

XVI Jornadas de Ingeniería Telemática JITEL 2023

La Salle – Universitat Ramon Llull

Actas de las XVI Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2023), Barcelona (España), 8-10 de noviembre de 2023.

# Modelado de un gemelo digital para la optimización de un sistema de auto-abastecimiento energético de uso residencial

Laura Rodríguez de Lope\*, Víctor M. Maestre<sup>†</sup>, Luis Diez\*, Alfredo Ortiz<sup>†</sup>, Ramón Agüero\*, Inmaculada Ortiz<sup>†</sup>

\*Departamento de Ingeniería de Comunicaciones

<sup>†</sup>Departamento de Ingeniería Química y Biomolecular

Universidad de Cantabria

\*{laura.rdelope, luisfrancisco.diez, ramon.agueroc}@unican.es

<sup>†</sup>{victormanuel.maestre, alfredo.ortizsainz, inmaculada.ortiz}@unican.es

La preocupante situación climática y la crisis energética, junto con la actual inestabilidad política, ha impulsado en Europa una serie de políticas que favorezcan la instalación de fuentes de energía renovables. Para combatir la intermitencia y las fluctuaciones asociadas a su funcionamiento, el hidrógeno renovable se presenta como una solución de interés para descarbonizar diferentes sectores económicos. Así, el diseño e implementación de un sistema híbrido de energía renovable-hidrógeno ha dado como resultado la primera vivienda social eléctricamente autosuficiente de España, situada en la localidad de Novales (Cantabria). Por otro lado, la digitalización de este tipo de sistemas permitiría una adaptación automática a situaciones cambiantes, incrementando la eficiencia energética. En este contexto, el proyecto HY2RES propone una arquitectura de gemelo digital que, utilizando técnicas de aprendizaje automático e inteligencia artificial, facilite la optimización del rendimiento del sistema físico, mediante la actuación sobre sus elementos de control. Para ello se plantea el uso de soluciones de telemetría que permitan la captación y almacenamiento de datos del propio sistema físico y del entorno (por ejemplo meteorológicos), cuando sea necesario. Este trabajo muestra algunos resultados iniciales del gemelo digital propuesto, que incorpora modelos de los componentes eléctricos del sistema físico.

Palabras Clave—Gemelo digital, energías renovables, hidrógeno.

## I. INTRODUCCIÓN

La situación actual de crisis climática y energética ha derivado en políticas que fomentan el uso de fuentes de energía renovable (FER) que favorezcan la independencia energética a través de soluciones sostenibles.

Desde la Conferencia de las Partes (COP) 21, celebrada en París en 2015 [1], se han promovido una serie de hojas de ruta y estrategias para limitar los efectos nocivos causados por el cambio climático. Así, la dependencia de la sociedad actual de los combustibles fósiles es el principal factor responsable de la situación climática mundial. En concreto, las actividades relacionadas con la energía contribuyen a más de tres cuartas partes de las emisiones totales de dióxido de carbono equivalente (CO2eq) [2], [3]. En este contexto, la Unión Europea ha aprobado el plan "Fit for 55", que incluye limitar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 55% para 2030.

Por otro lado, la inestabilidad política actual, derivada principalmente de la guerra entre Ucrania y Rusia, ha provocado una alta inflación y la escasez de combustibles fósiles (principalmente gas natural y petróleo) importados de Rusia [4].

Ante esta situación, el despliegue a gran escala de fuentes de energía renovables se hace esencial para garantizar un sistema energético descarbonizado, que además proporcione cierta independencia energética a través de soluciones eficientes y sostenibles. Sin embargo, es fundamental encontrar soluciones tecnológicas eficientes para el almacenamiento de energía, que respondan de forma rápida, segura y flexible al comportamiento intermitente y fluctuante de las FER. Por este motivo, la Comisión Europea aprobó el plan REPowerEU para 2022; con él, la Unión Europea (UE) pretende promover la independencia energética de Europa a través de las FER, el aumento de la eficiencia energética, y la economía del hidrógeno. Así, el uso del hidrógeno como vector energético y materia prima es una solución eficiente y sostenible para el almacenamiento de energía a gran escala y estacional. Aparece como una alternativa idónea para impulsar la presencia de las FER en el ámbito energético, y favorecer además la descarbonización de diferentes sectores relacionados con la energía [5].

En este contexto, destaca el sector residencial, al ser un consumidor masivo de energía en la UE, contribuyendo al 40% del consumo final. Además, es un sector altamente ineficiente, debido a su envejecimiento, lo que contribuye negativamente a la huella de carbono causada por este sector. Por otra parte, la inflación sin precedentes de la economía ha agravado la situación de los ciudadanos más vulnerables, llevándolos en muchos casos a la pobreza energética. Por ello, es fundamental mejorar el rendimiento energético del sector residencial para así disminuir su contribución al cambio climático y abaratar las facturas eléctricas que están deteriorando los estándares de calidad de la población [6].

El proyecto europeo SUDOE ENERGY PUSH<sup>1</sup> [7] dio como resultado el un sistema híbrido de energía renovable-hidrógeno instalado en la localidad de Novales (Cantabria), siendo la primera vivienda social eléctricamente autosuficiente de España.

Para optimizar el funcionamiento del sistema basado en hidrógeno renovable (SHR), se ha propuesto el desarrollo de un gemelo digital (GD) de la planta piloto, en el marco del proyecto HY2RES, que permita mejorar del rendimiento del SHR mediante algoritmos desarrollados y validados sobre la réplica digital. Este trabajo presenta la arquitectura del GD, compuesta por el modelo digital de la planta piloto, el interfaz de comunicaciones para la recogida de datos y el envío de señales de control, y un módulo para favorecer la compartición de datos con terceros.

El artículo se estructura como sigue: la Sección II describe el estado del arte en lo que se refiere a la utilización de gemelos digitales en el sector de la energía. La Sección III describe la arquitectura, tanto del sistema físico como del gemelo digital que se ha diseñado. Posteriormente, la Sección IV se centra en el desarrollo de los modelos que conforman el GD, para mostrar, en la Sección V, los resultados obtenidos en las primeras implementaciones que se han integrado. Por último, la Sección VI concluye el documento, resumiendo el trabajo e indicando los aspectos en los que se profundizará en el futuro.

#### II. ESTADO DEL ARTE

El concepto de GD se propuso originalmente a principios de siglo [8] para entornos industriales, aunque más recientemente su uso se ha extendido a diferentes sectores [9], [10], aprovechando los avances en la digitalización y las mayores capacidades de los sistemas de comunicación y computación. Como se explica en [11], la creciente complejidad en los procesos solo puede ser replicada a través de datos masivos, que adquieren una utilidad evidente cuando se aplican en los GD.

En el caso del sector químico, un escenario de especial interés es el de las fuentes de energía renovables. En este caso, tal y como manifiestan los autores en [12] y [10], existen pocos trabajos donde se haya tratado de aplicar el concepto de GD a este tipo de sistemas. Es más, en [13]

<sup>1</sup>https://www.sudoe-energypush.eu/



Fig. 1. Arquitectura del Sistema basado en Hidrógeno Renovable

se confirma que no existen estudios profundos acerca del uso de los GD en este sector.

Uno de los pocos trabajos en los que se aplica el concepto de gemelo digital al ámbito energético es el de Nguyen *et al.* [14]. En él los autores proponen el uso de un GD para mejorar el comportamiento de sistemas de distribución de energía, destacando su capacidad para tomar decisiones óptimas de control, basadas en análisis que se llevan a cabo en tiempo real. De forma similar, en [15] Agostinelli *et al.* analizan los posibles beneficios del GD en la gestión de la distribución y el consumo de energía en edificios, destacando el papel que las técnicas de inteligencia artificial podrían jugar.

Centrándonos en el proceso de producción de hidrógeno, en [16] se propone el uso de un GD para abordar las incertidumbres asociadas a los costes de inversión y explotación del sistema, analizando la influencia de distintos factores en los indicadores financieros.

Como se puede observar, a pesar de los potenciales beneficios que pueden presentar, el uso de gemelos digitales en el ámbito energético en general, y en el de sistemas basados en hidrógeno renovable en particular, es en la actualidad muy limitado. Es precisamente en este punto en el que se sitúa la principal contribución del proyecto HY2RES, tal y como se describe en este trabajo.

## III. METODOLOGÍA

En esta sección se describe el sistema de hidrógeno renovable instalado (sistema físico), indicando los elementos que lo constituyen y el funcionamiento general del mismo. Posteriormente se describe el diseño global del gemelo digital, describiendo su funcionamiento.

## A. Planta Piloto

El SHR diseñado y desplegado en el marco de la propuesta SUDOE ENERGY PUSH combina tanto energías renovables como novedosas tecnologías basadas en el hidrógeno para garantizar la completa autosuficiencia eléctrica de una vivienda social a lo largo del año. La Fig. 1 presenta un esquema de la planta piloto desplegada, así como los flujos eléctricos y de hidrógeno dentro del sistema.

Así, los paneles fotovoltaicos (punto 1 de la Fig. 1) instalados en el tejado del edificio recogen la energía solar para abastecer a la vivienda (punto 10 de la figura) como fuente primaria. Si existe un excedente de energía después de abastecer la vivienda, ésta se acumula en primer lugar en un conjunto de baterías de iones de litio (punto 3), que almacenan energía para el consumo a corto plazo. En caso de que el excedente sea alto, éste se emplea para la generación, compresión y almacenamiento del hidrógeno, para el ahorro energético estacional. El hidrógeno se genera a través de un electrolizador (punto 4), que genera hidrógeno por electrolisis, por lo que está alimentado con energía eléctrica. Este hidrógeno es almacenado, en primer lugar, en un buffer (punto 5). Al llenarse el buffer, el hidrógeno generado se comprime para ser almacenado en un tanque de alta presión (puntos 6 y 7). En el caso de que siguiera habiendo excedente de energía eléctrica procedente de los paneles solares después de abastecer estos procesos, ésta es vertida a la red (punto 9). Durante los periodos de déficit de energía fotovoltaica, las baterías suministran electricidad a la vivienda y, cuando alcanzan un determinado umbral de descarga, se cargan mediante una pila de combustible (punto 8) que, finalmente, cubre la demanda del hogar. Esta pila de combustible genera energía eléctrica a partir del hidrógeno almacenado en el buffer o el tanque de alta presión.

El funcionamiento de la planta piloto se ha automatizado por completo y se controla remotamente gracias a la ayuda de un controlador lógico programable (PLC). Además, el SHR funciona con una estrategia de gestión energética basada en el estado de la autonomía almacenada, y se monitoriza a través de un sistema de control y adquisición de datos (SCADA).

## B. Arquitectura del gemelo digital

Sobre la planta piloto descrita, en el proyecto HY2RES se propone el diseño y desarrollo de un GD en el que se caractericen los componentes de la planta y se desarrollen soluciones de control para afrontar la mejora automática de los parámetros de control. Para el modelado de los componentes del sistema se aplicarán técnicas de aprendizaje automático (ML) e inteligencia artificial (IA) a los datos recopilados cuando el comportamiento de la algorítmica programada no se adapte al funcionamiento real del SHR.

Para desarrollar el GD, el proyecto HY2RES propone una arquitectura de tres etapas principales. La primera, centrada en la interacción físico-virtual, se encarga de la recopilación de información del sistema real, así como de la aplicación de las políticas de decisión. Es más, también se contempla un módulo para la gestión e integración de datos procedentes de fuentes externas, como puede ser la previsión meteorológica o el precio de la energía. En una segunda etapa, y aprovechando los módulos mencionados, se implementa el GD, mediante un conjunto de librerías de software que replican el comportamiento del sistema real. En este sentido, una vez identificadas las variables de entrada/salida y de control de los principales componentes del SHR, se aborda su modelado. Este se basa en soluciones algorítmicas, cuando el comportamiento subyacente es bien conocido, y técnicas de ML en caso contrario. Finalmente, el proyecto HY2RES utilizará el GD para evaluar el rendimiento de diversas políticas de control sobre la réplica digital, incluidas las basadas en la previsión meteorológica.

La Fig. 2 representa la arquitectura completa del GD a alto nivel, incluyendo el flujo lógico básico de la operación del GD. Como se ha mencionado, la planta piloto utiliza un sistema SCADA para la supervisión del funcionamiento de los dispositivos. Así, el GD interactuará con dicho sistema a través del PLC, para recopilar datos y aplicar las acciones de control adecuadas (puntos 1 y 4 de la figura).

El sistema digital está formado por un componente principal, que es el modelo del GD, entrenado por los datos recopilados del sistema físico a través del sistema de control, que captura la lógica y funcionamiento del piloto. El GD seguirá un esquema basado en bucles para garantizar que se refleja de manera precisa el comportamiento del sistema real (puntos 5 y 6 de la Fig. 2): (i) análisis de las estrategias de control sobre el modelo GD para optimizar el rendimiento del sistema físico; (ii) aplicación de la estrategia sobre el piloto real, mediante el envío de comandos de control que interactúan con el sistema SCADA desplegado; (iii) el sistema seguirá recibiendo, a su vez, retroalimentación del piloto físico (monitorización continua) para seguir entrenando los modelos del GD en los casos en que se adopten soluciones de ML.

Por último, aunque se pretende que el GD funcione de forma cerrada, los datos generados en su operación, que se consideren más relevantes, serán accesibles para ser explotados por terceros, tal y como se muestra en la Fig. 2. Así, los datos generados por el GD se pondrán a disposición en un mercado de datos FIWARE y en repositorios de acceso abierto como Zenodo. En este sentido, es necesario adoptar modelos de datos abiertos, como es el caso de los Smart Data Models (SDM), que faciliten la interoperabilidad y reutilización de la información por parte de terceros. En caso de no existir modelos para las necesidades específicas del GD, se propondrán nuevas definiciones para ampliar el repositorio de los SDM, facilitando que los conjuntos de datos generados sean abiertos y accesibles, incluso en tiempo real.

Una vez expuesta la arquitectura general del sistema, las siguientes secciones presentan el modelo de GD y los primeros resultados obtenidos.

#### IV. MODELADO DEL GEMELO DIGITAL

El GD se implementa como un conjunto de módulos software independientes e interconectados entre sí, cada uno de los cuales modela uno o varios componentes físicos del SHR. Esta solución desagregada facilita la implementación, y la validación independiente, de cada uno de dichos elementos. Por otro lado, permite reemplazar los modelos aplicados a diferentes componentes concretos, sin afectar al sistema en su conjunto.

Para cada uno de los módulos se ha identificado el conjunto de variables que influye en su operación, catalogadas como de control y de entrada, así como las



Fig. 2. Arquitectura a alto nivel del gemelo digital

salidas que genera. Las variables de entrada y salida corresponden a magnitudes físicas del sistema, mientras que las de control imitan señales de decisión, como es el caso de las generadas por el PLC. De este modo, al aplicar unas determinadas variables de entrada y de control sobre un módulo, éste genera las correspondientes salidas, replicando el comportamiento de su homólogo físico. Los distintos módulos están conectados de tal manera que las salidas de un módulo pueden actuar como variables de entrada para otros. De hecho, algunas señales realimentan al sistema, como es el caso del estado de carga (State of Charge - SOC) de la batería y las presiones del bloque de almacenamiento de hidrógeno, que realimentan al PLC para la toma de decisiones.

En la Fig. 3 se muestran los módulos identificados, junto con las variables consideradas, diferenciando entre variables externas (color gris), del sistema (color azul) y de control (color naranja). Las primeras son independientes del sistema, mientras que las segundas son modeladas por el GD, y su estado depende de las variables externas, el estado previo del sistema y/o la política de decisiones programada. Como puede observarse en la figura, el GD únicamente requiere de la potencia demandada por la vivienda y la potencia fotovoltaica generada como variables externas, mientras que el resto de variables son estimadas por el propio GD. En próximas fases de la implementación se integrarán otras fuentes de datos externas, como la previsión meteorológica o la tarificación eléctrica, que podrían tener una influencia directa en la optimización del rendimiento del sistema.

A pesar de que en la fase inicial de HY2RES la actividad se ha centrado en la implementación de los módulos de los componentes eléctricos, como son el PLC, el inversor y la batería, a continuación de describen todos los módulos identificados. Como paso inicial, se implementan mediante algoritmos que replican el comportamiento lógico de los componentes físicos. Posteriormente, en los casos en los que soluciones algorítmicas no sean precisas, se adoptarán modelos basados en ML, entrenados a partir de los datos recogidos. A modo de resumen, en la Tabla I se indican todos los parámetros de entrada y salida de cada componente.

## A. PLC

Se trata del elemento principal, ya que integra la lógica de gestión del sistema. Este módulo toma como variables de entrada la demanda de potencia de la vivienda y la generación de energía fotovoltaica de los paneles solares. Estas variables, junto con otras internas que determinan el estado del sistema, como es el caso del estado de carga de la batería (SOC) y la presión de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno, son utilizadas para estimar las variables de salida, que en este caso se corresponden con las señales de control para el encendido/apagado del resto de módulos. Inicialmente la lógica implementada en el PLC sigue el comportamiento actualmente configurado, tal como está descrito en la Sección III, para la validación del resto de modelos. Posteriormente, la implementación de diferentes algoritmos de control conllevará la modificación de esta lógica.

## B. Inversor

El módulo inversor tiene, como variables de entrada, la potencia demandada por la vivienda, así como la que generan los paneles, además de la señal de carga y descarga de la batería, generada por el PLC. El modelo implementado distribuye el excedente/déficit de energía, generado a partir de la diferencia existente entre la demanda de la vivienda y la producción de los paneles solares, hacia/desde los diferentes módulos de almacenamiento de energía y, en su caso, hacia/desde la red eléctrica.

## C. Batería

El módulo de batería utiliza la potencia de carga/descarga proporcionada por el módulo inversor para actualizar el SOC. En caso de que la pila de combustible



Fig. 3. Módulos y variables del gemelo digital

Tabla I Variables de entrada y salida de cada componente

Variables de entrada	Variables de salida
PLC	
Pot. paneles solares	Señal on/off electrolizador
Pot. demandada	Señal on/off compresor
SOC	Señal on/off pila de combustible
Presión buffer y tanque	Señal carga/descarga batería
Inversor	
Pot. paneles solares	Pot. carga/desgarga batería
Pot. demandada vivienda	Pot. hacia/des la red
Pot. demandada electrolizador	
Pot. demandada compresor	
Señal carga/descarga batería	
Batería	
Pot. carga/descarga de batería	SOC
Pot. de la pila de combustible	
Electrolizador	
Señal on/off electrolizador	Pot. demandada electrolizador
	Hidrógeno generado
Almacenamiento de hidrógeno	
Señal on/off compresor	Pot. demandada compresor
Hidrógeno gen. electrolizador	Presión del buffer
Hidrógeno demandado pila	Presión del tanque
Pila de combustible	
Señal on/off pila	Pot. generada por la pila
Hidrógeno demandado pila	

esté encendida, la energía generada por ella también será utilizada como variable de entrada para determinar el SOC. La variable de salida de este módulo, SOC, realimenta al sistema, al ser utilizada por el PLC en su toma de decisiones.

## D. Electrolizador

El módulo electrolizador modela, a partir de la señal de encendido, el flujo de hidrógeno generado y de potencia consumida por éste. Estas variables actuarán, además, como entrada de los módulos de almacenamiento de hidrógeno e inversor, respectivamente. Otras variables, como la temperatura ambiental, también serán consideradas en próximas fases, para modelar el comportamiento de este bloque.

## E. Bloques de almacenamiento de hidrógeno

Este módulo está compuesto por un primer bloque de almacenamiento de hidrógeno en un buffer y un se-

gundo bloque de hidrógeno comprimido, formado por el compresor y el tanque. La variable compresor on/off del PLC determina si el hidrógeno generado por el electrolizador debe ser almacenado en el buffer o en el tanque de hidrógeno comprimido. El flujo de entrada/salida de hidrógeno determinará la presión en estos bloques, que serán realimentadas al PLC, ya que se utilizan en la toma de decisiones de la lógica de control.

## F. Pila de combustible

Recibe la señal de encendido por parte del PLC cuando la batería se encuentra por debajo de un umbral establecido. Proporciona como variables de salida el hidrógeno consumido y la potencia generada, que actualizan el estado de los módulos de almacenamiento de hidrógeno y batería, respectivamente.

## V. RESULTADOS

Durante la fase inicial del proyecto HY2RES, la actividad se ha centrado en la implementación de los módulos de los componentes eléctricos del sistema: PLC, inversor y batería. El modelado ha seguido un enfoque algorítmico, que utiliza el funcionamiento lógico de cada uno de ellos, así como las ecuaciones que rigen su comportamiento. Posteriormente se adoptarán otros enfoques basados en datos, en función de la precisión de la predicción observada. Para validar que los modelos propuestos proporcionan un comportamiento adecuado, reflejando el de sus homólogos físicos, esta sección presenta un análisis de los resultados de los componentes mencionados, centrándose en la interacción entre el inversor y la batería.

Los resultados que se muestran a continuación se basan en los datos obtenidos tras el muestreo del sistema físico, midiendo el estado de cada una de las variables a lo largo de 7 días con una cadencia entre muestras de 5 segundos, lo que permite una granularidad suficiente como para capturar cambios bruscos en el estado de las variables como, por ejemplo, picos en la demanda de energía por parte de la vivienda. Para cada instante de muestreo, el GD genera una estimación de las variables correspondientes.

En el caso del inversor, el análisis compara los valores, reales y estimados por el modelo, de potencia suministrada/consumida a/desde la batería, siendo las señales



Fig. 4. Potencia de descarga instantánea de la batería. Real (azul) y estimada (naranja).

de entrada al modelo la potencia fotovoltaica generada, la demanda de potencia del hogar y las señales estimadas del PLC. En el caso de la batería, la variable de salida SOC se evalúa mediante su potencia de carga/descarga, que se utiliza como señal de entrada para el modelo.

La Fig. 4 muestra la evolución instantánea de la potencia de descarga de la batería (Batt. Power Load). Con fondo sombreado se representa la diferencia entre las dos variables de entrada, la alimentación fotovoltaica y la demanda doméstica, cuya escala se indica en el eje derecho de la figura (PV/home diff.). Los puntos azules y naranjas representan los valores reales y estimados de la descarga de la batería, respectivamente.

La figura muestra que la descarga de la batería se produce principalmente durante el período nocturno, cuando existe un déficit de energía (PV/home diff negativa). Durante el día, la potencia de descarga se mantiene nula, a excepción de ciertos picos de demanda. Se puede apreciar que el modelo sigue la misma tendencia que el comportamiento del sistema físico, proporcionando valores estimados muy próximos a los reales en la mayoría de los casos. Sin embargo, se aprecian diferencias cuando se producen descargas bruscas de potencia, que en la figura se muestran como picos. Esto se debe a que la red eléctrica es más reactiva que la batería, por lo que ante demandas bruscas de energía, es capaz de reaccionar con mayor rapidez. Este fenómeno hace que se produzca una importación de energía de la red, siendo necesaria una descarga de potencia de la batería menor. Este comportamiento del sistema real es impredecible algorítmicamente y, por lo tanto, no está contemplado por el modelo, que siempre realiza una descarga de batería máxima antes de importar potencia de la red.

La Fig. 5 muestra la relación entre los valores de potencia de descarga de la batería medidos y los estimados durante el periodo de muestreo. Cada uno de los puntos azules representa la potencia de descarga estimada por el GD, frente a la medida por el sistema real en un instante temporal. El comportamiento ideal se representa mediante una línea (naranja), donde la estimación y las muestras reales coinciden. Como puede observarse, el modelo es capaz de reflejar, de manera precisa, el comportamiento real en la mayoría de los casos. Sin embargo, en el caso



Fig. 5. Potencia de descarga de la batería. Real vs. Estimada

de valores extremos, máximos o mínimos, se producen ciertos desajustes. En la parte izquierda de la figura se puede apreciar que el modelo proporciona valores en todo el rango, mientras que el sistema de medición no detectó ninguna descarga. Este comportamiento se debe a lagunas en el proceso de monitorización en el sistema físico, en concreto por parte del PLC, durante ciertos intervalos temporales, en los que se proporcionan medidas nulas. El fenómeno mencionado anteriormente, en el que se producen demandas bruscas de potencia, se refleja también en la parte superior derecha de la figura, donde se aprecia que la potencia de descarga estimada es máxima, mientras que la real adopta valores intermedios debido a la reacción más rápida de la red eléctrica ante estas demandas de consumo.

Para caracterizar numéricamente la desviación entre los valores proporcionados por el GD y los reales, se ha calculado el error cuadrático medio normalizado (NRMSE) a partir de las estimaciones de la potencia de descarga de la batería, obteniéndose un NRMSE de 0.0389, lo que evidencia la gran precisión del modelo propuesto. No obstante, en próximas fases, se adoptarán técnicas de aprendizaje máquina que permitan replicar la reacción del sistema ante demandas bruscas, tratando de reducir aún más esta desviación.

Para analizar el comportamiento del módulo de batería, se ha comparado la señal de salida SOC frente a su valor real, monitorizado en el sistema físico. La Fig. 6 muestra la evolución temporal del SOC de la batería real y el estimado por el GD, con líneas azules y naranjas, respectivamente. Adicionalmente, para ilustrar mejor el comportamiento observado, se representan las variables de entrada del modelo de batería, potencias de carga/descarga, mediante un fondo gris sombreado y escala en el eje derecho (In/Out power).

Como puede apreciarse, la señal de salida SOC estimada por el modelo del GD y la real siguen la misma tendencia. En un análisis más detallado, se puede observar que el modelo se comporta adecuadamente (con mucha precisión) en valores medios de SOC, mientras que en valores altos y bajos de SOC la diferencia se vuelve más apreciable. Esta circunstancia se debe al comportamiento no lineal de la batería cuando se encuentra en valores



Fig. 6. SOC real y estimada

extremos de carga.

En este caso, el NRMSE obtenido de todo el periodo de medición 1.72e - 2. Como puede verse, a pesar de esas diferencias en valores extremos del SOC, el modelo propuesto en el GD presenta un comportamiento adecuado, capturando de manera bastante precisa el del componente correspondiente en el sistema físico.

## VI. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el diseño y los primeros pasos de la implementación de un GD para un sistema híbrido de energía renovable-hidrógeno, instalado en una vivienda de la localidad de Novales (Cantabria).

El modelo GD, estructurado en módulos funcionales que emulan los componentes físicos, utiliza como variables externas la demanda energética de la vivienda y la energía generada por los paneles fotovoltaicos instalados, efectuando la predicción del valor del resto de variables presentes en el sistema.

Los resultados obtenidos para los primeros módulos incorporados al GD, que representan los componentes eléctricos del sistema físico, muestran un buen ajuste entre los valores monitorizados en el sistema real y los obtenidos a partir del GD, con errores, NRMSE, bajos. Sin embargo, también se observan comportamientos no previstos de los componentes físicos.

Los próximos pasos irán dirigidos a la ampliación de las funcionalidades del modelo GD, implementando el resto de componentes del sistema como módulos de software independientes, que se conectarán entre sí mediante las variables apropiadas. En paralelo, se analizarán alternativas basadas en ML que permitan reducir el NRMSE siempre que la algorítmica programada no se ajuste en la predicción a los valores reales, como es el caso de los valores extremos del SOC. Además, se integrarán los elementos adecuados para facilitar el acceso abierto a los datos más relevantes.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno de España (Ministerio de Ciencia e Innovación), y por la Unión Europea (Next GenerationEU/RTRP) a través de los proyectos *Gemelo digital de un sistema híbrido* solar fotovoltaica-hidrógeno para el abastecimiento en el ámbito residencial (TED2021-129951B-C22) y Piloto demostrador de un sistema híbrido solar fotovoltaicahidrógeno para el abastecimiento energético en el ámbito residencial (TED2021-129951B-C21), así como por el Gobierno de Cantabria a través del proyecto "Tecnologías habilitadoras de Gemelos Digitales y su aplicación a los sectores químico y de comunicaciones" (GDQuiC) del programa "Ayudas a proyectos de investigación con alto potencial industrial de agentes tecnológicos de excelencia para la competitividad industrial TCNIC".

## REFERENCIAS

- [1] "Paris agreement." [Online]. Available: https: //treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg\_ no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=\_en
- " $CO_2$ [2] International Energy Agency, emissions from fuel combustion 2020 edition. Database documentation, 2020. https://iea.blob.core.windows.net/ [Online]. Available: assets/474cf91a-636b-4fde-b416-56064e0c7042/WorldCO2\_ Documentation.pdf
- [3] H. Ritchie, M. Roser, and P. Rosado, "Co2 and greenhouse gas emissions," *Our World in Data*, 2020, https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions.
- [4] European Council, "Fit for 55 the eu's plan for a green transition," 2023. [Online]. Available: https://www.consilium.europa.eu/en/ policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/
- [5] —, "Repowereu: Affordable, secure and sustainable energy for europe," 2022. [Online]. Available: https://commission.europa. eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/ repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe\_en
- [6] V. Maestre, A. Ortiz, and I. Ortiz, "Transition to a low-carbon building stock. techno-economic and spatial optimization of renewables-hydrogen strategies in spain," *Journal of Energy Storage*, vol. 56, p. 105889, 2022. [Online]. Available: https: //www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22018771
- [7] V. M. Maestre, A. Ortiz, and I. Ortiz, "Implementation and digitalization of a renewable hydrogen-based power system for social housing decarbonization," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 96, pp. 223–228, 2022. [Online]. Available: https://www.cetjournal.it/cet/22/96/038.pdf
- [8] M. Grieves, "Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication," White paper, vol. 1, no. 2014, pp. 1–7, 2014.
- [9] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, "Digital twin in industry: State-of-the-art," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, 2019.
- [10] F. Tao, B. Xiao, Q. Qi, J. Cheng, and P. Ji, "Digital twin modeling," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 64, pp. 372–389, 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/ pii/S0278612522001108
- [11] Q. Qi and F. Tao, "Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3585–3593, 2018.
- [12] M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. Xu, "Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 58, pp. 346–361, 2021, digital Twin towards Smart Manufacturing and Industry 4.0. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/ pii/S0278612520301072
- [13] A. Ebrahimi, "Challenges of developing a digital twin model of renewable energy generators," in 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2019, pp. 1059–1066.
- [14] S. Nguyen, M. Abdelhakim, and R. Kerestes, "Survey paper of digital twins and their integration into electric power systems," in 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2021, pp. 01–05.
- [15] S. Agostinelli, F. Cumo, G. Guidi, and C. Tomazzoli, "Cyberphysical systems improving building energy management: Digital twin and artificial intelligence," *Energies*, vol. 14, no. 8, 2021. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1996-1073/14/8/2338
- [16] B. Gerard, E. Carrera, O. Bernard, and D. Lun1, "Smart design of green hydrogen facilities: A digital twin-driven approach," *E3S Web of Conferences*, vol. 334, no. 2022, pp. 1–7, 2022.