de un interruptor bipolar, para realizar las funciones de un interruptor de potencia en un solo dispositivo.

Algunas de las ventajas en este tipo de transistores, es el hecho de utilizar un sistema de control bastante simple y las bajas pérdidas por conmutación y conducción. Las fugas de corriente presentadas por los transistores de compuerta aislada son muy pequeñas debido a la

compuerta aislada que se usa para su control, lo cual supone un manejo más eficiente de la potencia.

Este dispositivo tiene tres terminales el colector, emisor y compuerta. Las primeras dos actúan como el colector y emisor de un transmisor a través de éstas. Por otra parte, la compuerta funciona como la compuerta de un transmisor MOSFET, controlado la corriente que circula a través del colector y emisor por medio de la diferencia de potencial aplicada entre la compuerta y el emisor.

El bloque IGBT se encuentra dentro de la librería 'Power electronics' de Simulink, y se define como una combinación en serie de una resistencia ' R_{on} ', una inductancia ' L_{on} ' y una fuente de tensión de corriente continua ' V_f ' en serie, por un interruptor controlado por señal lógica $g > 0$ ó $g = 0$.

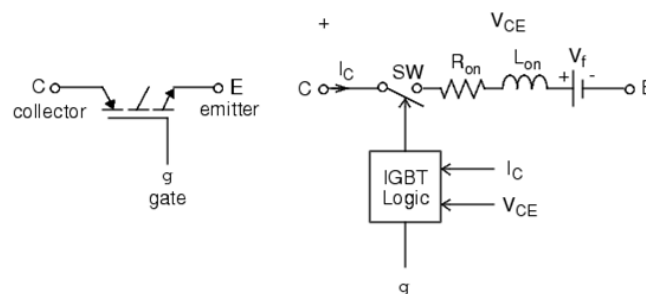


Figura 4.17. Bloque 'IGBT' de Matlab-Simulink.

La principal aplicación de estos transistores es su uso como interruptores controlados por medio de compuerta. Por esta razón, al estudiar este tipo de transistores, se hace con un enfoque en dos formas de operación. El transistor puede funcionar en corte (apagado) o saturación (encendido) entre el colector y emisor, dependiendo de la señal aplicada en la compuerta 'g'.

4.2.3.1 Transistor IGBT en saturación.

En estado de saturación la corriente puede fluir libremente a través del mismo, desde el colector al emisor siguiendo la dirección que indica la flecha de su símbolo. A pesar de ser un dispositivo eficiente, presenta una caída de tensión entre colector y emisor, produciendo un consumo de energía.

Para que un transistor IGBT alcance el punto de saturación se requieren dos condiciones. Estas condiciones son:

- El voltaje entre colector y emisor, debe ser mayor que la caída de tensión propia de cada transistor.
- En la compuerta debe aplicarse un nivel de tensión mayor al nivel existente en el emisor, esta diferencia de potencial debe ser proporcional a la corriente deseada entre colector y emisor del transistor.

De modo que el bloque IGBT funciona en saturación cuando la tensión colector emisor es positiva y mayor que ' V_f ', aplicándose una señal positiva en la compuerta $g > 0$.

4.2.3.2 Transistor IGBT en corte.

Cuando el transistor está en saturación, en muchas ocasiones hay que interrumpir la carga bien para controlar la corriente que introduce o para realizar operaciones de carga y descarga, para eso se utilizará en modo corte.

Cuando la compuerta se coloca a un nivel de potencia menor que el aplicado al emisor, la diferencia de potencial entre el colector y emisor comienza a aumentar linealmente, pero por un breve instante la corriente mantiene el mismo valor que circulaba durante la etapa de saturación, para luego disminuir hasta alcanzar un valor igual a cero.

Por lo que el interruptor IGBT estará en corte cuando la tensión entre el colector y el emisor sea menor que la tensión V_f positiva o negativa, aplicándose en la compuerta una tensión con un valor $g=0$.

Las características del modelo de apagado IGBT se aproxima a cero por dos segmentos según la figura 4.18. Cuando la señal del puesto g es cero, la corriente del colector disminuye ($I_{max} \rightarrow 0.1 \times I_{max}$) durante el tiempo de caída T_f' , y luego vuelve a caer durante el tiempo en cola T_t' ($0.1 I_{max} \rightarrow 0$).

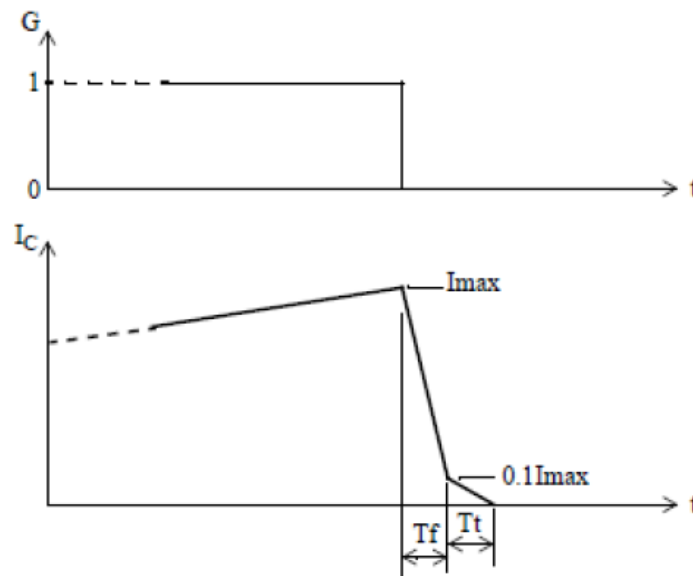


Figura 4.18. Apagado del bloque IGBT Matlab-Simulink. Variación intensidad del colector cuando el puerto a la entrada $g=0$.

4.2.4 Bloque 'Diode' de Matlab-Simulink.

El bloque 'diode', se encuentra dentro de la biblioteca 'power electronics' de Matlab-Simulink.

El diodo es un dispositivo de control, controlado por su propia tensión V_{ak} e intensidad I_{ak} .

Cuando un diodo está polarizado en sentido directo $V_{ak} > 0$, empieza a conducir una tensión directa V_f a través de él. Se apaga cuando el flujo de corriente en el dispositivo cae a 0.

Cuando el diodo está polarizado a la inversa, se activa el modo apagado $V_{ak} < 0$.

El bloque 'Diode', es simulado por una resistencia, una inductancia y una fuente de tensión continua en serie conectada con el interruptor, el cual, es controlado por la tensión V_{ak} y la I_{ak} intensidad de la forma que aparece en la figura siguiente.

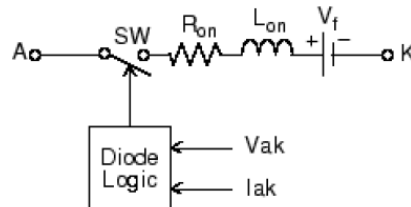


Figura 4.19. Esquema que describe el funcionamiento del bloque 'Diode' en Matlab-Simulink.

El bloque del diodo, también contiene un circuito de protección en serie Rs-Cs que puede conectarse en paralelo entre ánodo y cátodo A-K.

Los parámetros que definen el diodo a utilizar en dicha prueba, son los que aparecen en la ventana de diálogo de dicho bloque por defecto según la siguiente figura.

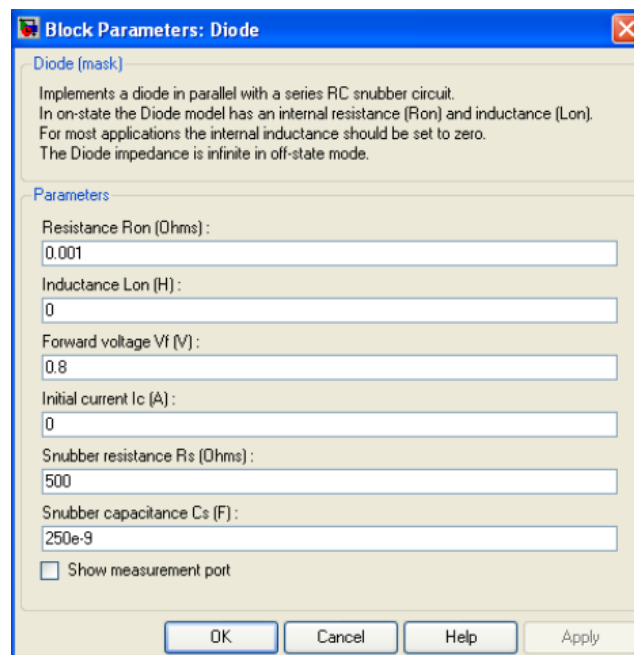


Figura 4.20. Ventana de diálogo del bloque 'Diode' en 'Power electronics' Matlab-Simulink.

4.3 Modelo de sistema de almacenamiento desarrollado en Matlab-Simulink.

Como ya hemos comentado en capítulos anteriores, las baterías es un sistema electroquímico, por lo que su modelado se puede abordar de diferentes perspectivas, Matlab-Simulink realiza un modelo eléctrico a partir de [1] y [2], basado en, un circuito equivalente en el que sus elementos son representativos de las reacciones que suceden en la batería.

En la siguiente figura, observamos el bloque implementado en Matlab-Simulink sobre un modelo dinámico de batería recargable.

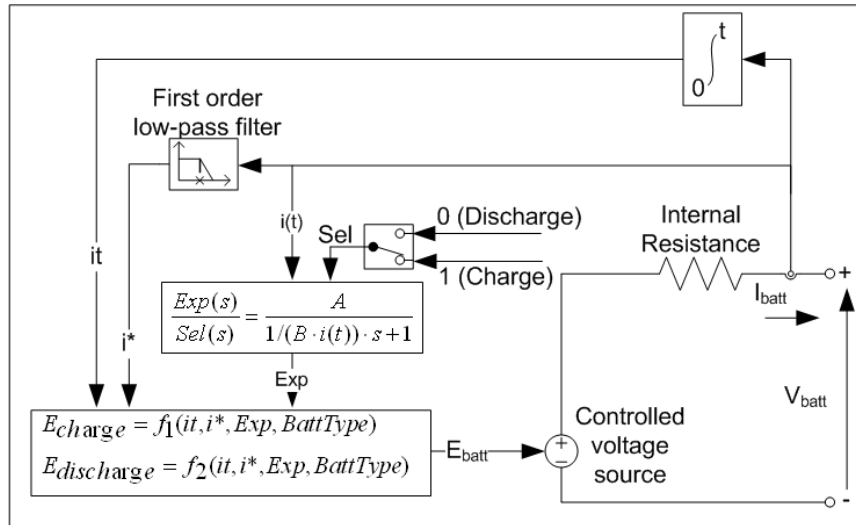


Figura 4.3.1. Bloque batería recargable Matlab-simulink

Las ecuaciones del modelo de carga y descarga de los distintos modelos de baterías implementados por Matlab-Simulink:

Lead-Acid Model

Discharge model ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, Exp) = E_0 - K \times \frac{Q}{Q-it} \times i^* - K \times \frac{Q}{Q-it} it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \times 0 \right) \quad (4.3.1)$$

Charge Model ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, Exp) = E_0 - K \times \frac{Q}{Q-it} \times i^* - K \times \frac{Q}{Q-it} it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \times \frac{1}{s} \right) \quad (4.3.2)$$

Lithium-Ion Model

Discharge Model ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \times \frac{Q}{Q-it} \times i^* - K \times \frac{Q}{Q-it} it + A \times exp(-B \times it) \quad (4.3.3)$$

Charge Model ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \times \frac{Q}{Q-it} \times i^* - K \times \frac{Q}{Q-it} it + A \times exp(-B \times it) \quad (4.3.4)$$

Nickel-Cadmium and Nickel-Metal-Hydride Model

Discharge Model ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \times \frac{Q}{Q-it} \times i^* - K \times \frac{Q}{Q-it} it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \times 0 \right) \quad (4.3.5)$$

Charge Model ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \times \frac{Q}{Q-it} \times i^* - K \times \frac{Q}{Q-it} it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \times \frac{1}{s} \right) \quad (4.3.6)$$

Donde tenemos que:

E_{Batt} = Tensión no lineal (V)

E_0 = Tensión constante (V)

$Exp(s)$ = Zona dinámica exponencial (V)

$Sel(s)$ = Representa el modo de funcionamiento de la batería. $Sel(s) = 0$ descarga, $Sel(s) = 1$ carga.

K = Constante de polarización (Ah^{-1}) o Resistencia de polarización (Ohms)

i^* = Corriente dinámica de baja frecuencia (A)

i = Corriente batería (A)

it = capacidad de extracción (Ah)

Q = Capacidad máxima batería (Ah)

A = Tensión exponencial (V)

B = Capacidad exponencial (Ah^{-1})

Los parámetros del circuito equivalente se pueden variar, de forma que el modelo de batería se adapte a las especificaciones necesarias.

La curva de descarga viene diferenciada por tres secciones que observamos en la figura.

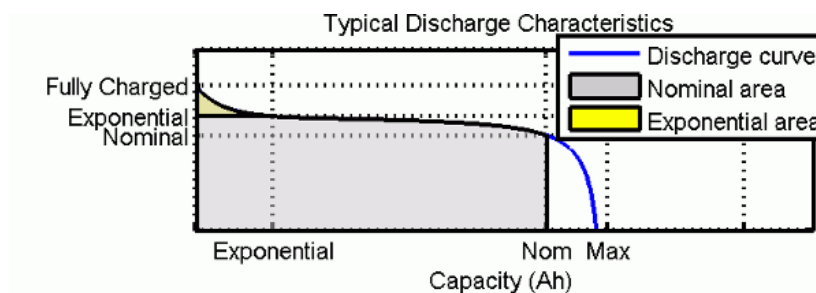


Figura 4.3.2. Curva de descarga.

La primera sección representa el área de tensión exponencial, que se obtiene cuando la batería está completamente cargado, observamos que se produce una caída de la tensión. La segunda sección, representa la carga que se puede extraer de la batería a tensión nominal, hasta que cae la tensión por debajo de la tensión nominal de la batería. Por último la tercera sección muestra la descarga de la batería, la tensión cae totalmente.

Cuando la batería está en estado de carga, la corriente es negativa abajo, en la figura podemos observar las características del estado de carga.

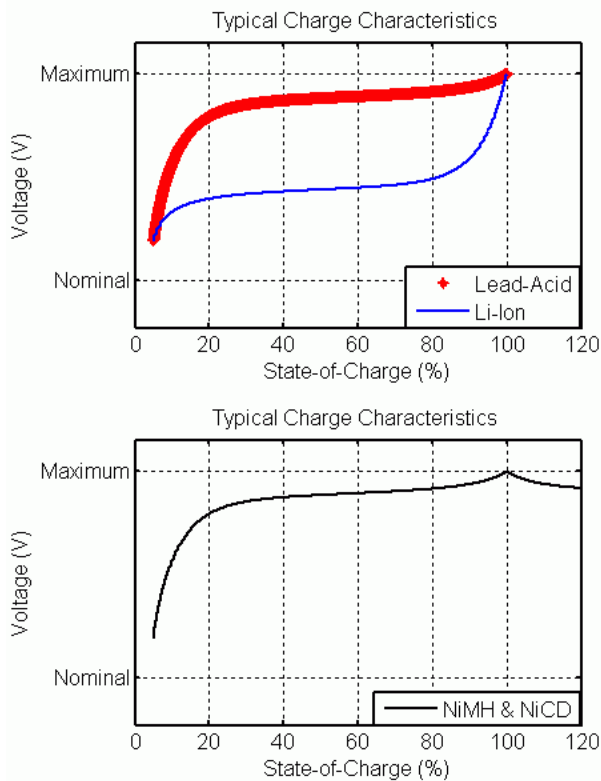


Figura 4.3.3. Curvas de carga.

Se suponen los mismos valores que son deducidos en la descarga.

La función de transferencia exponencial, representa el fenómeno de histéresis que se produce en las baterías de Lead-Acid, NiCD and NiMH durante los ciclos de carga y descarga. La tensión exponencial se incrementa en los ciclos de carga de la batería, independientemente del SoC. En el estado de descarga la tensión exponencial cae de inmediato. Figura.

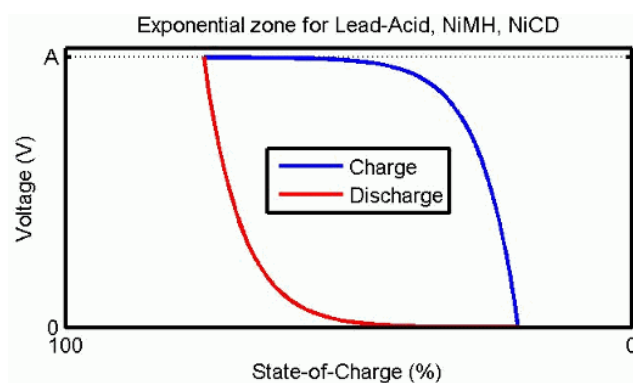
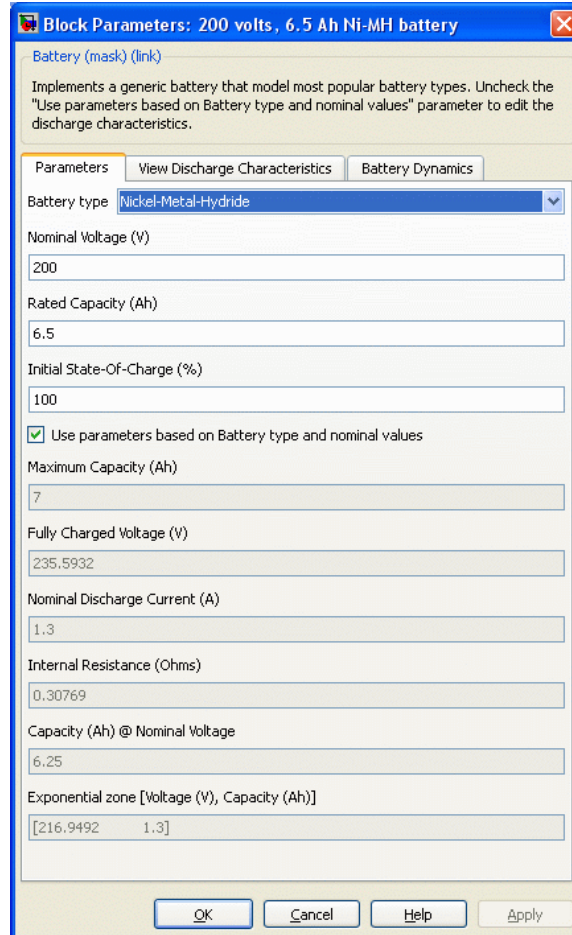


Figura 4.3.4. Zona exponencial Lead-Acid, NiMH, NiCd.

En la siguiente figura se observa la tabla de parámetros del modelo de batería.



Block Parameters: 200 volts, 6.5 Ah Ni-MH battery

Battery (mask) (link)

Implements a generic battery that model most popular battery types. Uncheck the "Use parameters based on Battery type and nominal values" parameter to edit the discharge characteristics.

Parameters | View Discharge Characteristics | Battery Dynamics

Battery type: Nickel-Metal-Hydride

Nominal Voltage (V): 200

Rated Capacity (Ah): 6.5

Initial State-Of-Charge (%): 100

Use parameters based on Battery type and nominal values

Maximum Capacity (Ah): 7

Fully Charged Voltage (V): 235.5932

Nominal Discharge Current (A): 1.3

Internal Resistance (Ohms): 0.30769

Capacity (Ah) @ Nominal Voltage: 6.25

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]: [216.9492 1.3]

OK Cancel Help Apply

Figura 4.3.4. Tabla de parámetros de un modelo de batería

Tipos de baterías:

Matlab-Simulink, proporciona diferentes comportamientos determinados para distintos tipos de batería.

- Plomo-ácido
- Ion-Lítio
- Niquel-Cadmio
- Nickel-Metal-Hydride

Tensión nominal.

La tensión nominal (V_{nom}) de la batería. Representa el final de la zona lineal de la curva de descarga.

Capacidad nominal (Ah).

La capacidad nominal (Q_{rated}) de la batería en amperios hora. Es la capacidad mínima efectiva que tiene la batería.

Estado inicial de carga (%).

El estado inicial de carga (SOC) de una batería. El 100% indica que la batería está completamente cargada, mientras que el 0% indica que está completamente descargada. Este

parámetro se utiliza para la condición inicial de simulación y no afecta a la curva de carga (cuando se usa la opción Plot Discharge Characteristics).

Uso de los parámetros según las características y tipo de batería.

Carga los parámetros correspondientes, en la ventana de la batería según el tipo de batería, la tensión nominal y la capacidad nominal seleccionada.

Cuando estás usando un modelo de batería, los parámetros detallados no se pueden variar. Se debe seleccionar otro tipo de batería y se cargaran los parámetros por defecto, desactivando la casilla "Use parameters based on Battery type and nominal values" se accede a los parámetros detallados.

Capacidad máxima (Ah).

La capacidad teórica máxima (Q). Cuando en la tensión de la batería aparecen discontinuidades, este valor es igual al 105% de la capacidad nominal.

Tensión de la batería totalmente cargada.

La tensión de la batería totalmente cargada (V_{full} , para una intensidad dada no es la tensión de carga.

Corriente nominal de descarga (A).

La corriente nominal de descarga, corresponde a los valores medidos de la curva de descarga. Por ejemplo, la corriente típica de descarga para una batería de 1.5 Ah es 20% de la capacidad nominal: $(0.2 * 1.5 \text{ Ah} / 1 \text{ h} = 0.3 \text{ A})$.

Resistencia interna.

La resistencia interna de la batería (ohm). Según el modelo utilizado, se carga un valor que es el 1% de la potencia nominal (tensión nominal*capacidad nominal de la batería). El valor de la resistencia es constante, no varía en los ciclos de carga y descarga ni a diferente amplitud.

Capacidad (Ah).

La capacidad (Q_{nom}), la corriente extraída de la batería hasta que la tensión cae por debajo de la tensión nominal, este valor debe estar entre Q_{exp} y Q_{max} .

Zona exponencial [Tensión (V), Capacidad (Ah)].

La tensión (V_{exp}) y la capacidad (Q_{exp}) pertenecen al final de la zona exponencial. La tensión debería estar entre V_{nom} y V_{full} . La capacidad debería estar entre 0 y Q_{nom} .

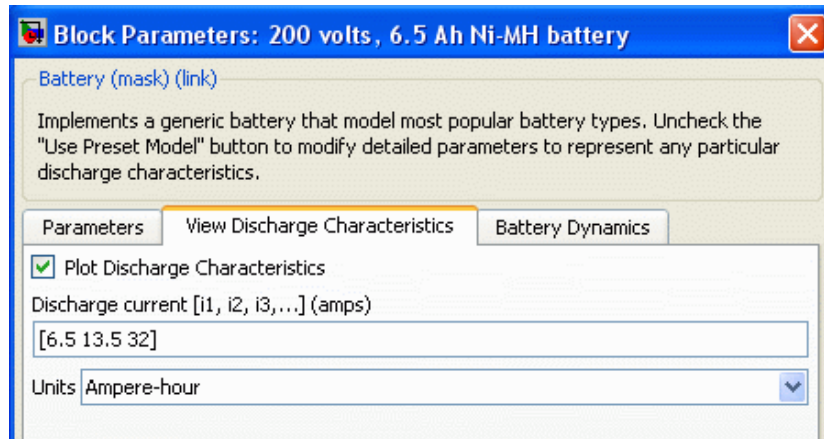


Figura 4.3.5. Tabla de características de descarga.

Plot Discharge Characteristics.

Si se selecciona esta casilla, se muestran dos gráficas en una figura. La primera gráfica muestra la curva de descarga nominal (y la corriente de descarga nominal) y la segunda gráfica representa las curvas de descarga de las corrientes de descarga especificadas. Cuando la casilla está marcada, la gráfica se actualiza automáticamente cuando los parámetros cambian en el cuadro de diálogo. Para limpiar la figura, desactiva y cierra.

Corriente de descarga (Discharge current).

Permite seleccionar los valores de la corriente de descarga. Las características de descarga de esta corriente, se presentan en la segunda parte de la gráfica.

Units.

Puedes elegir Tiempo o Amperios-hora para el eje X en la gráfica.

Battery Dynamics tab.

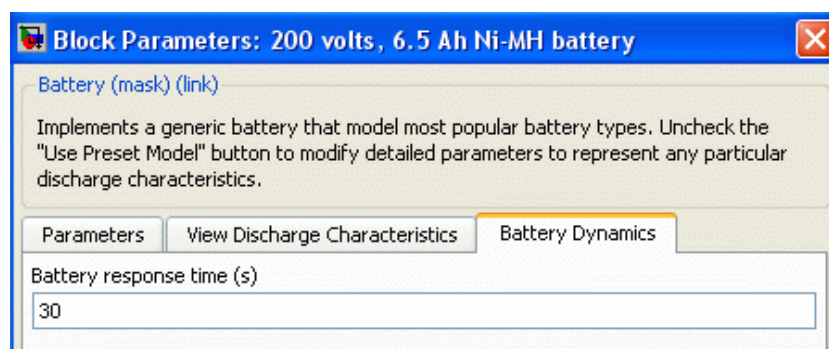


Figura 4.3.6. Parámetros modelo de batería, tiempo de respuesta.

Tiempo de respuesta de la batería (s).

El tiempo de respuesta es el 95 % del valor final. Este valor representa la tensión dinámica y puede observarse cuando se interrumpe la descarga de la batería.

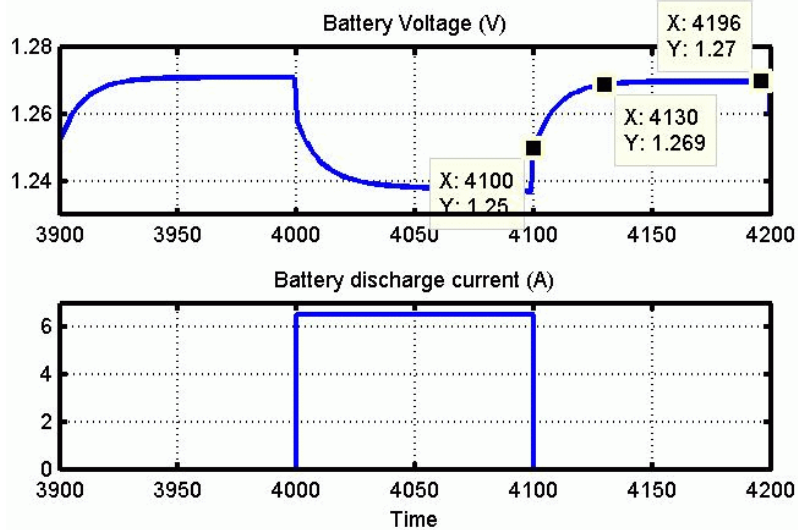


Figura 4.3.7. En este ejemplo el tiempo de respuesta es 30 sg.

Extracción de los parámetros de la batería de la ficha de datos.

En este ejemplo se muestra la ficha de datos del modelo de batería *Panasonic NiMH-HHR650*.

Specifications

	mm	inch
Diameter	33.0+0/-0.1	1.3+0/-0.04
Height	61+0/-1.5	2.40+0/-0.08
Approximate Weight	Grams	Ounces
	170	6.0

Nominal Voltage		1.2V	
Discharge Capacity*	Average**	6800 mAh	
	Rated (Min.)	6500 mAh	
Approx. Internal impedance at 1000Hz at charged state.		2mΩ	
Charge	Standard	650mA (0.1It) x 16hrs.	
	Rapid	6500mA (1It) x 1.2 hrs.	
Ambient Temperature	Charge	Standard	0°C to 45°C / 32°F to 113°F
		Rapid	0°C to 40°C / 32°F to 104°F
	Discharge		-10°C to 65°C / 14°F to 149°F
	Storage	< 2 years	-20°C to 45°C / -4°F to 113°F
< 6 months		-20°C to 55°C / -4°F to 131°F	

Typical Discharge Characteristics

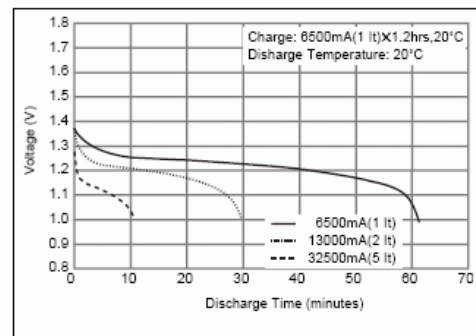
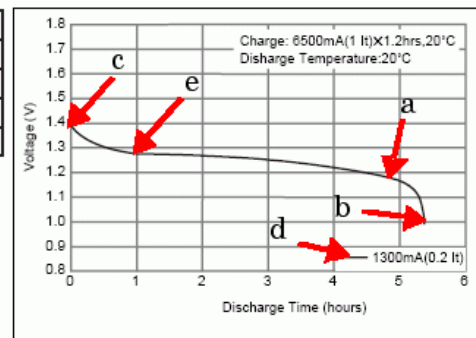


Figura 4.3.7. Ficha técnica.

De la ficha de especificaciones técnicas, obtenemos la capacidad nominal y la resistencia interna. El resto de parámetros se deducen de la curva de características típicas de descarga.

Parameter	Value
Rated capacity	6.5 Ah
Internal Resistance	2 mΩ
Nominal Voltage ^(a)	1.18 V
Rated Capacity	6.5 Ah
Maximum Capacity ^(b)	7 Ah (5.38h * 1.3A)
Fully Charged voltage ^(c)	1.39 V
Nominal Discharge Current ^(d)	1.3 A
Capacity @ Nominal Voltage ^(a)	6.25 Ah
Exponential Voltage ^(e)	1.28 V
Exponential Capacity ^(e)	1.3 Ah

Tabla 4.3.1. Parámetros del modelo del bloque 'battery' Matlab-Simulink.

Estos parámetros dependen de los puntos obtenidos en la curva de descarga. Una herramienta denominada ScanIt (proporcionada by amsterCHEM, <http://www.amsterchem.com>) se usa para extraer los valores de la curva de la hoja de datos.

Los parámetros obtenidos en la hoja de datos, son los que se seleccionaron en la tabla de parámetros siguiente.

Las siguientes curvas de descarga, son obtenidas de una batería con los parámetros de la tabla anterior.

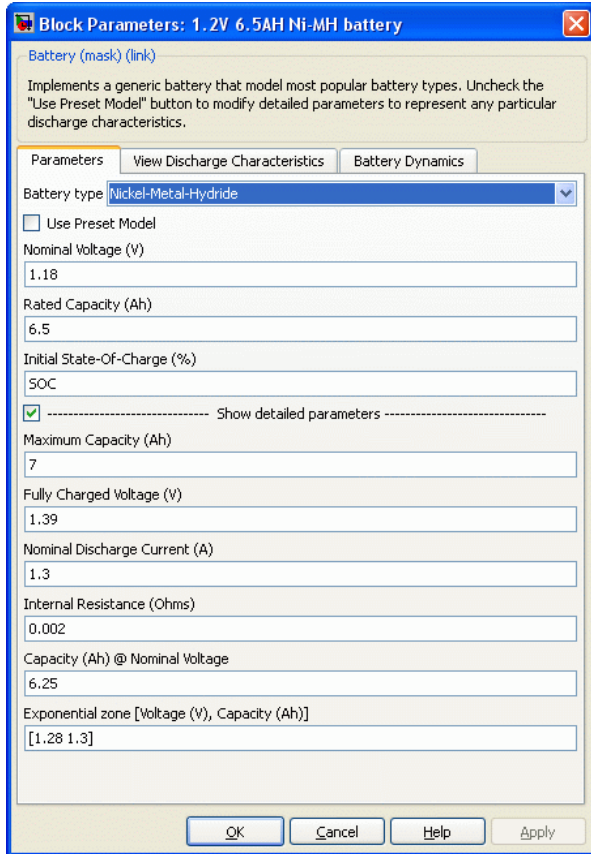


Figura 4.3.8. Tabla parámetros modelo batería.

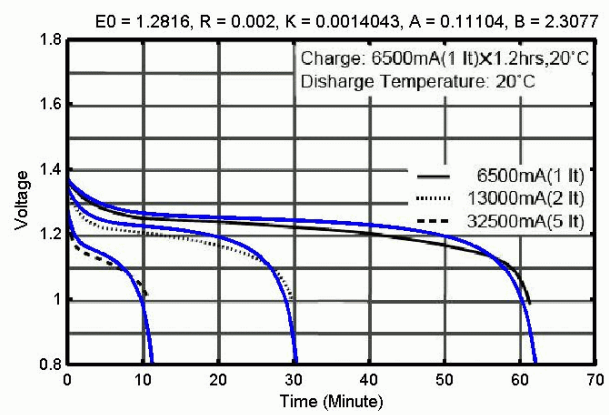
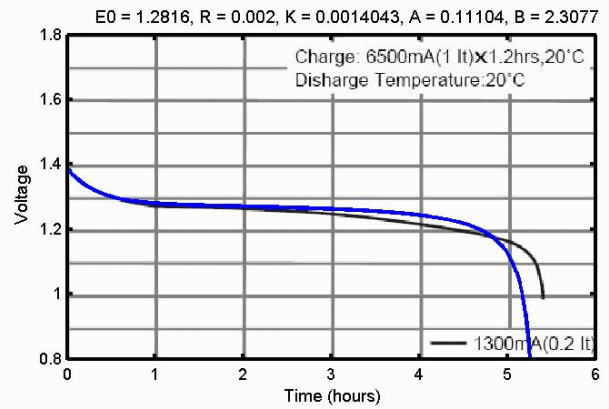


Figura 4.3.9. Curvas de descarga batería V-T.

Bloque, entrada y salida.

El bloque de Simulink, contiene un vector con tres señales. A través de un bloque Bus Selector, puedes visualizar las tres señales.

Señal	Definición	Unid.
SOC	Estado de carga de la batería (entre 0 y 100%). El SOC cuando la batería está completamente cargada es 100% y cuando está descargada es 0%. El SOC se calcula: $SOC = 100 \times \left(1 - \frac{1}{Q} \int_{t_0}^t i(t) dt\right)$ (4.3.7)	%
Corriente	Corriente de la batería	A
Tensión	Tensión de la batería	V

Validez del modelo.

El modelo representa según los datos experimentales un error máximo del 5% cuando el SOC está entre un 10%-100% durante la carga (corriente entre 0 y 2C) y la descarga (corriente entre 0 y 5C) dinámica.

Supuestos del modelo.

- La resistencia interna se considera constante durante los ciclos de carga y descarga, además no varía con la amplitud de corriente.

- Los parámetros del modelo son deducidos por las características de descarga y son iguales para la carga.
- La capacidad de la batería no varía con la amplitud de la corriente (no tiene efector Peukert).
- El modelo no tiene en cuenta la temperatura.
- La auto-descarga de la batería no se representa, aunque se puede representar colocando una resistencia en paralelo a los terminales de la batería.
- La batería no tiene efecto memoria.

Limitaciones.

- El valor mínimo de tensión de la batería en vacío es 0 V y el valor máximo de tensión en la batería es $2 \cdot E_0$.
- El valor mínimo de capacidad de la batería es 0 Ah y el valor máximo es Q_{max} .

CAPÍTULO 5.

ADAPTACIÓN DE LOS MODELOS Y SIMULACIONES

5. ADAPTACIÓN DE LOS MODELOS Y SIMULACIONES.

Debido a la complejidad del control del sistema de almacenamiento, en este proyecto se procede al estudio del bloque 'battery' 'SimPowerSystems' Matlab-Simulink y los elementos que funcionan como interruptor de carga y descarga, bloque 'IGBT' de la biblioteca 'SimPowerSystems' 'Power Electronics'. Se simulan de forma independiente con el fin de conocer el comportamiento del modelo de batería y así poder establecer un control que será modificado hasta obtener un sistema de bloques alimentado por un panel fotovoltaico y como carga la máquina DC, ya mencionada en apartados anteriores.

Previo al diseño del sistema final de control con panel fotovoltaico y máquina dc, se realizan una serie de simulaciones más simples con el fin de diseñar un lazo de control más sencillo. Se toma como elemento de descarga el bloque 'Resistance' de la biblioteca 'SimPowerSystems' y como elemento de carga de la batería una fuente controlada de intensidad, bloque 'Controlled Current Source' de la biblioteca 'SimPowerSystems' 'Electrical Sources'. Mediante un lazo de control realizado a través de bloques lógicos establecemos la carga y descarga de la batería, bloque 'battery' Matlab-Simulink.

5.1 PRIMERA SIMULACION.

Modelo continuo con Matlab-Simulink del modelo de batería (bloque 'battery') Matlab-Simulink conectado a un elemento $R=50 \Omega$.

En este caso se muestra, la primera simulación obtenida en Matlab-Simulink, con el simple objetivo de observar el comportamiento del modelo de batería bloque 'battery' 'SimPowerSystem' de Matlab-Simulink. Se conecta la batería en circuito cerrado a una resistencia ($R=50 \Omega$) y tiempo continuo, se descarga completamente en un tiempo $T=6400$ sg.

En la siguiente figura, aparece el esquema de la primera simulación realizada en este proyecto. Incluye el elemento 'powergui' para indicar que estamos trabajando con variables continuas.

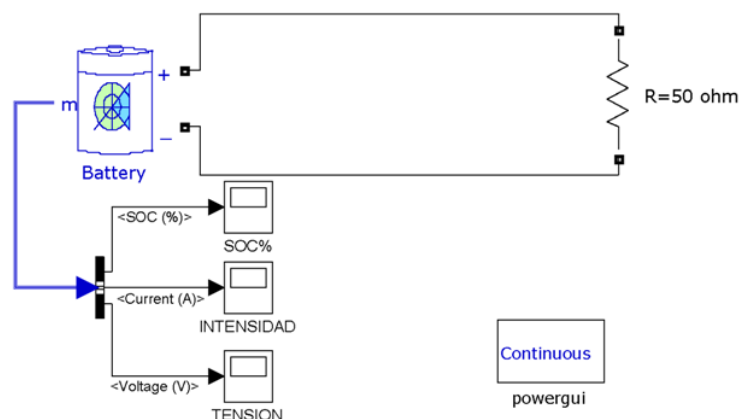


Figura5.1. Esquema de la primera simulación realizada en Matlab-Simulink.

Los parámetros usados en el modelo de batería aparecen en la siguiente tabla.

Parametros	Valor
Rated capacity	6.5 Ah
Internal Resistance	2 mΩ
Nominal Voltage ^(a)	1.18 V
Rated Capacity	6.5 Ah
Maximum Capacity ^(b)	7 Ah (5.38h * 1.3A)
Fully Charged voltage ^(c)	1.39 V
Nominal Discharge Current ^(d)	1.3 A
Capacity @ Nominal Voltage ^(a)	6.25 Ah
Exponential Voltage ^(e)	1.28 V
Exponential Capacity ^(e)	1.3 Ah

Tabla 5.1. Parámetros del modelo de batería utilizados en este proyecto.

En las gráficas que se presentan a continuación, se observan los resultados obtenidos de la corriente de descarga, tensión y estado de carga (SOC%).

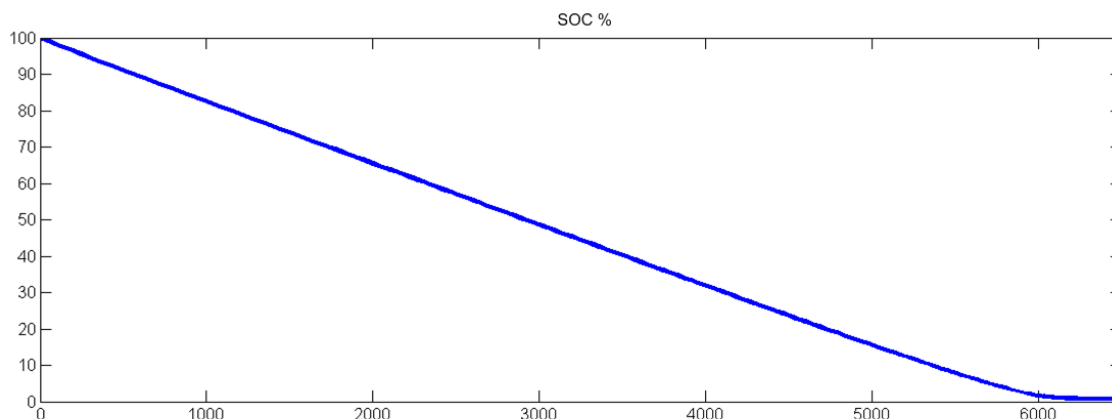


Figura 5.2. Estado de carga (SOC %) para los parámetros seleccionados en la primera simulación.

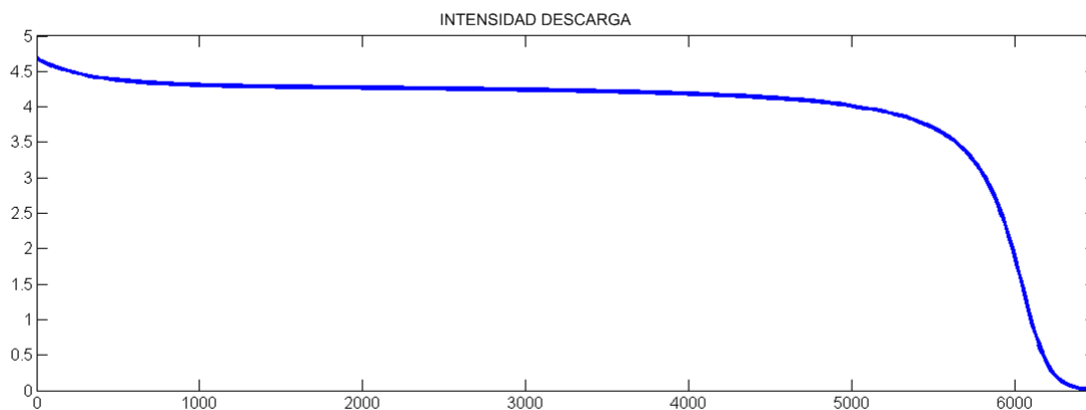


Figura 5.3. Intensidad de descarga (A) de la batería para los parámetros establecidos en la primera simulación.

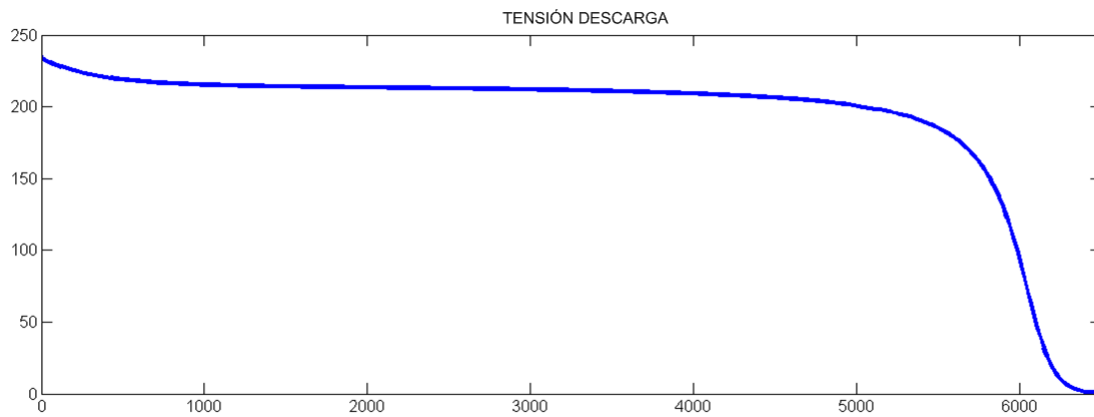


Figura 5.4. Tensión de descarga (V) de la batería para los parámetros seleccionados en la primera simulación.

5.2 SEGUNDA SIMULACIÓN.

Modelo continuo con Matlab-Simulink del modelo de batería (bloque 'battery') Matlab-Simulink conectado a una fuente controlada de intensidad con una corriente constante de 10 A, bloque 'Controlled Current Source'.

La segunda simulación realizada en este proyecto para el modelo de batería, trata de la conexión del bloque 'Controlled Current Source' de la biblioteca 'SimPowerSystems' 'Electrical Sources' en paralelo con el modelo de batería y presentando un estado de carga del 0%. Se lleva a cabo una carga hasta el 100% a través de la fuente de intensidad controlada de 10 A, en tiempo continuo T= 2500 sg. El objetivo es observar el comportamiento del bloque 'battery'.

En la figura 5.5 observamos el esquema para la carga de la batería en Matlab-Simulink.

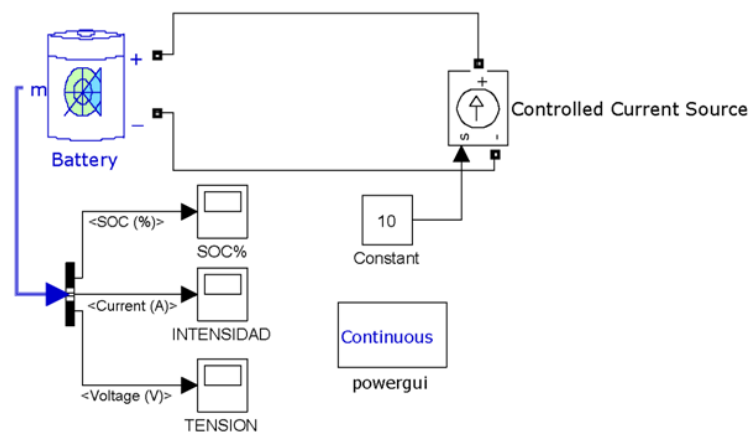
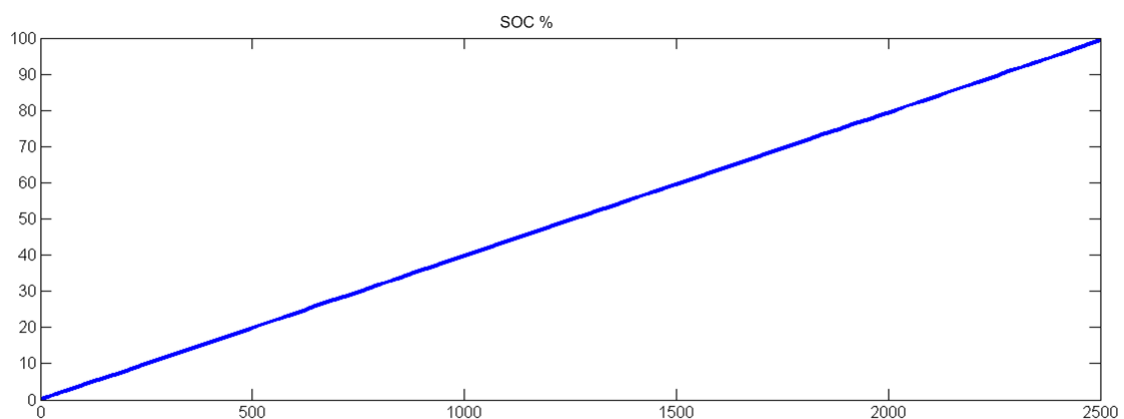


Figura 5.5. Esquema de la segunda simulación diseñada en Matlab-Simulink.

Mediante el uso de un bloque 'bus selector' de la librería 'Simulink' podemos seleccionar las medidas de corriente, estado de carga y tensión en el puerto de medida del bloque 'battery' Matlab-Simulink.

A través del bloque 'Scope' librería 'Simulink' se visualizan las tres graficas que se representan en las siguientes figuras.



5.6. Estado de carga (SOC %) para los parámetros seleccionados en la segunda simulación.

La intensidad de carga aparece como -10 A debido a que se le está inyectando un flujo de corriente a la batería. En el puerto de mediciones esté se interpreta como una intensidad negativa de 10 A.

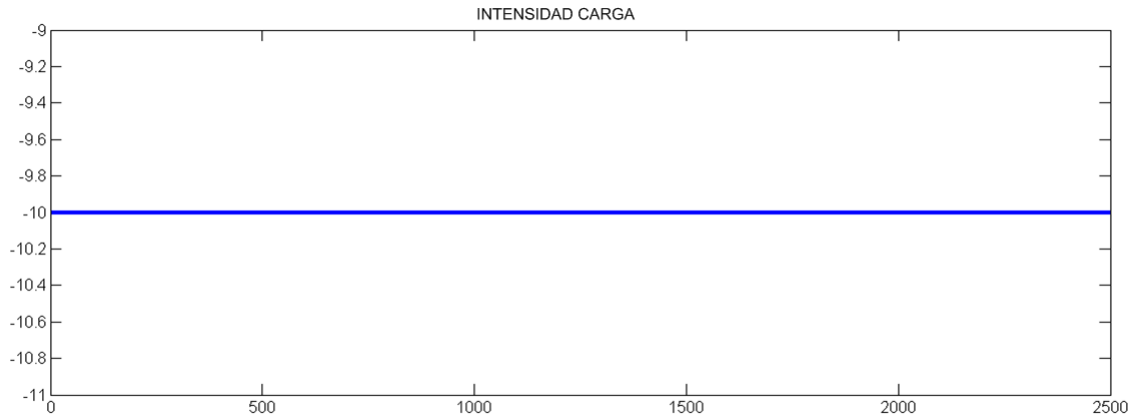


Figura5.7. Intensidad de carga de la batería (A) para los parámetros seleccionados en la segunda simulación.

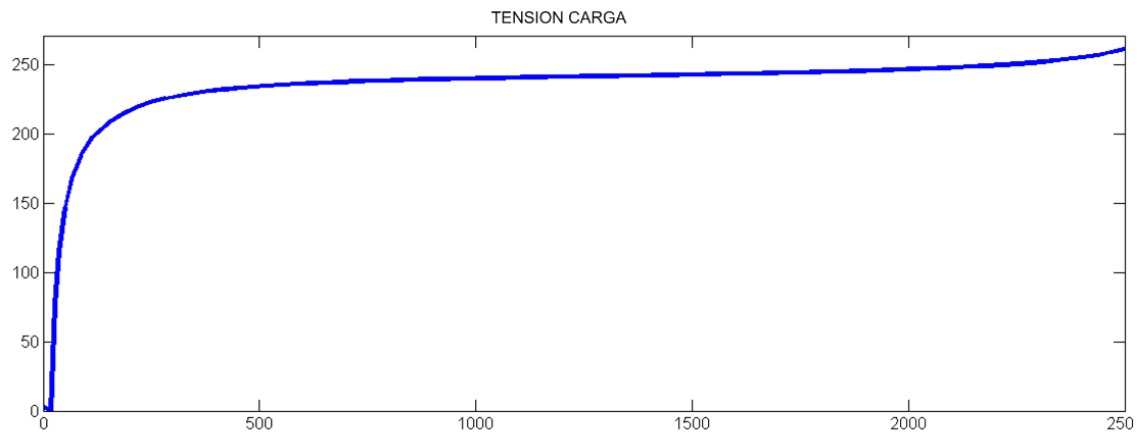


Figura5.8. Tensión de carga de la batería (V) para los parámetros seleccionados en la segunda simulación.

5.3 TERCERA SIMULACIÓN.

Modelo discreto, primera prueba de lazo de control con dispositivos de potencia y bloques lógicos.

En la tercera simulación, se realiza un lazo de control en Matlab-Simulink, dependiente del estado de carga (SOC%) y de la intensidad que pasa por la batería, en este circuito viene denominada como (Ibat).

El estado de carga inicial de la batería es del 80%, la resistencia elegida es de $R=20\ \Omega$ y la fuente de intensidad controlada produce un flujo de corriente constante de 20 A.

Se diseña un modelo de control de carga a través de elementos comparadores y puertas lógicas, bloque 'Compare To Constant', 'Compare To Zero' y 'Logical Operator' de la biblioteca 'Simulink' Matlab-Simulink. A través del lazo de control se activa y desactiva el elemento de potencia 'interruptor IGBT' 'SimPowerSystems', que pasará a estar en estado de corte y saturación según la señal de control que se establezca en el puerto 'gate' del IGBT.

El tipo de variable que se utiliza en esta simulación pasa a ser discreta con un paso por cero de 5×10^{-3} sg. El tiempo de simulación es de $T=5000$ sg. Con el objetivo de mostrar al menos un ciclo completo de carga y descarga.

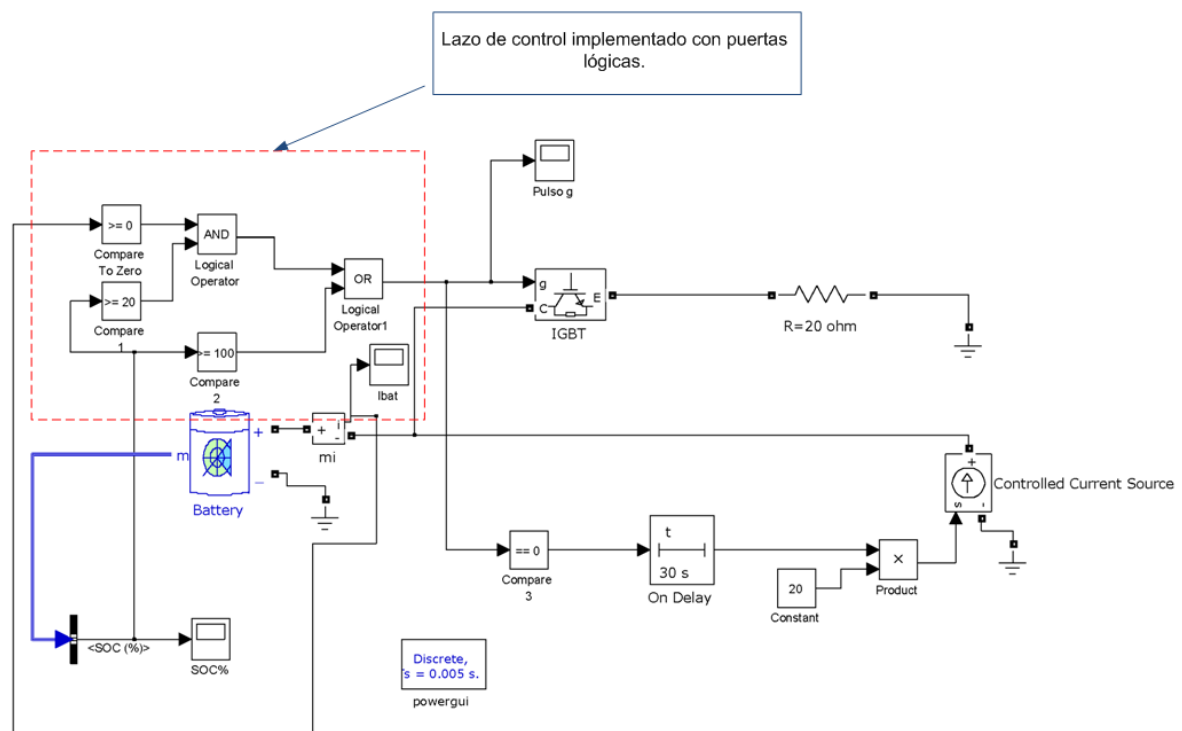


Figura 5.9. Esquema de bloques lazo de control tercera simulación en Matlab-Simulink.

El dispositivo 'On delay', se usa para lograr estabilizar los parámetros de la batería después de cada descarga. El tiempo de respuesta indicado en los parámetros de la batería es de 30 s esto significa el tiempo que necesita la batería para que la tensión dinámica vuelva a la tensión nominal cuando se desconecta una carga.

A continuación se muestra en los gráficos el estado de carga (SOC %), intensidad de la batería (carga y descarga) y el pulso de entrada a la puerta g del interruptor de potencia (IGBT).

La figura 5.10, nos muestra el estado de carga. Para un SOC del 20% se activa la carga de la batería hasta un SOC del 100% donde comienza el ciclo de descarga.

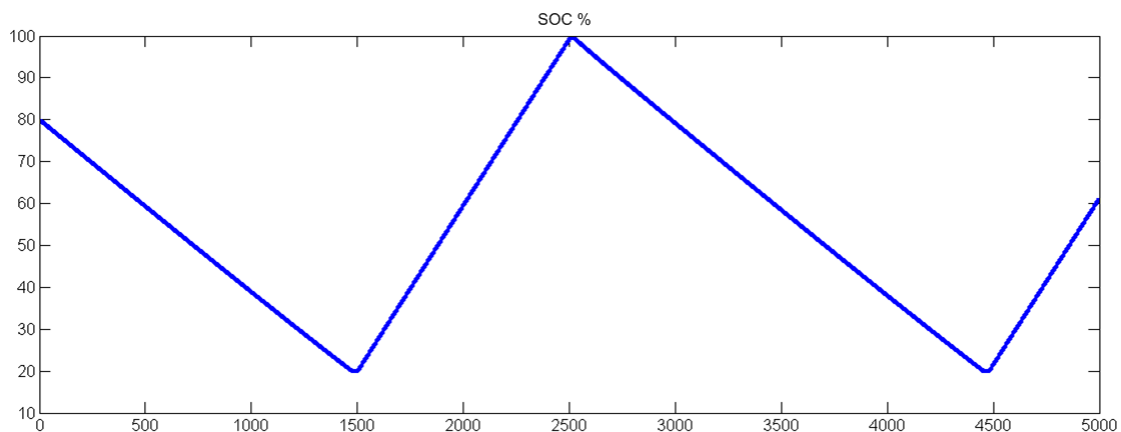


Figura 5.10. Estado de carga tercera simulación.

En la figura 5.11, se muestra el escalón que el sistema está sin carga debido al efecto del bloque 'on delay', que permite que la tensión vuelva a su estado nominal y poder ejercer otro ciclo de descarga completo.

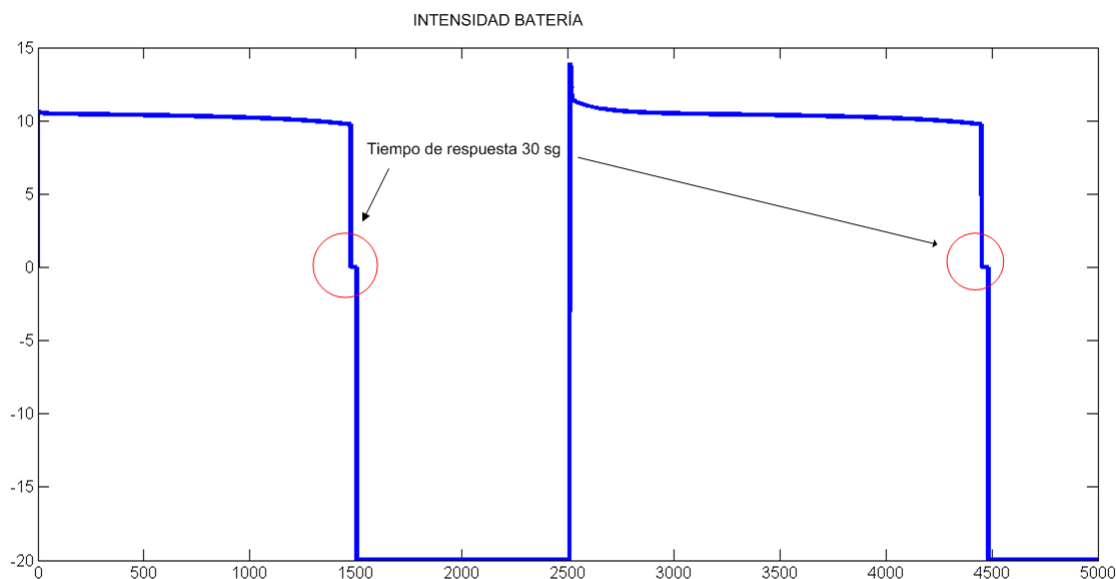
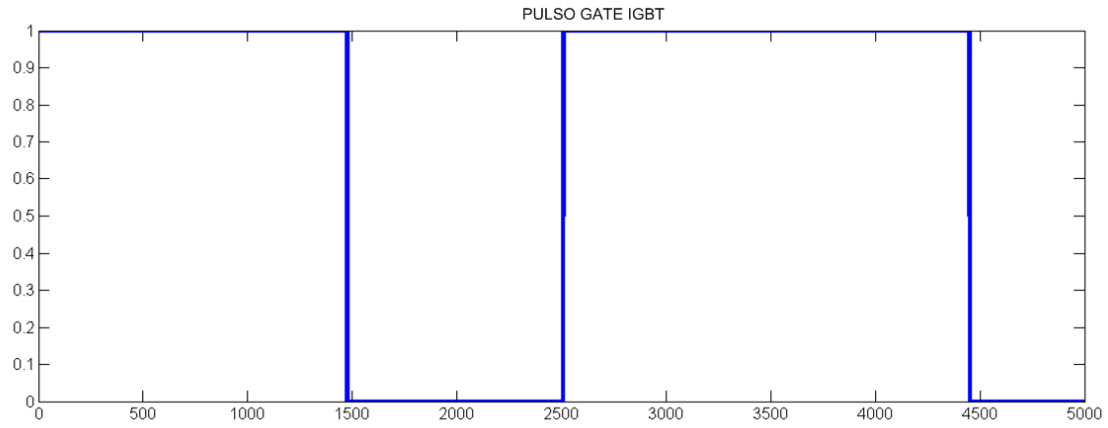


Figura 5.11. Intensidad batería tercera simulación.

Observamos la señal de salida del lazo de control para el valor '1' el interruptor de potencia 'IGBT' estará en modo conducción y para el valor '0' el IGBT funcionará en corte.



5.12. Salida lógica de lazo de control tercera simulación.

5.4 CUARTA SIMULACIÓN.

Se añade el bloque motor ya modelado y se diseña un lazo de control complejo para la carga de la batería y la descarga de esta de forma independiente a través del bloque motor.

El bloque motor utilizado en esta simulación proviene del proyecto nombrado en apartados anteriores ‘Modelización de un sistema de tracción eléctrica y de alimentación de un vehículo solar de fines experimentales’ autor Inmaculada Martínez Vidal. Los parámetros del bloque motor y todas sus características aparecen expuestos en el apartado 4.1 “Bloque motor Matlab-Simulink”.

El estado inicial de carga en esta simulación es de 22% y la fuente de intensidad controlada suministra un flujo de corriente constante de 20 A.

El bloque motor estará activo hasta que el estado de carga sea igual o menor al 20%, en ese momento se desactiva el motor de la batería a través del interruptor de potencia (IGBT), y comienza la carga de forma independiente, esa es la razón de que la intensidad I_{bat} sea de valor constante 20 A y negativo. Cuando el estado de carga supera es igual al 100% comienza el ciclo de descarga.

El tipo de variable que se utiliza en esta simulación es variable discreta con un paso por cero de 5×10^{-3} sg. El tiempo de simulación es de $T=3000$ sg. Con el objetivo de mostrar al menos un ciclo completo de carga y descarga.

El esquema de bloques de la cuarta simulación en Matlab-Simulink se muestra en la figura 5.13.

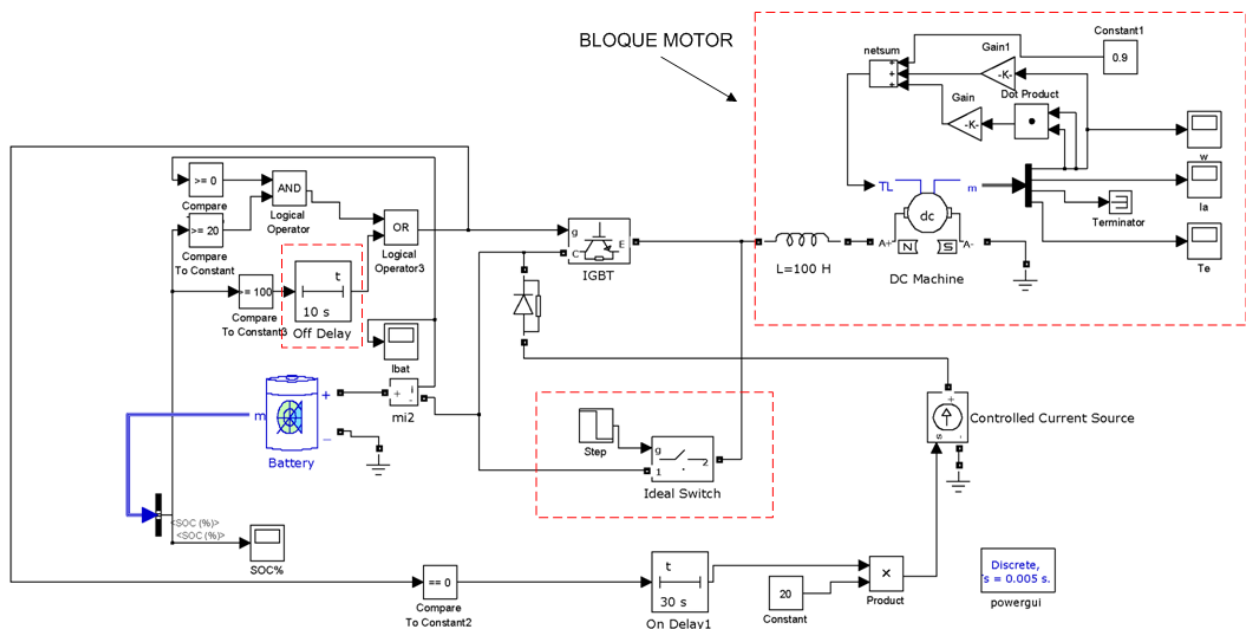


Figura 5.13. Esquema de bloques cuarta simulación lazo de control del bloque motor con Matlab-Simulink.

Al cambiar el elemento resistencia por el bloque motor, se complica el control. Añadimos una inductancia para controlar la corriente de entrada al bloque motor y un diodo para que no haya conducción a través de la fuente de intensidad controlada.

En el lazo de control se añade un bloque 'Off Delay' librería 'SimPowerSystems', con un retraso de 10 sg que es el tiempo que tarda aproximadamente el motor en alcanzar una intensidad que sea superior a cero, al ofrecer oscilaciones en el arranque.

Además se instala un bloque 'Ideal Switch' que hace las funciones de un interruptor normalmente abierto que es activado por un pulso de tensión de amplitud 10 sg al inicio, con el fin de impulsar el arranque del bloque motor al principio y que las oscilaciones no afecten a nuestro sistema de control.

En las siguientes figuras se pueden observar las curvas del estado de carga (SOC%), velocidad angular del motor (W rad/s) y la intensidad de carga y descarga.

Observamos que cuando el sistema está funcionando en modo carga, la batería se está cargando a una intensidad de 20 A, la velocidad pasa a ser negativa y se convierte en la suma de la intensidad de carga y la carga del bloque motor. El bloque motor comienza a funcionar como "generador", de forma que la batería se carga.

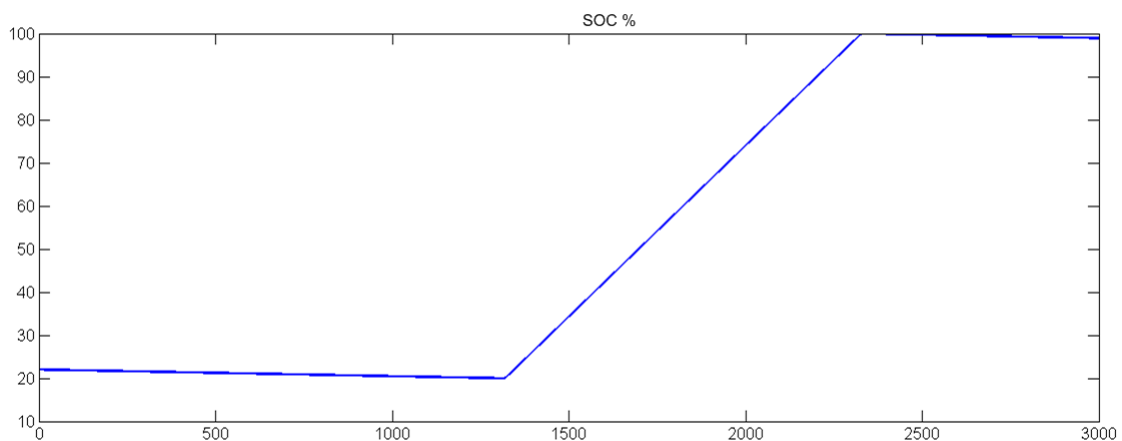


Figura 5.14. Curva estado de carga (SOC %), cuarta simulación.

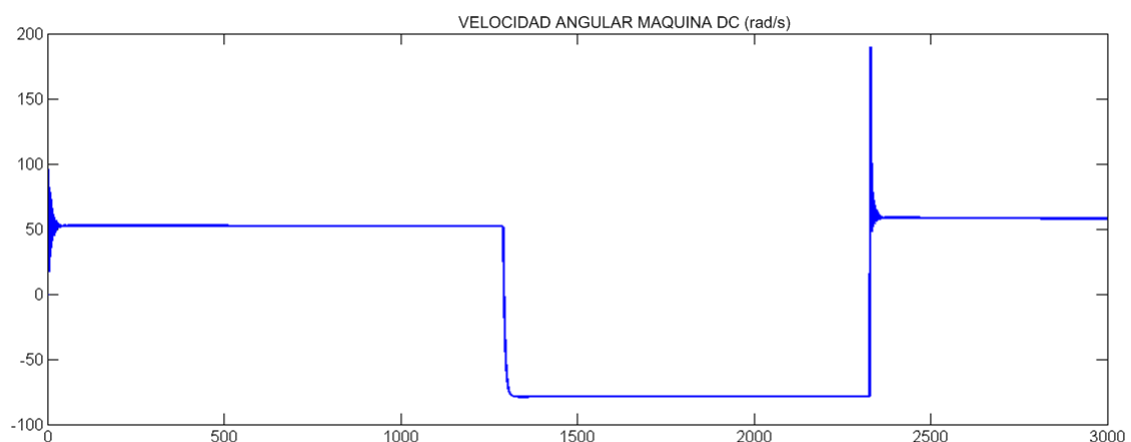


Figura 5.15. Curva velocidad angular en rad/s, cuarta simulación.

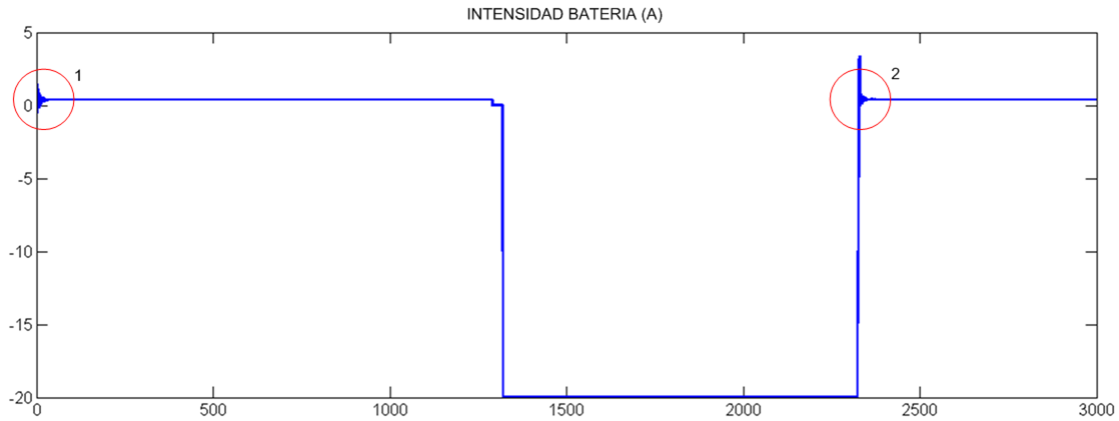


Figura 5.16. Forma de la corriente en la entrada de la batería, cuarta simulación.

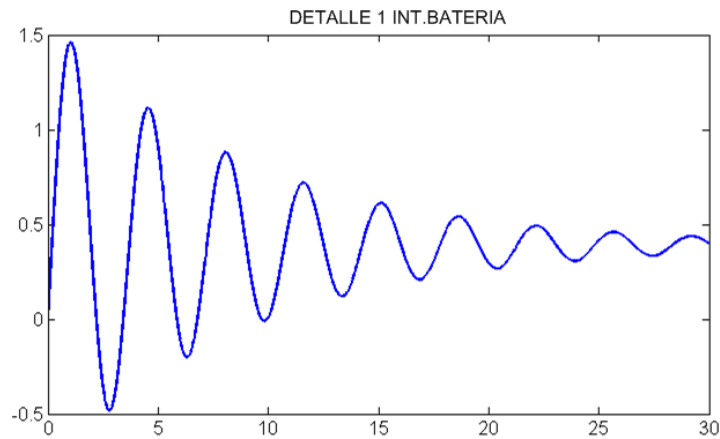


Figura 5.17. Detalle 1 del estado inicial de la corriente de descarga de la batería en la cuarta simulación.

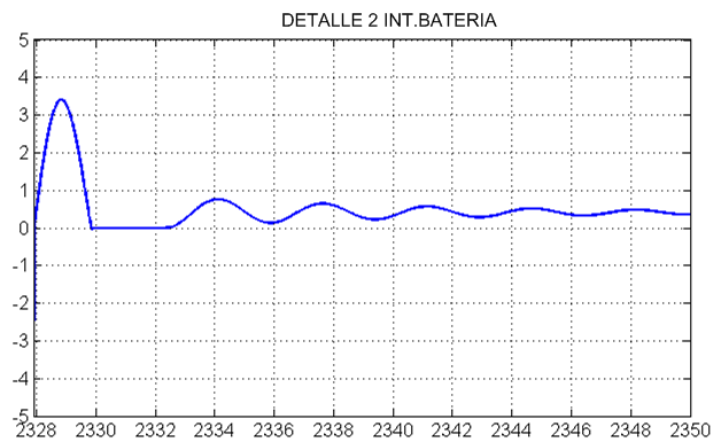


Figura 5.18. Detalle 2 de la intensidad de la batería en el estado inicial del segundo ciclo de descarga, cuarta simulación.

5.5 QUINA SIMULACIÓN.

Lazo de control de carga y descarga de la batería sin desconexión de bloque motor.

En esta simulación, se trata el control de la batería sin hacer una desconexión del bloque motor, de forma que en el modo de carga el motor siga funcionando.

Se utilizan los mismos parámetros que en la cuarta simulación, y el control es similar.

El estado inicial de carga en esta simulación es de 22% y la fuente de intensidad controlada suministra un flujo de corriente constante de 20 A.

El bloque motor estará activo hasta que el estado de carga sea igual o menor al 20%, en ese momento se desactiva el motor de la batería a través del interruptor de potencia (IGBT), y comienza la carga de la batería a la vez que el bloque motor sigue alimentado por la fuente controlada de intensidad, la carga de la batería será de aproximadamente 19.6 A, los 0.4 A restantes serán el consumo del motor. Cuando el estado de carga supera es igual al 100% comienza el ciclo de descarga.

En esta simulación el bloque motor no funciona como generador, está en constante funcionamiento. En la figura 5.21 y 5.22 se puede observar el comportamiento que sufre cuando comienza el ciclo de carga de la batería, sufriendo una pequeña oscilación al conectar la fuente controlada de corriente.

El tipo de variable que se utiliza en esta simulación es variable discreta con un paso por cero de 5×10^{-3} sg. El tiempo de simulación es de $T=3000$ sg. Con el objetivo de mostrar al menos un ciclo completo de carga y descarga.

En la figura siguiente 5.19 se observa el esquema de bloques en Matlab-Simulink del control establecido.

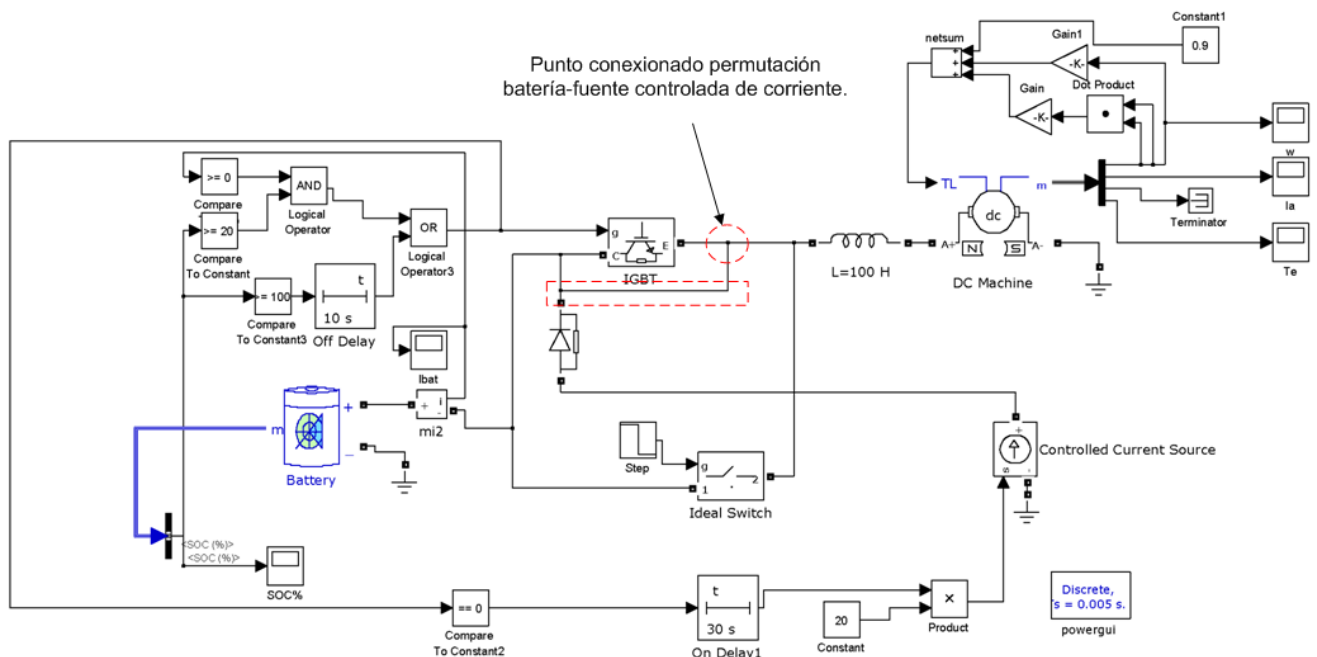


Figura 5.19. Esquema bloques en Matlab-Simulink de la quinta simulación.

En las siguientes figuras se pueden observar las curvas del estado de carga (SOC%),
velocidad angular del motor (W rad/s) y la intensidad de carga y descarga.

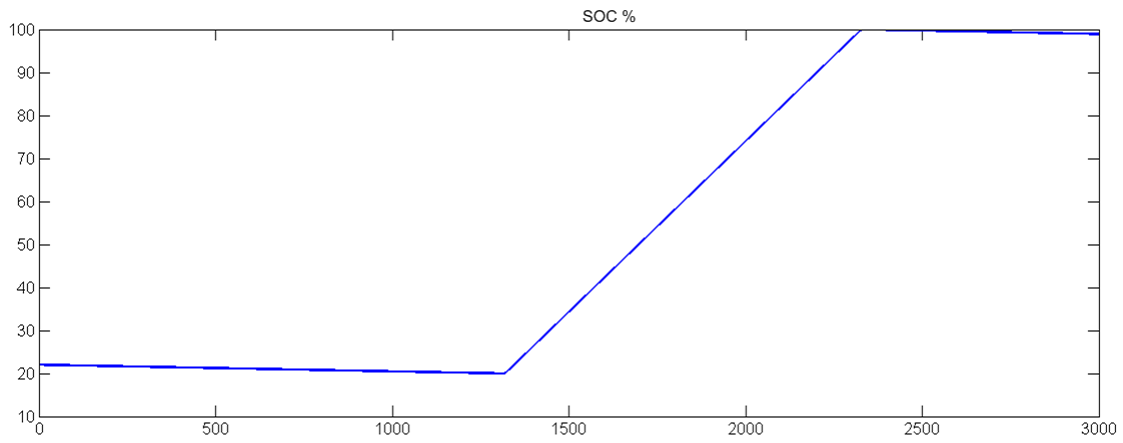


Figura 5.20. Curva estado de carga (SOC %), quinta simulación.

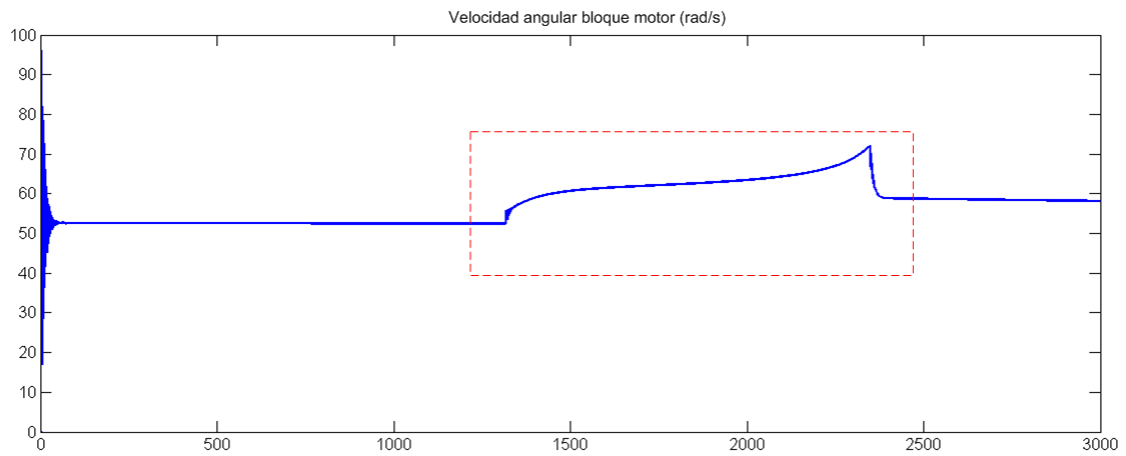


Figura 5.21. Gráfico velocidad angular del bloque motor, quinta simulación.

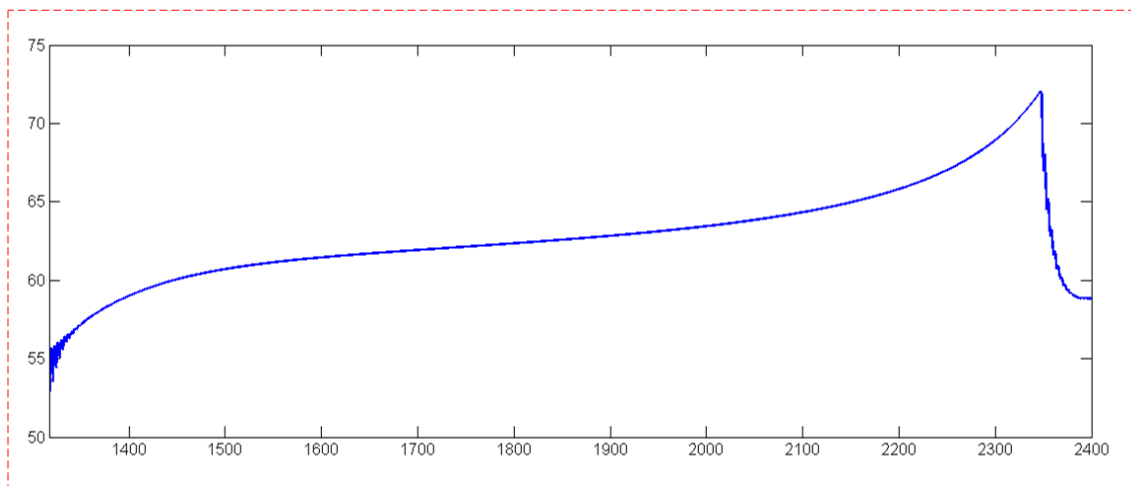


Figura 5.22. Detalle velocidad angular bloque motor, quinta simulación.

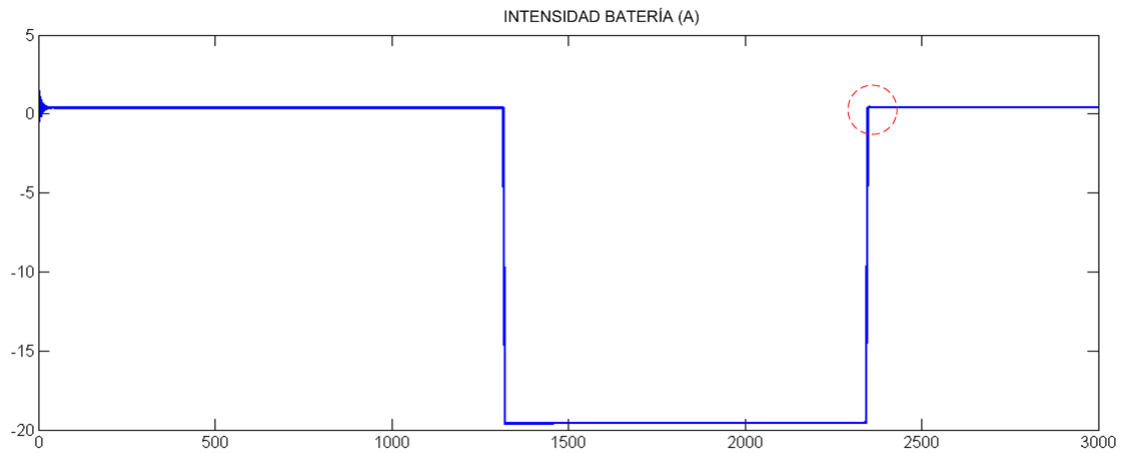


Figura 5.23. Curva intensidad de la batería (A), quinta simulación.

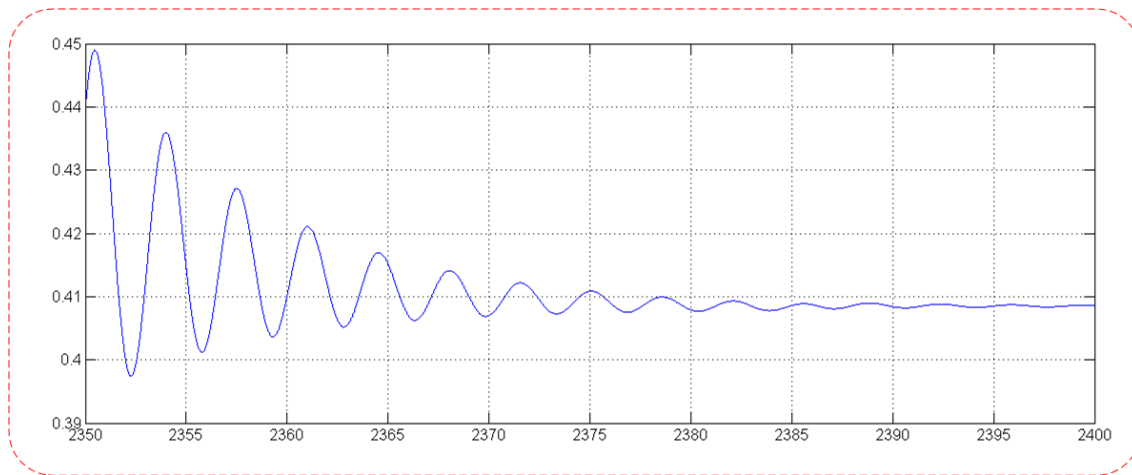


Figura 5.24. Detalle intensidad batería (A), quinta simulación.

5.6 SEXTA SIMULACIÓN.

Sistema de control de carga utilizando como elemento de carga el módulo fotovoltaico descrito en el apartado “3.3.2. Modelo de la célula fotovoltaica desarrollado en Matlab-Simulink usados en el proyecto.”

En esta simulación se muestra el esquema de bloques final en Matlab-Simulink del sistema de control de carga integrado al bloque motor y a la célula fotovoltaica ‘Pv module (V)’. De forma que se configura el esquema definitivo como culminación del proyecto.

Se explica el estado de carga (SOC%) para distintas potencias de radiación solar (w/m^2), además de el comportamiento del bloque motor cuando recibe potencia del panel fotovoltaico.

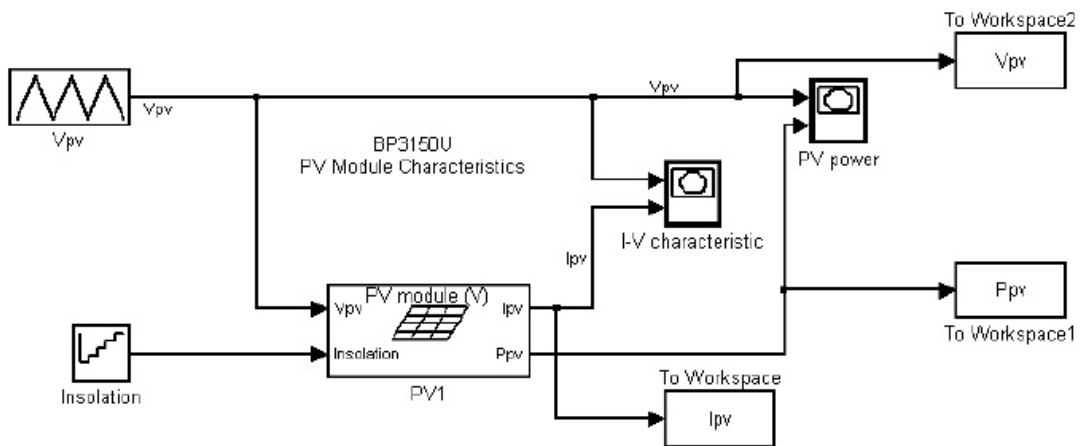


Figura 5.25. Bloque módulo fotovoltaico usado en la simulación final (Matlab-Simulink).

Para controlar la radiación (w/m^2) del panel fotovoltaico y la tensión, con el objetivo de controlar la intensidad que tenemos a la salida del módulo se usan los siguientes bloques:

- Repeating Sequence Stair.



Figura 5.26. Bloque ‘Repeating Sequence Stair’ librería ‘Simulink/Sources’ Matlab-Simulink.

Es un bloque que crea una señal escalonada con los valores que numéricos que elijamos dentro de un vector de cualquier dimensión. Seleccionando el tiempo que está activa la señal de cada escalon. Los parámetros que se muestran en la figura 5.27 ‘Vector of output values’ son los valores que se establecen como ejemplo de radiación solar en esta simulación. El tiempo que permanece cada valor será el que aparece en la casilla ‘Sample time’.

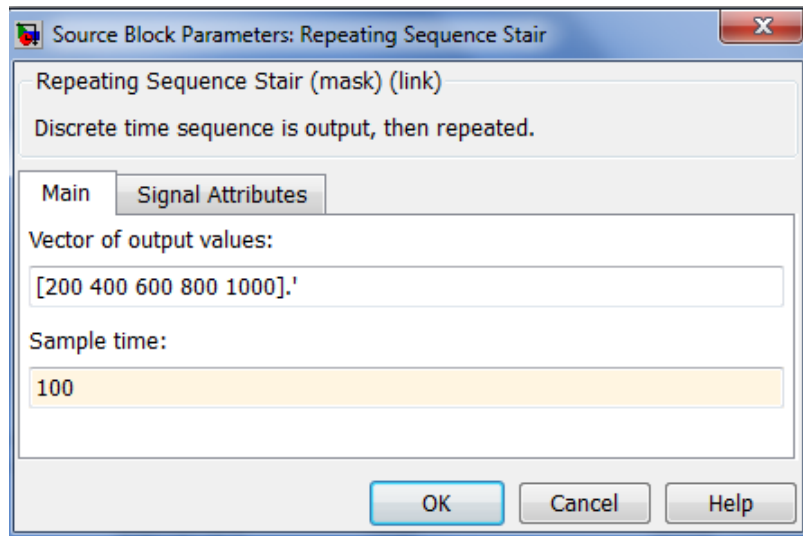


Figura 5.29. Parámetros establecidos en el bloque 'Repeating Sequence Stair', Matlab-Simulink.

- Repeating Table.

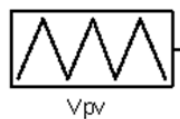


Figura 5.27. Bloque 'Repeating Table' librería 'Simulink/Sources' Matlab-Simulink.

Genera una secuencia de repetición de los números establecidos en una tabla tiempo-valor. Los valores de tiempo deben ser crecientes.

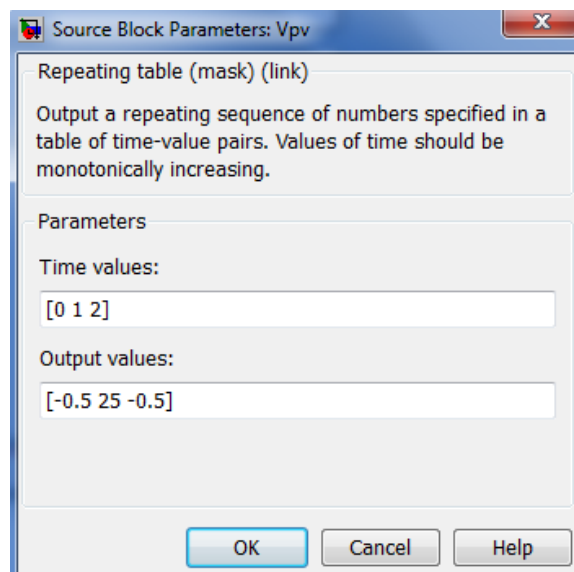


Figura 5.30. Parámetros establecidos en el bloque 'Repeating table', Matlab-Simulink.

En la figura 5.31, se observa el esquema de bloques en Matlab-Simulink, del control de carga desarrollado acoplado al bloque motor y al bloque panel fotovoltaico.

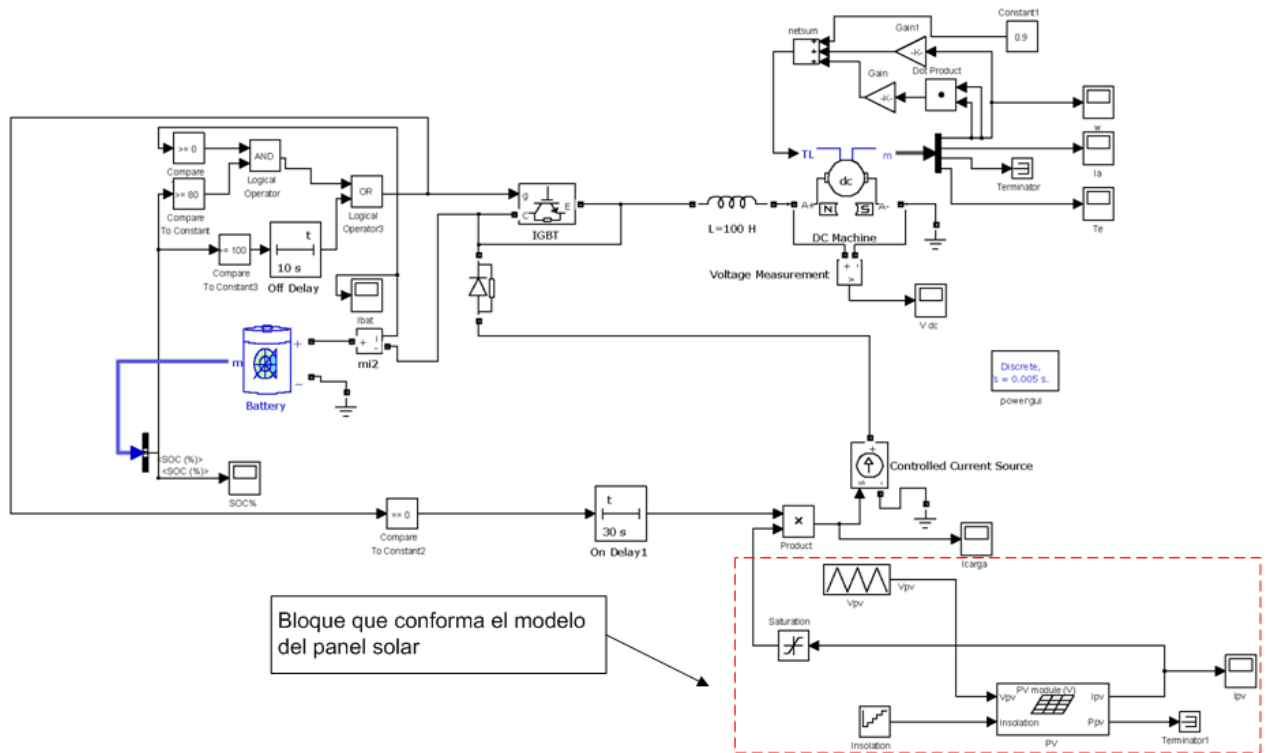


Figura 5.31. Esquema de bloques Matlab-Simulink, sexta simulación.

El tipo de variable que se utiliza en esta simulación es variable discreta con un paso por cero de 5×10^{-3} sg. El tiempo de simulación es de $T=1500$ sg. El estado de carga inicial será del 81% y limitaremos la descarga al 80%. El objetivo es observar el ciclo de carga de la batería.

En los siguientes gráficos mostraremos los resultados obtenidos en la sexta simulación para distintos valores de radiación 200 500 y 1000 w/m^2 respectivamente.

- Nivel de radiación de 200 w/m^2 obtenemos los siguientes valores.

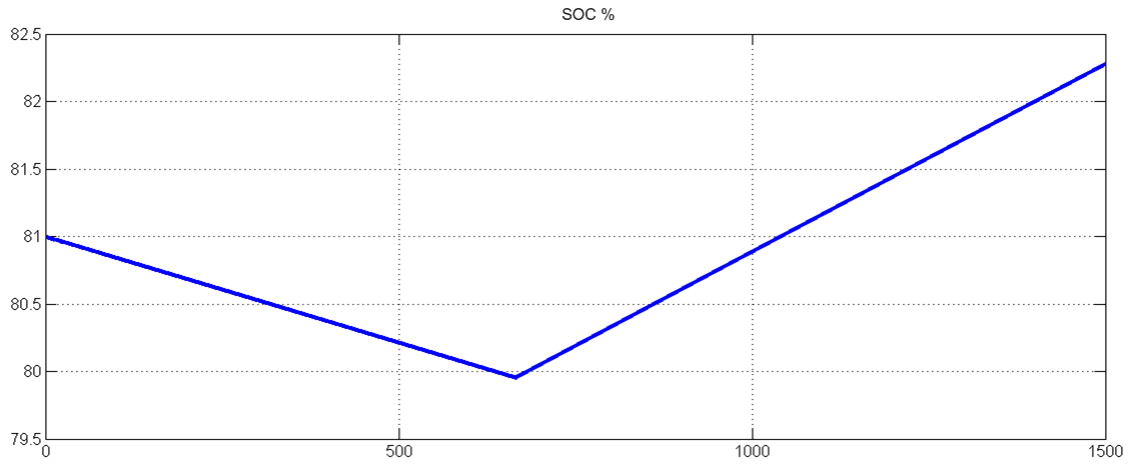


Figura 5.32. Estado de carga (%) para una radiación de 200 w/m^2 .

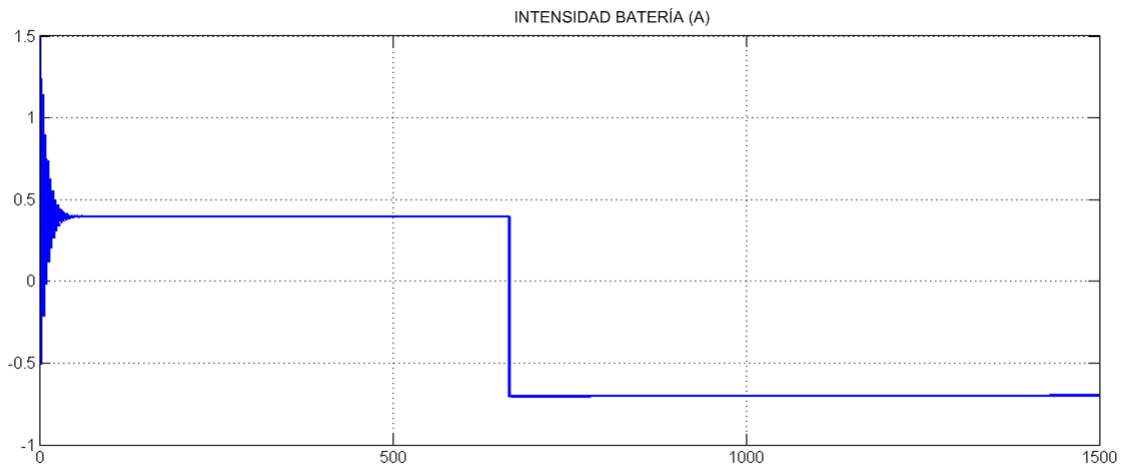


Figura 5.33. Intensidad de la batería (A) para una radiación de 200 w/m^2 .

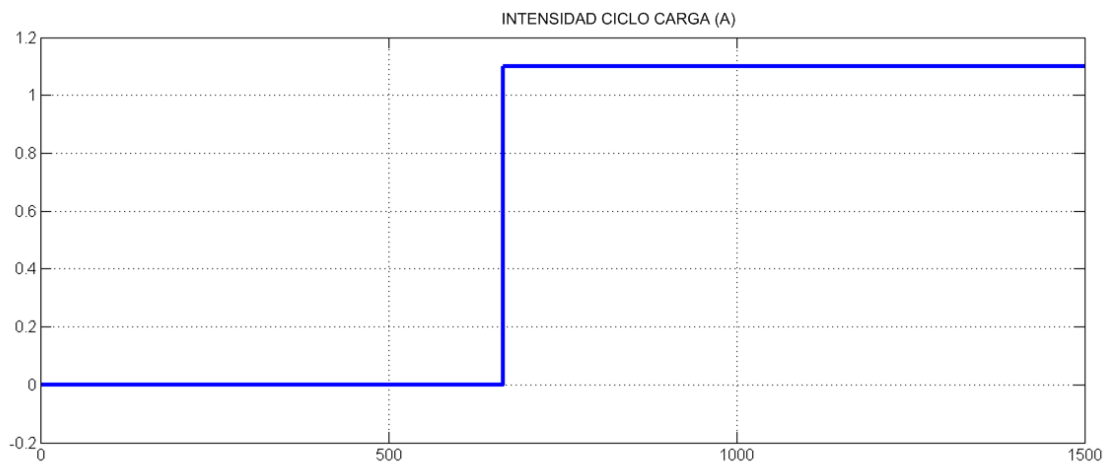


Figura 5.34. Intensidad ciclo de carga del bloque 'pv module' para una radiación de 200 w/m^2 .

- Nivel de radiación de 500 w/m^2 obtenemos los siguientes valores.

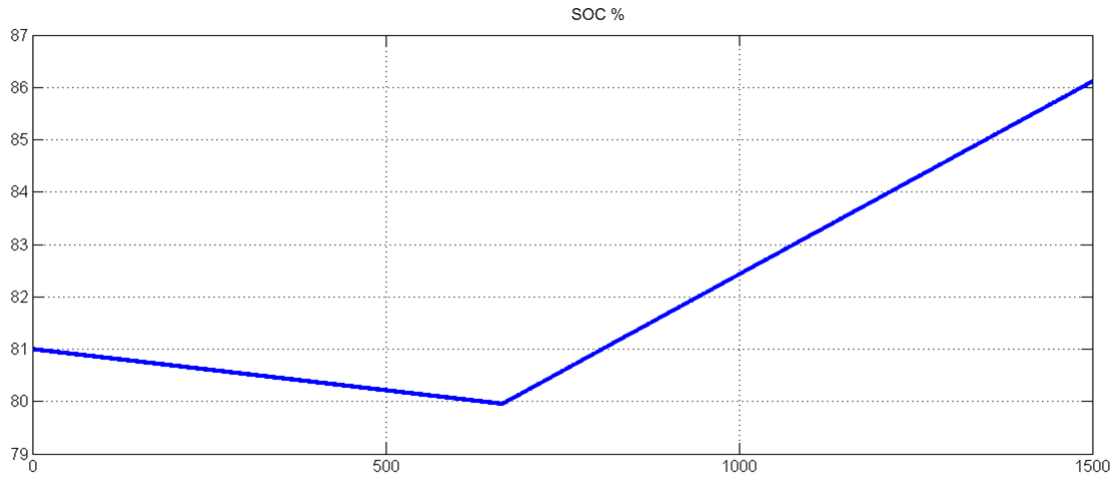


Figura 5.35. Estado de carga (%) para una radiación de 500 w/m^2 .

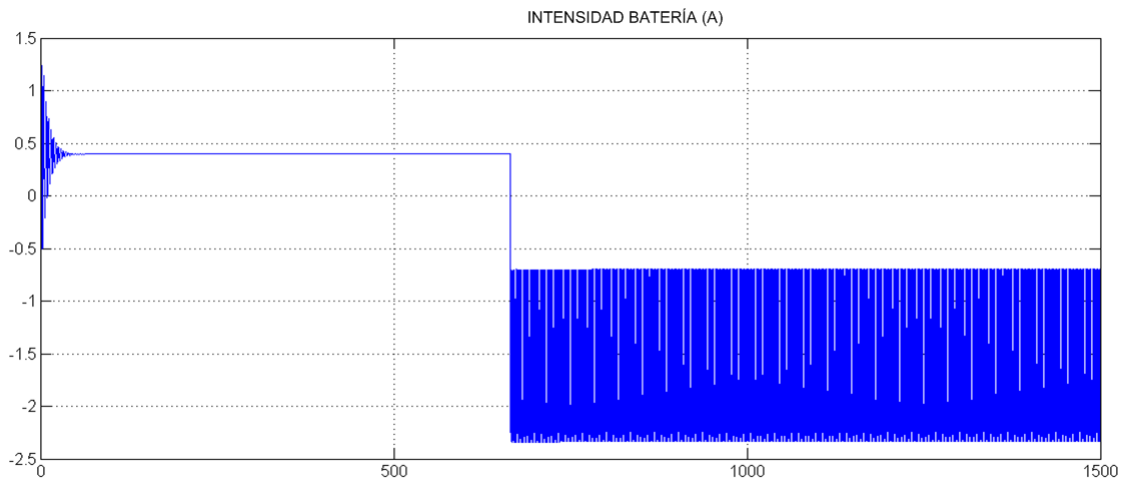


Figura 5.36. Intensidad de la batería (A) para una radiación de 500 w/m^2 .

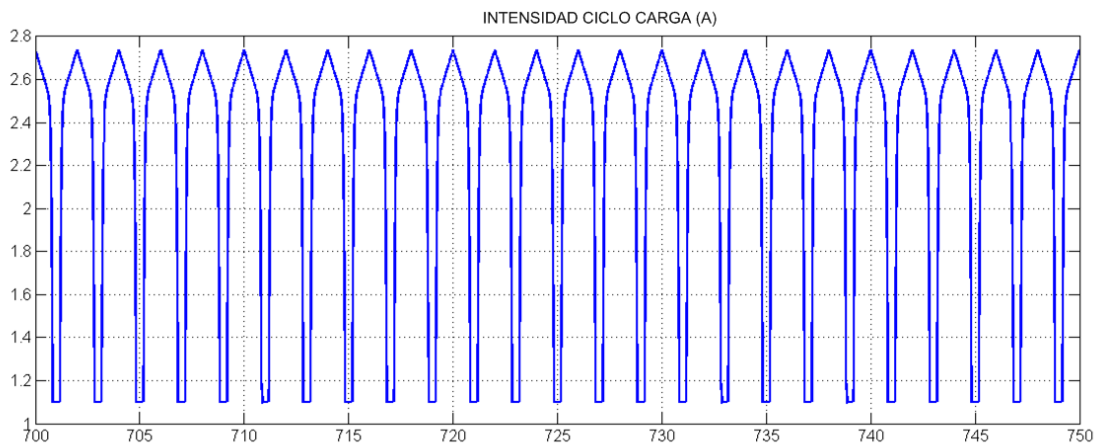


Figura 5.37. Intensidad ciclo de carga del bloque 'pv module' para una radiación de 500 w/m^2 .

- Nivel de radiación de 1000 w/m^2 obtenemos los siguientes valores.

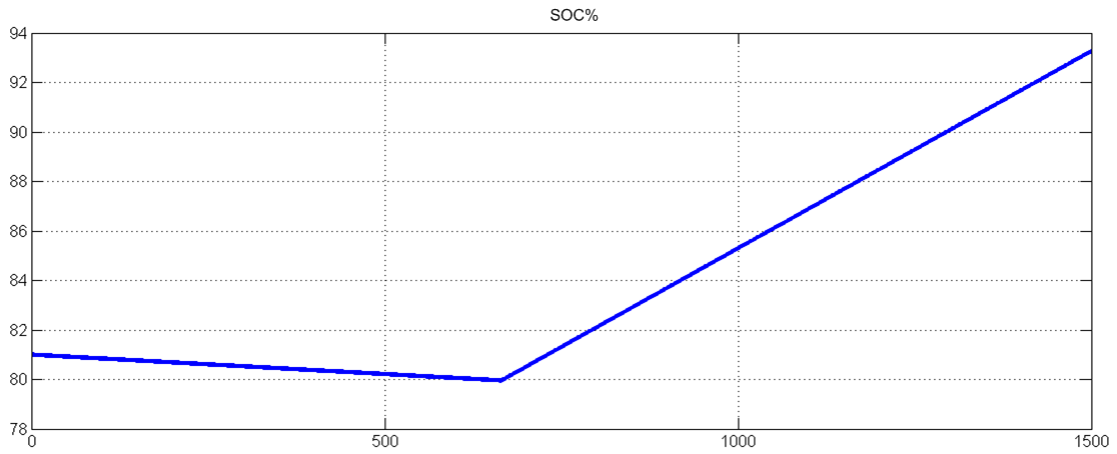


Figura 5.38. Estado de carga (%) para una radiación de 1000 w/m^2 .

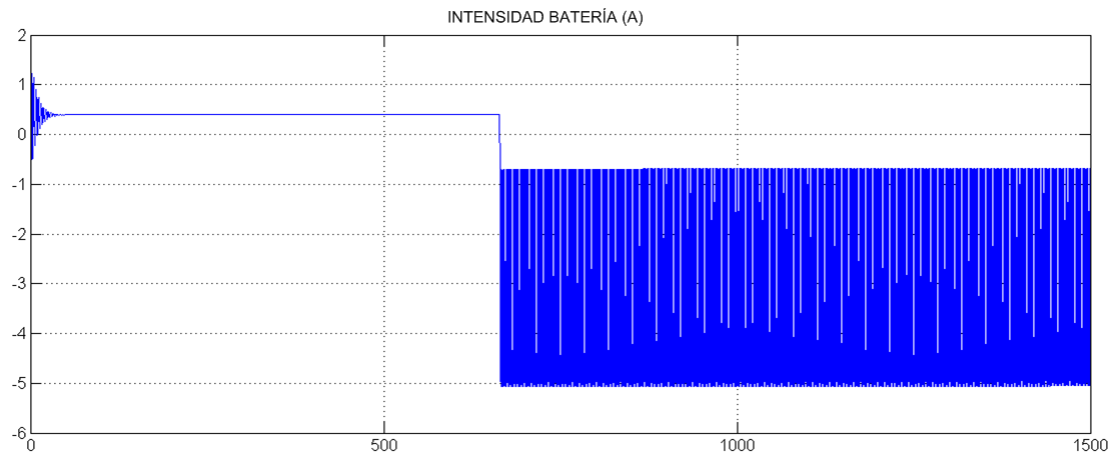


Figura 5.39. Intensidad de la batería (A) para una radiación de 1000 w/m^2 .

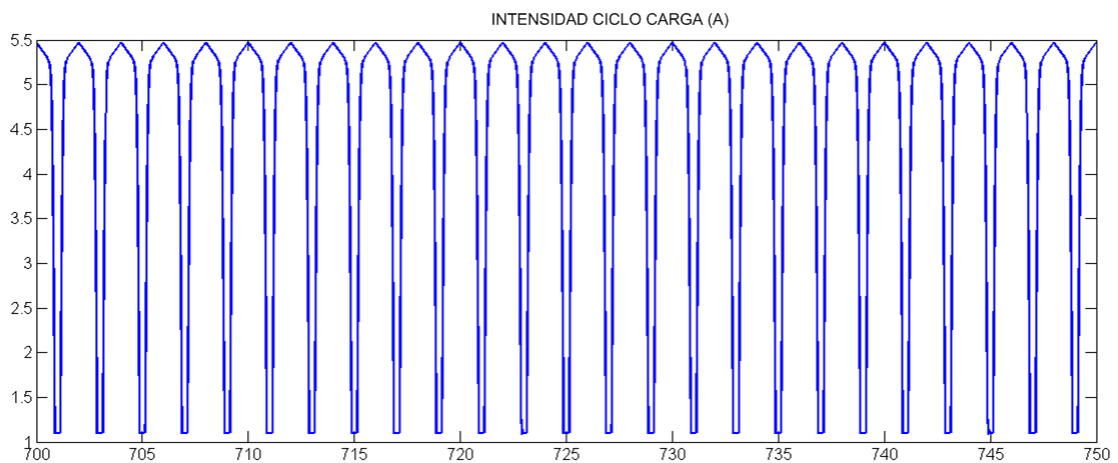


Figura 5.40. Intensidad ciclo de carga del bloque 'pv module' para una radiación de 1000 w/m^2 .

Se observa claramente que al aumentar la radiación, aumenta la intensidad que suministra el panel y con ello el estado de carga. Para un mismo $T=1500$ sg el estado de carga es mayor.

La onda de la señal observamos que tiene forma de pico, por esa razón se presentan discontinuidades en el ciclo de carga. Aplicando el bloque 'Saturation' de la biblioteca Simulink de Matlab-Simulink, conseguimos que no baje de 0 la intensidad de carga.

CAPÍTULO 6.

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LAS SIMULACIONES

6. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.

Este capítulo trata de analizar los resultados y comentar las conclusiones obtenidas de las simulaciones. Además exponer con detalle los resultados obtenidos en la sexta simulación, de la que se obtiene el modelo final. Las discontinuidades producidas en el tiempo y comportamiento del modelo ante la conexión del bloque panel fotovoltaico.

Se llevará a cabo el análisis de los modelos de control de carga, en el modelo final (sexta simulación), trataremos el bloque 'PV module (V)' Matlab-Simulink, con una radiación de 1000 w/m^2 , lo que producirá la intensidad máxima de carga en las simulacionesl.

6.1 Modelo de control de carga comparación intensidad de la batería.

En la figura 6.1 se puede observar la fluctuación de la intensidad en el segundo ciclo de descarga en la cuarta simulación.

En la cuarta simulación, el motor vuelve a activarse después de cargar la batería lo que provoca una fluctuación en la intensidad debida al par que tiene que superar en el arranque.

En la quinta simulación el bloque motor sigue activo durante la etapa de carga de la batería. En el ciclo de descarga el bloque motor funciona con la energía que produce la batería mientras que en el ciclo de carga, la fuente controlada de intensidad constante 20 A suministra el flujo de corriente necesario para cargar la batería y la corriente que necesita el bloque motor para seguir su funcionamiento. Si que se observa en la figura 6.2 una pequeña fluctuación en la etapa de carga, dado que la alimentación del motor pasa a ser por la fuente controlada de intensidad.

Para la sexta simulación, se han tomado los valores de radiación de 1000 w/m^2 , con los que obtendríamos una intensidad máxima.

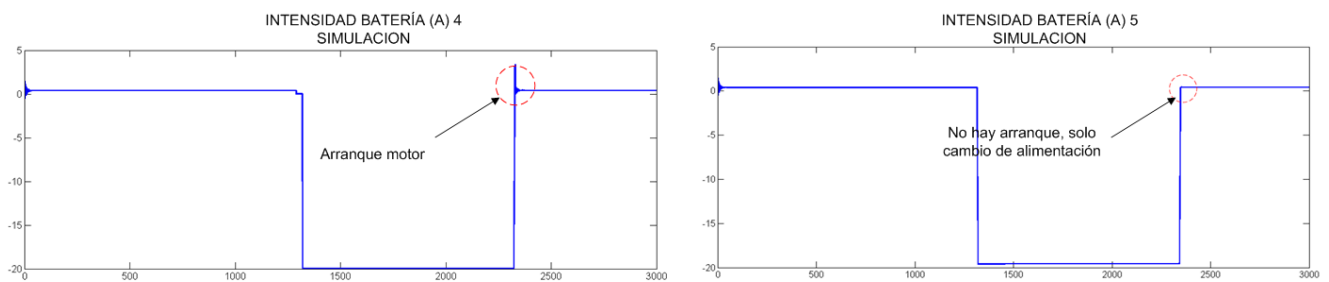


Figura 6.1. Curvas comparación intensidad batería (A) cuarta y quinta simulación.

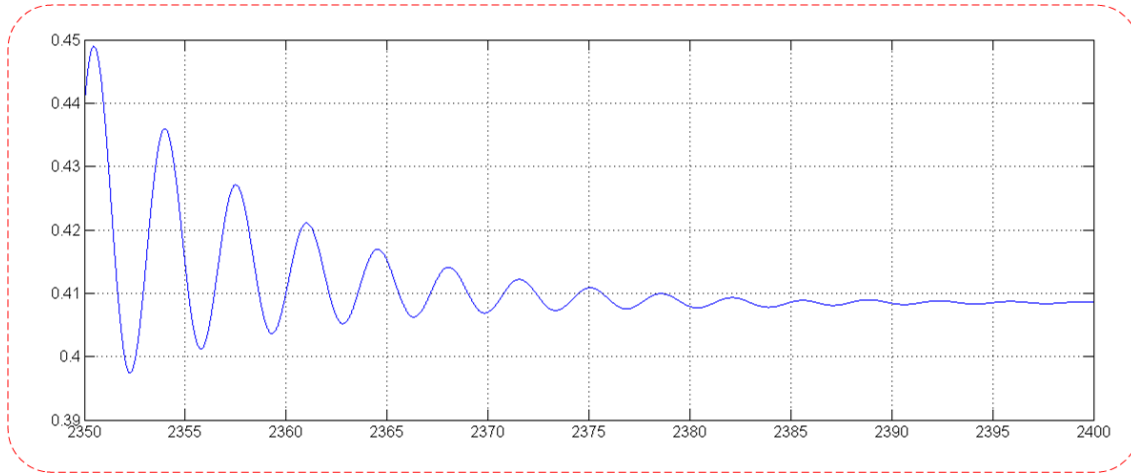


Figura 6.2. Detalle ciclo de carga quinta simulación.

En la sexta simulación se observa la discontinuidad producida por el funcionamiento del panel fotovoltaico en el ciclo de carga. Este funciona como una fuente de intensidad que varía en el tiempo creando una señal discontinua que se observa en la figura 6.4.

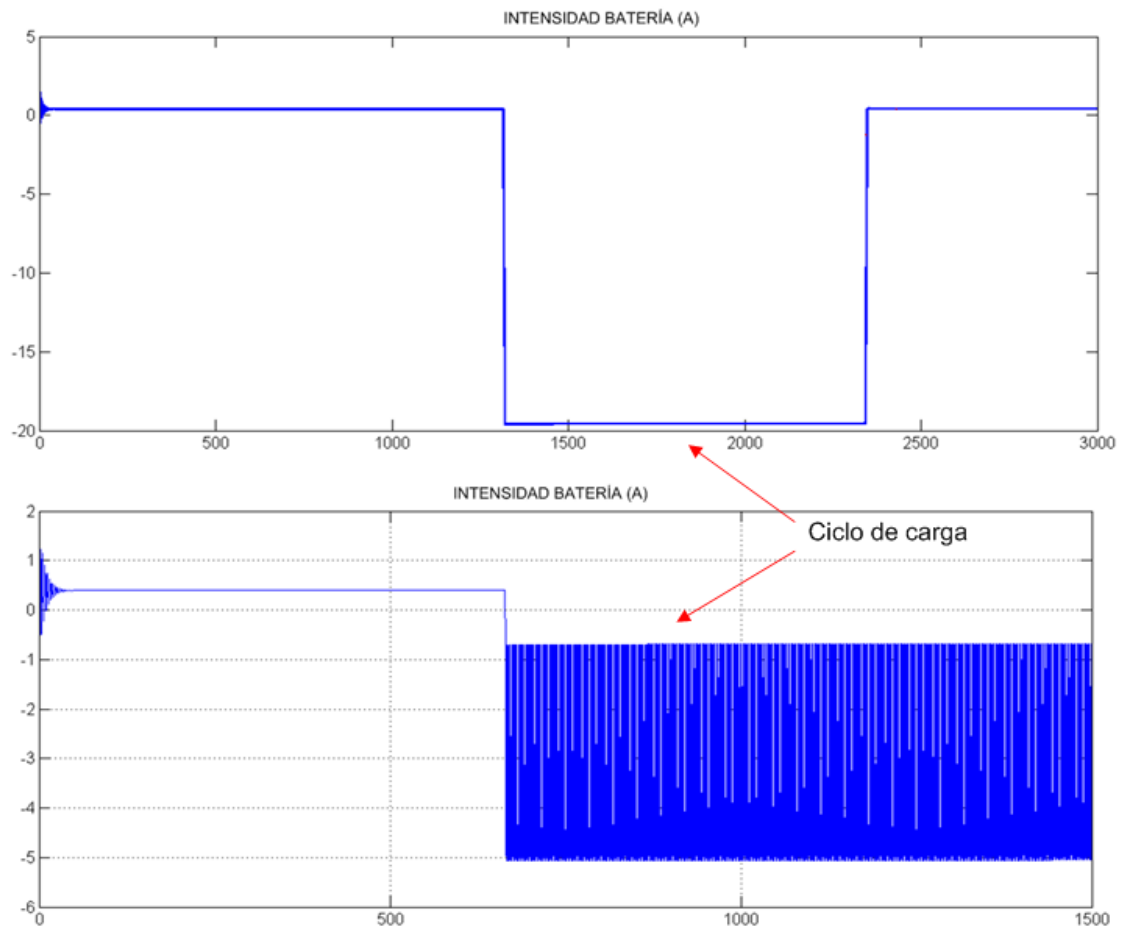


Figura 6.3. (Arriba) gráfica intensidad batería (A) quinta simulación, (abajo) gráfica intensidad batería (A) sexta simulación.

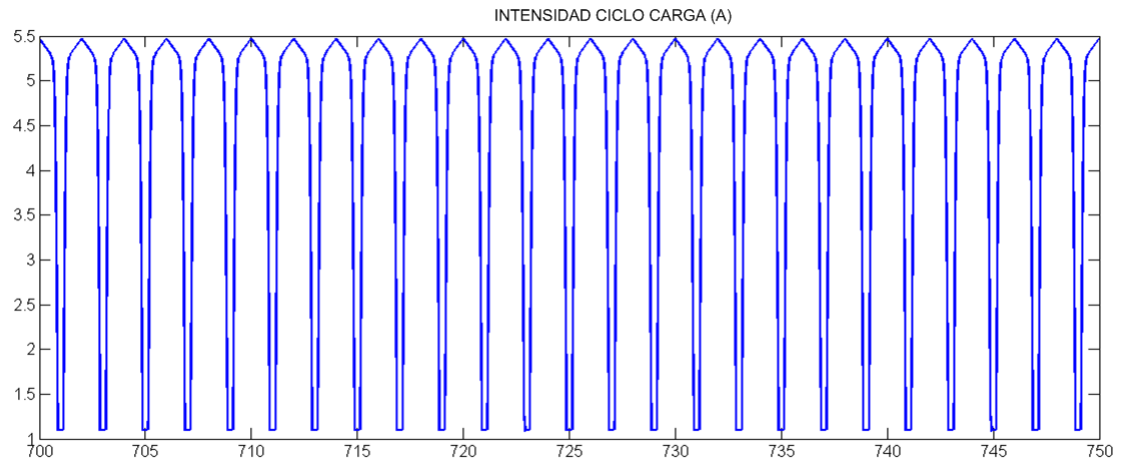


Figura 6.4. Intensidad ciclo de carga del bloque 'pv module' para una radiación de 1000 w/m^2 .

6.2 Modelo de control de carga comparación velocidad del bloque motor.

En este apartado, se exponen las curvas de velocidad, el comportamiento en (rad/s) del bloque motor. Frente a los modelos de control de carga en la cuarta, quinta y sexta simulación

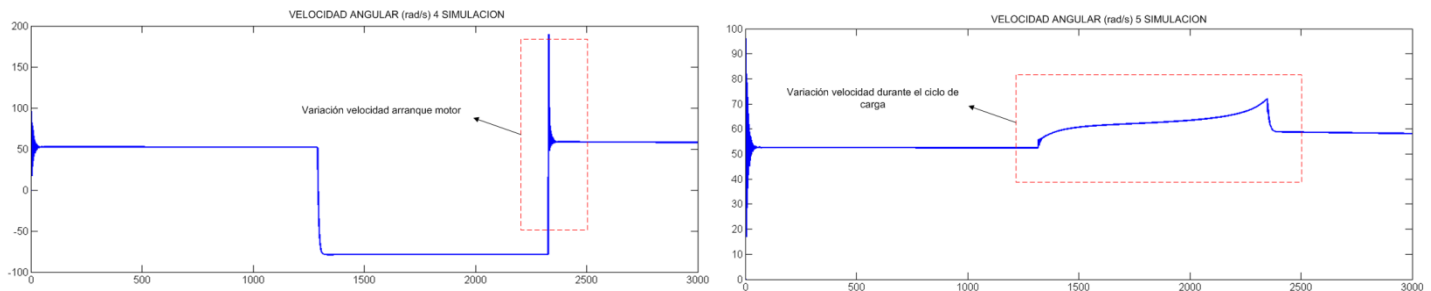


Figura 6.5. Curvas velocidad angular cuarta y quinta simulación.

En la cuarta simulación, el motor funciona como generador en la etapa de carga de la batería, por esa razón se observa una velocidad negativa. Al comenzar el segundo ciclo de descarga observamos una velocidad en el arranque mucho mayor, eso se explica por el cambio de estado en el que funciona como “generador”.

En la quinta simulación se observa como varía la velocidad en el ciclo de carga, donde está alimentado por la fuente controlada de intensidad a 20 A constante.

En la sexta simulación, sin embargo integramos el bloque del panel fotovoltaico y obtenemos, para una radiación de 1000 w/m^2 , en la zona de carga la curva de velocidad que aparece en la figura siguiente.

Observamos una discontinuidad en la velocidad, debida al bloque del panel fotovoltaico, la corriente que suministra es de forma discontinua, varía en el tiempo lo que genera esas discontinuidades en la velocidad.

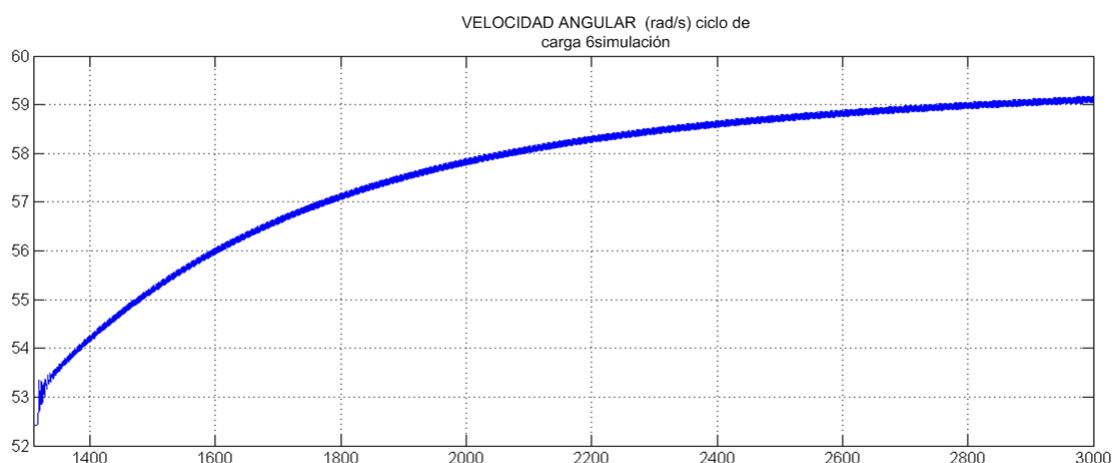


Figura 6.6. Curva velocidad angular, ciclo de carga, sexta simulación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. M. Shepherd, "Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge," *Journal of Electrochemical Society*, Volume 112, Jul. 1965, pp. 657-664
- [2] O.Tremblay, L.A. Dessaint, A.I. Dekkiche., "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles," *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007. VPPC 2007. IEEE 9-12 Sept. 2007, pp. 284-289'.
- [3] E. KARDEN,P. MAURACHER, F. SCHÖFE, "Electrochemical Modelling of Lead-Acid Batteries Under Operating Conditions of Electric Vehicle". *Journal of Power Sources*. Elsevier. 1997, vol. 64, p. 175-180.
- [4] L. THELE et al. "Hybrid Modelling of Lead-acid batteries in Frequency and Time Domain". *Journal of Power Sources*. Elsevier. 2005, vol. 144, p. 461-466.
- [5] Z. SALAMEH, CASACCA, M., LYNCH, W., "A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries". *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1992, vol. 7, num. 1, p. 93-98.
- [6] S. PILLER, PERRIN, M., JOSSEN, A. "Methods for State-of-charge Determination and its Applications". *Journal of Power Sources*. Elsevier. 2001, vol. 96, p. 113-120.
- [7] C. TSENG, et al. "Estimation of the State-of-charge of Lead-acid Batteries Used in Electric Scooters". *Journal of Power Sources*. Elsevier. 2005, vol. 147, p. 282-287.
- [8] E. KARDEN,et al. "A Frequency-domain Approach to Dynamical Modelling of Electrochemical Power Sources". *Electrochemical Acta*. 2001, vol. 47, p. 2347-2356.
- [9] A. DELAILLE, et al. "Study of the Coup de Fouet of Lead-acid Cells as a Function of their State-of-charge and State-of-Health". *Journal of Power Sources*. Elsevier. 2006, vol.158, p. 1019-1028.
- [10] National Semiconductor, *Characteristics of Rechargeable Batteries*
- [11] Dennis DeCoster. "A state of the art review of energy storage alternatives for mission critical UPS & CPS power systems" *Proceeding of 2005 – Power Quality Conference*. October 2005.