

Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de las Tecnologías Industriales  
Mención de Automática

Comparativa de estrategias de control predictivo en  
Microrred con domótica

Autor: Lourdes Fernández Píriz

Tutores: Jose María Maestre Torreblanca

Jesús Iván Maza Alcañiz

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

Sevilla, 2022





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Comparativa de estrategias de control predictivo en Microrred con domótica**

Autor:

Lourdes Fernández Píriz

Tutores:

Jose María Maestre Torreblanca

Profesor catedrático

Jesús Iván Maza Alcañiz

Profesor titular

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado: Comparativa de estrategias de control predictivo en Microrred con domótica

Autor: Lourdes Fernández Píriz

Tutor: Jose María Maestre Torreblanca

Jesús Iván Maza Alcañiz

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal



*A mi padre, que en paz descanse*





# Agradecimientos

---

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi familia que me ha apoyado siempre, haciendo que me supere y saque lo mejor de mí cada día, por convencerme de que no todo es inteligencia y que puedo cumplir lo que me proponga con trabajo duro, disciplina y esfuerzo.

Gracias a mis amigas de toda la vida que me han aguantado las quejas y preocupaciones durante estos duros años de carrera, además de cuidar de mi salud mental.

Gracias a mis compañeros de universidad con los que he compartido risas, apuntes, nervios ante los exámenes y lágrimas de todo tipo, haciendo una mención especial a Ezequiel Bravo que ha sido un pilar en mi vida tanto dentro como fuera de la universidad y sin el que este trabajo no podría haberse desarrollado.

Gracias a mis tutores por su guía a lo largo del proyecto y responder todas las dudas que he ido teniendo.

Por último, dar las gracias a mí misma, por no desesperar cuando las cosas no salían o los aprobados no llegaban, y por buscar las herramientas necesarias para seguir adelante en este duro periodo universitario cuando la inteligencia no era suficiente.

*Lourdes Fernández Piriz*

*Sevilla, 2022*



# Resumen

---

En este proyecto se va a tratar la importancia que tiene la energía eléctrica y cómo vamos a poder trabajar con ella de manera eficiente para ahorrar recursos naturales y dinero, además de descubrir la necesidad de una gestión adecuada de dicha energía no sólo por el interés de nuestra propia economía y el ahorro monetario personal, sino por el bien del planeta, que mediante esta medida se logrará reducir los impactos ambientales y los efectos del calentamiento global y del cambio climático. Para ello, se utilizarán dos tecnologías de control diferentes: Control Predictivo de Modelo (MPC) y control todo/nada con histéresis. Se realizarán diferentes simulaciones y ensayos cuyos resultados serán comparados. Para llevar a cabo las simulaciones, se utilizarán los programas de Matlab y Home I/O simultáneamente. El proyecto se centrará sobre todo en el control de los calefactores presentes en la vivienda simulada de Home I/O, ya que presentan el mayor impacto en el consumo eléctrico. Como fuente de alimentación de energía eléctrica a la vivienda, dispondremos de una microred que posee diversas fuentes de generación de energía eléctrica, permitiendo la optimización del proceso de elección de que fuente utilizar en cada instante de tiempo.



# Abstract

---

In this Project we are going to discuss the importance that the electric energy has in our life and how we are going to be available to use it in a more efficient way. The achievement of this goal is to prevent the end of natural resources and save money, doing this not only for ourselves but for the future. Doing so we will reduce contamination and the effects of global warming and pollution. In order to do so, we will use two different control technology, such us Model Predictive Control (MPC) and on/off control with hysteresis. The simulation is going to be done in two programs simultaneously, Matlab and Home I/O. The focus of the project will reside mainly in the control of all the heaters inside the house simulated by HOME I/O. The heaters are the devices that consume more power inside the house, so we are going to avoid the power lost in lights and blinds. As the power supply, a device called microred will be used, this device has the ability to optimize the process of power supply election.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introducción del proyecto</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Ámbito de estudio del proyecto</i>	1
1.2 <i>Medios para la realización del proyecto</i>	2
<b>2 HOME I/O</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Sistema actual</i>	5
2.2 <i>Sistema de control de calefacción</i>	6
2.3 <i>Conexión Matlab-Home I/O</i>	7
2.3.1 <i>Modos de funcionamiento en la vivienda</i>	7
2.3.2 <i>Lectura/escritura de variables de Home I/O mediante Matlab</i>	8
<b>3 Modelos y controladores</b>	<b>14</b>
3.1 <i>Microred simulada en Simulink</i>	14
3.1.1 <i>Componentes de la microred</i>	15
3.1.2 <i>Funcionamiento de la microred</i>	15
3.1.3 <i>Modelo lineal de la microred y restricciones</i>	15
3.1.4 <i>Controlador MPC de la microred</i>	17
3.2 <i>Modelos y controladores de todas las zonas del hogar</i>	19
3.2.1 <i>Sistema Centralizado</i>	19
3.2.2 <i>Sistema Descentralizado</i>	29
3.2.3 <i>Sistema todo/nada con banda de histéresis</i>	32
<b>4 análisis de los controladores</b>	<b>35</b>
4.1 <i>Ensayos utilizando el MPC de la microred y el control todo/nada con histéresis</i>	35
4.1.1 <i>Primer Ensayo</i>	35
4.1.2 <i>Segundo Ensayo</i>	38
4.2 <i>Ensayos utilizando el MPC descentralizado</i>	41
4.2.1 <i>Primer ensayo</i>	41
4.2.2 <i>Segundo ensayo</i>	44
4.2.3 <i>Tercer ensayo</i>	46
4.2.4 <i>Cuarto ensayo</i>	48
4.3 <i>Ensayos utilizando el MPC centralizado</i>	49
4.3.1 <i>Primer ensayo</i>	51
4.3.2 <i>Segundo Ensayo</i>	52
4.3.3 <i>Tercer ensayo</i>	54
4.3.4 <i>Cuarto ensayo</i>	56

<b>5</b>	<b>Elección del mejor controlador</b>	<b>59</b>
5.1	<i>Perfil base</i>	59
5.2	<i>Comparador de Potencias</i>	62
<b>6</b>	<b>Conclusión y estudios avanzados</b>	<b>70</b>
6.1	<i>Conclusiones</i>	70
6.2	<i>Comparación con el modelo de una habitación</i>	71
	<b>Referencias</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>75</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Potencias según la zona	7
Tabla 2. Temperaturas de referencia	56
Tabla 3. Comparación y datos de los controladores	66
Tabla 4. Diferencia de pesos entre la gestión de un calefactor frente a la gestión de todos	72



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. Precio de luz por año [15]	1
Figura 1-2. Precio de la luz al mes [12]	2
Figura 2-1. Visión exterior en Home I/O	5
Figura 2-2. Mapa de la planta	6
Figura 2-3. Mapa de la capa de calefacción	6
Figura 2-4. Dispositivo de control Home I/O	7
Figura 2-5. Función setup(block) de read	8
Figura 2-6. Función Output(block) de read	9
Figura 2-7. Bloque read de Simulink	9
Figura 2-8. Función setup(block) de write	9
Figura 2-7. Bloque read de Simulink	9
Figura 2-8. Función setup(block) de write	10
Figura 2-9. Función Output(block) de write	11
Figura 2-10. Módulo write de Simulink	12
Figura 2-11. Módulo de tiempo real de Simulink	12
Figura 3-1. Modelo de la microred	14
Figura 3-2. Script de la microred	17
Figura 3-3. Modelo de la microred ajustada	18
Figura 3-4. MPC de la microred	18
Figura 3-5. Planta 1	18
Figura 3-4. MPC de la microred	18
Figura 3-5. Planta 1	19
Figura 3-6. Planta Baja	19
Figura 3-7. Experimento 1	22
Figura 3-8. Gráfica de comprobación experimento 1	23
Figura 3-9. Gráfica de comprobación experimento 2	24
Figura 3-10. Modelo de comprobación para el experimento 3	24
Figura 3-11. Gráfica de comprobación experimento 3	25
Figura 3-12. Script modelo centralizado	27
Figura 3-13. MPC centralizado	29
Figura 3-14. Script modelo descentralizado	30
Figura 3-15. Modulo del MPC descentralizado	32
Figura 3-16. Control con histéresis	33
Figura 4-1. Porcentajes del ensayo 1 con histéresis	36
Figura 4-2. Potencia ensayo 1 con histéresis	36
Figura 4-3. Potencia por zonas ensayo 1 con histéresis	37
Figura 4-4. Potencia por zonas ensayo 1 con histéresis	38

Figura 4-5. Porcentaje ensayo 2 con histéresis	39
Figura 4-6. Potencia ensayo 2 con histéresis	39
Figura 4-7. Potencia por zonas ensayo 2 con histéresis	40
Figura 4-8. Potencia por zonas ensayo 2 con histéresis	41
Figura 4-9. Potencia ensayo 1 descentralizado	43
Figura 4-10. Potencia por zonas ensayo 1 descentralizado	44
Figura 4-11. Potencia por zonas ensayo 1 descentralizado	44
Figura 4-12. Potencia ensayo 2 descentralizado	45
Figura 4-13. Potencia por zonas ensayo 2 descentralizado	46
Figura 4-14 .Potencia por zonas ensayo 2 descentralizado	46
Figura 4-15. Potencia ensayo 3 descentralizado	47
Figura 4-17. Potencia por zonas ensayo 3 descentralizado	47
Figura 4-18. Potencia ensayo 4 descentralizado	48
Figura 4-19. Potencia por zonas ensayo 4 descentralizado	48
Figura 4-20. Potencia por zonas ensayo 4 descentralizado	49
Figura 4-21. Potencia ensayo 1 centralizado	51
Figura 4-22. Potencia por zonas ensayo 1 centralizado	51
Figura 4-23. Potencia por zonas ensayo 1 centralizado	52
Figura 4-24. Potencia ensayo 2 centralizado	53
Figura 4-26. Potencia por zonas ensayo 2 centralizado	54
Figura 4-25. Potencia por zonas ensayo 2 centralizado	53
Figura 4-27. Potencia ensayo 3 centralizado	54
Figura 4-28. Potencias por zonas ensayo 3 centralizado	55
Figura 4-31. Potencia por zonas ensayo 4 centralizado	57
Figura 4-32. Potencia por zonas ensayo 4 centralizado	57
Figura 5-3. Potencia de la red usada en el control todo/nada con banda de histéresis	62
Figura 5-1. Potencia de la red usada en el control centralizado	62
Figura 5-2. Potencia la red usada en el control descentralizado	62
Figura 5-4. Evolución temporal del estado de carga de las baterías y del nivel de hidruros metálicos para un sistema descentralizado	63
Figura 5-5. Evolución temporal del estado de carga de las baterías y del nivel de hidruros metálicos para un sistema centralizado	63
Figura 5-6. Evolución temporal del estado de carga de las baterías y del nivel de hidruros metálicos para un sistema todo/nada con banda de histéresis	63
Figura 5-7. Evolución temporal de la potencia de los calefactores y la temperatura en un sistema centralizado	64
Figura 5-8. Evolución temporal de la potencia de los calefactores y la temperatura en un sistema centralizado	64
Figura 5-10. Evolución temporal de la potencia de los calefactores y la temperatura en un sistema descentralizado	65

Figura 5-9. Evolución temporal de la potencia de los calefactores y la temperatura en un sistema descentralizado	65
Figura 5-11. Evolución temporal de la potencia de los calefactores y la temperatura en un sistema todo/nada con banda de histéresis	65
Figura 5-12. Evolución temporal de la potencia de los calefactores y la temperatura en un sistema todo/nada con banda de histéresis	66
Figura 6-1. Potencia de un sistema centralizado para una habitación	71
Figura 6-2. Potencia de un sistema centralizado para un calefactor	72



# 1 INTRODUCCIÓN DEL PROYECTO

A lo largo de los años, la energía, y sobre todo en la era de las nuevas tecnologías, se ha vuelto muy importante en el desarrollo de nuestras vidas. Todos los cambios en la naturaleza son producidos por algún tipo de energía y la energía eléctrica es un recurso necesario que posibilita la producción de bienes básicos y mejora las condiciones de vida del ser humano.

Debido al deseo de la civilización por nuevas invenciones y métodos de conversión y dominio de esta energía, se ha provocado un notable aumento del consumo de este recurso a nivel mundial en los últimos 200 años a raíz de la revolución industrial, gracias a esto, el mundo moderno ha conseguido las bases para el desarrollo de industrias básicas que han determinado el progreso de la producción social. En concreto, la tasa de desarrollo del sector energético supera la tasa de desarrollo de otras industrias.

En este proyecto, se va a tratar la importancia que tiene la energía eléctrica y cómo vamos a poder trabajar con ella de manera eficiente buscando así el ahorro de recursos naturales y dinero, además de descubrir la necesidad de una gestión adecuada de dicha energía no sólo por el interés de nuestra propia economía y el ahorro monetario personal, sino por el bien del planeta, que mediante esta medida logrará reducir impactos ambientales y contribuir a combatir los efectos del calentamiento global y del cambio climático.

## 1.1 Ámbito de estudio del proyecto

En los tiempos que corren y más desde la pandemia a nivel mundial ocasionada por el virus conocido como coronavirus o covid-19 en el año 2019, la energía eléctrica asume un papel primordial en todos los ámbitos, tales como el hogar, el transporte y las industrias, ya que muchas de nuestras actividades requieren su uso. Centrando los estudios en el ámbito del hogar, descubrimos que hacemos uso de la energía en cosas cotidianas tales como cocinar, ver la televisión o hablar por teléfono, sobre todo a raíz de la enfermedad previamente nombrada donde los trabajadores se han visto obligados a trabajar desde casa y requieren el uso diario de internet y carga de aparatos electrónicos entre otros.

Debidos al uso excesivo de la energía y la crisis económica originada por la enfermedad, se ha visto aumentado el precio de la luz en España, que actualmente, 2022, registra uno de sus máximos históricos.

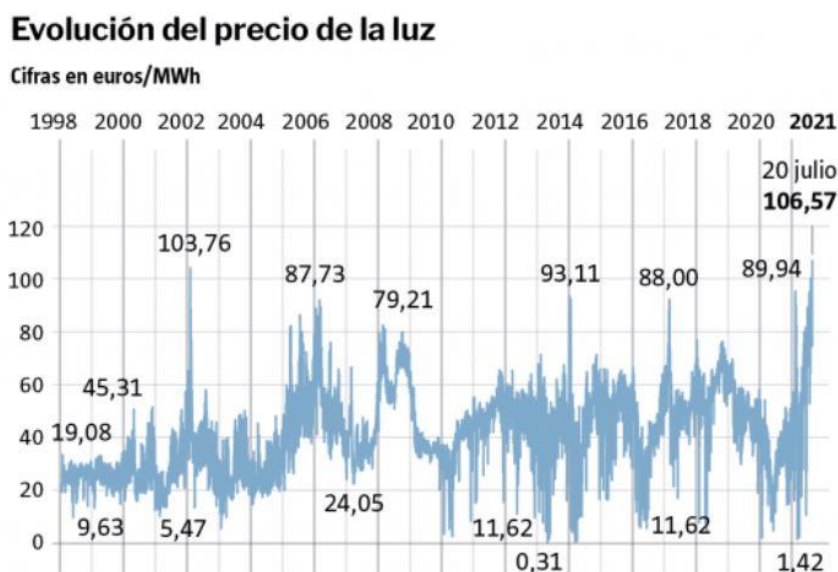


Figura 1-1. Precio de luz por año [15]

No sólo se aprecian cambios desorbitados de un año a otro, sino también de un mes a otro, o incluso entre los mismos tramos horarios del día. Tenemos de ejemplo los precios más recientes, por tramos horarios, el precio máximo de la luz para este 11 de enero de 2022 se dará entre las 21.00 horas y las 22.00 horas, con 262,66 euros/MWh, mientras que el mínimo, de 193 euros/MWh, se registrará entre las 4.00 horas y las 5.00 horas. Con respecto a hace un año, el precio del 'pool' para este martes será un 170,6% más caro que el que se registró el 11 de enero de 2021, de tan sólo 82,45 euros/MWh, coincidiendo además con la ola de frío de Filomena.



Figura 1-2. Precio de la luz al mes [12]

Hoy en día, como se puede apreciar, sigue el precio al alza, cada día que pasa se van alcanzando nuevos máximos históricos. Se desconoce cuál es el precio máximo que se llegará a alcanzar, ni cuando lo hará. Por este motivo, se hace de vital importancia una gestión adecuada de la energía eléctrica más que nunca, ya que una gestión mediocre de la electricidad ahora mismo puede provocar una subida de la factura de la luz considerable.

En consecuencia, el objetivo de este proyecto es dar a conocer ideas o formas para conseguir una gestión adecuada de la electricidad a nivel personal, en la vivienda de cada individuo mediante el uso de controladores, enfocados en el control de la calefacción de una vivienda. Igualmente, estas ideas se podrían aplicar a instalaciones más grandes, ya sean industrias, grandes edificios...

A continuación, se hará una breve introducción de las herramientas que se van a utilizar para este objetivo y detallar brevemente las diferentes formas de conseguir una mejor gestión de la electricidad con la tecnología actual.

## 1.2 Medios para la realización del proyecto

Las bases de este trabajo residen en la utilización de programas como Matlab [1] y Home I/O.

Matlab es una plataforma de programación y cálculo numérico cuyo uso está muy extendido en el mundo de la ingeniería. Es el programa que nos va a permitir ejercer el control sobre los aparatos eléctricos de la vivienda de forma automática.

Home I/O es un entorno de simulación interactivo que permite el control sobre una vivienda totalmente automatizable. Esta vivienda tiene diferentes aparatos eléctricos, que se pueden controlar utilizando programas externos.

La forma de trabajar en los siguientes apartados constará de:

- Leemos las entradas no manipulables del sistema, en este caso podrían ser tales como la temperatura de



las habitaciones o la potencia instantánea que usan los calefactores.

- Una vez tenemos claras cuales son las entradas y hemos tomado una decisión respecto a lo que queremos hacer o qué buscamos, tomamos las decisiones pertinentes y aplicamos cambios al modelo que será el que haga el trabajo para llegar a nuestras aspiraciones.
- Por último, escribiremos las salidas que en este caso serán manipulables y son identificadas como el grado de activación de los calefactores viendo así si hemos alcanzado nuestros objetivos. Dichos objetivos se verán reflejados en el entorno de simulación Home I/O.

Referido al ahorro de energía se van a plantear una serie de casos que conllevarán al estudio de distintos modelos:

- Caso 1: la vivienda solo dispone de la red eléctrica para su alimentación de energía eléctrica. En este caso, puede resultar útil el control basado en reglas. Esta técnica de control consiste en reducir la potencia o apagar los aparatos eléctricos según un orden establecido. Este orden de prioridad sería establecido por el usuario, y el algoritmo se encargaría de ejecutarlo. Esto es muy interesante, sobre todo, en la situación actual en la que hay diferentes tarifas de electricidad según la hora del día. Se podría limitar la potencia de la vivienda a un valor más alto en aquellas horas que el precio de la electricidad sea menor, y a un valor más bajo en aquellas horas que el precio de la electricidad sea mayor. El objetivo es que, aunque se activen más aparatos eléctricos de la casa, la potencia que consume la vivienda no sea mayor que la potencia límite máxima. Para ello, se reduce la potencia de los aparatos eléctricos.
- Caso 2: la vivienda dispone de una microrred en la que hay diversas fuentes de generación de energía eléctrica que se pueden utilizar. En este caso, usar un controlador predictivo por modelo (MPC) [2] sería muy productivo. Para la implementación de este controlador, primero es necesario tener un modelo del sistema que se quiere controlar. El modelo tendrá ciertas variables de entrada, de salida y perturbaciones. Una vez se tiene identificado el sistema, se puede programar el controlador MPC. Como en cualquier tipo de controlador en bucle cerrado, se introducirá una referencia para cada salida. El objetivo del controlador es determinar los valores óptimos que deberían tomar las variables de entrada para llevar las diferentes salidas a sus respectivas referencias.

El criterio para este objetivo tiene lugar en función de los pesos. Los pesos son valores adimensionales que se dan a las variables de entrada, a su incremento, y a las variables de salida. En función de estos pesos, los valores óptimos de las variables de entrada serán diferentes. Estos pesos influyen debido a que se utilizan en la función de coste. Si se aumenta por ejemplo drásticamente el peso de una variable de entrada, se penalizará más su uso y el controlador entenderá que se prefiere que esa variable se utilice lo menos posible. Otras peculiaridades de este controlador es el hecho de que tiene la capacidad de anticipar acontecimientos futuros y tomar acciones de control consecuentemente. Se encarga de optimizar las variables en un horizonte de tiempo finito. También permite establecer restricciones para las diferentes variables de entrada, salida e incrementos de las variables de entrada.

Estos controladores son útiles también a la hora de gestionar el consumo eléctrico en una vivienda, estableciendo una relación entre la potencia y su impacto en la variable que queramos controlar de la habitación, ya sea la temperatura, luminosidad... La entrada sería la tensión o potencia a la que trabaja el aparato eléctrico, y la salida la variable que queremos controlar de la habitación o estancia. En este caso, para alimentar a la vivienda se usará una microrred simulada en Matlab Simulink. Esta microrred tiene diferentes fuentes de alimentación para generar potencia. Se programará un controlador MPC también que se encargará de estimar cuanto debe utilizar de cada una en cada momento, en función de la demanda de la carga, que, en el caso de este proyecto, será la potencia instantánea consumida en la vivienda. Así podríamos, aparte de controlar la potencia del aparato eléctrico de forma optimizada, minimizar a su vez la cantidad de potencia que se absorbe de la red eléctrica utilizando el mismo controlador.



## 2 HOME I/O

**G**racias al software de simulación Home I/O haremos la automatización de una vivienda unifamiliar y además se podrá ver el efecto de las mejoras implementadas, mejorando la calidad de vida de sus residentes teniendo en cuenta el confort térmico, el ahorro energético y la seguridad.

La vivienda sobre la que se ha simulado la domótica corresponde a un edificio de lujo de dos plantas alejado de la ciudad, a pies de un lago. Debido a sus características constructivas es ideal implementar un sistema automatizado, ya que está plenamente acristalado, y la mejora energética posible es muy amplia. Además, al tratarse de una vivienda de lujo, las mejoras para la optimización del confort casan a la perfección con su estilo, quedando como resultado, una vivienda de altas prestaciones.



Figura 2-1. Visión exterior en Home I/O

Como se puede apreciar, se obtiene una continua información de interés relativa a la vivienda y al tiempo, como puede ser la temperatura actual en el exterior, la temperatura máxima y mínima del día en concreto en el que nos encontremos, la humedad, el viento, la nubosidad... Esto es importante conocerlo, ya que afectará a la temperatura que tengamos en el interior de la casa. Cabe destacar que en la esquina inferior derecha aparece información relativa al consumo eléctrico: potencia instantánea consumida, energía consumida a lo largo del día, energía consumida a lo largo del mes...

### 2.1. Sistema actual

El edificio se encuentra en una zona de campo, no contando con más edificaciones en un radio de un kilómetro. Como se puede ver en la figura 2-2, la vivienda consta de quince estancias: un salón, un aseo, dos cuartos de baño, tres dormitorios, oficina y garaje, entre otros. La oficina está directamente comunicada con el vestíbulo de entrada, encontrándose esta en su zona superior y sin techo que las separe. [3]

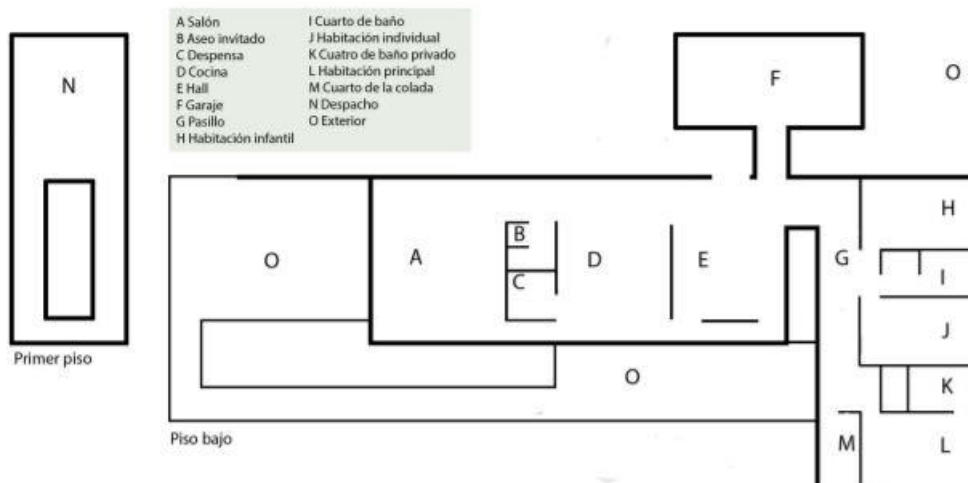


Figura 2-2. Mapa de la planta

En la zona exterior alberga una piscina y una entrada para veh6culos comunicada con la vivienda a trav6s de una puerta situada en el vest6bulo de entrada.

Dentro del Home I/O podemos ver planos de la iluminaci6n, con sus respectivos interruptores y sensores, planos de las persianas y sus interruptores, planos de los detectores de movimiento, humo, infrarrojos y de apertura de puerta como de otros dispositivos como la puerta del garaje, la puerta de entrada, la alarma central...

Aunque tenemos planos de cualquier cosa que incluya la casa, vamos a centrarnos en el plano que contempla los calefactores y los termostatos por los que se rigen, ya que va a ser el gasto m6s significativo al que se va a enfrentar la vivienda, los dem6s dispositivos como la luz o las persianas van a poderse despreciar.

## 2.2. Sistema de control de calefacci6n

En este apartado se describe el sistema de control de calefacci6n que se ha a6nadido a la vivienda. Como se observa en la figura 2-3, la vivienda cuenta con calefactores en todas las salas destinadas al tr6nsito y uso diario, con potencias dadas por la tabla 1.

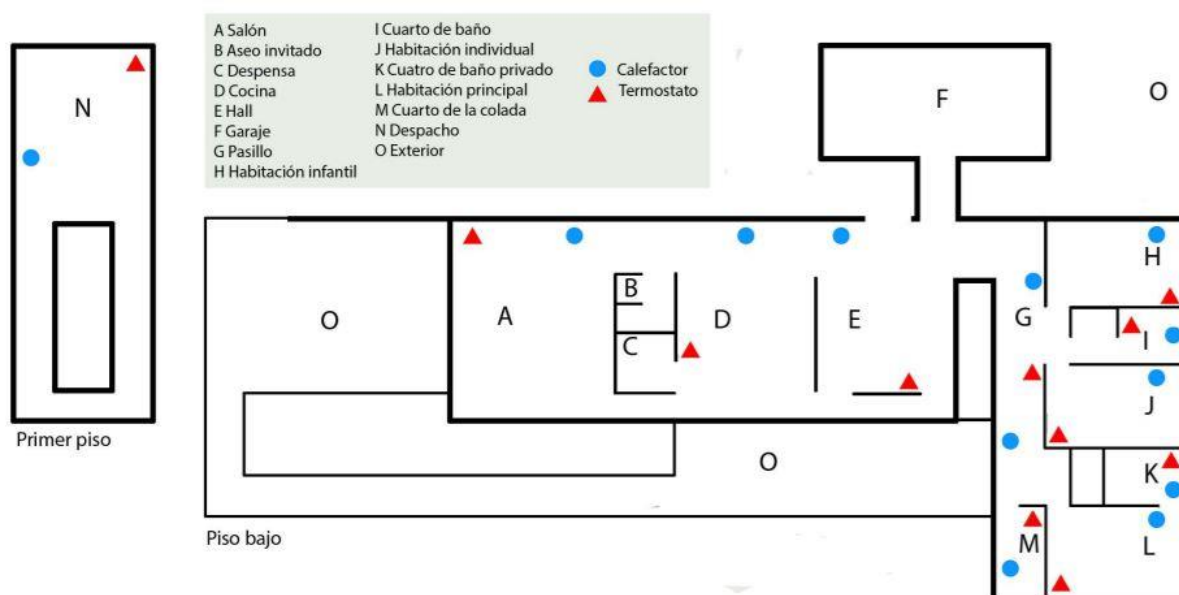


Figura 2-3. Mapa de la capa de calefacci6n

El consumo eléctrico queda reflejado en la siguiente tabla:

Habitación/Zona	Descripción	Potencia (Kw)
A	Salón	2.0
D	Cocina	1.5
E	Hall	1.75
G	Pasillo del dormitorio	Calefactor 1: 0.75 Calefactor 2: 0.75
H	Dormitorio infantil	1.0
I	Cuarto de baño	0.75
J	Habitación Individual	0.75
K	Baño privado	1.0
L	Habitación doble	0.75
M	Lavandería	0.5
N	Oficina	1.5

Tabla 1. Potencias según la zona

## 2.3. Conexión Matlab-Home I/O

Para la programación y automatización de la vivienda, se va a utilizar el programa de Matlab, ya que Home I/O permite el control y utilización de los dispositivos automatizables mediante el uso de programas externos, como puede ser Matlab.

### 2.3.1 Modos de funcionamiento en la vivienda

Por parte del Home I/O, para poder conectarse al programa Matlab, vemos que dentro del software de simulación hay unos dispositivos con distintos modos de funcionamiento, en concreto tres.



Figura 2-4.  
Dispositivo de control  
Home I/O

Cada dispositivo tiene asignado un modo:

- Wired mode. El dispositivo no se puede automatizar. Hace referencia al funcionamiento que tendría en una instalación eléctrica estándar donde todos los dispositivos están conectados mediante cables. El símbolo corresponde al de color rojo.
- Wireless mode. El dispositivo se puede controlar mediante la consola del programa. Los dispositivos

trabajan con un controlador central inalámbrico que puede programarse para automatizar los dispositivos que se encuentren en este modo de funcionamiento. El símbolo corresponde al de color verde.

- External mode. Permite a los dispositivos de entrada/salida ser controlados por programas externos. Su símbolo corresponde al de color azul

Para nuestro trabajo, sólo vamos a utilizar el de color azul, conocido como External Mode, que es el único que se va a poder conectar con Matlab. Para modificar voluntariamente los dispositivos que se quieren controlar, se tiene que crear una partida nueva dentro de Home I/O. Entonces, se recorre la vivienda, buscando los diferentes dispositivos que se quieren controlar. Una vez se encuentran, haciendo click sobre el símbolo mostrado, cambiará entre los distintos modos de funcionamiento hasta que se obtenga el deseado en cada uno de los dispositivos.

### 2.3.2 Lectura/escritura de variables de Home I/O mediante Matlab

El objetivo de la utilización de Matlab es leer el valor de variables de entrada de Home I/O, ya sea el valor de un sensor, un detector, ... y, actuando en consecuencia, escribir el valor deseado en las variables de salida de Home I/O. Para ello, primero se necesitará programar una función en Matlab para ambos casos. Una vez se tengan las funciones listas, éstas se ejecutarán desde Simulink mediante el uso de bloques “M-S-Function”. Un bloque ejecutará la función “read.m” y otro ejecutará la función “write.m”.

#### 2.3.2.1 Función y bloque de lectura en simulink

En el Anexo D se encuentra el código de un ejemplo de función para la lectura de variables. La función de lectura consta fundamentalmente de dos partes:

- function setup (block): utiliza para configurar el bloque. De esta función, lo que tiene mayor importancia es la definición del número de entradas y salidas que tendrá el bloque en Simulink y el período de muestreo, ya que son los parámetros modificables en el caso de que se quisieran leer más variables o cambiar el intervalo de tiempo entre dos muestras sucesivas.

```
function read(block)
% Level-2 MATLAB file S-Function for unit delay demo.
% Copyright 1990-2009 The MathWorks, Inc.
    setup(block);
endfunction

function setup(block)
%% Register number of input and output ports
block.NumInputPorts = 0;
block.NumOutputPorts = 13;

%% Setup functional port properties to dynamically
block.SetPreCompPortInfoToDefaults;

block.OutputPort(1).Dimensions = 1;

%% Set block sample time to [0.1 0]
block.SampleTimes = [10 0];

%% Set the block simStateCompliance to default (i.e., same as a built-in block)
block.SimStateCompliance = 'DefaultSimState';
path = strcat(pwd, '\EngineIO.dll');
NET.addAssembly(path);

%% Register methods
block.RegBlockMethod('Outputs', @Output);
endfunction
```

Figura 2-5. Función setup(block) de read

En nuestro caso y como función que vamos a utilizar para nuestros controles venideros, ajustamos con 13 salidas (ya que para lo que Home I/O es una entrada, para Matlab es una salida) y un período de muestreo de

10 segundos.

- **function output (block):** se utiliza para definir qué dispositivos se quieren leer y a qué puerto del bloque de Simulink corresponderá su valor. Se debe definir la dirección de la variable que se quiere leer, el tipo de dato que es (bit, float...) y el tipo de variable que es (si es una entrada, salida o una variable de memoria).

```
function Output(block)
EngineIO.MemoryMap.Instance.Update();

%Temperatura zona A
block.OutputPort(1).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(1, EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona D
block.OutputPort(2).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(13, EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona E
block.OutputPort(3).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(25, EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona G
block.OutputPort(4).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(46, EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona H
block.OutputPort(5).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(58, EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona I
block.OutputPort(6).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(69, EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona J
block.OutputPort(7).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(81, EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona K
block.OutputPort(8).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(92, EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona L
block.OutputPort(9).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(104, EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona M
block.OutputPort(10).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(116, EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona N
block.OutputPort(11).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(128, EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura Exterior
block.OutputPort(12).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(132, EngineIO.MemoryType.Memory).Value);
%potencia instantanea
block.OutputPort(13).Data = double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(141, EngineIO.MemoryType.Memory).Value);
endfunction
```

Figura 2-6. Función Output(block) de read

En la figura 2-6 ya dejamos definida de las variables que se van a leer, en este caso se leen las temperaturas de todas las habitaciones y zonas, además de añadir como puerto 12 y 13 la temperatura exterior y la potencia instantánea respectivamente, que son entradas exógenas o perturbaciones no manipulables pero que van a jugar un papel fundamental en nuestros controladores a desarrollar. Por poner un ejemplo, en el caso de la temperatura H, se puede observar que el dato es de tipo float, es una variable “input” y su dirección es la nº 58. Su valor se recogerá en el primer puerto del bloque de Simulink.

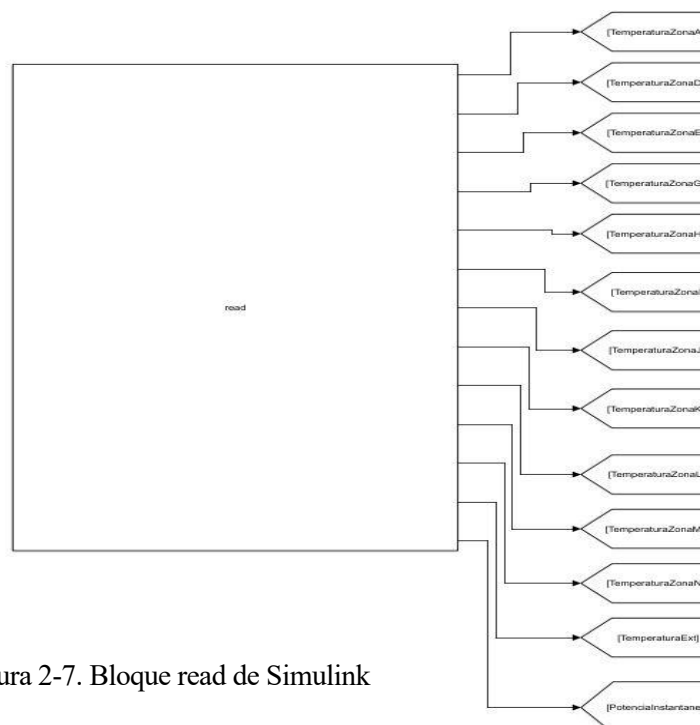


Figura 2-7. Bloque read de Simulink

Una vez tenemos las funciones, se va a trasladar a nuestro diagrama de simulink de la manera especificada en la figura 2-7.

### 2.3.2.2 Función y bloque de escritura en simulink

En el Anexo E se encuentra el código de un ejemplo de función para la escritura de variables. Al igual que en el caso anterior, la función de escritura consta fundamentalmente de dos partes:

- function setup (block): se utiliza para configurar el bloque.

```
function write(block)
% Level-2 MATLAB file S-Function for unit delay demo.
% Copyright 1990-2009 The MathWorks, Inc.

setup(block);

%endfunction

function setup(block)
%% Register number of input and output ports
block.NumInputPorts = 12;
block.NumOutputPorts = 0;

%% Setup functional port properties to dynamically
block.SetPreCompPortInfoToDefaults;

block.InputPort(1).Dimensions = 1;

%% Set block sample time to [0.1 0]
block.SampleTimes = [10 0];

%% Set the block simStateCompliance to default (i.e., same as a built-in block)
block.SimStateCompliance = 'DefaultSimState';

path = strcat(pwd, '\EngineIO.dll');
NET.addAssembly(path);

%% Register methods
block.RegBlockMethod('Outputs', @Output);
%endfunction
```

Figura 2-10. Función setup(block) de write

De esta función, lo que tiene mayor relevancia es la definición del número de entradas y salidas que tendrá el bloque en Simulink y el período de muestreo, ya que son los parámetros modificables en el caso de que se quisieran leer más variables o cambiar el intervalo de tiempo entre dos muestras sucesivas.

En la figura 2-8, como en el caso de la lectura, se ha especificado ya cual va a ser la función que se va a utilizar durante el resto del trabajo. Se ha elegido que el bloque de Simulink tenga 12 entradas (ya que para lo que Home I/O es una salida, para matlab es una entrada) y un período de muestreo de 10 segundos. Es casi similar a la del apartado anterior.

- function output (block): se utiliza para definir sobre qué dispositivos queremos actuar (escribir un valor) y por qué puerto del bloque de Simulink Home I/O recibirá el valor. Se debe definir primero la dirección de la variable sobre la que se quiere escribir, el tipo de dato que es (bit, float...) y el tipo de variable que es (en este caso, siempre será una salida, porque son las únicas que permiten escritura). Entonces, el valor se dará a través de una entrada del bloque en Simulink.



```
function Output(block)
    %Calefaccion zona A
    HeaterA = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(1, EngineIO.MemoryType.Output);
    HeaterA.Value = block.InputPort(1).Data;
    %Calefaccion zona D
    HeaterD = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(34, EngineIO.MemoryType.Output);
    HeaterD.Value = block.InputPort(2).Data;
    %Calefaccion zona E
    HeaterE = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(45, EngineIO.MemoryType.Output);
    HeaterE.Value = block.InputPort(3).Data;
    %Calefaccion zona G1
    HeaterG1 = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(67, EngineIO.MemoryType.Output);
    HeaterG1.Value = block.InputPort(4).Data;
    %Calefaccion zona G2
    HeaterG2 = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(68, EngineIO.MemoryType.Output);
    HeaterG2.Value = block.InputPort(5).Data;
    %Calefaccion zona H
    HeaterH = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(79, EngineIO.MemoryType.Output);
    HeaterH.Value = block.InputPort(6).Data;
    %Calefaccion zona I
    HeaterI = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(91, EngineIO.MemoryType.Output);
    HeaterI.Value = block.InputPort(7).Data;
    %Calefaccion zona J
    HeaterJ = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(102, EngineIO.MemoryType.Output);
    HeaterJ.Value = block.InputPort(8).Data;
    %Calefaccion zona K
    HeaterK = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(113, EngineIO.MemoryType.Output);
    HeaterK.Value = block.InputPort(9).Data;
    %Calefaccion zona L
    HeaterL = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(124, EngineIO.MemoryType.Output);
    HeaterL.Value = block.InputPort(10).Data;
    %Calefaccion zona M
    HeaterM = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(135, EngineIO.MemoryType.Output);
    HeaterM.Value = block.InputPort(11).Data;
    %%Calefaccion zona N
    HeaterN = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(148, EngineIO.MemoryType.Output);
    HeaterN.Value = block.InputPort(12).Data;

    EngineIO.MemoryMap.Instance.Update();
endfunction
```

Figura 2-11. Función Output(block) de write

Como se observa en la figura 2-9, las 12 entradas corresponden a los 12 calefactores distribuidos por la casa, que va a ser lo que el MPC controle y modifique según la necesidad del usuario y de las circunstancias en las que se encuentre la vivienda.

Para que quede más claro y como en el apartado anterior, tenemos por ejemplo la calefacción de la zona H, esta salida, salida porque es la única que permite escritura, tiene especificado EngineIO.MemoryType.Output y un número al inicio, que corresponderá con el número que encontramos en el anexo B sobre este caso.

Una vez tenemos las funciones, se va a trasladar a nuestro diagrama de simulink de esta manera:

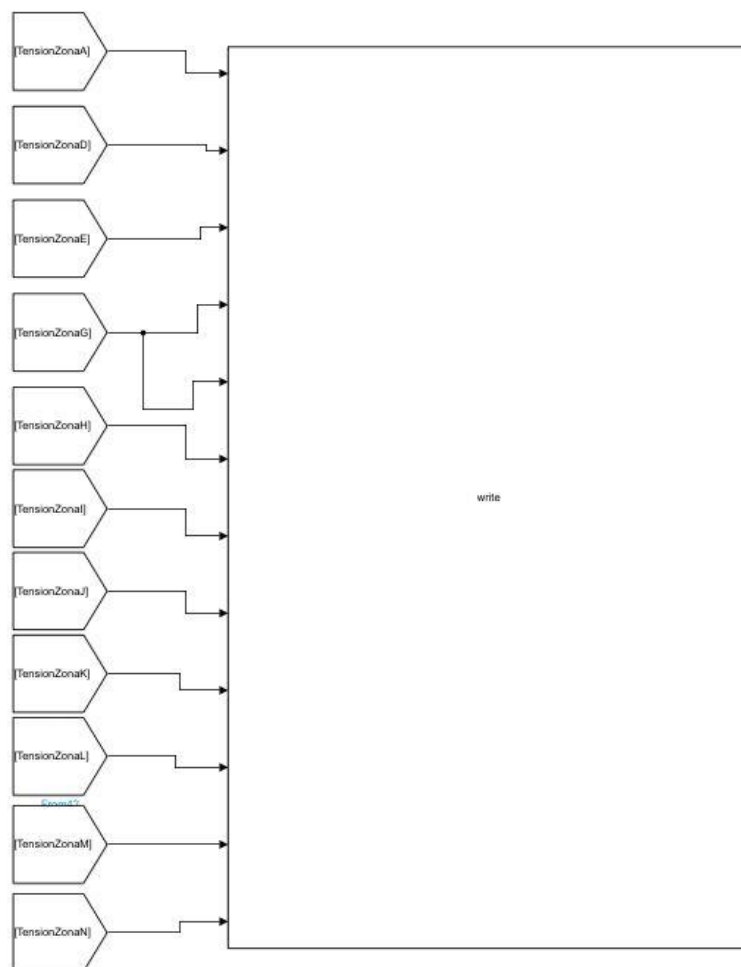


Figura 2-12. Módulo write de Simulink

### 2.3.2.2 Simulación en tiempo real

Al ser Home I/O un entorno de simulación en tiempo real, es necesario que Matlab sea capaz de simular en tiempo real también. Para ello, existe un paquete denominado “RealTime\_Pacer”. Este paquete permite a Matlab simular en tiempo real en Simulink. Para poder utilizar el paquete, se debe añadir la carpeta “RealTime\_Pacer” al path de Matlab. Una vez hecho esto, se tiene un nuevo bloque en Simulink disponible denominado “RealTime\_Pacer”. Este bloque se incluye en el archivo de Simulink y a partir de ese momento, las simulaciones se realizarán en tiempo real. El bloque de Simulink es el siguiente:

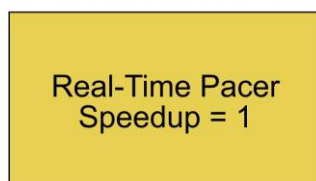


Figura 2-13. Módulo de tiempo real de Simulink



## 3 MODELOS Y CONTROLADORES

El programa Home I/O y la herramienta de Matlab Simulink hacen posible el estudio de una vivienda domotizada controlada por sistemas predictivos que ayudan al uso eficiente de la energía eléctrica cuya fuente de energía puede provenir de la red o en nuestro caso de estudio de la microrred explicada anteriormente. Se harán cambios en la potencia máxima que puede consumir y así hacerlo más realista para modificar de manera automática los aparatos eléctricos de la vivienda.

El uso de los controladores con los que se pretende trabajar en el domicilio, están basados en la premisa de que la potencia no va a provenir sólo de la red, sino de una denominada microrred que se especificará en el punto 3.1 antes de entrar en materia con los controladores predictivos.

### 3.1 Microrred simulada en Simulink

Como fuente de alimentación de energía eléctrica a la vivienda, se va a utilizar una microrred simulada en Simulink.

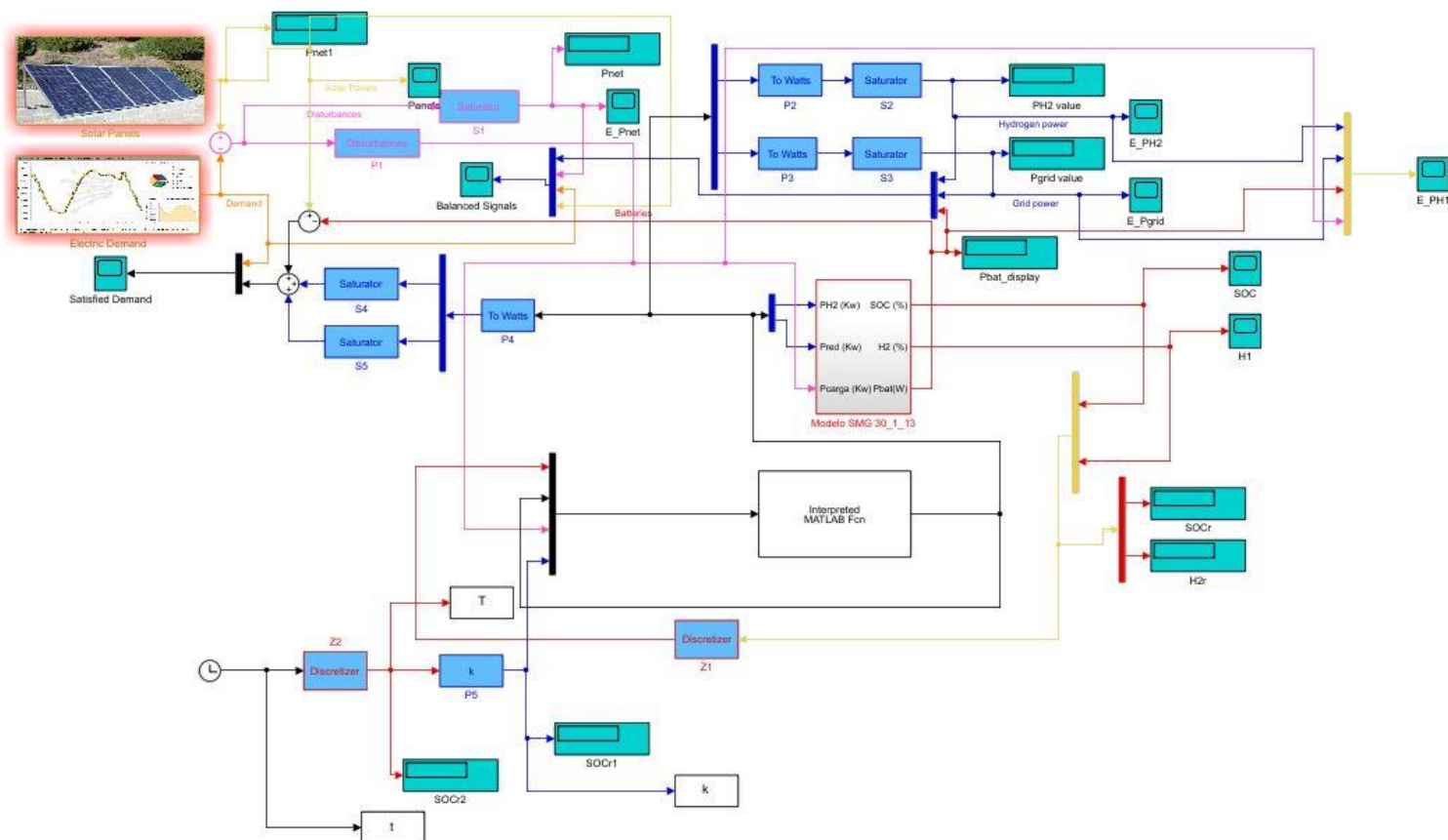


Figura 3-1. Modelo de la microrred

En la figura 3-1 vemos un esquema de la microrred original a la que se realizarán una serie de modificaciones.

### 3.1.1 Componentes de la microrred

La microrred consta de los siguientes componentes:

- Fuente de energía renovable: paneles solares
- Pila de combustible de membrana de intercambio protónico (pila de combustible PEM).
- Electrolizador de membrana polimérica protónica (electrolizador PEM).
- Tanque de hidruros metálicos, para la obtención de hidrógeno.
- Banco de baterías.
- Convertidores DC/DC.

### 3.1.2 Funcionamiento de la microrred

La principal fuente de energía eléctrica vendrá dada por la energía renovable, que se encargará de alimentar a la carga, en este caso, la vivienda. Cualquier exceso de potencia puede ser dirigido al electrolizador o almacenado en el banco de baterías. Cuando la potencia obtenida gracias a la fuente de energía renovable no sea suficiente, tanto la pila de combustible como el banco de baterías pueden suministrar potencia eléctrica. Aunque se dispone de la posibilidad de trabajo de la microrred de forma aislada, ésta trabajará conectada a la red eléctrica en caso de que sea necesario eventualmente su uso.

El recorrido que sigue el hidrógeno en la microrred es el siguiente:

1. Se almacena en un tanque de hidruros metálicos.
2. Del tanque de hidruros metálicos, se puede obtener hidrógeno mediante la electrólisis de membrana polimérica protónica, utilizando el electrolizador PEM. [4]
3. Obtenido el hidrógeno, se utiliza como combustible para conseguir energía eléctrica en la pila de combustible PEM. La energía eléctrica se obtiene mediante la oxidación electroquímica del hidrógeno y de la reducción electroquímica del oxígeno. [5]

Es importante destacar que el electrolizador y la pila de combustible no pueden trabajar simultáneamente

### 3.1.3 Modelo lineal de la microrred y restricciones

Como puede intuirse, el modelo real de la microrred está gobernado por subsistemas complejos y no lineales. Entonces, se necesita obtener un modelo lineal de la microrred para poder utilizar un controlador tipo MPC (Model Predictive Controller). Como consecuencia, la microrred ha sido linealizada en espacios de estados en tiempo discreto en torno a un punto de operación. [2].

El modelo consta de las siguientes características:

- Entradas: 2.
  - La potencia del electrolizador y la potencia de la pila de combustible ( $PH2(k)$ ). Si  $PH2(k)$  es mayor que cero, la pila de combustible es la que está trabajando, generando potencia. Si es menor que cero, es el electrolizador el que está funcionando, absorbiendo potencia.
  - La potencia de la red eléctrica ( $P_{grid}(k)$ ). Puede ser tanto mayor que cero, como menor que cero. Si es mayor que cero significará que se está haciendo uso de ella y por tanto, tendrá su coste económico. Si en cambio, es menor que cero, significará que se está exportando potencia a la red eléctrica.

Ambas potencias se miden en kW (kilovatios).

- Perturbaciones medibles: 1.
  - Tanto la potencia obtenida por la energía renovable ( $P_{res}(k)$ ), como la potencia demandada por el consumidor ( $P_{dem}(k)$ ) son variables sobre las que no se tiene control, pero si se pueden medir. La diferencia entre estas dos respectivamente es la potencia neta ( $P_{net}(k)$ ). Será considerada como perturbación a la microrred y se mide en kW (kilovatios).
- Estados o salidas: 2.
  - Estado de carga de la batería ( $SOC(k)$ ). Se expresa en porcentaje (%).
  - Nivel de hidruros metálicos ( $MHL(k)$ ). También se expresa en porcentaje (%).
- Tiempo de muestreo: 30 segundos.
- Punto de operación:
  - $x^* = [50\%, 50\%]^T$
  - $u^* = [0 \text{ Kw}, 1.75 \text{ Kw}]^T$
  - El vector de estados o salidas es  $x(k) = [SOC(k), MHL(k)]^T$ , y  $u(k) = [P_{H2}(k), P_{grid}(k)]^T$  es el vector de entradas manipulables.

La planta tiene una variable adicional, la potencia de las baterías ( $P_{batt}(k)$ ), que se controla indirectamente. Una vez definidas sus características, el modelo discreto de la microrred, para cada instante de tiempo, alrededor del punto de operación es el siguiente:

$$x(k+1) = x(k) + \begin{pmatrix} 8.1360 & 5.958 \\ -15.2886 & 0 \end{pmatrix} * u(k) + \begin{pmatrix} 5.958 \\ 0 \end{pmatrix} * w(k)$$

Donde  $w(k) = P_{net}(k)$

Pero, como a lo largo del trabajo se va a trabajar con modelos cuyo tiempo de muestreo es de 10 segundos, hay que transformar el modelo de la microrred anterior. Para ello, se utiliza la función “d2d” de Matlab, permitiendo cambiar el tiempo de muestreo de un modelo lineal. Por tanto, se cambia el tiempo de muestreo del modelo de la microrred de 30 segundos a 10 segundos.

Se obtiene entonces el siguiente nuevo modelo para la microrred, que es con el que se trabajará a lo largo del trabajo:

$$x(k+1) = x(k) + \begin{pmatrix} 2.712 & 1.986 \\ -5.096 & 0 \end{pmatrix} * u(k) + \begin{pmatrix} 1.986 \\ 0 \end{pmatrix} * w(k)$$

Las variables del sistema están sujetas a diferentes restricciones para evitar el daño de los equipos y garantizar su funcionamiento seguro. Por ello, es necesario limitar sus valores máximos y mínimos, asegurando así una mayor vida útil y un mejor funcionamiento de los equipos. Las restricciones son las siguientes:

$$\begin{aligned} -0.9 \text{ kW} &\leq P_{H2}(k) \leq 0.9 \text{ kW} \\ -2.5 \text{ kW} &\leq P_{grid}(k) \leq 2 \text{ kW} \\ -20 \text{ W s}^{-1} &\leq \Delta P_{H2}(k) \leq 20 \text{ W s}^{-1} \\ -2.5 \text{ kW s}^{-1} &\leq \Delta P_{grid}(k) \leq 2 \text{ kW s}^{-1} \end{aligned}$$

A su vez, las variables de estado también tienen sus respectivas restricciones:

$$40\% \leq SOC(k) \leq 90\%$$

$$10\% \leq MHL(k) \leq 90\%$$

Finalmente, la potencia total que se le suministra a la carga debe satisfacer el siguiente balance:

$$P_{dem}(k) = P_{H2}(k) - P_{batt}(k) + P_{grid}(k) + P_{res}(k)$$

### 3.1.4 Controlador MPC de la microrred

Conocido el modelo lineal de la microrred, es inmediata la implementación de un controlador MPC para la gestión inteligente de la gestión de la potencia en los diferentes componentes de la microrred. Para ello, se ha hecho uso del “Model Predictive Control toolbox” [5]. Es un toolbox de Matlab cuyo objetivo es el diseño y simulación de controladores usando tanto modelos lineales como modelos no lineales de control predictivo (MPC).

Para la creación del controlador, se ejecuta el código que aparece en la siguiente figura:

```
Ared=eye(2,2);
Bred=[2.712 1.986 1.986;-5.096 0 0];...
Cred=eye(2,2);
Dred=zeros(2,3);
microrred=idss(Ared,Bred,Cred,Dred);
set(microrred,'Ts',10)
microrred=setmpcsignals(microrred,'MD',[3],'MV',[1 2]);
MVL=[struct('Min',-0.9,'Max',0.9,'RateMin',-0.2,'RateMax',0.2);...
      struct('Min',-2.5,'Max',2,'RateMin',-2.5,'RateMax',2)];...
MOL=[struct('Min',40,'Max',90);struct('Min',10,'Max',90)];
Weights1=struct('ManipulatedVariables',[0 0],'OutputVariables',[1 1]);
MPC_microrred=mpc(microrred,10,5,1,Weights1,MVL,MOL,[]);
```

Figura 3-2. Script de la microrred

El código implementa un controlador para el modelo lineal de las ecuaciones del apartado 3.1.3.

En cuanto a las características del controlador, son las siguientes:

- Tiempo de muestreo: 10 segundos
- Horizonte de predicción: 5
- Horizonte de control: 1
- Pesos:
  - Para las entradas manipulables:
    - Para  $P_{H2}(k) = 0$
    - Para  $P_{grid}(k) = 0$
  - Para el incremento de entradas manipulables:
    - Para  $P_{H2}(k) = 0.1$
    - Para  $P_{grid}(k) = 0.1$
  - Para las variables de salida:

- Para  $SOC(k) = 1$
- Para  $MHL(k) = 1$

Para implementar el controlador en Simulink, hay directamente un bloque denominado “MPC Controller” que puede utilizar un controlador ya definido en el Workspace, como es el caso. Las referencias que se utilizan para el control en bucle cerrado de la microrred son las siguientes:

- $SOC_{ref}(k) = 65\%$
- $MHL_{ref}(k) = 40\%$

Por tanto, el diagrama de bloques en Simulink que simula la microrred con el que se va a trabajar finalmente es el siguiente:

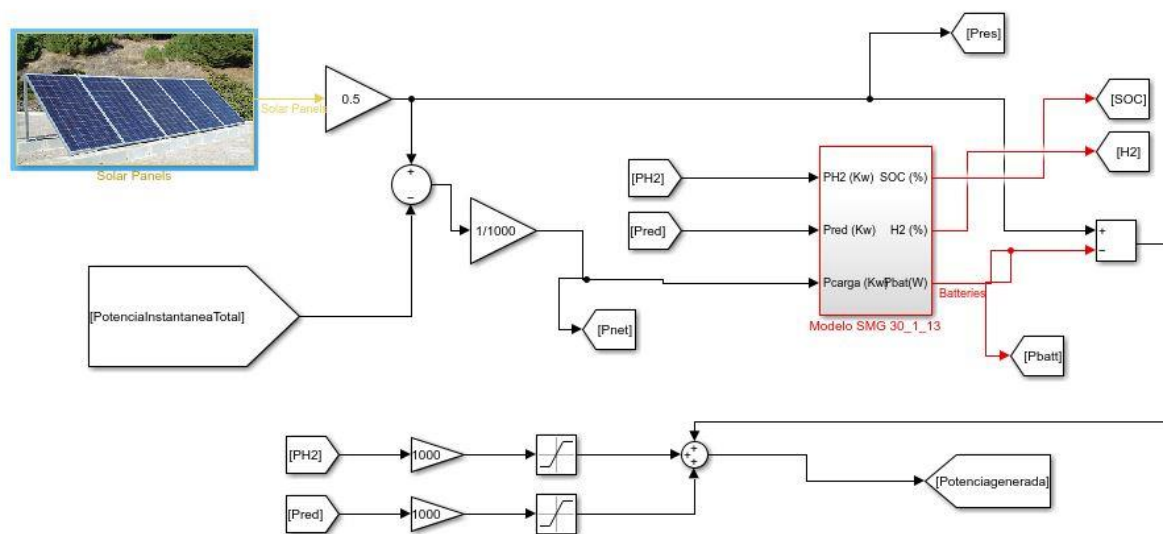


Figura 3-3. Modelo de la microrred ajustada

En la figura 3-3 vemos como la potencia generada por el sistema corresponde con la aportada por los paneles solares, las baterías, la pila de combustible y la red.

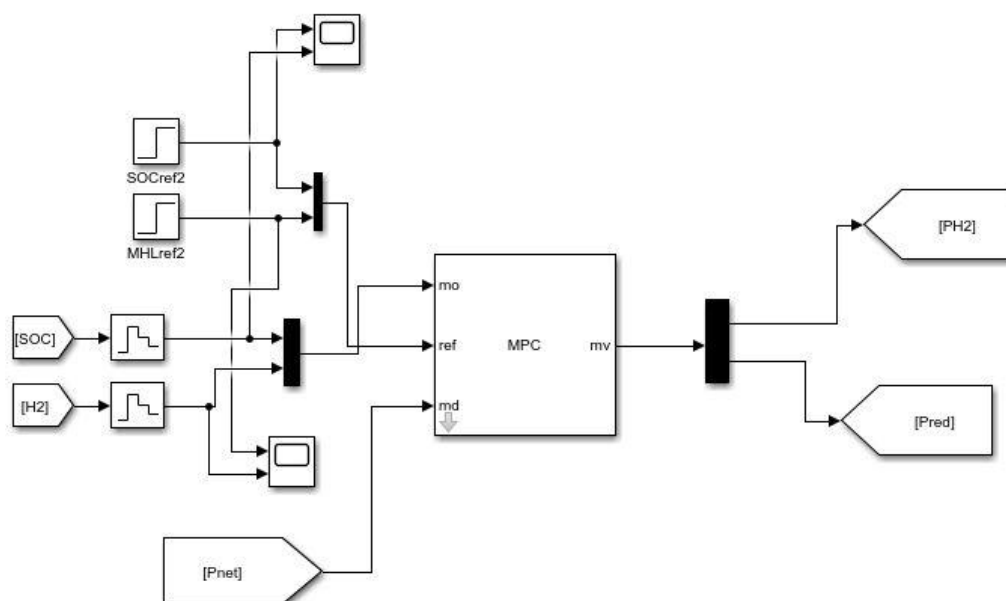


Figura 3-4. MPC de la microrred



La figura 3-4 representa el modelo MPC que rige la microrred y que dará como salidas MV la potencia de los hidruros y de la red. Si los pesos del modelo se modificaran, provocaría un cambio en el sistema que se está controlando, pudiendo llegar a penalizar o a potenciar la parte de la microrred que el usuario crea conveniente. El MPC de la microrred sirve para hacer un uso más eficiente y moderado de la energía eléctrica, como reducir la potencia que se saca de la propia red para un ahorro económico en la factura de la luz.

La carga va a ser la potencia demandada total que realice la casa en cada instante de tiempo.

## 3.2 Modelos y controladores de todas las zonas del hogar

El trabajo se va a centrar en la totalidad de la casa, incluyendo las habitaciones que contienen las dos plantas, usando así todos los aparatos de manera conjunta. Como ya se ha explicado anteriormente, cada habitación está provista de un calefactor, de diferente potencia según la habitación, una luz regulable y unas persianas automáticas cuya acción también va a consumir parte de la potencia. Como consecuencia de estos aparatos, la habitación también está provista de un termostato que marca la temperatura a la que se encuentra el habitáculo y un sensor de luminosidad que mide la luz del interior. El control se centrará en el calefactor que es el que tiene mayor impacto de consumo. Se contemplarán tres escenarios:

- Sistema Centralizado, consta de un único Modelo Controlador Predictivo (MPC), uniendo el modelo de la red con el modelo que engloba todos los calefactores.
- Sistema Descentralizado, consta de dos MPC, uno que controlará la microrred y otro que de manera independiente controlará los calefactores de la casa.
- Sistema on/off con Histéresis, consta de un MPC, en este caso el de la microrred y un controlador todo/nada con una banda de histéresis para el control de los calefactores.



Figura 3-8. Planta Baja

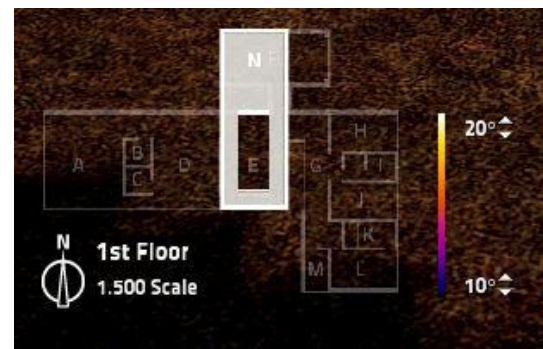


Figura 3-7. Planta 1

### 3.2.1 Sistema Centralizado

Para empezar, vamos a identificar el modelo necesario para la creación de nuestro MPC. Después de hacer un estudio exhaustivo de todas las habitaciones se ha decidido finalmente albergar todas las habitaciones bajo un mismo modelo de orden igual a 11, ya que partiremos de 11 variables distintas que corresponden a las temperaturas de cada habitación.

Previamente a la implementación del controlador, se ha realizado una identificación del sistema a controlar, en este caso, la calefacción. Para ello, primero hay que comprender el funcionamiento de la transmisión de calor en Home I/O, las distintas variables que afectan a la temperatura de la habitación y realizar una hipótesis de trabajo para nuestro modelo.

### 3.2.1.1 Diseño del modelo

Las distintas variables meteorológicas que afectan a la temperatura de la habitación en Home I/O son las siguientes:

- Temperatura del ambiente
- Dirección del viento
- Velocidad del viento
- Nubosidad
- Humedad

Se van a definir entonces unas condiciones de operación para estas variables en el modelado, siendo las siguientes:

- Temperatura del ambiente: varía entre 10 y 20 °C
- Dirección del viento: al tener el viento una velocidad tan baja, esta variable afectará de forma inapreciable al modelo.
- Velocidad del viento: 5 km/h. Es la mínima posible que permite establecer el programa, ya que nos interesaría que fuera nula para el modelo.
- Nubosidad: 1%. También es el valor mínimo que permite establecer el programa.
- Humedad: 40%

Se ha realizado un modelo de caja negra de espacio de estados donde las variables de entrada son:

- Grado de activación de los calefactores (0-10V):

$$(V_A(k), V_D(k), V_E(k), V_G(k), V_H(k), V_I(k), V_J(k), V_K(k), V_L(k), V_M(k), V_N(k))$$

- Temperatura exterior (en Kelvin):

$$T_{Ext}(k)$$

La temperatura exterior es una entrada exógena o perturbación cuyo valor no se va a manipular. En cambio, el grado de activación de los calefactores, será la única entrada manipulable. La variable de salida o estado son las temperaturas de las zonas A, D, E, G, H, I, J, K, L, M y N, para el resto del trabajo se asumirá que, al incluir toda la casa, incluimos también todas estas zonas.

El modelo es de orden 11 y se han realizado varios experimentos para su identificación. Se han medido las diferentes entradas y la salida durante 1 día en las condiciones de operación aplicando diferentes saltos a los calefactores con un tiempo de muestreo de 10 segundos. El punto de operación para los grados de activación de los calefactores ha sido de 0 V y de 289 K para las temperaturas de todas las zonas.

El modelo se ha obtenido utilizando el “System Identification Toolbox” de Matlab y cumple la siguiente ecuación para cada instante de tiempo alrededor del punto de operación:

$$x(k + 1) = A * x(k) + B * u(k) + C * w(k)$$

A =

```

0.99996 4.6123e-06 -1.53e-06 4.4971e-06 -1.2179e-07 -3.6194e-06 -3.6049e-07 -5.662e-06 -4.5269e-09 -1.8219e-06 2.0826e-06
-9.9814e-07 0.99997 -1.215e-06 -1.0945e-06 7.1141e-07 4.777e-07 -1.3293e-07 -9.7673e-07 1.49e-06 1.766e-06 5.8734e-07
1.4664e-05 -1.4988e-05 0.99998 -8.5982e-06 1.4887e-06 -3.5037e-06 -1.0517e-05 3.4445e-06 -1.848e-07 1.6433e-06 -7.5642e-06
1.9894e-05 6.6447e-06 4.4514e-06 0.99999 5.581e-06 1.959e-06 4.6204e-06 7.2268e-06 8.7867e-06 -2.6307e-06 -4.7223e-07
-1.0803e-05 2.2946e-05 1.0856e-05 -1.6034e-05 0.99998 -1.2603e-05 -1.2154e-05 1.8126e-06 6.2406e-06 9.0099e-06 6.6303e-06
-3.9519e-05 1.1767e-05 2.3486e-06 -1.1216e-05 -8.8366e-06 0.99997 -7.5448e-06 -6.5158e-06 -3.1046e-07 6.1108e-06 1.2016e-05
-1.4522e-05 9.7434e-06 -3.481e-06 -1.6438e-05 -5.5096e-06 -2.0499e-06 0.99998 6.3351e-06 7.3168e-06 1.0994e-05 -2.4239e-06
-4.2927e-05 5.3448e-06 2.9112e-05 -4.0321e-05 -1.4549e-05 -3.4192e-06 -5.8264e-06 1 -2.3976e-06 3.0837e-05 1.71e-05
-1.1707e-05 2.3857e-05 2.6306e-05 -5.0066e-05 -1.6084e-05 1.1041e-05 1.3969e-06 1.2119e-05 1 4.9928e-05 1.8248e-05
5.8602e-05 -2.2595e-05 3.7015e-07 2.9752e-05 2.0786e-05 6.8993e-06 -6.7637e-07 -1.159e-05 -6.2414e-06 0.99998 -1.5899e-05
1.2087e-06 1.0985e-06 1.5372e-05 -2.5446e-05 2.568e-05 4.5665e-06 -3.7574e-05 7.6118e-06 2.9107e-05 1.5973e-05 0.99997

```

A es una matriz de orden 11x11 que multiplica a la salida actual del sistema, es por eso por lo que acompaña al vector de salidas  $x(k)$  que tiene ese orden.

B =

```

1.8883e-09 4.5468e-09 1.8883e-09 7.9598e-09 5.7733e-09 5.3976e-09 8.4436e-09 2.4055e-09 4.2021e-09 5.3772e-09 5.8046e-09
4.5504e-10 1.9245e-09 4.5505e-10 -3.476e-09 -9.8481e-10 -1.7072e-09 -3.9614e-10 3.2245e-08 2.0575e-09 -2.8431e-10 -1.6912e-09
-6.6588e-09 -5.6681e-09 -6.6588e-09 1.6614e-08 1.1899e-08 3.4892e-08 -1.0078e-08 1.2309e-08 -5.3393e-08 6.0281e-09 1.5504e-08
-1.3327e-08 -2.3114e-08 -1.3327e-08 -8.3597e-09 8.5993e-09 4.719e-08 7.0026e-09 1.121e-08 1.9855e-08 2.8453e-08 -3.572e-08
-4.8917e-09 -3.1736e-08 -4.8917e-09 1.7728e-08 1.4376e-08 -2.4921e-08 5.6943e-08 7.8093e-09 -4.6077e-09 -5.1706e-08 2.0202e-08
5.1217e-09 -2.5193e-08 5.1217e-09 -4.2508e-08 -4.8053e-08 4.2807e-08 -6.2523e-09 9.3076e-09 -6.3689e-09 -2.3347e-08 7.5829e-08
-1.7875e-08 -8.9489e-09 -1.7875e-08 1.2254e-08 8.7408e-09 -6.9703e-08 9.2049e-09 1.0256e-08 -1.5588e-08 5.4781e-08 4.7785e-08
1.6081e-08 1.569e-08 1.6081e-08 -6.9755e-08 1.1533e-07 3.537e-09 -1.2787e-08 -1.5331e-08 1.1854e-08 -5.0693e-09 5.9106e-09
1.9175e-08 3.1625e-09 1.9175e-08 3.5565e-08 -9.2958e-08 3.8831e-08 5.1671e-08 -1.6553e-08 -8.0246e-09 4.6889e-08 -3.8458e-08
4.6088e-09 3.4605e-08 4.6088e-09 -1.0503e-07 -2.3321e-08 -1.4957e-08 1.1878e-07 -2.3277e-08 -7.3774e-08 3.4785e-08 -4.5051e-08
-4.1286e-08 1.0081e-07 -4.1286e-08 3.7744e-08 -5.4501e-08 7.9016e-08 4.7199e-08 -5.2255e-08 6.6517e-08 -8.7732e-08 3.0977e-08

```

B es una matriz de orden 11x11 que acompaña al vector de entrada  $u$ , que contiene los grados de activación de los 11 calefactores.

C =

```

2.5976e-08
2.6294e-09
-1.0573e-08
-1.5497e-08
8.3664e-09
2.8134e-08
1.1752e-08
4.3771e-08
2.5293e-08
-4.3919e-08
8.8986e-09

```

La matriz C de orden 11x1 acompaña a la salida exógena, también conocida como perturbación, que será la temperatura exterior y que no se va a poder modificar durante todo el trabajo.

Las variables de entrada, salida y perturbación serán:

- Para:

$$x(k) = [T_A(k), T_D(k), T_E(k), T_G(k), T_H(k), T_I(k), T_J(k), T_K(k), T_L(k), T_M(k), T_N(k)]^T$$

- Para:

$$u(k) = [V_A(k), V_D(k), V_E(k), V_G(k), V_H(k), V_I(k), V_J(k), V_K(k), V_L(k), V_M(k), V_N(k)]^T$$

- Para:

$$w(k) = [T_{Ext}(k)]$$

### 3.2.1.2 Validación del modelo

Con el modelo ya definido, es necesario validarlo. Para ello, se realizan tres experimentos más, de forma que los nuevos datos sean diferentes de los que se han utilizado para identificar el modelo, para demostrar su validez:

- Experimento 1:

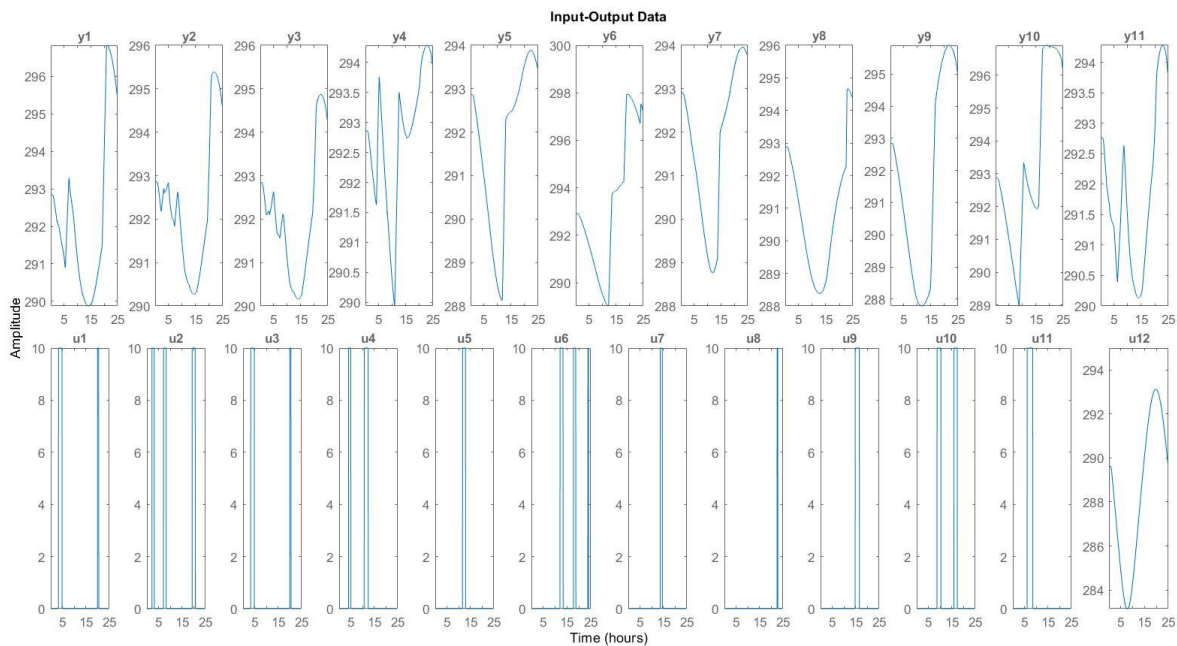


Figura 3-9. Experimento 1

Siendo las entradas  $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10}$  y  $u_{11}$  el grado de activación de los calefactores de las zonas A, D, E, G, H, I, J, K, L, M y N respectivamente, además de ser  $u_{12}$  la Temperatura exterior que trabajará como entrada exógena o perturbación y que se medirá en Kelvin. Las entradas tendrán como eje X el tiempo real que transcurre durante la simulación, como se dijo anteriormente, para este modelo irá desde 0 hasta 24 horas, que corresponderán a las horas de un día. Para el eje y los grados de activación oscilarán entre 0 y 10 voltios.

Las salidas  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9, y_{10}$  e  $y_{11}$  corresponderán a las temperaturas de las habitaciones A, D, E, G, H, I, J, K, L, M y N respectivamente, medidas en Kelvin. El eje X como en las entradas, corresponderá al tiempo que discurre.

Comparando con el modelo queda:

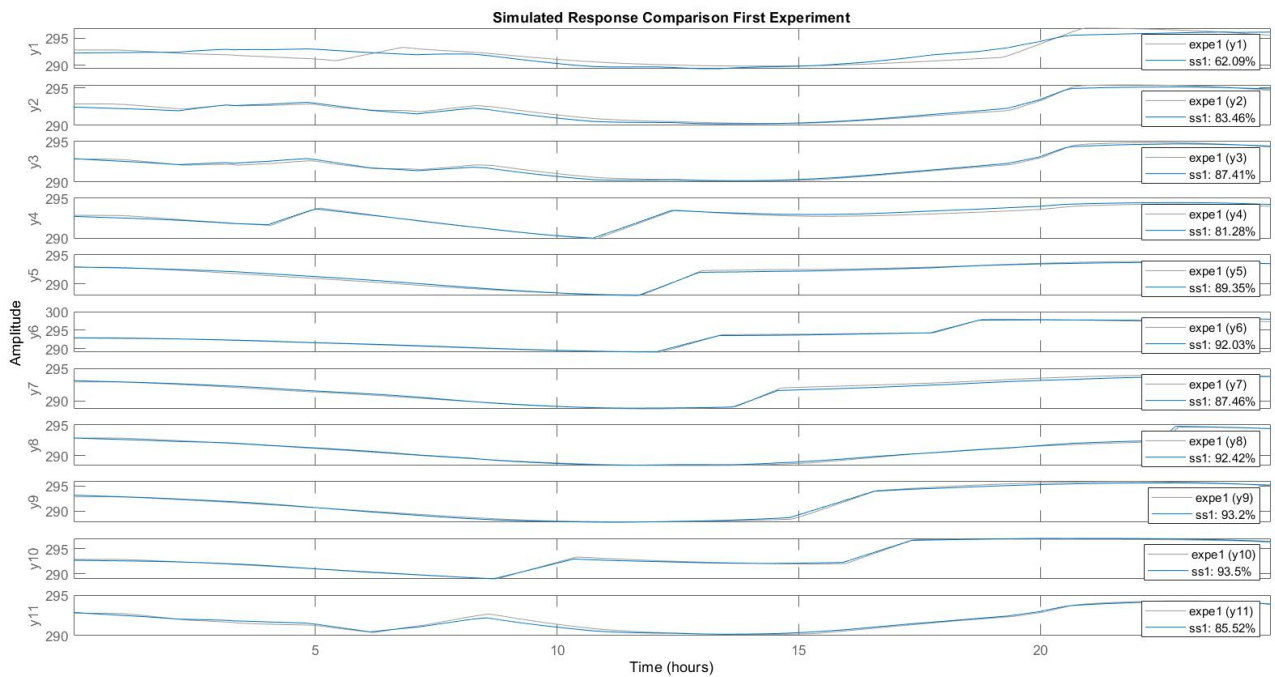


Figura 3-10. Gráfica de comprobación experimento 1

Todas las salidas tienen un porcentaje de similitud bastante alto con el experimento, todos están entorno al 80% y el 100%, salvo la salida y1, que corresponde con la temperatura de la zona A. Aunque la salida 1 tenga un porcentaje menor que el resto, como gira alrededor del 70% lo vamos a tomar igualmente como válido.

○ Experimento 2:

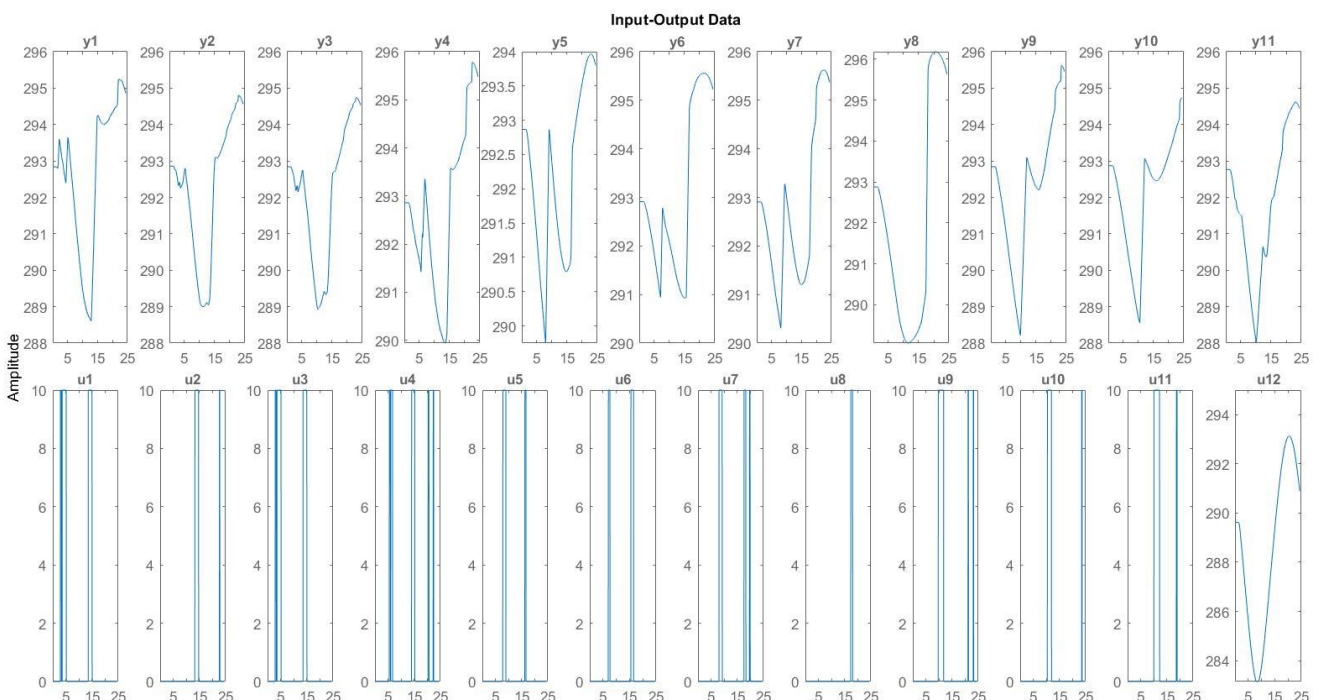


Figura 3-9. Experimento 2

Siendo las entradas  $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10}$  y  $u_{11}$  el grado de activación de los calefactores de las zonas A, D, E, G, H, I, J, K, L, M y N respectivamente, además de ser  $u_{12}$  la Temperatura exterior que trabajará como entrada exógena o perturbación y que se medirá en Kelvin. Las entradas tendrán como eje X el tiempo real que transcurre durante la simulación, como se dijo anteriormente, para este modelo irá desde 0 hasta 24 horas, que corresponderán a las horas de un día. Para el eje y los grados de activan oscilarán entre 0 y 10 voltios.

Las salidas  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9, y_{10}$  e  $y_{11}$  corresponderán a las temperaturas de las habitaciones A, D, E, G, H, I, J, K, L, M y N respectivamente, medidas en Kelvin. El eje X como en las entradas, corresponderá al tiempo que discurre.

Comparando con el modelo queda:

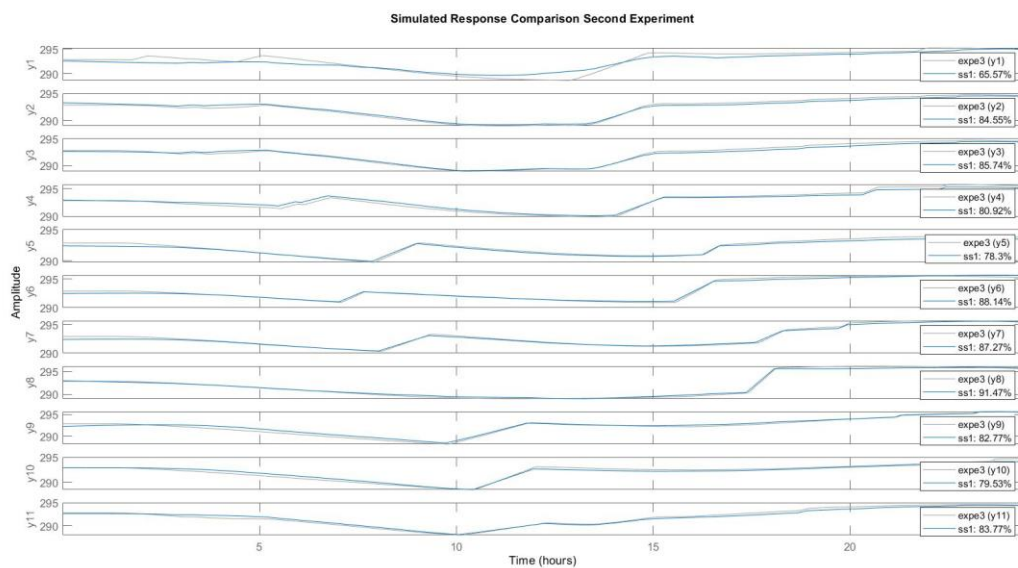


Figura 3-11. Gráfica de comprobación experimento 2

○ Experimento 3:

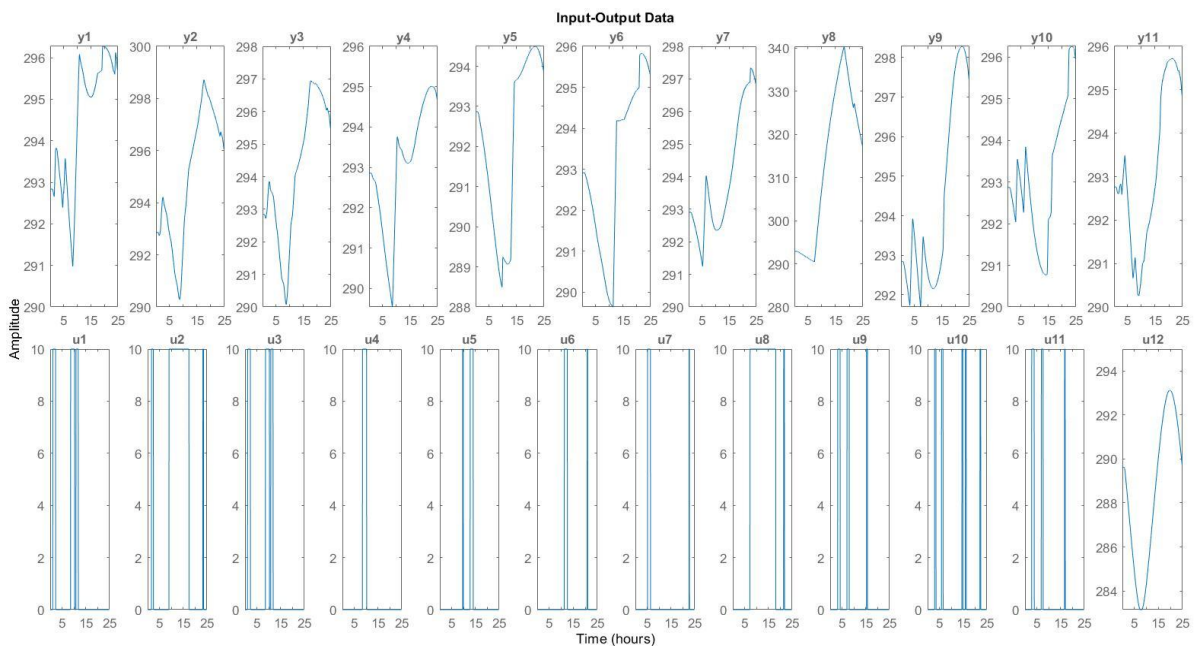


Figura 3-12. Modelo de comprobación para el experimento 3

Siendo las entradas  $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10}$  y  $u_{11}$  el grado de activación de los calefactores de las zonas A, D, E, G, H, I, J, K, L, M y N respectivamente, además de ser  $u_{12}$  la Temperatura exterior que trabajará como entrada exógena o perturbación y que se medirá en Kelvin. Las entradas tendrán como eje X el tiempo real que transcurre durante la simulación, como se dijo anteriormente, para este modelo irá desde 0 hasta 24 horas, que corresponderán a las horas de un día. Para el eje y los grados de activación oscilarán entre 0 y 10 voltios.

Las salidas  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9, y_{10}$  e  $y_{11}$  corresponderán a las temperaturas de las habitaciones A, D, E, G, H, I, J, K, L, M y N respectivamente, medidas en Kelvin. El eje X como en las entradas, corresponderá al tiempo que discurre.

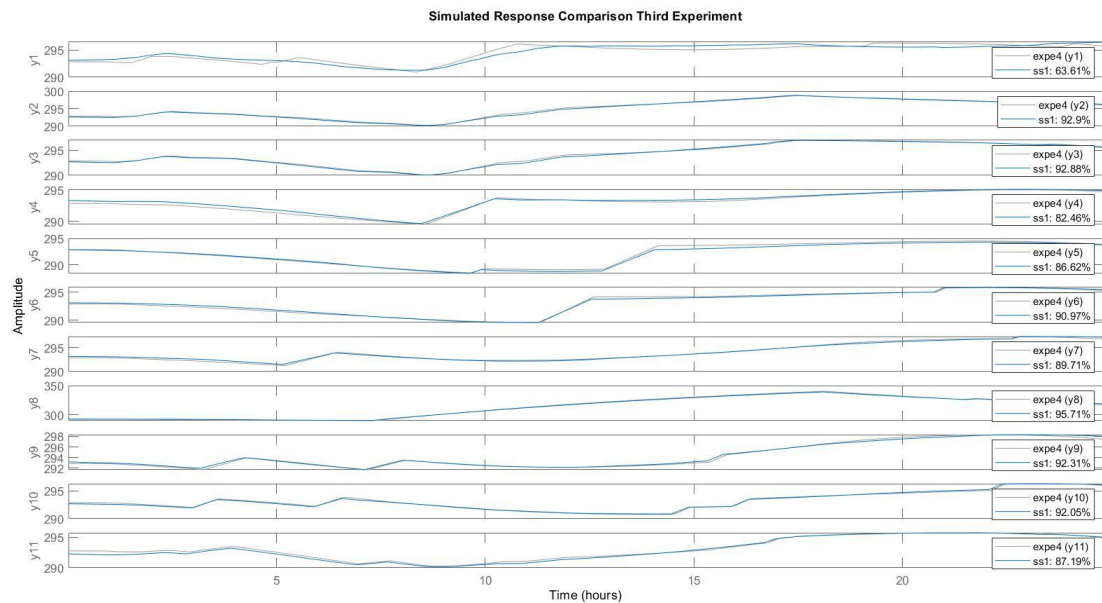


Figura 3-13. Gráfica de comprobación experimento 3

La precisión varía entre porcentajes altos para los tres experimentos, por lo que tomamos como válido el modelo.

### 3.2.1.3 Unión del modelo lineal de la microrred con el modelo del calefactor

Una vez se ha obtenido el modelo lineal que relaciona la temperatura de la habitación con el grado de activación del calefactor, se va a incorporar al modelo lineal de la microrred el modelo del calefactor. De este modo, se tienen ambos modelos en uno. Para ello, ambos modelos deben tener el mismo tiempo de muestreo.

Al modelo de la microrred del apartado 3.1.3 Modelo lineal de la microrred, le incluimos el modelo del calefactor del apartado 3.2.1.1 y obtenemos:

$$x(k+1) = A * x(k) + B * u(k) + C * w(k)$$

Siendo las matrices:

A1 =

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0.99996	4.6123e-06	-1.53e-06	4.4971e-06	-1.2179e-07	-3.6194e-06	-3.6049e-07	-5.662e-06	-4.5269e-09	-1.8219e-06	2.0826e-06		
0	0	-9.9814e-07	0.99997	-1.215e-06	-1.0945e-06	7.1141e-07	4.777e-07	-1.3293e-07	-9.7673e-07	1.49e-06	1.766e-06	5.8734e-07		
0	0	1.4664e-05	-1.4988e-05	0.99998	-8.5982e-06	1.4887e-06	-3.5037e-06	-1.0517e-05	3.4445e-06	-1.848e-07	1.6433e-06	-7.5642e-06		
0	0	1.9894e-05	6.6447e-06	4.4514e-06	0.99999	5.581e-06	1.959e-06	4.6204e-06	7.2268e-06	8.7867e-06	-2.6307e-06	-4.7223e-07		
0	0	-1.0803e-05	2.2946e-05	1.0856e-05	-1.6034e-05	0.99998	-1.2603e-05	-1.2154e-05	1.8126e-06	6.2406e-06	9.0099e-06	6.6303e-06		
0	0	-3.9519e-05	1.1767e-05	2.3486e-06	-1.1216e-05	-8.8366e-06	0.99997	-7.5448e-06	-6.5158e-06	-3.1046e-07	6.1108e-06	1.2016e-05		
0	0	-1.4522e-05	9.7434e-06	-3.481e-06	-1.6438e-05	-5.5096e-06	-2.0499e-06	0.99998	6.3351e-06	7.3168e-06	1.0994e-05	-2.4239e-06		
0	0	-4.2927e-05	5.3448e-06	2.9112e-05	-4.0321e-05	-1.4549e-05	-3.4192e-06	-5.8264e-06	1	-2.3976e-06	3.0837e-05	1.71e-05		
0	0	-1.1707e-05	2.3857e-05	2.6306e-05	-5.0066e-05	-1.6084e-05	1.1041e-05	1.3969e-06	1.2119e-05	1	4.9928e-05	1.8248e-05		
0	0	5.8602e-05	-2.2595e-05	3.7015e-07	2.9752e-05	2.0786e-05	6.8993e-06	-6.7637e-07	-1.159e-05	-6.2414e-06	0.99998	-1.5899e-05		
0	0	1.2087e-06	1.0985e-06	1.5372e-05	-2.5446e-05	2.568e-05	4.5665e-06	-3.7574e-05	7.6118e-06	2.9107e-05	1.5973e-05	0.99997		

Matriz A de orden 13x13 que acompaña a  $x(k)$ , de ahí su orden ya que consta de 13 salidas.

B =

2.712	1.986	-0.396	-0.297	-0.3465	-0.297	-0.198	-0.1485	-0.1485	-0.198	-0.1485	-0.099	-0.297
-5.096	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1.8883e-09	4.5468e-09	1.8883e-09	7.9598e-09	5.7733e-09	5.3976e-09	8.4436e-09	2.4055e-09	4.2021e-09	5.3772e-09	5.8046e-09
0	0	4.5504e-10	1.9245e-09	4.5505e-10	-3.476e-09	-9.8481e-10	-1.7072e-09	-3.9614e-10	3.2245e-08	2.0575e-09	-2.8431e-10	-1.6912e-09
0	0	-6.6589e-09	-5.6681e-09	-6.6589e-09	1.6614e-08	1.1899e-08	3.4892e-08	-1.0078e-08	1.2309e-08	-5.3393e-08	6.0281e-09	1.5504e-08
0	0	-1.3327e-08	-2.3114e-08	-1.3327e-08	-8.3597e-09	8.5993e-09	4.719e-08	7.0026e-09	1.121e-08	1.9855e-08	2.8453e-08	-3.572e-08
0	0	-4.8917e-09	-3.1736e-08	-4.8917e-09	1.7728e-08	1.4376e-08	-2.4921e-08	5.6943e-08	7.8093e-09	-4.6077e-09	-5.1706e-08	2.0202e-08
0	0	5.1217e-09	-2.5193e-08	5.1217e-09	-4.2508e-08	-4.8053e-08	4.2807e-08	-6.2523e-09	9.3076e-09	-6.3689e-09	-2.3347e-08	7.5829e-08
0	0	-1.7875e-08	-8.9489e-09	-1.7875e-08	1.2254e-08	8.7408e-09	-6.9703e-09	9.2049e-09	1.0256e-08	-1.5588e-08	5.4781e-08	4.7785e-08
0	0	1.6081e-08	1.569e-08	1.6081e-08	-6.9755e-08	1.1533e-07	3.537e-09	-1.2787e-08	-1.5331e-08	1.1854e-08	-5.0693e-09	5.9106e-09
0	0	1.9175e-08	3.1625e-09	1.9175e-08	3.5565e-08	-9.2958e-08	3.8831e-08	5.1671e-08	-1.6553e-08	-8.0246e-09	4.6889e-08	-3.8458e-08
0	0	4.6088e-09	3.4605e-08	4.6088e-09	-1.0503e-07	-2.3321e-08	-1.4957e-08	1.1878e-07	-2.3277e-08	-7.3774e-08	3.4785e-08	-4.5051e-08
0	0	-4.1286e-08	1.0081e-07	-4.1286e-08	3.7744e-08	-5.4501e-08	7.9016e-08	4.7199e-08	-5.2255e-08	6.6517e-08	-8.7732e-08	3.0977e-08

Matriz B de orden 13x13 que acompaña a  $u(k)$ , de ahí su orden ya que consta de 13 entradas.

C =

1.986	0
0	0
0	2.5976e-08
0	2.6294e-09
0	-1.0573e-08
0	-1.5497e-08
0	8.3664e-09
0	2.8134e-08
0	1.1752e-08
0	4.3771e-08
0	2.5293e-08
0	-4.3919e-08
0	8.8986e-09

Matriz C 13x2 que acompaña a  $w(k)$  que son las perturbaciones o salidas exógenas del sistema, en este caso será la Potencia neta por la microrred y la Temperatura Exterior por los calefactores y corresponden a la primera y segunda columna de la matriz respectivamente y se caracterizan por ser entradas no manipulables.

Las variables de entrada, salida y perturbación serán:

- Para:

$$x(k) = [SOC(k), MHL(k), T_A(k), T_D(k), T_E(k), T_G(k), T_H(k), T_I(k), T_J(k), T_K(k), T_L(k), T_M(k), T_N(k)]^T$$



- Para:

$$u(k) = [P_{Hz}(k), P_{grid}(k), V_A(k), V_D(k), V_E(k), V_G(k), V_H(k), V_I(k), V_J(k), V_K(k), V_L(k), V_M(k), V_N(k)]^T$$

- Para:

$$w(k) = [P_{net}(k), T_{Ext}(k)]^T$$

La razón por la que se pueden unir el sistema de la microrred y los calefactores para que interactúe el uno con el otro y sean dependientes reside en los coeficientes (1,3:13) de la matriz que multiplica  $u(k)$  se han obtenido siguiendo el siguiente razonamiento. Observando el modelo lineal de la microrred, se deduce que, para obtener unidades de potencia en el primer estado, se multiplica por el coeficiente 5.958 (para un tiempo de muestreo de 30 segundos). Ahora, el coeficiente ha pasado a ser 1.986 (para un tiempo de muestreo de 10 segundos). La relación entre la tensión de entrada del calefactor y la potencia que consume es lineal. En concreto, se obtiene multiplicando por 200 la tensión de entrada del calefactor A, por 150 la del D, por 175 la de E, por 75 la de G, I, J y L, 100 la de H, 50 la de M y 150 por la de la habitación N, obteniéndose así la potencia que consume en W. Como la unidad de potencia en el primer estado es en kW, hay que dividir el valor resultante entre 1000. Entonces, se obtiene que la relación entre el estado de la carga de la batería y la tensión de entrada del calefactor donde le añadimos el signo negativo, ya que la potencia del calefactor disminuiría la carga de la batería.

### 3.2.1.4 Implementación del MPC en Matlab

Para la implementación del controlador, se sigue un procedimiento similar al que se realizó para la microrred en la Figura 3-2. El script de Matlab tiene el código de la figura 3-12.

Continuamos con las mismas restricciones para la microrred y se introducen las de los calefactores que irán de 0 a 10 voltios para la tensión y de 273 K a 294K para las temperaturas. El incremento del grado de activación del calefactor no tiene asignada ninguna restricción.

$$0 V \leq V_x(k) \leq 10 V$$

$$273 K \leq T_x(k) \leq 294$$

En cuanto a las características del controlador, en principio, son las siguientes:

```

14 - modelo_MPC=idss(A,B,C,D,K);
15 - set(modelo_MPC,'Ts',10)
16 - modelo_MPC=setmpcsignals(modelo_MPC,'MD',[14 15],'MV',[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13]);
17 - MV=[struct('Min',-0.9,'Max',0.9,'RateMin',-0.02,'RateMax',0.02);...
18 -     struct('Min',-2.5,'Max',2,'RateMin',-2.5,'RateMax',2);...
19 -     struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf);...
20 -     struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf);...
21 -     struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf);...
22 -     struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf);...
23 -     struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf);...
24 -     struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf);...
25 -     struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf);...
26 -     struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf);...
27 -     struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf);...
28 -     struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf);...
29 -     struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf)];
30 - MO=[struct('Min',10,'Max',90);struct('Min',10,'Max',90);...
31 -     struct('Min',273,'Max',298); struct('Min',273,'Max',298);...
32 -     struct('Min',273,'Max',298); struct('Min',273,'Max',298);...
33 -     struct('Min',273,'Max',298); struct('Min',273,'Max',298);...
34 -     struct('Min',273,'Max',298); struct('Min',273,'Max',298);...
35 -     struct('Min',273,'Max',298); struct('Min',273,'Max',298);...
36 -     struct('Min',273,'Max',298)];
37 - Weights=struct('ManipulatedVariables',[0,1000,110,200,100,110,110,100,130,110,120,120,270]...
38 -               ,'ManipulatedVariablesRate',[0,0,1500,1500,1500,1500,1500,1500,1500,1500,1500,1500]...
39 -               ,'OutputVariables',[0.001,0.01,10000,35000,40000,20000,22000,20000,21000,10000,25000,20000,71000]);
40 - controlador_MPC1=mpc(modelo_MPC,10,5,1,Weights,MV,MO,[]);

```

Figura 3-14. Script modelo centralizado

- Tiempo de muestreo: 10 segundos

- Horizonte de predicción: 5
- Horizonte de control: 1
- Pesos:
  - Para las entradas manipulables:
    - $P_{H2}(k) = 0$
    - $P_{grid}(k) = 0$
    - $V_A(k) = 110$
    - $V_D(k) = 200$
    - $V_E(k) = 100$
    - $V_G(k) = 110$
    - $V_H(k) = 110$
    - $V_I(k) = 100$
    - $V_J(k) = 130$
    - $V_K(k) = 110$
    - $V_L(k) = 120$
    - $V_M(k) = 120$
    - $V_N(k) = 270$
  - Para el incremento de entradas manipulables:
    - $P_{H2}(k) = 0$
    - $P_{grid}(k) = 0$
    - $V_A(k) = 1500$
    - $V_D(k) = 1500$
    - $V_E(k) = 1500$
    - $V_G(k) = 1500$
    - $V_H(k) = 1500$
    - $V_I(k) = 1500$
    - $V_J(k) = 1500$
    - $V_K(k) = 1500$
    - $V_L(k) = 1500$
    - $V_M(k) = 1500$
    - $V_N(k) = 1500$
  - Para las variables de salida:
    - $SOC(k) = 0.001$
    - $MHL(k) = 0.01$
    - $T_A(k) = 10000$
    - $T_D(k) = 35000$
    - $T_E(k) = 40000$

- $T_G(k) = 20000$
- $T_H(k) = 22000$
- $T_I(k) = 20000$
- $T_J(k) = 21000$
- $T_K(k) = 10000$
- $T_L(k) = 25000$
- $T_M(k) = 20000$
- $T_N(k) = 71000$

Utilizando el modelo read y write explicado en los apartados anteriores, nos queda el modelo de la microrred:

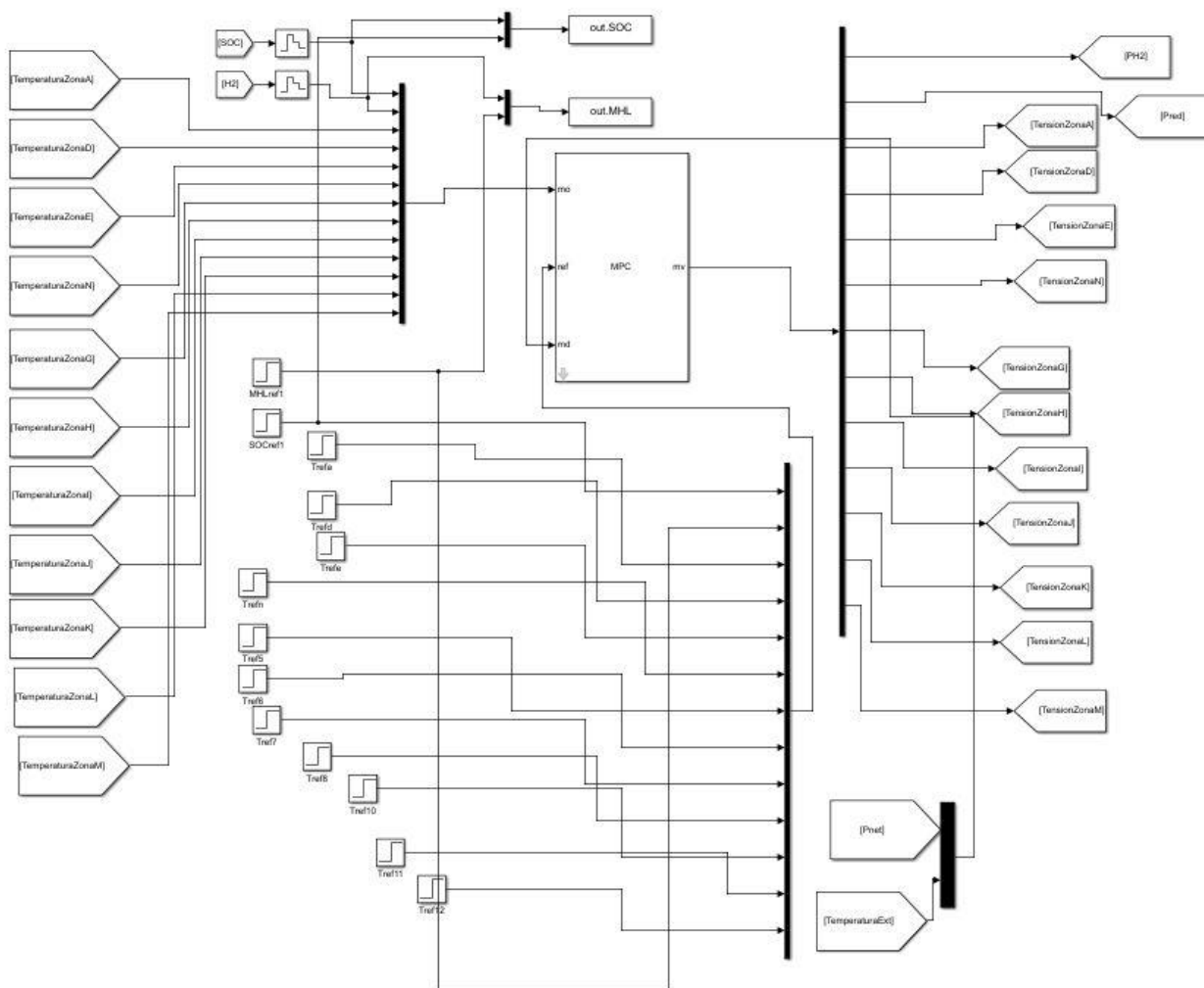


Figura 3-15. MPC centralizado

### 3.2.2 Sistema Descentralizado

A diferencia del sistema centralizado, este apartado implementará dos modelos por separado, un MPC que se encarga del control de la microrred y otro que realice el control de los calefactores. Aunque el tratamiento de los modelos sea independiente se procederá como en el apartado anterior:

- La microrred usará directamente el MPC explicado en el 3.1.3
- En el control del calefactor usaremos el modelo sacado del apartado 3.2.1.1 antes de unirlo a la microrred, para ello ejecutamos en matlab:

En cuanto a las características del controlador, en principio, son las siguientes:

```

modelo_MPC=idss(Ac,Bc,Cc,Dc,Kc);
set(modelo_MPC,'Ts',10)
modelo_MPC=setmpcsignals(modelo_MPC,'MD',12,'MV',[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11]);
MV=[
    struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf); ...
    struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf); ...
    struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf); ...
    struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf); ...
    struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf); ...
    struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf); ...
    struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf); ...
    struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf); ...
    struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf); ...
    struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf); ...
    struct('Min',0,'Max',10,'RateMin',-inf,'RateMax',inf)];
MO=[
    struct('Min',273,'Max',298); struct('Min',273,'Max',298);...
    struct('Min',273,'Max',298); struct('Min',273,'Max',298);...
    struct('Min',273,'Max',298); struct('Min',273,'Max',298);...
    struct('Min',273,'Max',298); struct('Min',273,'Max',298);...
    struct('Min',273,'Max',298); struct('Min',273,'Max',298);...
    struct('Min',273,'Max',298)];
Weights=struct('ManipulatedVariables',[110,200,100,110,110,100,130,110,120,120,270]...
    , 'ManipulatedVariablesRate',[1500,1500,1500,1500,1500,1500,1500,1500,1500,1500]...
    , 'OutputVariables',[10000,35000,40000,20000,22000,20000,21000,10000,25000,20000,71000]);
controlador_MPC2=mpc(modelo_MPC,10,5,1,Weights,MV,MO,[]);

```

Figura 3-16. Script modelo descentralizado

- Tiempo de muestreo: 10 segundos
- Horizonte de predicción: 5
- Horizonte de control: 1
- Pesos:
  - Para las entradas manipulables:
    - $V_A(k) = 110$
    - $V_D(k) = 200$
    - $V_E(k) = 100$
    - $V_G(k) = 110$
    - $V_H(k) = 110$
    - $V_I(k) = 100$
    - $V_J(k) = 130$
    - $V_K(k) = 110$
    - $V_L(k) = 120$
    - $V_M(k) = 120$
    - $V_N(k) = 270$

- Para el incremento de entradas manipulables:

- $V_A(k) = 1500$
- $V_D(k) = 1500$
- $V_E(k) = 1500$
- $V_G(k) = 1500$
- $V_H(k) = 1500$
- $V_I(k) = 1500$
- $V_J(k) = 1500$
- $V_K(k) = 1500$
- $V_L(k) = 1500$
- $V_M(k) = 1500$
- $V_N(k) = 1500$

- Para las variables de salida:

- $T_A(k) = 1000$
- $T_D(k) = 3500$
- $T_E(k) = 4000$
- $T_G(k) = 2000$
- $T_H(k) = 2200$
- $T_I(k) = 2000$
- $T_J(k) = 2100$
- $T_K(k) = 1000$
- $T_L(k) = 2500$
- $T_M(k) = 2000$
- $T_N(k) = 71000$

A diferencia del sistema centralizado, el controlador que contiene los calefactores tendrá como entradas y referencias sólo el grado de activación de los calefactores, sin incluir la carga de las baterías SOC y el sistema de hidruros metálicos MHL, que se añadirán por otro lado a la microrred. La entrada MD del sistema explicado tampoco albergará la potencia neta que se sacaba del modelo de la microrred, viéndose en la figura 3-15 como sólo aparece la temperatura exterior de la casa.

La potencia demandada ( $Pdem(k)$ ) de la microrred será la potencia que necesite el calefactor según el controlador.

El diagrama en Simulink correspondiente a este último controlador es el siguiente:

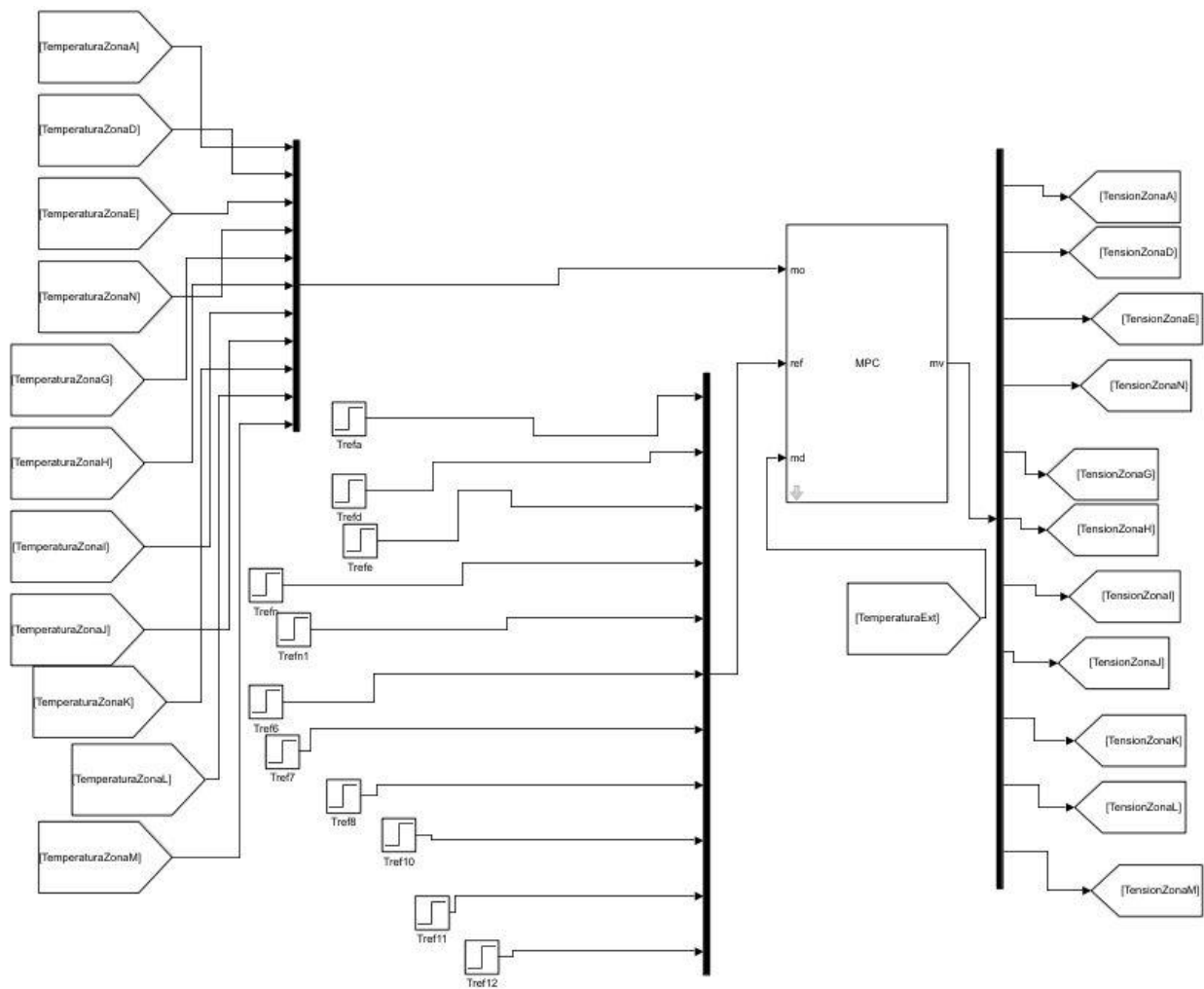


Figura 3-17. Módulo del MPC descentralizado

### 3.2.3 Sistema todo/nada con banda de histéresis

Los sistemas explicados hasta ahora tenían el firme propósito de mejorar la eficiencia del uso de la red eléctrica, así como disminuir el precio económico, ahorrando dinero y materias primas. Sin embargo, se va a hacer un estudio de un sistema más intuitivo y por ende más robusto para justificar la creación de estos modelos a priori más complicados que éste y comprobar que efectivamente se está ahorrando y compensa la implementación de estos nuevos modelos predictivos.

Este nuevo sistema obtendrá su potencia de una microrred como la explicada en el punto 3.2.2 del sistema descentralizado y controlará los calefactores mediante un sistema todo/nada con banda de histéresis

#### 3.2.3.1 Esquema del controlador

El funcionamiento de los controladores por histéresis se basa en: si la diferencia entre la temperatura de referencia y la temperatura real de la correspondiente habitación es mayor que 0, la calefacción se enciende y funciona a la máxima tensión posible (10 V). Si es menor o igual que 0, la calefacción se apaga.

Esta tensión de trabajo del calefactor podría ser modificada a voluntad del usuario, dependiendo de sus necesidades. Se ha definido que todos los calefactores trabajen a su máxima tensión (10 V) cuando estén funcionando.

Esta forma de controlar la temperatura acarrea una cantidad de conmutaciones muy alta que reduce la vida útil del conmutador. Por ello, se aplica una banda de histéresis. El controlador, una vez llegue a la temperatura de referencia (21 °C) y se apague, no se volverá a encender hasta que se alcance la temperatura de 20,5 °C o menos. Esto provoca una disminución considerable de conmutaciones que alargan la vida útil del aparato eléctrico.

El esquema quedaría como:

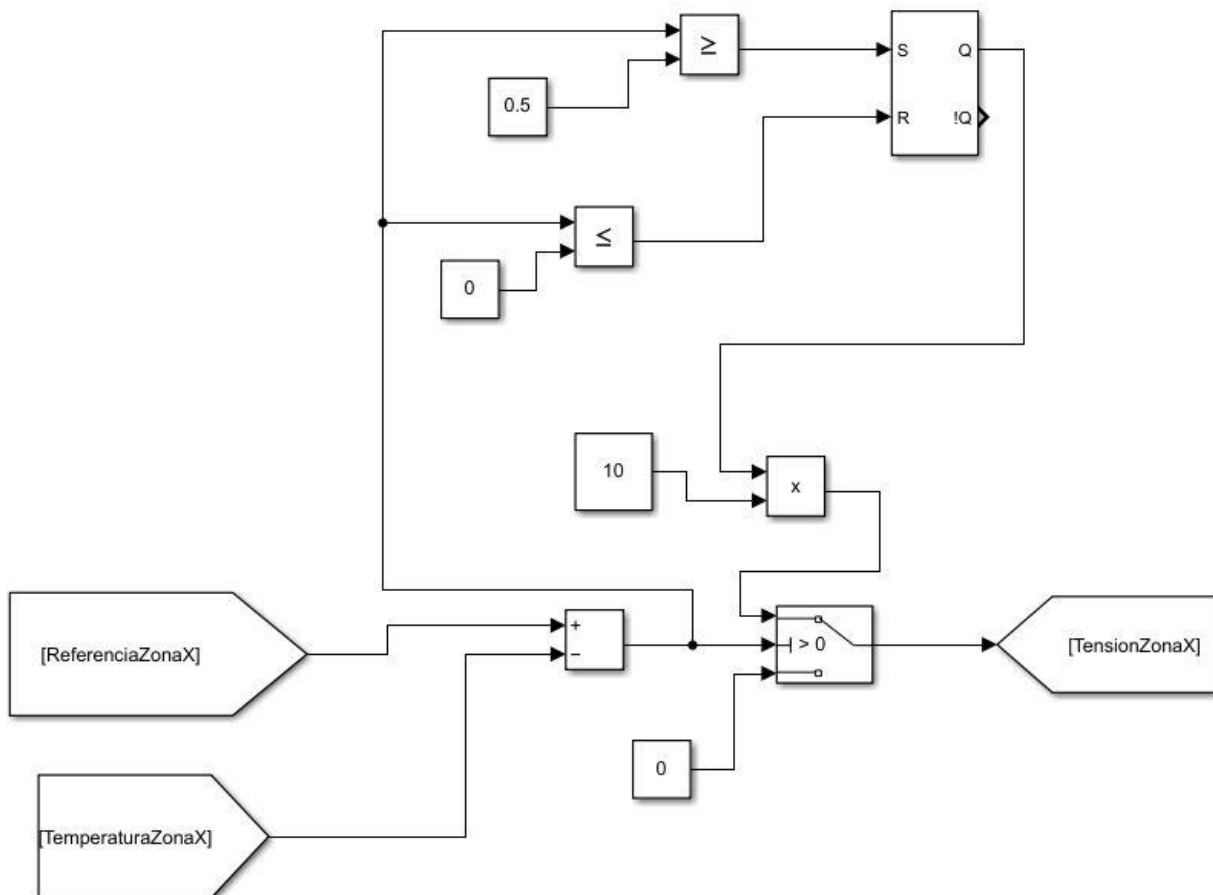


Figura 3-18. Control con histéresis





## 4 ANÁLISIS DE LOS CONTROLADORES

En este capítulo se van a analizar los diferentes controladores y su funcionamiento en las situaciones que se han estudiado a lo largo del trabajo para cada sistema. Primero se van a realizar ensayos para un sistema donde el control del calefactor hace uso de un controlador todo/nada con una banda de histéresis. Después, se estudiará el caso donde hay un controlador MPC para cada sistema, es decir, de forma descentralizada. Y, por último, se estudiará para el caso en el que ambos modelos se incluyen en el mismo MPC, es decir, se estudian de forma centralizada por lo que uno cambiará en función del otro.

### 4.1 Ensayos utilizando el MPC de la microrred y el control todo/nada con histéresis

Este apartado se basa en realizar ensayos utilizando el diagrama simulink de la figura 3-4, que consta de un controlador MPC con la microrred y un control todo/nada con histéresis.

#### 4.1.1 Primer Ensayo

Los parámetros del controlador MPC de la microrred:

- Tiempo de muestreo: 10 segundos
- Horizonte de predicción: 5
- Horizonte de control: 1
- Pesos:
  - Para las entradas manipulables:
    - Para  $P_{H2}(k) = 0$
    - Para  $P_{grid}(k) = 0$
  - Para el incremento de entradas manipulables:
    - Para  $P_{H2}(k) = 0.1$
    - Para  $P_{grid}(k) = 0.1$
  - Para las variables de salida:
    - Para  $SOC(k) = 1$
    - Para  $MHL(k) = 1$

Por su parte, el control por histéresis intentará alcanzar una referencia de 21°C, temperatura ajustada por el usuario.

Las gráficas de las potencias tanto generada como demandada:

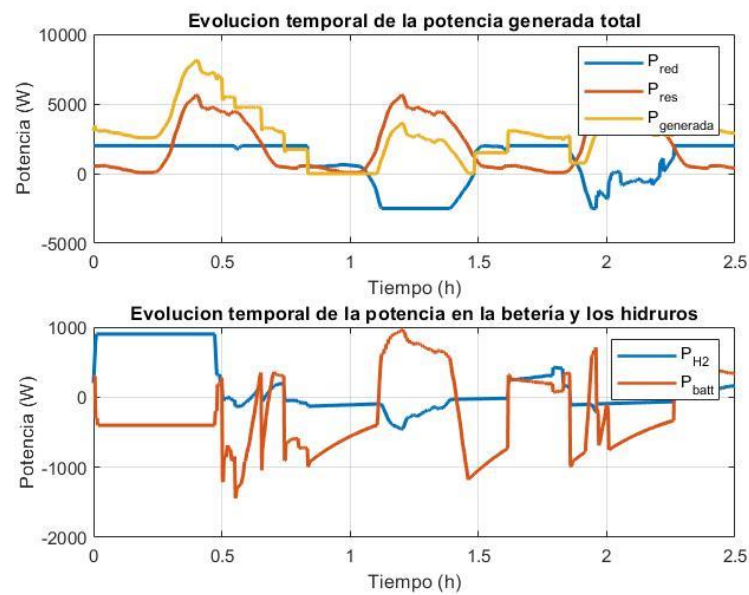


Figura 4-2. Potencia ensayo 1 con histéresis

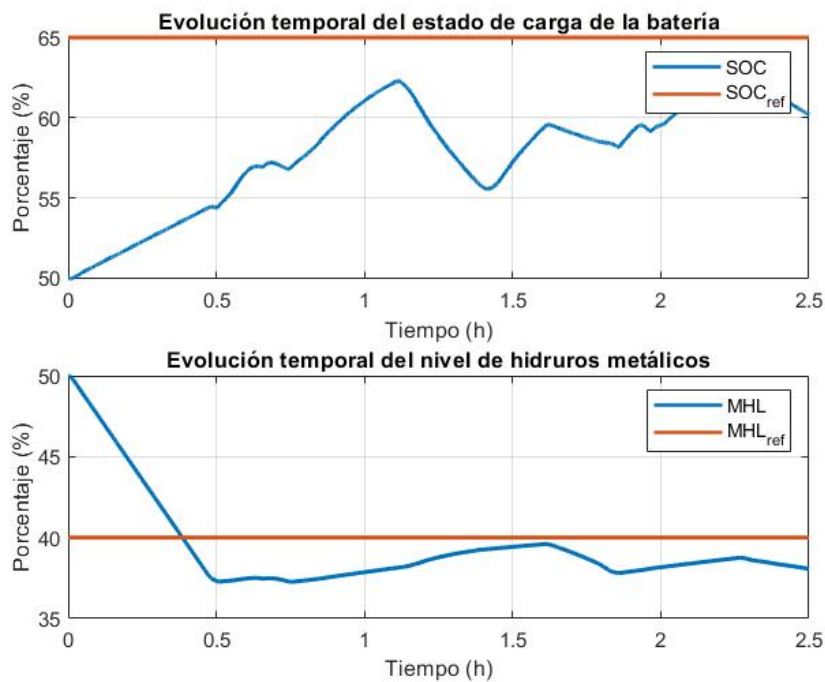


Figura 4-1. Porcentajes del ensayo 1 con histéresis

Como se ve en la figura 4-2, este controlador no tiene reparo en usar toda la energía que sea necesaria para alcanzar sus objetivos, en este caso, la temperatura de referencia, es por eso por lo que:

- El perfil de generación de los paneles solares se ha obtenido de Internet, gracias a las estadísticas que ofrece el Gobierno de España y se ha escalado para que los valores fueran adecuados para este proyecto.

- De toda la potencia que se está generando para alcanzar los objetivos propuestos, vemos que hace uso total de la red eléctrica en momentos necesarios, como al inicio y cuando la potencia solar no alcanza. Pasada la hora de simulación se ve en la figura como el sistema cede potencia a la red eléctrica, provocando que se haga uso de las baterías y por ende provocando la disminución en el porcentaje de ésta.
- El principal objetivo del controlador es llegar a la temperatura de referencia y a los porcentajes de batería y de hidruros impuestos. Debido a la cantidad de habitaciones que hay y a la considerable baja temperatura del exterior, la potencia que se requerirá para alcanzar los objetivos es alta, alrededor de los 13000-14000 vatios, ya que estarán todos los calefactores encendidos, todo esto sin contar lo que consume para que las baterías y el electrolizador lleguen a su referencia. El principio es donde está la carga más fuerte por eso hace el uso total de toda la potencia disponible. Cuando los calefactores llegan a su banda de histéresis, aunque se tengan que estar encendiendo y apagando hará falta alrededor de unos 3000-4000 vatios.
- El electrolizador comienza a trabajar justo al alcanzar la media hora de simulación, ya que  $PH_2$  ( $k$ ) toma valores por debajo de cero, es por eso por lo que el nivel de hidruros metálico comienza descendiendo y por ende cediendo potencia. Al alcanzar el tiempo anterior dicho, como la potencia demandada es menor, se absorbe parte de la potencia por el electrolizador haciendo que el porcentaje de hidruros aumente para intentar alcanzar la referencia impuesta. Esto implica que trabaja tanto la pila de combustible como el electrolizador absorbiendo potencia.
- Las baterías comienzan absorbiendo energía y no es hasta pasada la hora que no comienza a ceder energía y, por lo tanto, a bajar el porcentaje de carga de las baterías para aportar al equipo la potencia demandada que la red y los paneles no pueden afrontar por su cuenta.
- Tanto el estado de carga de las baterías como el nivel de hidruros metálicos se acercan adecuadamente a sus respectivas referencias, hasta que el sistema no puede afrontar la potencia demandada por los calefactores y éstas dos primeras se sacrifican para alcanzar la temperatura óptima en toda la casa, alejándose así de su meta.
- Que los hidruros y el porcentaje de la batería no lleguen a la referencia impuesto es debido a que estamos limitando la potencia que le entra a la casa, por ejemplo, la red sólo puede aportar 2000 vatios y los paneles solares incluso menos.

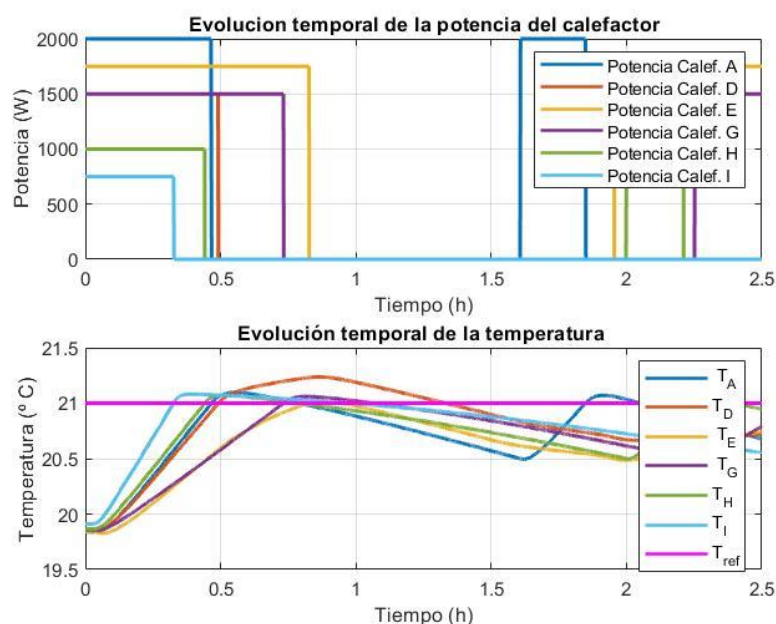


Figura 4-3. Potencia por zonas ensayo 1 con histéresis

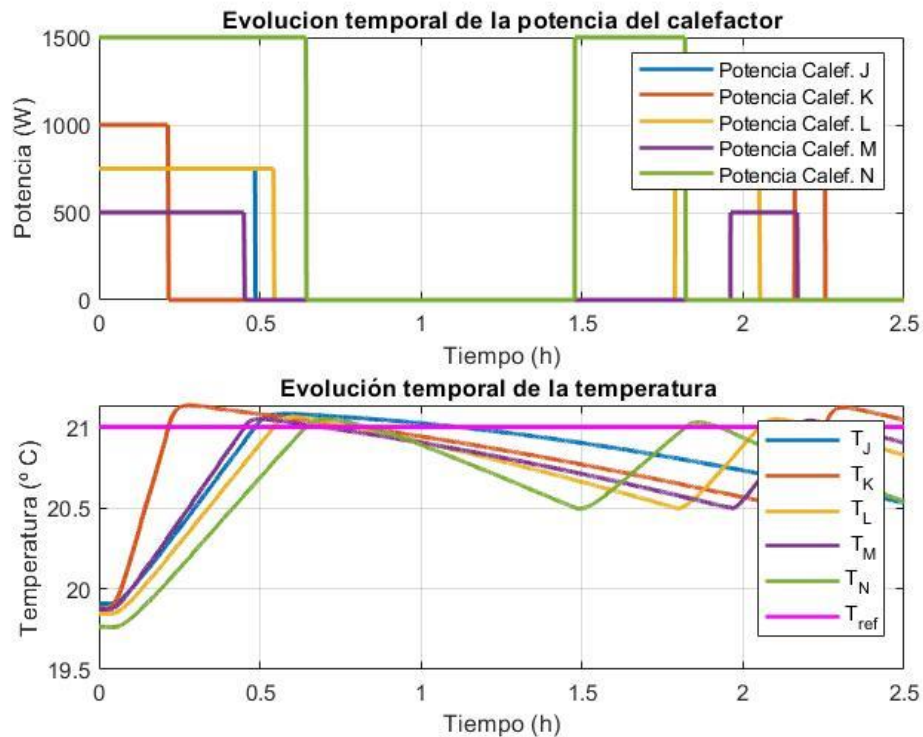


Figura 4-4. Potencia por zonas ensayo 1 con histéresis

Las diferentes variables tienen este comportamiento debido a los pesos que se les han asignado.

En los siguientes ensayos, se modificarán los pesos y se observará cómo se modifican sus comportamientos. En este caso sólo cambiaremos la microrred ya que es el único modelo manipulable.

#### 4.1.2 Segundo Ensayo

Los parámetros del controlador MPC de la microrred serán ahora

- Tiempo de muestreo: 10 segundos
- Horizonte de predicción: 5
- Horizonte de control: 1
- Pesos:
  - Para las entradas manipulables:
    - Para  $P_{H2}(k) = 0$
    - Para  $P_{grid}(k) = 400$
  - Para el incremento de entradas manipulables:
    - Para  $P_{H2}(k) = 0.1$
    - Para  $P_{grid}(k) = 0.1$
  - Para las variables de salida:
    - Para  $SOC(k) = 0.0001$
    - Para  $MHL(k) = 1$

Por su parte, el control por histéresis intentará alcanzar una referencia de 21°C, temperatura ajustada por el usuario.

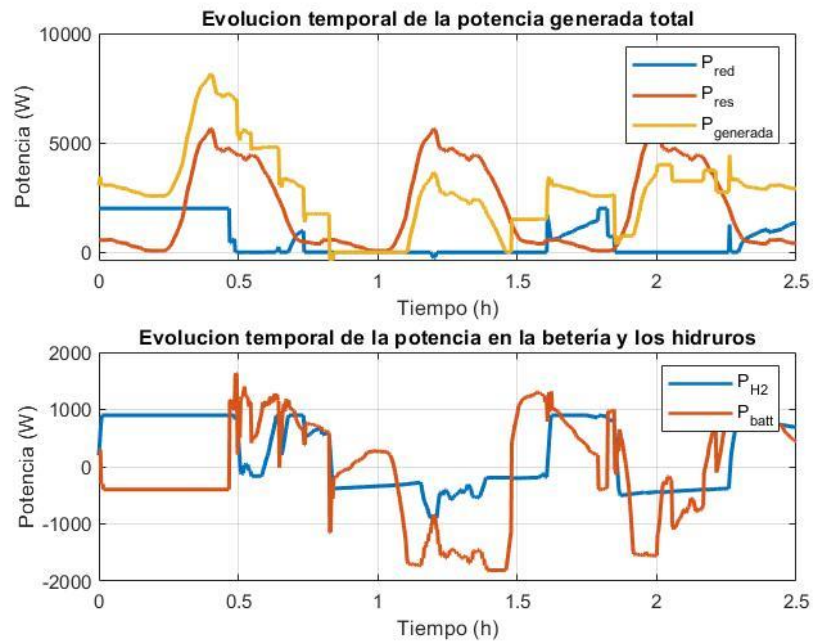


Figura 4-6. Potencia ensayo 2 con histéresis

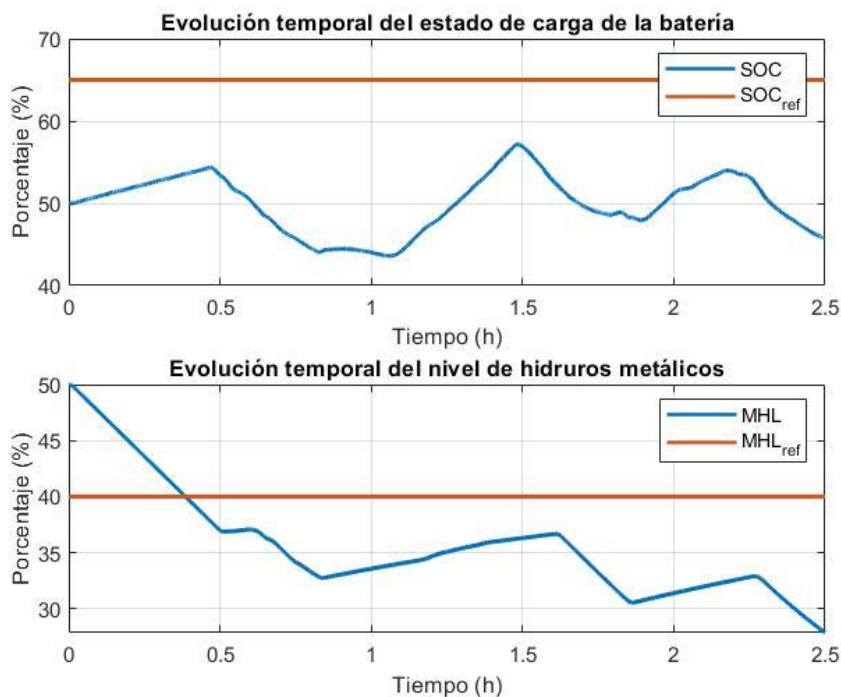


Figura 4-5. Porcentaje ensayo 2 con histéresis

Se observa que:

- El electrolizador se activa en los momentos de la simulación dónde los calefactores han alcanzado su referencia y no demandan tanta potencia del sistema, es por eso por lo que entre la hora y la hora y media que vemos que la potencia generada disminuye, el electrolizador

aprovecha para absorber potencia y llevar el nivel de hidruros metálicos al porcentaje de referencia. Todo esto se ve cuando  $PH2(k)$  toma valores menores que cero.

- Se ha reducido el uso de la potencia de la red drásticamente. Esto es debido al aumento del peso que le hemos dado a esta variable. Un aumento de peso a una entrada provoca que el controlador de menos prioridad a la hora de utilizarla. Aún así, hay momentos críticos en los que se usa como al inicio cuando mucha potencia es requerida.
- El perfil de generación de los paneles solares se mantiene similar.
- Las baterías en este caso empiezan generando potencia eléctrica, para luego absorber. Esto se produce debido a que el peso del estado de carga de la batería ha disminuido. Una disminución del peso a una salida da lugar a que la prioridad del controlador de llevar dicha variable al valor de referencia sea menor. Esto permite una mayor utilización de las baterías como consecuencia.
- Como se acaba de mencionar, la prioridad del controlador de llevar el nivel de estado de carga de la batería es mucho menor. Por lo que, el estado de carga se encuentra más alejado de su referencia esta vez. En cambio, el nivel de hidruros metálicos se mantiene como antes, e incluso, se disminuye el tiempo que tarda en acercarse a su valor de referencia. Esto se debe a que el controlador pone todo el esfuerzo en llevar el nivel de hidruros metálicos al valor de referencia, gracias a la disminución del peso del estado de carga de la batería. Sin embargo y aún teniendo en cuenta lo dicho previamente, los niveles de hidruros no están totalmente en la referencia debido a la penalización del uso de la red.

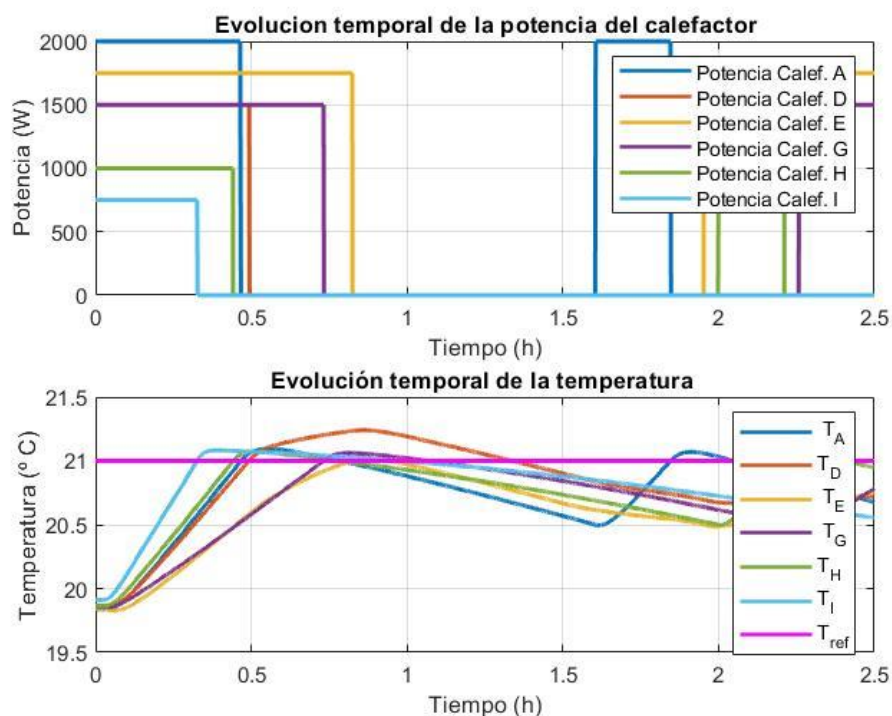


Figura 4-7. Potencia por zonas ensayo 2 con histéresis

En cuanto al control del calefactor, se observa que sigue funcionando adecuadamente y sin cambiar, ya que los pesos no le afectan al ser una parte independiente.

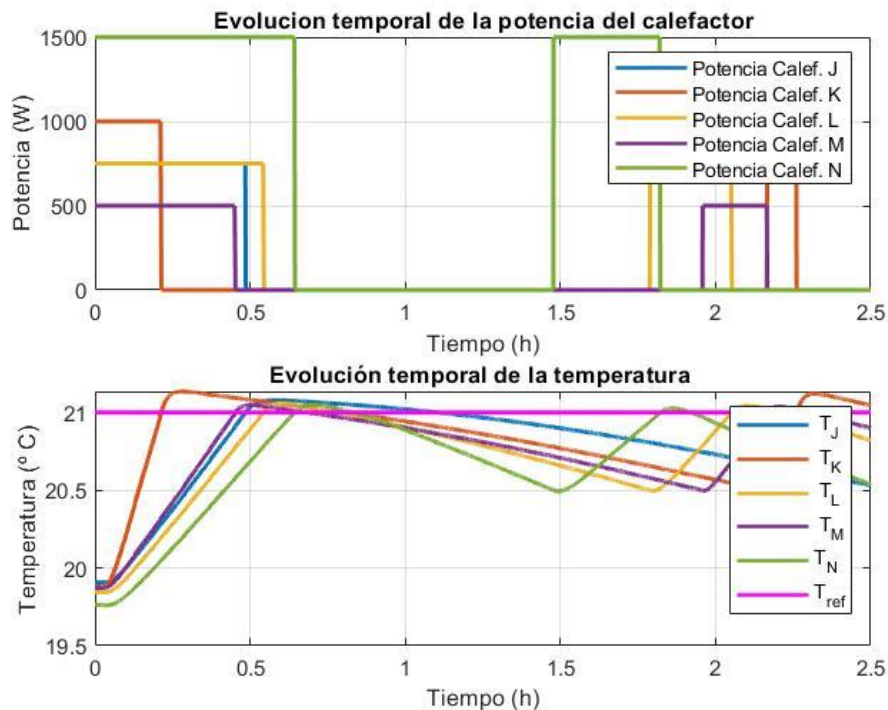


Figura 4-8. Potencia por zonas ensayo 2 con histéresis

## 4.2 Ensayos utilizando el MPC descentralizado

En este caso, se va a estudiar el MPC descentralizado, el que aparece en la Figura 3-15. Es aquel donde la microrred y el calefactor se tratan como sistemas independientes, como en el sistema todo/nada con histéresis, a diferencia de que ahora se utiliza un controlador MPC para cada uno, quitando la parte rústica que alojaba el controlador por histéresis. Al usar un controlador MPC, éste mejorará la vida de los conmutadores al mantener la temperatura en la referencia y no encender y apagar en periodos tan corto de tiempo. Además, ahorrará más energía, siendo así más eficiente el sistema. En el subapartado anterior, se ha visto la influencia de los pesos en cuanto al funcionamiento del controlador. Por ello, las características de los controladores, obtenidas mediante prueba y error, van a ser las siguientes:

### 4.2.1 Primer ensayo

Para el primer ensayo vamos a usar una potencia de los paneles inferior a la anterior. Los niveles iniciales de estado de carga de la batería y de hidruros metálicos tendrán:

- $SOC = 50 \%$
- $MHL = 50\%$
- Pesos Microrred:
  - Para las entradas manipulables:
    - $P_{H_2}(k) = 0$
    - $P_{grid}(k) = 0$
  - Para el incremento de entradas manipulables:
    - $P_{H_2}(k) = 0.1$

- $P_{grid}(k) = 0.1$
- Para las variables de salida:
  - $SOC(k) = 1$
  - $MHL(k) = 1$
- Pesos Calefactor:
  - Para las entradas manipulables:
    - $V_A(k) = 110$
    - $V_D(k) = 200$
    - $V_E(k) = 100$
    - $V_G(k) = 110$
    - $V_H(k) = 110$
    - $V_I(k) = 100$
    - $V_J(k) = 130$
    - $V_K(k) = 110$
    - $V_L(k) = 120$
    - $V_M(k) = 120$
    - $V_N(k) = 270$
  - Para el incremento de entradas manipulables:
    - $V_A(k) = 1500$
    - $V_D(k) = 1500$
    - $V_E(k) = 1500$
    - $V_G(k) = 1500$
    - $V_H(k) = 1500$
    - $V_I(k) = 1500$
    - $V_J(k) = 1500$
    - $V_K(k) = 1500$
    - $V_L(k) = 1500$
    - $V_M(k) = 1500$
    - $V_N(k) = 1500$



- Para las variables de salida:
  - $T_A(k) = 10000$
  - $T_D(k) = 35000$
  - $T_E(k) = 40000$
  - $T_G(k) = 20000$
  - $T_H(k) = 22000$
  - $T_I(k) = 20000$
  - $T_J(k) = 21000$
  - $T_K(k) = 10000$
  - $T_L(k) = 25000$
  - $T_M(k) = 20000$
  - $T_N(k) = 71000$

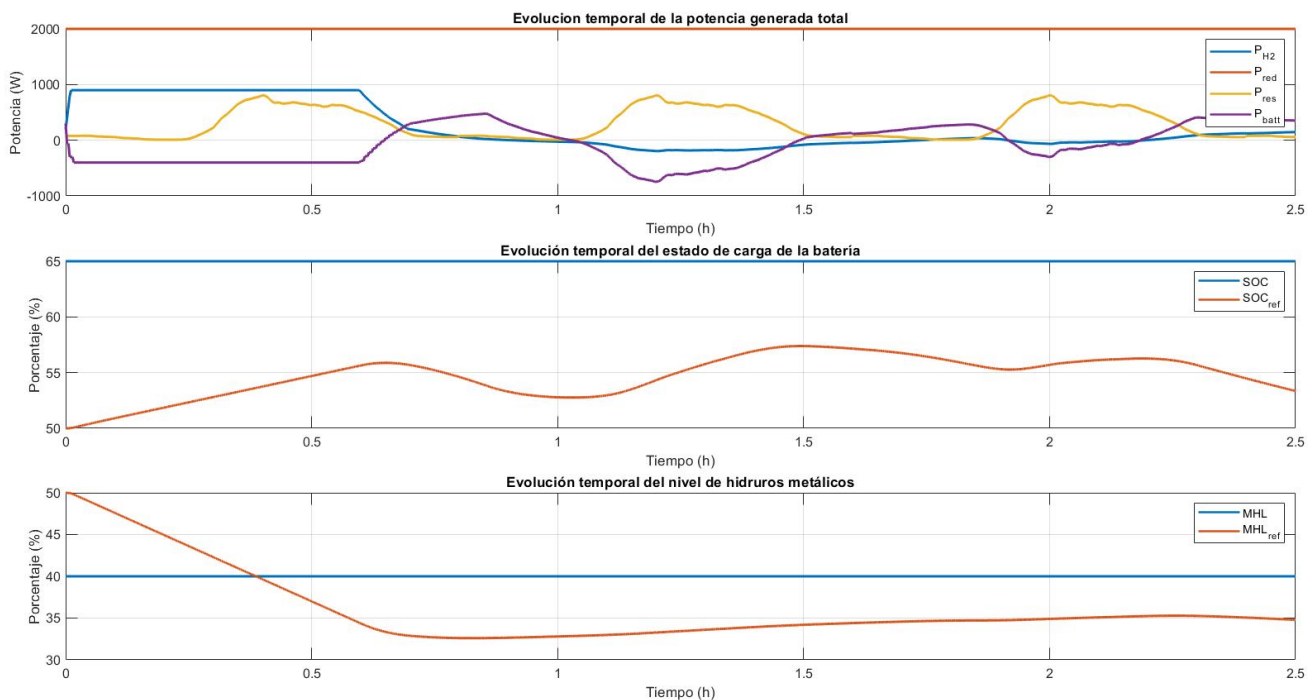


Figura 4-9. Potencia ensayo 1 descentralizado

Observamos que:

- El controlador de los calefactores es notoriamente más eficiente que el anterior con histéresis, ya que se produce una disminución gradual de su potencia en función de su cercanía a la temperatura de referencia.
- Al inicio de la simulación, los calefactores parten de una temperatura muy inferior a su objetivo, por lo que la potencia necesaria para conseguir resultados es superior a la dada por las baterías, los hidruros y los paneles, es por eso por lo que se hace uso de la red, además de que tampoco se le ha cambiado el peso para que interpretara una reducción de ésta.

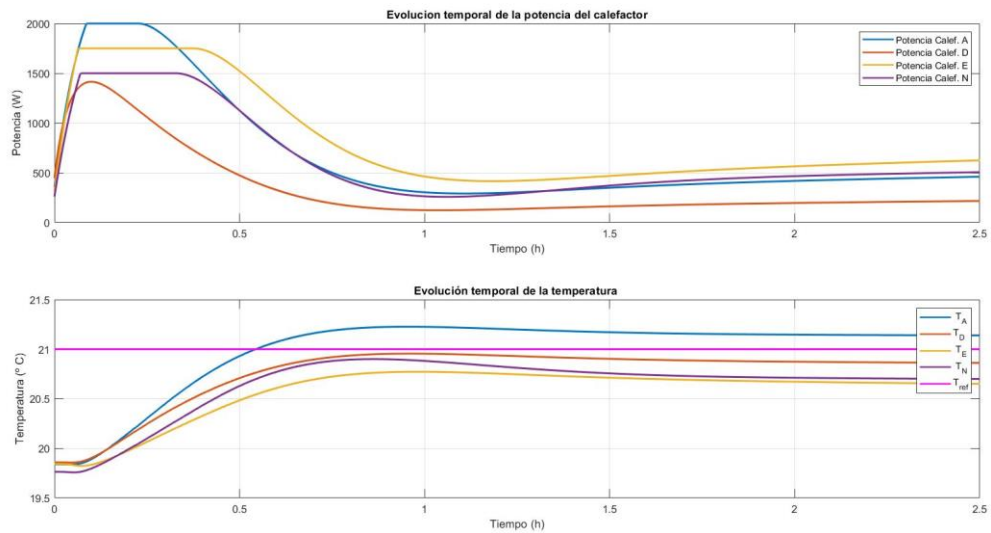


Figura 4-10. Potencia por zonas ensayo 1 descentralizado

El funcionamiento del controlador es el esperado según los pesos utilizados para cada variable, para llegar justo a la referencia habría que hacer un control más fino de los pesos.

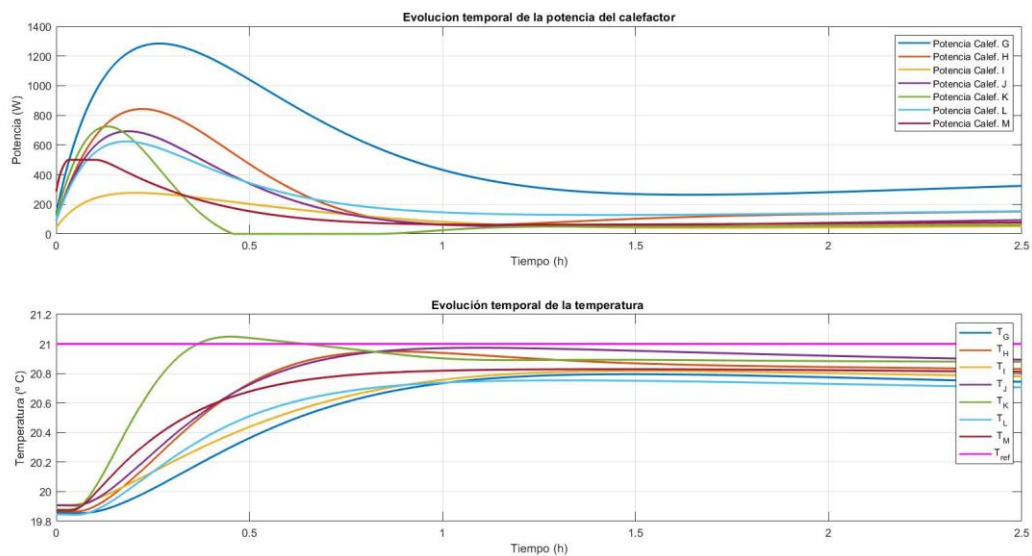


Figura 4-11. Potencia por zonas ensayo 1 descentralizado

#### 4.2.2 Segundo ensayo

Seguirá todo igual que en el ensayo del punto 4.2.1, a salvedad de los pesos de la microrred:

- Pesos Microrred:
  - Para las entradas manipulables:
    - $P_{H2}(k) = 0$
    - $P_{grid}(k) = 1000$
  - Para el incremento de entradas manipulables:
    - $P_{H2}(k) = 0.1$
    - $P_{grid}(k) = 0.1$
  - Para las variables de salida:
    - $SOC(k) = 0.001$
    - $MHL(k) = 1$

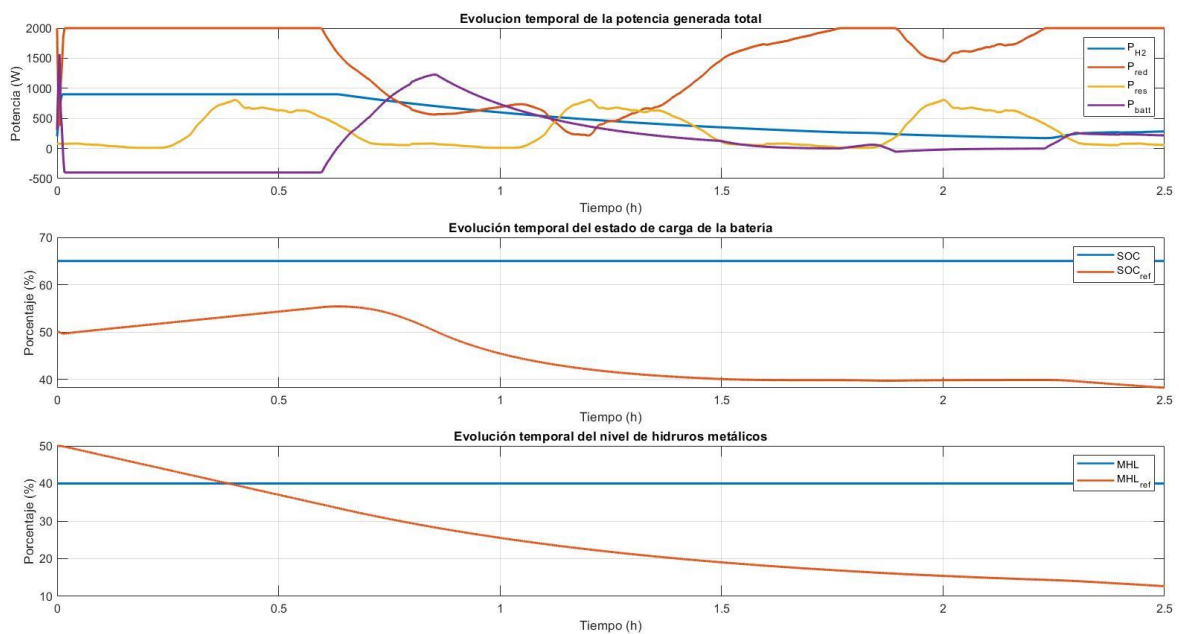


Figura 4-12. Potencia ensayo 2 descentralizado

Observamos que:

- Cambiando el peso de la red y de la batería vemos cómo ésta primera se reduce y se usa el de las baterías que ya no tiene como prioridad llegar a la referencia. Igualmente, y a pesar de tener penalizada la red, ésta se sigue utilizando sobre todo al principio de la simulación ya que la demanda de potencia está por encima de la aportada por las placas, los hidruros y las baterías.
- Como la red ha sido penalizada y los calefactores siguen trabajando a la misma potencia que en el apartado anterior, esto se traduce en un uso más pronunciado de las baterías y los hidruros, que disminuyen hasta su nivel permitido, en este caso un porcentaje de 40 para las baterías y uno de 10 para los hidruros.

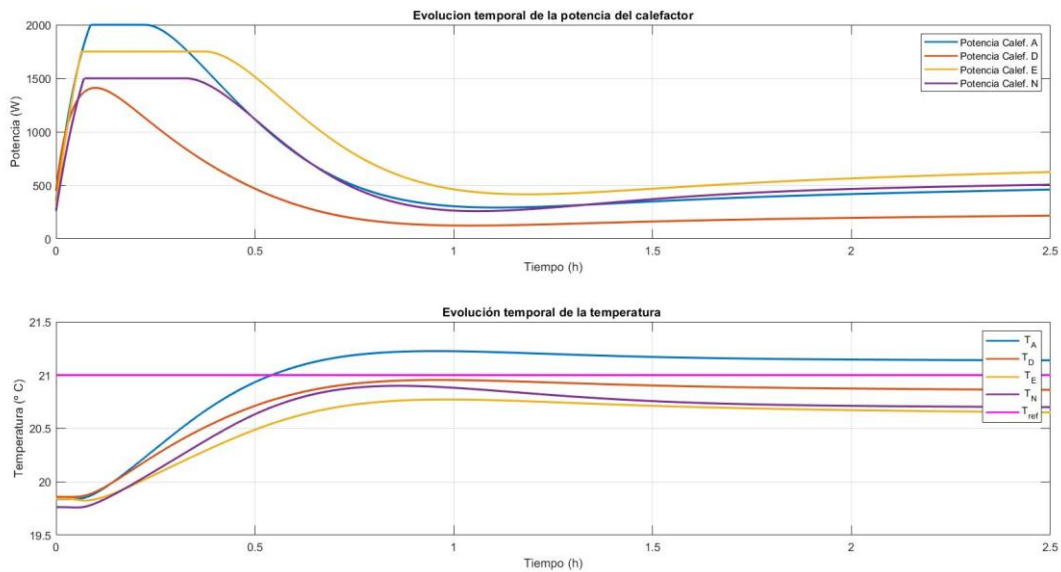


Figura 4-13. Potencia por zonas ensayo 2 descentralizado

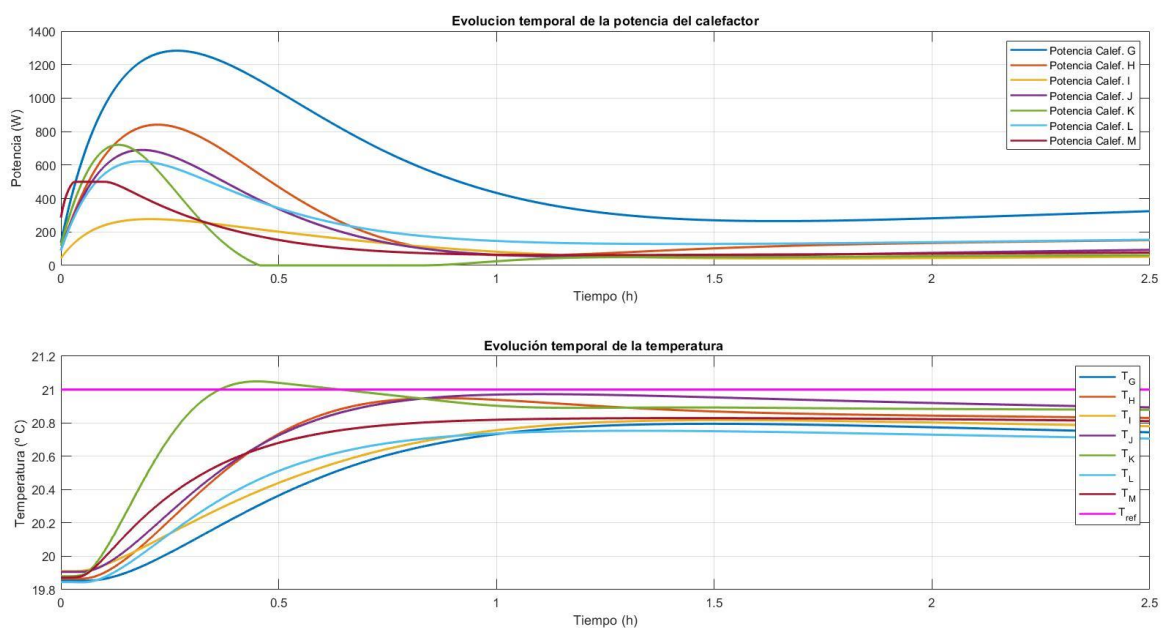


Figura 4-14 .Potencia por zonas ensayo 2 descentralizado

Como los pesos del modelo del calefactor no se han cambiado, éstos siguen siendo igual que en el caso anterior ya que constamos de un sistema descentralizado y la microrred funciona de manera independiente.

### 4.2.3 Tercer ensayo

Ahora, se va a llevar la situación anterior un poco más allá. Se va a suponer que no se puede obtener energía a través de los paneles solares durante toda la simulación. También se disminuirá el nivel inicial de hidruros metálicos:

- $SOC = 50 \%$

- MHL= 50%

Los pesos serán iguales que en el Segundo ensayo.

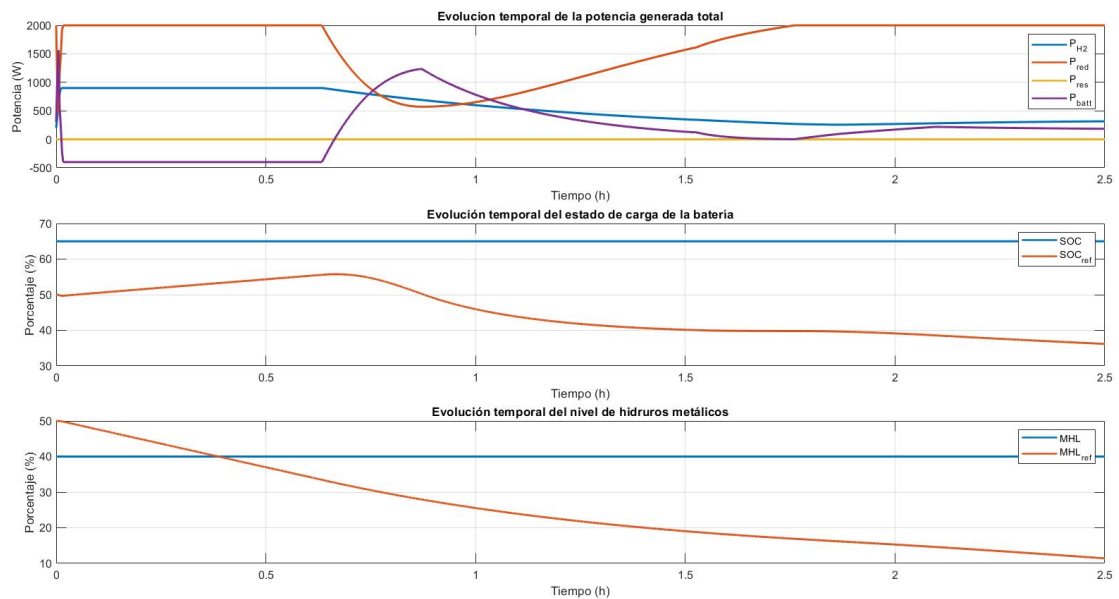


Figura 4-15. Potencia ensayo 3 descentralizado

Se observa que:

- La cancelación de la potencia aportada por las placas solares hace necesario el uso de la red, los hidruros y las baterías, es por eso por lo que éstas dos últimas disminuyen notablemente hasta pasada la media hora ensayo, que se establecen en la referencia las temperaturas. El PH2 pasa por debajo de 0 para que los hidruros absorban potencia y no caigan debajo del mínimo especificado, en este caso 10. Todo el poder recae sobre la red y ésta no siempre es capaz de afrontar lo pedido.

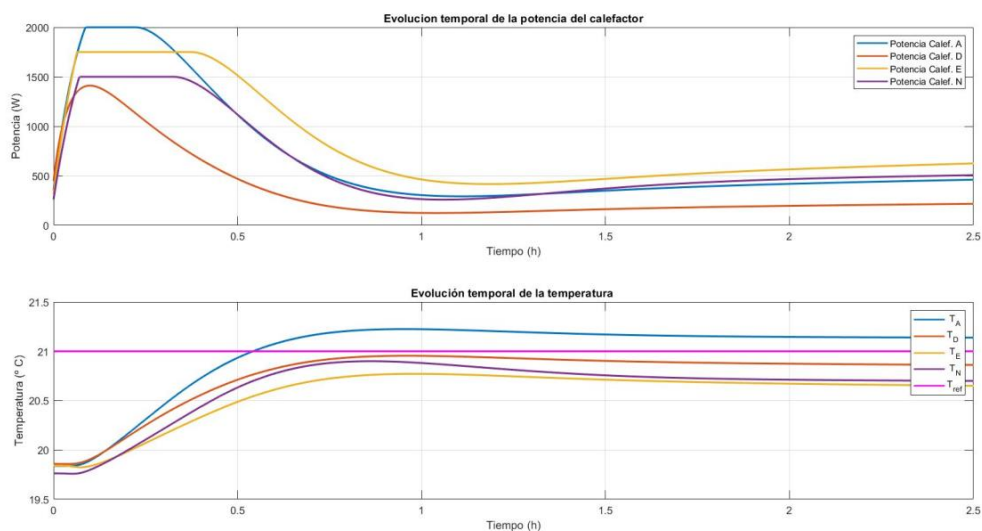


Figura 4-16. Potencia por zonas ensayo 3 descentralizado

Se puede observar cómo, independientemente de la generación existente, la potencia del calefactor no se ve afectada. Esto es debido al tratamiento de ambos sistemas como independientes. El

controlador MPC del calefactor se centra únicamente en llevar la temperatura a la referencia impuesta.

#### 4.2.4 Cuarto ensayo

Se estudia el caso contrario al del ensayo del punto 4.2.3, ahora se dispone de una gran potencia gracias a los paneles solares.

Los pesos quedan igual también.

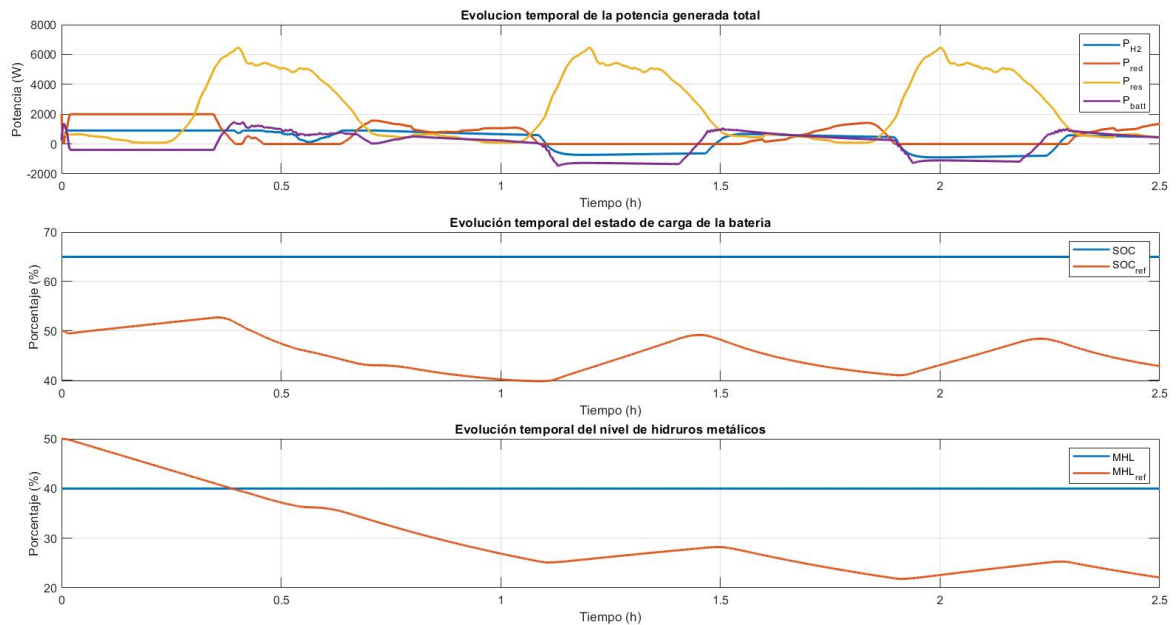


Figura 4-17. Potencia ensayo 4 descentralizado

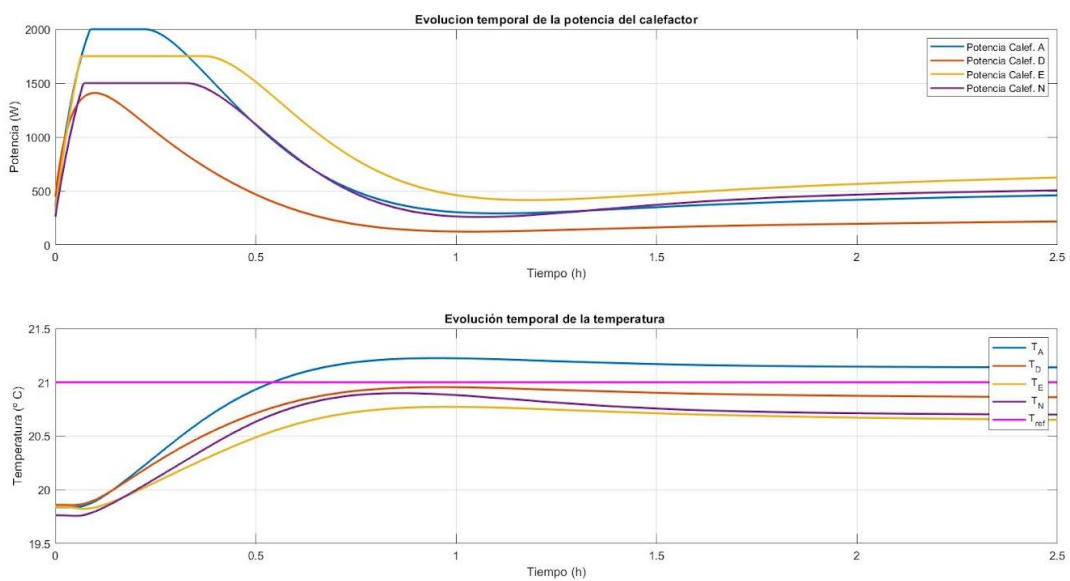


Figura 4-18. Potencia por zonas ensayo 4 descentralizado

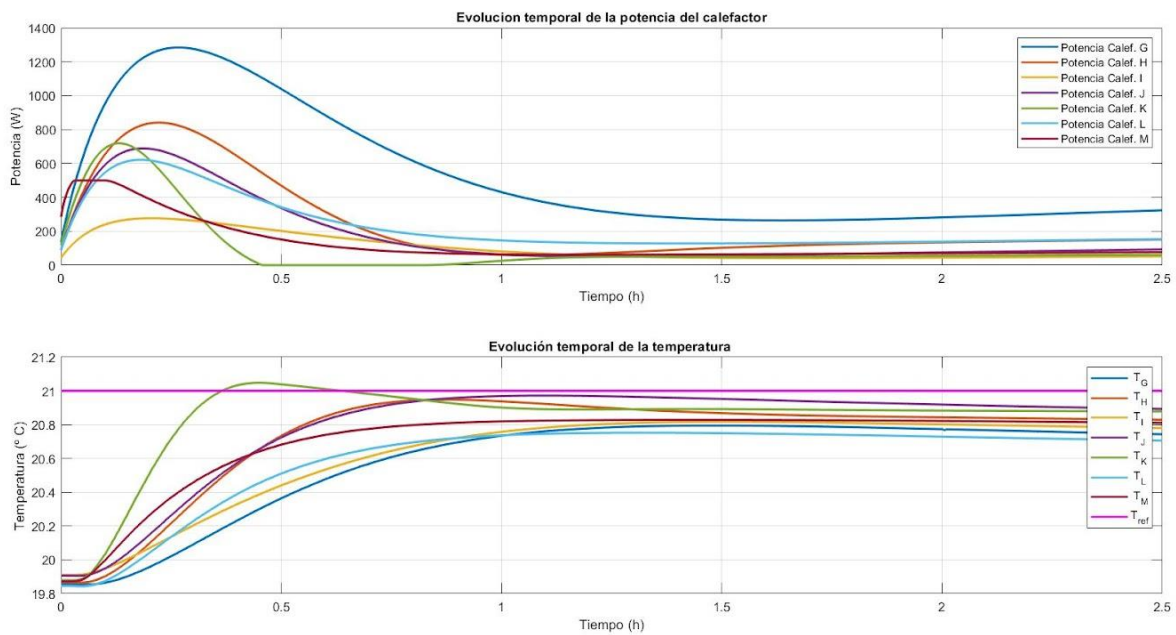


Figura 4-19. Potencia por zonas ensayo 4 descentralizado

Como se puede ver en este ensayo, se ve muy penalizado el uso de la red ya que tenemos más energía de generación, aún así el sistema demanda mucha potencia, por lo que en momentos claves, si se hace uso de la red, es por eso que el nivel de los hidruros y las baterías, aunque mejora en los momentos donde la placa puede afrontar todo el gasto de energía, disminuye en los momentos en los que no y por eso no llega a alcanzar nunca la referencia, aunque todo dentro de las restricciones especificadas en el controlador

Como los pesos del modelo del calefactor no se han cambiado, éstos siguen siendo igual que en el caso del punto 4.2.2 ya que constamos de un sistema descentralizado y la microrred funciona de manera independiente.

### 4.3 Ensayos utilizando el MPC centralizado

En este último caso, se va a analizar el funcionamiento del MPC centralizado, el que aparece en la Figura 3-13. Es aquel en el que la microrred y el calefactor se tratan como un único modelo conjunto, utilizando también un único controlador MPC. Mediante ensayos de prueba y error, las características del controlador van a ser las siguientes:

Tanto el nivel inicial del estado de carga de la batería como el nivel inicial de hidruros metálicos será del 50%. A lo largo de ellos, se modificarán sólo los pesos de la microrred y la potencia de generación. Se analizará el comportamiento del controlador MPC para diferentes casos de generación:

- Pesos:
  - Para las entradas manipulables:
    - $P_{H2}(k) = 0$
    - $P_{grid}(k) = 0$
    - $V_A(k) = 110$
    - $V_D(k) = 200$

- $V_E(k) = 100$
- $V_G(k) = 110$
- $V_H(k) = 110$
- $V_I(k) = 100$
- $V_J(k) = 130$
- $V_K(k) = 110$
- $V_L(k) = 120$
- $V_M(k) = 120$
- $V_N(k) = 270$
- Para el incremento de entradas manipulables:
  - $P_{H2}(k) = 0$
  - $P_{grid}(k) = 0$
  - $V_A(k) = 1500$
  - $V_D(k) = 1500$
  - $V_E(k) = 1500$
  - $V_G(k) = 1500$
  - $V_H(k) = 1500$
  - $V_I(k) = 1500$
  - $V_J(k) = 1500$
  - $V_K(k) = 1500$
  - $V_L(k) = 1500$
  - $V_M(k) = 1500$
  - $V_N(k) = 1500$
- Para las variables de salida:
  - $SOC(k) = 0.001$
  - $MHL(k) = 0.01$
  - $T_A(k) = 10000$
  - $T_D(k) = 35000$
  - $T_E(k) = 40000$
  - $T_G(k) = 20000$
  - $T_H(k) = 22000$
  - $T_I(k) = 20000$
  - $T_J(k) = 21000$
  - $T_K(k) = 10000$
  - $T_L(k) = 25000$
  - $T_M(k) = 20000$
  - $T_N(k) = 71000$



### 4.3.1 Primer ensayo

La potencia de los paneles siendo como la del apartado 4.2.1 y los pesos especificados previamente Se analizará el comportamiento del controlador MPC para diferentes casos de generación

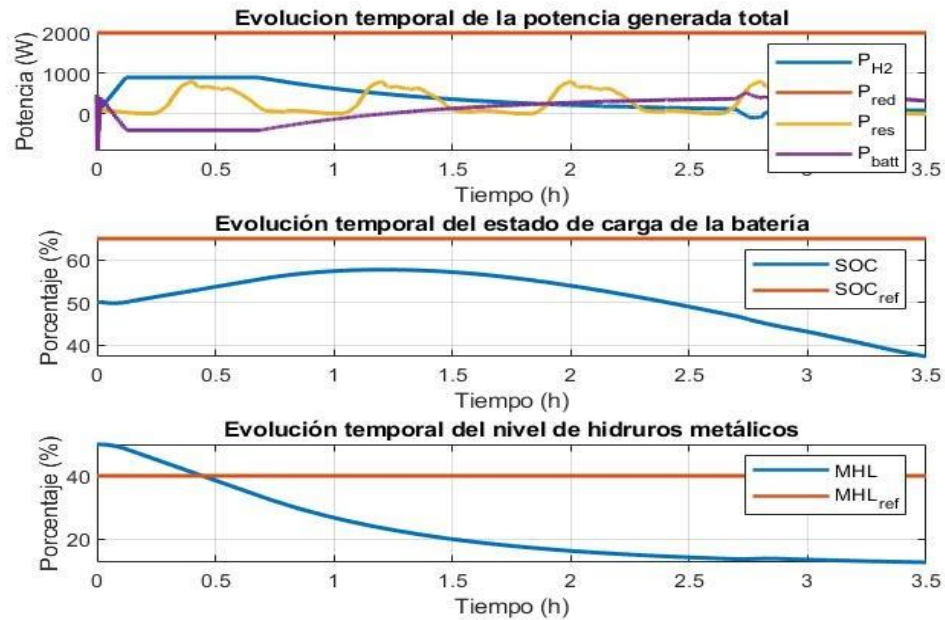


Figura 4-20. Potencia ensayo 1 centralizado

Se observa que:

- El comportamiento de la microrred no varía mucho con respecto a los subapartados anteriores, funciona adecuadamente. Para poder acercar los calefactores a su temperatura de referencia se hace uso de la red, los paneles solares y el tanque de hidruros. Pasada la hora y media deja de trabajar la pila de combustible para que éste no sobrepase su límite inferior especificado en el sistema MPC. Con este cambio en la pila de combustible, el banco de baterías también disminuye aportando potencia al sistema y alejándose de su referencia.

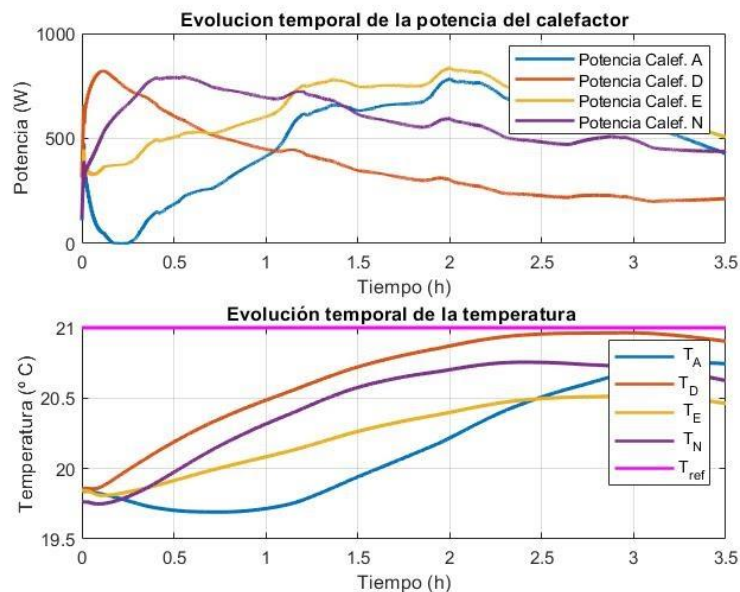


Figura 4-21. Potencia por zonas ensayo 1 centralizado

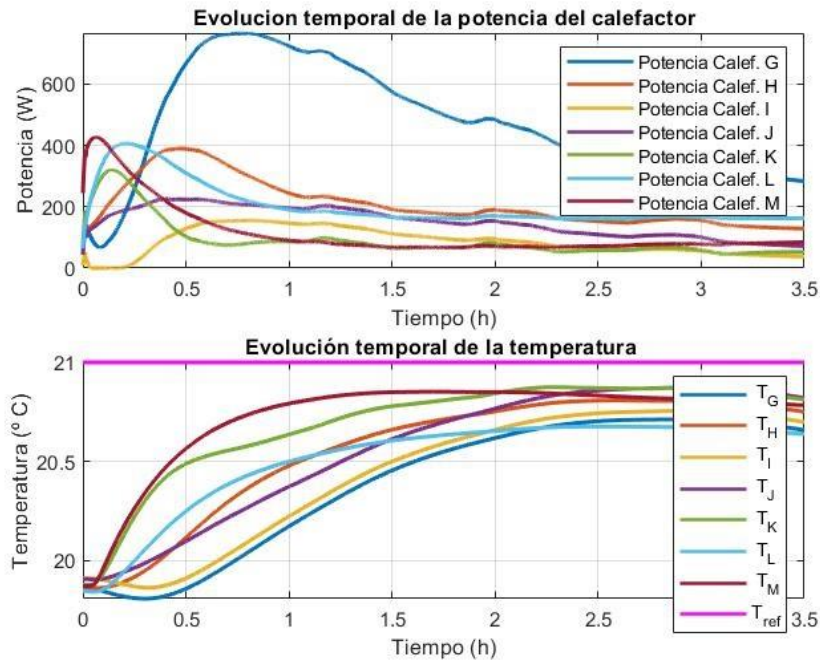


Figura 4-22. Potencia por zonas ensayo 1 centralizado

En este caso se puede apreciar un comportamiento diferente respecto a los casos de control anteriores. Esto es debido a la centralización del sistema. Este hecho permite que la potencia del calefactor varíe también en función de la potencia que se está recibiendo gracias a la generación, de forma que cuanto más potencia se disponga gracias a la generación, mayor potencia se utilizará en el calefactor para alcanzar su valor de referencia. Bien es cierto que la temperatura para este caso no alcanza perfectamente la referencia y crece más lento debido a la falta de potencia al inicio de la simulación.

La llegada a la referencia, además de la potencia disponible, también vendrá dictaminada por el ajuste fino de los pesos y las necesidades del usuario.

### 4.3.2 Segundo Ensayo

Para este ensayo vamos a eliminar la potencia aportada por los paneles y a penalizar el uso de la red, quedando los pesos del calefactor igual y los de la microrred:

- Pesos Microrred:
  - Para las entradas manipulables:
    - $P_{H2}(k) = 0$
    - $P_{grid}(k) = 1000$
  - Para el incremento de entradas manipulables:
    - $P_{H2}(k) = 0.1$
    - $P_{grid}(k) = 0.1$
  - Para las variables de salida:
    - $SOC(k) = 0.001$
    - $MHL(k) = 0.001$

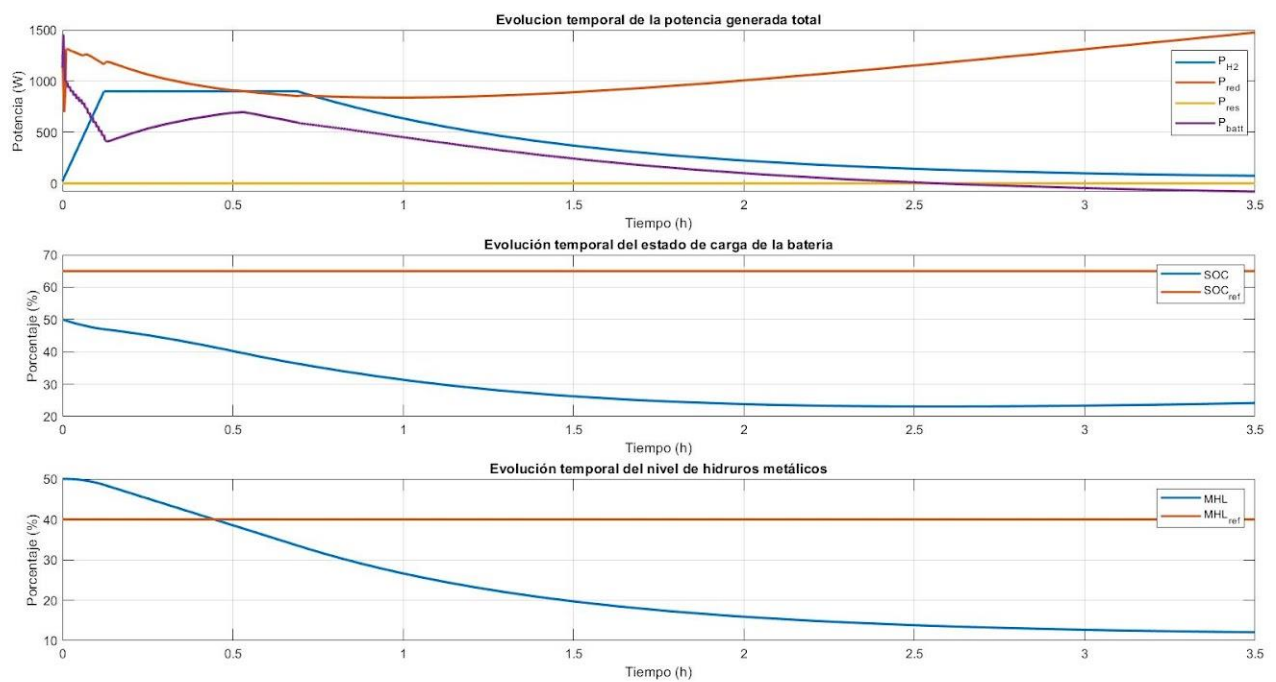


Figura 4-23. Potencia ensayo 2 centralizado

Como no se dispone de potencia de generación, tanto el estado de carga de la batería como el nivel de hidruros metálicos disminuyen, siempre con valores que cumplan las restricciones impuestas en el controlador. La red en este caso, aunque vemos como su uso se ve penalizado respecto al ensayo anterior, se sigue utilizando, aunque se ve limitado para ahorrar en la factura de la luz.

A consecuencia de lo anterior y al no disponerse de la potencia necesaria, en vez de tirar del máximo de la red como veíamos en el caso descentralizado o en histéresis, la consecuencia de todo esto es que la temperatura no llegue a su referencia y se acerque a la temperatura exterior. Vemos que es un buen controlador porque prioriza el ahorro de luz y energía frente al funcionamiento de los calefactores y la búsqueda de confort.

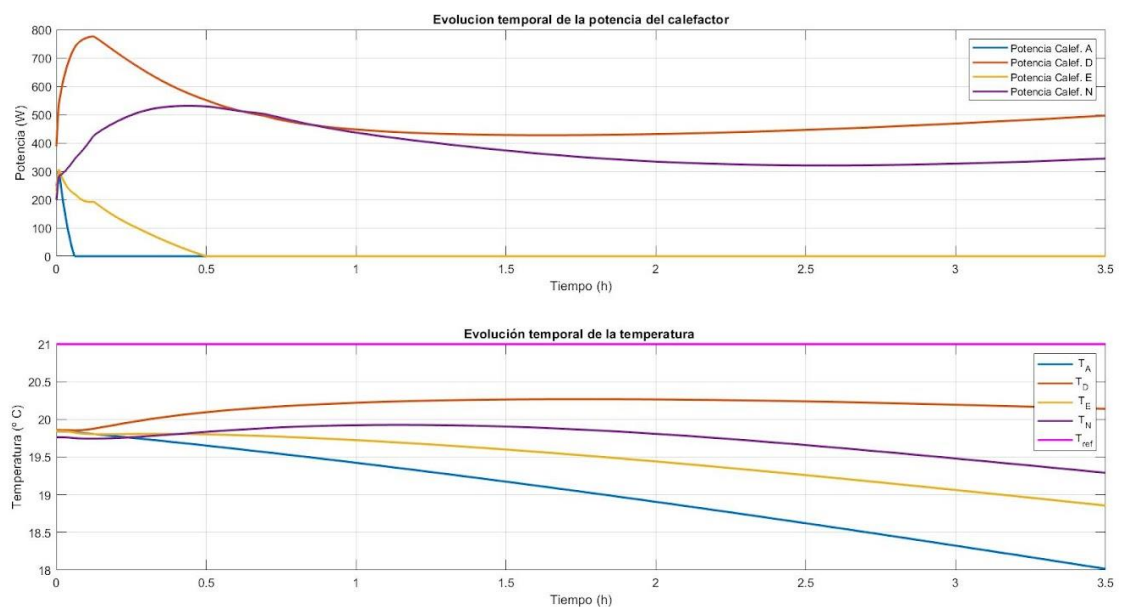


Figura 4-24. Potencia por zonas ensayo 2 centralizado

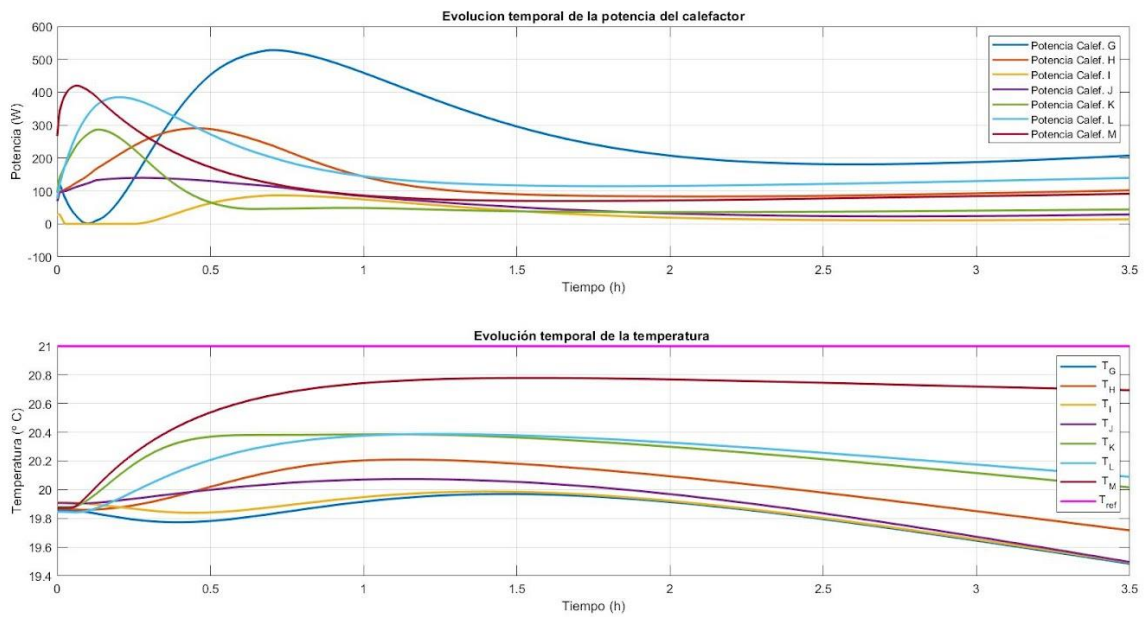


Figura 4-25. Potencia por zonas ensayo 2 centralizado

### 4.3.3 Tercer ensayo

Vamos a hacer un aumento de la potencia de generación multiplicando por 10 la potencia de los paneles de los apartados anteriores, pero dejando los pesos igual:

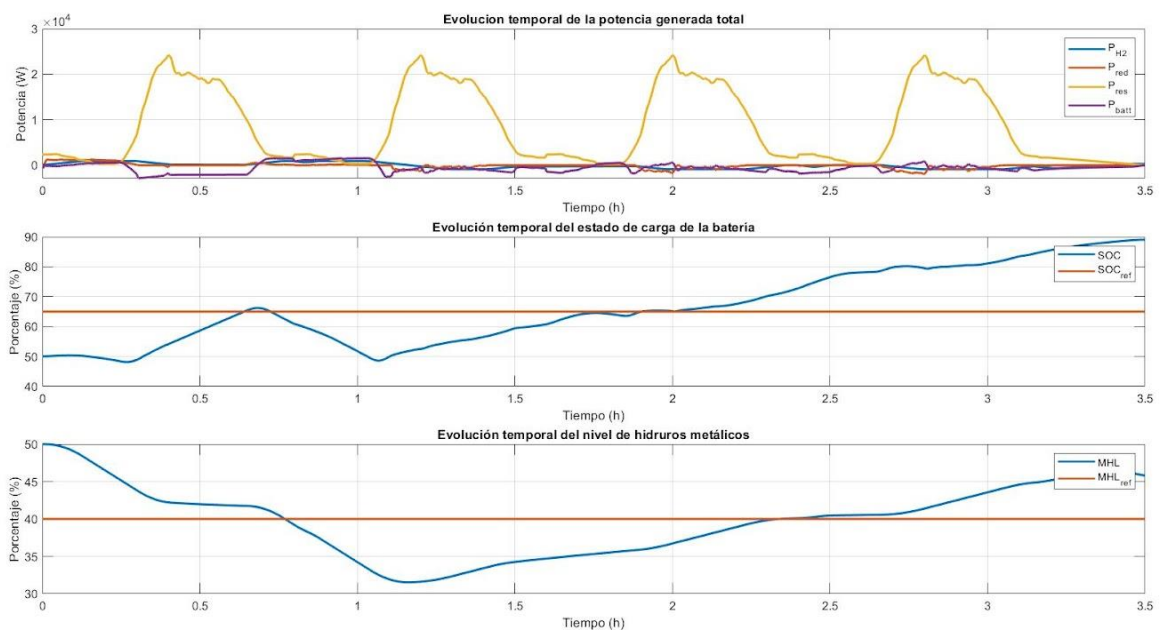


Figura 4-26. Potencia ensayo 3 centralizado

Como se dispone de mayor potencia de generación, tanto el estado de carga de la batería como el nivel de hidruros metálicos no sólo no disminuyen tanto como en el apartado anterior, sino que suben por encima de la referencia al guardar la potencia sobrante de los paneles. El uso de la red también se ve mermado gracias a la potencia de los paneles. A su vez, también permite que el calefactor se acerque más a la temperatura que se le ha marcado como referencia.

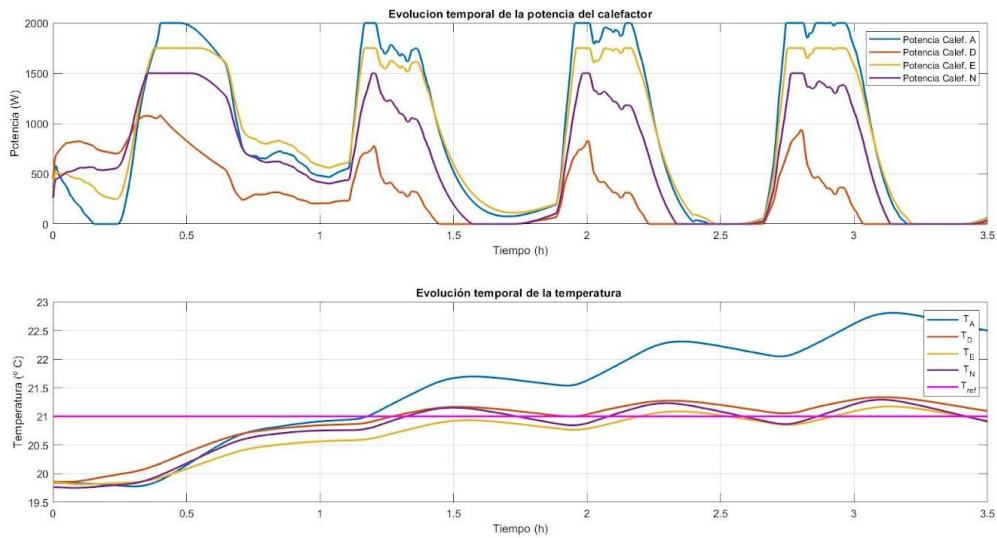


Figura 4-27. Potencias por zonas ensayo 3 centralizado

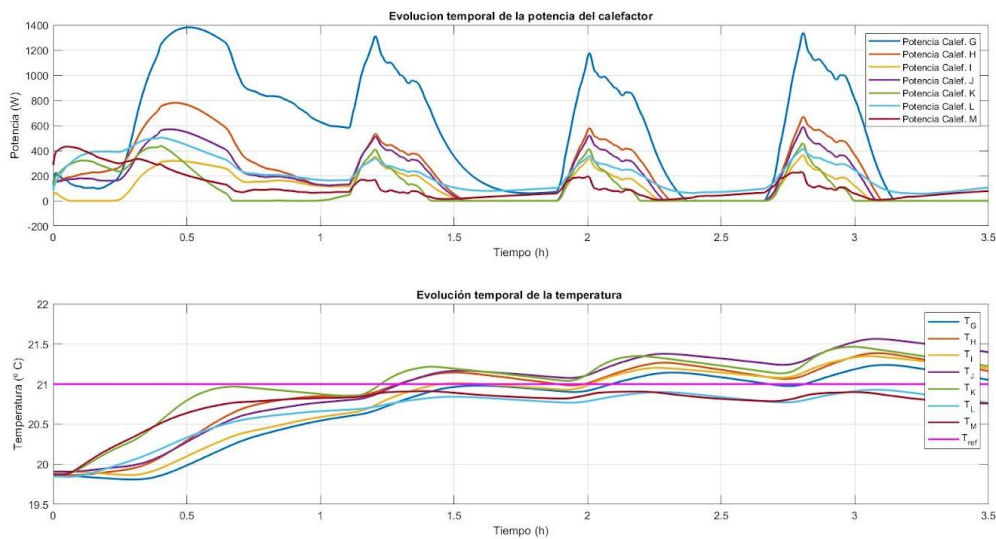


Figura 4-29. Potencia por zonas ensayo 3 centralizado

En este caso, no hará falta hacer un sacrificio del confort ya que dispondremos de más potencia de la necesaria, es más, el exceso de potencia provocará que el grado de activación sea más que el necesario para llegar a la referencia, es por eso por lo que sobrepasan los 21°C, aunque esto podría mejorarse un poco con un ajuste más fino de los pesos dado a las entradas y salidas del control centralizado.

#### 4.3.4 Cuarto ensayo

Todo lo probado anteriormente se ha basado en una conexión a la red simultánea por parte de todos los calefactores, aunque la realidad es que no van a estar todos los calefactores encendidos a la vez, es por eso por lo que se va a cambiar la temperatura de referencia para cada habitación.

Las referencias serán ahora:

Habitación/Zona	Descripción	Temperatura de referencia (°C)
A	Salón	20
D	Cocina	20.5
E	Hall	20
G	Pasillo del dormitorio	19
H	Dormitorio infantil	21
I	Cuarto de baño	19
J	Habitación Individual	21
K	Baño privado	21
L	Habitación doble	21
M	Lavandería	19
N	Oficina	21

Tabla 2. Temperaturas de referencia

Para los pesos dejaremos los especificados en el punto **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, tanto para los pesos de la microrred como para los de los calefactores.

Haciendo la simulación con las nuevas referencias aplicadas observamos los resultados:

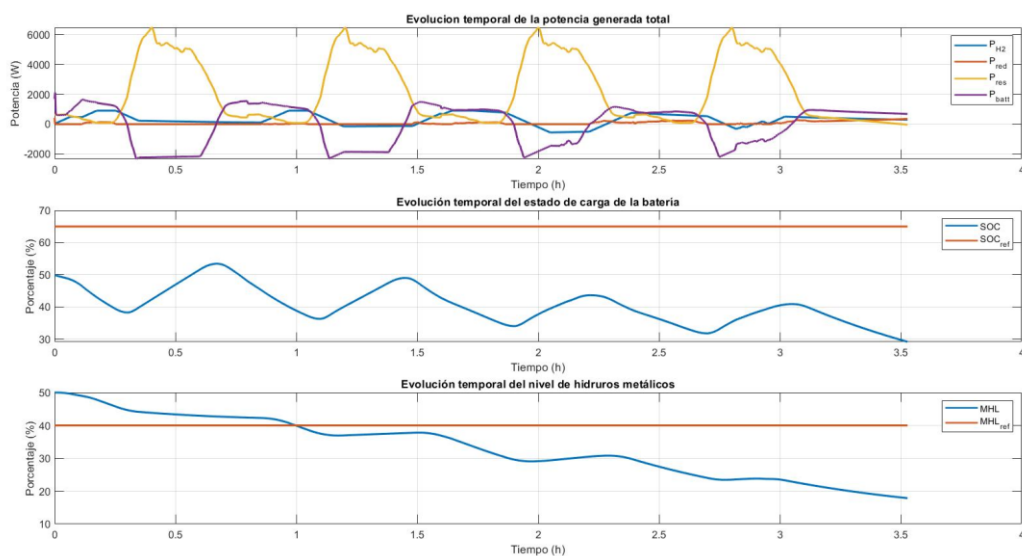


Figura 4-30. Potencias utilizadas para el ensayo 4 sistema centralizado

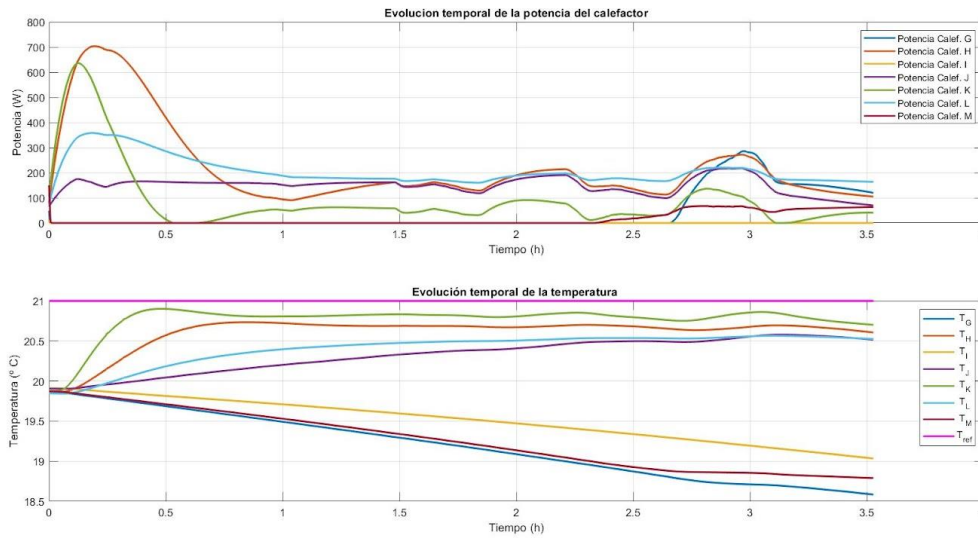


Figura 4-28. Potencia por zonas ensayo 4 centralizado

Vemos cómo, al no encenderse todos los calefactores, las temperaturas llegan mejor a su referencia que en el apartado anterior, además de restringirse el uso de la potencia de la red, ya que los paneles solares junto a los hidruros y el banco de baterías pueden afrontar con la demanda de potencia.

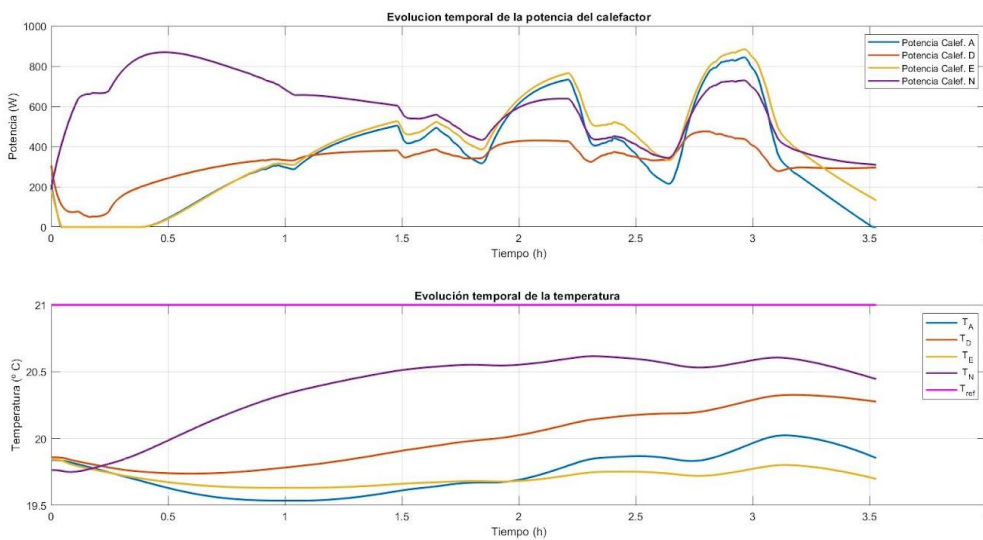


Figura 4-29. Potencia por zonas ensayo 4 centralizado





## 5 ELECCIÓN DEL MEJOR CONTROLADOR

Una vez visto el análisis de los controladores para distintos escenarios, como el cambio de potencia de generación, los pesos y los calefactores en juego, vamos a centrarnos en un estudio más exhaustivo para comparar los controladores entre sí partiendo del mismo perfil de generación y de las mismas condiciones, pudiéndose así llegar a una mejor conclusión de cuál es más efectivo y las carencias y virtudes que podrían llegar a tener cada uno de ellos.

### 5.1 Perfil base

Puesto que se va a partir de la misma base y condiciones, hacemos un estudio previo de ellas:

- Potencias que se van a usar:
  - Potencia de la red
  - Potencia de las baterías
  - Potencia del tanque de hidruros
  - Potencia de los paneles: Se trabajará con un perfil de generación un tanto diferente al trabajado en el punto 4, ahora los paneles generarán una potencia de 3000 vatios durante todo el tiempo de simulación.
- Los niveles iniciales de estado de carga de la batería y de hidruros metálicos tendrán:
  - $SOC = 50 \%$
  - $MHL = 50\%$
- Tiempo de muestreo: 10 segundos
- Horizonte de predicción: 5
- Horizonte de control: 1
- Pesos:
  - Control por histéresis + microrred:
    - Para las entradas manipulables:
      - Para  $P_{H_2}(k) = 0$
      - Para  $P_{grid}(k) = 1000$
    - Para el incremento de entradas manipulables:
      - Para  $P_{H_2}(k) = 0.1$
      - Para  $P_{grid}(k) = 0.1$
    - Para las variables de salida:
      - Para  $SOC(k) = 0.001$
      - Para  $MHL(k) = 0.01$
  - Control descentralizado + microrred:
    - Microrred:
      - Para las entradas manipulables:
        - Para  $P_{H_2}(k) = 0$

- Para  $P_{grid}(k) = 1000$
- Para el incremento de entradas manipulables:
  - Para  $P_{H2}(k) = 0.1$
  - Para  $P_{grid}(k) = 0.1$
- Para las variables de salida:
  - Para  $SOC(k) = 0.001$
  - Para  $MHL(k) = 0.01$
- Control del calefactor:
  - Para las entradas manipulables:
    - $V_A(k) = 125$
    - $V_D(k) = 200$
    - $V_E(k) = 100$
    - $V_G(k) = 110$
    - $V_H(k) = 110$
    - $V_I(k) = 100$
    - $V_J(k) = 130$
    - $V_K(k) = 110$
    - $V_L(k) = 120$
    - $V_M(k) = 120$
    - $V_N(k) = 270$
  - Para el incremento de entradas manipulables:
    - $V_A(k) = 1500$
    - $V_D(k) = 1500$
    - $V_E(k) = 1500$
    - $V_G(k) = 1500$
    - $V_H(k) = 1500$
    - $V_I(k) = 1500$
    - $V_J(k) = 1500$
    - $V_K(k) = 1500$
    - $V_L(k) = 1500$
    - $V_M(k) = 1500$
    - $V_N(k) = 1500$
  - Para las variables de salida:
    - $T_A(k) = 10000$
    - $T_D(k) = 35000$
    - $T_E(k) = 40000$
    - $T_G(k) = 20000$

- $T_H(k) = 22000$
- $T_I(k) = 20000$
- $T_J(k) = 21000$
- $T_K(k) = 10000$
- $T_L(k) = 25000$
- $T_M(k) = 20000$
- $T_N(k) = 71000$
- Control centralizado + microrred:
  - Control del calefactor
    - Para las entradas manipulables:
      - $P_{H2}(k) = 0$
      - $P_{grid}(k) = 1000$
      - $V_A(k) = 110$
      - $V_D(k) = 200$
      - $V_E(k) = 100$
      - $V_G(k) = 110$
      - $V_H(k) = 110$
      - $V_I(k) = 100$
      - $V_J(k) = 130$
      - $V_K(k) = 110$
      - $V_L(k) = 120$
      - $V_M(k) = 120$
      - $V_N(k) = 270$
    - Para el incremento de entradas manipulables:
      - $P_{H2}(k) = 0$
      - $P_{grid}(k) = 0$
      - $V_A(k) = 1500$
      - $V_D(k) = 1500$
      - $V_E(k) = 1500$
      - $V_G(k) = 1500$
      - $V_H(k) = 1500$
      - $V_I(k) = 1500$
      - $V_J(k) = 1500$
      - $V_K(k) = 1500$
      - $V_L(k) = 1500$
      - $V_M(k) = 1500$
      - $V_N(k) = 1500$

- Para las variables de salida:
  - $SOC(k) = 0.001$
  - $MHL(k) = 0.01$
  - $T_A(k) = 10000$
  - $T_D(k) = 35000$
  - $T_E(k) = 40000$
  - $T_G(k) = 20000$
  - $T_H(k) = 22000$
  - $T_I(k) = 20000$
  - $T_J(k) = 21000$
  - $T_K(k) = 10000$
  - $T_L(k) = 25000$
  - $T_M(k) = 20000$
  - $T_N(k) = 71000$

## 5.2 Comparador de Potencias

Para hacer un análisis parte por parte de cuál es el controlador más ideal, se empezará con la comparación de las potencias que llegan a consumir cada controlador por separado.

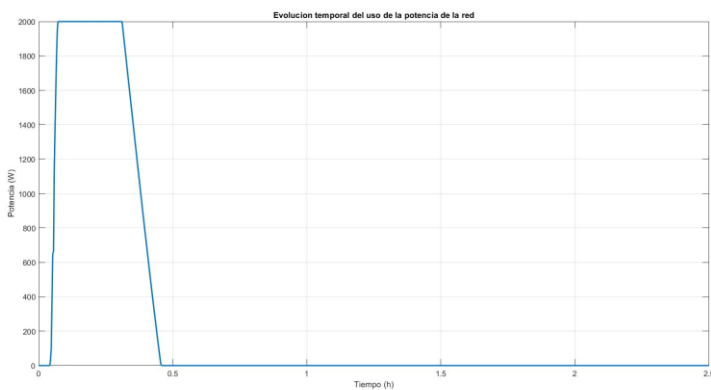


Figura 5-2. Potencia la red usada en el control descentralizado

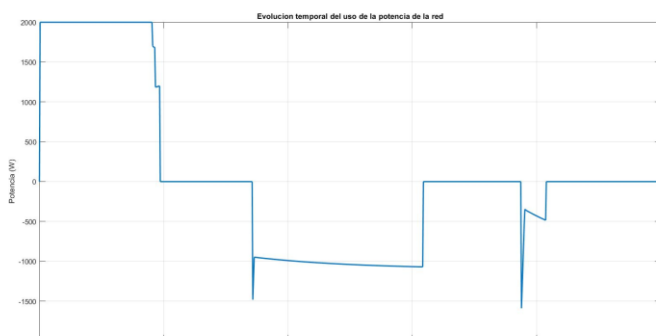


Figura 5-1. Potencia de la red usada en el control todo/nada con banda de histéresis

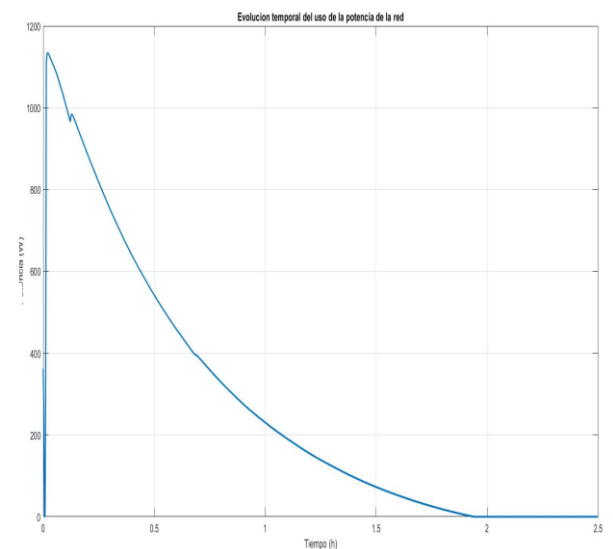


Figura 5-3. Potencia de la red usada en el control centralizado

Una de las principales razones por las que se estudia la mejora de estos controladores es para poder hacer un uso más eficiente de la red eléctrica, bajo esta premisa, observamos en la figura 5-1 que el sistema centralizado es el más indicado, ya que, a pesar de que todos tengan las mismas restricciones iniciales, el centralizado es el único que realmente consigue seguir en mejor medida la penalización de la red encargada al controlador, que como se vio en los pesos, se le dio una importancia de 1000 para que priorizara el uso de otras fuentes de potencias antes que la red, que es lo que más caro va a costar.

La reducción de la red tanto en el sistema descentralizado de la figura 5-2. como en el sistema centralizado de la figura 5-1, y como mejoría respecto al sistema por histéresis de la figura 5-3, se hace de manera progresiva, evitando picos de encendido y apagado que no sólo limita la vida del conmutador, sino que, además, provoca una subida considerable en el precio de la factura de la luz. Aunque el sistema descentralizado no tenga tantas conmutaciones como el de histéresis, sigue haciendo un uso pronunciado de la red, ya que no controla lo que consume de ella, puesto que no está dentro de sus prioridades.

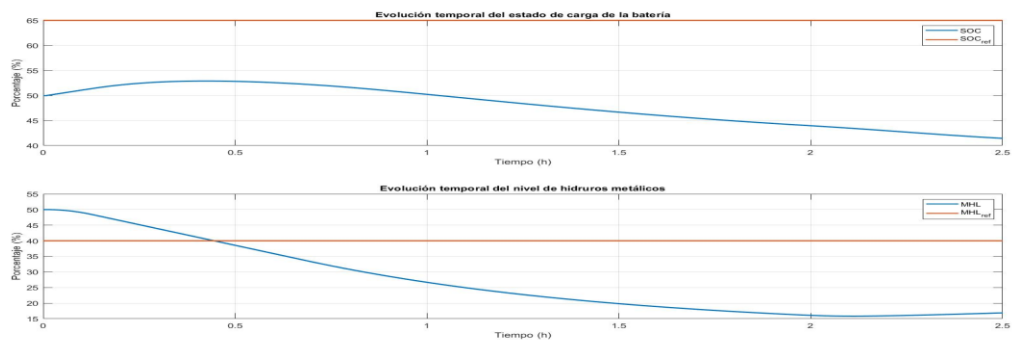


Figura 5-5. Evolución temporal del estado de carga de las baterías y del nivel de hidruros metálicos para un sistema centralizado

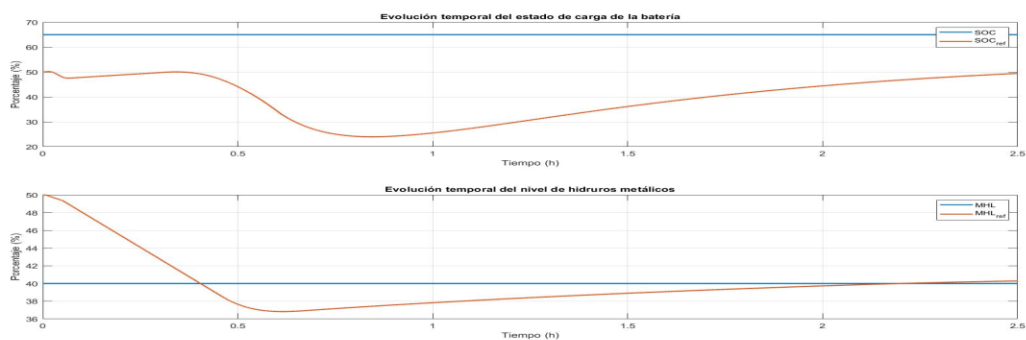


Figura 5-4. Evolución temporal del estado de carga de las baterías y del nivel de hidruros metálicos para un sistema descentralizado

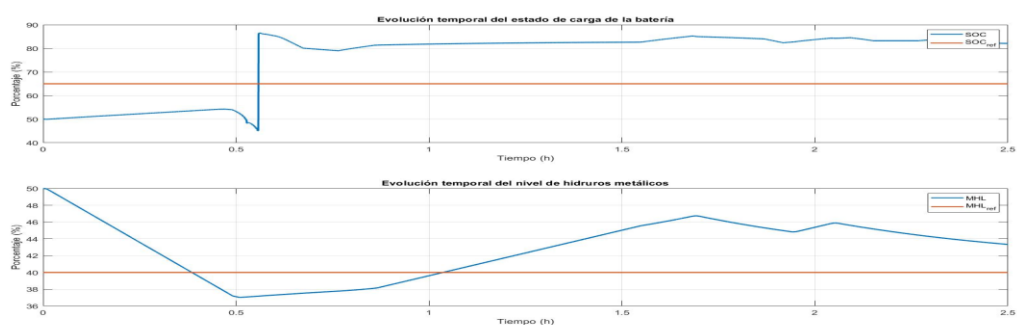


Figura 5-6. Evolución temporal del estado de carga de las baterías y del nivel de hidruros metálicos para un sistema todo/nada con banda de histéresis

En la figura 5-5 se puede observar que ni las baterías ni el tanque de hidruros llegan a la referencia especificada en el controlador, esto se debe a que al estar limitado el uso de la potencia de la red, se hace necesario el uso de la pila de combustible y de las baterías para poder afrontar la demanda de los calefactores, todo esto sin sobrepasar los límites inferiores de ninguno de los dos sistemas de carga y descarga.

Para la figura 5-4, se ve como los dos porcentajes se acercan más a su meta, esto es debido a que, entre la media hora y la hora de la simulación, las temperaturas han llegado a su referencia y la demanda de potencia va a ser menor, por lo que gracias a la generación de los paneles y sin importarle realmente las restricciones de la red, hace uso total de las potencias a su disposición para cumplir con sus metas de referencia, claro está, consume de una manera más continua que el de histéresis, pero sin control alguno de qué consume.

De todo lo discutido en el párrafo anterior, puede extraerse el por qué los porcentajes tanto del tanque de hidruros como el de las baterías son tan altos en la figura 5-6, al punto de rozar el 90% en el caso de las baterías. Todo esto viene a que el uso de la red no se escatima mínimamente en el control todo/nada con banda de histéresis, al punto de que una vez llegadas a las referencias de temperaturas es la red quien aporta potencia al circuito, cargando así las baterías y haciendo uso del electrolizador. Una vez el control por histéresis ha llegado en su primera vuelta a la referencia de 21°C, en la figura 5-6 se observa como los porcentajes tienen picos de subida y bajada en función de cuando se encienden y se apagan los calefactores.

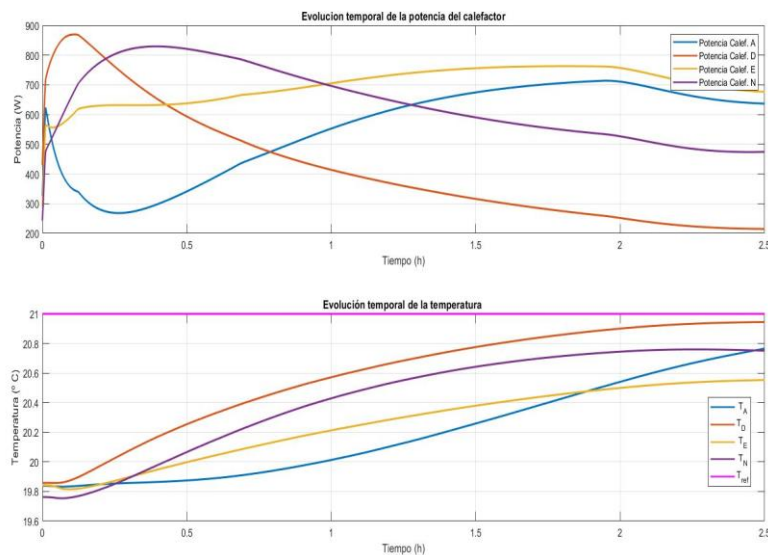


Figura 5-7. Evolución temporal de la potencia de los calefactores y la temperatura en un sistema centralizado

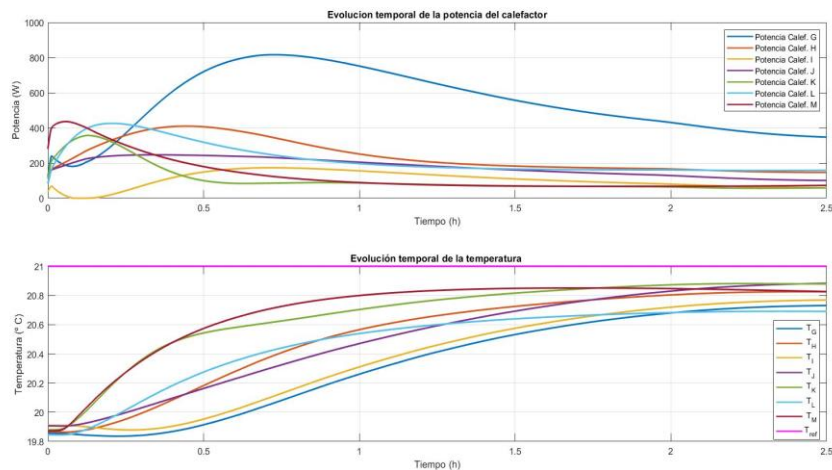


Figura 5-8. Evolución temporal de la potencia de los calefactores y la temperatura en un sistema centralizado

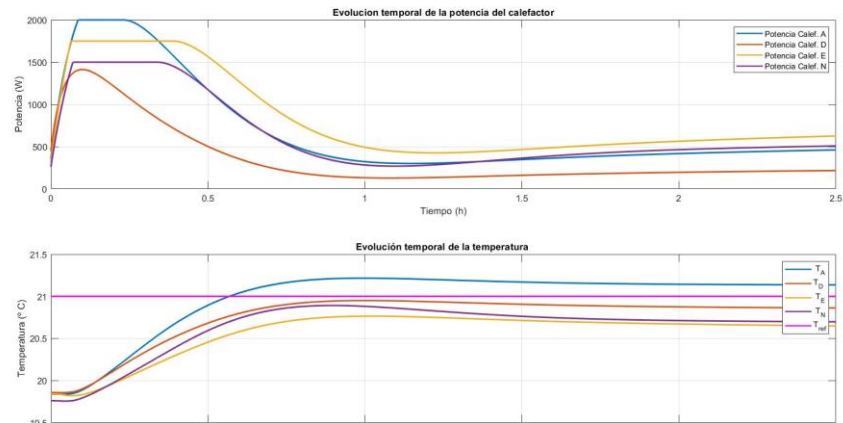


Figura 5-10. Evolución temporal de la potencia de los calefactores y la temperatura en un sistema descentralizado

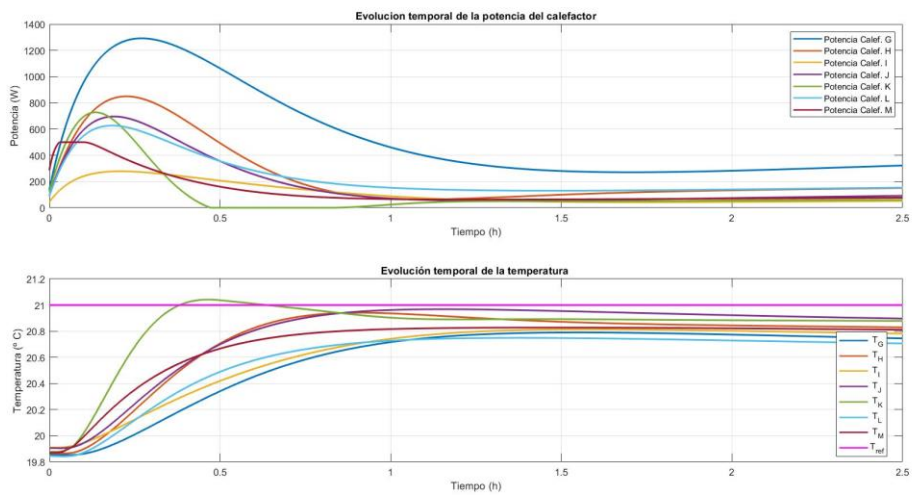


Figura 5-9. Evolución temporal de la potencia de los calefactores y la temperatura en un sistema descentralizado

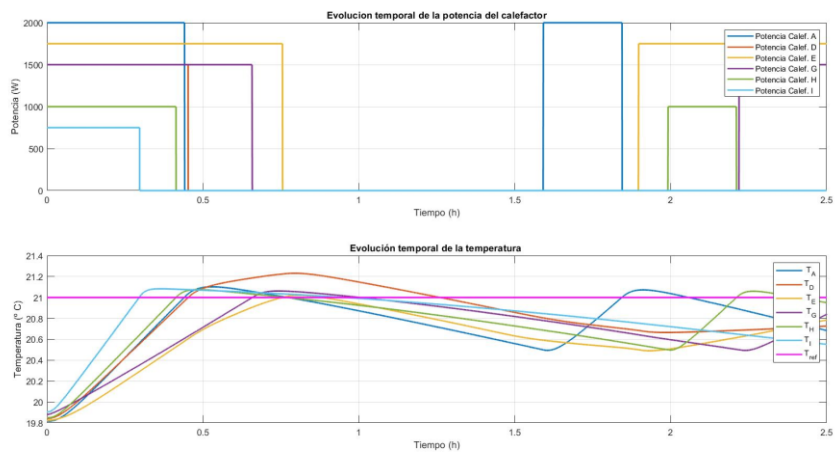


Figura 5-11. Evolución temporal de la potencia de los calefactores y la temperatura en un sistema todo/nada con banda de histéresis

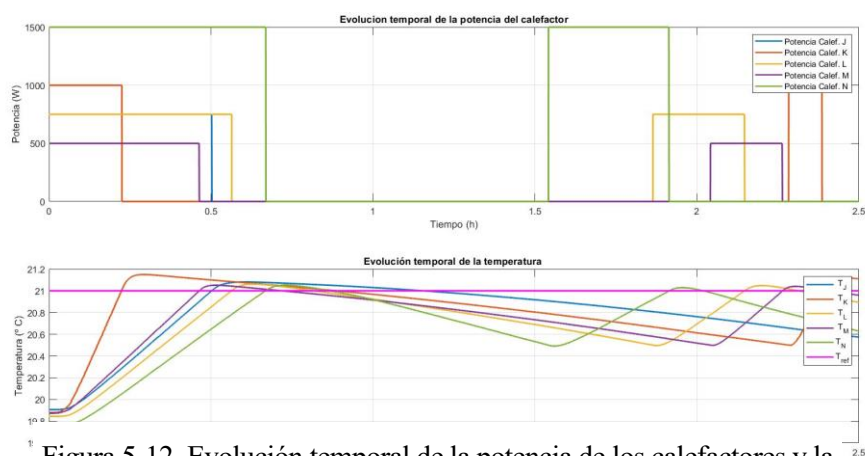


Figura 5-12. Evolución temporal de la potencia de los calefactores y la temperatura en un sistema todo/nada con banda de histéresis

Para hacer una mejor comprobación, además de verlo gráficamente en las figuras 5-7, 5-8, 5-9, 5-10, 5-11 y 5-12, en la tabla 3 se observará el error acumulado de cada variable manipulable usada para cumplir con los objetivos:

Descripción	Sistema Centralizado	Sistema Descentralizado	Sistema todo/nada con banda de histéresis
Potencia de la red	262.77	240.47	362.77
Potencia PH2	467.3	152.56	150.47
Potencia de las baterías	105.11	208.72	506.62
Potencia de los Paneles	3000	3000	3000
Potencia Demandada	3835.4	3949.6	3977.2
Potencia Generada	3835.2	3184.3	3006.6
Error Habitación A	0.78353	0.3226	0.24753
Error Habitación D	0.41415	0.23305	0.1886
Error Habitación E	0.74534	0.42459	0.39225
Error Habitación G	0.6618	0.40982	0.23958
Error Habitación H	0.47309	0.25498	0.19154
Error Habitación I	0.61748	0.36443	0.22531
Error Habitación J	0.48772	0.21143	0.1686
Error Habitación K	0.32547	0.15879	0.26847
Error Habitación L	0.52012	0.40181	0.24993
Error Habitación M	0.29882	0.27983	0.32787
Error Habitación N	0.57241	0.35621	0.32776

Tabla 3. Comparación y datos de los controladores

En la tabla 3, además del error de las temperaturas a la hora de llegar a la referencia estimada, también se aclaran las potencias usadas para alcanzar los objetivos, la potencia demandada que se requiere para llegar a la meta y la que finalmente genera el programa, ésta última será la suma de las potencias usadas. Una vez aclarada la descripción de la tabla y que existe una diferencia entre los parámetros dependiendo del sistema, comentamos el por qué:



1. La potencia demandada será la necesaria y la que el sistema deberá prever para que los calefactores lleven las habitaciones a la temperatura de referencia establecida por el usuario y que el tanque de hidruros y las baterías también alcancen su objetivo. El sistema todo/nada con banda de histéresis tiene la demanda más alta, llegando casi a los 1000 vatios sin contar la potencia de los paneles, la razón para demandar más potencia que el resto de los sistemas es debido a cómo se controlan los calefactores. Como el propio nombre indica, el control todo/nada con banda de histéresis se basa en encender y apagar el calefactor, pasando de 0 a 10 voltios, esto provoca que el nivel de conmutaciones sea muy alto, haciendo que tenga una vida más efímera el conmutador y provocando grandes demandas de potencias para soportar los picos de encendido y apagado. En contraposición, los otros sistemas tienen una manera de controlar los calefactores más progresiva, suave y continua, es por eso que la potencia demandada es menor. Además, el control todo nada por histéresis, como no es capaz de controlar ni tener en cuenta a la microrred, una vez que el sistema ha entrado en la banda de histéresis por primera vez, que el sistema no necesita tanta potencia, en vez de cortar la potencia de la red, hace que ésta aporte al sistema, cargándose más de lo necesario las baterías y el tanque de hidruros.
2. A la hora de calcular la potencia generada, se tiene en cuenta la potencia de la red, la aportada por las baterías, la del tanque de hidruros y la generada por los paneles, todas ellas aportan potencia al sistema menos la de las baterías, donde la potencia del sistema se invierte en cargarla. Después de la explicación entendemos mejor por qué la potencia generada por el sistema todo/nada con banda de histéresis, quitando la generación de los paneles, se queda en apenas 10 vatios, porque toda está yéndose en cargar las baterías, invirtiéndose 506.62 vatios, en comparación con los 208.72 vatios del sistema descentralizado y los 105.1 vatios del sistema centralizado.
3. Por un lado, veíamos que el sistema podía llegar a cargar las baterías invirtiendo potencia en eso, en vez de en subir la temperatura de las habitaciones, al contrario, también tenemos el tanque de hidruros, regida por la potencia PH2 y que donde toda la potencia que se recoge ahí se debe al trabajo de la pila de combustible, que genera potencia al sistema para que los calefactores puedan trabajar y llegar a la referencia demandada. Se puede ver como en el caso de sistema centralizado, es una gran fuente de potencia, llegando a facilitar 467.3 vatios, mientras que el sistema descentralizado sólo ofrece 152.56 vatios y el sistema todo/nada con histéresis incluso menos, 150.47 vatios. Tiene lógica que la potencia de los tanques se use notablemente ya que no sólo le habíamos dado un peso pequeño a la salida para quitarle importancia y se centrara en los calefactores, sino que la red es una entrada a la que le habíamos puesto un peso muy alto, significando que su uso debía verse altamente reducido. Como las únicas fuentes que generan además de la red son los tanques de hidruros y los paneles, y puesto que los paneles es una variable constante que no se puede tocar, tiene sentido que el tanque de hidruros tome más peso en las simulaciones, buscando así la reducción de la red pedida.
4. Gran parte de la razón de este proyecto tenía que ver con la eficiencia con la que trabajaba la red y cómo se podía ahorrar dinero en la factura de la luz en el camino, sabiendo eso, el uso de la potencia de la red debería ser el recurso que debería utilizarse en último lugar, pudiéndose hasta llegar a cancelar totalmente si así lo requiriera el usuario de la vivienda. Es aquí, y con la búsqueda del menor uso de la potencia de la red posible, que vemos cual es el mejor controlador de los tres discutidos, el elegido será el sistema centralizado, que tiene un consumo total de la red de 262.77 vatios frente a los 240.47 vatios del sistema descentralizado y 362.77 vatios del sistema todo/nada con banda de histéresis. Se observa como el uso en el sistema más robusto, que sería en el sistema todo/nada con histéresis, el uso de la potencia de la red se dispara, mientras que en el descentralizado y el centralizado son menores. Analizando sólo este apartado podría pensarse que el sistema descentralizado es mejor porque utiliza menos la red, pero si echamos la vista al resto de potencias, vemos que la potencia generada por el sistema centralizado es de 3835.2 vatios frente a los 3184.3 vatios del sistema descentralizado, por lo que en consecuencia podríamos despreciar que se usen 20 vatios más en la red en comparación con 640 vatios más de potencia que genera el sistema centralizado.
5. Que se elija el sistema centralizado como mejor control no es sólo por el mejor uso de la red,

sino que es más eficiente que los otros dos, ya que el desembolso de potencia que requiere el sistema es de 3835.4 vatios, menor que los otros que serán 3949.6 vatios para el descentralizado y 3977.2 vatios para el sistema todo/nada con histéresis.

6. La importancia del proyecto no es sólo llegar a cumplir las referencias impuestas por el sistema, incluyendo aquí que las temperaturas lleguen a sus objetivos pertinentes, es muy importante también el cómo llegamos a conseguir nuestros objetivos, es por eso que, aunque la tabla muestra un error mayor para el sistema centralizado que para los otros dos, siendo un 0.5 mayor, se sigue tomando éste como el mejor controlador, ya que realmente el error es ínfimo, llega bastante bien a la referencia y encima trabaja con la energía de una manera más económica y efectiva. Podemos llegar a la conclusión de que, aunque el sistema centralizado sacrifique en algunas ocasiones el confort, siendo encima un sacrificio bastante pequeño, se sigue prefiriendo el uso de éste, que va a ayudar a cumplir la referencia de temperatura, la mejor eficiencia de la energía y un claro descenso del coste económico de la factura de la luz.



## 6 CONCLUSIÓN Y ESTUDIOS AVANZADOS

**E**n este último capítulo se van a explicar las conclusiones a las que se han llegado después de la realización del trabajo, las limitaciones que se han observado

A lo largo de la realización de este trabajo, se han encontrado ciertas limitaciones en cuanto al programa de Home I/O. Si bien es cierto que el programa no ha ocasionado ningún obstáculo, hay ciertos aspectos de la vivienda que faltan por incluir para que se asemeje aún más a la realidad. Por ejemplo, se puede destacar la ausencia de electrodomésticos y tomas de corriente. Estos elementos consumen una potencia eléctrica considerable y, por tanto, afectan al consumo eléctrico destacablemente. La inclusión de lavavajillas, lavadora, frigorífico, horno, microondas... Son aparatos eléctricos que se encuentran en cualquier vivienda y cuya existencia se ha echado en falta a la hora de gestionar la energía eléctrica en la realización de este trabajo.

### 6.1 Conclusiones

Como conclusión, se han obtenido resultados que demuestran la utilidad tanto de los controladores MPC para todos los sistemas discutidos, como de los controles más robustos como puede ser el control todo/nada con banda de histéresis. Ambos han cumplido con la función que se esperaba y permitirán reducir el consumo eléctrico notablemente en aquellas viviendas en las que se aplique. El controlador MPC es una forma de controlar más sofisticada y compleja, y resuelve básicamente un problema de optimización según las necesidades del usuario. Este controlador se vuelve muy necesario a la hora de gestionar las diferentes fuentes de energía eléctrica en la red, siendo su uso prácticamente obligado. Permite dar más prioridad a unas fuentes que a otras, y cuya prioridad también se puede modificar cuando el usuario lo requiera modificando los pesos.

En los tres diferentes tipos de control, se ha usado un controlador MPC para controlar las diversas fuentes de la microrred, por lo que, en ese caso, la optimización a la hora de seleccionar la fuente de potencia eléctrica es similar en los tres. La diferenciación de los tres tipos de control se aprecia sobre todo en el control del calefactor:

1. Se ha utilizado un controlador todo/nada con histéresis. Este controlador es la manera más simple de controlar este tipo de sistemas, pero a que su vez, sigue siendo una solución válida. Bien es cierto, que presenta también ciertas desventajas. Como se aprecia, los calefactores sólo pueden funcionar a máxima potencia, por lo que, al conectar varios calefactores a la vez, se producen picos de potencia bastantes elevados. Tampoco tiene en cuenta la generación que se está produciendo en el momento, ni de la disponibilidad de potencia eléctrica (gracias a las baterías e hidruros metálicos). Con lo cual, no es el control óptimo a la hora de optimizar el consumo de potencia del calefactor.
2. Se ha utilizado un controlador MPC independiente del controlador de la microrred, teniendo un control descentralizado. Un importante avance respecto al control anterior es el hecho que el controlador predice la potencia que es necesaria aplicar al calefactor una vez la temperatura se está acercando a la referencia, descendiendo la potencia de forma gradual hasta llegar a cierto valor en el que se mantiene casi constante. Esto provoca que una vez la calefacción haya llegado cercana a la temperatura de referencia, la potencia consumida por el calefactor disminuirá considerablemente, evitando así picos de potencia elevados que se podrían dar en el caso anterior. En cambio, al tratar ambos sistemas como independientes, sigue siendo una desventaja el hecho de que sigue sin tener en cuenta la generación que se está produciendo ni la disponibilidad de potencia eléctrica gracias a las baterías y la pila de combustible.
3. Se ha usado un único controlador MPC para el control de la microrred y del calefactor, de forma centralizada. En este caso, aparte del hecho de predecir la potencia necesaria para que la temperatura de la habitación alcance su referencia, también tiene en cuenta la generación obtenida gracias a las energías renovables y la disponibilidad de potencia eléctrica. Esto hace que este controlador sea el óptimo de los estudiados a la hora de ahorrar energía, ya que sigue nuestros deseos en cuanto a la cantidad de potencia que tiene permitido consumir. Aunque el hecho de penalizar la potencia que consumen trae consigo un ahorro de energía y de dinero en la factura, conlleva también otros problemas, como la disminución del confort. Como el sistema regula la potencia que le entra, cuando no llega la suficiente, en vez de tirar

de la red y gastar más, reduce el uso de los aparatos que consumen potencia, provocando que la temperatura no alcance la referencia elegida por el usuario.

## 6.2 Comparación con el modelo de una habitación

Todo el estudio que se ha llevado a cabo para una conexión simultánea de dos o más calefactores, haciendo que el gasto de la potencia se dispare en comparación al trabajo de la gestión activa para una única habitación. [6]

Los pesos que incluiremos al modelo son:

- Para las entradas manipulables:
  - $P_{H2}(k) = 0$
  - $P_{grid}(k) = 500$
  - $V_H(k) = 4$
- Para el incremento de entradas manipulables:
  - $P_{H2}(k) = 0.1$
  - $P_{grid}(k) = 0.1$
  - $V_H(k) = 0.1$
- Para las variables de salida:
  - $SOC(k) = 10$
  - $MHL(k) = 10$
  - $V_H(k) = 500$

El estudio para el sistema centralizado con microrred centrándose en única habitación, en este caso, en la habitación infantil de la zona H queda como:

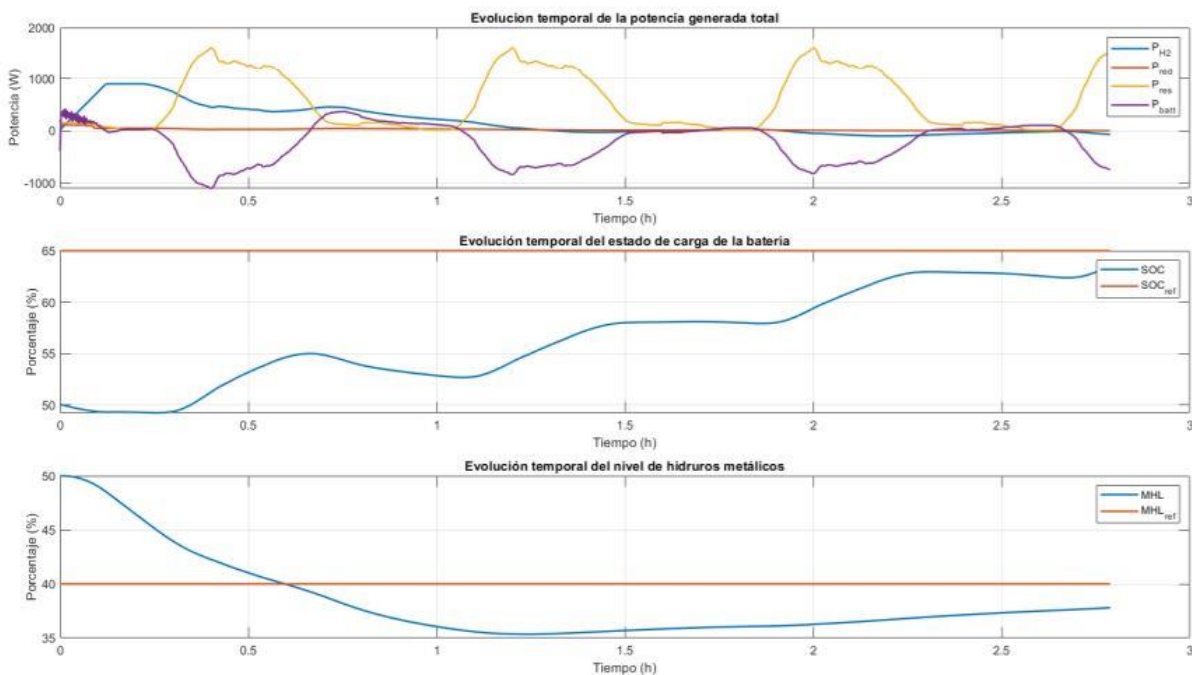


Figura 6-1. Potencia de un sistema centralizado para una habitación

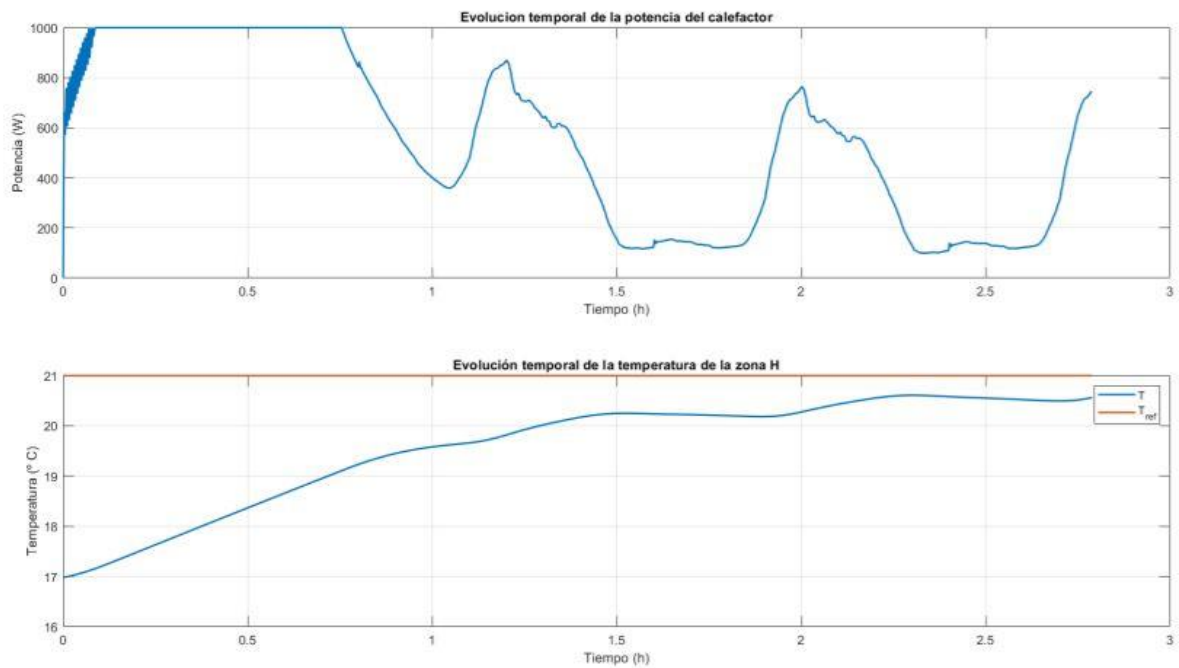


Figura 6-2. Potencia de un sistema centralizado para un calefactor

Como se observa en la figura 6-1, con la potencia suficiente y bastante inferior a otros apartados que se ha visto durante el estudio de este sistema, la potencia de los paneles es suficiente para sostener la potencia que necesita el calefactor de la zona H y llevar al tanque de hidruros y a las baterías a su referencia. Todo esto se hace con un consumo nulo de la energía de la red, que además se había especificado en sus pesos que se restringiera.

Por consiguiente, la temperatura llega a su referencia.

En contraposición con el estudio de la gestión activa de todos los calefactores, el uso de un solo calefactor tiene unos pesos de menor magnitud como se observa en la tabla 4

Descripción	Pesos del calefactor único	Pesos del Calefactor de trabajo simultáneo
Potencia H2	0	0
Potencia de la red	500	1000
Calefactor de la zona H	4	110
Temperatura de la zona H	500	22000
Incremento de entradas manipulable para la tensión del calefactor H	0.1	1500

Tabla 4. Diferencia de pesos entre la gestión de un calefactor frente a la gestión de todos

## REFERENCIAS

---

- [1] «matlab,» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [2] «matlab,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/model-predictive-control.html>.
- [3] R. Games, «Home I/O,» [En línea]. Available: <https://docs.realgames.co/homeio/en/>.
- [4] M. Retuerto, «ideagreen,» [En línea]. Available: <https://ideagreen.es/hidrogeno-verde/tipos-de-electrolizadores/>.
- [5] «WIKIPEDIA,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Pila\\_de\\_combustible#Pila\\_de\\_Combustible\\_de\\_Membrana\\_de\\_intercambio\\_](https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible#Pila_de_Combustible_de_Membrana_de_intercambio_).
- [6] E. B. d. Cid, «idus,» [En línea]. Available: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/127660/TFG-3843-BRAVO%20DEL%20CID.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [15] A. Monell, «LA VANGUARDIA,» [En línea]. Available: <https://www.lavanguardia.com/economia/20210721/7613885/maximo-historico-luz-hoy-casi-anula-rebaja-fiscal.html>.
- [12] «LA VANGUARDIA,» [En línea]. Available: <https://www.lavanguardia.com/economia/20210721/7613885/maximo-historico-luz-hoy-casi-anula-rebaja-fiscal.html>.





# ANEXOS

**ANEXO A:** Direcciones de memoria de todos los **dispositivos de entrada** del programa HOME I/O

Tipo de dato	Dirección	Zona	Nombre	Tipo de contacto
Bool	0	A	Light Switch 1	NO
Bool	1	A	Light Switch 2	NO
Bool	2	A	Light Switch 3	NO
Bool	3	A	Up/Down Switch 1 (Up)	NO
Bool	4	A	Up/Down Switch 1 (Down)	NO
Bool	5	A	Up/Down Switch 2 (Up)	NO
Bool	6	A	Up/Down Switch 2 (Down)	NO
Bool	7	A	Light Switch Dimmer 1 (Up)	NO
Bool	8	A	Light Switch Dimmer 1 (Down)	NO
Bool	9	A	Light Switch Dimmer 2 (Up)	NO
Bool	10	A	Light Switch Dimmer 2 (Down)	NO
Bool	11	A	Light Switch Dimmer 3 (Up)	NO
Bool	12	A	Light Switch Dimmer 3 (Down)	NO
Bool	13	A	Door Detector 1	NO
Bool	14	A	Door Detector 2	NO
Bool	15	A	Motion Detector	NO
Bool	16	A	Brightness Sensor	NC
Bool	17	A	Smoke Detector	NO
Bool	27	B	Light Switch 1	NO
Bool	28	B	Light Switch 2	NO
Bool	29	B	Motion Detector	NO
Bool	39	C	Light Switch	NO
Bool	49	D	Up/Down Switch (Up)	NO
Bool	50	D	Up/Down Switch (Down)	NO
Bool	51	D	Light Switch Dimmer 1 (Up)	NO
Bool	52	D	Light Switch Dimmer 1 (Down)	NO
Bool	53	D	Light Switch Dimmer 2 (Up)	NO
Bool	54	D	Light Switch Dimmer 2 (Down)	NO
Bool	55	D	Door Detector	NO
Bool	56	D	Motion Detector	NO
Bool	57	D	Brightness Sensor	NC
Bool	67	E	Light Switch 1	NO
Bool	68	E	Light Switch 2	NO
Bool	69	E	Light Switch 3	NO
Bool	70	E	Light Switch 4	NO
Bool	71	E	Light Switch 5	NO
Bool	72	E	Up/Down Switch (Up)	NO
Bool	73	E	Up/Down Switch (Down)	NO
Bool	74	E	Light Switch Dimmer 1 (Up)	NO
Bool	75	E	Light Switch Dimmer 1 (Down)	NO
Bool	76	E	Light Switch Dimmer 2 (Up)	NO

Bool	77	E	Light Switch Dimmer 2 (Down)	NO
Bool	78	E	Door Detector 1	NO
Bool	79	E	Door Detector 2	NO
Bool	80	E	Motion Detector	NO
Bool	81	E	Brightness Sensor	NC
Bool	82	E	Alarm Key Pad (Armed)	NO
Bool	92	F	Light Switch 1	NO
Bool	93	F	Light Switch 2	NO
Bool	94	F	Up/Down Switch 1 (Up)	NO
Bool	95	F	Up/Down Switch 1 (Down)	NO
Bool	96	F	Up/Down Switch 2 (Up)	NO
Bool	97	F	Up/Down Switch 2 (Down)	NO
Bool	98	F	Motion Detector	NO
Bool	99	F	Brightness Sensor	NO
Bool	100	F	Garage Door (Opened)	NO
Bool	101	F	Garage Door (Closed)	NO
Bool	102	F	Garage Door (Infrared)	NO
Bool	112	G	Light Switch 1	NO
Bool	113	G	Light Switch 2	NO
Bool	114	G	Light Switch 3	NO
Bool	115	G	Light Switch 4	NO
Bool	116	G	Light Switch 5	NO
Bool	117	G	Up/Down Switch (Up)	NO
Bool	118	G	Up/Down Switch (Down)	NO
Bool	119	G	Motion Detector	NO
Bool	120	G	Smoke Detector	NO
Bool	130	H	Light Switch 1	NO
Bool	131	H	Light Switch 2	NO
Bool	132	H	Up/Down Switch (Up)	NO
Bool	133	H	Up/Down Switch (Down)	NO
Bool	134	H	Light Switch Dimmer (Up)	NO
Bool	135	H	Light Switch Dimmer (Down)	NO
Bool	136	H	Door Detector 1	NO
Bool	137	H	Door Detector 2	NO
Bool	138	H	Motion Detector	NO
Bool	139	H	Brightness Sensor	NC
Bool	140	H	Smoke Detector	NO
Bool	150	I	Light Switch	NO
Bool	151	I	Light Switch Dimmer (Up)	NO
Bool	152	I	Light Switch Dimmer (Down)	NO
Bool	153	I	Motion Detector	NO
Bool	163	J	Light Switch 1	NO
Bool	164	J	Light Switch 2	NO
Bool	165	J	Up/Down Switch (Up)	NO
Bool	166	J	Up/Down Switch (Down)	NO
Bool	167	J	Light Switch Dimmer (Up)	NO
Bool	168	J	Light Switch Dimmer (Down)	NO
Bool	169	J	Door Detector 1	NO
Bool	170	J	Door Detector 2	NO

Bool	171	J	Motion Detector	NO
Bool	172	J	Brightness Sensor	NC
Bool	173	J	Smoke Detector	NO
Bool	183	K	Light Switch Dimmer (Up)	NO
Bool	184	K	Light Switch Dimmer (Down)	NO
Bool	185	K	Motion Detector	NO
Bool	195	L	Light Switch 1	NO
Bool	196	L	Light Switch 2	NO
Bool	197	L	Up/Down Switch (Up)	NO
Bool	198	L	Up/Down Switch (Down)	NO
Bool	199	L	Light Switch Dimmer 1 (Up)	NO
Bool	200	L	Light Switch Dimmer 1 (Down)	NO
Bool	201	L	Light Switch Dimmer 2 (Up)	NO
Bool	202	L	Light Switch Dimmer 2 (Down)	NO
Bool	203	L	Door Detector 1	NO
Bool	204	L	Door Detector 2	NO
Bool	205	L	Motion Detector	NO
Bool	206	L	Brightness Sensor	NC
Bool	207	L	Smoke Detector	NO
Bool	217	M	Light Switch	NO
Bool	218	M	Up/Down Switch (Up)	NO
Bool	219	M	Up/Down Switch (Down)	NO
Bool	220	M	Door Detector 1	NO
Bool	221	M	Door Detector 2	NO
Bool	222	M	Motion Detector	NO
Bool	223	M	Brightness Sensor	NC
Bool	233	N	Light Switch 1	NO
Bool	234	N	Light Switch 2	NO
Bool	235	N	Light Switch 3	NO
Bool	236	N	Light Switch Dimmer 1 (Up)	NO
Bool	237	N	Light Switch Dimmer 1 (Down)	NO
Bool	238	N	Light Switch Dimmer 2 (Up)	NO
Bool	239	N	Light Switch Dimmer 2 (Down)	NO
Bool	240	N	Light Switch Dimmer 3 (Up)	NO
Bool	241	N	Light Switch Dimmer 3 (Down)	NO
Bool	242	N	Up/Down Switch (Up)	NO
Bool	243	N	Up/Down Switch (Down)	NO
Bool	244	N	Door Detector 1	NO
Bool	245	N	Door Detector 2	NO
Bool	246	N	Motion Detector	NO
Bool	247	N	Brightness Sensor	NC
Bool	248	N	Smoke Detector	NO
Bool	258	O	Motion Detector	NO
Bool	259	O	Brightness Sensor	NC
Bool	260	O	Entrance Gate (Opened)	NO
Bool	261	O	Entrance Gate (Closed)	NO
Bool	262	O	Entrance Gate (Infrared 1)	NO
Bool	263	O	Entrance Gate (Infrared 2)	NO
Bool	264	O	Entrance Gate (Infrared 3)	NO

Bool	274	-	Remote Button 1	NO
Bool	275	-	Remote Button 2	NO
Bool	276	-	Remote Button 3	NO
Bool	277	-	Remote Button 4	NO
Bool	278	-	Remote Button 5	NO
Bool	279	-	Remote Button 6	NO
Bool	280	-	Remote Button 7	NO
Bool	281	-	Remote Button 8	NO
Float	0	A	Brightness Sensor (Analogue)	-
Float	1	A	Thermostat (Room Temperature)	-
Float	2	A	Thermostat (Set Point)	-
Float	3	A	Roller Shades (Openness)	-
Float	4	A	Roller Shades (Openness)	-
Float	5	A	Roller Shades (Openness)	-
Float	6	A	Roller Shades (Openness)	-
Float	12	D	Brightness Sensor (Analogue)	-
Float	13	D	Thermostat (Room Temperature)	-
Float	14	D	Thermostat (Set Point)	-
Float	15	D	Roller Shades (Openness)	-
Float	24	E	Brightness Sensor (Analogue)	-
Float	25	E	Thermostat (Room Temperature)	-
Float	26	E	Thermostat (Set Point)	-
Float	27	E	Roller Shades (Openness)	-
Float	36	F	Brightness Sensor (Analogue)	-
Float	37	F	Roller Shades (Openness)	-
Float	46	G	Thermostat (Room Temperature)	-
Float	47	G	Thermostat (Set Point)	-
Float	48	G	Roller Shades (Openness)	-
Float	57	H	Brightness Sensor (Analogue)	-
Float	58	H	Thermostat (Room Temperature)	-
Float	59	H	Thermostat (Set Point)	-
Float	60	H	Roller Shades (Openness)	-
Float	69	I	Thermostat (Room Temperature)	-
Float	70	I	Thermostat (Set Point)	-
Float	80	J	Brightness Sensor (Analogue)	-
Float	81	J	Thermostat (Room Temperature)	-
Float	82	J	Thermostat (Set Point)	-
Float	83	J	Roller Shades (Openness)	-
Float	92	K	Thermostat (Room Temperature)	-
Float	93	K	Thermostat (Set Point)	-
Float	103	L	Brightness Sensor (Analogue)	-
Float	104	L	Thermostat (Room Temperature)	-
Float	105	L	Thermostat (Set Point)	-
Float	106	L	Roller Shades (Openness)	-
Float	115	M	Brightness Sensor (Analogue)	-
Float	116	M	Thermostat (Room Temperature)	-
Float	117	M	Thermostat (Set Point)	-
Float	118	M	Roller Shades (Openness)	-
Float	127	N	Brightness Sensor (Analogue)	-

Float	128	N	Thermostat (Room Temperature)	-
Float	129	N	Thermostat (Set Point)	-
Float	130	N	Roller Shades (Openness)	-
Float	139	O	Brightness Sensor (Analogue)	-
DateTime	0	-	Date and Time	-

ANEXO B: Direcciones de memoria de todos los **dispositivos de salida** del programa HOME I/O

Tipo de dato	Dirección	Zona	Nombre
Bool	0	A	Lights
Float	0	A	Lights (Analogue)
Bool	1	A	Roller Shades 1 (Up)
Float	1	A	Heater (Analogue)
Bool	2	A	Roller Shades 1 (Down)
Bool	3	A	Roller Shades 2 (Up)
Bool	4	A	Roller Shades 2 (Down)
Bool	5	A	Roller Shades 3 (Up)
Bool	6	A	Roller Shades 3 (Down)
Bool	7	A	Roller Shades 4 (Up)
Bool	8	A	Roller Shades 4 (Down)
Bool	9	A	Heater
Float	11	B	Lights 1 (Analogue)
Float	12	B	Lights 2 (Analogue)
Bool	19	B	Lights 1
Bool	20	B	Lights 2
Float	22	C	Lights (Analogue)
Bool	30	C	Lights
Float	32	D	Lights 1 (Analogue)
Float	33	D	Lights 2 (Analogue)
Float	34	D	Heater (Analogue)
Bool	40	D	Lights 1
Bool	41	D	Lights 2
Bool	42	D	Roller Shades (Up)
Bool	43	D	Roller Shades (Down)
Bool	44	D	Heater
Float	44	E	Lights (Analogue)
Float	45	E	Heater (Analogue)
Bool	54	E	Lights
Bool	55	E	Roller Shades (Up)
Float	55	F	Lights 1 (Analogue)
Bool	56	E	Roller Shades (Down)
Float	56	F	Lights 2 (Analogue)
Bool	57	E	Heater
Bool	58	E	Siren
Bool	59	E	Alarm Key Pad (Arm)
Bool	60	E	Alarm Key Pad (Disarm)
Float	66	G	Lights (Analogue)
Float	67	G	Heater 1 (Analogue)

Bool	68	F	Lights 1
Float	68	G	Heater 2 (Analogue)
Bool	69	F	Lights 2
Bool	70	F	Roller Shades (Up)
Bool	71	F	Roller Shades (Down)
Bool	72	F	Garage Door (Open)
Bool	73	F	Garage Door (Close)
Float	78	H	Lights (Analogue)
Float	79	H	Heater (Analogue)
Bool	83	G	Lights
Bool	84	G	Roller Shades (Up)
Bool	85	G	Roller Shades (Down)
Bool	86	G	Heater 1
Bool	87	G	Heater 2
Float	89	I	Lights 1 (Analogue)
Float	90	I	Lights 2 (Analogue)
Float	91	I	Heater (Analogue)
Bool	97	H	Lights
Bool	98	H	Roller Shades (Up)
Bool	99	H	Roller Shades (Down)
Bool	100	H	Heater
Float	101	J	Lights (Analogue)
Float	102	J	Heater (Analogue)
Bool	110	I	Lights 1
Bool	111	I	Lights 2
Bool	112	I	Heater
Float	112	K	Lights (Analogue)
Float	113	K	Heater (Analogue)
Bool	122	J	Lights
Bool	123	J	Roller Shades (Up)
Float	123	L	Lights (Analogue)
Bool	124	J	Roller Shades (Down)
Float	124	L	Heater (Analogue)
Bool	125	J	Heater
Float	134	M	Lights (Analogue)
Bool	135	K	Lights
Float	135	M	Heater (Analogue)
Bool	136	K	Heater
Float	145	N	Lights 1 (Analogue)
Bool	146	L	Lights
Float	146	N	Lights 2 (Analogue)
Bool	147	L	Roller Shades (Up)
Float	147	N	Lights 3 (Analogue)
Bool	148	L	Roller Shades (Down)
Float	148	N	Heater (Analogue)
Bool	149	L	Heater
Float	158	O	Lights Poarch 1 (Analogue)
Bool	159	M	Lights
Float	159	O	Lights Poarch 2 (Analogue)

Bool	160	M	Roller Shades (Up)
Float	160	O	Lights Pool (Analogue)
Bool	161	M	Roller Shades (Down)
Float	161	O	Lights Garden (Analogue)
Bool	162	M	Heater
Float	162	O	Lights Entrance (Analogue)
Bool	172	N	Lights 1
Bool	173	N	Lights 2
Bool	174	N	Lights 3
Bool	175	N	Roller Shades (Up)
Bool	176	N	Roller Shades (Down)
Bool	177	N	Heater
Bool	187	O	Lights Porch 1
Bool	188	O	Lights Porch 2
Bool	189	O	Lights Pool
Bool	190	O	Lights Garden
Bool	191	O	Lights Entrance
Bool	192	O	Siren
Bool	193	O	Entrance Gate (Open)
Bool	194	O	Entrance Gate (Close)

ANEXO C: Direcciones de memoria de **variables de memoria que solo se pueden leer (no modificar)** del programa HOME I/O

Tipo de dato	Dirección	Zona	Nombre
Bool	256	-	Using DLST
Float	129	-	Time Scalev
Float	130	-	Latitude
Float	131	-	Longitude
Float	132	-	Air Temperature [K]
Float	133	-	Relative Humidity
Float	134	-	Minimum Air Temperature [K]
Float	135	-	Maximum Air Temperature [K]
Float	136	-	Dew Point Temperature [K]
Float	137	-	Wind Speed [m/s]
Float	138	-	Cloudiness
Float	139	-	Sun Zenith
Float	140	-	Sun Azimuth
Float	141	-	Instant Power [w]
Float	142	-	Current Hour Energy Consumption [J]
Float	143	-	Current Day Energy Consumption [J]
Float	144	-	Current Week Energy Consumption [J]
Float	145	-	Current Month Energy Consumption [J]
Float	146	-	Last Hour Energy Consumption [J]
Float	147	-	Last Day Energy Consumption [J]
Float	148	-	Last Week Energy Consumption [J]
Float	149	-	Last Month Energy Consumption [J]

Float	150	A	Temperature [K]
Float	151	B	Temperature [K]
Float	152	C	Temperature [K]
Float	153	D	Temperature [K]
Float	154	E	Temperature [K]
Float	155	F	Temperature [K]
Float	156	G	Temperature [K]
Float	157	H	Temperature [K]
Float	158	I	Temperature [K]
Float	159	J	Temperature [K]
Float	160	K	Temperature [K]
Float	161	L	Temperature [K]
Float	162	M	Temperature [K]
Float	163	N	Temperature [K]
DateTime	65	-	Date And Time

#### ANEXO D: Función de ejemplo en Matlab para la lectura de variables de Home I/O

```
function read(block)
% Level-2 MATLAB file S-Function for unit delay demo.
% Copyright 1990-2009 The MathWorks, Inc.

    setup(block);

%endfunction

function setup(block)
    %% Register number of input and output ports
    block.NumInputPorts = 0;
    block.NumOutputPorts = 6;

    %% Setup functional port properties to dynamically
    block.SetPreCompPortInfoToDefaults;

    block.OutputPort(1).Dimensions = 1;

    %% Set block sample time to [0.1 0]
    block.SampleTimes = [0.02 0];

    %% Set the block simStateCompliance to default (i.e., same as a
    built-in block)
    block.SimStateCompliance = 'DefaultSimState';
    path = strcat(pwd, '\EngineIO.dll');
    NET.addAssembly(path);
    %% Register methods
    block.RegBlockMethod('Outputs', @Output);
%endfunction

function Output(block)
EngineIO.MemoryMap.Instance.Update();
```



```

%Temperatura cuarto niños
block.OutputPort(1).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(58,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Luminosidad cuarto niños
block.OutputPort(2).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(57,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Nivel de apertura persianas cuarto niños
block.OutputPort(3).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(60,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%DETECTOR DE PUERTA 1 cuarto niños
block.OutputPort(4).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetBit(136,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%DETECTOR DE PUERTA 2 cuarto niños
block.OutputPort(5).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetBit(137,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Potencia instantanea consumida
block.OutputPort(6).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(141,
EngineIO.MemoryType.Memory).Value);

%endfunction

```

#### ANEXO E: Función de ejemplo en Matlab para la escritura de variables de Home I/O

```

function write(block)
% Level-2 MATLAB file S-Function for unit delay demo.
% Copyright 1990-2009 The MathWorks, Inc.

    setup(block);

%endfunction

function setup(block)
%% Register number of input and output ports
block.NumInputPorts = 4;
block.NumOutputPorts = 0;

%% Setup functional port properties to dynamically
block.SetPreCompPortInfoToDefaults;

block.InputPort(1).Dimensions = 1;

%% Set block sample time to [0.1 0]
block.SampleTimes = [0.02 0];

%% Set the block simStateCompliance to default (i.e., same as a
built-in block)
block.SimStateCompliance = 'DefaultSimState';

```

```

path = strcat(pwd, '\EngineIO.dll');
NET.addAssembly(path);

%% Register methods
block.RegBlockMethod('Outputs', @Output);
%endfunction

function Output(block)
    %Calentador niños
    Heater = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(79,
EngineIO.MemoryType.Output);
    Heater.Value = block.InputPort(1).Data;
    %Luces niños
    Luz = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(78,
EngineIO.MemoryType.Output);
    Luz.Value = block.InputPort(2).Data;
    %PersianasSubida
    PersianasUP = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetBit(98,
EngineIO.MemoryType.Output);
    PersianasUP.Value = block.InputPort(3).Data;
    %PersianasBajada
    PersianasDOWN = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetBit(99,
EngineIO.MemoryType.Output);
    PersianasDOWN.Value = block.InputPort(4).Data;

    EngineIO.MemoryMap.Instance.Update();

%endfunction

```

**ANEXO F:** Función de lectura de las temperaturas de todas las habitaciones equipadas con calefactor de la vivienda en Home I/O

```

function read(block)
% Level-2 MATLAB file S-Function for unit delay demo.
% Copyright 1990-2009 The MathWorks, Inc.

    setup(block);

%endfunction

function setup(block)
    %% Register number of input and output ports
    block.NumInputPorts = 0;
    block.NumOutputPorts = 12;

    %% Setup functional port properties to dynamically
    block.SetPreCompPortInfoToDefaults;

    block.OutputPort(1).Dimensions = 1;

    %% Set block sample time to [0.1 0]
    block.SampleTimes = [0.1 0];

```

```

    %% Set the block simStateCompliance to default (i.e., same as a
    built-in block)
    block.SimStateCompliance = 'DefaultSimState';
    path = strcat(pwd, '\EngineIO.dll');
    NET.addAssembly(path);
    %% Register methods
    block.RegBlockMethod('Outputs', @Output);
endfunction

```

```

function Output(block)
EngineIO.MemoryMap.Instance.Update();

%Temperatura zona A
block.OutputPort(1).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(1,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona D
block.OutputPort(2).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(13,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona E
block.OutputPort(3).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(25,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona G
block.OutputPort(4).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(46,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona H
block.OutputPort(5).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(58,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona I
block.OutputPort(6).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(69,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona J
block.OutputPort(7).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(81,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona K
block.OutputPort(8).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(92,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona L
block.OutputPort(9).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(104,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona M
block.OutputPort(10).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(116,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);
%Temperatura zona N
block.OutputPort(11).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(128,
EngineIO.MemoryType.Input).Value);

```

```

%Potencia instantanea consumida
block.OutputPort(12).Data =
double(EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(141,
EngineIO.MemoryType.Memory).Value);
%endfunction

```

**ANEXO H:** Función de escritura de las tensiones de entrada a los calefactores calefactor de cada habitación de la vivienda en Home I/O

```

function write(block)
% Level-2 MATLAB file S-Function for unit delay demo.
% Copyright 1990-2009 The MathWorks, Inc.

    setup(block);

%endfunction

function setup(block)
%% Register number of input and output ports
block.NumInputPorts = 12;
block.NumOutputPorts = 0;

%% Setup functional port properties to dynamically
block.SetPreCompPortInfoToDefaults;

block.InputPort(1).Dimensions = 1;

%% Set block sample time to [0.1 0]
block.SampleTimes = [0.1 0];

%% Set the block simStateCompliance to default (i.e., same as a
built-in block)
block.SimStateCompliance = 'DefaultSimState';

path = strcat(pwd, '\EngineIO.dll');
NET.addAssembly(path);

%% Register methods
block.RegBlockMethod('Outputs', @Output);
%endfunction

function Output(block)
%Calefaccion zona A
HeaterA = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(1,
EngineIO.MemoryType.Output);
HeaterA.Value = block.InputPort(1).Data;
%Calefaccion zona D
HeaterD = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(34,
EngineIO.MemoryType.Output);
HeaterD.Value = block.InputPort(2).Data;
%Calefaccion zona E
HeaterE = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(45,
EngineIO.MemoryType.Output);
HeaterE.Value = block.InputPort(3).Data;

```

```
%Calefaccion zona G1
HeaterE = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(67,
EngineIO.MemoryType.Output);
HeaterE.Value = block.InputPort(4).Data;
%Calefaccion zona G2
HeaterE = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(68,
EngineIO.MemoryType.Output);
HeaterE.Value = block.InputPort(5).Data;
%Calefaccion zona H
HeaterH = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(79,
EngineIO.MemoryType.Output);
HeaterH.Value = block.InputPort(6).Data;
%Calefaccion zona I
HeaterI = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(91,
EngineIO.MemoryType.Output);
HeaterI.Value = block.InputPort(7).Data;
%Calefaccion zona J
HeaterJ = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(102,
EngineIO.MemoryType.Output);
HeaterJ.Value = block.InputPort(8).Data;
%Calefaccion zona K
HeaterK = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(113,
EngineIO.MemoryType.Output);
HeaterK.Value = block.InputPort(9).Data;
%Calefaccion zona L
HeaterL = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(124,
EngineIO.MemoryType.Output);
HeaterL.Value = block.InputPort(10).Data;
%Calefaccion zona M
HeaterM = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(135,
EngineIO.MemoryType.Output);
HeaterM.Value = block.InputPort(11).Data;
%%Calefaccion zona N
HeaterN = EngineIO.MemoryMap.Instance.GetFloat(148,
EngineIO.MemoryType.Output);
HeaterN.Value = block.InputPort(12).Data;

EngineIO.MemoryMap.Instance.Update();

%endfunction
```

