

Gestión inteligente de turbinas mareales mediante lógica difusa

Cruz-Álamo, A.^a, Gómez-Ruiz, G.^a, Sánchez-Herrera, R.^a, Pérez-Torreglosa, J.^a

^a Centro de Investigación en Tecnología, Energía y Sostenibilidad (CITES), Universidad de Huelva, 21007 Huelva, España

To cite this article: Cruz-Álamo, A., Gómez-Ruiz, G., Pérez-Torreglosa, J., Sánchez-Herrera, R., 2025. Intelligent management of tidal turbines using fuzzy logic. XX Simposio CEA de Control Inteligente, Huelva (Spain), 2025.

Resumen

Este artículo presenta la simulación de un Sistema de Gestión de Energía (EMS) basado en lógica difusa, aplicado a una instalación de generación eléctrica con corrientes mareales. La instalación consta de una turbina generadora, un convertidor para operar en el punto máximo de potencia, un banco de baterías para almacenamiento y un inversor para inyección a la red. El EMS funciona como un control inteligente que evalúa la energía disponible en el recurso marino, el estado de carga (SOC) de las baterías y el coste instantáneo de electricidad, para determinar la potencia óptima a inyectar según la estrategia implementada (como priorizar rentabilidad o prolongar la vida útil de las baterías). La lógica difusa permite manejar la incertidumbre y variabilidad ambiental, logrando una operación más flexible y eficiente. Los resultados muestran que el EMS mejora la estabilidad operativa, optimiza el uso del recurso energético y favorece una gestión más rentable y sostenible.

Palabras clave: Control de fuentes de energía renovables, Sistemas de almacenamiento, Control adaptativo neural y difuso, Modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia, Redes inteligentes.

Intelligent management of tidal turbines using fuzzy logic

Abstract

This article presents the simulation of a fuzzy logic-based Energy Management System (EMS) applied to a tidal current power generation installation. The system includes a generating turbine, a converter to operate at maximum powerpoint, a battery bank for energy storage, and an inverter for grid injection. The EMS acts as an intelligent controller that assesses the available marine energy, battery state of charge (SOC), and instantaneous electricity cost to determine the optimal power to inject based on the implemented strategy (e.g., prioritizing profitability or extending battery life). Fuzzy logic handles environmental uncertainty and variability, enabling more flexible and efficient operation. Simulation results show that the EMS improves operational stability, optimizes resource utilization, and promotes more profitable and sustainable energy management.

Keywords: Control of renewable energy resources, Energy systems, Neural and fuzzy adaptive control, Modeling and simulation of power systems, Smart grids.

1. Introducción

La creciente preocupación por el cambio climático, el agotamiento de los combustibles fósiles y la necesidad de seguridad energética han impulsado una transformación global hacia sistemas energéticos sostenibles y descentralizados. En este contexto, las energías renovables cobran protagonismo, siendo la energía mareal una de las fuentes más prometedoras debido a su alta previsibilidad, su bajo impacto visual y su potencial energético significativo incluso en instalaciones de pequeña escala (Ahmad et al., 2018).

La energía mareal, en particular, ofrece una oportunidad significativa en la provincia de Huelva. Desde el siglo XVIII, se han utilizado construcciones como el Molino del Pintado en Ayamonte para aprovechar esta energía, utilizando la diferencia de altura entre la bajamar y la pleamar para moler trigo. La historia y geografía de Huelva, con sus amplios humedales, han facilitado el uso de la energía mareal a lo largo de su costa.

Los ciclos de mareas en nuestra provincia son de doce horas (6 horas cada marea), estos permitirían un suministro predecible de energía a lo largo del día, sin embargo, existen desventajas, ya que en periodos de mareas muertas (mareas de poco

coeficiente) las velocidades de flujo son muy bajas, esto provoca momentos de potencia generada nula haciendo imposible la implementación sin sistemas de almacenamiento.

Esta naturaleza variable del recurso mareal, especialmente durante las mareas muertas, plantea desafíos de gestión energética que requieren soluciones inteligentes y adaptativas. Es aquí donde los sistemas de gestión energética (*Energy Management Systems*, EMS) juegan un papel fundamental al coordinar la generación, el almacenamiento y el consumo de energía en tiempo real para maximizar la eficiencia y la autonomía del sistema.

Entre las diversas técnicas de control, la lógica difusa ha demostrado ser especialmente eficaz para gestionar la incertidumbre inherente a los sistemas renovables, permitiendo decisiones más flexibles y robustas en entornos dinámicos (Prathyush and Jasmin, 2018) (Arcos-Aviles et al., 2018). Su aplicación en microrredes híbridas, especialmente aquellas que combinan energías renovables con sistemas de almacenamiento, ha sido ampliamente validada mediante simulaciones y estudios experimentales en diferentes configuraciones (Sreeleksmi et al., 2017) (Aristizábal et al., 2020).

En este trabajo se propone el diseño y evaluación, en el entorno de MATLAB® Simulink, de un sistema EMS que incorpora un controlador basado en lógica difusa. El objetivo es optimizar el flujo energético de la instalación mareal, gestionando la potencia inyectada a red, con un enfoque equilibrado que busque tanto rentabilidad económica como alargar la vida útil de las baterías, solventando el problema de bajas velocidades de flujo en las horas muertas de la marea.

Las principales contribuciones de este trabajo son:

- (1) Desarrollo de un modelo eléctrico completo de la instalación, incluyendo turbina síncrona de imanes permanentes, convertidores de potencia, banco de baterías e inversor conectado a red, que permite el análisis detallado de las dinámicas transitorias del sistema.
- (2) Propuesta de un modelo simplificado con fuentes de corriente controladas que facilita la simulación a largo plazo de estrategias de gestión energética, superando limitaciones de tiempo computacional.
- (3) Diseño de un controlador EMS basado en lógica difusa que integra variables clave como la potencia generada, el estado de carga (*State of Charge*, SOC) de las baterías y el coste instantáneo de la electricidad para optimizar la potencia inyectada a la red, priorizando tanto la rentabilidad económica como la prolongación de la vida útil de las baterías.

- (4) Validación del EMS mediante simulaciones que demuestran su capacidad para manejar la variabilidad del recurso mareal.

2. Modelado del sistema

En este apartado se abordarán los modelos utilizados. Con el objetivo de evaluar el comportamiento energético de la instalación, se ha optado por dos modelos. El primero reproduce de forma detallada el sistema eléctrico completo, incluyendo, el generador síncrono de imanes permanentes (PMSG, *Permanent Magnet Synchronous Generator*), los convertidores de potencia y el banco de baterías, permitiendo analizar el desempeño de cada componente. Sin embargo, debido a las limitaciones en tiempo de simulación asociadas a este tipo de modelos, se desarrolló un segundo modelo simplificado que sustituye el sistema físico por fuentes de corriente controladas. Este modelo emula el comportamiento general de la instalación permitiendo simular escenarios de largo plazo (varios ciclos de marea) pudiendo así evaluar estrategias de control como la lógica difusa. La combinación de ambos modelos permite abordar el estudio tanto desde el punto de vista técnico como operativo.

2.2. Modelo eléctrico completo

El modelo eléctrico, que se muestra en la Figura 1, tiene como objetivo simular dinámicas transitorias del sistema, y verificar que las formas de onda correspondientes a cada parte de la instalación son las correctas. La simulación se compondrá de los siguientes elementos.

- (1) PMSG.
- (2) Puente rectificador trifásico, (no controlado).
- (3) Convertidor boost, con algoritmo P&O (*Perturb and Observe*).
- (4) Baterías, de ion litio, con una tensión nominal de 700 V, fijando la tensión en el bus de continua para que el convertidor pueda trabajar en MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).
- (5) Inversor, si bien puede funcionar como Grid tied o como Grid forming (Siguiendo la red, o estableciendo esta), en su modo conectado a red controlaremos la intensidad/potencia que se inyecta siendo esta la variable más valiosa, y la variable a controlar posteriormente en el control inteligente (Magro et al., 2025).
- (6) Red.

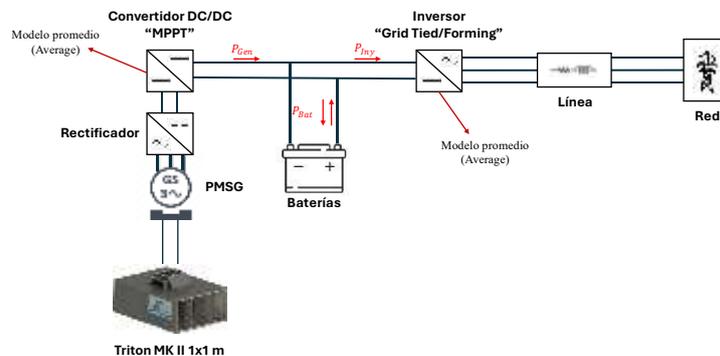


Figura 1: Esquema eléctrico de la instalación.

Se han utilizado modelos average (para el convertidor y el inversor), que promedian las variables de estado sobre un ciclo de conmutación, simplificando el modelo y reduciendo el tiempo de simulación sin comprometer la precisión dinámica.

El control del inversor que se refleja en la Figura 2, es el que nos permite mediante la consigna de potencia controlar lo rápido que se carga o descarga la batería, siempre cumpliéndose la relación (1).

$$P_{Generada} + P_{Baterías} - P_{Inyectada} = 0 \quad (1)$$

Como la potencia generada siempre es la máxima posible debido al convertidor MPPT y la inyectada es la fijada por consigna, la potencia que va por las baterías siempre vendrá condicionada por las otras dos. De esta forma la batería solo se encarga de fijar la tensión en el bus de continua y absorber las desviaciones de la red.

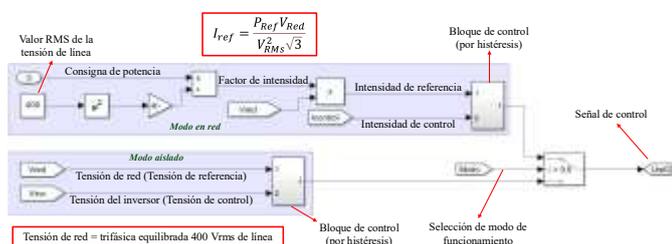


Figura 2: Modelo de control del inversor.

Pero como se explicó anteriormente este modelo no permite simular las dinámicas del sistema en un intervalo de tiempo muy grande, como pueden ser días y para ello se ha construido el modelo que se presenta en la Sección 2.2.

2.2. Modelo simplificado con fuentes de intensidad controladas

En esta sección se explica el modelo mediante el cual se ha implementado el EMS, este modelo trata solo con las variables

mínimas que necesita el EMS para funcionar, además cumple el principio que se menciona en (1), las fuentes de intensidad emulan las intensidades que le llegan a la batería en la simulación de la sección anterior; las variables que necesita el EMS son las siguientes:

- (1) Potencia generada, la cual se estima con la velocidad de marea, y la curva de potencia de la turbina. En la Figura 3 se muestran tanto la velocidad de marea para los días seleccionados, como la curva de potencia característica.
- (2) Estado de carga de la batería, SOC.
- (3) Precio de la electricidad en MWh, precio por franja horaria (Figura 7).

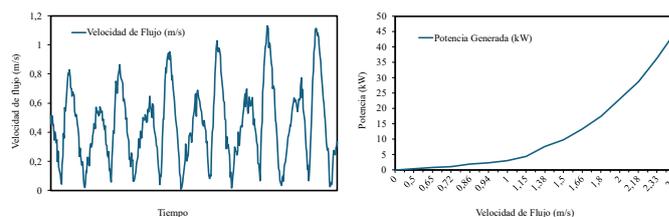


Figura 3: Velocidades de flujo (medidas reales tomadas en las instalaciones de Marina del Odiel, con un intervalo de medidas de 10 minutos) y curva de potencia característica del generador.

Esta simulación (Figura 4) utiliza fuentes de intensidades controladas y una capacidad de batería de 50 Ah para poder apreciar variaciones sustanciales del SOC.

Las intensidades de referencia generadas por las fuentes controladas vendrán dadas por la división de la potencia (generada o inyectada) entre la tensión del bus de continua impuesta por la batería (700 V). Los perfiles de potencia generada/coste de la electricidad abarcan tres días completos: del 25 al 27 de abril de 2025, el perfil de potencia equivale a la interpolación de las curvas de la Figura 3, dando lugar al perfil de potencia de la Figura 6.

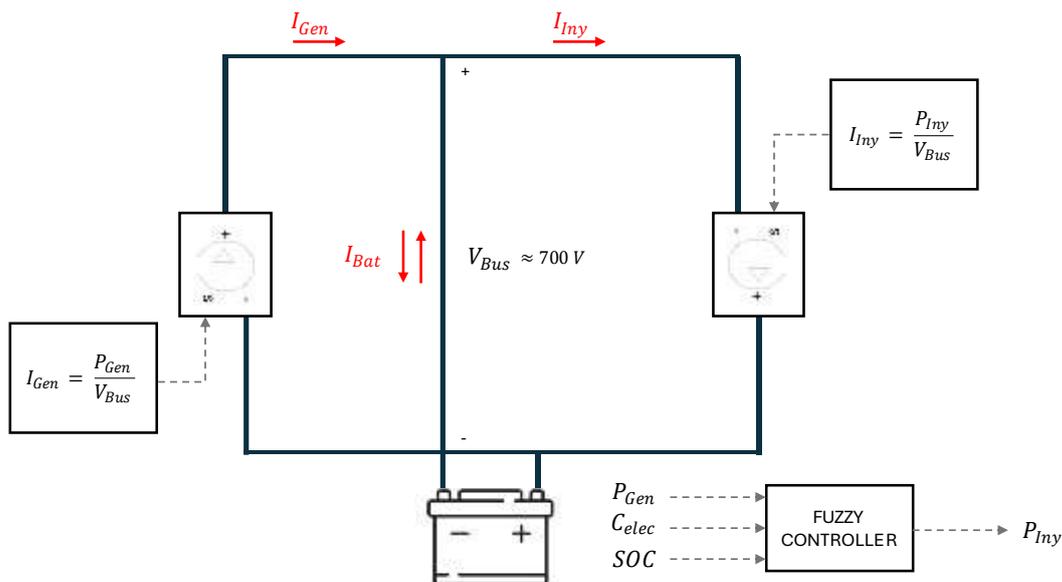


Figura 4: Modelo simplificado con fuentes de intensidad.

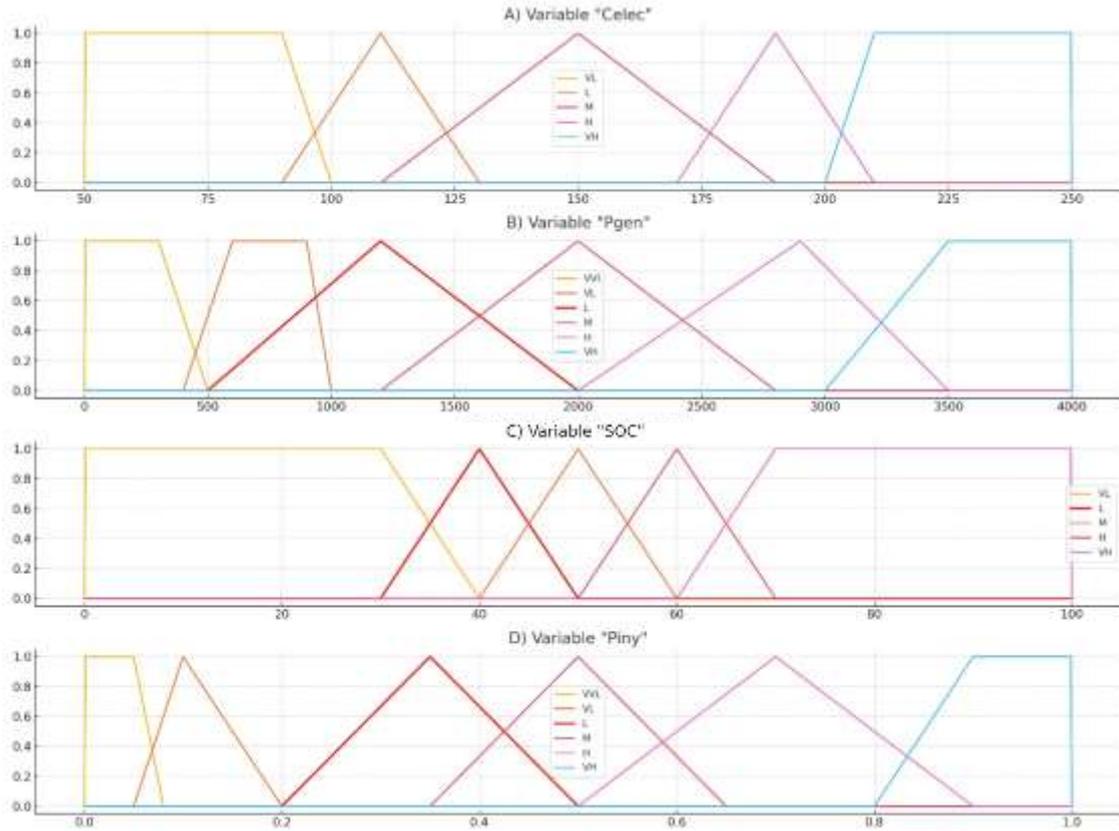


Figura 5: Funciones de membresía, se muestran ordenadas alfabéticamente: A) Coste de la electricidad (MWh), B) Potencia generada (W), C) Estado de carga (SOC) (%), D) Potencia inyectada (W).

Los parámetros de simulación utilizados se muestran en la Tabla 1. El parámetro paso se refiere a la variable *sample time* del bloque *repeating sequence stair*, el cual marca cuánto dura cada step de la función del perfil, se toma el valor de 600 segundos ya que el intervalo de medidas de las potencias es un dato cada 10 minutos.

Tabla 1: Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
Tiempo de muestreo	10 s
Paso	600 s
Tiempo de parada	259800 s

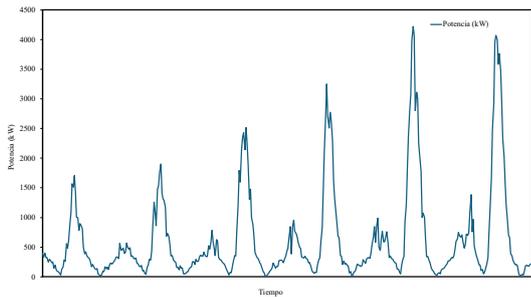


Figura 6: Perfil de potencia generada desde 25/04/2025 a 27/04/2025.

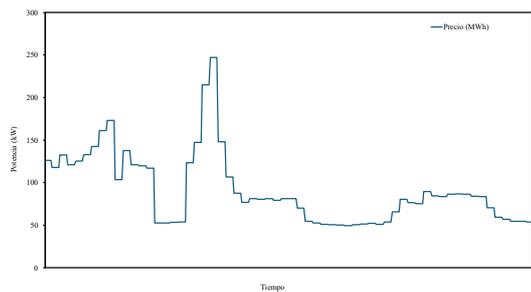


Figura 7: Coste horario de la electricidad desde 25/04/2025 a 27/04/2025.

En cuanto al control inteligente del EMS, utilizaremos el bloque *fuzzy controller* el cual recibe como variables de entrada la potencia generada (Pgen), el coste de la electricidad (Celec) y el estado de carga de la batería (SOC); la variable de salida es la potencia inyectada (Pout).

Las funciones de membresía (Figura 5) se han definido de tal forma que se establecen 5 niveles desde muy bajo (VL) a muy alto (VH), menos para las variables de potencia generada e inyectada donde se establece un nuevo nivel; muy muy bajo (VVL), el cual permite detectar la potencia generada cuando está en valores cercanos al nula, ya que la curva característica del generador es exponencial haciendo que los valores bajos de velocidad de flujo se traduzcan en potencias casi nulas. En el caso de la potencia inyectada este último nivel nos permite inyectar una potencia cero.

Las funciones de pertenencia son de tipo trapezoidal y triangular, con ellas se consigue que el sistema reaccione de forma progresiva ante cambios en las variables de entrada. Los anchos de dichas funciones se han repartido de manera uniforme dentro del rango de valores de las entradas, es decir la función central siempre tendrá su centro en la mitad del

rango de valores de la variable de entrada. Todas las funciones son simétricas, excepto para las variables potencia de salida y generada donde necesitamos un nivel de potencia nula, como se mencionó previamente, además esta salida se encuentra normalizada de 0 a 1, lo cual nos permite seleccionar según convenga cuales la potencia máxima que inyectará el sistema utilizando un bloque de ganancia a la salida del controlador con el valor de dicha potencia.

Estas funciones de membresía permiten al sistema evaluar con precisión los diferentes estados de las variables de entrada y salida, facilitando una toma de decisiones más eficiente y adaptativa en el EMS. De esta manera, el control inteligente puede responder dinámicamente a las variaciones en la generación, el precio y el almacenamiento de energía, optimizando el uso de los recursos disponibles.

La estrategia de funcionamiento del EMS ha priorizado que las baterías trabajen en su rango óptimo para prolongar su vida útil (80-20%), esto se ve reflejado en la función de membresía del SOC donde los límites de las funciones triangulares de L y H se encuentran entre un 30 y 70 por ciento, asegurando que el sistema se mueva dentro de ese rango. El EMS prioriza la vida útil de las baterías sin dejar de lado extraer el máximo beneficio económico posible, la dinámica de funcionamiento sigue las reglas mostradas en Algoritmo 1 y estas se ven reflejadas en la Tabla 2, la cual muestra un ejemplo de tabla de reglas.

Algoritmo 1: Estrategia de inyección del EMS

Entrada:
 SOC, C_{elec}, P_{gen}
 Límites de operación: $SOC_{min} = 20\%, SOC_{max} = 80\%$
 Controlador difuso: reglas, funciones de membresía, inferencia y defuzzificación.

Salida:
 P_{out} — potencia a inyectar a red

- 1. Evaluar el SOC actual:**
 - Si $SOC < 20\%$
 - Reducir P_{out} a cero para forzar carga de la batería
 - Si $SOC > 80\%$
 - Aumentar P_{out} para forzar descarga de la batería
- 2. Si SOC dentro del rango operativo (20–80%):**
 - Determinar P_{out} según las reglas difusas:
 - Si precio alto → Aumentar P_{out} (vender energía)
 - Si precio bajo → Disminuir P_{out} (guardar energía)
 - Si P_{gen} es alta y C_{elec} bajo → aumenta SOC
 - Si P_{gen} es baja y C_{elec} alto → disminuye SOC

Tabla 2: Ejemplo tabla de reglas para la potencia inyectada (Potencia generada = baja (L)).

C_{elec}/SOC	VL	L	M	H	VH
VL	VVL	VVL	VVL	L	H
L	VVL	L	M	M	H
M	VVL	M	M	H	VH
H	VVL	M	H	H	VH
VH	VVL	H	VH	VH	VH

3. Resultados

Para la evaluación del modelo se han utilizado varios escenarios de SOC inicial (Figuras de la 8 a la 10) del cual

parte el sistema, de esta forma es posible apreciar si el sistema sigue la estrategia adecuada o no. Los perfiles de potencia generada y coste de la electricidad son los mostrados en las Figuras 6 y 7, aunque también se ven reflejados en la Figura 8.

El comportamiento esperado para un estado inicial del SOC de un 20%, sería de una inyección nula, ya que la batería se encuentra en el límite inferior de su rango de operación, lo cual es perjudicial para su vida útil, por lo que la batería debería de entrar en estado de carga lo antes posible para volver al rango adecuado. La Figura 8 muestra como esto ocurre para los primeros instantes de simulación volviendo la batería a un SOC del 30%, con una potencia inyectada nula, y con un primer pico de inyección que aprovecha la subida de la velocidad de flujo para inyectar algo de potencia sin dejar de descargar la batería buscando SOC's mayores por seguridad.

Nótese que, en las tres figuras, para precios bajos de la electricidad con altas velocidades de flujo el sistema se sigue cargando, acumulando energía esperando a precios mayores sin dejar de lado el beneficio económico e inyectando algo de potencia a red.

En la Figura 10 se muestra el caso contrario, con un SOC inicial por encima del rango, descargándose la batería rápidamente, aprovechando unos precios óptimos. Después de haberse descargado la batería hasta aproximadamente un 40%, el control sigue una estrategia conservadora donde carga la batería poco a poco inyectando potencia en los picos de corriente.

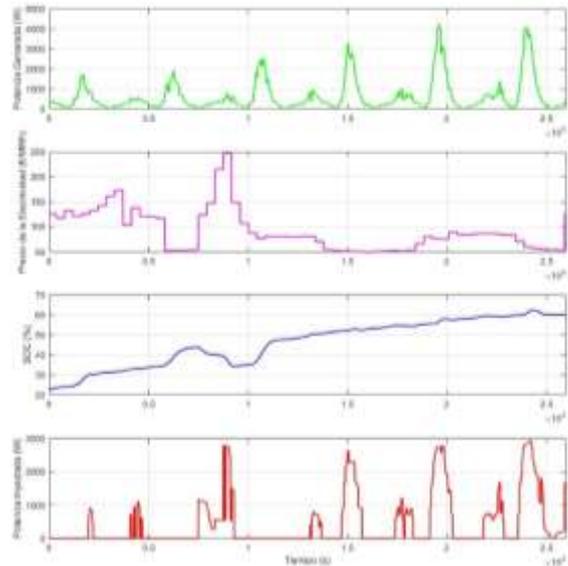


Figura 8: Escenario SOC inicial del 20%.

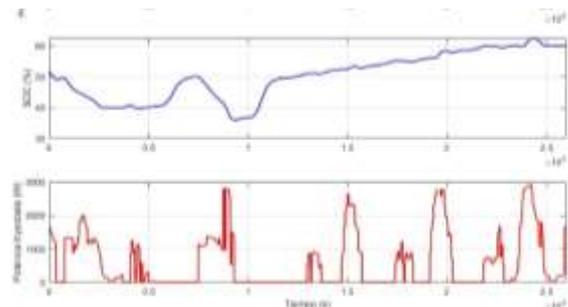


Figura 9: Escenario SOC inicial del 50%.

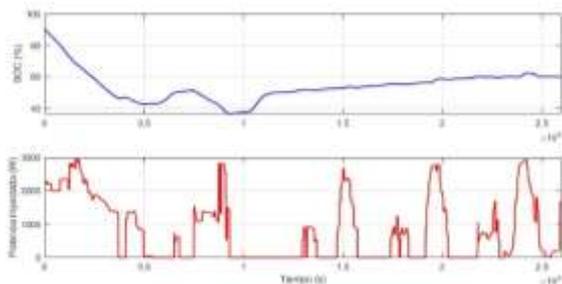


Figura 10: Escenario SOC inicial del 90%.

En el caso intermedio (Figura 9), el sistema sigue una operación normal descargando la batería con precios altos y cargándola cuando los precios son bajos.

En resumen, cada escenario demuestra que el EMS adapta correctamente la potencia inyectada según el estado inicial de la batería, el recurso energético disponible y el precio de la electricidad, confirmando que el sistema cumple sus objetivos de gestión eficiente y protección del almacenamiento.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado y evaluado un sistema de gestión de energía (EMS) basado en lógica difusa para una instalación de generación eléctrica a partir de la energía de las corrientes mareales. La implementación combinó un modelo eléctrico detallado con un modelo simplificado para facilitar simulaciones a largo plazo, validando así la estrategia de control propuesta.

Como trabajo futuro, se planea validar el EMS mediante pruebas en una instalación piloto perteneciente al proyecto “Experiencia piloto de aprovechamiento de corrientes mareales en las costas de Huelva (TidUtil)”, para confirmar la efectividad del control bajo condiciones reales. Además, se podrían explorar otras técnicas de control híbridas que combinen lógica difusa con métodos de aprendizaje automático para optimizar aún más el desempeño.

Agradecimientos

Este artículo es parte del Proyecto del Plan Complementario de Ciencias Marinas. Código de expediente PCM_00024, cofinanciado por la Junta de Andalucía y por la Unión Europea a través de los fondos NextGenerationEU del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. El autor Gabriel Gómez Ruiz disfruta de una ayuda FPU, número FPU21/00468, financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.



Referencias

- Ahmad, M., Hasan, G.M.J., Chy, H.M.M.B., Mahenoor, G.M.Md., 2018. Renewable Energy Potentials along the Bay of Bengal due to Tidal Water Level Variation. MATEC Web Conf. 147, 05008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814705008>
- Arcos-Aviles, D., Pascual, J., Marroyo, L., Sanchis, P., Guinjoan, F., 2018. Fuzzy Logic-Based Energy Management System Design for Residential Grid-Connected Microgrids. IEEE Trans. Smart Grid 9, 530–543. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2555245>
- Aristizábal, A.J., Hemán Ospina, D., Castañeda, M., Zapata, S., Banguero, E., 2020. Fuzzy logic energy management for a microgrid with storage battery. International Journal of Ambient Energy 41, 1183–1191. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1507931>
- Magro, N., Vázquez, J.R., Sánchez-Herrera, R., 2025. Design and Practical Implementation of Microgrid Inverter Control Using TMS320F28335 Microcontroller with Improvement in Electrical Power Quality. Electronics 14, 319. <https://doi.org/10.3390/electronics14020319>
- Prathyush, M., Jasmin, E.A., 2018. Fuzzy Logic Based Energy Management System Design for AC Microgrid, in: 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). Presented at the 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT), IEEE, Coimbatore, pp. 411–414. <https://doi.org/10.1109/ICICCT.2018.8473317>
- Sreelekshmi, R.S., Ashok, A., Nair, M.G., 2017. A fuzzy logic controller for energy management in a PV — battery based microgrid system, in: 2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy). Presented at the 2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), IEEE, Kollam, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/TAPENERGY.2017.8397282>