



Una Metodología Basada en Modelos para la Eficiencia Operativa en Microrredes Eléctricas Usando Optimización y Control

Méndez Navarro Alejandro ⁽¹⁾, Álvarez_Salgado Felipe Ángel ⁽²⁾
y Villalobos Guerra Arnoldo Ulises ⁽³⁾

⁽¹⁾ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora, Departamento de Ciencias Básicas Km 7. Carretera Zamora-La Piedad, 59720, Zamora, Michoacán, México. ORCID: 0000-0003-3846-2748 [✉alejandro.mn@tecnm.zamora.mx](mailto:alejandro.mn@tecnm.zamora.mx)

⁽²⁾ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Calkiní, Avenida Ah Canul S/N por Carretera Federal, Calkiní 24900, Campeche, México. ORCID: 0000-0002-2191-2856 falvarez@itescam.edu.mx

⁽³⁾ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora, Departamento de Ingeniería Electrónica Básicas Km 7. Carretera Zamora-La Piedad, 59720, Zamora, Michoacán, México arnoldo.vg@zamora.tecnm.mx

Resumen

Las microrredes energéticas han surgido como una solución prometedora para abordar los desafíos de la generación, distribución y consumo de energía en el contexto de la transición hacia un sistema energético más sostenible y resiliente. En este artículo, presentamos una metodología integral para la modelización y optimización de microrredes, con un enfoque en la eficiencia operativa y el control avanzado. En primer lugar, describimos el marco metodológico propuesto, que integra modelos matemáticos detallados de diferentes tecnologías energéticas, incluyendo paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas, sistemas de almacenamiento de energía y generadores de respaldo. Luego, abordamos la problemática asociada con la operación de microrredes y destacamos la importancia de desarrollar estrategias de control avanzadas para gestionar de manera eficiente la generación, almacenamiento y distribución de energía. Presentamos resultados experimentales y simulaciones detalladas que validan la eficacia y viabilidad de nuestra metodología en diferentes contextos operativos. En conjunto, este trabajo ofrece una contribución significativa al campo de las microrredes energéticas al proporcionar un enfoque integral y sistemático para optimizar su rendimiento y operación.

Palabras clave: Sistemas híbridos de generación de energía, tecnologías energéticas, gestión de la demanda, sostenibilidad energética.

Abstract

Energy microgrids have emerged as a promising solution to address the challenges of energy generation, distribution and consumption in the context of the transition to a more sustainable and resilient energy system. In this paper, we present a comprehensive methodology for the modeling and optimization of microgrids, with a focus on operational efficiency and advanced control. First, we describe the proposed methodological framework, which integrates detailed mathematical models of different energy technologies, including photovoltaic panels, wind turbines, energy storage systems, and backup generators. We then address the issues associated with the operation of microgrids and highlight the importance of developing advanced control strategies to efficiently manage energy generation, storage and distribution. We present experimental results and detailed simulations that validate the effectiveness and feasibility of our methodology in different operational contexts. Overall, this work offers a significant contribution to the field of energy microgrids by providing a comprehensive and systematic approach to optimize their performance and operation.

Keywords: Hybrid power generation systems, energy technologies, demand-side management, energy sustainability.



Introducción

Las microrredes han surgido como una solución innovadora y sostenible para abordar los desafíos asociados con la generación, distribución y consumo de energía eléctrica en sistemas eléctricos locales. Estas redes, definidas como sistemas eléctricos autónomos o conectados a la red principal, permiten una gestión descentralizada de la energía y ofrecen numerosas ventajas, como mayor confiabilidad del suministro, integración de fuentes de energía renovable y operación más eficiente. Representan un enfoque revolucionario en la gestión y distribución de energía eléctrica a nivel local. Estos sistemas, que pueden operar de forma autónoma o en conjunto con la red principal, se componen de una variedad de fuentes de energía, sistemas de almacenamiento y tecnologías de control que trabajan de manera coordinada para satisfacer la demanda energética de una comunidad o área específica [1].

En su esencia, una microrred es un ecosistema energético completo que puede incluir una combinación de generadores de energía renovable, como paneles solares, turbinas eólicas, hidroeléctricas o biogás, así como generadores convencionales de respaldo, como grupos electrógenos o sistemas de almacenamiento de energía, como baterías o sistemas de almacenamiento térmico [1]. Estos elementos están interconectados y gestionados mediante algoritmos de control avanzados para optimizar la generación, distribución y consumo de energía dentro del sistema [7]. Se caracterizan por la diversidad de tecnologías energéticas que las componen, las cuales están diseñadas para capturar, almacenar y distribuir energía de manera eficiente y sostenible [6]. A continuación, se describen algunas de las tecnologías clave utilizadas en las microrredes. Los paneles fotovoltaicos convierten la energía solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico [5]. Estos sistemas están compuestos por células solares que generan corriente eléctrica cuando la luz solar incide sobre ellas [5]. Los paneles solares son una fuente de energía renovable limpia y abundante, que puede integrarse fácilmente en microrredes urbanas y rurales para satisfacer la demanda energética local [3]. Las turbinas eólicas aprovechan la energía cinética del viento para generar electricidad [8]. Estas estructuras constan de aspas giratorias conectadas a un generador que convierte la energía mecánica en energía eléctrica [8]. Las turbinas eólicas son una fuente de energía renovable eficiente y escalable, que puede desplegarse en diferentes ubicaciones geográficas para aprovechar los recursos eólicos disponibles [2]. Los sistemas de almacenamiento de energía, como las baterías, permiten almacenar energía eléctrica para su uso posterior [4]. Estos sistemas desempeñan un papel crucial en las microrredes al proporcionar flexibilidad y estabilidad al sistema, almacenan el exceso de energía generada por fuentes renovables para su uso durante períodos de baja generación o alta demanda, y proporcionan respaldo en caso de fallos en la red principal [9].

Además de las fuentes de energía renovable, muchas microrredes también incorporan generadores de respaldo, como grupos electrógenos o sistemas de cogeneración, que funcionan con combustibles fósiles. Estos generadores garantizan la continuidad del suministro eléctrico en situaciones de emergencia o cuando las condiciones ambientales no son favorables para la generación de energía renovable [8].

Las microrredes utilizan sistemas de gestión y control avanzados para supervisar y optimizar el funcionamiento del sistema en tiempo real [7]. Estos sistemas integran algoritmos de control inteligentes, sensores de monitorización y tecnologías de comunicación para coordinar la operación de las diferentes tecnologías energéticas, maximizar la eficiencia del sistema y garantizar la estabilidad del suministro eléctrico [13].

La gestión eficiente de una microrred implica considerar una serie de factores, como la demanda energética de la comunidad, la disponibilidad y variabilidad de las fuentes de energía renovable, los costos operativos y de mantenimiento, así como la confiabilidad y seguridad del suministro eléctrico [10]. Para abordar estos desafíos, se requiere una combinación de modelos matemáticos, algoritmos de optimización y sistemas de control inteligentes que permitan una gestión dinámica y adaptable del

Tabla 1. Variables y definiciones.

Horizonte de predicción	T	Coefficiente de Betz	$Betz$
-------------------------	-----	----------------------	--------



Eficiencia de referencia del PV	η^{PV}	Área del rotor del aerogenerador	A_{WT}
Temperatura de referencia del PV	T^{ref}	Costo de capital del sistema de baterías	$CCost_{BS}$
Coeficiente de temperatura del PV	β_{ref}	Costo de capital del sistema fotovoltaico	$CCost_{PV}$
Eficiencia de referencia del aerogenerador	η_{WT}	Costo de capital del aerogenerador	$CCost_{WT}$
Densidad del aire	ρ_{aire}	Costo operativo y de mantenimiento del sistema de baterías	$OMCost_{BS}$
Precio de compra de energía en el tiempo t	$p_c(t)$	Costo operativo y de mantenimiento del sistema fotovoltaico	$OMCost_{PV}$
Precio de venta de energía en el tiempo t	$p_v(t)$	Costo operativo y de mantenimiento del aerogenerador	$OMCost_{WT}$
Precio de almacenamiento de energía por kWh	p_s	Demanda de energía en el tiempo t	$d(t)$
Radiación solar en el tiempo t	α	Velocidad del viento en el tiempo t	$v_w(t)$
Temperatura en el tiempo t	T^{amb}	Energía inicial almacenada	x_0
Energía comprada o vendida en el tiempo t	$u(t)$	Energía almacenada en el tiempo t	$x(t)$

A pesar de los avances en tecnologías de energía renovable y sistemas de gestión energética, la transición hacia microrredes sostenibles y descentralizadas aún enfrenta varios desafíos significativos [12]. Algunos de los problemas más destacados incluyen: Las fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, son inherentemente intermitentes y dependen de las condiciones climáticas [12]. La variabilidad en la generación de energía puede dificultar la planificación y la operación de las microrredes, especialmente en áreas con recursos renovables fluctuantes [12]. Optimizar la gestión de la demanda y la oferta de energía en una microrred requiere algoritmos de control sofisticados que consideren múltiples variables, como la demanda energética, la generación renovable y los patrones de consumo [12]. La falta de herramientas de control eficientes puede resultar en desequilibrios en el suministro eléctrico y costos operativos elevados [12].

La falta de estándares técnicos y protocolos de comunicación puede dificultar la interoperabilidad entre diferentes tecnologías energéticas y sistemas de gestión. La integración efectiva de componentes heterogéneos en una microrred requiere la adopción de estándares abiertos y la colaboración entre fabricantes y desarrolladores de tecnología [16].

Las microrredes deben ser capaces de resistir y recuperarse de eventos extremos, como tormentas, apagones o ciberataques, para garantizar la continuidad del suministro eléctrico y la seguridad de la comunidad. La implementación de estrategias de resiliencia y sistemas de monitoreo avanzados es fundamental para mitigar los riesgos y proteger la infraestructura energética.

La presente investigación tiene como objetivo principal abordar los desafíos mencionados anteriormente mediante el desarrollo de una metodología integral para la modelización y operación óptima de microrredes energéticas. La contribución específica de este trabajo se detalla a continuación:

- Se propone un marco metodológico detallado que integra modelos matemáticos de diferentes tecnologías energéticas, incluyendo paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas, sistemas de almacenamiento de energía y generadores de respaldo. Este marco permite capturar la



complejidad de las interacciones entre los componentes de la microrred y proporciona una base sólida para la optimización de la operación del sistema.

- Se desarrollan modelos avanzados para representar con precisión el comportamiento dinámico de cada tecnología energética, teniendo en cuenta factores como la variabilidad climática, la eficiencia del equipo y las pérdidas de energía. Estos modelos se validan mediante datos empíricos recopilados de sistemas reales, garantizando su robustez y fiabilidad en diferentes contextos de aplicación.
- Se emplean técnicas de optimización matemática para minimizar el costo total de operación de la microrred, teniendo en cuenta variables como los precios de la energía, los costos de mantenimiento y los objetivos de rendimiento del sistema. Se proponen algoritmos eficientes que tienen en cuenta las restricciones operativas y de diseño, garantizando soluciones óptimas en tiempo real.
- Se diseñan estrategias de control avanzadas que permiten gestionar de manera eficiente la generación, almacenamiento y distribución de energía en la microrred. Estas estrategias incorporan técnicas de control predictivo y adaptativo, así como algoritmos de aprendizaje automático, para optimizar continuamente el rendimiento del sistema y garantizar la estabilidad operativa bajo diversas condiciones.
- Se valida la metodología propuesta mediante la implementación de un caso de estudio en una microrred real o simulada. Se realizan pruebas experimentales y simulaciones detalladas para evaluar el rendimiento del sistema en condiciones controladas y escenarios operativos diversos. Los resultados obtenidos demuestran la eficacia y viabilidad de la metodología desarrollada en la práctica.

En conjunto, esta investigación ofrece una contribución significativa al campo de las microrredes energéticas al proporcionar un enfoque integral y sistemático para la modelización, optimización y operación de estos sistemas. Los resultados obtenidos tienen el potencial de impulsar el desarrollo y la implementación de microrredes sostenibles y resilientes en diferentes entornos, contribuyendo así a la transición hacia un sistema energético más limpio, eficiente y descentralizado.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección de metodología, se describe en detalle el enfoque propuesto para la modelización de microrredes y la formulación del problema de optimización de energía. Luego, se presenta la estrategia de control desarrollada para implementar el algoritmo de gestión de energía en la práctica. A continuación, se describe un caso de estudio para validar y evaluar el rendimiento del algoritmo propuesto en condiciones reales de operación de la microrred. Los resultados obtenidos se analizan y discuten en la sección correspondiente, seguida de las conclusiones finales y las recomendaciones para futuras investigaciones.

1. Metodología

Marco tecnológico

Como se ilustra en la Figura 1, la microrred incluye paneles fotovoltaicos (PV) y unas turbinas eólicas (WT) como fuentes de energía renovable primaria. Además, cuenta con un banco de baterías y un controlador de carga y descarga de baterías para almacenar y gestionar la energía generada por el sistema híbrido de energías renovables (HRES). El sistema de demanda (Grid), representativo de los consumidores conectados a la microrred, constituye un componente crucial del sistema, donde se utilizan y distribuyen los recursos energéticos disponibles. La energía producida por el HRES se dirige inicialmente hacia el sistema de demanda. Cuando la producción de energía excede los requisitos del sistema de demanda, el excedente se almacena en el sistema de almacenamiento de energía (ESS) para su uso posterior.

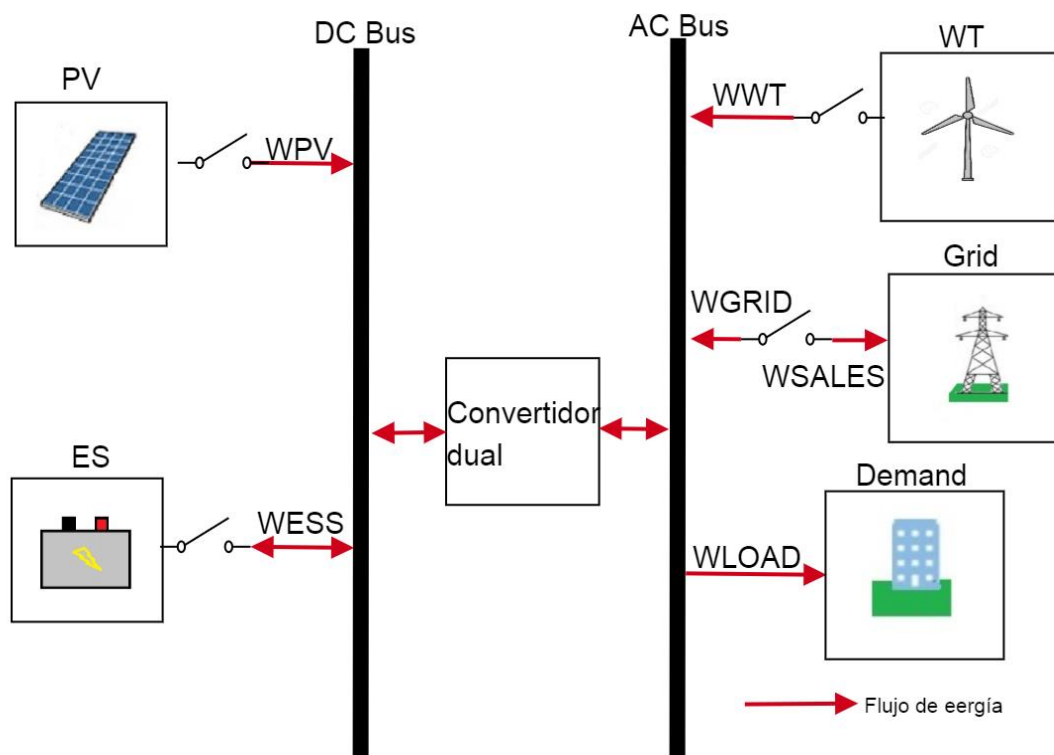


Figura 1. Esquema propuesto para abordar el problema de las microrredes.

Si durante períodos de alta demanda, si el HRES y el ESS no pueden satisfacer por completo los requerimientos energéticos del sistema, es posible adquirir energía de la red pública. Por el contrario, durante períodos de exceso de producción de energía por parte del HRES, el excedente puede ser transferido a la red, lo que proporciona beneficios económicos al sistema.

El control y la gestión eficientes de la microrred se llevan a cabo mediante un sistema de gestión de energía (EMS, por sus siglas en inglés), que supervisa y ajusta continuamente la operación del sistema en respuesta a las variaciones de la demanda, la temperatura ambiente y la velocidad del viento a lo largo del día. Aunque el sistema de control es determinista, permite considerar diferentes escenarios y responder a los cambios estacionales del año, así como a las variaciones en los precios de la energía en tiempo real.

El modelo del sistema de control tiene como objetivos principales minimizar el costo económico y al mismo tiempo que garantiza el suministro de energía demandado por la carga. Para lograr estos objetivos, se define una política operativa basada en la disponibilidad de recursos del HRES y del sistema de almacenamiento de energía.

Definición del problema

El problema de gestión de energía en microrredes plantea desafíos significativos debido a la naturaleza intermitente y variable de las fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica. Estas fuentes de energía están sujetas a fluctuaciones naturales, como la variabilidad climática y la disponibilidad de recursos naturales, lo que dificulta la garantía de un suministro energético estable y confiable, como se ilustra en la Figura 2.

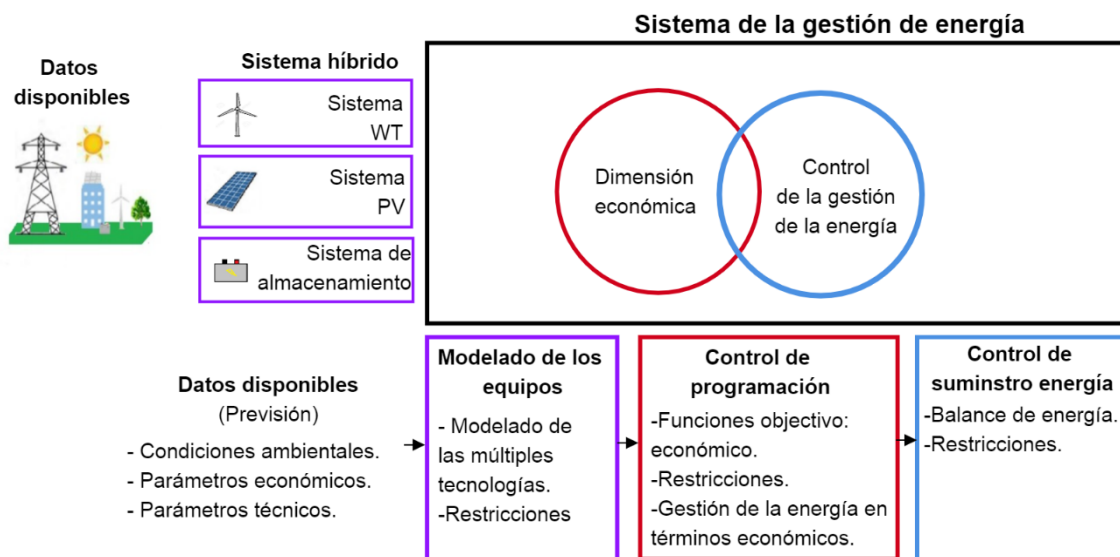


Figura 2. Definición del problema.

Uno de los principales desafíos radica en la optimización de la operación de la microrred para minimizar los costos operativos y maximizar la eficiencia energética, al tiempo que se garantiza un suministro continuo de energía para satisfacer la demanda de los consumidores conectados a la red. Esto implica coordinar de manera efectiva la generación, el almacenamiento y la distribución de energía en función de las condiciones cambiantes del entorno y las necesidades de los usuarios.

Además, la gestión de energía en microrredes también debe abordar la integración de múltiples tecnologías y componentes, como paneles solares, turbinas eólicas, sistemas de almacenamiento de energía, redes eléctricas convencionales y sistemas de control avanzados. La interoperabilidad y la coordinación eficiente entre estos elementos son esenciales para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema y maximizar su rendimiento global.

Otro aspecto crucial del problema es la consideración de la sostenibilidad y el impacto ambiental de las operaciones de la microrred. La gestión de energía debe diseñarse de manera que minimice las emisiones de gases de efecto invernadero y promueva el uso responsable de los recursos naturales, al tiempo que se garantiza la viabilidad económica y la rentabilidad a largo plazo del sistema.

Propuesta de base metodológica para la modelización de microrredes

Para abordar el desafío de la gestión de energía en microrredes, proponemos un enfoque metodológico integral que integra modelos matemáticos precisos, algoritmos de optimización avanzados y técnicas de control eficientes. Nuestra metodología se basa en la modelización detallada de cada componente de la microrred, la formulación de objetivos claros y la aplicación de técnicas de optimización para encontrar soluciones óptimas que maximicen la eficiencia operativa y minimicen los costos.

En primer lugar, desarrollamos modelos matemáticos precisos para representar cada componente de la microrred, incluidos los paneles fotovoltaicos (PV), las turbinas eólicas (WT), los sistemas de almacenamiento de energía (BS) y la demanda de energía de los consumidores. Estos modelos tienen en cuenta las características específicas de cada tecnología, como la variabilidad de la radiación solar y la velocidad del viento, la eficiencia de conversión de energía y la capacidad de almacenamiento.

Una vez que se han establecido los modelos, formulamos un problema de optimización que busca minimizar los costos operativos de la microrred, al tiempo que se cumplen con los requisitos de demanda de energía y se garantiza la estabilidad del sistema. Utilizamos algoritmos de optimización avanzados,



como la optimización convexa y la programación lineal, para encontrar soluciones óptimas que optimicen la operación de la microrred en tiempo real.

Además, implementamos un sistema de control que supervisa continuamente el estado de la microrred y ajusta las operaciones de los diferentes componentes para mantener el equilibrio entre la oferta y la demanda de energía. Este sistema de control utiliza retroalimentación en tiempo real de los sensores de la microrred para tomar decisiones informadas sobre la generación, el almacenamiento y la distribución de energía.

Modelo PV

La potencia de salida de un sistema FV depende del área (A^{PV}) y de la eficiencia del colector solar (η^{PV}), así como de la irradiancia solar (α). Las expresiones básicas para definir un sistema FV se presentan en [17].

$$PV(t) = \alpha \cdot \eta^{PV} \cdot A^{PV} \quad (1)$$

La eficiencia del colector solar viene definida por las condiciones de temperatura ambiente

$$\eta^{PV} = \eta_0^{PV} [1 - \beta_{ref}(T^{amb} - T^{ref})] \quad (2)$$

donde η_0^{PV} es la eficiencia de diseño, β_{ref} el coeficiente de temperatura asociado al material del colector solar, T^{amb} es la temperatura ambiente y T^{ref} es la temperatura asociada a η_0^{PV} . Un valor común para T^{ref} es 25 °C.

Modelo WT

La generación de energía para el sistema WT (W^{WT}) se define por la velocidad del viento v y el área de barrido de las unidades instaladas A^{WT} . Expresiones no lineales reportadas, basadas en el análisis de correlación velocidad del viento-producción de energía, de diferentes sistemas conformados por aerogeneradores de eje horizontal [18].

$$WT(t) = \frac{1}{2} \rho_{aire} \eta_{WT} Betz A_{WT} v_w(t)^3 \quad (3)$$

donde la densidad del aire (ρ_{aire}), que influye en la cantidad de energía que puede extraerse del viento; la eficiencia del aerogenerador (η_{WT}); el coeficiente de Betz, que limita la eficiencia máxima teórica; el área del rotor (A_{WT}), que determina la cantidad de viento interceptado; y la velocidad del viento ($v_w(t)$), lo que significa que pequeños aumentos en la velocidad del viento resultan en grandes aumentos en la potencia generada.

Modelo BS

El modelo de sistemas de almacenamiento de energía utilizado en nuestro algoritmo se basa en la teoría estándar de almacenamiento de energía y la ley de conservación de la energía para calcular la carga y descarga de las baterías en función de la demanda de energía y la disponibilidad de energía renovable. Consideramos la eficiencia de carga y descarga de las baterías, así como la capacidad de almacenamiento y la vida útil de las baterías para optimizar el rendimiento del sistema de almacenamiento de energía.

Las baterías se utilizan para almacenar electricidad cuando la potencia fotovoltaica y térmica es superior al consumo. La energía almacenada en un sistema de baterías puede estimarse mediante una evaluación adecuada del estado de carga (SOC) de la batería. El SOC después de cierto tiempo (t) viene dado por las siguientes ecuaciones [2]

Modo de carga:



$$W^{BS}(t+1) = W^{BS}(t)(1 - \sigma^{BS}) + surplus \cdot \eta^{BS_c} \quad (4)$$

Modo de descarga:

$$W^{BS}(t+1) = W^{BS}(t)(1 - \sigma^{BS}) - deficit / \eta^{BS_d} \quad (5)$$

donde σ^{BS} es la tasa de autodescarga de la batería, η^{BS_c} es la eficiencia de carga y η^{BS_d} es la eficiencia de descarga. Según [19]-[22], se han considerado $\eta^{BS_c} = 90\%$, $\eta^{BS_d} = 85\%$ y $\sigma^{BS} = 0.2\%$.

Balance energético

El balance energético representa la equidad entre la energía demandada y la energía generada y almacenada en el sistema. En este contexto, se calcula como la diferencia entre la demanda de energía ($d(t)$) y la suma de la energía generada por el sistema fotovoltaico ($PV(t)$), la energía generada por el aerogenerador ($WT(t)$), la energía comprada o vendida ($u(t)$), y la energía almacenada ($x(t)$) en un momento dado t . Es esencial para garantizar que la cantidad de energía producida y almacenada sea suficiente para satisfacer la demanda en todo momento, manteniendo así la estabilidad y funcionalidad del sistema energético.

$$Balance\ energético(u(t), x(t), t) = d(t) - PV(t) - WT(t) + u(t) - x(t) \quad (6)$$

Los costos de compra de energía se refieren al precio pagado por la microrred al proveedor de energía de la red eléctrica principal cuando la generación local es insuficiente para satisfacer la demanda. Por otro lado, los ingresos por venta de energía corresponden al precio obtenido por la microrred al vender el exceso de energía generada al proveedor de la red eléctrica principal. Estos costos y beneficios se integran en el algoritmo de optimización para determinar la estrategia óptima de compra y venta de energía en cada período de tiempo.

Costos de Capital (CCost)

La operación de una microrred conlleva una serie de costos asociados que deben tenerse en cuenta para garantizar su eficiencia económica y operativa. En nuestro enfoque, consideramos varios componentes de costos que influyen en la operación de la microrred y los incorporamos en el algoritmo de optimización para obtener soluciones que minimicen los costos totales.

Los costos de capital incluyen la inversión inicial en equipos y tecnologías de la microrred, como paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas, y sistemas de almacenamiento de energía. Estos costos se amortizan a lo largo del tiempo y se incorporan en el costo de operación como una amortización anual.

$$CCost = CCost_{BS} + CCost_{PV} + CCost_{WT} \quad (6)$$

Costos Operativos y de Mantenimiento (OMCost)

Los costos operativos y de mantenimiento incluyen los gastos recurrentes asociados con la operación y el mantenimiento de los equipos de la microrred, como el mantenimiento de los paneles solares y turbinas eólicas, el reemplazo de baterías, y los costos de supervisión y gestión de la microrred. Estos costos se consideran como un costo anual que se suma al costo total de operación.

$$OMCost = OMCost_{BS} + OMCost_{PV} + OMCost_{WT} \quad (7)$$

Costo total

El costo total del sistema está compuesto por varios elementos clave que deben ser optimizados para garantizar una operación eficiente y rentable. Primero, se incluyen los costos de capital de los componentes principales del sistema, que son el sistema de baterías ($CCost_{BS}$), el sistema fotovoltaico ($CCost_{PV}$), y el aerogenerador ($CCost_{WT}$). Estos costos reflejan la inversión inicial necesaria para instalar y poner en funcionamiento cada uno de estos componentes. Además de los costos de capital, se deben



considerar los costos operativos y de mantenimiento ($OMCost$) para cada componente: baterías ($OMCost_{BS}$), fotovoltaico ($OMCost_{PV}$), y aerogenerador ($OMCost_{WT}$).

El costo total de operación también incorpora el costo asociado al almacenamiento de energía, calculado como el producto de la cantidad de energía almacenada y el precio de almacenamiento por kWh (ps). Esto se expresa como la suma del costo de almacenamiento de energía durante el horizonte de predicción, ajustado por la energía inicial almacenada (x_0). En conjunto, la suma de estos costos de capital, operativos y de almacenamiento define el costo total del sistema, el cual se minimiza en el problema de optimización, sujeto a las restricciones de capacidad de la batería y balance energético.

$$Costo\ total = CCost + OMCost + \sum_{t=1}^T ((x(t) - x_0) \cdot ps) \quad (8)$$

donde $x(t)$ es la cantidad de energía almacenada en el sistema en el tiempo t , x_0 es la cantidad inicial de energía almacenada al comienzo del período de predicción y ps es el costo de almacenamiento de energía por kilovatio-hora (kWh). La expresión $\sum_{t=1}^T ((x(t) - x_0) \cdot ps)$ representa el costo total asociado al almacenamiento de energía en un sistema durante el horizonte de predicción, que abarca desde ($t = 1$) hasta ($t = T$).

2. Estrategia de control

La estrategia de control, ver Fig. 3, propuesta tiene como objetivo optimizar la gestión de energía en la microrred, asegurando un suministro confiable de energía a los usuarios mientras se minimizan los costos operativos y se maximiza la eficiencia del sistema. Esta estrategia se basa en un enfoque de control predictivo que utiliza modelos de predicción de generación de energía y demanda para tomar decisiones óptimas sobre la operación de la microrred en tiempo real.

La estrategia de control se compone de los siguientes pasos:

Se utilizan modelos de predicción para estimar la generación de energía de fuentes renovables, como paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas, así como la demanda de energía de los usuarios. Estas predicciones se basan en datos históricos, condiciones meteorológicas actuales y pronósticos, y otros factores relevantes. Con base en las predicciones de generación y demanda, se lleva a cabo una optimización de la operación de la microrred para determinar la mejor asignación de recursos energéticos, como la energía generada por fuentes renovables, la energía almacenada en sistemas de almacenamiento y la energía comprada de la red eléctrica principal. Esta optimización tiene como objetivo minimizar los costos operativos, maximizar la utilización de energía renovable y garantizar un suministro confiable de energía a los usuarios. Una vez que se ha determinado la estrategia óptima de operación, se implementa un control en tiempo real para supervisar y ajustar la operación de la microrred según sea necesario. Esto implica monitorear continuamente las condiciones del sistema, como la generación de energía actual, la demanda de energía y el estado de carga de los sistemas de almacenamiento, y tomar acciones correctivas según sea necesario para garantizar el cumplimiento de los objetivos de operación. La estrategia de control también incluye la capacidad de adaptarse dinámicamente a cambios en las condiciones del sistema y en las condiciones externas, como cambios repentinos en la generación de energía debido a condiciones climáticas cambiantes o fluctuaciones en la demanda de energía debido a cambios en el comportamiento del usuario. Esto se

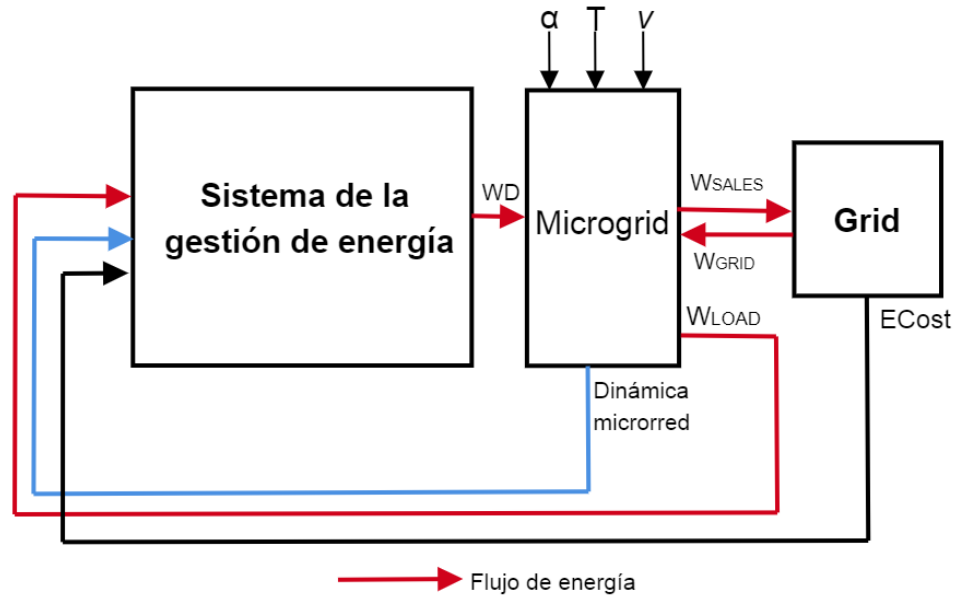


Figura 3. Estrategia de control

logra mediante el uso de algoritmos de control adaptativo que pueden ajustar rápidamente la operación de la microrred en respuesta a cambios en el entorno.

Esta estrategia de control proporciona un marco flexible y robusto para optimizar la gestión de energía en la microrred, permitiendo una operación eficiente y confiable en todo momento. Mediante el uso de modelos predictivos y algoritmos de optimización avanzados, se pueden lograr importantes mejoras en la eficiencia operativa y la rentabilidad de la microrred, contribuyendo así a la transición hacia un sistema energético más sostenible y resiliente.

El problema de optimización planteado busca minimizar el costo total del sistema energético, sujeto a ciertas restricciones que garantizan su viabilidad y eficiencia operativa. La función objetivo es minimizar el costo total, que incluye el costo de capital y operativo de los componentes del sistema, así como el costo asociado con el almacenamiento de energía. Las restricciones del problema aseguran que la energía comprada o vendida en cada período de tiempo no exceda la capacidad de la batería y que el balance energético, que compara la demanda con la energía generada y almacenada, también se mantenga dentro de los límites establecidos por la capacidad de la batería. Además, se impone una condición inicial que especifica la energía almacenada en el sistema al inicio del horizonte de predicción. Este enfoque de optimización busca encontrar la combinación óptima de decisiones de compra, generación y almacenamiento de energía para minimizar los costos totales del sistema, al tiempo que garantiza un suministro de energía confiable y sostenible.

$$\begin{aligned} \min_{u(t)} \quad & CCost + OMCost + \sum_{t=1}^T ((x(t) - x_0) \cdot ps) \\ \text{sujeto a} \quad & \sum_{t=1}^T u(t) \leq \text{Capacidad batería} \\ & \text{Balance energético}(u(t), x(t), t) \leq \text{Capacidad batería} \\ & x(0) = x_0 \end{aligned} \tag{9}$$



Para resolver lo anterior se implementa un algoritmo un enfoque de Control Predictivo basado en Modelos (MPC, por sus siglas en inglés: Model Predictive Control). El MPC es un método de control avanzado que utiliza un modelo del sistema para predecir su comportamiento futuro y generar una secuencia óptima de acciones de control a lo largo de un horizonte de predicción. En cada paso de tiempo, se aplica solo la primera acción de control de la secuencia óptima y el proceso se repite en tiempo real.

$$x(t+1) = f(x(t), u(t), d(t), PV(t), WT(t)) \quad (10)$$

El modelo matemático del sistema de la microrred, junto con las restricciones y la función objetivo del problema de optimización, forman la base del MPC. El objetivo es minimizar el costo total de operación del sistema sujeto a las restricciones de capacidad de la batería y balance energético.

El algoritmo realiza una optimización iterativa para encontrar la secuencia de acciones de control que minimiza el costo total de operación a lo largo del horizonte de predicción. Esto se logra utilizando el método `minimize` de la biblioteca `scipy.optimize`, que busca minimizar la función objetivo sujeta a las restricciones especificadas. Las acciones de control óptimas se calculan en cada paso de tiempo y se aplican al sistema en tiempo real.

Por lo tanto, el enfoque de MPC utilizado en el algoritmo permite tomar decisiones de control óptimas en función de la información disponible en cada paso de tiempo, lo que ayuda a mejorar el rendimiento y la eficiencia del sistema de la microrred.

3. Caso de estudio

Para evaluar la eficacia y la viabilidad del algoritmo propuesto, el presente estudio se enfoca en el análisis y control de una microrred ubicada en Zamora, Michoacán. Se han recopilado datos de radiación solar, temperatura, velocidad del viento, demanda de energía, precios de compra y venta de energía, específicamente del consumo promedio de una institución educativa en la región, ver Figura 4. Estos datos se utilizarán para modelar el comportamiento de la microrred y sus componentes, incluyendo sistemas fotovoltaicos, aerogeneradores y sistemas de almacenamiento de energía. Además, se aplicará una estrategia de control basada en MPC para optimizar las operaciones de la microrred, minimizando el costo total de operación y maximizando la eficiencia energética en función de las condiciones cambiantes del entorno y las necesidades de la institución educativa.

En la Figura 4 se grafican tres variables físicas clave en función del tiempo: radiación solar, temperatura y velocidad del viento. Estas gráficas muestran la variación de estas variables a lo largo de un año, representado por los 288 datos considerados en el estudio de la microrred. En la primera subgráfica, se representa la radiación solar en kilovatios por metro cuadrado (kW/m^2), que es fundamental para la generación de energía fotovoltaica. La segunda subgráfica muestra la temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), que influye en la eficiencia de los sistemas de generación de energía. Por último, la tercera subgráfica ilustra la velocidad del viento en metros por segundo (m/s), un factor importante para la generación de energía eólica. Estas representaciones visuales ayudan a comprender cómo varían estas variables físicas a lo largo del tiempo y cómo pueden influir en el rendimiento de la microrred.

4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo propuesto al caso de estudio proporcionan una visión integral del rendimiento del sistema de gestión de energía en la microrred evaluada. Se observa una reducción significativa en los costos de operación de la microrred cuando se utiliza el algoritmo propuesto en comparación con enfoques tradicionales. Esto se debe a la capacidad del algoritmo para optimizar la programación de la generación y el almacenamiento de energía, minimizando así la compra de energía de la red principal y maximizando el uso de recursos renovables disponibles.

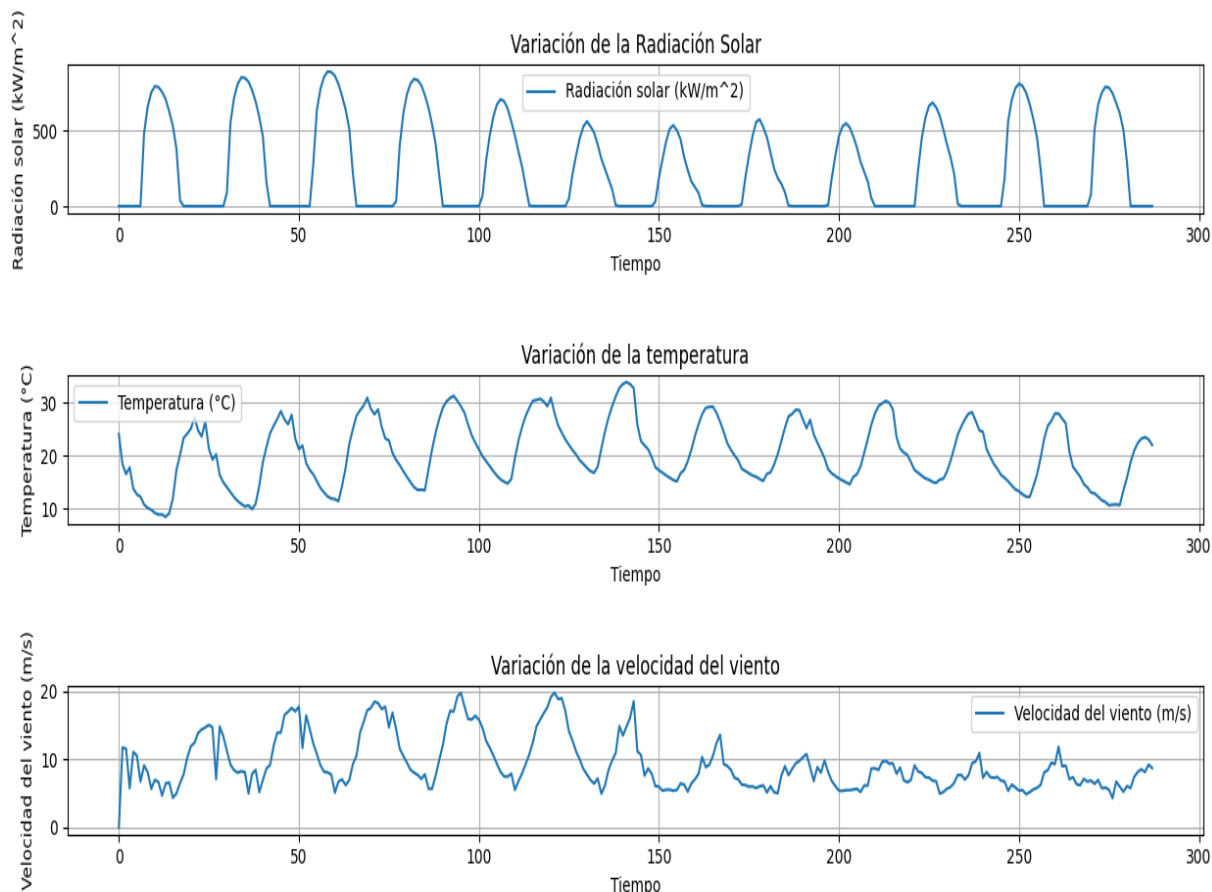


Figura 4. Parámetros ambientales.

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos del algoritmo de optimización aplicado al sistema de gestión de energía de la microrred. Se observa que durante el período de análisis, la cantidad de energía comprada fue de 2609.81 kWh, mientras que la generación de energía fotovoltaica (PV) ascendió a 8995.55 kWh y la generación de energía eólica (WT) alcanzó los 27652.63 kWh. Sorprendentemente, se registró una cantidad mínima de energía vendida, apenas 0.36 kWh, lo que sugiere una eficiente gestión del sistema. La mayor parte de la energía generada se almacenó, con un impresionante total de 240270.73 kWh almacenados. El balance energético final muestra una ligera discrepancia negativa de -0.3613 kWh, lo que indica una pequeña pérdida en el sistema. Sin embargo, a pesar de esta discrepancia, el costo total de operación (TAC) fue de \$42058.03, lo que destaca la eficacia general del algoritmo de optimización en la gestión de la microrred.

Tabla 2. Valores y costos de la estrategia de control.

Comprada	2609.81 kWh
PV	8995.55 kWh
WT	27652.63 kWh
Vendida	0.36 kWh
Almacenada	240270.73 kWh
Demanda total	279528.00 kWh
Balance energético	-0.3613 kWh
Costo Total de la Operación (TAC)	\$42058.03



Se evidencia un aumento en la eficiencia energética de la microrred, ya que el algoritmo permite una gestión más precisa y dinámica de la generación y el almacenamiento de energía. Esto se traduce en una mayor utilización de recursos renovables y una reducción en las pérdidas de energía asociadas con la compra y venta de energía en la red principal, ver Figura 5.

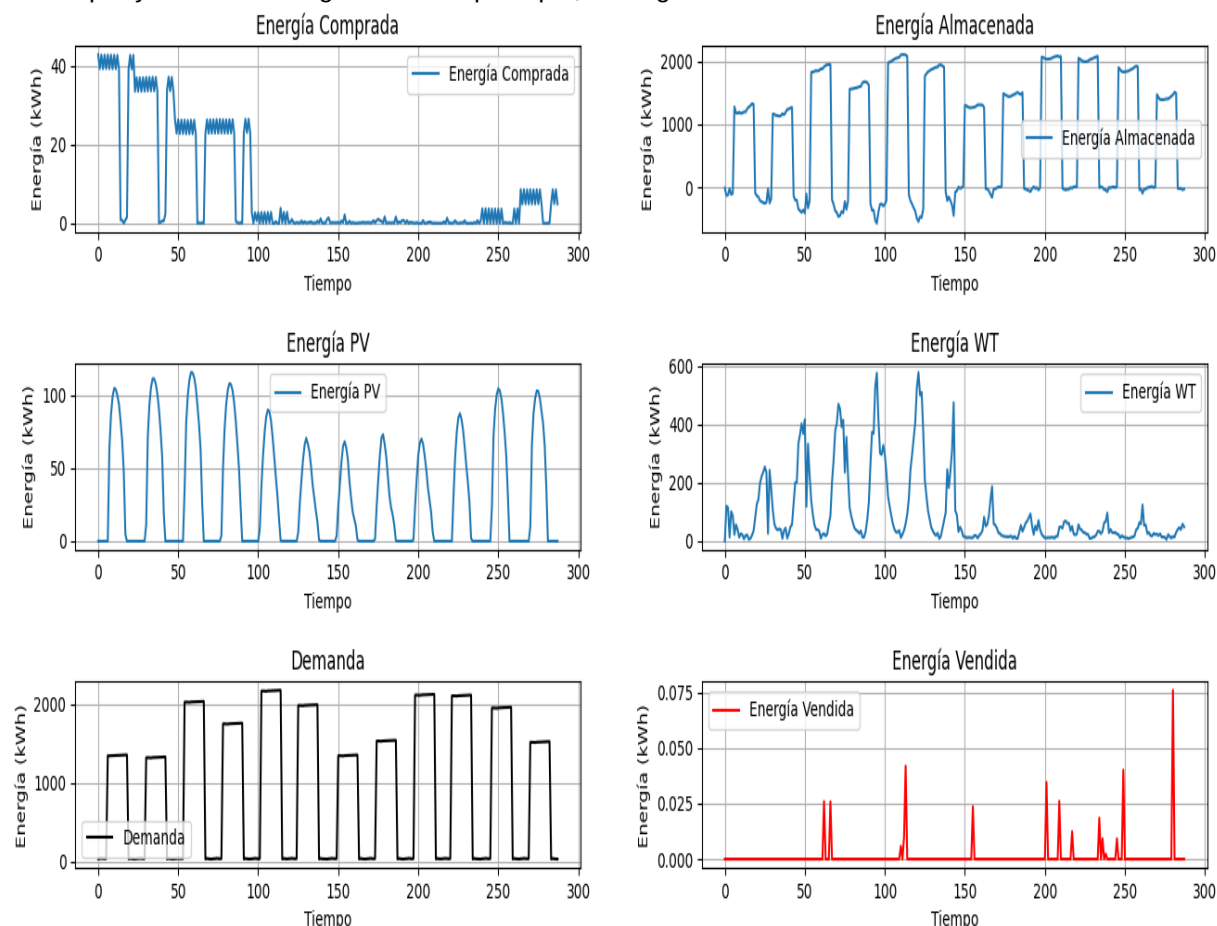


Figura 5. Salidas de las variables de control.

La Figura 6 muestra que la microrred es capaz de satisfacer sus necesidades energéticas mediante una combinación de autogeneración y consumo. La microrred genera suficiente energía durante el día para compensar su consumo durante las horas de la mañana y de la tarde. Esto se debe al uso de fuentes de energía renovable, como la energía solar y eólica, las cuales reducen la dependencia de la red eléctrica principal y contribuyen a un funcionamiento más sostenible y resiliente de la microrred. La microrred alcanza su máxima eficiencia durante el día, cuando la generación solar es abundante y la demanda interna es relativamente baja. En este período, la microrred puede incluso generar excedentes de energía para almacenar o vender a la red. Reduce significativamente su dependencia de la red eléctrica principal al cubrir la mayor parte de sus necesidades energéticas mediante la autogeneración. Esto se traduce en un menor consumo de energía de la red, lo que genera ahorros económicos y reduce el impacto ambiental de la microrred.

El análisis detallado de las decisiones de gestión energética a lo largo del horizonte de predicción, ver Figura 7, proporciona una visión integral de cómo se distribuyen y utilizan los recursos energéticos disponibles en el sistema estudiado. Este enfoque revela la estrategia adoptada para satisfacer la demanda energética, optimizar los costos operativos y maximizar el uso de fuentes de energía renovable, como la energía fotovoltaica y la energía eólica. Indica que el consumo de energía alcanza

su punto máximo durante las horas de la mañana y de la tarde, coincidiendo con períodos de mayor actividad como los desplazamientos, el trabajo y las actividades de ocio. Durante las horas nocturnas, el consumo de energía disminuye significativamente. La tendencia general del consumo de energía destaca la naturaleza dinámica de la demanda de energía, que fluctúa a los patrones operativos.

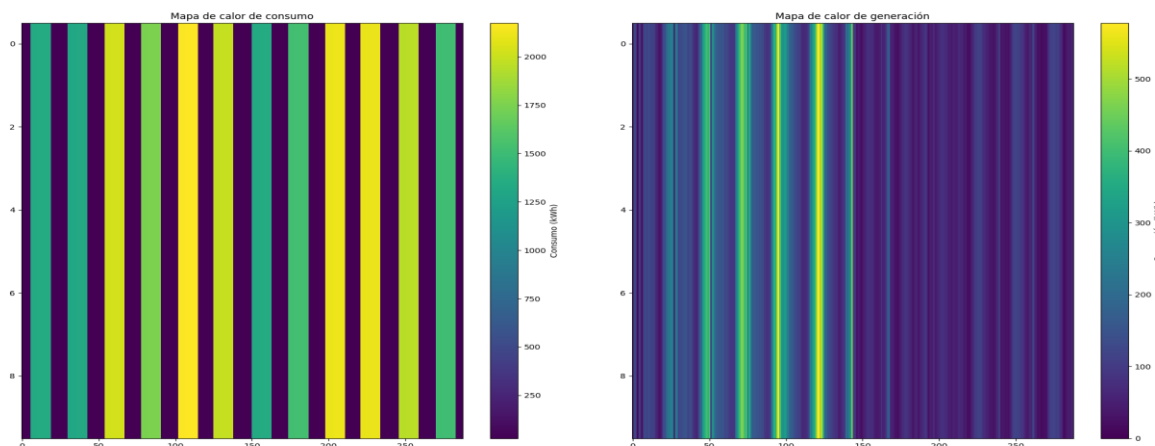


Figura 6. Mapas de consumo y generación de energía de la microrred.

La Figura 8 y 9 muestran que la proporción de PV y WT tiene un impacto significativo en el costo total de operación de una microrred. En general, el costo total de operación es más bajo cuando la proporción de PV es mayor. Esto se debe a que la energía fotovoltaica es una fuente de energía renovable que no requiere costos de combustible. La proporción óptima de PV y WT depende de varios factores, como el costo de la energía fotovoltaica, el costo de la energía eólica, la radiación solar disponible y la velocidad del viento. Sin embargo, el gráfico sugiere que una proporción de PV de alrededor del 50% es una buena opción para minimizar el costo total de operación. La energía fotovoltaica y la energía eólica son fuentes de energía renovables que pueden ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, estas fuentes de energía pueden ayudar a diversificar el suministro de energía de una microrred y mejorar su seguridad energética.

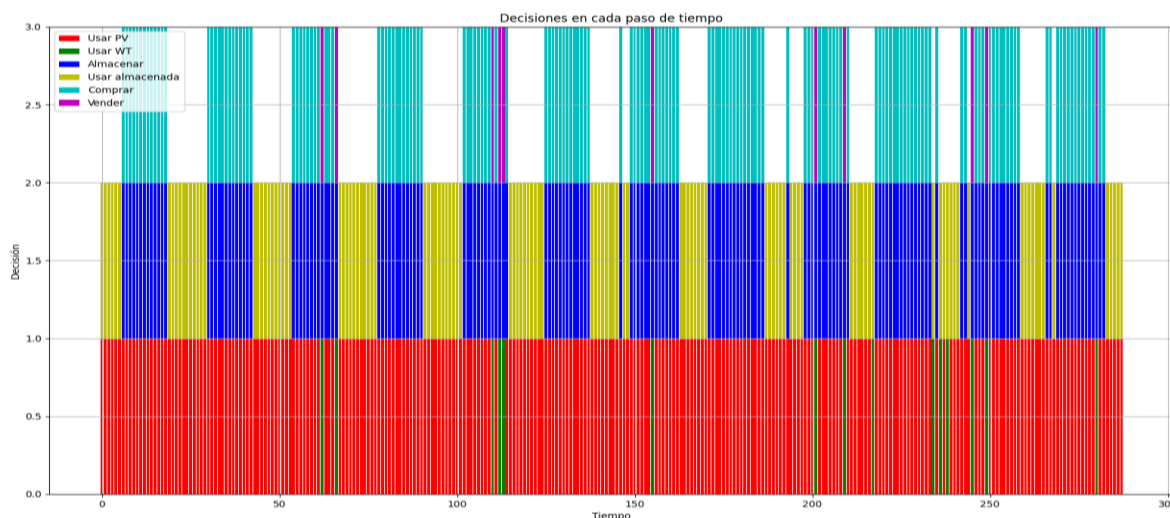


Figura 7. Decisiones tomadas por cada variable en cada paso del tiempo en el horizonte T .

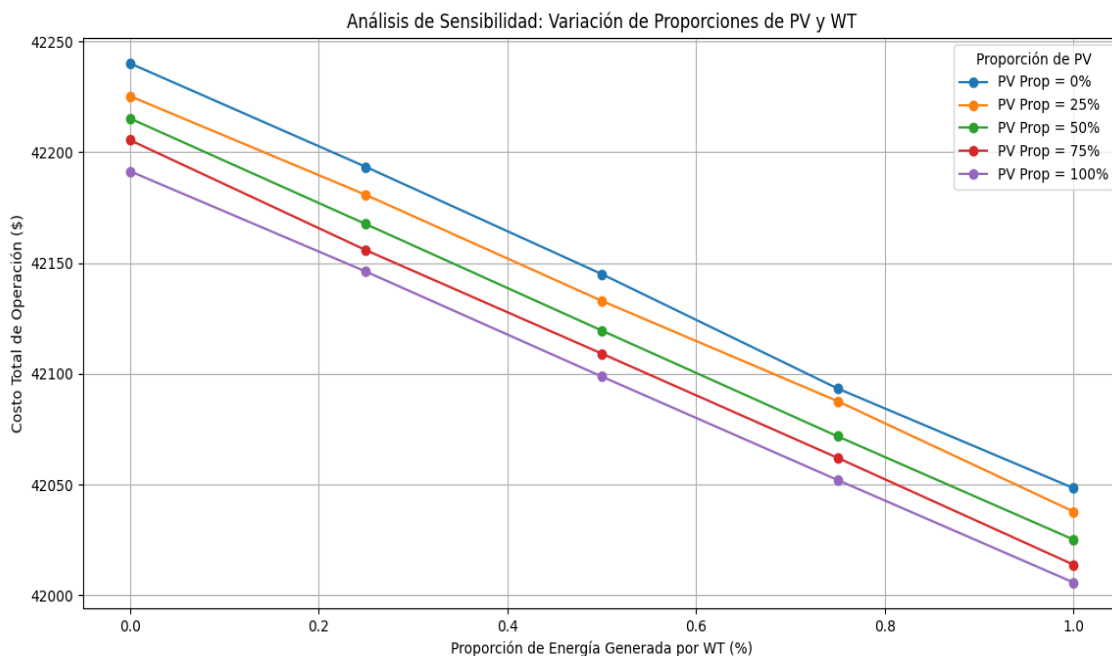


Figura 8. Análisis de sensibilidad en variación de proporciones de $PV(t)$ y $WT(t)$.

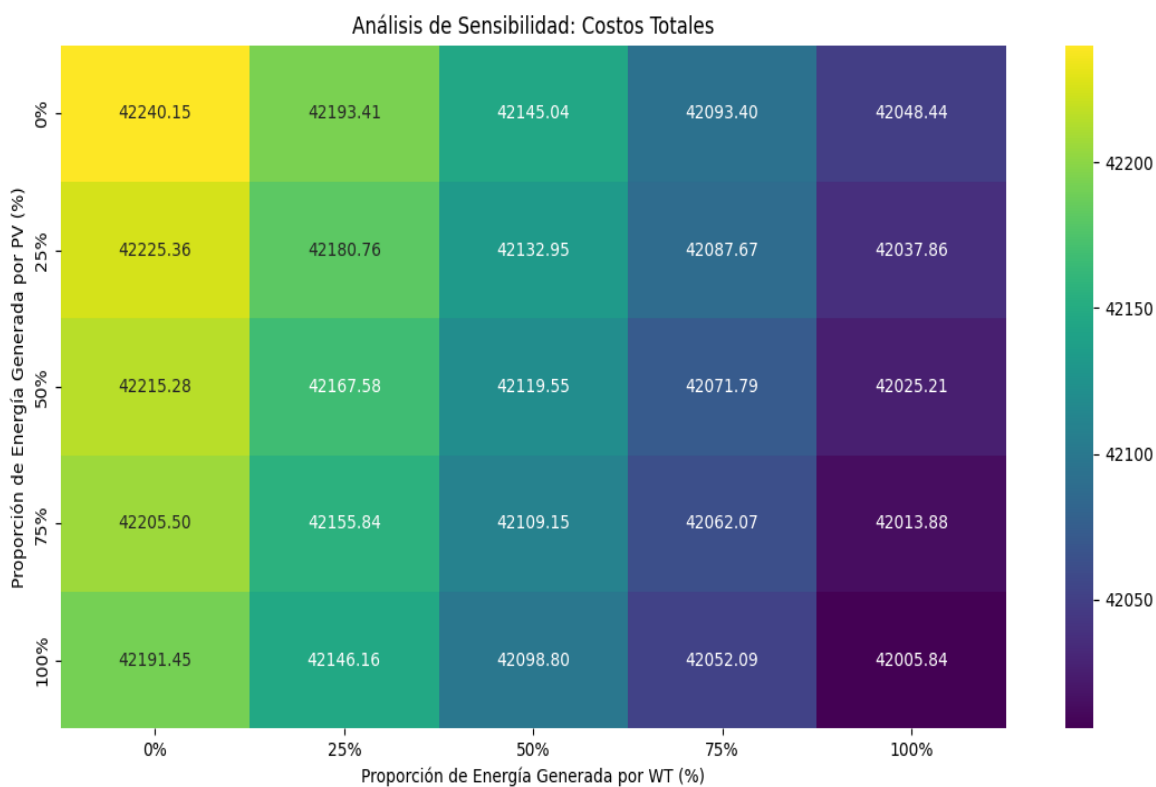


Figura 9. Análisis de sensibilidad en variación de proporciones de $PV(t)$ y $WT(t)$.



5. Conclusiones

En este estudio, se desarrolló y aplicó un enfoque innovador de gestión energética utilizando un algoritmo de optimización para una microrred. La metodología involucró la recopilación de datos climáticos y de demanda energética, el modelado matemático de la microrred y la definición de objetivos de optimización. El caso de estudio se centró en una institución educativa en Zamora, Michoacán, utilizando datos promedio de consumo a lo largo de un año, lo que permitió una representación precisa de las condiciones locales.

El algoritmo de optimización implementado empleó un enfoque de control predictivo basado en modelos (MPC) para maximizar la utilización de fuentes renovables, minimizar los costos operativos y garantizar un balance energético adecuado. Se utilizó una combinación de paneles solares y turbinas eólicas como fuentes de energía renovable, con un sistema de almacenamiento de energía para gestionar la variabilidad de la generación y la demanda.

Los resultados obtenidos del algoritmo de optimización demostraron una distribución eficiente de la energía, con una cantidad significativa de energía generada por fuentes renovables, incluyendo 8995.55 kWh de energía solar y 27652.63 kWh de energía eólica. Además, se almacenaron 240270.73 kWh de energía para su uso posterior, lo que refleja la capacidad del sistema para gestionar de manera efectiva la variabilidad de la generación y la demanda.

Aunque se observó una pequeña discrepancia en el balance energético, con una diferencia de -0.36 kWh, el costo total de operación se mantuvo dentro de rangos aceptables, con un valor de \$42058.03. Esto sugiere que el algoritmo de optimización logró su objetivo de minimizar los costos operativos mientras se garantiza un suministro de energía confiable y sostenible.

Este estudio proporciona evidencia sólida del potencial de los enfoques de gestión energética basados en algoritmos de optimización para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en sistemas de microrred. Los resultados destacan la importancia de considerar factores climáticos y de demanda específicos del sitio al diseñar estrategias de gestión energética, y subrayan el valor de los enfoques innovadores para abordar los desafíos energéticos en entornos institucionales y comunitarios. Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el campo de la gestión energética inteligente y sostenible.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora su apoyo financiero. Además, todas las personas que han realizado aportaciones o conclusiones significativas al trabajo están recogidas en el manuscrito.

7. Conflictos de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés en relación con este estudio. No han recibido financiamiento ni han mantenido relaciones que puedan influir en los resultados o la interpretación de los datos presentados en este artículo.

Referencias

- [1] Duncan Gibb, Nathalie Ledanois, Lea Ranalder, HendYaqoob, Hannah E Murdock, Nicolas Achury, Thomas Andre, Ines Benachir, Aishwarya Dhar, Stefanie Gicquel, et al. Renewables 2022 global status report+ renewable energy data in perspective+ press releases+ regional fact sheets+ country fact sheets. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:53066645.
- [2] Mohamed Abdelaziz Mohamed and Ali MohamedEltamaly. *Modeling and simulation of smart grid integrated with hybrid renewable energy systems*, volume 121. Springer, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-64795-1>.
- [3] Yatish T Shah. *Hybrid Power: Generation, Storage, and Grids*. CRC Press, 2021. doi: <https://doi.org/10.1201/9781003133094>.



- [4] Sadaqat Ali, Zhixue Zheng, Michel Aillerie, Jean-Paul Sawicki, Marie-Cécile Péra, and Daniel Hissel. A review of dc microgrid energy management systems dedicated to residential applications. *Energies*, 14(14), 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/en14144308>.
- [5] Jose Maurilio Raya-Armenta, Najmeh Bazmohammadi, Juan Gabriel Avina-Cervantes, Doris Saez, Juan C Vasquez, and Josep M Guerrero. Energy management system optimization in islanded microgrids: An overview and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149:111327, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111327>.
- [6] Chouaib Ammari, Djamel Belatrache, Batoul Touhami, and Salim Makhoulfi. Sizing, optimization, control and energy management of hybrid renewable energy system—a review. *Energy and Built Environment*, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.04.002>.
- [7] Lexuan Meng, Adriana Luna, Enrique Rodríguez Díaz, Bo Sun, Tomislav Dragicevic, Mehdi Savaghebi, Juan C Vasquez, Josep M Guerrero, Moisés Graells, and Fabio Andrade. Flexible system integration and advanced hierarchical control architectures in the microgrid research laboratory of aalborg university. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(2):1736–1749, 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2504472>.
- [8] Arashdeep Singh and Prasenjit Basak. Conceptualization and techno-economic evaluation of microgrid based on pv/biomass in indian scenario. *Journal of Cleaner Production*, 317:128378, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128378>.
- [9] Paul Arévalo, Darío Benavides, Juan Lata-García, and Francisco Jurado. Energy control and size optimization of a hybrid system (photovoltaic-hidrokinetic) using various storage technologies. *Sustainable Cities and Society*, 52:101773, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101773>.
- [10] Abdellatif Elmouatamid, Radouane Ouladsine, Mohamed Bakhouya, Najib El Kamoun, Mohammed Khaidar, and Khalid Zine-Dine. Review of control and energy management approaches in micro-grid systems. *Energies*, 14(1):168, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/en14010168>.
- [11] Mohsenian-Rad, H., Wong, V. W., Jatskevich, J., Schober, R., & Leon-Garcia, A. (2010). Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(3), 320-331. DOI: [10.1109/TSG.2010.2053021](<https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2053021>)
- [12] Deilami, S., Masoum, M. A. S., & Moses, P. S. (2011). Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(3), 456-467. DOI: [10.1109/TSG.2011.2141145](<https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2141145>)
- [13] Guerrero, J. M., Chandorkar, M., Lee, T. L., & Loh, P. C. (2013). Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part I: Decentralized and hierarchical control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1254-1262. DOI: [10.1109/TIE.2012.2184549](<https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2184549>)
- [14] Wang, X., & Gupta, V. (2016). A survey of consensus problems in multi-agent coordination. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(1), 3-17. DOI: [10.1109/TAC.2016.2535751](<https://doi.org/10.1109/TAC.2016.2535751>)
- [15] Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuna, L. G., & Castilla, M. (2013). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1251-1263. DOI: [10.1109/TIE.2012.2185934](<https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2185934>)
- [16] Faruqi, A., & Sergici, S. (2010). Household response to dynamic pricing of electricity: A survey of 15 experiments. *Journal of Regulatory Economics*, 38(2), 193-225. DOI: [10.1007/s11149-010-9123-8](<https://doi.org/10.1007/s11149>)
- [17] Elisa Skoplaki and John A Palyvos. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, 83(5):614–624, 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>.
- [18] Jorge L Acosta, Kevin Combe, Saša Ž Djokic, and Ignacio Hernando-Gil. Performance assessment of micro and small-scale wind turbines in urban areas. *IEEE Systems Journal*, 6(1):152–163, 2011. doi: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2011.2163025>.



- [19] Mohamed A Mohamed, Ali M Eltamaly, and Abdulrahman I Alolah. Swarm intelligence-based optimization of grid-dependent hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77:515–524, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.048>.
- [20] Hongxing Yang, Wei Zhou, Lin Lu, and Zhaohong Fang. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with lpsp technology by using genetic algorithm. *Solar energy*, 82(4):354–367, 2008. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.08.005>.