

Proyecto Fin de Máster  
Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

Automatización de una microrred con doble banco  
de baterías

Autor: Pedro Antonio Fernández Gómez

Tutor: Miguel Angel Ridao Carlini

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018





Proyecto Fin de Máster  
Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

# **Automatización de una microrred con doble banco de baterías**

Autor:

Pedro Antonio Fernández Gómez

Tutor:

Miguel Ángel Ridao Carlini

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Máster: Automatización de una microrred con doble banco de baterías

Autor: Pedro Antonio Fernández Gómez

Tutor: Miguel Ángel Ridaó Carlini

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis amigos*

*A mis compañeros*

*A mis profesores*



# Agradecimientos

---

A mis compañeros Juan Jose Márquez, Guillermo Teno, Sergio Navas y Alan Pino por su inestimable ayuda y el compañerismo transmitido en este tiempo.

A Miguel Angel Ridao y Carlos Bordons por su ayuda, y por la confianza depositada en mi para llevar a cabo el proyecto en este grupo.

A mi familia sevillana por la estimulación constante en mejorar.

*Pedro Antonio Fernández Gómez*

*Ingeniero Electronico Industrial*

*Sevilla, 2018*



# Resumen

---

En este trabajo fin de master se presenta la integración de una batería de Ion-Litio en una microrred. Para ello se desarrolla un programa de control para la integración en PLC y un SCADA del mapa de comunicaciones del convertidor de las baterías de Ion-Litio. El control estará basado en la potencia, para así poder modificarla en función de la necesidad del sistema. Se realizará la caracterización de las baterías para su integración en el modelo y MPC del sistema, tanto para pruebas en simulación como experimentales.



# Abstract

---

In this master's thesis, presented the integration of an Ion-Lithium battery in a micro-grid. To make this possible, is developed a control program for PLC integration and a program SCADA of communications map for the lithium-ion battery converter. The control will be based on the power, so that it can be modified depending on the need of the system. The characterization of the batteries for their integration is performed in the model and MPC of the system, both for testing simulation and experimental tests.

Agradecimientos .....	ix
Resumen .....	xi
Abstract.....	xiii
Índice .....	xiv
Índice de Tablas.....	xvii
Índice de Figuras .....	xix
Notación.....	xxi
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>23</b>
1.1 Descripción general.....	24
1.2 Objetivos .....	24
<b>2 Descripción del sistema .....</b>	<b>25</b>
2.1 Instalación Hylab .....	25
2.2 Descripción de componentes del sistema Hylab (Hardware).....	26
2.2.1 Fuente de energía renovable y demanda eléctrica .....	26
2.2.2 Electrolizador AEM .....	27
2.2.3 Pila de combustible .....	27
2.2.4 Hidruros Metálicos .....	27
2.2.5 Baterías de Plomo-ácido .....	27
2.2.6 PLC.....	28
2.2.7 Baterías de Ion-Litio .....	28
2.2.8 Convertidor DC/DC.....	29
2.3 Software .....	30
2.3.1 Matlab/Simulink .....	30
2.3.2 Unity Pro XL.....	30
2.3.3 Vijeo Citect SCADA .....	31
2.4 Control Predictivo basado en modelo (MPC).....	31
2.4.1 Formulación del Control Predictivo .....	32
2.4.1.1 Estrategia deslizante .....	32
2.4.1.2 Modelo de predicción .....	33
2.4.1.3 Función de coste o función objetivo .....	34
2.4.1.4 Restricciones.....	34
<b>3 Automatización del convertidor con Unity PRO-XL .....</b>	<b>35</b>
3.1 Características del sistema .....	36
3.2 Bus PLC, variables del Sistema y comunicación vía Ethernet .....	40
3.3 Programa .....	44
<b>4 Scada del convertidor con Vijeo Citect .....</b>	<b>51</b>
4.1 Diseño del SCADA .....	51
4.2 Implementación del SCADA .....	53

<b>5</b>	<b>Caracterización y modelado.....</b>	<b>55</b>
5.1	<i>Caracterización de componentes .....</i>	55
5.1.1	Caracterización de las baterías de Ion-Litio .....	55
5.1.2	Caracterización pila de combustible Nexa 1.2 kW .....	57
5.1.3	Caracterización del electrolizador AEM 2.3 kW .....	58
5.2	<i>Modelado de los componentes.....</i>	58
5.2.1	Modelado de las baterías de Ion-Litio.....	58
5.2.1.1	Validación experimental del modelo de baterías.....	60
5.2.1.2	Simulaciones del modelo de baterías .....	61
5.2.2	Modelado de pila de combustible.....	62
5.2.2.1	Validación del modelo de pila de combustible.....	64
5.2.2.2	Simulaciones del modelo de pila de combustible .....	65
5.2.3	Modelado de electrolizador AEM.....	66
5.2.3.1	Validación del modelo del electrolizador.....	68
5.2.3.2	Simulaciones del modelo del electrolizador .....	69
<b>6</b>	<b>Integración de las baterías de Ion-Litio en la microrred Hylab .....</b>	<b>71</b>
6.1	<i>Descripción del control MPC .....</i>	71
6.1.1	Modelo del MPC .....	71
6.1.2	Restricciones del controlador .....	72
6.1.3	Función de coste .....	73
6.2	<i>Resultados del controlador MPC en simulación .....</i>	73
6.2.1	MPC simulación escenario día soleado.....	74
6.2.2	MPC simulación escenario día nublado .....	76
6.2.3	MPC simulación escenario día con viento .....	78
<b>7</b>	<b>Conclusiones y futuros trabajos.....</b>	<b>81</b>
7.1	<i>Conclusiones integración en la microrred .....</i>	81
7.2	<i>Futuras líneas de investigación.....</i>	81
	<b>Referencias .....</b>	<b>83</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Mapa de comunicaciones Modbus.	37
Tabla 2. Register code.	37
Tabla 3. Funcionamiento máquina de estados.	38
Tabla 4. Leyenda mapa de registros Modbus.	40
Tabla 5. Variables Unity Pro-XL (1).	41
Tabla 6. Variables Unity Pro-XL (2).	42
Tabla 7. Tabla de animación de Unity Pro-XL.	50
Tabla 8. Parámetros del modelo de baterías Ion-Litio.	59
Tabla 9. Modelado baterías Ion-Litio.	61
Tabla 10. Parámetros del modelo de pila de combustible.	63
Tabla 11. Puntos de corriente y tensión escogidos de la curva de polarización experimental.	64
Tabla 12. Parámetros obtenidos de xi.	64
Tabla 13. Modelado Pila de combustible y Electrolizador.	65
Tabla 14. Parámetros del modelo del electrolizador.	67
Tabla 15. Pesos de la función de costes para el diseño del controlador MPC.	73



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2.1. Esquema conexión microrred Hylab.	26
Figura 2.2. Esquema de una batería de Ion-Litio.	29
Figura 2.3. Esquema convertidor DC/DC.	29
Figura 2.4. Predicción con horizonte $N=N_2-N_1$ .	32
Figura 2.5. Estructura básica del MPC.	33
Figura 3.1. Bloque de baterías de Ion-Litio instaladas en la microrred.	35
Figura 3.2. Convertidor DC/DC instalado en la microrred.	35
Figura 3.3. Máquina de estados del convertidor DC/DC.	38
Figura 3.4. Módulos PLC instalados.	40
Figura 3.5. Configuración en Unity Pro-XL, conexión de red.	43
Figura 3.6. Configuración Unity Pro-XL, conexión Ethernet con el convertidor.	43
Figura 3.7. Lectura Registros del PLC.	44
Figura 3.8. Bloques de acondicionamiento de las variables del PLC.	45
Figura 3.9. Bloques de escritura de las variables del convertidor en el PLC.	46
Figura 3.10. Bloques para Flag de estado del convertidor DC/DC.	47
Figura 3.11. Bloques para flag de protecciones del convertidor DC/DC.	48
Figura 3.12. Bloques para flag de errores del convertidor DC/DC.	49
Figura 4.1. Configuración OFS Configuration Tool.	51
Figura 4.2. Servidor OPC.	52
Figura 4.3. Tag de variables importadas.	52
Figura 4.4. Página del convertidor DC/DC – Baterías Ion-Litio.	53
Figura 5.1. Test dinámico de carga y descarga de la batería de Ion-Litio.	56
Figura 5.2. Curva de polarización pila de combustible.	57
Figura 5.3. Curva de polarización del electrolizador.	58
Figura 5.4. Test de validación de la batería de Ion-Litio.	60
Figura 5.5. Validación pila de combustible.	64
Figura 5.6. Validación del electrolizador AEM.	68
Figura 5.7. Validación Curva I-P del electrolizador.	69
Figura 6.1. Potencias microrred con baterías Ion-Litio para día soleado con control MPC.	74
Figura 6.2. Potencias microrred sin baterías Ion-Litio para día soleado con control MPC.	74
Figura 6.3. Nivel de carga con baterías Ion-Litio para día soleado con control MPC.	75
Figura 6.4. Nivel de carga sin baterías Ion-Litio para día soleado con control MPC.	75

Figura 6.5. Potencias microrred con baterías Ion-Litio para día nublado con control MPC.	76
Figura 6.6. Potencias microrred sin baterías Ion-Litio para día nublado con control MPC.	76
Figura 6.7. Nivel de carga con baterías Ion-Litio para día nublado con control MPC.	77
Figura 6.8. Nivel de carga sin baterías Ion-Litio para día nublado con control MPC.	77
Figura 6.9. Potencias microrred con baterías Ion-Litio para día con viento con control MPC.	78
Figura 6.10. Potencias microrred sin baterías Ion-Litio para día con viento con control MPC.	78
Figura 6.11. Nivel de carga con baterías Ion-Litio para día con viento con control MPC.	79
Figura 6.12. Nivel de carga sin baterías Ion-Litio para día con viento con control MPC.	79

# Notación

---

A	Amperios
V	Voltios
I	Corriente
V	Tensión
MPC	Model Predictive Control
cm	centímetros
TFM	Trabajo fin de master
sen	Función seno
:	Tal que
W	Vatios
kg	Kilogramos
PLC	Programmable Logical Control
HMI	Human Machine Interface
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
RTU	Remote Terminal Units
DCS	Distributed Control System
OPC	OLE for Process Control
CPU	Control Processing Unit
AEM	Alkaline Membrane Electrolysis
SOC	State of Charge
LOH	Level Output Hydrogen
Ah	Amperios por hora
K	Kelvin



# 1 INTRODUCCIÓN

---

**E**L trabajo se enmarca en el proyecto “Almacenamiento y gestión de energías renovables en aplicaciones comerciales y residenciales, 0076\_AGERAR\_6\_6” desarrollado por el Grupo de Automática y Robótica Industrial del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática en colaboración con el Grupo de Termotecnia del departamento de Ingeniería Energética de la Universidad de Sevilla.

AGERAR tiene el objetivo general de desarrollar y evaluar soluciones técnicas para promover la eficiencia energética y criterios de sostenibilidad en microrredes comerciales y residenciales, incrementando el uso y mejorando la gestión de energías renovables en estas aplicaciones gracias a innovadores sistemas de almacenamiento de energía y a la utilización de tecnologías de la información y comunicación. Este objetivo general se alcanzará mediante la puesta en común del conocimiento e instalaciones experimentales con las que cuentan los socios del proyecto, concretándose en acciones específicas de I+D que se desarrollarán durante el mismo.

La demostración de estas soluciones ofrecerá información fiable a los entes regionales responsables de las políticas energéticas para la elaboración de estrategias y planes de acción relacionados con la eficiencia energética, la edificación sostenible, las energías renovables y el almacenamiento de energía. Productos concretos serán informes sobre prestaciones de tecnologías en aplicaciones comerciales y residenciales, recomendaciones de uso y mejores tecnologías disponibles para la definición por las autoridades públicas de políticas regionales, estrategias y planes de acción relacionados con la eficiencia energética, la edificación sostenible, el almacenamiento de energía y las energías renovables, herramientas de diseño y evaluación, etc.

Disponemos de una microrred (HYLAB) de integración de energías renovables con diferentes tipos de almacenamiento de energía. El funcionamiento de dicha microrred es el siguiente:

Se dispone de una fuente programable que proporciona energía eléctrica en forma de corriente continua, esta es simulada ya que es producida por un panel fotovoltaico. En los momentos en los que se produce mayor energía de la demandada, se utilizará para cargar el sistema de baterías (baterías de plomo ácido y las nuevas baterías de Ion-Litio), excepto cuando éstas estén muy cargadas y/o la corriente enviada hacia ellas sea superior a sus límites, entonces el control derivará este excedente de energía al electrolizador que producirá hidrogeno para su almacenamiento. Cuando nos encontramos que la demanda es superior a la producción, el déficit de energía será suplido por las baterías, excepto cuando las baterías estén muy descargadas y/o la corriente desde las baterías supere los límites admisibles, entonces el hidrogeno almacenado pasará a transformarse en electricidad mediante una pila de combustible.

La microrred objeto de estudio teóricamente está conectada a la red de distribución de la compañía, el control ordena el uso del hidrogeno almacenado previamente para transformarlo en energía eléctrica cuando se encuentre en las franjas horarias de mayor demanda, es decir, que la electricidad se pague a mayor precio.

En este capítulo se realiza una descripción del problema objeto de estudio y del propósito a alcanzar. Se describe la estrategia utilizada para la consecución de los objetivos.

## 1.1 Descripción general

Se desea realizar la integración de unas baterías de Ion-Litio en sistemas híbridos de energía. Dicha integración se realiza dentro de la microrred HYLAB. Para ello es necesario el desarrollo de un sistema de control y supervisión en tiempo real.

El principal objetivo del presente estudio es la integración de las baterías de Ion-Litio en una microrred junto con las baterías de plomo ácido ya conectadas a la microrred. Para ello se ha utilizado un convertidor DC/DC bidireccional de 3KW, que cumple con las funciones de elevador reductor en ambos sentidos. Este equipo está preparado para aportar o requerir potencia a un sistema de almacenamiento, en este caso a las baterías de Ion-Litio, a través de la conexión con un bus de continua según las consignas recibidas a través de las comunicaciones Modbus.

## 1.2 Objetivos

Desarrollo e integración de un programa que nos permita operar las baterías de Ion-Litio a través del PLC y SCADA del mapa de comunicaciones del convertidor de baterías de Ion-Litio.

- Desarrollo del mapa de comunicaciones del convertidor DC/DC
- Integración del mapa de comunicaciones en el PLC de la microrred
- Integración de las nuevas variables del convertidor DC/DC en el SCADA
- Realización de pruebas de conjunto

Actualización del simulador de microrred y realización del control predictivo.

- Modelado de las baterías de Ion-Litio
- Simulación y evaluación de modos de operación de las baterías de Ion-Litio
- Diseño y validación experimental de un Control predictivo basado en Modelo

La estrategia seguida para conseguir los objetivos de integración de las baterías de Ion-Litio y el simulador de la microrred se expone a continuación.

- En el segundo capítulo se realiza una descripción del sistema y de la materia objeto de estudio.
- En el tercer capítulo se realiza la programación del convertidor DC/DC junto con su mapa de comunicaciones y la integración en el PLC de la microrred.
- En el cuarto capítulo se realiza la integración de las nuevas variables del convertidor DC/DC en el SCADA para poder realizar las pruebas en el laboratorio.
- En el quinto capítulo se realiza la caracterización del estado actual de las baterías de Ion-Litio, a través del convertidor DC/DC implementado en el PLC y con la ayuda del sistema de supervisión en el SCADA para así poder realizar los ensayos reales en el laboratorio. Así como la caracterización y el modelo de la nueva pila de combustible y el nuevo electrolizador.
- En el sexto capítulo se integra las baterías de Ion-Litio en el simulador de la microrred y se realiza el control predictivo basado en modelos, con la actualización de los componentes de la pila de combustible y del electrolizador. Y se exponen los resultados obtenidos en simulación.
- En el séptimo capítulo se exponen a las conclusiones llegadas y las posibles futuras líneas de investigación.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

---

**S**e presenta en la primera parte del capítulo la instalación experimental HYLAB: Microrred de energía renovable con almacenamiento basado en hidrógeno, así como del hardware y software utilizado para la comunicación entre los componentes de la microrred.

Dentro del apartado de hardware se introduce la importancia de la integración de las baterías de Ion-Litio y el convertidor DC/DC en la microrred.

Por último, se presenta la estrategia de control seguida en la microrred para simulación y experimentación.

### 2.1 Instalación Hylab

El sistema Hylab es una instalación experimental con una estructura modular con el objetivo de alcanzar un alto grado de flexibilidad con relación a las topologías de sistemas y componentes que pueden ser investigados. El diseño permite futuras ampliaciones de componentes para distintos rangos de potencia, ensayar distintas configuraciones y modos de operación. Así mismo permite ensayar individualmente equipos o el funcionamiento de la planta al completo.

Actualmente, el sistema incluye una fuente electrónica programable para emular diversas fuentes de energías renovables, un electrolizador tipo AEM (Alkaline Membrane Electrolysis) para la producción de hidrógeno, un depósito de hidrógeno basado en hidruros metálicos, un banco de baterías de plomo ácido, una pila de combustible tipo PEM y finalmente una carga electrónica para emular diferentes condiciones de demanda.

Esta microrred puede funcionar de la siguiente manera: la fuente electrónica de 6 kW puede emular la potencia generada por diversos tipos de fuentes renovables. El exceso de energía procedente de la fuente renovable puede ser almacenado mediante las baterías (plomo ácido o Ion-Litio) o mediante la producción de hidrógeno a través del proceso de electrólisis. El hidrógeno producido en este proceso se almacena en el tanque de hidruros metálicos. Finalmente, la pila de combustible hace uso del hidrógeno cuando es necesario suplir la demanda por ausencia de generación de potencia de la fuente renovable.

La figura 2.1 muestra el esquema del sistema eléctrico de la instalación de la microrred. Todos los equipos se encuentran conectados a través de un bus de corriente en CC, cuyo voltaje es mantenido por el banco de baterías de plomo ácido (conectadas directamente) a alrededor de 48 V.

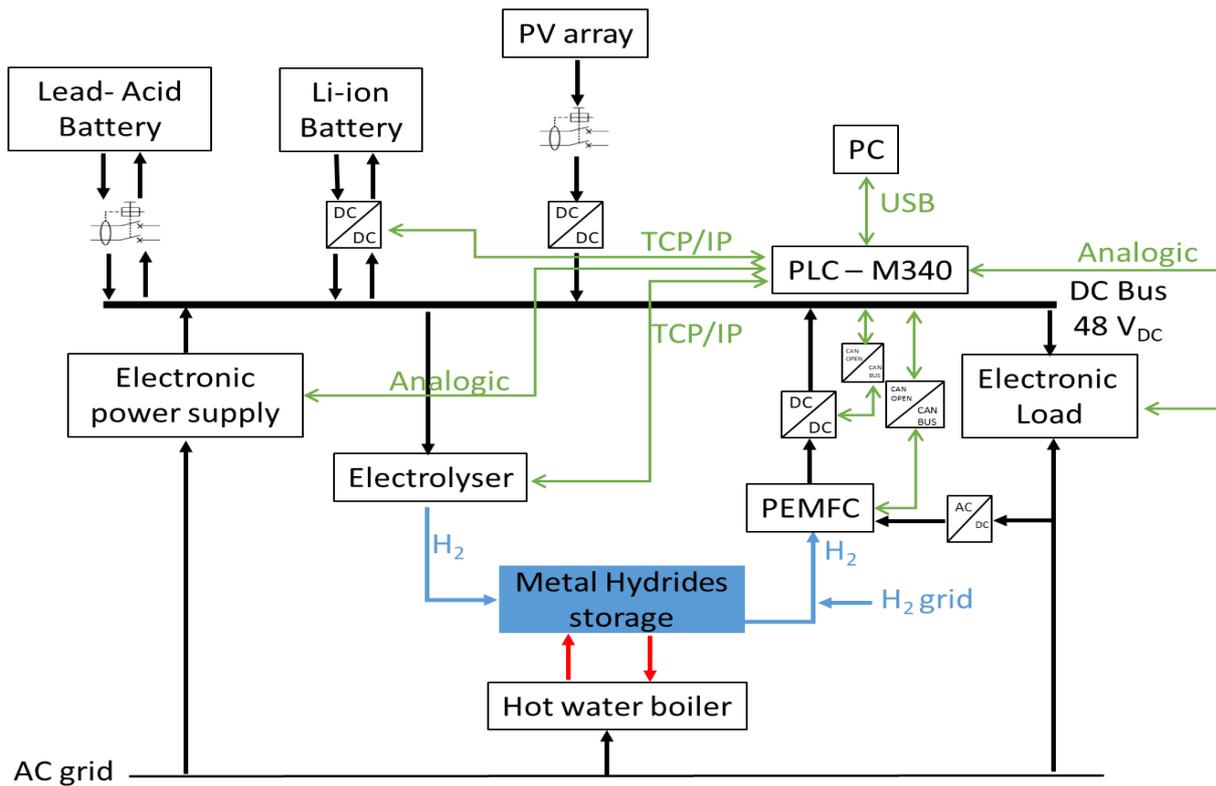


Figura 2.1. Esquema conexión microrred Hylab.

Todo el sistema es gestionado por un PLC que recibe todas las señales de los sensores y gestiona la actuación de las electroválvulas y set-points de los equipos. Para ello, se dispone de un sistema de comunicaciones basado en CANOpen. El bus CAN permite controlar la pila de combustible el convertidor de potencia. Los elementos restantes se comunican con el PLC central mediante comunicación OPC (Ole Process Control). Los servidores son capaces de leer y escribir variables en el PLC de la planta y servir la información relevante a través de la aplicación cliente, en nuestro caso un sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition).

## 2.2 Descripción de componentes del sistema Hylab (Hardware)

### 2.2.1 Fuente de energía renovable y demanda eléctrica

La fuente de energía renovable es emulada mediante una fuente electrónica programable. Permite emular cualquier fuente renovable sin pérdida alguna de realismo en las pruebas. No se utiliza aun el panel fotovoltaico debido a que no se ha llevado a cabo la integración en la microrred. Del mismo modo, se dispone de una carga electrónica para emular diferentes condiciones de la demanda y añadir flexibilidad al sistema. Así, se pueden emular diferentes perfiles de consumo de una vivienda, de la red eléctrica o de cualquier carga que se desee. Tanto fuente electrónica como carga son controladas por control analógico desde el PLC.

El equipo de la fuente electrónica programable es del fabricante POWERBOX con una capacidad nominal de 6 kW. En el caso de la carga electrónica programable pertenece al fabricante AMREL con una potencia máxima de 2.5 kW.

### 2.2.2 Electrolizador AEM

El generador de hidrogeno ELS500 produce hidrogeno de pureza 99,999 % por medio de la electrolisis del agua. El elemento de núcleo del dispositivo es el stack electrolítico AES500 que permite la producción de hidrógeno puro el cual puede utilizarse directamente para aplicaciones de pilas de combustible o para almacenamiento de energía doméstica. La membrana de intercambio aniónico (AEM), genera una barrera física entre el hidrógeno y el oxígeno de tal forma que ambos nunca podrán mezclarse para generar una explosión. Dicha membrana no es permeable por iones metálicos y se puede utilizar agua desmineralizada. El electrolizador será el encargado de producir hidrogeno para distintos rangos de potencia.

El electrolizador es del fabricante Heliocentris y puede llegar a producir  $1\text{m}^3$  entorno a 4 kW.

### 2.2.3 Pila de combustible

Una pila de combustible es un dispositivo capaz de generar electricidad a partir de un compuesto químico (combustible). Dicho compuesto sufre una reacción electroquímica, que se aprovecha para redirigir una corriente de electrones generada, a través de un circuito. El combustible es oxidado en un lugar físico diferente (ánodo) de donde se reduce el comburente (cátodo) (DoE, 2000).

La pila de combustible instalada en el Hylab es de Heliocentris, con una capacidad nominal de 1.2 kW.

### 2.2.4 Hidruros Metálicos

El depósito de Hidruros Metálicos (HM) disponible en la microrred es del tipo AB5, en concreto una aleación del tipo  $\text{LaNi}_4.7\text{Al}_{0.3}$ , que absorbe el hidrógeno a una presión máxima de 5 bar y expulsa a un mínimo de 2 bar. Los dos tanques suman un total de capacidad máxima de  $14\text{Nm}^3$ .

En el laboratorio se dispone de un almacenamiento de hidrógeno mediante hidruros metálicos con el fin de experimentar con su capacidad de almacenamiento y gestionar los desajustes entre generación y demanda que se den en la microrred. Ha sido fabricado por la empresa LabTech. Se trata del modelo HBond-7000H. Es un hidruro que funciona a baja presión y temperatura, apto para el laboratorio. Además de la seguridad que garantiza el trabajar con el almacenamiento del hidrógeno en estado sólido.

El hidruro goza de una estructura con las tuberías y conducciones necesarias, en particular el agua fría y el agua caliente para favorecer los procesos de absorción y desorción respectivamente. El circuito de calefacción consta de un termo eléctrico que recircula el fluido caliente mediante una bomba, suministrando agua caliente a una temperatura de entre  $40\text{-}70\text{ }^\circ\text{C}$  a la entrada del hidruro. El hidruro metálico escogido para el laboratorio no requiere de agua a una temperatura demasiado baja para la desorción ( $15\text{-}20\text{ }^\circ\text{C}$ ) por ello se utiliza directamente agua de red.

### 2.2.5 Baterías de Plomo-ácido

El banco de baterías del laboratorio de hidrógeno incluye 24 mono-bloques de 2 Voltios nominales cada uno. Las baterías son de tipo estacionario, con una capacidad total de 367 Ah. Fueron instaladas como elemento secundario de almacenamiento de energía, especialmente enfocada a amortiguar los desajustes leves entre generación y demanda. Además, la inclusión de las baterías en el sistema responde a criterios de versatilidad en las diferentes estrategias de control que permite implementar.

Las baterías instaladas en Hylab están conectadas en serie, obteniendo un voltaje nominal de 48 Voltios.

## 2.2.6 PLC

El autómata programable o PLC (Programable Logic Controller) instalado en Hylab es de la casa Schneider Electric, de la serie Modicon M340. En concreto la CPU es la BMC P34 20302, la fuente de alimentación es la CPS 2000, con un módulo de entradas digitales DDI1602, un módulo de salidas digitales DDO1602, tres módulos de entradas analógicas AMI 0402 y 2 módulos de salidas analógicas AMO 0210.

El PLC es el encargado del control primario de todo el sistema, lee todas las variables y supervisa el correcto funcionamiento. Cualquier variable fuera de rango provoca la entrada en estado de emergencia del sistema.

## 2.2.7 Baterías de Ion-Litio

Las baterías recargables son los sistemas más antiguos de almacenamiento de energía eléctrica (J.N. Baker, 1999). Sabemos que almacenan la energía eléctrica en forma de energía química en su interior mediante un sistema compuesto por una o varias celdas electroquímicas. Cada celda consiste en un electrolito (líquido o sólido) junto con un electrodo positivo (ánodo) y negativo (cátodo). Durante la descarga, las reacciones electroquímicas tienen lugar en los dos electrodos y la corriente de electrones fluye por el circuito exterior. Esta reacción es reversible, permitiendo a la batería recargarse aplicando un voltaje externo entre los electrodos.

La ventaja de las baterías es que responden con bastante rapidez a la variación de la carga, permitiendo estabilizar el voltaje de una red fácilmente. Además, presentan unas pérdidas de *stand-by* relativamente bajas.

También presentan una eficiencia de almacenamiento de la energía bastante elevada, que se encuentran entre el 60% y el 95% dependiendo de la tecnología (Ioannis Hadjipaschalis, 2009).

Los tipos de baterías más comunes empleados en sistemas de almacenamiento son: Baterías de Plomo-ácido, Níquel-Hidruro Metálico, y baterías de Ion-Litio.

Las baterías de Ion-Litio son los tipos de acumulador de energía más extendido en el mundo, y están basadas en el uso como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo. (véase figura 2.3)

La tecnología de las baterías de litio se divide en dos tipos principales: de Ion-Litio y células de polímero. Su ventaja respecto las baterías de plomo-ácido y de níquel-hidruro metálico es una densidad de energía mayor, su eficiencia energética, su menor tasa de auto-descarga y que requieren poco mantenimiento. El rango de voltaje de una celda de ion litio es de 3.75 V y la densidad de energía típica oscila en torno a los 130-200 Wh/kg con una densidad de potencia de 1200-4000 W/kg. Las baterías de ion litio tienen una alta eficiencia energética (entre el 85 y el 96 %), son fáciles de instalar y requieren relativamente bajo mantenimiento, aunque un coste superior de inversión. Adicionalmente, el ratio de auto descarga para este tipo de baterías son bajos, del orden de menos del 5 % de la tasa de capacidad por mes, lo que las hace ideales para aplicaciones de medio-largo tiempo de almacenamiento de energía. Los factores limitantes para estas baterías son la seguridad ante sobrecalentamiento o sobrecargas y su coste superior (800 €/kWh). Los valores típicos de periodos de vida de las baterías de Ion-Litio oscilan entre 1500 y 2000 ciclos de carga/descarga. [3]

Sin embargo, la vida útil de una batería de litio es dependiente de la temperatura, con el envejecimiento paulatino de la batería, este efecto se va agravando, y la vida se puede acortar severamente debido a profundas descargas. Esto hace que las baterías de litio no sean aptas para el uso en aplicaciones en las que puede llegar a ser completamente descargadas. Además, las baterías de litio son “frágiles”, en el sentido de que requieren un circuito de protección para mantener una operación segura. Con respecto a los niveles de temperatura (hasta 65 °C que es el límite superior de operación de las baterías) puede mejorar el funcionamiento de la batería en términos de mayor capacidad, pero las bajas temperaturas también pueden reducir la vida total de la batería, así como la eficiencia energética.

En cada pack de batería, el circuito de protección limita el pico de tensión de cada una de las células y evita que el voltaje de la célula caiga demasiado. Además, la temperatura de la célula se debe controlar para evitar las temperaturas extremas. El nivel de carga máximo y la corriente de descarga en la mayoría de las pilas también están limitados.

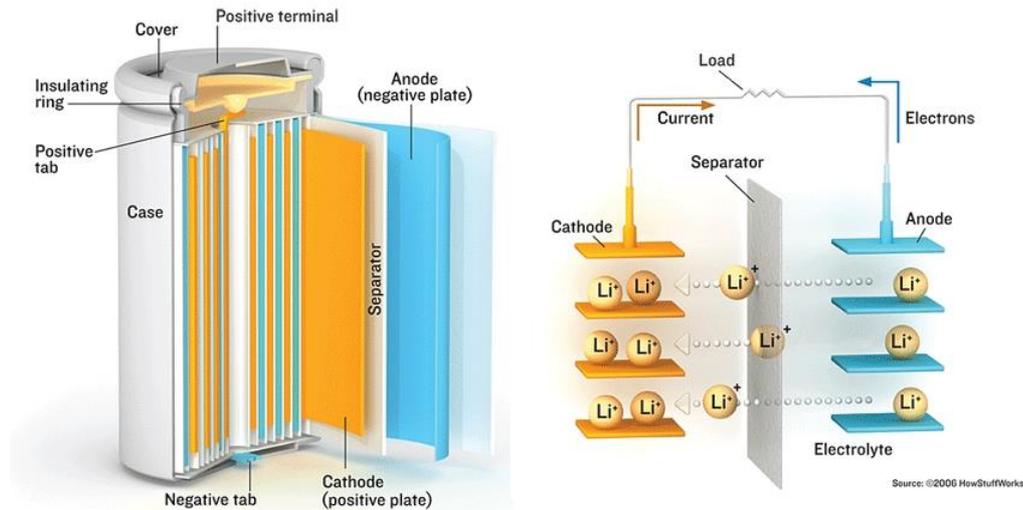


Figura 2.2. Esquema de una batería de Ion-Litio.

## 2.2.8 Convertidor DC/DC

La conexión de los distintos elementos entre sí se suele realizar mediante un bus de corriente al cual se acoplan los distintos elementos mediante convertidores de potencia, a excepción de las baterías de plomo ácido que tenemos conectadas en el laboratorio que van directamente al bus. Para instalaciones de pequeño tamaño, la tendencia es usar un sistema CC. Dado que son más simples y más eficientes.

En los sistemas de acoplamiento en corriente continua, las diferentes fuentes de energía se acoplan a un bus de corriente mediante convertidores DC/DC. Pero finalmente la energía deberá ser convertida en alterna a través de un inversor, dado que la mayoría de los equipos comerciales que consumirán la corriente eléctrica se diseñan para un consumo en alterna, y por supuesto si está conectado a red, será inevitable esta conversión. El inversor puede ser diseñado y controlado para permitir un flujo bidireccional de energía. Las cargas que sean en alterna se conectan directamente al bus de alterna y las de continua al bus de continua.

Las ventajas de utilizar convertidores DC/DC es simplificar la alimentación de un sistema, ya que permite generar tensiones cuando se necesitan, reduciendo la cantidad de líneas de potencia necesarias. Además, permiten un mejor manejo de la potencia, control de tensiones de entrada y un aumento en la seguridad.

Los principales inconvenientes que presentan son la generación de ruidos y armónicos, no solo en la alimentación regulada, sino que a través de su línea de entrada se puede propagar el resto del sistema.

En nuestro caso, se trata de un convertidor bidireccional de 3 kW que cumple con las funciones de elevador reductor en ambos sentidos. Este equipo está preparado para aportar o requerir potencia a un sistema de almacenamiento a través de la conexión con un bus de continua según las consignas recibidas a través de comunicaciones Modbus. La topología del convertidor utilizado es Buck-boost [4], que puede proporcionar una magnitud de voltaje de salida mayor o menor que la magnitud de voltaje de entrada.

Un esquema simplificado de la topología del convertidor se presenta en la siguiente imagen 2.4:

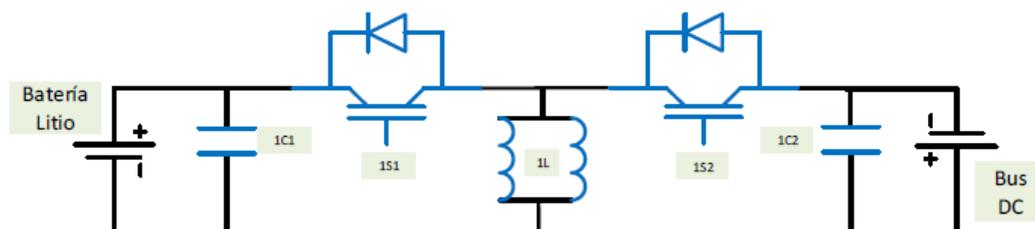


Figura 2.3. Esquema convertidor DC/DC.

## 2.3 Software

En este apartado se comentan las herramientas software utilizadas para el desarrollo del trabajo fin de máster y el fin para el cual han sido utilizadas.

### 2.3.1 Matlab/Simulink

Simulink es una herramienta gráfica para el modelado, análisis y simulación de una amplia variedad de sistemas físicos y matemáticos, inclusive aquellos con elementos no lineales y aquellos que hacen uso de tiempos continuos y discretos. Al tratarse de una extensión de Matlab, Simulink [5, 7] incorpora muchas características específicas a los sistemas dinámicos, mientras conserva toda la funcionalidad de propósito general de Matlab. Así pues, Simulink no es completamente un programa separado de Matlab, sino un anexo a este. El entorno de Matlab esta siempre disponible mientras se ejecuta una simulación en Simulink.

Simulink puede simular cualquier sistema que pueda ser definido por ecuaciones diferenciales continuas y/o discretas. Esto significa que se puede modelar sistemas en tiempo continuo, discreto o híbridos.

En este proyecto se ha hecho uso de Simulink para la simulación de la microrred en el que está basado el laboratorio HYLAB, y de esta manera proporcionarle de total interactividad y aspecto gráfico al modelo y a los algoritmos de control que se ejecutaran sobre él.

### 2.3.2 Unity Pro XL

El software de programación Unity Pro-XL es un software de última generación y de reciente implantación en el campo de la automatización industrial.

Unity Pro [7] es un software común de la programación, puesta a punto y explotación de los autómatas. Con esta herramienta se configura el hardware que forma el PLC y la programación del procesador para que ejecute las instrucciones en función del proyecto. Dentro del software Unity Pro-XL podemos generar proyectos en varias familias de autómatas, como son Modicon M340, Premium, Quantum y coprocesadores Atrium. Todos ellos dentro de la marca Schneider Electric.

Es un software “todo en uno” y de utilización sencilla:

- Acceso directo a las herramientas y a los datos.
- Configuración 100% gráfica.
- Barra de herramientas e iconos personalizables.
- Funciones avanzadas de “arrastrar y soltar” y zoom.
- Ventana de diagnóstico integrado.

Unity Pro propone un conjunto completo de funcionalidades y de herramientas que permiten calcar la estructura de la aplicación en la estructura del proceso o de la máquina. El programa se divide en módulos funcionales jerarquizados que agrupan:

- Secciones de programa
- Tablas de animación
- Pantallas de los operadores
- Hipervínculos

En este proyecto se ha hecho uso de Unity Pro-XL para la integración del mapa de comunicaciones en el PLC

de la microrred del convertidor DC/DC, y de esta manera proporcionar el control necesario sobre las baterías de Ion-Litio.

### 2.3.3 Vijeo Citect SCADA

Vijeo Citect es una solución HMI/SCADA (Human Machine Interface / Supervisory Control and Data Acquisition) para la supervisión y el control de cualquier aplicación industrial [8].

Conocido por su fiabilidad y flexibilidad, las características y la potencia de Vijeo Citect hacen que sea adecuado para cualquier aplicación de cualquier mercado, en los campos más exigentes:

- Energía e infraestructuras: aeropuertos, carreteras y túneles, conducciones de agua, petróleo y gas.
- Industria: minería, metal, minerales.

De complejidad media, las herramientas de configuración y características potentes permiten el desarrollo y despliegue de soluciones de cualquier tamaño.

Vijeo Citect se ejecuta con 3 programas, necesarios para trabajar con el Scada:

- Explorador de Citect: para crear y manejar los proyectos Vijeo Citect.
- Editor de proyectos de Citect: para crear y manejar la base de datos de Vijeo Citect que contiene las informaciones de configuración del proyecto, que no está relacionado con las paginas gráficas. Es posible visualizar todos los registros de las bases de datos en este editor.
- Editor gráfico de Citect: para crear y editar las paginas gráficas, plantillas, objetos...

Vijeo Citect puede comunicar con varios tipos de control o elementos de supervisión de E/S como PLCs (Programmable Logic Controllers), como tratamos en este proyecto o con controladores de bucle, lectores de código de barras, analizadores científicos, unidades remotas de E/S (RTU- Remote Terminal Units), sistemas de control distribuido (DCS- Distributed Control System).

Comunica directamente o vía OPC con los dispositivos de E/S en una planta y factoría, permitiendo la transferencia de datos de o desde un elemento al control de supervisión del sistema.

En este proyecto se ha hecho uso de Vijeo Citect SCADA para la integración de las nuevas variables del convertidor DC/DC en el SCADA actual de la microrred, y así obtener una supervisión de las baterías de Ion-Litio.

## 2.4 Control Predictivo basado en modelo (MPC)

El control predictivo basado en modelo o de sus siglas en inglés MPC (Model Predictive Control), es un método avanzado de control de procesos. Se puede decir que la principal característica de este controlador es que se basa en un modelo de la planta para predecir las acciones futuras de control.

El MPC engloba un conjunto de técnicas que permiten abarcar gran variedad de problemas, desde aquellos con dinámicas relativamente simples hasta otros muchos más complejos (inestables, grandes retardos, sistemas de fase no mínima, ...)

El MPC, se puede considerar un controlador óptimo, es decir, aquellos donde las actuaciones responden a la optimización de un criterio para el control del sistema. El optimizador, o función de coste, está relacionado con el comportamiento futuro del sistema, que se predice gracias a un modelo dinámico del mismo, denominado modelo de predicción.

La técnica de “horizonte deslizante” permite corregir la posible discrepancia entre el comportamiento predicho por el modelo dinámico y el comportamiento real del sistema. Con esta técnica conseguimos añadir robustez al control mediante la resolución del problema de optimización en cada nuevo periodo de muestreo. De manera que el horizonte de predicción se desliza. También el MPC nos permite incluir en su formulación las

restricciones de operación de cada proceso. [1]

El control predictivo presenta una serie de ventajas sobre otros métodos, entre las que se pueden citar las siguientes:

- Son aplicables a prácticamente cualquier tipo de proceso: lineal, no lineal, de fase no mínima, inestable en bucle abierto, grandes retardos, etc.
- Es posible realizar distintas formulaciones en función del modelo de representación.
- La formulación es fácilmente aplicable a sistemas multivariables.
- Compensación de retardos de manera natural y óptima sin necesidad de utilizar compensadores clásicos de retardo (como el predictor de Smith).
- Las perturbaciones medibles pueden ser compensadas mediante realimentación.
- Las acciones de control se obtienen bajo criterios de optimización.
- Puede aprovechar el conocimiento de la evolución de la referencia en el horizonte de control para el cálculo de las acciones de control.
- Permite la fácil inclusión en el diseño de restricciones de operación en las entradas y salidas del proceso.

## 2.4.1 Formulación del Control Predictivo

La estrategia de MPC se caracteriza por tres elementos fundamentalmente: la estrategia de horizonte deslizante, el modelo de la planta y la función de coste. Se proporciona a continuación una breve descripción de estos elementos [2].

### 2.4.1.1 Estrategia deslizante

La estrategia de horizonte se basa en que en cada instante de tiempo  $t$ , el controlador calcula las salidas futuras haciendo uso de un modelo de la planta para un horizonte de predicción  $N$ . Las predicciones de la variable controlada en  $N$  instantes de muestreo en adelante con datos hasta el instante  $t$  se denotan por:

$$\{\hat{y}(t+1|t), \dots, \hat{y}(t+N|t)\}$$

Para las predicciones se hace uso tanto de los valores pasados de las variables manipuladas como de los valores presentes y pasados de las variables controladas del proceso, véase la figura 2.1:

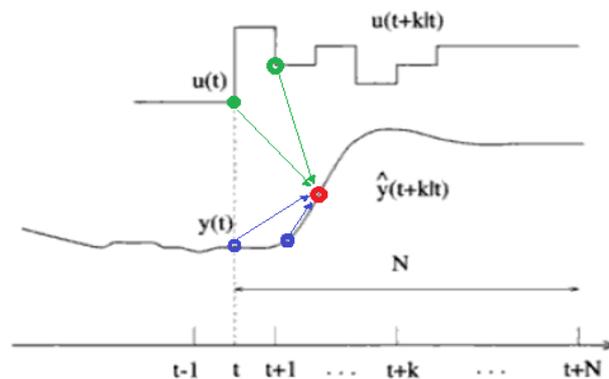


Figura 2.4. Predicción con horizonte  $N=N_2-N_1$ .

Un punto fundamental de la estrategia de control deslizante es aplicar sólo el primer valor de la secuencia calculada  $u^*$ ,  $u^*(t|t)$ , desechando el resto de la secuencia. Esta estrategia a la hora de aplicar la ley de control supone aplicar sólo los valores óptimos en cada instante de muestreo.

Para aplicar esta estrategia se emplea el conocido esquema mostrado en la Figura 2.2. Funcionando, como se ha comentado: El modelo permite predecir las salidas futuras en función de las entradas pasadas. Las acciones de control son calculadas por el optimizador, que es donde se tiene en cuenta la función de coste y las restricciones del proceso. Como se observa, el modelo se emplea para calcular el error futuro que se cometería, permitiendo actuar con ventaja.

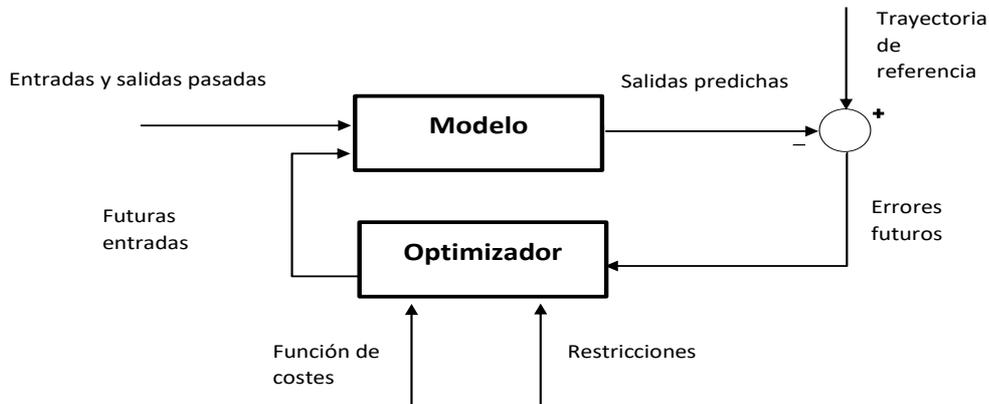


Figura 2.5. Estructura básica del MPC.

#### 2.4.1.2 Modelo de predicción

Se podría decir que el modelo de la planta es el elemento clave en el MPC. Lo deseable es que el modelo sea lo suficientemente “rico” para describir las dinámicas de la planta, pero a su vez no ser demasiado complejo para permitir un cálculo computacional ágil.

Las técnicas más usadas para formular el modelo cumpliendo estas características son:

- Modelo de respuesta impulsional: La planta se somete a impulsos unitarios para identificar la dinámica. La amplitud del impulso es igual al periodo de muestreo. La salida del proceso se puede describir por:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} h_i \cdot u(t - i)$$

- Modelo de respuesta ante escalón: Siguiendo la expresión anterior, con la diferencia de que ahora los  $h_i$  corresponden a escalones unitarios.
- Modelo de función de transferencia: Para describir el modelo se emplea una función de transferencia definida en su forma tradicional como la salida dividida por la entrada en el dominio de Laplace.

$$H(s) = Y(s)/U(s)$$

- Modelos CARIMA (Controller Auto-Regresive Integrated Moving- Average): utilizado para controlar procesos descritos en tiempo discreto.
- Modelo en el espacio de estados: En esta formulación el modelo queda definido por unas ecuaciones diferenciales de primer orden que relacionan las entradas y salidas con ecuaciones algebraicas descritas en forma matricial.

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t)$$

$$\dot{y}(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t)$$

### 2.4.1.3 Función de coste o función objetivo

Se denomina función de coste a la función que modela el criterio a optimizar cuando se calcula la acción de control. Las diversas variantes del MPC proponen diferentes funciones de coste para la obtención de dicha ley de control, aunque todas comparten un criterio común. Por lo general, el criterio consistirá en seguir una referencia en la salida (dentro del horizonte considerado) a la vez que se penaliza el esfuerzo de control requerido para alcanzarla.

La función de coste utilizada emplea la expresión general de minimización de la suma del cuadrado de los errores predichos y del cuadrado de los incrementos de la señal de control futuros en el horizonte de predicción definido:

$$J = \sum_{k=1}^N \delta(k) [(\hat{y}(t+k|t) - w(t+k))]^2 + \sum_{k=1}^{Nu} \lambda(k) [(\Delta u(t+k-1|t))]^2$$

Donde “ $u$ ” es la secuencia de señales futuras y “ $w$ ” es la secuencia de la trayectoria de referencia. Las funciones de coste varían según la técnica MPC, pero en general, el objetivo del controlador es obtener en cada instante de muestreo la secuencia de actuaciones  $u^*$  admisibles que minimiza  $J$ .

La función de coste es un punto clave en el diseño del MPC. Para una mejor comprensión teórica de la misma se describen a continuación los elementos principales que la definen:

- $N$ : Horizonte de predicción.
- $N1$  y  $N2$ : Horizontes de control mínimo y máximo. Definen los límites de los instantes en que se desea que la salida siga a la referencia.
- $Nu$ : horizonte de control (no tiene por qué coincidir con  $N2$ ).
- Trayectoria de referencia: Si la trayectoria de referencia es conocida a priori, el MPC obtiene una ventaja fundamental dado que es capaz de reaccionar antes de que el cambio se haya realizado. Esto ayuda a eliminar los retardos en la respuesta.

### 2.4.1.4 Restricciones

En la mayoría de los procesos reales se pueden encontrar numerosas restricciones de operación. Tanto en los actuadores como en los equipos, las limitaciones físicas y constructivas motivan restricciones de operación que han de ser tenidas en cuenta en el control. El MPC permite considerar dichas restricciones en la propia formulación. Se puede considerar tanto límites en la amplitud como en la variación de esa amplitud (slew rate). Así mismo, es normal que la salida del sistema esté limitada (por ejemplo, la temperatura de una mezcla no puede superar cierto valor).

$$\begin{aligned} u_{min} &\leq u(t) \leq u_{max} \\ du_{min} &\leq u(t) - u(t-1) \leq du_{max} \\ y_{min} &\leq y(t) \leq y_{max} \end{aligned}$$

### 3 AUTOMATIZACIÓN DEL CONVERTIDOR CON UNITY PRO-XL

La finalidad de este capítulo es la realización del código para el control de las baterías Ion-Litio a través del convertidor DC/DC.

La batería de Ion-Litio utilizada en este proyecto son de la marca GBS de Segunda Generación Li-ion, con un voltaje nominal de 12.8 V (4 celdas · 3.2 V) y una capacidad nominal de 100 Ah. [9]



Figura 3.1. Bloque de baterías de Ion-Litio instaladas en la microrred.

El convertidor utilizado en este proyecto es un Convertidor DCDC bidireccional de 3 kW proporcionado por el grupo de Electrónica de Potencia (GEP) de la Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía (AICIA), denominado ESS3-DCDC.



Figura 3.2. Convertidor DC/DC instalado en la microrred.

### 3.1 Características del sistema

Las características y especificaciones técnicas de funcionamiento de nuestro sistema son las siguientes:

- Tensión de baterías: 42-56 VDC
- Tensión de bus DC: 42-56 VDC
- Potencia de batería a bus DC:
  - Lado bus DC:
    - Potencia nominal: 3kW
    - Corriente nominal: 62.5 A
  - Lado baterías:
    - Potencia nominal: 3.16 kW
    - Corriente nominal: 65.8 A
- Potencia de bus DC a batería:
  - Lado bus DC:
    - Potencia nominal: 3kW
    - Corriente nominal: 62.5 A
  - Lado baterías:
    - Potencia nominal: 2.85 kW
    - Corriente nominal: 59.36 A
- Rendimiento potencia nominal: 95 %

Para la realización de las comunicaciones Modbus con el sistema se ha seguido el mapa de registros que se muestra en la siguiente tabla:

DCDC 3kW									
Mapa Modbus									
Dirección	Dato	Tipo dato	Tamaño	Formato	Unidad	Factor escala	Tipo acceso	Función Modbus	Fuente
Direcciones Lectura									
0	Bandera estado	Uint16	1	Hex	Código	--	RO	03	Control central
1	Bandera protecciones	Uint16	1	Hex	Código	--	RO	03	Control central
2	Bandera errores	Uint16	1	Hex	Código	--	RO	03	Control central
3	VDC_BAT	Uint16	1	Hex	V	0,01	RO	03	Control central
4	VDC_BAT_DClint	Uint16	1	Hex	V	0,01	RO	03	Control central
5	VDC_BUS_Dclink	Uint16	1	Hex	V	0,01	RO	03	Control central
6	VDC_BUS	Uint16	1	Hex	V	0,01	RO	03	Control central
7	Eficiencia	Uint16	1	Hex	%	0,01	RO	03	Control central
8	P_BAT	Int16	1	Hex	W	1	RO	03	Control central
9	P_BUS	Int16	1	Hex	W	1	RO	03	Control central
10	I_BAT	Int16	1	Hex	A	0,01	RO	03	Control central
11	I_BUS	Int16	1	Hex	A	0,01	RO	03	Control central
12	Temperatura COIL	Int16	1	Hex	°C	0,01	RO	03	Control central
13	Temperatura IGBT	Int16	1	Hex	°C	0,01	RO	03	Control central
Direcciones Escritura									
19	Bandera comandos	Uint16	1	Hex	Código	--	R/W	16	HMI
20	P_ref	Int16	1	Hex	W	1	R/W	16	HMI
21	V_bat_lim_min	Int16	1	Hex	V	1	R/W	16	HMI
22	V_bat_lim_max	Int16	1	Hex	V	1	R/W	16	HMI
23	V_bus_lim_min	Int16	1	Hex	V	1	R/W	16	HMI
24	V_bus_lim_max	Int16	1	Hex	V	1	R/W	16	HMI
25	I_bat_lim_min	Int16	1	Hex	A	1	R/W	16	HMI
26	I_bat_lim_max	Int16	1	Hex	A	1	R/W	16	HMI
27	I_bus_lim_min	Int16	1	Hex	A	1	R/W	16	HMI
28	I_bus_lim_max	Int16	1	Hex	A	1	R/W	16	HMI
29	P_bat_lim_min	Int16	1	Hex	W	1	R/W	16	HMI
30	P_bat_lim_max	Int16	1	Hex	W	1	R/W	16	HMI
31	P_bus_lim_min	Int16	1	Hex	W	1	R/W	16	HMI
32	P_bus_lim_max	Int16	1	Hex	W	1	R/W	16	HMI
33	T_COIL_max	Int16	1	Hex	°C	1	R/W	16	HMI
34	T_IGBT_max	Int16	1	Hex	°C	1	R/W	16	HMI

Tabla 1. Mapa de comunicaciones Modbus.

Se nos ha proporcionado también el código de registro del convertidor DC/DC:

Register Code									
Address	System status flag								
0	Address bit (LSB)	7 bit	6 bit	5 bit	4 bit	3 bit	2 bit	1 bit	0 bit
	Name	Reserved	Reserved	Error	Parada	Run	Precarga	Esperando Vbat y Vbus	Esperando marcha
	Address bit (MSB)	15 bit	14 bit	13 bit	12 bit	11 bit	10 bit	9 bit	8 bit
Name	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved
Address	System protection flag								
1	Address bit (LSB)	7 bit	6 bit	5 bit	4 bit	3 bit	2 bit	1 bit	0 bit
	Name	Reserved	Reserved	SW2_RST_HW	SW1_ON_OFF	R_KBUS-	R_KBUS+	R_KBAT-	R_KBAT+
	Address bit (MSB)	15 bit	14 bit	13 bit	12 bit	11 bit	10 bit	9 bit	8 bit
Name	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	
Address	System error flag								
2	Address bit (LSB)	7 bit	6 bit	5 bit	4 bit	3 bit	2 bit	1 bit	0 bit
	Name	Under current bus	Over current bus	Under current bat	Over current bat	Under voltage bus	Over voltage bus	Under voltage bat	Over voltage bat
	Address bit (MSB)	15 bit	14 bit	13 bit	12 bit	11 bit	10 bit	9 bit	8 bit
Name	Err_Pre-Charge	Err_Driver	High Temp COIL	High Temp IGBT	Under power bus	Over power bus	Under power bat	Over power bat	
Address	System command flag								
100	Address bit (LSB)	7 bit	6 bit	5 bit	4 bit	3 bit	2 bit	1 bit	0 bit
	Name	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	RST Límites	RST_SW	MARCHA_PARO
	Address bit (MSB)	15 bit	14 bit	13 bit	12 bit	11 bit	10 bit	9 bit	8 bit
Name	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	Reserved	

Tabla 2. Register code.

A continuación, se muestra la máquina de estados del sistema y explicaremos el funcionamiento de esta misma con la ayuda de la figura 3.3 y la tabla 3.

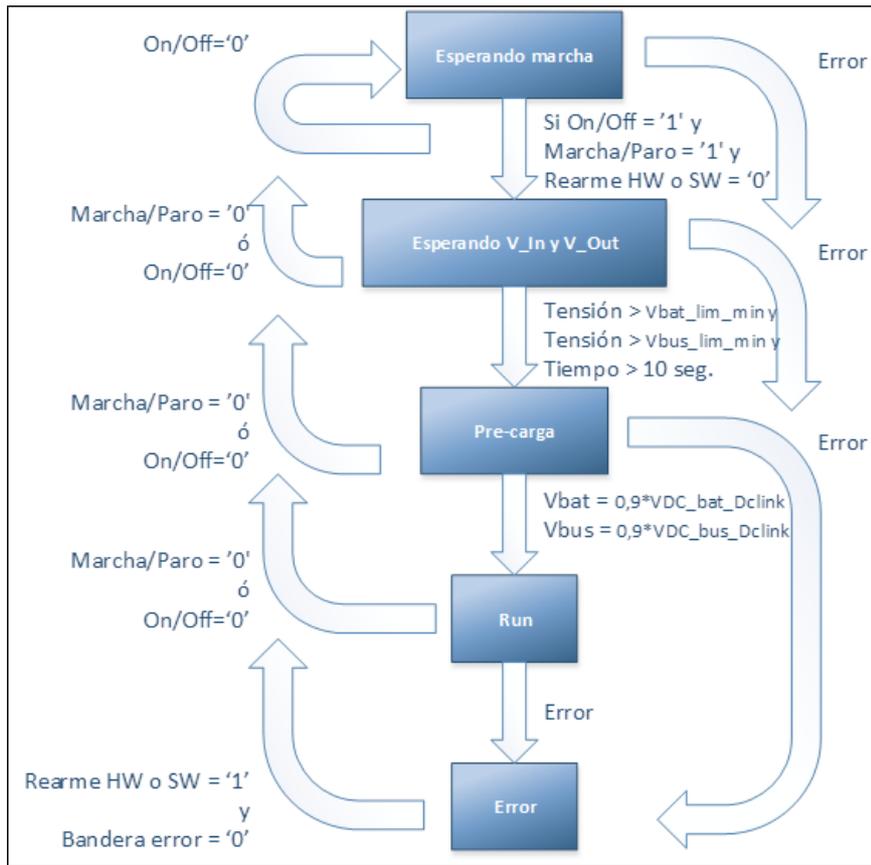


Figura 3.3. Máquina de estados del convertidor DC/DC.

Estado inicio	Transición	Estado final
Esperando marcha	SW1='1' ;marcha='1' ; parada='0'	Esperando Vbat y Vbus
Esperando Vbat y Vbus	Tensión>Vbat_lim_min Tensión>Vbus_lim_min	Precarga
Precarga	Vbat=0,9*VDC_bat_Dclink Vbus=0,9*VDC_bus_Dclink	Run
Esperando Vpan y Vout	SW1='0' o parada='1'	Esperando marcha
Precarga		
Run		
Esperando marcha	Bandera error ='1'	Error
Esperando Vpan y Vout		
Precarga		
Run		
Error	Bandera error='0'	Esperando marcha

Tabla 3. Funcionamiento máquina de estados.

La dinámica de operación o funcionamiento del convertidor DC/DC es la siguiente:

- Estado “Esperando marcha”.
  - Espera botón físico “On/Off” = 1, orden de rearme física o por comunicaciones = 0 y orden de “Marcha/Paro” = 1 por comunicaciones.
  - En caso afirmativo, transición a estado esperando  $V_{In}$  y  $V_{Out}$ .
  - En caso de situación de error, transición a estado de error.
  - En cualquier otro caso permanece en el mismo.
- Estado “Esperando  $V_{In}$  y  $V_{Out}$ ”.
  - Espera que las tensiones de baterías y de bus sean superiores a un valor mínimo establecido. Comprueba esta situación cada 10 segundos.
  - En caso afirmativo, transición a estado pre-carga.
  - En caso de situación de error, transición estado de error.
  - En caso de orden de parada, física o por comunicaciones, transición a estado de esperando marcha.
  - En cualquier otro caso permanece en el mismo estado.
- Estado “Pre-carga”.
  - Esperando que la tensión del DC Link del lado de las baterías haya alcanzado al menos el 90% de la tensión de las baterías.
  - En caso afirmativo, transición a modo ejecución.
  - En caso de situación de error, transición a estado de error.
  - En caso de orden de parada, física o por comunicaciones, transición a estado de esperando marcha.
  - En cualquier otro caso permanece en el mismo estado, por un tiempo determinado. Si no se alcanza las tensiones mínimas requeridas en ese tiempo, transición a estado de error.
- Estado “Run”.
  - Funcionamiento correcto del equipo. A la espera de recibir consignas de potencia.
  - En caso de situación de error, transición a estado de error.
  - En caso de orden de parada, física o por comunicaciones, transición a estado de esperando marcha.
  - En cualquier otro caso permanece en el mismo estado.
- Estado “Error”
  - Permanece en este estado indefinidamente hasta que no se restablezca la situación normal de operación y se proporciona orden de “Rearme”, física o por comunicaciones.
  - Errores enclavados rearme por hardware: Precarga, driver, temperatura IGBT o bobina.
  - Errores rearme automático: Baja tensión de baterías o bus.
  - Los demás errores se rearman tanto por hardware como por software.
    - Tensión de baterías límite mínimo → 40 V
    - Tensión de baterías límite máximo → 57 V
    - Tensión de bus límite mínimo → 40 V
    - Tensión de bus límite máximo → 57 V
    - Corriente de baterías límite mínimo → -70 A

- Corriente de baterías límite máximo → 70 A
- Corriente de bus límite mínimo → -70 A
- Corriente de bus límite máximo → 70 A
- Potencia de baterías límite mínimo → -3200 W
- Potencia de baterías límite máximo → 3200 W
- Potencia de bus límite mínimo → -3200 W
- Potencia de bus límite máximo → 3200 W
- Temperatura máxima de la bobina → 80 °C
- Temperatura máxima del IGBT → 80 °C
- Error de Driver
- Error de precarga por tiempo → 5 min

Leyenda del mapa de comunicaciones implementado:

Tipo dato	Tipo de dato empleado para representar el dato. <b>Uint16</b> : tipo entero sin signo de 16 bits. <b>Int16</b> : tipo entero con signo de 16 bits.
Tamaño	Espacio ocupado en memoria del mapa modbus. El tamaño nativo es 16 bits.
Factor escala	Factor por el cual se debe multiplicar para obtener el valor de la medida. Empleado para obtener precisión en las medidas.
Tipo acceso	<b>RO</b> : sólo lectura. <b>R/W</b> : lectura y escritura. Ligado a la función Modbus que indica el tipo de acceso que se realiza sobre el registro.
Función Modbus	<b>03 Read holding Registers (4x)</b> : permite realizar la lectura del valor del registro. Dirección base 40001. <b>16 Write Multiple Registers</b> : permite realizar la escritura de un grupo de registros. Dirección base 40001.
Fuente	Medio a través de cual se tiene acceso al registro.

Tabla 4. Leyenda mapa de registros Modbus.

## 3.2 Bus PLC, variables del Sistema y comunicación vía Ethernet

Los procesadores de plataforma automatizados de Modicon M340 gestionan toda la estación PLC, que está formada por módulos de E/S binarias, módulos de E/S analógicas y módulos de conteo, otros módulos expertos y módulos de comunicación. Estos se distribuyen por uno o más bastidores conectado al bus local. Cada bastidor debe incluir un módulo de alimentación; el bastidor principal aloja la CPU.

En nuestro caso particular se ha utilizado el procesador BMX P34 2030/20302. Por lo que nuestro Bus PLC quedaría de la siguiente manera:

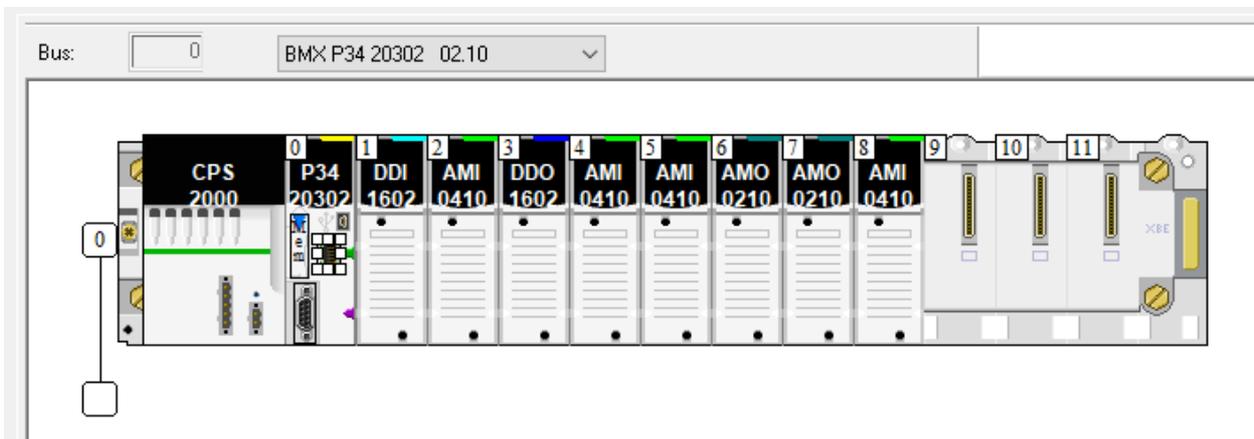


Figura 3.4. Módulos PLC instalados.

Una vez enunciado el problema, se han declarado una serie de variables que llevarán a conseguir el objetivo marcado. Son variables tanto de entrada como de salida, las variables proporcionadas por el mapa de comunicaciones (véase tabla 1) que llevan asociada una dirección, y el resto de las variables creadas en el programa necesarias para su ejecución o funcionamiento correcto. Todas ellas quedan definidas en la tabla 5 y 6.

Nombre	Tipo	Direcci	Valor	Comentario
BL_Handler	ARRAY[0..3] OF INT			Tabla de gestión de intercambio de lectura
DatoEnvio	ARRAY[1..15] OF INT	%MW119		Datos para envío
DCDC_Bandera_comandos	UINT	%MW119		0=Paro; 1=Marcha; 2=Reset límites
DCDC_Bandera_erros	UINT	%MW102		
DCDC_Bandera_estado	UINT	%MW100		
DCDC_Bandera_protecciones	UINT	%MW101		
DCDC_Buffer_recepcion	ARRAY[0..34] OF INT	%MW100		Buffer de recepción Modbus TCP/IP
DCDC_Eficiencia	UINT	%MW107		
DCDC_Eficiencia_Real	REAL			
DCDC_Erros_0	BOOL			
DCDC_Erros_1	BOOL			
DCDC_Erros_2	BOOL			
DCDC_Erros_3	BOOL			
DCDC_Erros_4	BOOL			
DCDC_Erros_5	BOOL			
DCDC_Erros_6	BOOL			
DCDC_Erros_7	BOOL			
DCDC_Erros_8	BOOL			
DCDC_Erros_9	BOOL			
DCDC_Erros_10	BOOL			
DCDC_Erros_11	BOOL			
DCDC_Erros_12	BOOL			
DCDC_Erros_13	BOOL			
DCDC_Erros_14	BOOL			
DCDC_Erros_15	BOOL			
DCDC_Estado_0	BOOL			
DCDC_Estado_1	BOOL			
DCDC_Estado_2	BOOL			
DCDC_Estado_3	BOOL			
DCDC_Estado_4	BOOL			
DCDC_Estado_5	BOOL			
DCDC_I_BAT	INT	%MW110		
DCDC_I_bat_lim_max	INT	%MW126	70	[0A - 70A]
DCDC_I_bat_lim_min	INT	%MW125	-70	[-70A - 0A]
DCDC_I_BAT_Real	REAL			
DCDC_I_BUS	INT	%MW111		
DCDC_I_bus_lim_max	INT	%MW128	70	[0A - 70A]
DCDC_I_bus_lim_min	INT	%MW127	-70	[-70A - 0A]
DCDC_I_BUS_Real	REAL			

Tabla 5. Variables Unity Pro-XL (1).

DCDC_I_bus_lim_min	INT	%MW127	-70	[-70A - 0A]
DCDC_I_BUS_Real	REAL			
DCDC_P_BAT	INT	%MW108		
DCDC_P_bat_lim_max	INT	%MW130	3200	[0W - 3000W]
DCDC_P_bat_lim_min	INT	%MW129	-3200	[-3000W - 0W]
DCDC_P_BAT_Real	REAL			
DCDC_P_BUS	INT	%MW109		
DCDC_P_bus_lim_max	INT	%MW132	3200	[0W - 3000W]
DCDC_P_bus_lim_min	INT	%MW131	-3200	[-3000W - 0W]
DCDC_P_BUS_Real	REAL			
DCDC_P_ref	INT	%MW120		[-3000W - 3000W]
DCDC_Protecciones_0	BOOL			
DCDC_Protecciones_1	BOOL			
DCDC_Protecciones_2	BOOL			
DCDC_Protecciones_3	BOOL			
DCDC_Protecciones_4	BOOL			
DCDC_Protecciones_5	BOOL			
DCDC_T_COIL_max	INT	%MW133	80	[30°C - 100°C]
DCDC_T_IGBT_max	INT	%MW134	80	[30°C - 100°C]
DCDC_Temperatura_COIL	INT	%MW112		
DCDC_Temperatura_COIL_Real	REAL			
DCDC_Temperatura_IGBT	INT	%MW113		
DCDC_Temperatura_IGBT_Real	REAL			
DCDC_V_bat_lim_max	INT	%MW122	60	[48V - 57V]
DCDC_V_bat_lim_min	INT	%MW121	40	[41V - 48V]
DCDC_V_bus_lim_max	INT	%MW124	60	[48V - 57V]
DCDC_V_bus_lim_min	INT	%MW123	40	[41V - 48V]
DCDC_VDC_BAT	UINT	%MW103		
DCDC_VDC_BAT_DClink	UINT	%MW104		
DCDC_VDC_BAT_DClink_Real	REAL			
DCDC_VDC_BAT_Real	REAL			
DCDC_VDC_BUS	UINT	%MW106		
DCDC_VDC_BUS_DClink	UINT	%MW105		
DCDC_VDC_BUS_DClink_Real	REAL			
DCDC_VDC_BUS_Real	REAL			
Management_Param	ARRAY[0..3] OF INT			Tabla de gestión de intercambio de escritura
ModbusCantidad	INT		13	
ModbusReg	DINT		00	
ModbusReg2	DINT		19	

Tabla 6. Variables Unity Pro-XL (2).

Para la conexión del PLC con el convertidor DC/DC se ha llevado a cabo una comunicación vía ethernet con la que poder realizar el intercambio de datos.

Con dicha comunicación conseguiremos poder recibir datos del estado de operación del dispositivo, la potencia a la que se encuentra, el estado de las baterías de Ion-Litio o algún tipo de alarma que se pueda producir. A parte nos permitiría el envío de consignas de control de potencia, señales de encendido o apagado del dispositivo para que de esta forma trabaje en el estado que requiramos.

Dicha comunicación Modbus con el sistema se ha utilizado la configuración que se presenta a continuación:

- Dirección IP: 192.168.1.100
- Mascara de enlace: 255.255.255.0
- Puerta de enlace predeterminada: 192.168.1.1

La configuración de la conexión Ethernet en el Bus PLC se ha configurado en el módulo 0: BMX P34 20302 con Unity Pro-XL, tal y como se puede observar en la figura 3.5:

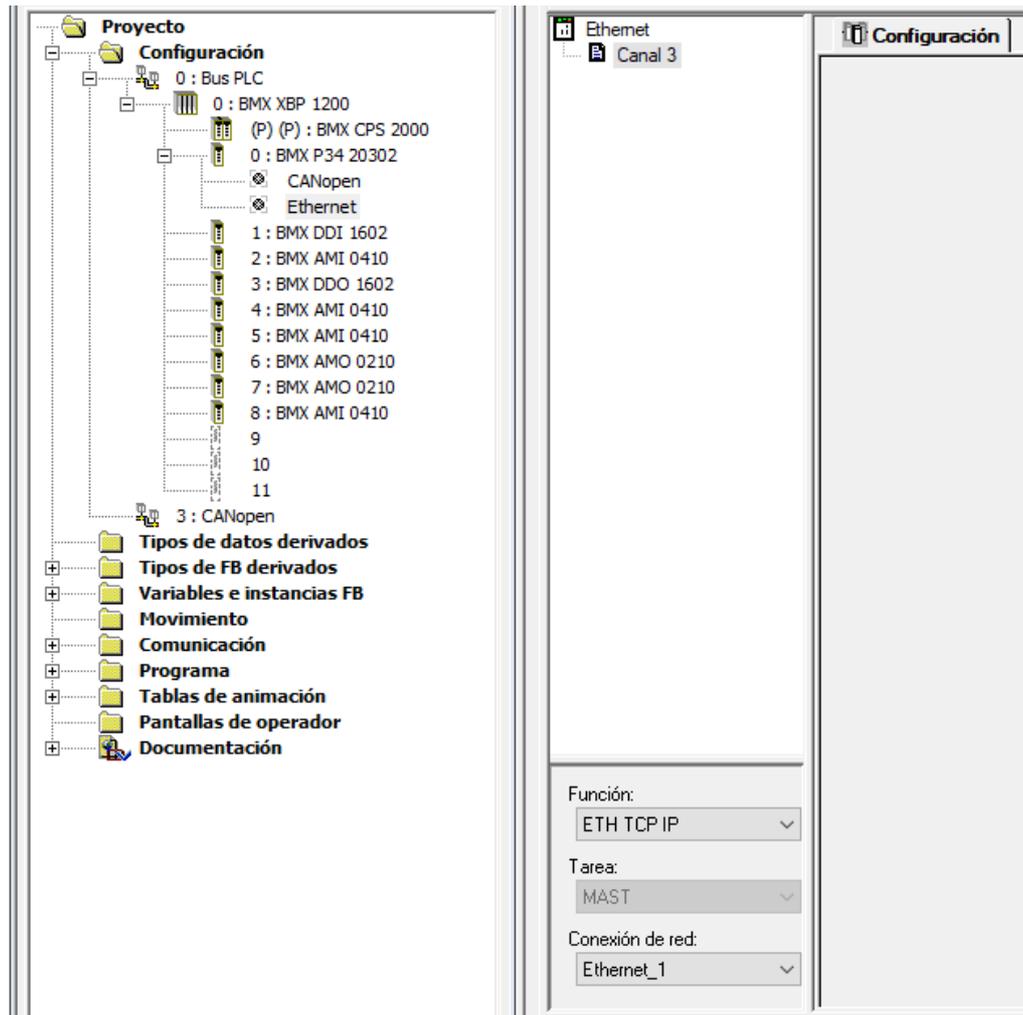


Figura 3.5. Configuración en Unity Pro-XL, conexión de red.

Una vez creada la red Ethernet, esta se configura en el apartado de comunicación, donde se especifica el modelo y la dirección de nuestro PLC. Véase Figura 3.6:

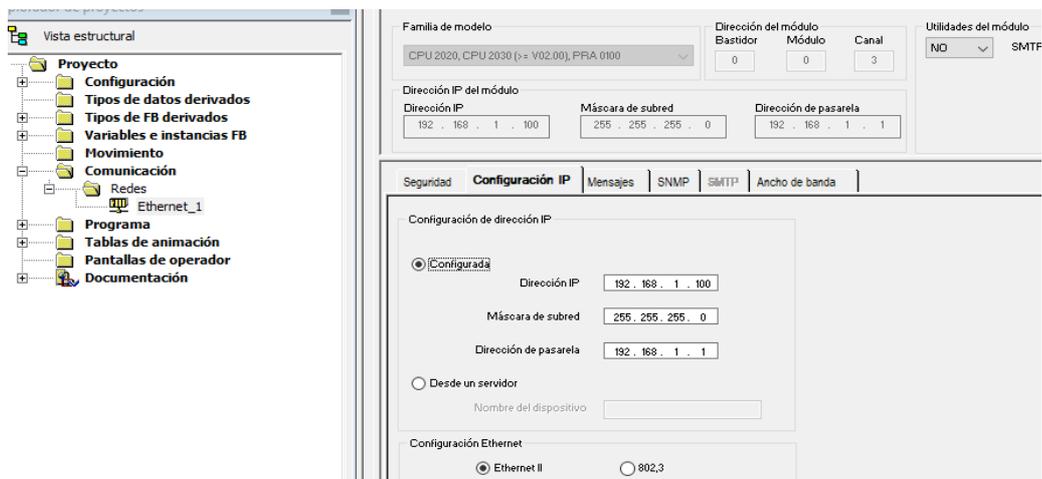


Figura 3.6. Configuración Unity Pro-XL, conexión Ethernet con el convertidor.

### 3.3 Programa

El programa se ha realizado íntegramente con el lenguaje de programación FBD- Lenguaje de bloques funcionales (Functional Block Diagram). Se ha utilizado este lenguaje y únicamente una sección para que de esta forma sea más fácil de integrar en el programa actual de la microrred.

Ya que disponemos de una única sección donde se ha llevado a cabo la programación del control del convertidor DC/DC, podríamos diferenciar 6 partes:

- La primera parte trata la lectura de las variables que se quieren obtener, para ello se ha implementado en los siguientes bloques (véase figura 3.7):

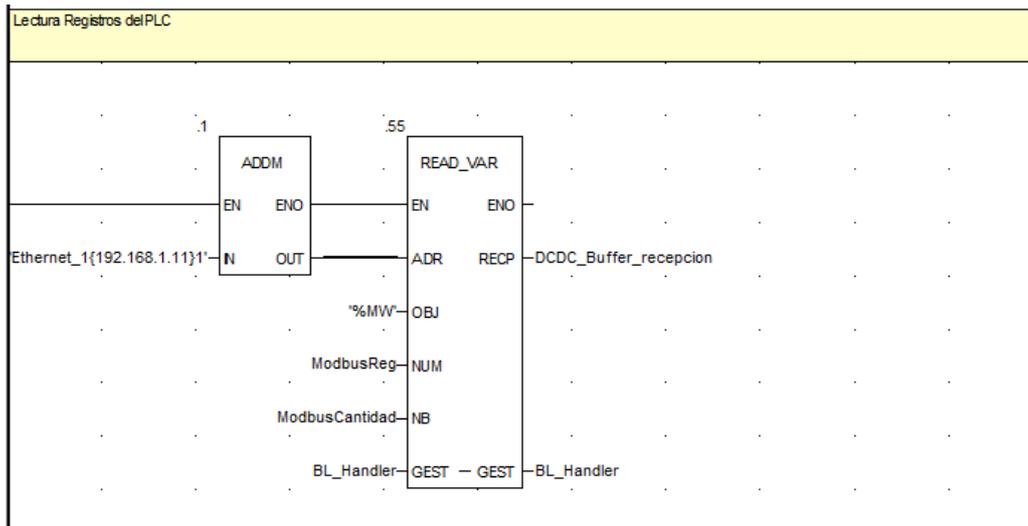


Figura 3.7. Lectura Registros del PLC.

El bloque ADDM se utiliza para convertir la cadena de caracteres procedentes del convertidor en una dirección que el bloque READ\_VAR puede utilizar directamente para leer el valor de los bits internos de nuestro sistema. Como entradas del bloque tenemos la dirección utilizada por el autómatas que ha sido del tipo %MW que indica un objeto de lenguaje de palabra de memoria, con ModbusReg indicamos el índice del primer objeto de lectura, con ModbusCantidad indicamos la cantidad de objetos de lectura y BL\_Handler es una tabla de gestión de intercambio. Disponemos de una única salida, que es DCDC\_Buffer\_recepcion que se trata de una tabla de palabras que contiene el valor de los objetos leídos.

- La segunda parte se ha utilizado para el acondicionamiento de medidas, utilizando el factor de escala proporcionado por el mapa de comunicaciones y aplicado a cada uno de los bloques para las distintas variables (direcciones de lectura) (véase figura 3.8):

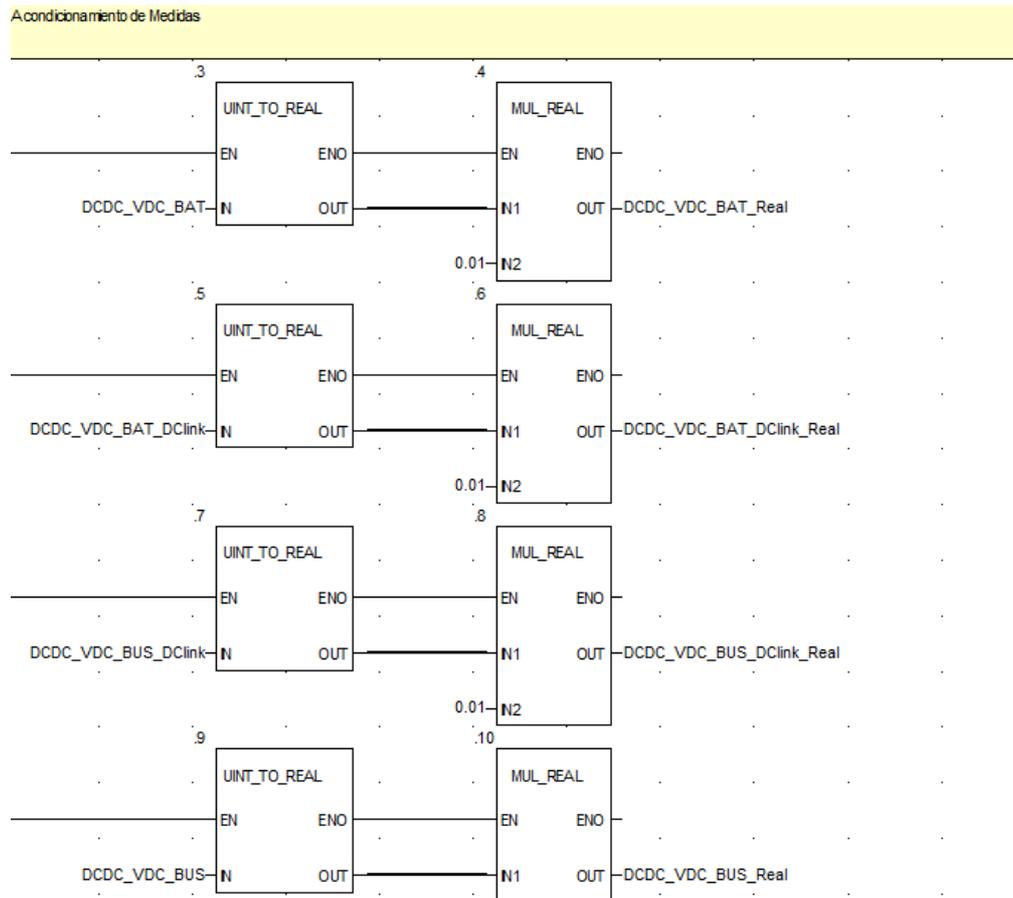


Figura 3.8. Bloques de acondicionamiento de las variables del PLC.

Con la función `UINT_TO_REAL` convertimos los valores de entrada del tipo de datos `UINT` (véase tabla 4) en un valor de salida de tipo `REAL`, y con el bloque `MUL_REAL` multiplicamos el valor de entrada con el factor de escala de la tabla 1 de cada variable.

- En la tercera parte se ha programado el envío de consignas al convertidor con las variables que aparecen en el mapa de comunicaciones (direcciones de escritura), utilizando los siguientes bloques (véase figura 3.9):

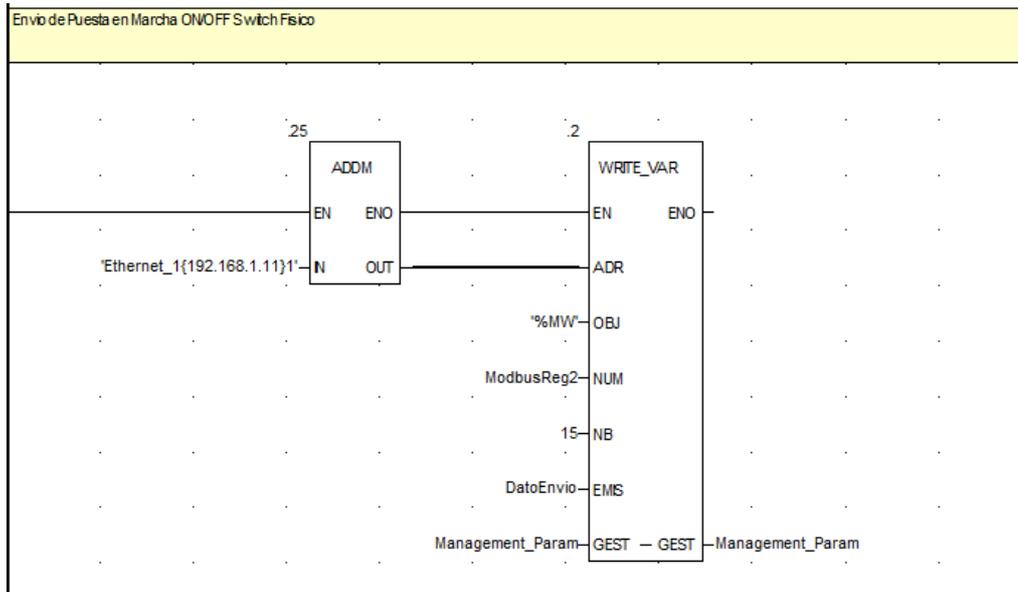


Figura 3.9. Bloques de escritura de las variables del convertidor en el PLC.

Se ha vuelto a utilizar el bloque ADDM que junto con el bloque WRITE\_VAR conseguimos escribir el valor de los objetos de lenguaje del mismo tipo, es nuestro caso bits internos.

- Para saber el estado del convertidor DC/DC se ha implementado los siguientes bloques (véase figura 3.10):

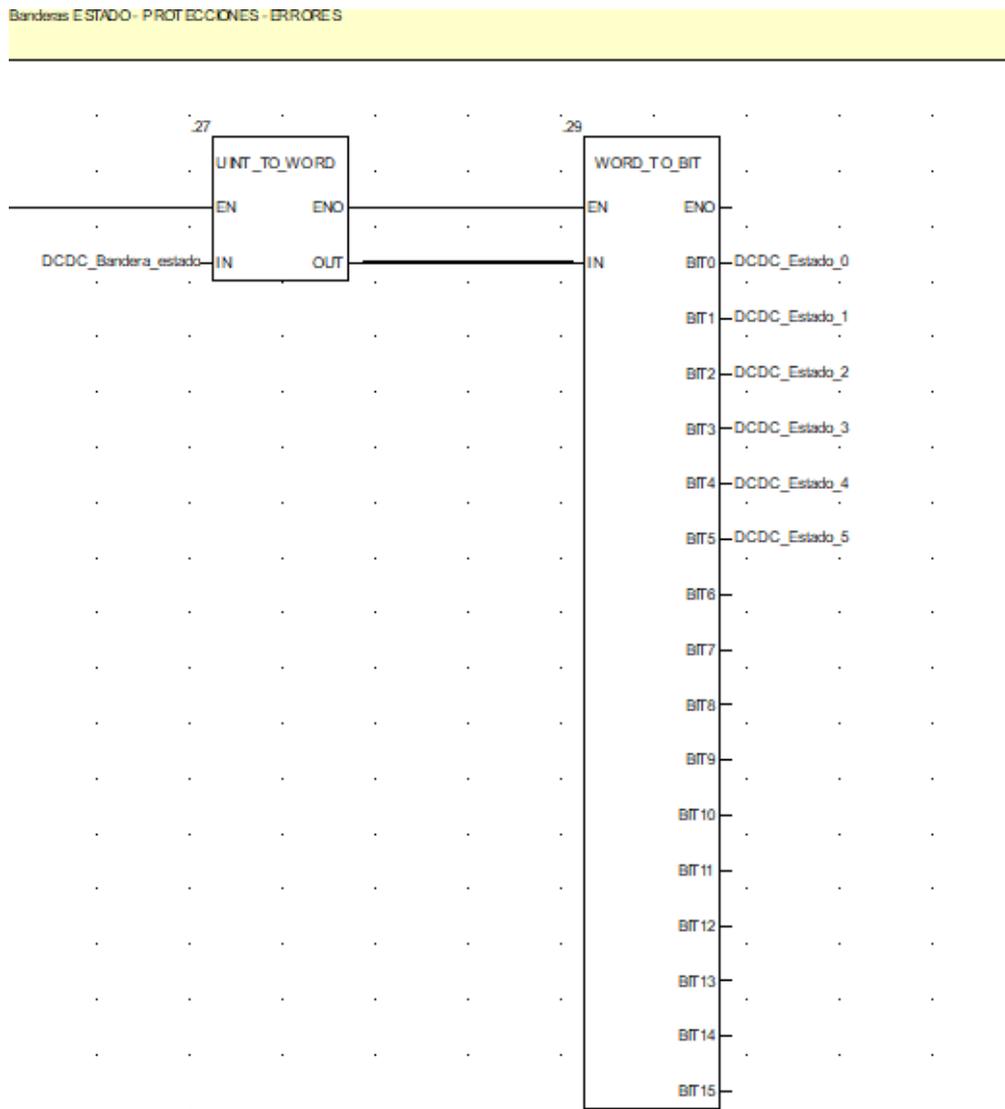


Figura 3.10. Bloques para Flag de estado del convertidor DC/DC.

Puesto que la variable tratada inicialmente se trata de UINT (Entero sin signos) se ha convertido a palabra con el bloque UINT\_TO\_WORD y esta siguiente a bit con el bloque WORD\_TO\_BIT; para de esta forma poder obtener todos los estados de manera independiente a cuál se encuentre activado y/o desactivado.

En la tabla 2, en el apartado System Status flag se puede visualizar a que estado pertenece cada bit.

- Como quinta parte se han implementado los mismos bloques utilizados en la parte anterior, pero esta vez para la obtención del estado de las protecciones del sistema del convertidor (véase figura 3.11):

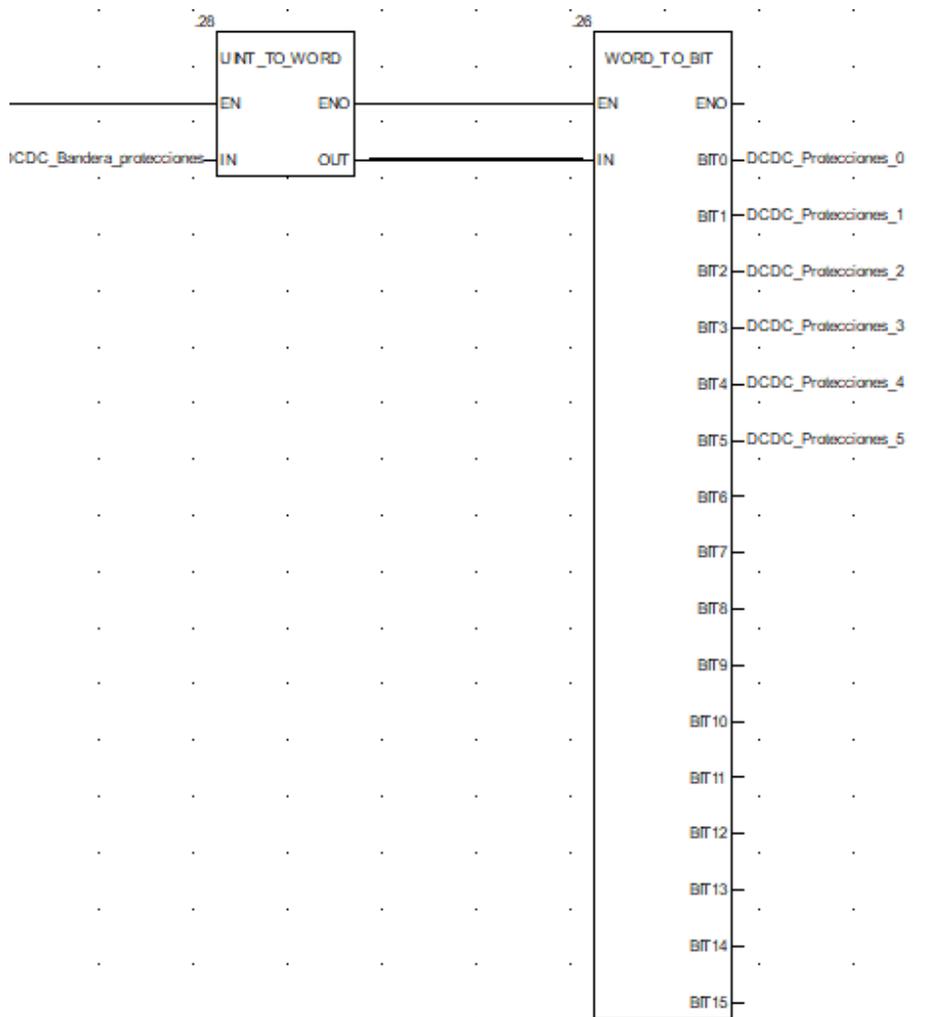


Figura 3.11. Bloques para flag de protecciones del convertidor DC/DC.

Para saber que protecciones se encuentran activas/desactivadas se puede hacer uso de la tabla 2, en el apartado System protection flag.

- Como último apartado implementado se ha utilizado los mismos bloques que en las últimas partes para la obtención de los diferentes errores que se pueden producir en el convertidor DC/DC y de esta forma poder visualizar independientemente en nuestro SCADA. (véase figura 3.12)

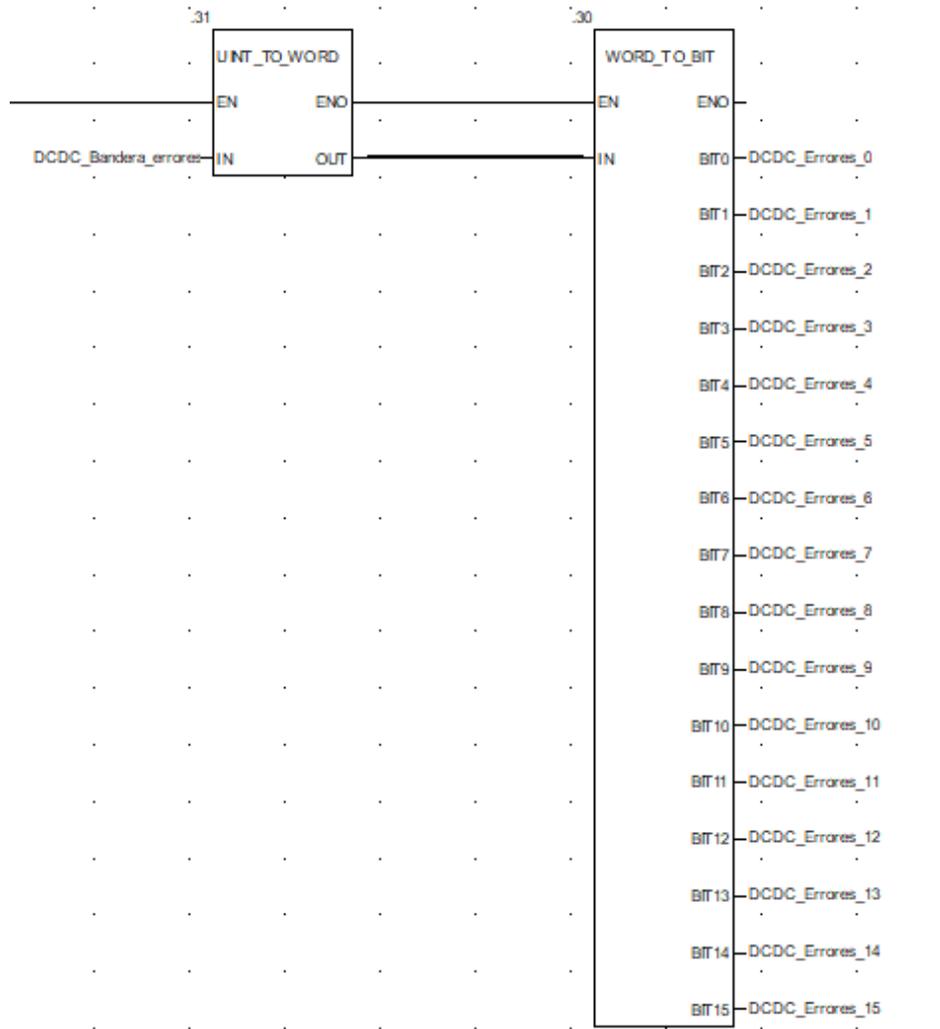


Figura 3.12. Bloques para flag de errores del convertidor DC/DC.

En la tabla 2, en el apartado System Error flag se pueden ver que error o errores ocurren en el sistema.

Si fuera necesario se ha creado una tabla de animación (tabla 7) con el programa Unity Pro-XL para la visualización y el envío de comandos al convertidor DC/DC, sin necesidad del SCADA. Aunque la finalidad de este proyecto es la integración de este programa para el control del convertidor DC/DC a través del SCADA o bien con MATLAB.

En dicha tabla de animación (véase tabla 5.), se han añadido comentarios a las variables utilizadas en el programa para una mayor facilidad de uso.

Nombre	Valor	Tipo	Comentario
DCDC_Buffer_recepcion		ARRAY[0..3]	Buffer de recepción Modbus TCP/IP
BL_Handler		ARRAY[0..3]	Tabla de gestión de intercambio de lectura
DCDC_Eficiencia_Real		REAL	
DCDC_I_BAT_Real		REAL	
DCDC_I_BUS_Real		REAL	
DCDC_P_BAT_Real		REAL	
DCDC_P_BUS_Real		REAL	
DCDC_Temperatura_COIL_Real		REAL	
DCDC_Temperatura_IGBT_Real		REAL	
DCDC_VDC_BAT_DClint_Real		REAL	
DCDC_VDC_BAT_Real		REAL	
DCDC_VDC_BUS_DClint_Real		REAL	
DCDC_VDC_BUS_Real		REAL	
DCDC_Bandera_errores		UINT	
DCDC_Bandera_estado		UINT	
DCDC_Bandera_protecciones		UINT	
DatoEnvio		ARRAY[1..1]	Datos para envío
Management_Param		ARRAY[0..3]	Tabla de gestión de intercambio de escritura
DCDC_Bandera_comandos		UINT	0=Paro; 1=Marcha; 2=Reset límites
DCDC_P_ref		INT	[-3000W - 3000W]
DCDC_V_bat_lim_min		INT	[41V - 48V]
DCDC_V_bat_lim_max		INT	[48V - 57V]
DCDC_I_bat_lim_min		INT	[-70A - 0A]
DCDC_I_bat_lim_max		INT	[0A - 70A]
DCDC_P_bat_lim_min		INT	[-3000W - 0W]
DCDC_P_bat_lim_max		INT	[0W - 3000W]
DCDC_V_bus_lim_min		INT	[41V - 48V]
DCDC_V_bus_lim_max		INT	[48V - 57V]
DCDC_I_bus_lim_min		INT	[-70A - 0A]
DCDC_I_bus_lim_max		INT	[0A - 70A]
DCDC_P_bus_lim_min		INT	[-3000W - 0W]
DCDC_P_bus_lim_max		INT	[0W - 3000W]
DCDC_T_COIL_max		INT	[30°C - 100°C]
DCDC_T_IGBT_max		INT	[30°C - 100°C]

Tabla 7. Tabla de animación de Unity Pro-XL.

## 4 SCADA DEL CONVERTIDOR CON VIJEO CITECT

En este capítulo se desarrolla el SCADA del sistema para la visualización de las variables de control del convertidor DC/DC sobre las baterías de Ion-Litio mediante el programa Vijeo Citect SCADA. Asimismo, se mostrará la conexión realizada con el servidor OPC para establecer las comunicaciones con el PLC.

### 4.1 Diseño del SCADA

Se ha utilizado el programa OPC Factory Server v3.5, donde viene incluido el programa OFS Configuration tool necesario para establecer la conexión de Unity Pro-XL, Vijeo Citect y el PLC. También se utiliza para la comunicación entre Matlab y el PLC, pudiendo así permitir el intercambio entre el control manual y automático de la planta.

#### OFS Configuration tool

Se establece un nombre al servidor OFS en *Device name*, una dirección que en nuestro caso se trata del cable USB conectado al PLC en *Device address* y en *Symbol table file* la dirección del archivo Unity Pro utilizado en el proyecto con la extensión “stu”, tal y como aparece en la figura 4.1.

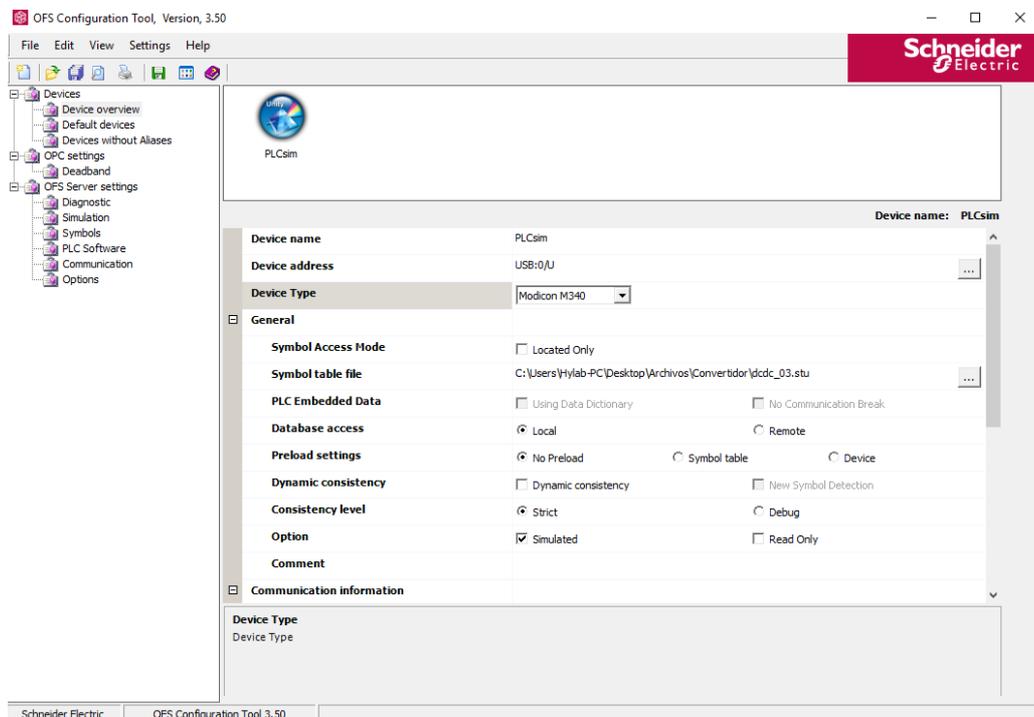


Figura 4.1. Configuración OFS Configuration Tool.

Para la conexión del SCADA con el archivo Unity Pro-XL, es necesario tener instalado una versión operativa del OPC Server. Utilizando la pestaña del programa Vijeo Citect “Editor de proyectos de Citect” en el apartado *Comunicación/Asistente exprés* se ha establecido el dispositivo de comunicación entre el Vijeo Citect y el OPC Server, tal y como se puede ver en la figura 4.2.

The screenshot shows the 'Dispositivos de E/S [ convertidor ]' configuration window. It contains the following fields and values:

- Nombre del servidor: IOServer1
- Nombre: IODev
- Número: 2
- Dirección: PLC\_MICROGRID\_01
- Protocolo: OFSOPC
- Nombre del puerto: PORT1\_BOARD1
- Modo de inicio: (empty)
- Prioridad: (empty)
- Memoria: (empty)
- Sólo lectura: (empty)
- Comentario: (empty)
- Vinculado: TRUE
- Tipo de base de datos: Unity SpeedLink to OFS
- Base de datos externa: Schneider-Aut.OFS.2
- Cadena de conexión: ServerNode=;Branch=PLC\_MICROGRID\_01;
- Prefijo de la etiqueta: (empty)
- Actualización automática: TRUE
- Actualización activa: (empty)

Figura 4.2. Servidor OPC.

Una vez finalizada la conexión con OPC, se importan automáticamente las variables de nuestro programa Unity, que se utilizarán para la implementación del SCADA. Véase figura 4.3.

The screenshot shows the 'Tags de variable [ convertidor ]' configuration window. It contains the following fields and values:

- Equipo: (empty)
- Nombre del ítem: (empty)
- Nombre del cluster: (empty)
- Comentario: (empty)
- Nombre de etiqueta: PLC\_MICROGRID\_01\_DCDC\_I\_BAT\_Real
- Dirección: DCDC\_I\_BAT\_Real
- Dispositivo de E/S: IODev
- Tipo de datos: REAL
- Escala cero bruta: (empty)
- Escala completa bruta: (empty)
- Escala cero de ingeniería: (empty)
- Escala completa de ingeniería: (empty)

Figura 4.3. Tag de variables importadas.

## 4.2 Implementación del SCADA

En la figura 4.4 se puede ver el HMI creado para el convertidor DC/DC que controla las baterías de Ion-Litio.

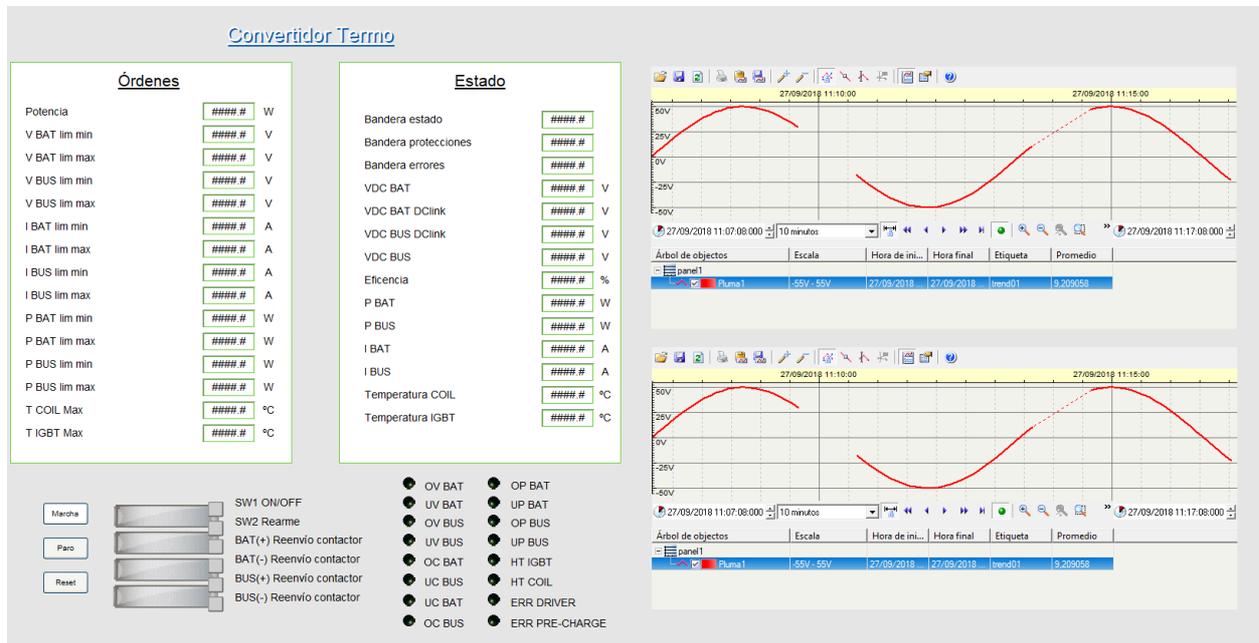


Figura 4.4. Página del convertidor DC/DC – Baterías Ion-Litio.

Con el SCADA creado para la operación del convertidor se puede:

- Encendido, Paro o Reset del DCDC.
- Visualización del sistema: Bandera de comandos, bandera de protecciones y bandera de errores.
- Envío de consignas para establecer la potencia de suministro del convertidor, establecer los límites de voltaje, intensidad, potencia de la batería o del bus y las temperaturas del COIL y del IGBT interno del convertidor.
- Visualización de las variables en estado real y guardar los datos en un archivo Excel, con la ayuda de Process Analyst Control.



# 5 CARACTERIZACIÓN Y MODELADO

**E**n este capítulo se pretende realizar una caracterización de los equipos que van a conformar el sistema, se trata de la batería de Ion-Litio, pila de combustible Nexa 1.2 kW y electrolizador AEM 2.3 kW.

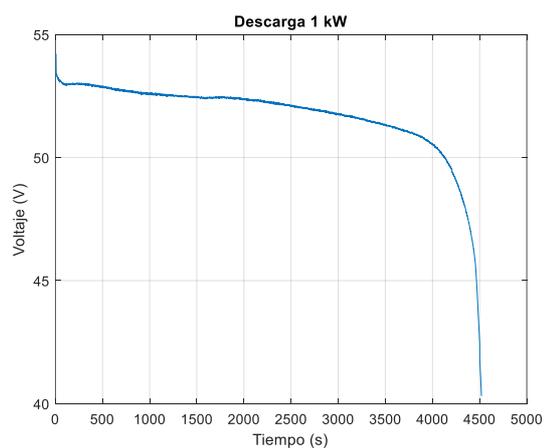
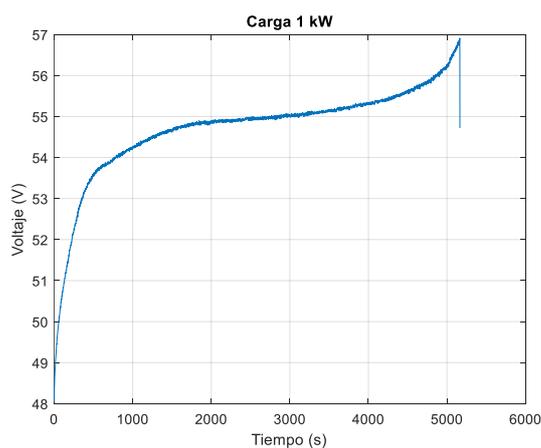
Para la caracterización de las baterías de Ion-Litio se utiliza el programa implementado en Unity Pro-XL y Vijeo CITECT, con esto se consigue un control de forma manual de las referencias de potencia y realizar una conversión inmediata de los valores reales de tensión y corriente del sistema de manera que se puedan visualizar en tiempo real. Dichos valores son almacenados de manera manual en el momento que se ejecuta el programa implementado en el SCADA.

Para la caracterización de la pila de combustible y del electrolizador se han utilizado datos ya proporcionados, en el caso del electrolizador, datos obtenidos de ensayos realizados en el laboratorio Hylab.

## 5.1 Caracterización de componentes

### 5.1.1 Caracterización de las baterías de Ion-Litio

Las baterías han sido caracterizadas experimentalmente llevando a cabo unos test de carga y descarga controlados para obtener su curva de funcionamiento (véase figura 5.1). Los test consisten en someter al banco de baterías de Ion-Litio a una potencia constante dada en forma de escalón para cada ensayo hasta sus límites inferior y superior, para descarga y carga. Esto nos permite encontrar la curva característica para la carga/descarga de la batería, así como la resistencia interna.



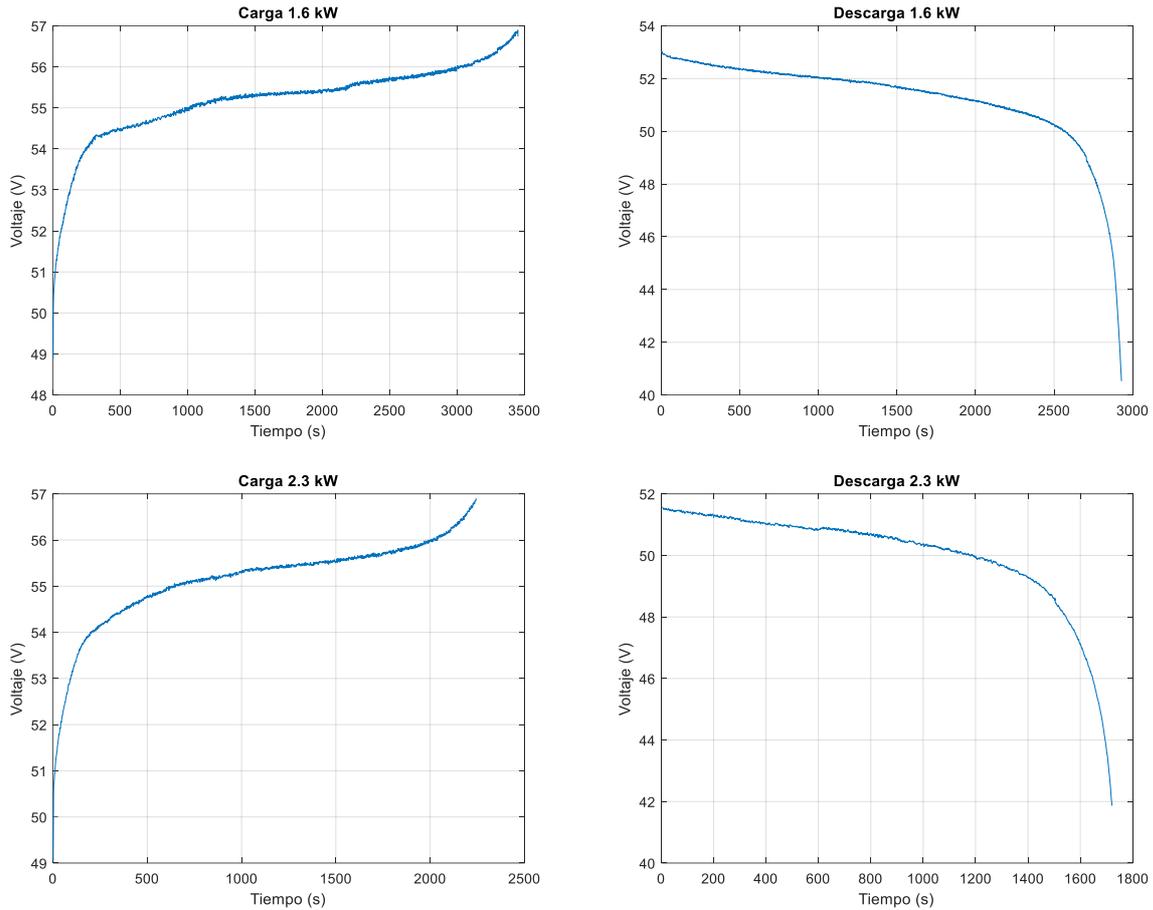


Figura 5.1. Test dinámico de carga y descarga de la batería de Ion-Litio.

La curva de funcionamiento obtenida se usará para estimar un valor inicial del estado de carga (SOC) en los sucesivos experimentos. Un parámetro clave es la tensión a circuito abierto, que se puede estimar para diferentes potencias de carga/descarga usando la resistencia interna encontrada en el test, como posible método para la estimación del SOC. Al no funcionar la planta en un modo continuo, ya que es una planta experimental, se puede pausar, encender y apagar durante el transcurso de cada prueba; se medirá la tensión inicial a circuito abierto y se realizará a continuación la integración de la corriente (saliente o entrante). Esto permite reiniciar el SOC con la tensión a circuito abierto de las baterías de Ion-Litio, de este modo no se acumula el error excesivo de integración, ya que cada vez que se mida el voltaje a circuito abierto se corrige la medida.

### 5.1.2 Caracterización pila de combustible Nexa 1.2 kW

Para la caracterización de la pila de combustible se han utilizado los datos proporcionados por el INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial).

En la figura 5.2. se muestra la curva polarización que representa la relación entre la tensión y la corriente en la pila de combustible.

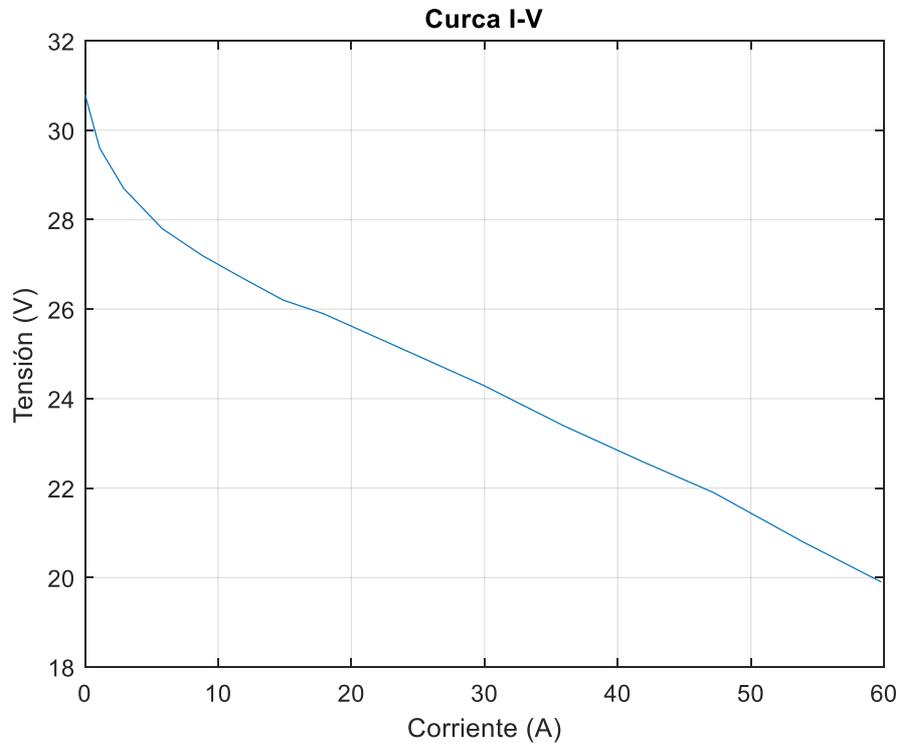


Figura 5.2. Curva de polarización pila de combustible.

El máximo punto de trabajo que se ha obtenido corresponde con: 59.8 A, 19.9 V, es decir 1190 W. Hay que indicar que someter a las celdas a altas intensidades podría causar un daño irreversible.

### 5.1.3 Caracterización del electrolizador AEM 2.3 kW

La figura 5.3 muestra la evolución del voltaje en los stack cuando se aplica una corriente creciente de manera gradual. Obteniéndose lo que se denomina la “curva de polarización”. La cual define la característica eléctrica del equipo. Esta curva es una herramienta indispensable para la integración del electrolizador en un sistema de potencia basado en hidrogeno y su validación en modelo.

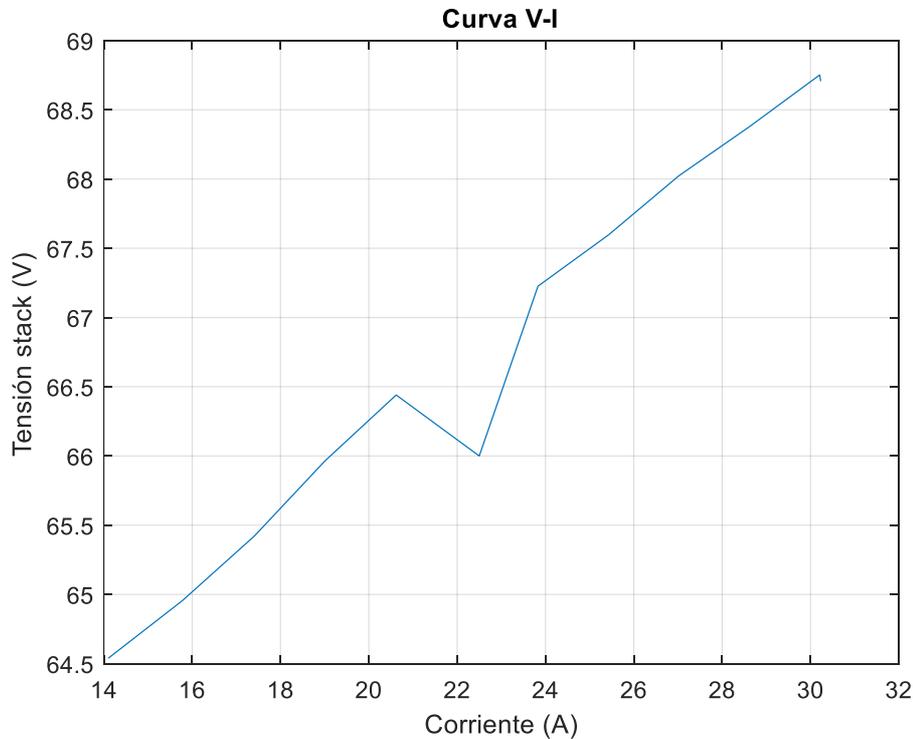


Figura 5.3. Curva de polarización del electrolizador.

## 5.2 Modelado de los componentes

Todos los modelos implementados en este proyecto están basados en la Tesis de Luis Valverde [2].

### 5.2.1 Modelado de las baterías de Ion-Litio

El modelo emplea una resistencia eléctrica interna ( $R_i$ ) para modelar la caída de tensión y una fuente de tensión controlada para modelar el comportamiento exponencial de la tensión de las baterías.

La tensión en bornes de la batería se puede describir por la siguiente ecuación:

$$V_{bt} = V_{bt,int} + R_i \cdot I_{bt}$$

Por otro lado, se hace necesario particularizar la tensión interna de la batería para el proceso de carga y el proceso de descarga. Teniéndose para el proceso de carga que:

$$V_{bat,int} = V_{bt,0} - K_{bt} \cdot \frac{C_{120,bt}}{C_{120,bt} - C_{out,t}} I_{bt}^* - K_{bt} \cdot \frac{C_{120,bt}}{C_{120,bt} - C_{out,t}} C_{out,t} + A_{bt} e^{B_{bt} C_{out,t}}$$

$$C_{out,t} = \int_0^t I_{bt} dt$$

Y de manera análoga, para el proceso de descarga de la batería, la tensión interna se describe como:

$$V_{bat,int} = V_{bt,0} - K_{bt} \cdot \frac{C_{120,bt}}{C_{out,t} + 0.1C_{120,bt}} I_{bt}^* - K_{bt} \cdot \frac{C_{120,bt}}{C_{120,bt} - C_{out,t}} C_{out,t} + A_{bt} e^{B_{bt} C_{out,t}}$$

Donde,  $V_{bt,0}$  es la tensión de la batería a circuito abierto.

$A_{bt}$ , es la amplitud de la zona exponencial (V).

$B_{bt}$ , representa la inversa de la constante de tiempo en la zona exponencial ( $Ah^{-1}$ ).

$K_{bt}$ , es la constante de polarización.

$C_{out,t}$ , es la capacidad actual de la batería (Ah).

$C_{120,bt}$ , es la capacidad máxima de la batería (Ah).

Con esta ecuación se puede obtener un modelo semi-empírico, en función de una serie de parámetros que se pueden determinar experimentalmente. Los parámetros para este modelo se muestran en la tabla 6.

Parámetros	Valor por defecto
Voltaje de la batería en circuito abierto, "Vbt,0"	56.02 V
Capacidad máxima de la batería, "C120,bt"	400 A · h
Constante de polarización, "Kbt"	0.001215 V
Amplitud de la zona exponencial, "Abt"	1.000 V
Inversa de la constante de tiempo en la zona experimental, "Bbt"	0.12 A · h <sup>-1</sup>
Resistencia interna, "Ri"	0.01 Ω
SOC Inicial de la batería	50 %

Tabla 8. Parámetros del modelo de baterías Ion-Litio.

Sin embargo, estos parámetros en la práctica cambian para cada condición de operación. Por tanto, habrá que asumir ciertas hipótesis y simplificaciones que no quitan validez al modelo dado que los errores del modelo respecto a los resultados experimentales no son importantes como se verá.

Los parámetros señalados en la tabla 8, no todos se han obtenido del fabricante ya que algunos se han identificado de manera experimental mediante el ajuste de la curva del modelo a los datos obtenidos.

### 5.2.1.1 Validación experimental del modelo de baterías

La validación del modelo matemático se ha llevado a cabo realizando el siguiente ensayo:

El experimento consiste en obtener la evolución de la tensión de la batería a media que se va cargando o descargando. Para ello, se somete a una demanda de potencia constante. Este ensayo se corresponde con el de caracterización presentado en el anterior apartado del capítulo, y sirve para la validación del modelo. Como se observa en la figura 5.4., se obtiene la curva de tensión de la batería a medida que se carga o descarga y se ajusta al modelo con justa precisión.

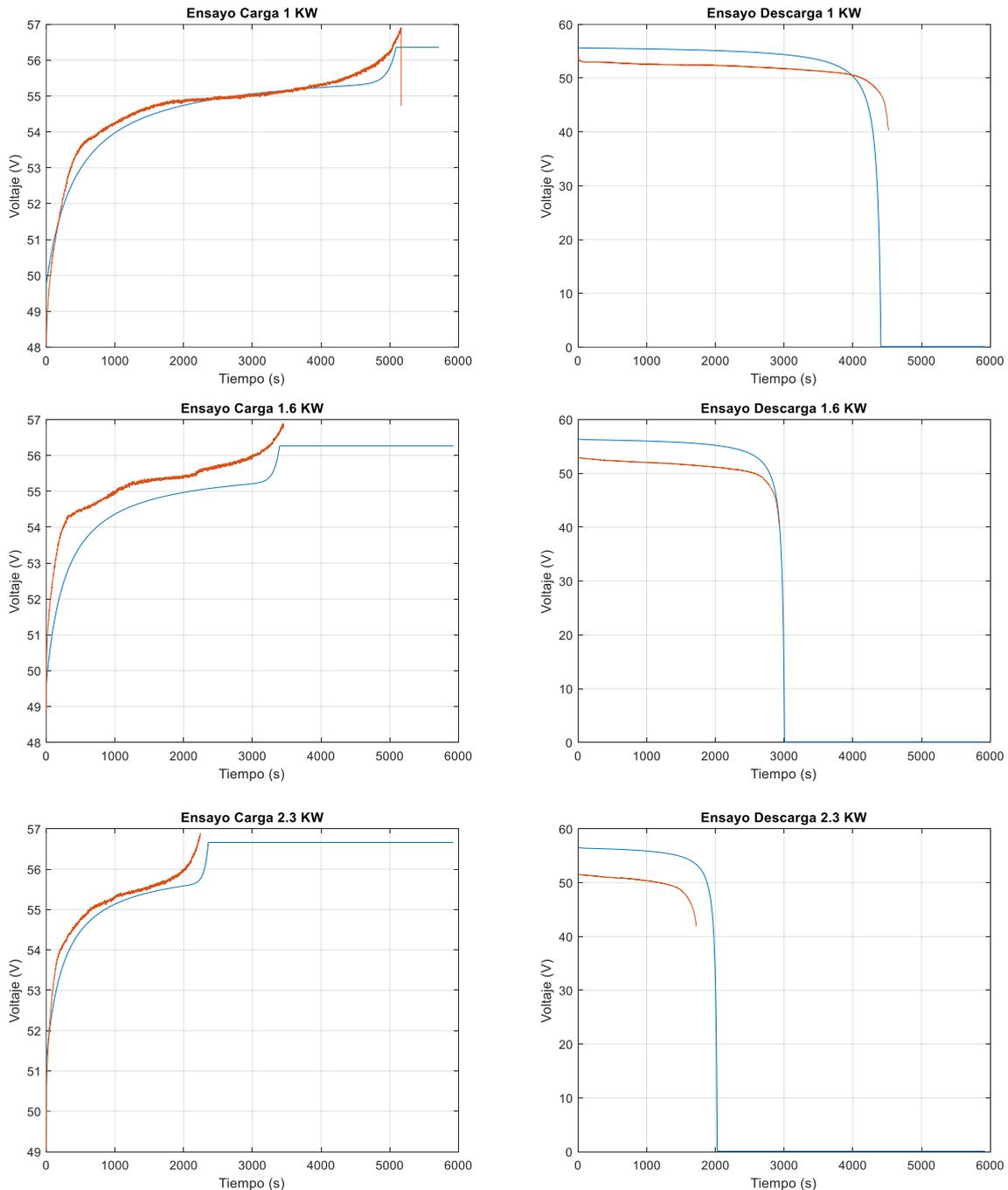


Figura 5.4. Test de validación de la batería de Ion-Litio.

Como se observa en la figura 5.4. el ajuste es mejor para los ensayos de carga de la batería.

### 5.2.1.2 Simulaciones del modelo de baterías

En este apartado, se presenta los resultados obtenidos con el modelo y parámetros obtenidos para simulaciones a potencia constante de carga y descarga para el cálculo del modelo de las baterías de Ion-Litio para la matriz MPC a implementar en el capítulo 6 de este proyecto.

Como se puede ver en la tabla 9, se han realizado ensayos a potencia constante en un tiempo de simulación de 30 min y con distinto SOC inicial tanto para carga como descarga de las baterías de Ion-Litio.

Para el cálculo de la pendiente se ha utilizado la diferencia entre el valor final del SOC obtenido en simulación con el establecido inicialmente partido el tiempo de simulación. Una vez obtenido la pendiente del SOC se ha calculado la constante característica en función de la potencia introducida a las baterías de Ion-Litio.

Potencia_carga (W)	Potencia_descarga (W)	SOC_inicial	SOC_final	tiempo (min)	DELTA SOC	Pendiente SOC	Constante
1750		20	24,054	30	4,054	0,135133333	7,7219E-05
1750		30	34,003	30	4,003	0,133433333	7,62476E-05
1750		40	43,977	30	3,977	0,132566667	7,57524E-05
1750		50	53,961	30	3,961	0,132033333	7,54476E-05
1750		60	63,95	30	3,95	0,131666667	7,52381E-05
1750		70	73,942	30	3,942	0,1314	7,50857E-05
1750		80	83,936	30	3,936	0,1312	7,49714E-05
	1750	30	26,015	30	-3,985	-0,132833333	-7,59048E-05
	1750	40	36,05	30	-3,95	-0,131666667	-7,52381E-05
	1750	50	46,07	30	-3,93	-0,131	-7,48571E-05
	1750	60	56,083	30	-3,917	-0,130566667	-7,46095E-05
	1750	70	66,092	30	-3,908	-0,130266667	-7,44381E-05
	1750	80	76,099	30	-3,901	-0,130033333	-7,43048E-05
	1750	90	86,104	30	-3,896	-0,129866667	-7,42095E-05
1000		20	22,315	30	2,315	0,077166667	7,71667E-05
1000		30	32,284	30	2,284	0,076133333	7,61333E-05
1000		40	42,268	30	2,268	0,0756	0,0000756
1000		50	52,259	30	2,259	0,0753	0,0000753
1000		60	62,253	30	2,253	0,0751	0,0000751
1000		70	72,248	30	2,248	0,074933333	7,49333E-05
1000		80	82,245	30	2,245	0,074833333	7,48333E-05
	1000	30	27,722	30	-2,278	-0,075933333	-7,59333E-05
	1000	40	37,74	30	-2,26	-0,075333333	-7,53333E-05
	1000	50	47,751	30	-2,249	-0,074966667	-7,49667E-05
	1000	60	57,758	30	-2,242	-0,074733333	-7,47333E-05
	1000	70	67,763	30	-2,237	-0,074566667	-7,45667E-05
	1000	80	77,767	30	-2,233	-0,074433333	-7,44333E-05
	1000	90	87,77	30	-2,23	-0,074333333	-7,43333E-05
500		20	21,157	30	1,157	0,038566667	7,71333E-05
500		30	31,141	30	1,141	0,038033333	7,60667E-05
500		40	41,133	30	1,133	0,037766667	7,55333E-05
500		50	51,125	30	1,125	0,0375	0,000075
500		60	61,125	30	1,125	0,0375	0,000075
500		70	71,123	30	1,123	0,037433333	7,48667E-05
500		80	81,121	30	1,121	0,037366667	7,47333E-05
	500	30	28,861	30	-1,139	-0,037966667	-7,59333E-05
	500	40	38,869	30	-1,131	-0,0377	-0,0000754
	500	50	48,874	30	-1,126	-0,037533333	-7,50667E-05
	500	60	58,878	30	-1,122	-0,0374	-0,0000748
	500	70	68,88	30	-1,12	-0,037333333	-7,46667E-05
	500	80	78,882	30	-1,118	-0,037266667	-7,45333E-05
	500	90	88,883	30	-1,117	-0,037233333	-7,44667E-05

Carga	7,55887E-05
Descarga	-7,48918E-05
media	7,52402E-05

%SOC/W

0,075240249

%SOC/KW

continuo

2,257207483

%SOC/KW

discretizado

Tabla 9. Modelado baterías Ion-Litio.

### 5.2.2 Modelado de pila de combustible

El modelo implementado en este proyecto de la pila de combustible está basado en la Tesis de Luis Valverde [2]. Se trata de un modelo simplificado compuesto por dos bloques principales: Modelo estático electroquímico y modelo dinámico térmico.

La expresión que expresa el voltaje final que ofrecería la pila de combustible sería, el voltaje de una mono celda, multiplicado por el número de celdas se puede descomponer de la siguiente forma:

$$V_{st} = n_{fc} \cdot V_{fc}$$

La curva de polarización se puede describir por:

$$V_{fc} = x_1 + x_2(T_{st} - T_{st}^0) + x_3(0.5 \ln(P_{O_2,ca}) + \ln(P_{H_2})) - x_4(1 - \exp(-j/x_5)) - x_6j - x_7j^{(1+x_8)}$$

$$j = \frac{I_{st}}{A_{fc}}$$

Donde,  $V_{fc}$ , es la tensión del stack (V)

$I_{st}$ , es la corriente que genera el stack (A)

$A_{fc}$ , es el área efectiva de la membrana ( $cm^2$ )

$j$ , es la densidad de corriente en el stack ( $A \text{ cm}^{-2}$ )

$T_{st}^0$ , es la temperatura nominal del stack (K)

$T_{st}$ , es la temperatura del stack (K)

$P_{O_2,ca}$ , es la presión de oxígeno en el cátodo (bar)

$P_{H_2}$ , es la presión de hidrogeno en el ánodo (bar)

La ecuación del modelo esta particularizada por unos coeficientes  $x_i$  que son calculados por el método que se presenta a continuación:

- En primer lugar, se necesitan 4 puntos experimentales  $(p_{ij}, p_{ji})$  que definen la forma de la curva de polarización.
- También se necesitan algunos coeficientes experimentales:

$$\frac{\Delta V_{fc}}{\Delta T_{st}} \text{ Y } \frac{\Delta V_{fc}}{\Delta P_{O_2}}$$

Que se obtienen experimentalmente, tras hacer funcionar la pila cerca del punto de operación.

Los 4 puntos  $(p_{ij}, p_{ji})$  característicos de los que hablamos deben ser escogidos de tal modo que dividan la curva de polarización en tres partes, cada uno corresponde a una de las tres caídas de voltaje.

Por otra parte, conocemos que los coeficientes  $x_i$  vienen dados por las expresiones:

$$x_8 = \frac{1 + p_{4i}^2}{0.25p_{4i}}$$

$$x_7 = \frac{(p_{4v} - p_{3v}) + (p_{2v} - p_{3v})(p_{4i} - p_{3i})/(p_{3i} - p_{2i})}{-p_{4i}^{(1+x_8)} + p_{3i}^{(1+x_8)}(p_{4i} - p_{3i})/(p_{3i} - p_{2i})}$$

$$x_6 = \frac{(p_{2v} - p_{3v}) - x_7 p_{3i}^{(1+x_8)}}{(p_{3i} - p_{2i})}$$

$$x_5 = \frac{p_{2i} - p_{1i}}{4}$$

$$x_4 = p_{1v} - p_{2v} - x_6 p_{2i}$$

$$x_3 = 2P_{O_2,ca} \frac{\Delta V_{fc}}{\Delta P_{O_2}}$$

$$x_2 = \frac{\Delta V_{fc}}{\Delta T_{st}}$$

$$x_1 = p_{1v} - x_3(0.5 \ln(P_{O_2,ca}) + \ln(P_{H_2}))$$

Las ecuaciones descritas permiten definir completamente la curva de polarización para la pila de combustible.

El hidrogeno requerido por la pila de combustible para producir la potencia demanda viene dado por la ecuación:

$$\dot{n} = \frac{n_{cells} I}{zF}$$

Donde,  $\dot{n}$ , es el caudal de hidrogeno demandado ( $mol\ s^{-1}$ )

N, es el número de celdas de la pila combustible

I, es la corriente eléctrica que atraviesa el stack (A)

Z, es el número de electronos por molécula (2)

F, es la constante de Faraday (96500)

Los parámetros que se han usado para caracterizar el modelo de nuestra pila AEM son:

Parámetros	Valor por defecto
Temperatura del stack, " $T_{st}$ "	293 K
Temperatura nominal del stack, " $T_{st}^0$ "	296 K
Área efectiva de la membrana, " $A_{fc}$ "	93 $cm^2$
Número de celdas, " $n_{fc}$ "	36
Corriente máxima	36 A
Presión de oxígeno en el cátodo, " $P_{O_2,ca}$ "	0.34 bar
Presión de hidrógeno en el ánodo, " $P_{H_2}$ "	1.32 bar
$\frac{\Delta V_{fc}}{\Delta T_{st}}$	$2.93 \cdot 10^{-3} (V\ K^{-1})$
$\frac{\Delta V_{fc}}{\Delta P_{O_2}}$	$0.85 (V\ bar^{-1})$

Tabla 10. Parámetros del modelo de pila de combustible.

### 5.2.2.1 Validación del modelo de pila de combustible

En esta sección se presentarán los resultados de validación del modelo. Los puntos seleccionados para el algoritmo son:

$p_{ji}$	$p_{ij}$
0	30.8
5.8	27.8
41.8	22.6
59.8	19.9

Tabla 11. Puntos de corriente y tensión escogidos de la curva de polarización experimental.

Se ha programado en Matlab un archivo .m que calcula los valores de  $x_i$  del algoritmo usando los datos de la tabla 10 y 11. Donde se obtiene:

Coefficiente	Valor
$x_1$	0.861
$x_2$	0.0029
$x_3$	0.5780
$x_4$	0.0743
$x_5$	0.0156
$x_6$	0.3242
$x_7$	0.02130
$x_8$	8.0028

Tabla 12. Parámetros obtenidos de  $x_i$ .

Una vez obtenidos los parámetros característicos de la curva de polarización del modelo, podemos representar dicha curva juntamente con los valores experimentales, para comprobar la semejanza del modelo.

Se observa en la figura 5.5 que el ajuste de la curva del modelo con los experimentales es bueno. Por lo que podemos considerar el modelo como adecuado.

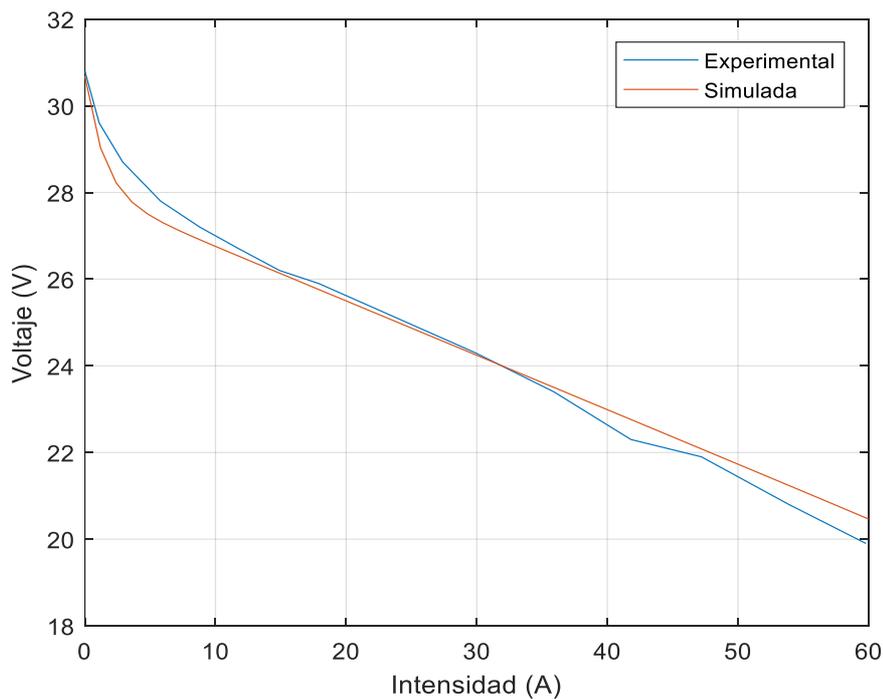


Figura 5.5. Validación pila de combustible.

### 5.2.2.2 Simulaciones del modelo de pila de combustible

En este apartado, se presenta los resultados obtenidos con el modelo y parámetros obtenidos para simulaciones a potencia constante de carga para el cálculo del modelo de la pila de combustible para la matriz MPC a implementar en el capítulo 6 de este proyecto.

Como se puede ver en la tabla 13, se han realizado ensayos a potencia constante en un tiempo de simulación de 30 min y con distinto LOH (nivel de hidruros) inicial para carga de los tanques de hidruros metálicos.

Para el cálculo de la pendiente se ha utilizado la diferencia entre el valor final del LOH obtenido en simulación con el establecido inicialmente partido el tiempo de simulación. Una vez obtenido la pendiente del LOH se ha calculado la constante característica en función de la potencia de la pila de combustible.

Potencia_carga (W)	Potencia_descarga (W)	LOH_inicial	LOH_final	tiempo (min)	DELTA LOH	Pendiente LOH	Constante
1000		20	25,5	30	5,5	0,183333333	0,000183333
1000		30	34,81	30	4,81	0,160333333	0,000160333
1000		40	44,13	30	4,13	0,137666667	0,000137667
1000		50	53,44	30	3,44	0,114666667	0,000114667
1000		60	62,75	30	2,75	0,091666667	9,16667E-05
1000		70	72,06	30	2,06	0,068666667	6,86667E-05
1000		80	81,38	30	1,38	0,046	4,6E-05
	1000	30	23,52	30	-6,48	-0,216	-0,000216
	1000	40	31,36	30	-8,64	-0,288	-0,000288
	1000	50	39,19	30	-10,81	-0,360333333	-0,000360333
	1000	60	47,03	30	-12,97	-0,432333333	-0,000432333
	1000	70	54,87	30	-15,13	-0,504333333	-0,000504333
	1000	80	62,71	30	-17,29	-0,576333333	-0,000576333
	1000	90	70,55	30	-19,45	-0,648333333	-0,000648333
750		20	24,19	30	4,19	0,139666667	0,000186222
750		30	33,67	30	3,67	0,122333333	0,000163111
750		40	43,15	30	3,15	0,105	0,00014
750		50	52,62	30	2,62	0,087333333	0,000116444
750		60	62,1	30	2,1	0,07	9,33333E-05
750		70	71,57	30	1,57	0,052333333	6,97778E-05
750		80	81,05	30	1,05	0,035	4,66667E-05
	750	30	25,16	30	-4,84	-0,161333333	-0,000215111
	750	40	33,55	30	-6,45	-0,215	-0,000286667
	750	50	41,93	30	-8,07	-0,269	-0,000358667
	750	60	50,32	30	-9,68	-0,322666667	-0,000430222
	750	70	58,71	30	-11,29	-0,376333333	-0,000501778
	750	80	67,09	30	-12,91	-0,430333333	-0,000573778
	750	90	75,48	30	-14,52	-0,484	-0,000645333
500		20	22,85	30	2,85	0,095	0,00019
500		30	32,49	30	2,49	0,083	0,000166
500		40	42,14	30	2,14	0,071333333	0,000142667
500		50	51,78	30	1,78	0,059333333	0,000118667
500		60	61,43	30	1,43	0,047666667	9,53333E-05
500		70	71,07	30	1,07	0,035666667	7,13333E-05
500		80	80,71	30	0,71	0,023666667	4,73333E-05
	500	30	26,77	30	-3,23	-0,107666667	-0,000215333
	500	40	35,7	30	-4,3	-0,143333333	-0,000286667
	500	50	44,62	30	-5,38	-0,179333333	-0,000358667
	500	60	53,55	30	-6,45	-0,215	-0,00043
	500	70	62,47	30	-7,53	-0,251	-0,000502
	500	80	71,4	30	-8,6	-0,286666667	-0,000573333
	500	90	80,32	30	-9,68	-0,322666667	-0,000645333

Carga	0,00011663	
Descarga	-0,000430884	
media	0,000273757	%LOH/W
	0,273756614	%LOH/KW continuo
	8,122698413	%LOH/KW discretizado

Tabla 13. Modelado Pila de combustible y Electrolizador.

### 5.2.3 Modelado de electrolizador AEM

En esta sección se desarrolla el modelo dinámico de un electrolizador tipo AEM (Alkaline Membrane Electrolysis). El objetivo de este apartado es la obtención de un modelo que sea capaz de ofrecer una descripción adecuada del electrolizador con fines de control durante su operación en plantas de potencia basadas en hidrogeno.

Para que se produzcan las reacciones del proceso de electrolisis se establece una diferencia de potencial en la celda que generan las reacciones al paso de la corriente. El modelo electroquímico permite obtener la curva característica tensión-intensidad de una celda. La caída de tensión que se establece es producto por tanto de varios fenómenos en el interior de la celda, que se pueden diferenciar por los sumandos que constituyen la siguiente formula:

$$V_{celda} = V_0 + \eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{ion}$$

Donde,  $V_0$ , es el voltaje reversible (V).

$\eta_{act}$ , es el potencial de activación de los electrodos (V).

$\eta_{ohm}$ , es la caída de tensión debida a la resistencia interna (V).

$\eta_{ion}$ , corresponde con las perdidas relacionadas con la concentración iónica (V).

La caída de tensión total en el stack del electrolizador vendrá dada por el producto del número de celdas aplicadas en serie y el voltaje, tal que la expresión siguiente:

$$V_{stack} = n \cdot V_{celda}$$

El voltaje reversible tiene una expresión que muestra dependencia tanto de la temperatura como de las presiones parciales de los productos de la reacción.

$$V_0 = V_{0rev} + \frac{2.3 RT \log(P_{H_2}^2 P_{O_2})}{4F}$$

Donde R es la constante de los gases ideales, T es la temperatura en Kelvin,  $P_{H_2}$  y  $P_{O_2}$  son las presiones parciales de los gases (bar) y F es la constante de Faraday.  $V_{0rev}$  viene dado por:

$$V_{0rev} = 1.23 - 0.9^{-3}(T_{stack} - 298)$$

El potencial de activación de los electrodos se puede deducir por la siguiente expresión:

$$V_{act} = \frac{RT}{F} \sin^{-1} \left[ \frac{1}{2} (i/i_{ao}) \right] + \frac{RT}{F} \sin^{-1} \left[ \frac{1}{2} (i/i_{co}) \right] + \left( \frac{\delta_B}{\sigma_B} \right) i$$

Donde,  $i$ , es la densidad de corriente en el stack ( $A \text{ cm}^{-2}$ )

$i_{ao}$ , es la densidad de corriente en el cátodo ( $A \text{ cm}^{-2}$ )

$i_{co}$ , es la densidad de corriente en el ánodo ( $A \text{ cm}^{-2}$ )

$\delta_B$ , es la anchura de la membrana ( $\mu\text{m}$ )

$\sigma_B$ , es la conductividad de la membrana (S/cm)

Por último, tenemos la ecuación que nos describe  $\eta_{ohm}$  y  $\eta_{ion}$ :

$$\eta_{ohm} + \eta_{ion} = \frac{\delta_B I}{A_{stack} \sigma_B}$$

Donde,  $A_{stack}$ , es el área de la membrana del electrolizador ( $cm^2$ )

Los parámetros para este modelo se muestran en la tabla 14.

Parámetros	Valor por defecto
Voltaje reversible, " $V_0$ "	1.23 V
Presión parcial del hidrógeno, " $P_{H_2}$ "	32 bar
Área de la membrana del electrolizador, " $A_{stack}$ "	8000 $cm^2$
Presión parcial del oxígeno, " $P_{O_2}$ "	4.5 bar
Densidad de corriente en el ánodo " $i_{ao}$ "	$2.4 \cdot 10^{-6} A/cm^2$
Densidad de corriente en el cátodo, " $i_{co}$ "	$1.5 \cdot 10^{-5} A/cm^2$
Número de celdas en el stack "n"	40
Temperatura del electrolizador	298 K
Potencia máxima	3200 W

Tabla 14. Parámetros del modelo del electrolizador.

### 5.2.3.1 Validación del modelo del electrolizador

Para la validación del modelo se ha obtenido experimentalmente la curva de funcionamiento principal del electrolizador, es decir, la curva de polarización (intensidad-voltaje) del equipo. Esta curva se compara con la obtenida en simulación.

El electrolizador se ha sometido a una entrada tipo rampa en intensidad suministrada. Se deja el equipo evolucionar durante un periodo de tiempo suficiente. En la figura 5.6 se puede ver que los resultados obtenidos por el modelo tienen un ajuste aceptable con los datos recogidos experimentalmente.

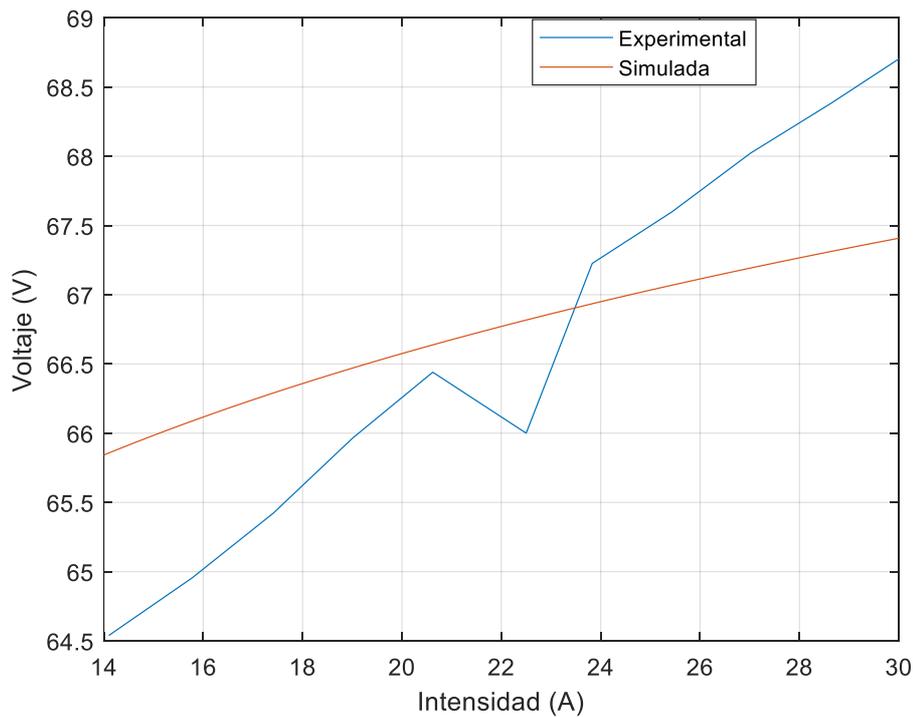


Figura 5.6. Validación del electrolizador AEM.

Para poder concluir que los resultados obtenidos demuestran una buena validez del modelo obtenido, hacemos uso de la gráfica de potencia para el mismo ensayo. (véase figura 5.7)

Esto nos permite usar el modelo para predecir con exactitud el comportamiento del electrolizador.

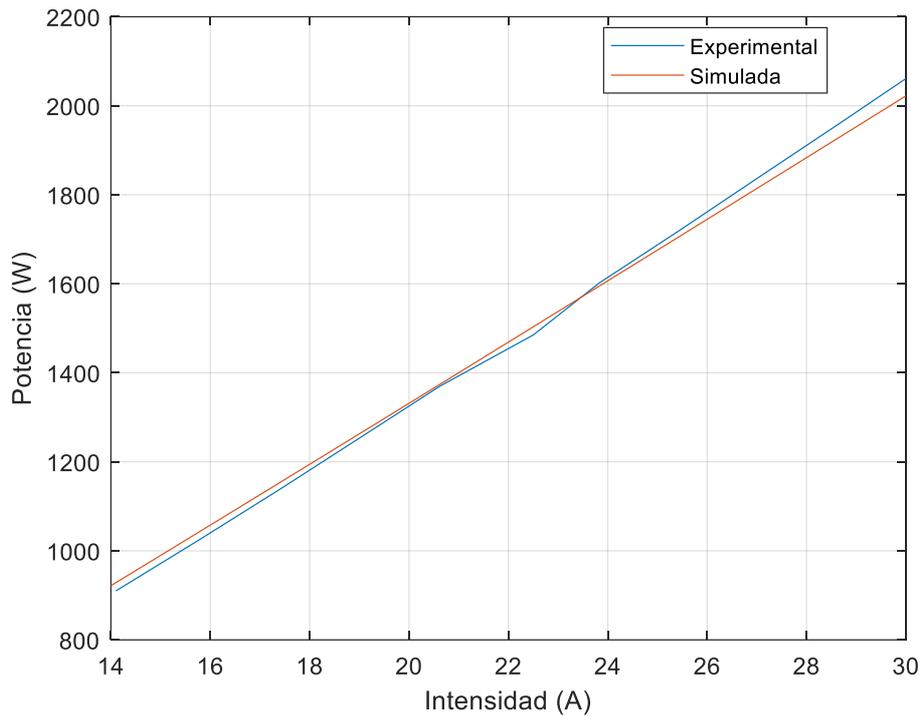


Figura 5.7. Validación Curva I-P del electrolizador.

### 5.2.3.2 Simulaciones del modelo del electrolizador

En este apartado, se presenta los resultados obtenidos con el modelo y parámetros obtenidos para simulaciones a potencia constante de carga para el cálculo del modelo del electrolizador para la matriz MPC a implementar en el capítulo 6 de este proyecto.

Para saber los resultados véase la tabla 13, donde se han realizado ensayos a potencia constante en un tiempo de simulación de 30 min y con distinto LOH (nivel de hidruros) inicial para descarga de los tanques de hidruros metálicos.

Para el cálculo de la pendiente se ha utilizado la diferencia entre el valor final del LOH obtenido en simulación con el establecido inicialmente partido el tiempo de simulación. Una vez obtenido la pendiente del LOH se ha calculado la constante característica en función de la potencia del electrolizador.



# 6 INTEGRACIÓN DE LAS BATERÍAS DE ION-LITIO EN LA MICRORRED HYLAB

En este capítulo se desarrolla el nuevo modelo implementado en el simulador de la microrred, teniendo en cuenta que son los componentes actuales del laboratorio Hylab.

Se muestra el desarrollo del control predictivo basado en modelo (MPC) para el control de la microrred del laboratorio Hylab considerando restricciones y costes de operación.

Por ultimo se obtienen los resultados simulados para distintos escenarios con el control MPC.

## 6.1 Descripción del control MPC

El Model Predictive Control es una estrategia de control optima basada en el uso de un modelo dinámico para predecir el proceso de salida en instantes de tiempo futuro, tal y como se ha explicado en el capítulo 2, apartado 2.1 de este TFM.

El modelo utilizado del sistema se basa en el descrito por Guillermo Teno en el artículo: “Comparativa de algoritmos de Control Predictivo Distribuido aplicado a microrredes interconectadas” [10]. Con la modificación en nuestro caso de una nueva variable como es la potencia de las baterías de Ion-Litio, teniendo así un doble banco de baterías.

### 6.1.1 Modelo del MPC

El controlador desarrollado, expresado en espacios de estados, viene dado por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= A x(k) + B u(k) + B_a d(k) \\y(k) &= C x(k)\end{aligned}$$

Siendo  $x$ ,  $u$ ,  $y$ ,  $d$  los vectores asociados al estado, entradas controlables, salidas y perturbaciones, respectivamente.

Se puede definir las distintas entradas, salidas y estados que se consideran en el controlador. El vector de estados está conformado por el SOC y el LOH, los estados de carga de las baterías de plomo ácido y Ion-Litio, y de los hidruros metálicos.

$$x = \begin{bmatrix} SOC \\ LOH \\ SOC_{Li} \end{bmatrix}$$

El vector  $u$  de entradas controlables, en el caso de esta microrred, está formado por la potencia destinada al circuito de hidrogeno ( $P_{H2}$ ), la potencia del convertidor de las baterías de Ion-Litio ( $P_{cnv}$ ) y la potencia que se compra o vende a la red de distribución ( $P_{grid}$ ). Estas potencias se calculan minimizando una función de costes  $J$ . La potencia del circuito de hidrogeno, dependiendo de si es positiva o negativa, activara la pila de combustible o el electrolizador respectivamente.

$$u = \begin{bmatrix} P_{H2} \\ P_{grid} \\ P_{cnv} \end{bmatrix}$$

El vector de perturbaciones  $d$ , sigue siendo el mismo, se trata de un vector unidimensional. La  $P_{neta}$ , es el resultado de la diferencia entre la potencia generada de forma renovable (fuente fotovoltaica y eólica) y la potencia demandada, que se consideran dentro de las perturbaciones.

$$d = [P_{neta}]$$

Se sigue considerando que las salidas del sistema son los estados del mismo, siendo la matriz equivalente en este caso  $I_{3 \times 3}$ . Siendo el resto de las matrices del modelo, para una única microrred, y discretizadas a 30 s de la siguiente forma. En la tabla número 9 y 13, se pueden visualizar los nuevos parámetros obtenidos para la actualización de los componentes.

$$A = I_{3 \times 3}; B = \begin{bmatrix} 2.8087 & 2.8087 & 2.8087 \\ -8.2127 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.2572 \end{bmatrix}; B_d = \begin{bmatrix} 2.8087 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Es a través de este modelo, donde se incluyen la ecuación de balance de potencia de nuestro sistema, que queda de la siguiente manera:

$$P_{neta} + P_{H2} + P_{grid} + P_{cnv} + P_{bat} = 0$$

La  $P_{bat}$  se considera variable libre del sistema, calculándose como resultado del cumplimiento de la ecuación de balance, tener en cuenta que  $P_{neta}$  es dato y tanto  $P_{H2}$ ,  $P_{grid}$  y  $P_{cnv}$  son resultado de la minimización de  $J$ .

Finalmente se utiliza un modelo en espacios de estado ampliado en forma incremental.

### 6.1.2 Restricciones del controlador

Tal y como se explica en el capítulo 2, apartado 2.1.1.4, se modelan matemáticamente las restricciones operacionales de la microrred Hylab.

Las potencias mínimas y máximas del electrolizador y la pila PEM vienen motivadas por la seguridad en la operación de estos. En cuanto a la operación de la red, los límites los establecen la potencia de la carga electrónica (2.5 kW) y de la fuente electrónica (6 kW).

La potencia mínima y máxima de las baterías de Ion-Litio vienen determinadas por la potencia capaz de suministrar el convertidor DC/DC (3 kW).

La formulación para las restricciones del electrolizador y la pila del combustible serán de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ez,min} &= -20 \frac{W}{s} \leq \Delta P_{ez} \leq 20 \frac{W}{s} = \Delta P_{ez,max} \\ \Delta P_{FC,min} &= -20 \frac{W}{s} \leq \Delta P_{FC} \leq 20 \frac{W}{s} = \Delta P_{FC,max} \\ \Delta P_{bat,min} &= -250 \frac{W}{s} \leq \Delta P_{FC} \leq 250 \frac{W}{s} = \Delta P_{bat,max} \end{aligned}$$

En cuanto a la red, la potencia del convertidor de las baterías de Ion-Litio y la potencia neta, se consideran que tienen capacidad de responder rápidamente. Quedando las restricciones de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \Delta P_{grid,min} &= -1200 \frac{W}{s} \leq \Delta P_{grid} \leq 2200 \frac{W}{s} = \Delta P_{grid,max} \\ \Delta P_{net,min} &= -2500 \frac{W}{s} \leq \Delta P_{net} \leq 6000 \frac{W}{s} = \Delta P_{net,max} \\ \Delta P_{cnv,min} &= -2900 \frac{W}{s} \leq \Delta P_{cnv} \leq 2900 \frac{W}{s} = \Delta P_{cnv,max} \end{aligned}$$

Y finalmente, las restricciones en la salida de las variables se establecen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} SOC_{min} &= 40 \% \leq SOC \leq 75 \% = SOC_{max} \\ LOH_{min} &= 10 \% \leq LOH \leq 90 \% = LOH_{max} \\ SOC_{Li,min} &= 20 \% \leq SOC_{Li} \leq 80 \% = SOC_{Li,max} \end{aligned}$$

### 6.1.3 Función de coste

Siguiendo los objetivos planteados en el apartado 2.1.1.4, en esta sección se describe el diseño de la función de coste del controlador. La función de coste es el elemento que condiciona y conduce el comportamiento último del controlador mediante la selección adecuada de los pesos en la ecuación.

$$\begin{aligned} J = \sum_{k=1}^N & \delta_1 (SOC_{(t+k)} - SOC_{ref})^2 + \delta_2 (LOH_{(t+k)} - LOH_{ref})^2 + \delta_3 (SOC_{li,(t+k)} - SOC_{li,ref})^2 \\ & + \sum_{k=1}^{Nu} \alpha_1 P_{H2(t+k)}^2 + \alpha_2 P_{grid(t+k)}^2 + \alpha_3 P_{cnv(t+k)}^2 + \lambda_1 \Delta P_{H2(t+k)}^2 + \lambda_2 \Delta P_{grid(t+k)}^2 \\ & + \lambda_3 \Delta P_{cnv(t+k)}^2 \end{aligned}$$

Donde N representa el horizonte de predicción y el resto de las variables ya han sido definidas previamente. Los valores establecidos para las simulaciones del horizonte de predicción, el horizonte de control y el tiempo de muestreo son N=10, Nu=2 y T<sub>s</sub>=30.

Los pesos de la función de costes elegidos para las variables manipulables han sido:

$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	4	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0.02	$5 \cdot 10^{-4}$

Tabla 15. Pesos de la función de costes para el diseño del controlador MPC.

## 6.2 Resultados del controlador MPC en simulación

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de simulación tras implementar el controlador diseñado en el apartado anterior. Este es un paso obligatorio antes de la prueba experimental del controlador en la planta real, ya que permite detectar posibles errores o un mal funcionamiento sin generar posibles daños a la planta.

Los resultados de simulación que se muestran en las siguientes gráficas son para distintos escenarios, con un perfil de generación de día soleado, día nublado y un día con viento. De esta manera se compara el comportamiento del controlador con los distintos modos de operación.

A su vez, dichos modos de operación serán implementados y probados en la microrred Hylab para demostrar experimentalmente el funcionamiento de los mismos.

### 6.2.1 MPC simulación escenario día soleado

Las condiciones de simulación utilizadas son las siguientes:

- Tiempo de simulación: 86400 s (24 horas)
- Condiciones iniciales de reserva de energía: SOC=50 %, LOH=50% y SOC Li=50%

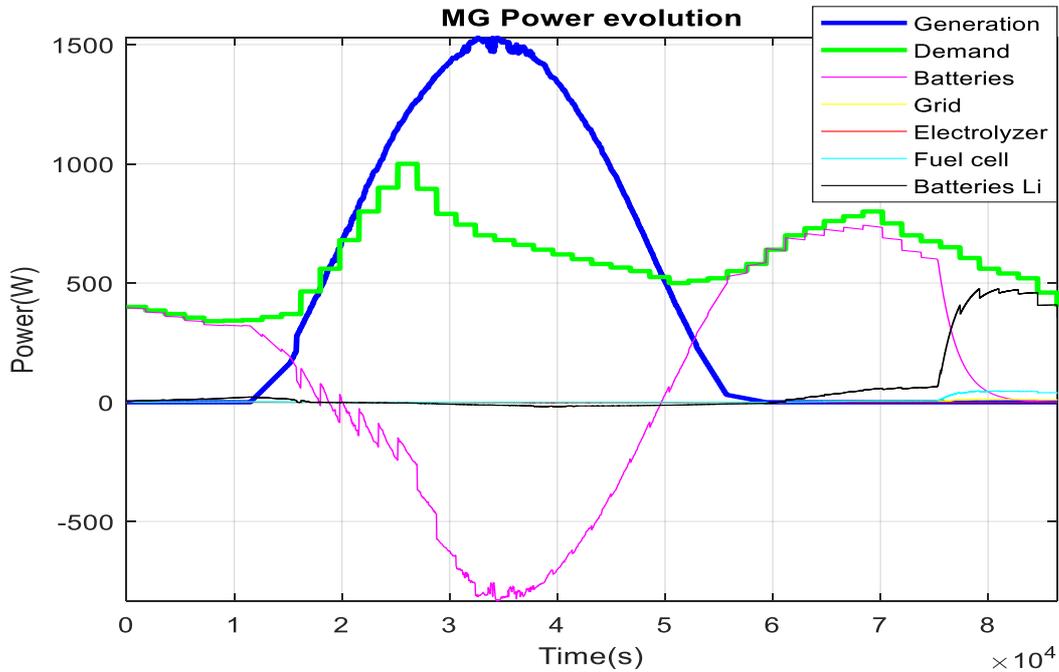


Figura 6.1. Potencias microrred con baterías Ion-Litio para día soleado con control MPC.

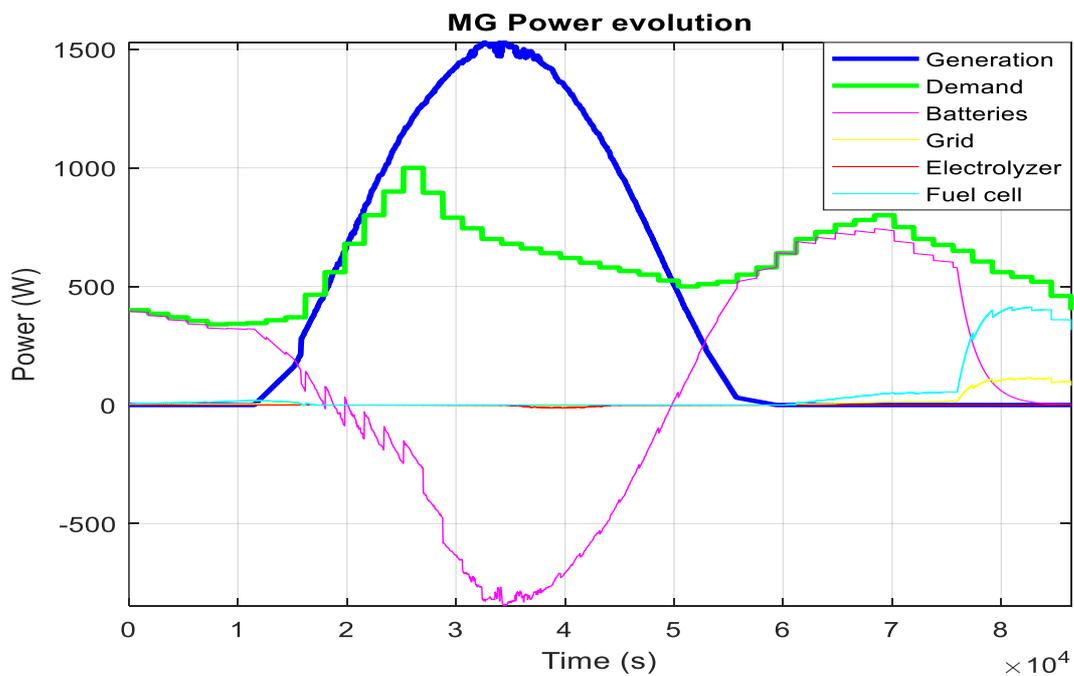


Figura 6.2. Potencias microrred sin baterías Ion-Litio para día soleado con control MPC.

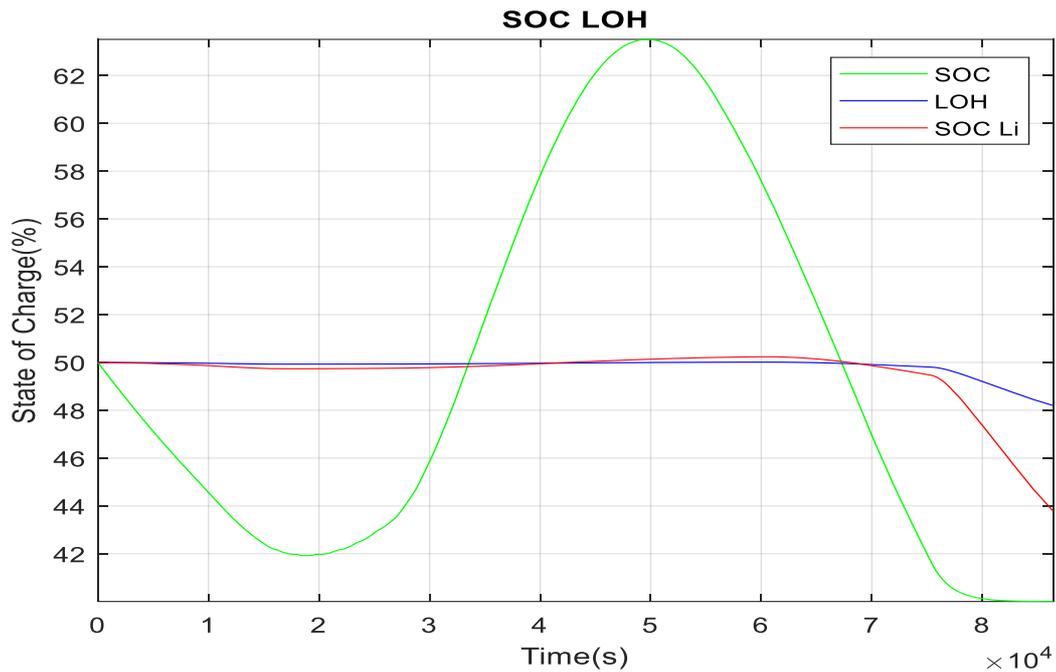


Figura 6.3. Nivel de carga con baterías Ion-Litio para día soleado con control MPC.

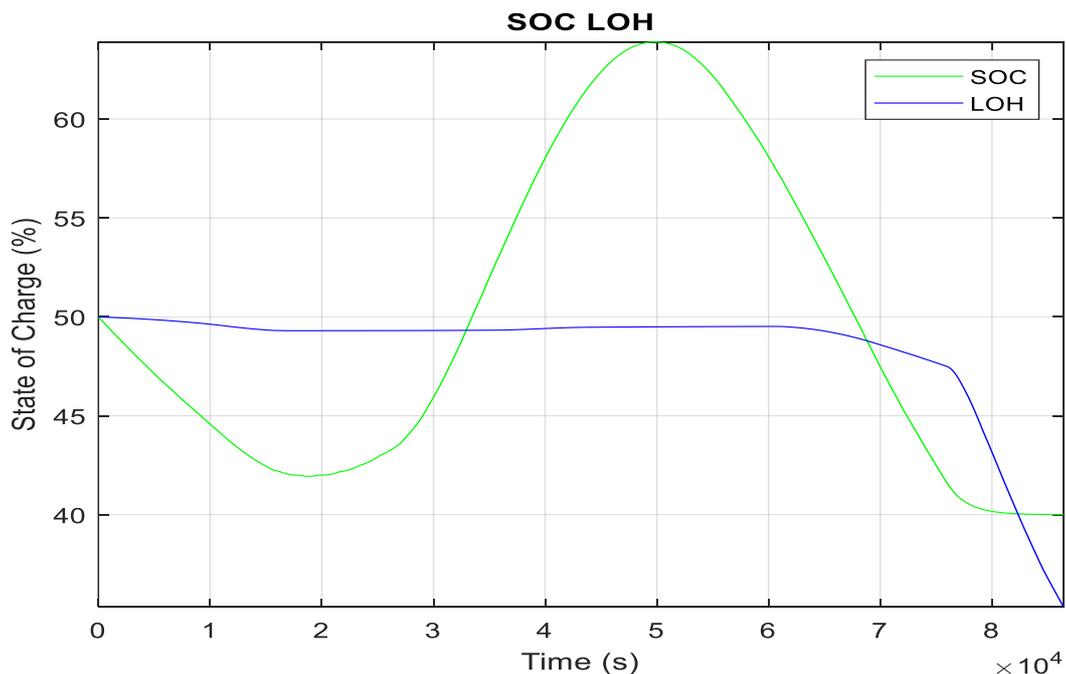


Figura 6.4. Nivel de carga sin baterías Ion-Litio para día soleado con control MPC.

Podemos observar en la figura 6.1 la actuación del controlador MPC. En primer lugar, emplea las baterías de plomo ácido para suministrar la demanda, una vez que la generación es superior a la demanda, las usa para almacenar la energía sobrante y posteriormente su descarga. Cuando la generación de energía es nula, actúan las baterías Ion-Litio y la pila de combustible, suministrando así la energía necesaria para la demanda. El resto de potencia necesaria se compra de la red.

La comparativa con el uso de las baterías de Ion-Litio, es un menor coste puesto que se le da un menor uso a la pila de combustible y se compra menos potencia de la red.

Deducimos que los valores de consigna de potencia son los óptimos calculados por el MPC según la función de costes propuesta en 6.1.3.

## 6.2.2 MPC simulación escenario día nublado

Las condiciones de simulación utilizadas son las siguientes:

- Tiempo de simulación: 86400 s (24 horas)
- Condiciones iniciales de reserva de energía: SOC=40 %, LOH=50% y SOC Li=50%

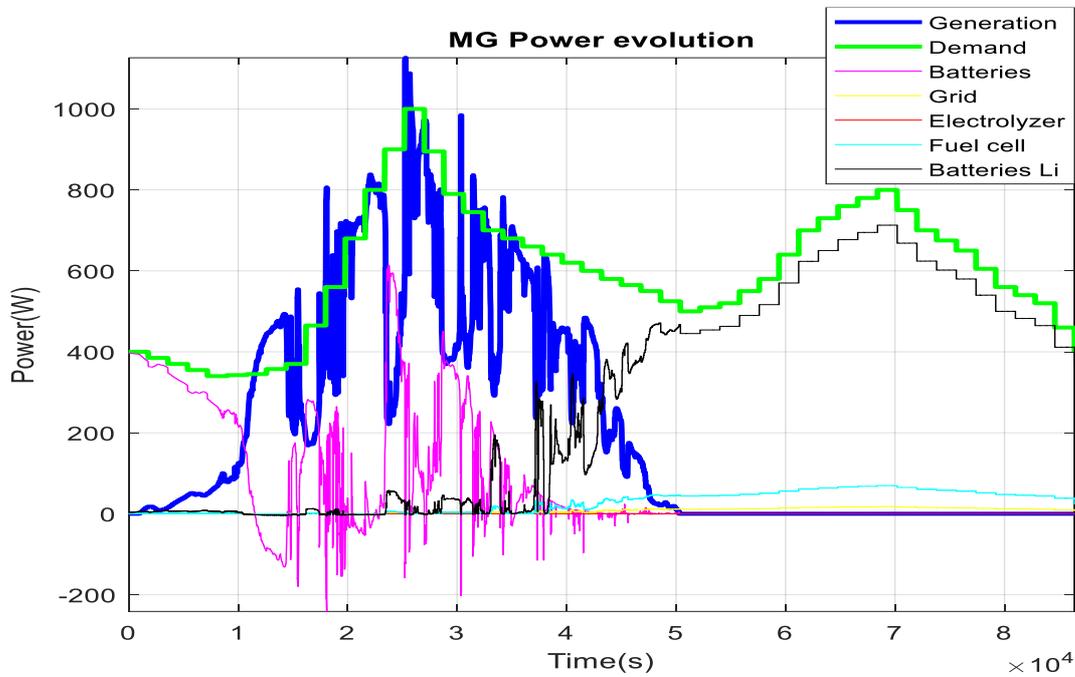


Figura 6.5. Potencias microrred con baterías Ion-Litio para día nublado con control MPC.

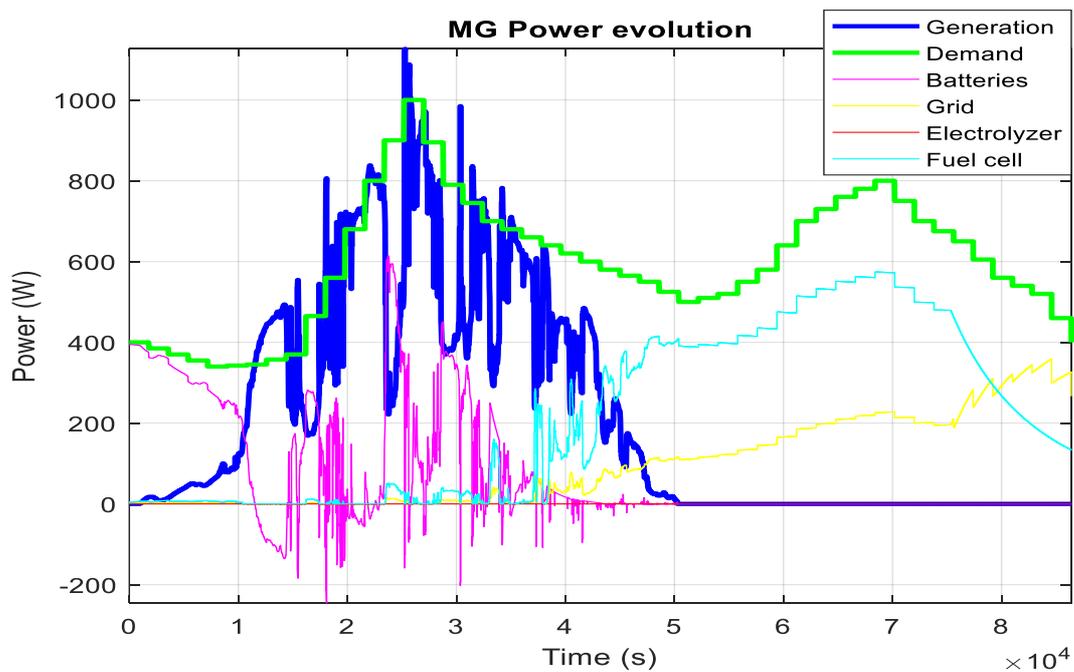


Figura 6.6. Potencias microrred sin baterías Ion-Litio para día nublado con control MPC.

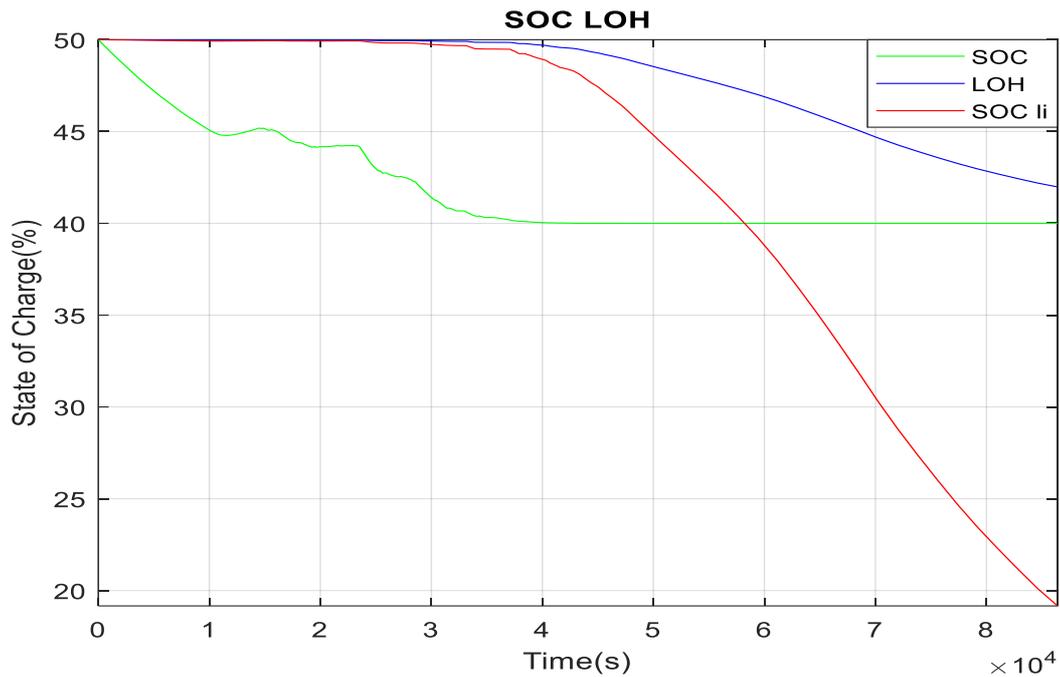


Figura 6.7. Nivel de carga con baterías Ion-Litio para día nublado con control MPC.

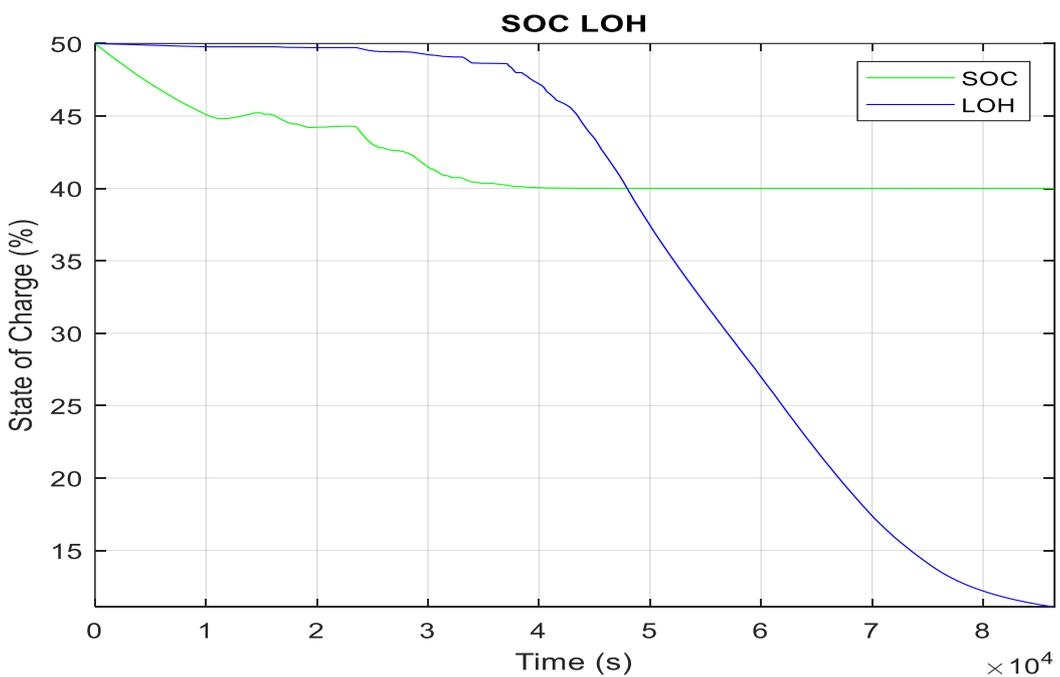


Figura 6.8. Nivel de carga sin baterías Ion-Litio para día nublado con control MPC.

En la figura 6.5 y 6.6, se puede observar la actuación del controlador MPC. En este caso, existe un déficit de energía que provoca una descarga de las baterías de plomo ácido primero y a continuación el controlador excoge las baterías de Ion-Litio como suministro de energía, utilizando por ultimo la pila de combustible. Con las baterías de Ion-Litio conseguimos un menor uso de la pila de combustible, pero a su vez que también haga menos uso de la red para suplir el déficit de energía. De esta forma utiliza la pila de combustible únicamente al final de la simulación ya que dispone de hidrogeno y le resulta más barato que utilizar la red.

### 6.2.3 MPC simulación escenario día con viento

Las condiciones de simulación utilizadas son las siguientes:

- Tiempo de simulación: 86400 s (24 horas)
- Condiciones iniciales de reserva de energía: SOC=50 %, LOH=50% y SOC Li=50%

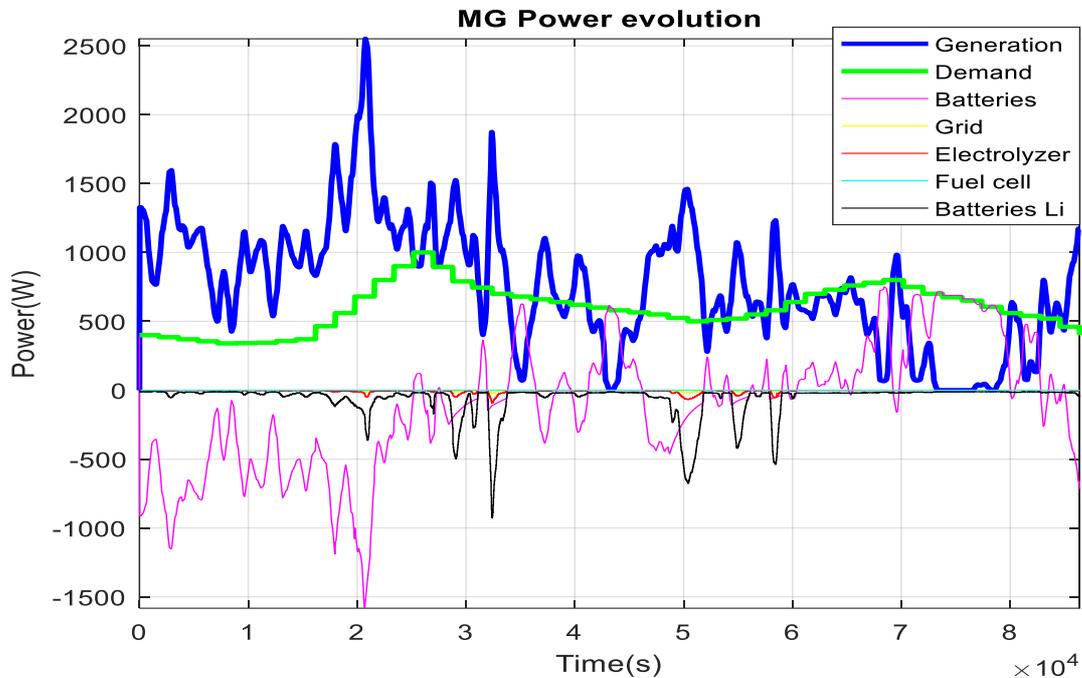


Figura 6.9. Potencias microrred con baterías Ion-Litio para día con viento con control MPC.

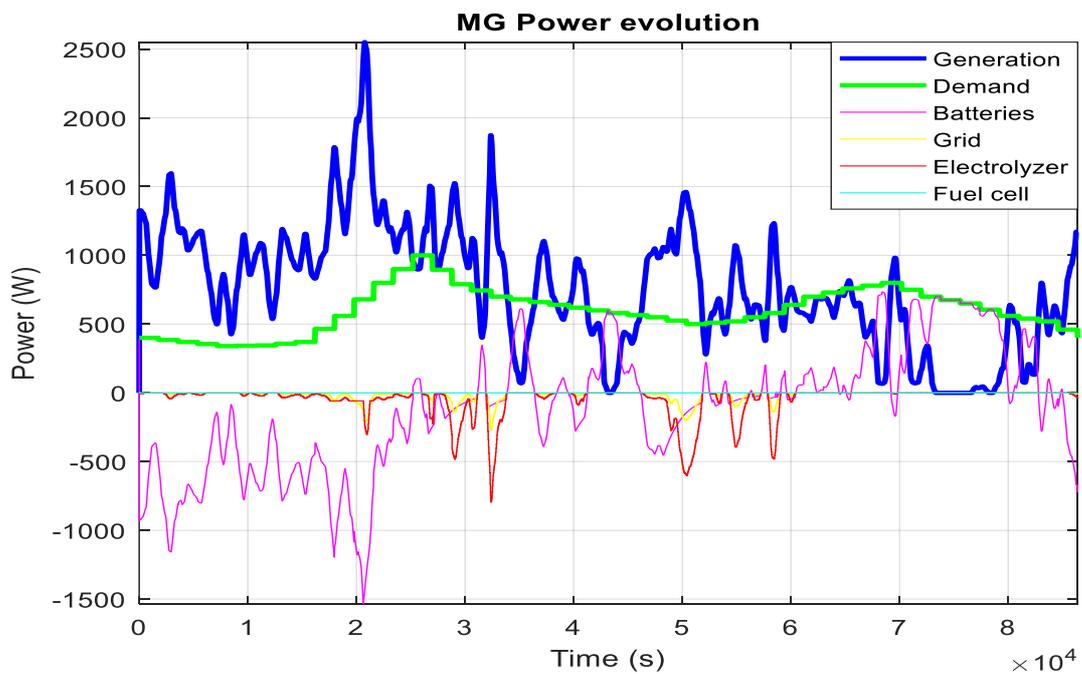


Figura 6.10. Potencias microrred sin baterías Ion-Litio para día con viento con control MPC.

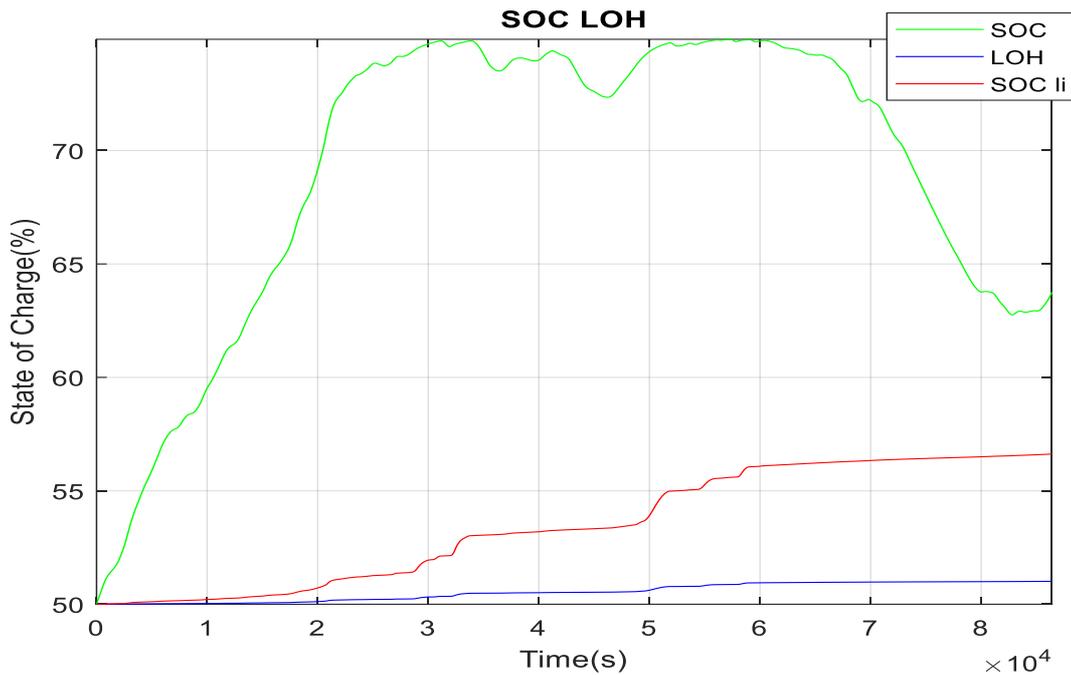


Figura 6.11. Nivel de carga con baterías Ion-Litio para día con viento con control MPC.

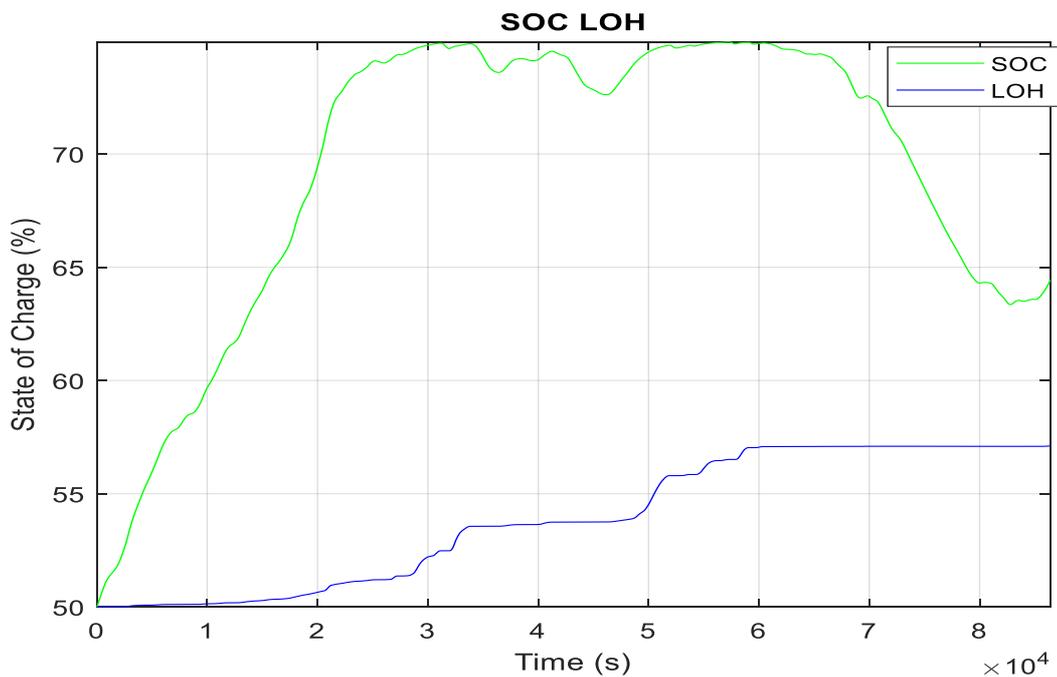


Figura 6.12. Nivel de carga sin baterías Ion-Litio para día con viento con control MPC.

En este escenario con la integración de las baterías de Ion-Litio conseguimos hacer un menor uso del electrolizador ya que acumula la energía con las baterías de plomo ácido y por consiguiente en las baterías de Ion-Litio. Activando el electrolizador de manera mas eficiente con envío de consignas de potencias menos bruscas. En ambos casos podemos ver que el electrolizador se desactiva al final de la simulación, ya que utiliza ambas baterías para suplir la energía que no es producida por el viento.



# 7 CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

---

**E**n este capítulo se pretende explicar las conclusiones obtenidas sobre el control de referencias realizado para la integración de las baterías de Ion-Litio así como la exposición de futuras líneas de investigación.

La primera conclusión que destacar es la consecución de integrar la batería de Ion-Litio de 100 Ah - 12.8 V en la microrred.

## 7.1 Conclusiones integración en la microrred

El controlador implementado para los distintos casos de generación y demanda expuestos en el capítulo 6, es capaz de suministrar la potencia demanda por el PLC que controla la microrred en el caso que sea necesario, ya sea en demanda de energía de las baterías de Ion-Litio o para el almacenamiento de energía sobrante.

Para la caracterización de los nuevos componentes tales como la pila de combustible y el electrolizador, se han obtenido buenos resultados en la operación del sistema completo.

## 7.2 Futuras líneas de investigación

Se propone la integración del programa realizado en Vijeo Citect en el SCADA completo de la microrred.

Se sugiere la posibilidad de instalar un convertidor bidireccional para las baterías de plomo ácido para disponer de un control entre dichas baterías y el bus de potencia.

El estudio de distintas técnicas de control en la microrred con la integración de las baterías de Ion-Litio, tanto en simulación como en experimentación.

Por último, se propone la comprobación experimental del controlador MPC desarrollado junto con todos los componentes, para así poder comparar los resultados obtenidos en simulación.



## REFERENCIAS

---

- [1] E. F. Camacho C. Bordons. Model Predictive Control [Libro]. - [s.l.]: Edición, 2004.
- [2] Tesis Doctoral, “Gestión de Energía en Sistemas con Fuentes renovables y almacenamiento de energía basado en Hidrógeno mediante Control Predictivo”. Luis Valverde Isorna.
- [3] Control de Vehículos. Tema 6 Componentes básicos de un vehículo híbrido: Modelado cuasiestático (II). Dip. 8. Miguel A. Ridao, Carlos Bordons.
- [4] Sistemas Electrónicos para Gestión de Energías Renovables. Tema 10 Almacenamiento en redes eléctrica. Dip 33. Sergio Vázquez Pérez, Eduardo Galván Diez, Juan Manuel Carrasco Solís.
- [5] Mathworks Matlab. El lenguaje del cálculo técnico, [consulta 6-11-2018]. Disponible en: <http://es.mathworks.com/products/matlab/>
- [6] Mathworks Simulink Matlab, [consulta 6-11-2018]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>
- [7] Schneider Electric, Telemecanique «Tutorial Práctico Unity Pro –Modicon M340.»
- [8] InfoPLC- Schneider Electric- «Curso Vijeo Citect. »
- [9] <https://energyev.com/tienda/baterias/bateria-de-litio-de-100ah-3-2v/>
- [10] “Comparativa de algoritmos de Control Predictivo Distribuido aplicado a microrredes interconectadas”. Guillermo Teno, Miguel A. Ridao, Carlos Bordons, Juan J. Márquez.