



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ESTUDIO DINÁMICO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA  
GESTIÓN DE ENERGÍA - EMS EN MR ELÉCTRICAS EN AC**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: JONATHAN SANTIAGO SOCASI TIPAN

TUTOR: LEONY ORTIZ MATOS

Quito -Ecuador

2024

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Yo, Jonathan Santiago Socasi Tipan con documento de identificación N° 1727156570 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 31 de marzo del año 2024

Atentamente,



Jonathan Santiago Socasi Tipan  
1727156570

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Jonathan Santiago Socasi Tipan con documento de identificación No. 1727156570, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Estudio dinámico comparativo de métodos de optimización para la gestión de energía - EMS en MR eléctricas en AC.”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 31 de marzo del año 2024

Atentamente,



Jonathan Santiago Socasi Tipan

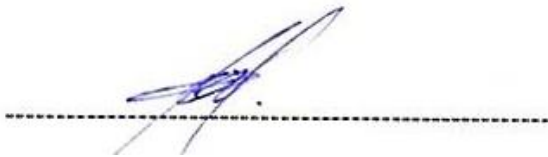
1727156570

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Leony Ortiz Matos con documento de identificación N° 1754230389, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: *“ESTUDIO DINÁMICO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA GESTIÓN DE ENERGÍA - EMS EN MR ELÉCTRICAS EN AC”* realizado por Jonathan Santiago Socasi Tipan con documento de identificación N° 1727156570, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 31 de marzo del año 2024

Atentamente,



Ing. Leony Ortiz Matos, Ph.D  
1754230389

## ÍNDICE GENERAL

1	Introducción .....	2
2	Marco teórico .....	4
2.1	Micro-red.....	5
2.2	Modelado de la Micro-red .....	6
2.3	Modelos de sistemas de gestión de energías .....	7
2.3.1	Diversas técnicas de DSM .....	7
2.3.2	Modelado del sistema de gestión de energía fotovoltaica .....	8
	Modelado del sistema de gestión de energía de la batería:.....	9
3	Algoritmos de optimización para la gestión de energía.....	10
3.1	Cuadrática .....	10
3.2	Lineal .....	11
3.3	Heurística.....	11
3.3.1	Formulación matemática .....	12
4	Planteamiento del problema .....	12
4.1	Algoritmo cuadrático.....	12
4.2	Algoritmo lineal .....	13
4.3	Algoritmo heurístico.....	14
5	Caso de estudio y resultados .....	15
5.1	Análisis de resultados .....	15
5.2	Análisis comparativo .....	19
6	Conclusiones .....	20
6.1	Trabajos futuros.....	21
7	Referencias .....	21
7.1	Matriz de Estado del Arte .....	29
7.2	Resumen de Indicadores .....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de algoritmos en la Micro-red .....	2
Figura 2. Clasificación de MR .....	4
Figura 3. Generación y Almacenamiento de energía fotovoltaica. ....	8
Figura 4. Modelo dinámico simplificado de batería.....	9
Figura 5. Diagrama de la Micro-red.....	12
Figura 6. Voltaje, SOC y precio de la comparativa.....	16
Figura 7. Costos y uso de la red de la comparativa. ....	17
Figura 8. Valores de potencia de la comparativa. ....	19
Figura 9. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.....	35
Figura 10. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	35
Figura 11. Indicador de solución - Estado del arte.....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Revisión de literatura .....	3
Tabla 2. Variables del algoritmo cuadrático.....	13
Tabla 3. Pseudocódigo del algoritmo cuadrático .....	13
Tabla 4. Variables del algoritmo lineal. ....	13
Tabla 5. Pseudocódigo del algoritmo lineal .....	14
Tabla 6. Variables del algoritmo heurístico .....	14
Tabla 7. Pseudocódigo del algoritmo heurístico .....	15
Tabla 8. Comparativa de costos .....	19
Tabla 9. Comparativa de uso de la red .....	20
Tabla 10. Matriz de estado del arte. ....	29

# ESTUDIO DINÁMICO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA GESTIÓN DE ENERGÍA - EMS EN MR ELÉCTRICAS EN AC

## Resumen

El presente documento está enfocado en realizar un análisis dinámico comparativo de métodos de gestión óptima de energía aplicados a micro-redes eléctricas en AC. Para ello, se implementó y evaluaron tres modelos de sistemas de gestión óptima de energía basados en modelos cuadrático, heurístico y por programación lineal. Para la comparación dinámica de los tres métodos se consideraron variables de rendimiento como los perfiles de voltaje, el estado de carga del sistema de almacenamiento, el precio del consumo de la energía, costos, y el consumo de energía la red principal. Si bien los tres métodos pudieron realizar la gestión de energía de la micro-red, los resultados se contrastarán con una diferencia entre cada método de optimización implementado, lo que indica que ninguno de los métodos es mejor que otro por sí mismo, lo que evidencia que la selección de técnicas de optimización está sujeta en gran medida a un análisis multicriterial. Los modelos fueron implementados y validados usando simulación digital en Matlab/ Simulink.

**Palabras Clave:** Gestión de energía, Cuadrática, Heurística, Optimización Lineal, Demanda, Generación.

## Abstract

This paper is focused on performing a comparative dynamic analysis of optimal energy management methods applied to AC microgrids. For this purpose, three optimal energy management systems models based on quadratic, heuristic, and linear programming models were implemented and evaluated. Performance variables such as voltage profiles, storage system state of charge, energy consumption price, costs, and main grid energy consumption were considered for the dynamic comparison of the three methods. While all three methods were able to perform microgrid energy management, the results will be contrasted with a difference between each optimization method implemented, indicating that none of the methods is better than the other by itself, which is evidence that the selection of optimization techniques is mainly subject to a multi-criteria analysis. The models were implemented and validated using digital simulation in Matlab/Simulink.

**Keywords:** Energy Management, Quadratic, Heuristic, Linear optimization, Demand, Generation.

# 1 Introducción

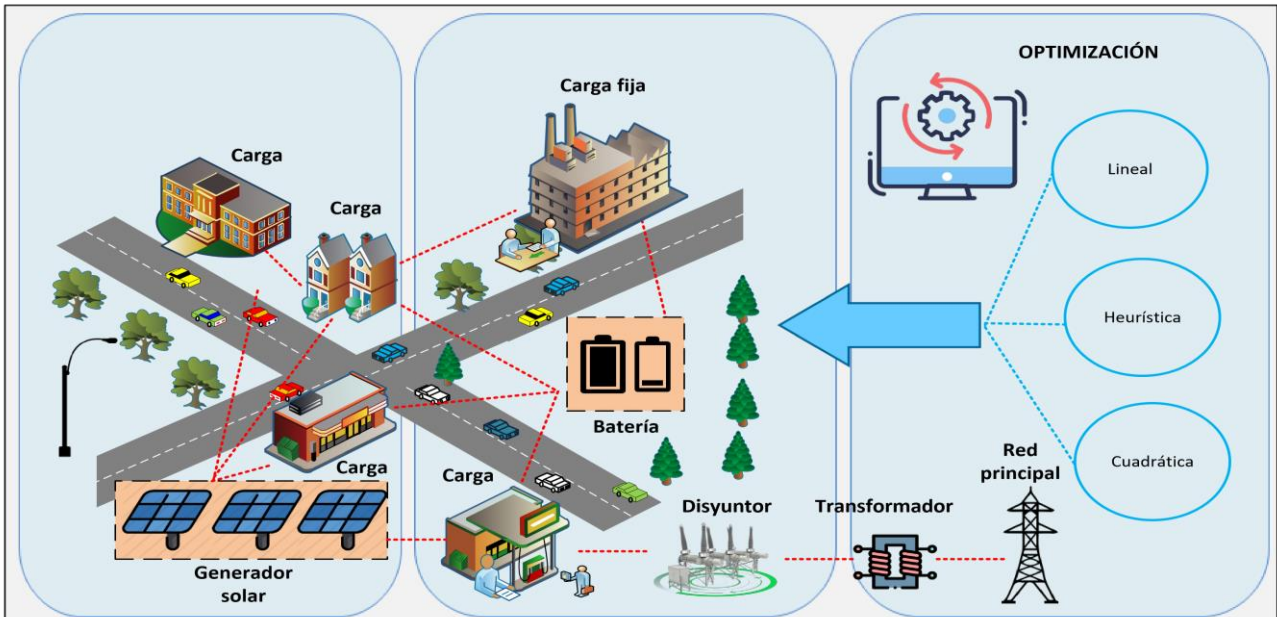


Figura 1. Comparación de algoritmos en la Micro-red

En la figura 1, se puede apreciar que la micro-red (MR) está logrando un interés significativo en la actualidad y se perfilan como la tendencia futura en los sistemas de distribución de energía. Como se muestra una representación visual del objetivo de este trabajo de investigación. [1], [2].

Los términos teóricos se han desarrollado para facilitar la implementación de diversas fuentes de generación de energía en una MR, atendiendo principalmente a las necesidades energéticas [3], [4].

Para poder garantizar un suministro eficiente y con un costo bajo, pero a la vez de calidad, tenemos que considerar las limitaciones ambientales, tales como, emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación del aire, agua y gestión de residuos e incluso fallas. La implementación de energía solar, fotovoltaica, eólicas, baterías para el almacenamiento que nos proporciona satisfacer la demanda y la calidad de potencia en la MR [5], [6], [7].

La MR enfrenta desafíos significativos para lograr una gestión eficiente. Su objetivo es organizar el despacho de energía de manera que no solo se atienda la demanda del sistema de almacenamiento, sino que también se asegure el cumplimiento de las condiciones operativas y los estándares de calidad de servicio. Esto implica una cuidadosa coordinación y planificación para equilibrar la generación de energía con las necesidades fluctuantes del sistema [5], [6], [8].

El uso de energías renovables es aún limitado a nivel mundial, pero su implementación es primordial para satisfacer las necesidades de los clientes. Estas fuentes de energía, que no se agotan, pueden llevar electricidad a lugares donde antes no era posible, ayudando a que más personas tengan acceso a servicios básicos. Esto no solo hace la vida más cómoda, sino que también puede ayudar a que las comunidades crezcan económicamente [9], [10], [11], [12], [13], [14].



La MR tiende a ofrecer una infraestructura eléctrica confiable, los estudios abarcan un medio de contingencia en casos de fenómenos naturales, debido a la cualidad de la MG para ser práctico, está conectado a la red principal tomando en cuenta que consta con fuentes de energía limpia de generación distribuida, que pueden contribuir con energía, tanto recibiendo como entregando, dependiendo de la necesidad [15], [16], [17], [18], [19].

El sistema de almacenamiento de energía de batería es un complemento aceptable en el caso de almacenamiento a corto tiempo. La implementación de este tipo de almacenamiento se ha puesto en practicar por varios autores. En la actualidad la red eléctrica no tiene un gran confort, por tal motivo despilfarran la energía producida, por lo cual, se desea respaldar la calidad de energía [16], [20].

Las temáticas de los problemas en la MR han propuesto una variedad de algoritmos en los últimos años [21], [22], [23], [24], [25], [26]. Estos algoritmos comparten el objetivo de reducir costos para los usuarios. Los métodos de optimización demuestran su capacidad para adaptarse a configuraciones autónomas y continuas, su enfoque se ajusta en función de la variedad de factores de calidad. La percepción de esta comparación es disminuir brechas en los EMS de las MR futuras, el algoritmo desarrollado permitirá reducir el costo total de la operación, abarcando transacciones del mercado y pérdidas en la red eléctrica [27], [28].

En la tabla 1, se aprecia una revisión de literatura relacionada al tema de investigación del presente paper.

Tabla 1. Revisión de literatura

Cita	Resumen
[29]	Se analiza la planificación y optimización de MR de corriente directa para áreas rurales y urbanas en

India, considerando perfiles de carga de una aldea rural, un edificio residencial urbano y una organización empresarial. Se exploran configuraciones de MR con generación de energía a través de paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas y biodiesel. El estudio compara detalladamente costos, producción eléctrica, gestión energética y emisiones de cada sistema, revelando que estas configuraciones ofrecen un costo razonable y suministro fiable de electricidad en comparación con los precios de la red convencional.

[30] El estudio desarrolló un modelo de planificación integrada para evaluar el rendimiento técnico y económico de una MR independiente con alta proporción de energías renovables. Se utilizó un enfoque que combina evaluación de capacidad y planificación operativa, integrando estrategias de gestión de la demanda en distintos escenarios de diseño. Para la optimización se empleó un algoritmo de programación lineal de enteros mixtos en MATLAB®, con el objetivo de minimizar los costos totales del sistema. Se encontró que la combinación más eficiente para la MR estudiada es la que incluye energía fotovoltaica, turbinas eólicas y almacenamiento de energía térmica mediante bombeo

[31] El estudio aborda la adaptabilidad y resiliencia de MR ante desastres naturales, proponiendo y evaluando estrategias de emergencia para garantizar operación continua y recuperación rápida post-desastre. Estas estrategias incluyen programación proactiva y tácticas avanzadas para minimizar el impacto de interrupciones graves, destacando la eficacia de las MR en mantener el suministro de energía en condiciones adversas, crucial para la seguridad de comunidades vulnerables

[32] El estudio examina la transformación de redes eléctricas tradicionales a MR con un alto uso de energías renovables, analizando los aspectos técnicos, económicos y los avances tecnológicos que facilitan este cambio. También propone una ruta progresiva para la transición y sugiere políticas de incentivo para promover sistemas más sostenibles y autónomos

[33]

El estudio revisa cómo las micro-redes (MR) pueden contribuir a una transición hacia la electricidad 100% renovable, señalando que, aunque tienen un gran potencial, las políticas emergentes aún requieren desarrollo sustancial para aprovecharlo plenamente. La investigación concluye que las tensiones políticas fundamentales radican más en aspectos de justicia y rentabilidad de la infraestructura de las MR que en cuestiones técnicas. Se destaca la necesidad de futuros estudios técnicos y cuantitativos para orientar el desarrollo de políticas de MR, incluyendo análisis sociotecnoeconómicos sobre su rentabilidad que consideren una gama amplia de beneficios y costos

[34]

El estudio compara la eficacia de integrar distintas fuentes de energía renovable en MR, utilizando turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos y sistemas de almacenamiento de baterías para mejorar la fiabilidad y reducir los costos. Se emplea la herramienta de optimización fmincon, demostrando que la incorporación de tecnologías de generación distribuida de energías renovables ofrece resultados superiores.

## 2 Marco teórico

Dentro del marco teórico de esta investigación, se abordan varios subtemas fundamentales. En primer lugar, se explora el concepto de MR, un sistema de distribución energética que integra fuentes renovables y sistemas de almacenamiento para garantizar un suministro confiable y sostenible a nivel local. Luego, se considera el modelado de la MR, que implica la creación de representaciones matemáticas para comprender su funcionamiento y optimización. Además, se analizan los Modelos de sistemas de gestión de energías, encargados de la administración eficiente de la energía dentro de la MR, y se examina el modelado del sistema de gestión de energía de la batería, fundamental en la integración efectiva de sistemas de almacenamiento. Estos subtemas son

esenciales para abordar la eficiencia y sostenibilidad en la gestión de energía eléctrica en MR. El sistema de MR se puede catalogar en tres clases como se muestra en la figura 2 [4], [7]:

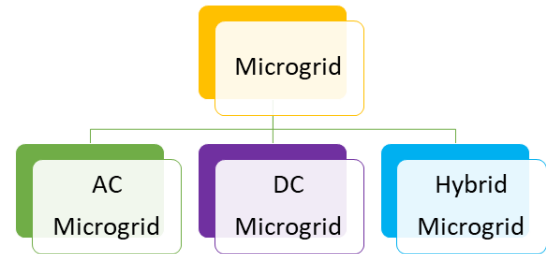


Figura 2. Clasificación de MR

En el ámbito de las MR, el control centralizado se erige como un elemento fundamental. Este sistema coordina integralmente la generación, el almacenamiento y el consumo de energía, optimizando el funcionamiento global de la red. Su eficacia radica en la capacidad de mantener un equilibrio constante entre la oferta y la demanda de energía, lo que resulta esencial para asegurar un suministro energético constante y fiable [3], [12], [35], [36], [37].

En este contexto, se resalta la importancia del controlador de histéresis. Dicho controlador demuestra ser efectivo al registrar la potencia de salida de los sistemas de almacenamiento en las MR, destacando especialmente el uso de baterías. Esta metodología no solo mejora la confiabilidad y eficiencia del sistema de energía existente, sino que también supera a otros métodos de almacenamiento [3].

Además, la incorporación de la energía híbrida en las MR aprovecha al máximo la potencia disponible de manera económica y eficiente. Esta estrategia optimiza el rendimiento del sistema y, a su vez, reduce significativamente la degradación de las baterías. Al mitigar problemas específicos como la sulfatación en los electrodos y la

estratificación de electrolitos, la energía híbrida emerge como una solución integral para el manejo eficiente de la energía [3].

El control centralizado, aunque eficiente, presenta desafíos. Un controlador recopila datos de generación, consumo y almacenamiento de energía en varios puntos de la MR. Esta información es vital para ajustar estrategias de control y mantener un equilibrio adecuado. Sin embargo, la comunicación centralizada puede ser vulnerable a fallos, lo que puede afectar negativamente la operación de toda la MR [3].

Por ello, es imperativo implementar sistemas de respaldo y protocolos de comunicación robustos. Estas medidas son cruciales para mantener la fiabilidad y la constancia en el suministro de energía, compensando así las vulnerabilidades del sistema centralizado. Con estas precauciones, las micro-redes pueden optimizar su rendimiento, garantizando un servicio energético eficiente y seguro [38].

## 2.1 Micro-red

Las MR eléctricas son elementos clave en el avance tecnológico al ofrecer una distribución de energía segura, confiable y económica desde la generación hasta las cargas específicas. Su capacidad de autoabastecimiento y funcionamiento independiente las convierte en sistemas energéticos eficientes y autónomos, especialmente útiles en áreas remotas o cuando la red principal no está disponible o es inestable [8], [39].

Al ser bloques bien estructurados, la MR está diseñada para otorgar confiabilidad de la distribución de energía. Además, buscan minimizar los costos para los usuarios, lo que contribuye a una mayor accesibilidad y asequibilidad energética. La seguridad es otro aspecto crucial en el desarrollo de las MR. Se implementan medidas y sistemas de

protección para garantizar que el suministro de energía sea confiable y que los usuarios estén protegidos contra posibles problemas, como sobrecargas o cortocircuitos [38], [39], [40]. La MR tiene la capacidad de almacenar y distribuir energía sobrante, la cual puede ser guardada en baterías o capacitores para su uso en momentos de alta demanda [41].

El almacenamiento de energía en la MR optimiza su funcionamiento al utilizar energía almacenada en baterías o capacitores para satisfacer aumentos de demanda, ya sea planificados o inesperados. Esto ofrece ventajas como una gestión más eficiente de la oferta y la demanda, así como una mayor autonomía y reducción de la dependencia de la red eléctrica principal [39].

La elección entre baterías y capacitores como medio de almacenamiento depende de varios factores, como capacidad, velocidad de carga y descarga, vida útil y eficiencia energética. La decisión se toma en función de las necesidades específicas de la MR. La implementación de energías limpias como la eólica, solar y biomasa optimiza la entrega de electricidad, evita el deterioro ambiental y extiende la vida útil, reduciendo costos y mejorando el confort [41], [42].

La integración de energías renovables en la matriz energética ayuda a preservar el medio ambiente, ya que estas fuentes son más sostenibles y emiten menos gases de efecto invernadero que las fuentes convencionales. Al aprovechar energía eólica, solar, térmica y biomasa, se reduce la dependencia de combustibles fósiles y se promueve un modelo energético más limpio y sostenible. Además, la incorporación de generación renovable en la red eléctrica puede prolongar la vida útil de los sistemas de energía al requerir menos mantenimiento y ser más duraderos que las plantas

convencionales, lo que garantiza una mayor fiabilidad a largo plazo [38], [39], [40], [41], [42], [43].

La generación de energía renovable ofrece beneficios económicos a largo plazo al reducir los costos asociados con el combustible, la operación y el mantenimiento. Esto se traduce en precios más competitivos para los consumidores y una mayor estabilidad en los costos de energía. Además, la energía renovable mejora el confort general al reducir la contaminación acústica y las emisiones de residuos. Las fuentes como la energía eólica y solar térmica no generan ruido ni emisiones perjudiciales, lo que mejora la calidad de vida y el bienestar en las áreas circundantes [38], [39], [40], [41], [42], [43].

## 2.2 Modelado de la Micro-red

Para realizar el modelamiento de una Micro-red (MR), es importante considerar diversos antecedentes. La MR está compuesta por cargas interconectadas que cuentan con recursos renovables capaces de almacenar energía que presentan altas no linealidades y complejidad técnica que imposibilitan la obtención de modelos mediante métodos analíticos. Además, la MR tiene la opción de conectarse o desconectarse de la red principal [39]. Es por ello que, en el ámbito del modelado de las MR la comunidad académica y científica se ha volcado al estudio de nuevas técnicas de modelado basado en la Identificación de sistemas y el uso de algoritmos computacionales [11], [44], [45], [46], [47], [48].

En el caso de que la MR se desconecte de la red principal, comienza a funcionar como una "isla". Esto implica que puede operar de manera autónoma y permite realizar el modelamiento de cada sección de la MR de forma más precisa y específica [42].

Al analizar qué tipo de recurso renovable se puede utilizar en la MR, se consideran opciones como la energía solar, eólica, térmica, entre otras. La elección del recurso renovable depende de las circunstancias y localización geográfica [49].

Por ejemplo, si la MR se encuentra en una zona con abundante radiación solar, puede ser conveniente utilizar paneles solares para aprovechar la energía del sol. Si hay vientos constantes en la región, la energía eólica podría ser una opción viable. También se pueden considerar sistemas de energía térmica si existen fuentes de calor o frío disponibles en la zona [50].

Cada tipo de recurso renovable tiene sus propias características y requerimientos técnicos, por lo que es fundamental realizar un análisis detallado para determinar cuál es el recurso más adecuado para la MR en cuestión. Este análisis incluye considerar la disponibilidad, la capacidad de generación, los costos de implementación y mantenimiento, así como la integración con el sistema de almacenamiento de energía [49], [50], [51].

$$C_{tot} = \sum_{k=0}^N C_{grid}(k) \cdot E_{grid}(k) \quad (1)$$

Donde:

$C_{tot}$	Costo variable de la electricidad.
$C_{grid}$	Costo de la red.
$E_{grid}$	Energía almacenada en la red.
$K$	Se refiere al paso de tiempo, que es la duración entre dos instantes de tiempos consecutivos en un sistema dinámico.

El cambio de demanda máxima basado en la optimización es minimizar el costo total de la electricidad, teniendo en cuenta que deben ser modelados mediante esta ecuación (1) para el costo [51].

## 2.3 Modelos de sistemas de gestión de energías

Los modelos de sistemas de gestión de energías permiten tener un adecuado control sobre el almacenamiento de energía en sus diversos dispositivos [52].

La gestión de energía del lado de la demanda contempla que el usuario mediante los métodos disminuya el consumo y el costo de energía eléctrica, los modelos se emplean para compensar cuando el tiempo y la magnitud de la demanda de energía no corresponden con la generación [53].

### 2.3.1 Diversas técnicas de DSM

#### *Recorte de pico:*

La técnica del pico se encarga de reducir gastos producidos por el usuario durante las horas en las que la demanda supera los límites de consumo establecidos. Esta estrategia busca mitigar los picos de demanda eléctrica, que generalmente ocurren durante ciertos períodos del día, como las horas punta [52].

La implementación de la técnica del pico implica fomentar y promover medidas de eficiencia energética entre los usuarios, incentivando la reducción de la demanda eléctrica durante los momentos de mayor carga en la red. Estas medidas pueden incluir la gestión y el control de los electrodomésticos, el uso de sistemas de iluminación eficientes, la implementación de sistemas de gestión energética en edificios y la concienciación sobre el consumo responsable de energía [52], [53].

Al reducir el consumo durante los picos de demanda, se logra un uso más eficiente de la energía disponible y se evita la sobrecarga del sistema eléctrico. Esto tiene beneficios tanto a nivel individual, al permitir a los usuarios ahorrar en sus facturas de energía, como a nivel colectivo,

al mejorar la estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico en general. Es importante destacar que la técnica del pico puede ser implementada tanto por los usuarios como los proveedores de servicios energéticos. A través de la educación, la planificación y la adopción de tecnologías eficientes, se puede alcanzar la disminución en la demanda eléctrica durante los momentos de mayor consumo [53], [54].

#### *Relleno de valles:*

La técnica de relleno se utiliza para acumular energía durante períodos de baja demanda, aprovechando la capacidad de generación disponible. Esto permite optimizar la eficiencia y evitar desperdicios de energía al almacenar el excedente generado para su uso posterior en momentos de mayor demanda [51].

El almacenamiento de energía se realiza mediante diversas tecnologías, como baterías o sistemas de almacenamiento térmico. El objetivo de la técnica de relleno es lograr un uso eficiente de la energía y evitar desperdicios. Al acumular y utilizar la energía excedente durante períodos de baja demanda, se reduce la necesidad de usar fuentes adicionales de energía, aprovechando al máximo la capacidad de generación existente [39].

Esta estrategia de relleno también puede ser beneficiosa en términos económicos, ya que permite maximizar la utilización de los recursos energéticos y minimizar los costos de adquisición de energía adicional en momentos de alta demanda [53], [54].

#### *Variación de carga:*

La técnica de variación se emplea para ajustar la demanda de energía eléctrica, facilitando transiciones fluidas entre períodos de alta y baja demanda. Implica regular la demanda según las necesidades del sistema. Durante los picos, se aplican medidas para reducir la carga eléctrica,

como la gestión de electrodomésticos y la eficiencia energética en la iluminación [39].

Por otro lado, durante los períodos de valle, se busca aumentar la demanda eléctrica aprovechando la disponibilidad de energía excedente o tarifas más bajas. Se pueden programar actividades que consuman más energía, como la recarga de vehículos eléctricos, el uso de sistemas de calefacción o refrigeración, y otras tareas que requieran mayor consumo eléctrico [38].

Esta técnica de variación permite equilibrar la demanda eléctrica a lo largo del tiempo, evitando los picos de consumo excesivos y aprovechando los momentos de menor demanda. Al realizar una gestión eficiente de la demanda, se optimiza el uso de los recursos energéticos y se reduce la carga en la red eléctrica, lo que contribuye a una mayor estabilidad y eficiencia en el suministro eléctrico. Además, la técnica de variación puede tener beneficios económicos al aprovechar tarifas más bajas durante los períodos de valle. Esto permite a los usuarios reducir sus costos energéticos al utilizar energía cuando es más económica y evitar costos adicionales durante los momentos de alta demanda y tarifas más altas [53], [54].

### 2.3.2 Modelado del sistema de gestión de energía fotovoltaica

#### *Paneles fotovoltaicos:*

El prototipo solar interpreta la unión de una matriz fotovoltaica. La célula fotovoltaica es el patrón eléctrico que aprueba el acceso para la generación de electricidad usando la energía renovable que nos proporciona el sol mediante la radiación solar que genera [55].

El panel fotovoltaico está conformado por varios celulares solares como se puede observar en la figura 3.

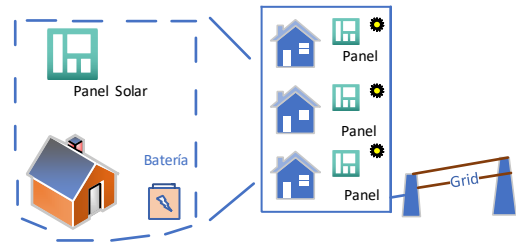


Figura 3. Generación y Almacenamiento de energía fotovoltaica.

La corriente del módulo solar está definida por la siguiente ecuación (2) [55], [56]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q V_d}{K_b F T_c} \right) - 1 \right] - \frac{V_d}{V_p} \quad (2)$$

Donde:

- $I_{pv}$  Corriente de salida del panel solar.
- $I_{ph}$  Corriente fotogenerada por el panel solar. Esta es la corriente generada debido a la irradiación solar incidente en el panel.
- $I_0$  Corriente de saturación inversa del diodo. Representa la corriente de fuga a través del diodo en ausencia de irradiación solar.
- $q$  Carga del electrón.
- $V_d$  Tensión en el diodo del panel solar. Es la diferencia de potencial a través del diodo.
- $K_b$  Constante de Boltzmann.
- $F$  Factor de idealidad del diodo. Indica cuánto se desvía el comportamiento del diodo de un comportamiento ideal.
- $T_c$  Temperatura del panel solar. La temperatura del panel solar afecta a la corriente y la tensión generadas.
- $V_p$  Tensión nominal de panel solar. Es la tensión de circuito abierto del panel solar.

La generación de energía fotovoltaica puede no coincidir con la demanda de carga, lo que lleva a los consumidores a equilibrarla mediante el almacenamiento de energía. Esto se logra utilizando sistemas como baterías para capturar el exceso de consumo. En ocasiones, los consumidores también pueden comprar energía de la red para satisfacer sus necesidades energéticas [50].

Por otro lado, existe la situación en la cual la generación de energía fotovoltaica supera la demanda de carga. En este escenario, los consumidores tienen un excedente de electricidad que pueden aprovechar vendiéndola a la red eléctrica. Esto se conoce como inyección de energía en la red, y los consumidores pueden recibir compensaciones económicas o créditos por la energía que suministran a la red [51].

Estas dos situaciones reflejan la dinámica de la generación fotovoltaica, cómo los consumidores pueden adaptarse y beneficiarse de acuerdo con las condiciones particulares. Por un lado, pueden equilibrar su carga mediante el almacenamiento de energía y, en otros casos, aprovechar el excedente de generación para obtener beneficios económicos al venderla a la red [3].

Es importante destacar que la elección entre equilibrar la carga y almacenar energía o vender el excedente a la red depende de varios factores, como los costos de almacenamiento, las políticas de compensación y los objetivos individuales de los consumidores. También es relevante considerar la regulación y las políticas energéticas locales que pueden influir en la viabilidad y rentabilidad de estas opciones [57].

### *Modelado del sistema de gestión de energía de la batería:*

#### **BATERÍA**

La gestión del almacenamiento de energía en las baterías se basa en la configuración de celdas conectadas en paralelo y en serie junto con la utilización de convertidores que simplifican los procesos de carga y descarga como se observa en la figura 4.

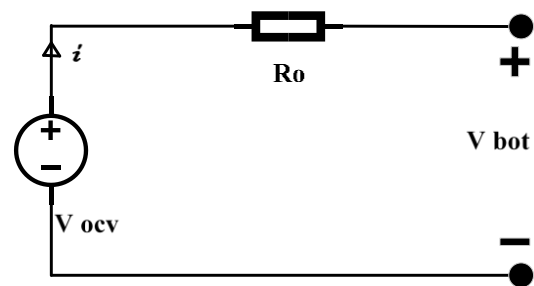


Figura 4. Modelo dinámico simplificado de batería.

Esta configuración optimiza el almacenamiento y liberación de energía según las necesidades de la red. Hay varias tecnologías de baterías disponibles para su uso en el sistema de reserva de energía en la red, siendo la batería de iones de litio una de las más populares debido a su eficiencia y vida útil superiores en comparación con otras tecnologías [58].

Las baterías de iones de litio son una opción popular para la gestión de reserva de energía en la red debido a su alta capacidad de almacenamiento, respuesta rápida y capacidad para retener energía durante períodos prolongados. Además, tienen una mayor eficiencia en la carga y descarga, lo que contribuye a un rendimiento operativo superior y una mayor rentabilidad. Aunque existen otras tecnologías disponibles, como las baterías de plomo-ácido o de flujo, su elección depende de las necesidades específicas del sistema de almacenamiento de energía [58], [59].

Las restricciones de entrada y salida a la batería podemos observar en la siguiente ecuación (3):

$$E_{batt}(k) = E_{batt}(k-1) + P_{batt}(k)\Delta T \quad (3)$$

Donde:

- $E_{batt}$**  Energía almacenada en la batería.
- $P_{batt}$**  Potencia de la batería.
- $\Delta T$**  Es el intervalo de tiempo variable.
- $K$**  Se refiere al paso de tiempo, que es la duración entre dos instantes de tiempos consecutivos en un sistema dinámico.

Para el balance de potencia en la ecuación (4):

$$P_{pv}(k) + P_{grid}(k) + P_{batt}(k) = P_{load}(k) \quad (4)$$

Donde:

- $P_{pv}$**  Potencia generada por el panel fotovoltaico.
- $P_{grid}$**  Potencia de la red eléctrica.
- $P_{batt}$**  Potencia de la batería.
- $P_{load}$**  Potencia de la carga.
- $K$**  Se refiere al paso de tiempo, que es la duración entre dos instantes de tiempos consecutivos en un sistema dinámico.

### 3 Algoritmos de optimización para la gestión de energía

#### 3.1 Cuadrática

La programación cuadrática es un método de optimización donde la función objetivo que se busca minimizar o maximizar es cuadrática y las restricciones son lineales. La gestión de sistemas, como las MR que integran fuentes renovables y baterías para la reserva de energía, la programación cuadrática se utiliza para encontrar el punto

de operación más económico que satisface las demandas de carga y las restricciones operativas [60].

La formulación matemática define las variables de decisión que representan la potencia de la red, la potencia de la batería y la energía de la batería en cada intervalo de tiempo.

La función objetivo se menciona en la ecuación (4):

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^N (dt * Cost_i * P^i_{grid}) - \text{FinalWeight} * E^N_{batt} + \text{Var}^2 * 1e - 10 \quad (4)$$

Esta busca minimizar el costo total de la energía consumida de la red, ajustado por una penalización relacionada con el estado final deseado de la carga de la batería y una regularización para evitar cambios bruscos en las variables de decisión [61].

Para destacar lo antes mencionado se emplea la ecuación (5) de manera que se tiene:

$$P^i_{grid}, P^i_{batt} \text{ y } E^i_{batt} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

Las restricciones aseguran el balance de energía dentro de la batería y el cumplimiento de la demanda de carga, manteniendo las operaciones dentro de los límites técnicos de las capacidades de la batería [62]. A continuación, se presenta las ecuaciones de balance de energía en la batería, balance carga y restricciones en variables de decisión (6), (7), (8):

$$E^1_{batt} = E_{init} \\ E^i_{batt} = E^{i-1}_{batt} - P^{i-1}_{batt} * dt \quad \text{para } i = 2, 3, \dots, N \quad (6)$$

$$P_{pv} + P^i_{grid} + P^i_{batt} = P^i_{load} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$



$$0 \leq P^i_{grid} \text{ para } i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

### 3.2 Lineal

La técnica de optimización basada en programación lineal se basa en la formulación matemática de un modelo que busca encontrar la mejor asignación de energía y potencia, con el propósito de minimizar o maximizar una función específica, sujeta a restricciones establecidas. Mediante la utilización de ecuaciones y desigualdades lineales, este enfoque busca encontrar la combinación óptima de variables para lograr un rendimiento energético eficiente en la MR [60].

La formulación matemática de este problema implica variables de decisión. Para destacar lo antes mencionado se emplea la ecuación (10) de manera que se tiene:

$$P^i_{grid}, P^i_{batt} \text{ y } E^i_{batt} \quad (10)$$

*para*  $i = 1, 2, \dots, N$

Como la potencia tomada de la red, la potencia gestionada por la batería y el estado de la energía de la batería en cada intervalo de tiempo, desde el inicio  $i = 1$  hasta un final  $i = N$ .

La función objetivo se menciona en la ecuación (9):

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^N (dt * Cost_i * P^i_{grid}) - \text{FinalWeight} * E^N_{batt} \quad (9)$$

Que busca reducir el consumo de la red, ponderando la energía final en la batería por un factor de importancia conocido como FinalWeight [63].

Las restricciones mantienen el sistema dentro de los límites físicos y operativos, incluyendo el balance energético de la batería, que asegura que la energía almacenada en un intervalo proviene del

intervalo anterior ajustado por la carga o descarga de la batería, y el balance de carga total, que asegura que, en cada intervalo de tiempo, la energía total (producida, almacenada o consumida) satisfaga la demanda de la carga. Además, se establecen límites para la potencia y así no sobrepasar sus capacidades técnicas. Estas formulaciones son cruciales para el diseño eficiente y económico de sistemas de energía modernos y sostenibles [62]. A continuación, se presenta las ecuaciones (11), (12), (13) que definen el balance de energía en la batería, balance carga y restricciones en variables de decisión:

$$E^1_{batt} = E_{init}$$

$$E^i_{batt} = E^{i-1}_{batt} - P^{i-1}_{batt} * dt \text{ para } i = 2, 3, \dots, N \quad (11)$$

$$P_{PV} + P^i_{grid} + P^i_{batt} = P^i_{load} \text{ para } i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

$$0 \leq P^i_{grid} \text{ para } i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

### 3.3 Heurística

Las heurísticas en la gestión energética ofrecen métodos pragmáticos para tomar decisiones eficientes y rápidas, especialmente útiles en sistemas dinámicos donde las fuentes renovables y el almacenamiento de energía juegan un papel central [64].

En un sistema que busca equilibrar la generación de energía renovable con el consumo de carga y la reserva de las baterías, una heurística calcula la diferencia entre la energía producida y consumida para determinar la necesidad de recurrir a la red eléctrica y ajustar el estado de carga de la batería de manera que se minimicen los costos [61].

Esta aproximación permite una operación óptima del sistema al evaluar rápidamente las variables y aplicar

correcciones sin la necesidad de un cálculo exhaustivo, favoreciendo la toma de decisiones en tiempo real y la adaptación a las condiciones cambiantes [62].

### 3.3.1 Formulación matemática

A continuación, se presenta matemáticamente el proceso que sigue la programación heurística:

- Cálculo de la diferencia

$$diferencia = potencia_{renovable} - consumo_{carga}$$

- Si Diferencia < 0:

$$potencia_{necesaria} = consumo_{carga} - potencia_{renovable} \quad (14)$$

$$costo_{utilizar\_red} = potencia_{necesaria} * costo_{red} \quad (15)$$

$$SoC_{actual} = SoC_{inicial} - \frac{potencia_{necesaria}}{eficiencia_{bateria}} \quad (16)$$

$$Si SoC_{actual} \leq SoC_{min} \quad (17)$$

$$potencia_{carga\_ajustada} = potencia_{carga} - (SoC_{min} - SoC_{actual}) * eficiencia_{bateria} \quad (18)$$

$$costo_{cargar\_bateria} = potencia_{carga\_ajustada} * costo_{red} \quad (19)$$

$$Si SoC_{min} \leq SoC_{actual} \leq SoC_{max} \quad (20)$$

$$costo_{utilizar\_bateria} = 0$$

$$Si SoC_{actual} > SoC_{max} potencia_{descarga\_ajustada} = potencia_{carga} - (SoC_{actual} - SoC_{max}) * eficiencia_{bateria} \quad (21)$$

$$costo_{descargar\_bateria} = potencia_{descarga\_ajustada} * costo_{renovable}$$

- Si Diferencia ≥ 0 (22)

$$costo_{utilizar\_renovable} = 0$$

## 4 Planteamiento del problema

En la figura 5, se observa que en el contexto de las MR eléctricas basadas en fuentes de energía renovables y sistemas de almacenamiento de energía BESS, se busca comparar tres métodos de optimización para mejorar el uso de energía EMS. El objetivo principal es evaluar, comparar la eficacia, eficiencia de la programación lineal, un método heurístico y programación cuadrática en la optimización de la gestión de energía en micro redes eléctricas.

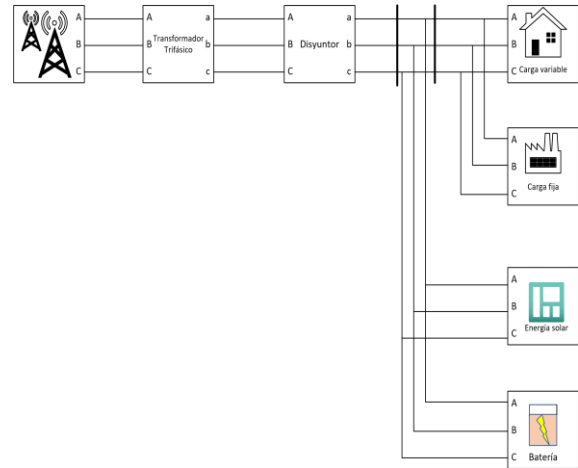


Figura 5. Diagrama de la Micro-red.

Para ello, se considerarán múltiples criterios de evaluación, como el consumo solar directo, el almacenamiento de suministro, la alimentación de la red, la generación fotovoltaica y el cambio de demanda máxima. Mediante simulaciones en MATLAB®, se verificarán los resultados obtenidos, lo que permitirá obtener información relevante para la implementación de sistemas de manejo de energía eficiente y sostenible en MR eléctricas.

### 4.1 Algoritmo cuadrático

La programación cuadrática (PC) es una rama de la optimización matemática que se

centra en la resolución de problemas para la minimización o maximización de una función cuadrática sujeta a restricciones lineales y posiblemente no lineales. A continuación observamos las variables con las que trabajaremos en la tabla 2 [60].

Tabla 2. Variables del algoritmo cuadrático

Simbología	Descripción	Unidad
<b>N</b>	Número de intervalos de tiempo	-
<b>Dt</b>	Duración de cada intervalo de tiempo	Horas
<b>P_pv</b>	Potencia generada por el panel fotovoltaico	kW
<b>P_load</b>	Potencia de la carga demandada	kW
<b>E_init</b>	Energía inicial en la batería	kWh
<b>Cost</b>	Costo de la electricidad de la red	\$/kWh
<b>FinalWeight</b>	Ponderador para la energía final en la batería	-
<b>batteryMinMax.Pmin</b>	Límite mínimo de potencia de la batería	kW
<b>batteryMinMax.Pmax</b>	Límite máximo de potencia de la batería	kW
<b>batteryMinMax.Emin</b>	Límite mínimo de energía de la batería	kWh
<b>batteryMinMax.Emax</b>	Límite máximo de energía de la batería	kWh
<b>PgridV</b>	Potencia de la red eléctrica en cada intervalo de tiempo	kW
<b>PbattV</b>	Potencia manejada por la batería en cada intervalo	kW
<b>EbattV</b>	Energía de la batería en cada intervalo de tiempo	kWh

En la tabla 3, el problema busca encontrar los valores de PgridV, PbattV, EbattV que cumplen con las restricciones dadas y minimizan la función objetivo.

Tabla 3. Pseudocódigo del algoritmo cuadrático

Algoritmo de Optimización Cuadrático	
<b>Inicio</b>	
Paso 1:	Entradas / Salidas Entradas → P_pv, P_load, E_init. Salidas → batteryMinMax.Pmin, batteryMinMax.Pmax, batteryMinMax.Emin, batteryMinMax.Emax
Paso 2:	Función objetivo
prob.ObjectiveSense = 'minimize';	

```
prob.Objective = dt * Cost' * PgridV -
FinalWeight * EbattV (N) + Var^2;
prob.ObjectiveSense = 'minimize';
```

Paso 3: Inicializar  
N, dt.

Paso 4: Optimización del sistema  
prob.Constraints.loadBalance = P\_pv  
+ PgridV + PbattV == Pload;

Paso 5 Restricciones  
if exitflag <= 0  
PgridV = zeros (N, 1);  
PbattV= zeros (N, 1);  
EbattV = zeros (N, 1);  
else  
PgridV = round(values.PgridV\*10);  
PbattV= round (values.PbattV\*10);  
EbattV= round (values.EbattV\*10);

Paso 6: Resultados  
PgridV; PbattV; EbattV

**Fin**

## 4.2 Algoritmo lineal

Tabla 4. Variables del algoritmo lineal.

Simbología	Descripción	Unidad
<b>N</b>	Número de intervalos de tiempo	-
<b>dt</b>	Duración de cada intervalo de tiempo	Horas
<b>P_pv</b>	Potencia generada por el panel fotovoltaico	kW
<b>P_load</b>	Potencia de la carga demandada	kW
<b>E_init</b>	Energía inicial en la batería	kWh
<b>Cost</b>	Costo de la electricidad de la red	\$/kWh
<b>FinalWeight</b>	Ponderador para la energía final en la batería	-
<b>batteryMinMax.Pmin</b>	Límite mínimo de potencia de la batería	kW
<b>batteryMinMax.Pmax</b>	Límite máximo de potencia de la batería	kW
<b>batteryMinMax.Emin</b>	Límite mínimo de energía de la batería	kWh
<b>batteryMinMax.Emax</b>	Límite máximo de energía de la batería	kWh
<b>PgridV</b>	Potencia de la red eléctrica en cada intervalo de tiempo	kW
<b>PbattV</b>	Potencia manejada por la batería en cada intervalo	kW
<b>EbattV</b>	Energía de la batería en cada intervalo de tiempo	kWh

Este enfoque ofrece la ventaja de proporcionar soluciones óptimas, lo que permite maximizar la eficiencia energética y minimizar los costos en la gestión de energía de la MR. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la programación lineal tiene limitaciones en términos de complejidad y escalabilidad, por lo que su aplicación puede estar restringida a MR con variables presentadas y restricciones relativamente simples que se indican en la tabla 4 [62]

En la tabla 5, el problema busca encontrar los valores de PgridV, PbattV, EbattV que cumplen con las restricciones dadas y minimizan la función objetivo.

Tabla 5. Pseudocódigo del algoritmo lineal

<b>Algoritmo de Optimización Lineal</b>	
<b>Inicio</b>	
Paso 1:	Entradas / Salidas Entradas → P_pv, P_load, E_init. Salidas → batteryMinMax.Pmin, batteryMinMax.Pmax, batteryMinMax.Emin, batteryMinMax.Emax
Paso 2:	Función objetivo  prob.ObjectiveSense = 'minimize'; prob.Objective = dt * Cost' * PgridV - FinalWeight * EbattV (N); prob.ObjectiveSense = 'minimize';
Paso 3:	Inicializar N, dt
Paso 4:	Optimización del sistema prob.Constraints.loadBalance = P_pv + PgridV + PbattV == Pload;
Paso 5:	Restricciones if exitflag <= 0 PgridV = zeros (N, 1); PbattV = zeros (N, 1); EbattV = zeros (N, 1); else PgridV = (values.PgridV); PbattV = (values.PbattV); EbattV = (values.EbattV);
Paso 6:	Resultados PgridV; PbattV; EbattV
<b>Fin</b>	

### 4.3 Algoritmo heurístico

La ventaja de la heurística radica en su capacidad para abordar problemas complejos y adaptarse tanto a diversas condiciones como restricciones de la MR. Aunque las soluciones obtenidas a través de la heurística pueden no ser óptimas, permiten tomar decisiones rápidas y eficientes en la gestión de energía, lo que resulta especialmente beneficioso en MR con características dinámicas y variables mostradas en la tabla 6 [64].

Tabla 6. Variables del algoritmo heurístico

<b>Simbología</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
<b>SoC_inicial</b>	Estado de carga inicial de la batería	%
<b>SoC_min</b>	Estado de carga mínimo permitido de la batería	%
<b>SoC_max</b>	Estado de carga máximo permitido de la batería	%
<b>cons_carga</b>	Consumo de la carga	kW
<b>pot_carga</b>	Potencia de la carga demandada	kW
<b>pot_renov</b>	Potencia generada por fuentes renovables	kW
<b>pot_red</b>	Potencia suministrada por la red eléctrica	kW
<b>cost_red</b>	Costo de la electricidad de la red	\$/kW h
<b>cost_renov</b>	Costo de la electricidad renovable	\$/kW h
<b>eficiencia_bateria</b>	Eficiencia de la batería	%
<b>Microgrid_Voltag</b>	Voltaje de la micro-red	V
<b>Power</b>	Potencia eléctrica total	kW
<b>Ess_SoC</b>	Estado de carga del sistema de almacenamiento de energía	%
<b>Price</b>	Precio de la energía	\$/kW h

En la tabla 7, el problema busca encontrar los valores de PgridV, PbattV, EbattV que cumplen con las restricciones dadas y minimizan la función objetivo.

Tabla 7. Pseudocódigo del algoritmo heurístico

<b>Algoritmo de Optimización Heurístico</b>	
<b>Inicio</b>	
Paso 1:	Entradas / Salidas Entradas → SoC_inicial, SoC_min, SoC_max, cons_carga. Salidas → pot_carga, pot_renov, pot_red, cost_red, cost_renov.
Paso 2:	Función objetivo  prob.ObjectiveSense = 'minimize'; prob.Objective = dt * Cost * PgridV - FinalWeight * EbattV (N) + Var^2; prob.ObjectiveSense = 'minimize';
Paso 3:	Inicializar SoC_max) * efi_bat.
Paso 4:	Optimización del sistema Si dif < 0: pot_nec= con_carg - pot_renov cost_uti_red = pot_nec * cost_red (SoC_actual = SoC_inicial - pot_nec / efi_bat
Paso 5	Restricciones  Si SoC_actual < SoC_min: (pot_carg_ajus = pot_carg - ((SoC_min - SoC_actual) * efi_bat)) -cost_car_bat = pot_carg_ajus * costo_red) Si SoC_min <= SoC_actual <= SoC_max cost_uti_reno = 0)
Paso 6:	Resultados poten_nec; cost_uti_red cost_car_bat cost_des_bat
<b>Fin</b>	

## 5 Caso de estudio y resultados

La MR presente es una implementación de un sistema de gestión de energía (EMS) tomado del [62], para una MR. La MR se compone de múltiples recursos de generación de energía, como paneles solares y baterías que pueden estar conectadas o desconectadas de la red principal.

El sistema de gestión de energía (EMS) se encarga de mejorar el uso de energía útil disponible en la MR. Utiliza técnicas de optimización y algoritmos para tomar decisiones eficientes sobre la generación, almacenamiento y consumo de energía. El objetivo es maximizar la eficiencia energética, minimizar los costos y garantizar un suministro confiable de energía.

Se destacan también las capacidades de reserva de energía, a través de baterías, que ayudan a mantener la estabilidad y la eficiencia del sistema al almacenar el excedente de energía para su uso durante la demanda pico o cuando la generación es baja.

Esta MR está diseñada para proporcionar energía a una carga, con la ventaja de poder operar de forma autónoma para mejorar la resiliencia y la sostenibilidad del suministro de energía.

### 5.1 Análisis de resultados

La gestión de la MR se realiza a través de un sistema de control inteligente que optimiza el flujo de energía entre sus componentes, manteniendo el equilibrio entre la producción como en el consumo, garantizando así una operación óptima y la reducción de costos energéticos.

En la figura 6, se aprecia los resultados de voltaje, SoC y precio de la simulación heurística, lineal y cuadrática. En la parte A de la figura 6, se muestra la variación del voltaje en la MR a lo largo del tiempo. El voltaje se mantiene relativamente constante y dentro de un rango estrecho, lo que indica estabilidad en el sistema. No obstante, se observan fluctuaciones menores, debido a variaciones de carga o perturbaciones en la red. La curva de la línea Lineal muestra un comportamiento ligeramente más estable que las otras dos, lo que podría indicar una

mejor capacidad para mantener el voltaje dentro de los límites deseados.

En la parte B de la figura 6, se aprecia el estado de carga varía a lo largo del tiempo, lo cual es típico en sistemas que dependen de fuentes de energía intermitentes o en aplicaciones que tienen demandas de carga variables. La línea Heurística alcanza el pico más alto, lo que sugiere una estrategia de carga más agresiva, mientras que la Lineal muestra un SOC más conservador y posiblemente más eficiente a lo largo del tiempo. La línea Cuadrática parece tener la

menor variabilidad, lo que es indicativo de una estrategia de balance entre eficiencia y disponibilidad de energía.

En la parte C de la figura 6, se indica el precio de la energía en centavos por kilovatio hora. Es evidente una gran variación representada por las tres líneas muestran un pico significativo. Esto podría estar reflejando una tarifa de demanda dinámica o una respuesta a la escasez de energía o exceso de demanda.

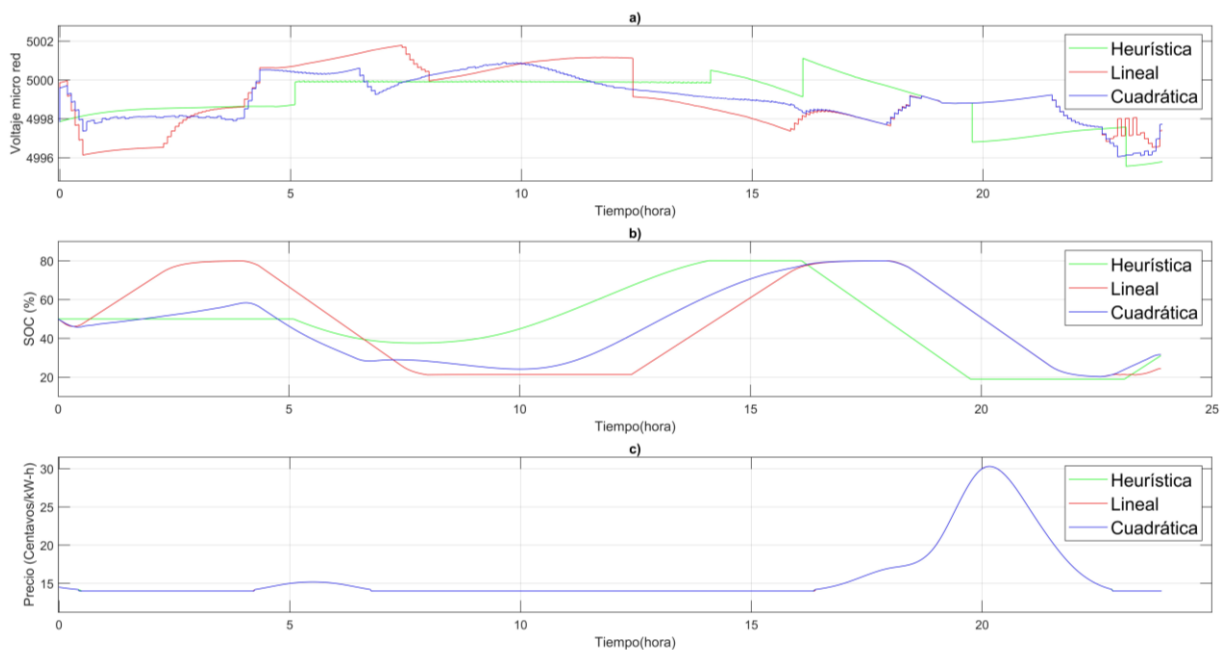


Figura 6. Voltaje, SOC y precio de la comparativa.

En la figura 7, se aprecia los costos y uso de la red de la simulación heurística, lineal, sin almacenamiento y cuadrática. En la parte A de la figura 7, se ilustra la variación de costos en dólares a lo largo del tiempo, medido en horas. Se comparan cuatro estrategias o condiciones: Heurística, Lineal, Sin almacenamiento y Cuadrática.

A primera vista, todas las estrategias comienzan con costos similares, pero a medida que pasa el tiempo, se observan divergencias significativas. La estrategia de Sin almacenamiento es la más costosa, especialmente hacia las últimas horas, lo

que sugiere que la falta de almacenamiento puede llevar a mayores costos operativos o de adquisición de energía.

La estrategia Cuadrática y Lineal muestran comportamientos similares hasta aproximadamente la mitad del período de tiempo, después de lo cual Lineal logra mantener los costos más bajos. Esto podría indicar una gestión más eficiente de los recursos o una optimización de las tarifas de energía. La estrategia Heurística se mantiene en un rango intermedio, lo que podría reflejar un enfoque equilibrado o una dependencia de reglas basadas en la

experiencia más que en la optimización matemática.

En la parte B de la figura 7, se muestra el uso de la red eléctrica en kilovatios hora. Es notable que todas las estrategias siguen un patrón similar, con el uso de la red incrementando hacia el final del período. La estrategia Sin almacenamiento muestra el mayor uso de la red, lo que es coherente con los costos más altos observados en el gráfico anterior e indica que la falta de

almacenamiento conduce a un consumo mayor de recursos externos.

La Lineal tiene el uso más eficiente de la red hacia el final, lo cual es consistente con su perfil de costos más bajo. Esto sugiere que la optimización puede incluir el empleo de energía en momentos de menor demanda o tarifas más bajas. Las estrategias Heurística y Cuadrática muestran una utilización media de la red, con la Cuadrática alcanzando ligeramente un uso más bajo al final del período.

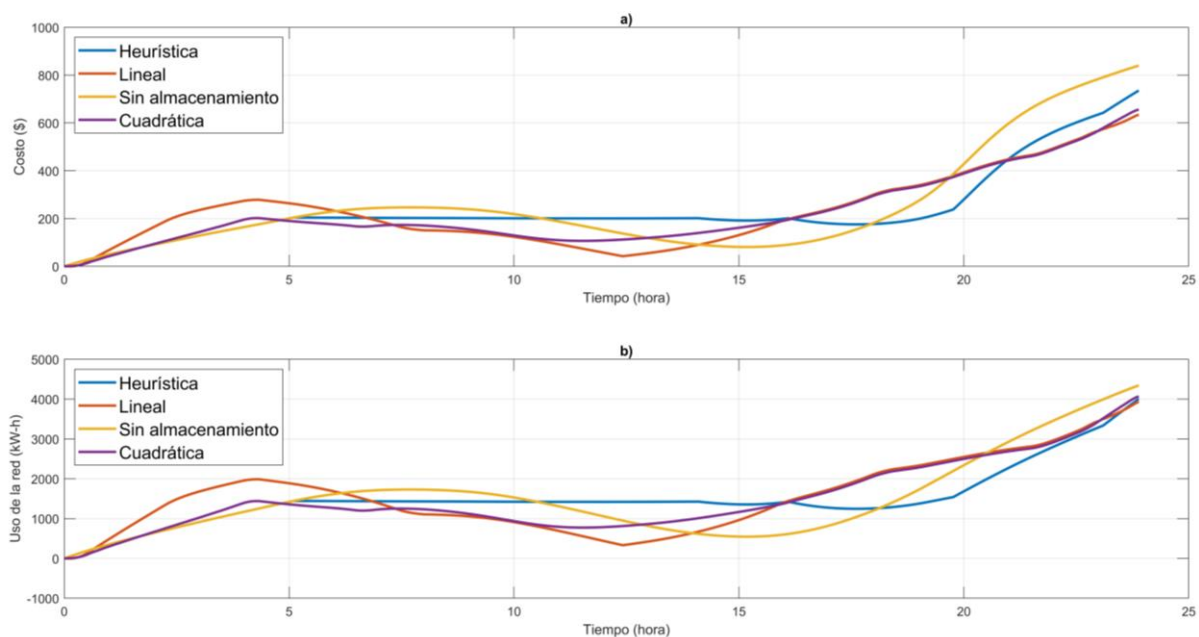


Figura 7. Costos y uso de la red de la comparativa.

**Curva de Panel fotovoltaico:** Esta curva muestra picos significativos de generación de energía, correspondientes a la producción de energía solar a lo largo del día. Los picos altos coinciden con las horas de máxima irradiación solar. La energía generada tiene una caída significativa, posiblemente durante las horas sin luz solar, lo cual es un comportamiento esperado para un panel fotovoltaico.

**Curva de Batería (Heurística, Lineal, Cuadrática):** La estrategia Heurística

muestra un patrón que está basado en reglas predeterminadas o en la experiencia pasada. Esta estrategia tiene momentos de carga y descarga bien definidos, lo que sugiere un enfoque menos dinámico, pero más predecible. La carga de la batería en este caso está programada para ocurrir durante ciertas horas, cuando la generación de energía del panel fotovoltaico es más alta, y la descarga está alineada con los horarios de alta demanda.

La estrategia Lineal está utilizando algoritmos más complejos para determinar el mejor momento para cargar y descargar la batería, en tiempo real. Esta línea muestra una mayor adaptabilidad a las condiciones cambiantes de la red, con fluctuaciones que sugieren una respuesta activa a los precios de la energía, la demanda y la producción. La optimización lineal está maximizando la eficiencia del sistema al reducir la compra de energía cuando es más cara y almacenar energía cuando es más barata o abundante.

La estrategia Cuadrática sigue un modelo matemático específico, lo que está relacionado con un algoritmo que busca un punto óptimo basado en una función de costo cuadrático. Esta curva tiene un patrón distintivo que puede indicar una estrategia que busca equilibrar la carga y descarga en función de múltiples variables. Esto está tratando de minimizar el costo total del sistema, tomando en cuenta tanto el costo de la energía como otros posibles factores, como la vida útil de la batería y la sostenibilidad del sistema.

#### **Curva de Red (Heurística, Lineal, Cuadrática):**

La Red Heurística muestra un comportamiento que está siguiendo un enfoque basado en reglas para la importación y exportación de energía. Las fluctuaciones de esta curva sugieren que el sistema está tratando de responder a las condiciones de la red de una manera programada, alineándose con los patrones de uso conocidos o con señales simples como los precios de la energía.

La Red Lineal es la más dinámica, con cambios significativos que reflejan una estrategia altamente adaptable. Esta curva indica que el sistema está constantemente evaluando tanto el mercado como las condiciones de la red para tomar decisiones en tiempo real sobre la compra y venta de energía. El objetivo es minimizar los costos y también maximizar los ingresos por la venta de energía excedente.

La curva de la Red Cuadrática muestra un comportamiento que es el resultado de una estrategia que intenta minimizar una función de costo cuadrático. Esta estrategia es menos reactiva a los cambios inmediatos y más enfocados en un rendimiento consistente a lo largo del tiempo. La energía está siendo comprada o vendida en un intento de mantener un balance óptimo que no solo considere los costos, sino también otros aspectos como la fiabilidad y la estabilidad de la red a largo plazo.

**Curva de Carga:** Esta curva muestra una demanda de energía constante con ciertos picos, que representan el consumo de energía de una carga o demanda específica dentro del sistema. La curva es relativamente estable comparada con las otras, lo que sugiere que la carga no varía mucho con el tiempo, aunque los picos indican aumentos temporales en el consumo de energía.

En la figura 8, se aprecia los resultados de fuerza del panel, batería, red y carga de las simulaciones heurística, lineal y cuadrática.



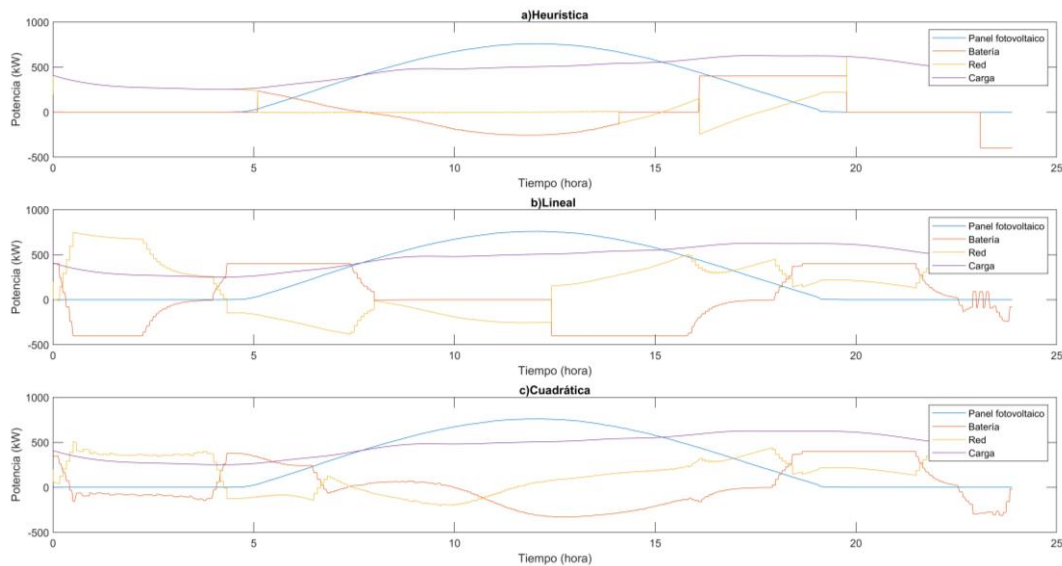


Figura 8. Valores de potencia de la comparativa.

## 5.2 Análisis comparativo

En la tabla 8, presenta una comparativa de costos y optimización porcentuales para los diferentes métodos de programación. El método "Lineal" muestra el costo más bajo con \$631.135, lo que lo hace el más eficiente económicamente entre los presentados.

Tabla 8. Comparativa de costos

Programación	Costo [\$]	Optimización [%]
Heurística	735.741	12.42
Lineal	631.135	24.87
Sin almacenamiento	840.086	0
Cuadrática	656.279	21.88

Sin embargo, cuando se compara con el método "Sin almacenamiento", que tiene el mayor costo y sirve como punto de referencia con una optimización del 0%, el método "Lineal" presenta una optimización del 24.87%. Esto indica que el método "Lineal" logra reducir el costo en un 24.87% comparado con el método "Sin almacenamiento".

Por otro lado, el método "Heurística" presenta un costo de \$735.741, que es aproximadamente un 12.42% menor que el

método "Sin almacenamiento". Este es un ahorro significativo, aunque no tanto como el logrado por el método "Lineal".

El método "Cuadrática" tiene un costo de \$656.279, lo que representa un ahorro del 21.88% en comparación con el método "Sin almacenamiento". Aunque no es tan eficiente como el método de "Lineal", sigue siendo sustancialmente más económico que el método sin almacenamiento.

El método "Sin almacenamiento" tiene el costo más alto, estableciendo la línea de base para la comparación porcentual. Este método, al no contar con almacenamiento de energía, no puede aprovechar la generación de energía renovable de manera óptima, lo que resulta en el mayor costo operativo.

El porcentaje de optimización se compara con la variable que representa el mayor costo, siendo en este caso Sin almacenamiento.

La tabla 9, presenta la comparativa en el uso de la red eléctrica, medido en kilovatios por hora (kw/h), y la optimización asociados para los diferentes métodos de programación.

Tabla 9. Comparativa de uso de la red

Programación	Uso de la red [kw/h]	Optimización [%]
Heurística	4003.59	7.82
Lineal	3931.45	9.48
Sin almacenamiento	4343.32	0
Cuadrática	4068.94	6.32

El método "Sin almacenamiento" registra el uso más alto de la red con 4343.32 kw/h, actuando como el punto de referencia para calcular la optimización porcentual de los otros métodos, por lo tanto, si su optimización es 0%. Este mayor uso indica una falta de optimización en la gestión de energía, ausencia de almacenamiento local, lo que obliga a depender más de la red externa.

El método "Lineal" muestra un uso de la red de 3931.45 kw/h, que es 9.48% menor que el método de referencia. Esto refleja una mejora en la eficiencia a través de la optimización, debido a una mejor gestión del almacenamiento de energía o una utilización más efectiva de fuentes de generación locales. La heurística resulta en un uso de 4003.59 kw/h, que es 7.82%. Aunque es menos eficiente que el método "Lineal", sigue ofreciendo un ahorro significativo en el uso de la red comparado con el método "Sin almacenamiento".

El método "Cuadrática" tiene un uso de la red de 4068.94 kw/h, que es 6.32%. Esto sugiere que, de los métodos listados, el enfoque Lineal es el que mejor equilibra la generación y el consumo de energía dentro de la micro-red, reduciendo la dependencia de la red eléctrica externa.

El porcentaje de optimización se compara con la variable que representa el mayor uso de la red, siendo en este caso Sin almacenamiento.

## 6 Conclusiones

La comparativa de costos revela que la implementación de métodos de optimización y algoritmos cuadráticos en la gestión de la energía de una micro-red conduce a ahorros significativos en comparación con sistemas que no utilizan almacenamiento de energía. El método de "Lineal" resulta ser el más efectivo en el criterio económico, ofreciendo una reducción de costos de casi un cuarto en comparación con el método "Sin almacenamiento", lo que subraya la importancia de aplicar técnicas avanzadas de gestión de energía para optimizar los costos operativos.

En cuanto al análisis del uso de la red eléctrica demuestra que todas las estrategias de gestión energética, incluyendo heurísticas, lineal y programación cuadrática, reducen significativamente la demanda de energía de la red en comparación con la opción de "Sin almacenamiento". El método de "Lineal" proporciona una mejora notable en la autosuficiencia de la red, seguido muy de cerca por el método "Cuadrático", lo que indica que la integración de almacenamiento de energía y la adaptación de estrategias de optimización son fundamentales para reducir la dependencia de la red eléctrica externa y promover la sostenibilidad en sistemas de Micro-redes.

A partir de la obtención de datos anteriores nace la idea de un modelo de negocio en el que intervengan la aplicación de los tres algoritmos antes mencionados, ya que se evidencia la reducción de costos, el aumento de aprovechamiento de la producción energética, dando como resultado el nacimiento de un mercado energético de importación, el cual al ser gestionado eficientemente puede proporcionar beneficios financieros y contribuir a la estabilidad general de la red.

La variedad en las estrategias de manejo de energía muestra un enfoque en la sostenibilidad y confiabilidad a largo plazo del sistema. Al ajustar la carga de las baterías como de la interacción con la red en función de una serie de objetivos tales como: reducir costos, aprovechar tanto la estabilidad de la red como del ciclo de vida de los elementos del sistema. Con esto se logra que el sistema encuentre eficiencia a corto plazo y esta se mantenga sostenible en el tiempo.

### 6.1 Trabajos futuros

Futuros trabajos se propone el desarrollo e integración de algoritmos predictivos de aprendizaje automático que anticipen la generación de energía renovable y los patrones de consumo. Esto permitiría una gestión más proactiva y precisa del almacenamiento de energía y la optimización de la carga en la Micro-red. La integración de tecnologías emergentes de almacenamiento de energía, como el almacenamiento térmico, podría ofrecer vías para mejorar aún más la eficiencia y reducir los costos operativos de las Micro-redes.

Los modelos de negocio sostenibles y el desarrollo de políticas energéticas basadas en los hallazgos de estos métodos de programación pueden proporcionar perspectivas sobre cómo incentivar la adopción pudiera ser otra de las propuestas futuras.

## 7 Referencias

- [1] “IEEE Vision for Smart Grid Controls: 2030 and Beyond Reference Model,” *IEEE Vision for Smart Grid Control: 2030 and Beyond Reference Model*, pp. 1–10, Sep. 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6598993.
- [2] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Águila, J. W. González, G. J. López, and I. Isaac, “Hybrid AC/DC microgrid test system simulation: grid-connected mode,” *Heliyon*, vol. 5, no. 12, p. e02862, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02862>.
- [3] T. Khyzhniak and V. Kolesnyk, “Modeling of power-supply subsystems of microgrid using Petri nets,” in *2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Apr. 2013, pp. 391–395. doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552045.
- [4] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Águila, J. W. Gonzalez, I. Isaac, and J. L. Gabriel, “Hybrid AC / DC microgrid test system simulation: grid-connected mode,” *Heliyon*, vol. 5, no. August, p. 21, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02862.
- [5] L. Ortiz, J. W. González, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-Santiago, “A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids,” *Heliyon*, vol. 6, no. 8, p. e04799, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04799>.
- [6] G. Gonzalo, A. Águila, D. Gonzalez, and L. Ortiz, “Optimum location and sizing of capacitor banks using VOLT VAR compensation in micro-grids,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 03, pp. 465–472, Mar.

- 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082717.
- [7] L. Ortiz-Matos, L. B. Gutierrez-Zea, and J. W. Gonzalez-Sanchez, "A Methodology of Sensor Fault-tolerant Control on a Hierarchical Control for Hybrid Microgrids," *IEEE Access*, vol. 11, no. June, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3279821.
- [8] L. Ortiz, J. W. Gonzalez, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-santiago, "A review on control and fault-tolerant control systems of AC / DC microgrids," *Heliyon*, vol. 6, no. June, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04799.
- [9] G. Cembrano, J. Quevedo, M. Salamero, V. Puig, J. Figueras, and J. Martí, "Optimal control of urban drainage systems. A case study," *Control Eng Pract*, vol. 12, no. 1, pp. 1–9, 2004, doi: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00280-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00280-0).
- [10] K. Wang, Z. Ouyang, R. Krishnan, L. Shu, and L. He, "A Game Theory-Based Energy Management System Using Price Elasticity for Smart Grids," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 11, no. 6, pp. 1607–1616, Dec. 2015, doi: 10.1109/TII.2015.2426015.
- [11] G. Julio, O. Leony, A. Alexander, P. Wilson, and R. Milton, "An Hybrid Algorithm based NARX for Non-Linear Identification and modeling of an AC/DC Hybrid Microgrid simulation," *6th IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting, ETCM 2022*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/ETCM56276.2022.9935724.
- [12] M. Lema, W. Pavon, L. Ortiz, and A. B. Asiedu-asante, "Controller Coordination Strategy for DC Microgrid Using Distributed Predictive Control Improving Voltage Stability," *Energies (Basel)*, pp. 1–15, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15155442>.
- [13] A. Águila, D. González, G. Gutiérrez, and L. Ortiz, "Ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida fotovoltaica en redes de distribución usando PSO," *I+D Tecnológico*, vol. 18, no. 1, pp. 50–68, 2022, doi: <https://doi.org/10.33412/idt.v18.1.3219>.
- [14] J. R. Collaguazo Solís and L. Ortiz Matos, "Control de voltaje óptimo para sistemas de almacenamiento de energía de batería (BESS) acoplados a microrredes de AC utilizando algoritmos LQG," Universidad Politécnica Salesiana, 2020. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19171>
- [15] A. Sturaro, S. Silvestri, M. Conti, and S. K. Das, "Towards a realistic model for failure propagation in interdependent networks," in *2016 International Conference on Computing, Networking and*

- Communications (ICNC)*, Feb. 2016, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICCNC.2016.7440711.
- [16] P. Arboleya *et al.*, “Efficient Energy Management in Smart Micro-Grids: ZERO Grid Impact Buildings,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 1055–1063, Mar. 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2392071.
- [17] J. G. B. Sánchez and L. O. Matos, “Sistema de Detección de Fallos de sensado en tiempo real basado en modelos por Observadores de Modo Deslizantes para el Control Secundario de Micro-redes en AC,” Universidad Central del Ecuador, 2023. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpc ajpcgclefindmkaj/https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/9478d305-34c5-4cdc-bca6-7f3aff5ffafe/content>
- [18] J. Ramírez, L. Ortiz, and A. Aguila, “Passive Control Tolerant to Sensing Faults in dynamic compensation devices - SVC through a hybrid strategy,” *Ingenius*, no. 28, pp. 34–43, 2022, doi: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.03>.
- [19] J. C. Buestán, L. Ortiz Matos, and A. Aguila Telelz, “Control Tolerante a Fallos Multi-Objetivo para BESS acoplados a Micro-redes aisladas basado en IMC y  $H_\infty$ ,” *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 15, no. 5, pp. 41–56, 2022, [Online]. Available: <https://publicaciones.uci.cu/index.php/serie/article/view/1046/912>
- [20] Q. Wang and S. S. Choi, “The Design of Battery Energy Storage System in a Unified Power-Flow Control Scheme,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 1015–1024, Apr. 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2008.917701.
- [21] C. F. Gómez Zalazar and L. Ortiz Matos, “Simulación y validación tipo benchmark de una micro-red híbrida en ac/dc basado en co-simulación piecewise linear electrical circuit simulation (plecs) y matlab/simulink,” Universidad Politécnica Salesiana, 2023.
- [22] A. T. Aguila, L. M. Ortiz, M. Ruiz, and S. Varela, “Optimal Location of Reclosers in Electrical Distribution Systems Considering Multicriteria Decision Through the Generation of Scenarios Using the Montecarlo Method,” *SSRN Electronic Journal*, vol. XX, 2022, doi: 10.2139/ssrn.4121092.
- [23] B. Ramírez, L. Ortiz, and W. Pavón, “Análisis Dinámico Comparativo de Métodos de Detección e identificación de Fallas de Sensado sobre el Control Local de Micro-redes,” *RISTI – Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, vol. E45, no. 44, pp. 1–17, 2021, [Online]. Available: <http://www.risti.xyz/issues/ristie45.pdf>

- [24] S. P. Quishpe Guamantica and L. Ortiz Matos, "Detección de fallas de sensado en convertidores CA/CC para micro-redes híbridas usando análisis de componentes principales (PCA)," Universidad Politécnica Salesiana, 2021. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19791>
- [25] B. E. Ramírez Velasco and L. Ortiz Matos, "Estudio comparativo de métodos de detección e identificación de fallas (FDI) de sensado sobre el Control Local de micro redes Electricas Híbridas AC/DC," Universidad Politécnica Salesiana, 2020. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19170>
- [26] J. L. M. Bastidas and L. O. Matos, "Localización de fallas en microredes eléctricas basado en un modelo Markoviano.," Universidad Politécnica Salesiana, 2018. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15782>
- [27] J. Zhang, Y. Wu, Y. Guo, B. Wang, H. Wang, and H. Liu, "A hybrid harmony search algorithm with differential evolution for day-ahead scheduling problem of a microgrid with consideration of power flow constraints," *Appl Energy*, vol. 183, pp. 791–804, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.035>.
- [28] M. Nemati, M. Braun, and S. Tenbohlen, "Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming," *Appl Energy*, vol. 210, pp. 944–963, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.007>.
- [29] C. Phurailatpam, B. S. Rajpurohit, and L. Wang, "Planning and optimization of autonomous DC microgrids for rural and urban applications in India," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, Elsevier Ltd, pp. 194–204, 2018. doi: [10.1016/j.rser.2017.09.022](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.022).
- [30] M. K. Kiptoo, M. E. Lotfy, O. B. Adewuyi, A. Conteh, A. M. Howlader, and T. Senjyu, "Integrated approach for optimal techno-economic planning for high renewable energy-based isolated microgrid considering cost of energy storage and demand response strategies," *Energy Convers Manag*, vol. 215, Jul. 2020, doi: [10.1016/j.enconman.2020.112917](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112917).
- [31] A. Hussain, V. H. Bui, and H. M. Kim, "Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience," *Applied Energy*, vol. 240, Elsevier Ltd, pp. 56–72, Apr. 15, 2019. doi: [10.1016/j.apenergy.2019.02.055](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.055).
- [32] J. Yan, Y. Zhai, P. Wijayatunga, A. M. Mohamed, and P. E. Campana, "Renewable energy integration with mini/micro-

- grids,” *Applied Energy*, vol. 201. Elsevier Ltd, pp. 241–244, 2017. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.160.
- [33] R. Wallsgrove, J. Woo, J. H. Lee, and L. Akiba, “The emerging potential of microgrids in the transition to 100% renewable energy systems,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14061687.
- [34] T. Adefarati and R. C. Bansal, “Reliability and economic assessment of a microgrid power system with the integration of renewable energy resources,” *Appl Energy*, vol. 206, pp. 911–933, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.228.
- [35] D. R. Cruz Alvarez and L. Ortiz Matos, “Control de sistema de distribución eléctrica usando técnica descubrimiento de patrón (Pattern discovery technique),” Universidad Politécnica Salesiana, 2017. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13588>
- [36] A. F. Falcón Ayala and L. Ortiz Matos, “Confiabilidad en microredes eléctricas AC/DC usando control robusto  $H_\infty$  y estrategias de tolerancia a fallas,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17685>
- [37] S. X. Garrido Jácome and L. Ortiz Matos, “Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de micro-redes eléctricas en DC,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17621>
- [38] L. Ahmethodzic and M. Music, “Comprehensive review of trends in microgrid control,” *Renewable Energy Focus*, vol. 38, pp. 84–96, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.07.003>.
- [39] L. Meng, M. Savaghebi, F. Andrade, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, and M. Graells, “Microgrid central controller development and hierarchical control implementation in the intelligent microgrid lab of Aalborg University,” in *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Mar. 2015, pp. 2585–2592. doi: 10.1109/APEC.2015.7104716.
- [40] N.-M. Zografou-Barredo, C. Patsios, I. Sarantakos, P. Davison, S. L. Walker, and P. C. Taylor, “MicroGrid Resilience-Oriented Scheduling: A Robust MISOCP Model,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 12, no. 3, pp. 1867–1879, May 2021, doi: 10.1109/TSG.2020.3039713.
- [41] J. Fossati, “Revisión bibliográfica sobre micro redes inteligentes,” *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, Jan. 2011.
- [42] J. Guacaneme, D. Velasco, and C. Trujillo, “REVISIÓN DE LAS

- CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA APLICACIONES EN MICRO REDES,” *Información tecnológica*, vol. 25, pp. 175–188, Jan. 2013, doi: 10.4067/S0718-07642014000200020.
- [43] M. M. Saidu, S. P. Jaiswal, K. Jayaswal, S. Mitra, and V. S. Bhadoria, “A survey on: Automation of micro grid and micro distributed generation,” *Mater Today Proc*, vol. 49, pp. 3192–3196, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.404>.
- [44] F. A. Urgiles Navarrete and L. Ortiz Matos, “Estrategia de identificación dinámica no lineal basada en NARX para fuentes de generación distribuida acopladas electrónicamente a micro – redes AC/DC,” Universidad Politécnica Salesiana, 2020. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18892>
- [45] F. Urgiles, L. Ortiz, and A. Aguila, “Estrategia de identificación no-lineal para Fuentes de Generación Distribuida acopladas electrónicamente a Micro-redes en CA / CC basada en NARX,” *RISTI – Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, no. E48, pp. 576–593, 2021, [Online]. Available: <http://www.risti.xyz/issues/ristie48.pdf>
- [46] L. Ortiz, L. B. Gutiérrez, J. W. González, and A. Águila, “A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets,” *Heliyon*, vol. 6, no. March, p. 18, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03559.
- [47] L. Ortiz Matos, L. B. Gutierrez Zea, J. W. González Sanchez, and A. Aguila Tellez, “An ARX-Petri Nets algorithm for Active Identification of an AC / DC Microgrid Simulation,” in *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, Medellín, Colombia: IEEE, 2019, p. 6. doi: 10.1109/CCAC.2019.8921191.
- [48] S. I. Freire Piedra and L. Ortiz Matos, “Modelado y simulación de un sistema automático de adquisición de datos en centrales hidroeléctricas pequeñas,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8065>
- [49] L. Ortiz, L. B. Gutiérrez, J. W. González, and A. Águila, “A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets,” *Heliyon*, vol. 6, no. 3, p. e03559, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03559>.
- [50] L. O. Matos, L. B. Gutiérrez, J. W. G. Sánchez, and A. A. Téllez, “An ARX-Petri Nets algorithm for Active Identification of an AC/DC Microgrid Simulation,” in *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic*



- Control (CCAC)*, Oct. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/CCAC.2019.8921191.
- [51] A. A. Hassan, S. Bavanitha, C. Goyal, and D. Daphne Miriam, “Simulation and modelling of micro-grid with energy storage system,” *Mater Today Proc*, vol. 33, pp. 4536–4541, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.057>.
- [52] Y. Wang and Y. Xiang, “Photovoltaic-storage energy system management considering wireless data communication,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 267–273, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.152>.
- [53] J. Prasad, T. Jain, N. Sinha, and S. Rai, “Load Shifting Based DSM Strategy for Peak Demand Reduction in a Microgrid,” in *2020 International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET)*, Jul. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICEFEET49149.2020.9186983.
- [54] A. Sinha and M. De, “Load shifting technique for reduction of peak generation capacity requirement in smart grid,” in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, Jul. 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853528.
- [55] S. Said, A. Massoud, M. Benammar, and S. Ahmed, “A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox,” *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 6, pp. 1965–1975, Jan. 2012.
- [56] Z. Ullah, S. Wang, G. Wu, M. Xiao, J. Lai, and M. R. Elkadeem, “Advanced energy management strategy for microgrid using real-time monitoring interface,” *J Energy Storage*, vol. 52, p. 104814, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104814>.
- [57] J.-W. Ni, M.-J. Li, T. Ma, W. Wei, and Z. Li, “The configuration optimized design method based on real-time efficiency for the application of vanadium redox flow battery in microgrid,” *Energy Convers Manag*, vol. 267, p. 115899, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115899>.
- [58] W. A. Omran, M. Kazerani, and M. M. A. Salama, “Investigation of Methods for Reduction of Power Fluctuations Generated From Large Grid-Connected Photovoltaic Systems,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 1, pp. 318–327, Mar. 2011, doi: 10.1109/TEC.2010.2062515.
- [59] Y. Yang, C. Menictas, S. Bremner, and M. Kay, “A Comparison Study of Dispatching Various Battery Technologies in a Hybrid PV and Wind Power Plant,” in *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Aug. 2018, pp. 1–5. doi:

10.1109/PESGM.2018.8585803.

<http://hdl.handle.net/10584/11034>

- [60] D. De Posgrado, “Evaluación de un sistema de gestión de energía en una microrred aislada basado en un problema de optimización no lineal,” 2022. Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9799>
- [61] F. Soria Álvarez, “Optimización y control predictivo basado en modelos de una microrred con recursos de generación renovable,” 2022. Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0002-7322-5898>
- [62] J. S. Sarda, K. Lee, H. Patel, N. Patel, and D. Patel, “Energy Management System of Microgrid using Optimization Approach,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 9, pp. 280–284, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.049>.
- [63] C. Margarita, “OPTIMIZACIÓN LINEAL MULTIOBJETIVO: ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO DE SOLUCIÓN,” 2022. Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12773/14757>
- [64] Juan David Acosta Dangond, “Optimización del Flujo de Energía en Instituciones de Asistencia Médica Utilizando Técnicas Heurísticas,” 2022, Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available:

## 7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 10. Matriz de estado del arte.

ESTUDIO DINÁMICO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA GESTIÓN DE ENERGÍA - EMS EN MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN AC.																												
ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA											
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN AC	MODELADO DE LA MICRO-RED	MODELOS DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE ENERGÍAS	MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA GESTIÓN DE ENERGÍA	MODELADO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA	MODELADO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA DE LA	ANÁLISIS COMPARATIVO DE TRES MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA GESTIÓN ÓPTIMA DE ENERGÍA EMS	OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE ENERGÍA EN MICRO REDES ELÉCTRICAS	CONSUMO SOLAR DIRECTO	MÉTODO HEURÍSTICO Y PROGRAMACIÓN CUADRÁTICA EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE ENERGÍA EN MICRO REDES ELÉCTRICAS	EFICACIA Y EFICIENCIA DE LA PROGRAMACIÓN	FALTA DE EVALUACIONES DE CONSUMO SOLAR DIRECTO	FALTA DE ALMACENAMIENTO DE SUMINISTRO	FALTA DE ALIMENTACIÓN DE LA MICRORED	MÉTODO HEURÍSTICO Y PROGRAMACIÓN CUADRÁTICA EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE ENERGÍA EN MICRO REDES ELÉCTRICAS	ALGORITMO OPTIMIZACIÓN	PROGRAMACIÓN CUADRÁTICA	SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA (EMS)	ESTRATEGIA DE OPERACIÓN DE LA MICRO-RED	IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN EN EL SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA EN UNA MICRORED.	MAXIMIZAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA, MINIMIZAR LOS COSTOS Y GARANTIZAR UN SUMINISTRO CONFIABLE DE ENERGÍA	MEJORA LA EFICIENCIA Y LA CONFIABILIDAD DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN Y ESTRATEGIAS HEURÍSTICAS	MINIMIZAR EL USO DE LA RED CUANDO LOS COSTOS DE LA ENERGÍA SON ALTOS Y A MAXIMIZAR EL USO DE LA ENERGÍA ALMACENADA O GENERADA		
1	2013	A critical and comparative review of energy management strategies for microgrids	1	✗	✗		✗	✗								✗				✗							✗	
2	2019	Hybrid AC/DC microgrid test system simulation: grid-connected mode	1		✗					✗		✗											✗					
3	2013	Modeling of power-supply subsystems of microgrid using Petri nets	1		✗		✗						✗					✗										✗
4	2020	Energy Management in Microgrids with Renewable Energy Sources: A Literature Review	1	✗	✗					✗						✗				✗			✗		✗			





## ESTUDIO DINÁMICO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA GESTIÓN DE ENERGÍA - EMS EN MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN AC.

24	2011	Revisión bibliográfica sobre micro redes inteligentes	2	☒	☒						☒							☒	☒	☒	
25	2013	REVISION DE LAS CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA APLICACIONES EN MICRO REDES	3	☒	☒						☒							☒	☒		
26	2020	A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets	2	☒																	
27	2019	An ARX-Petri Nets algorithm for Active Identification of an AC/DC Microgrid Simulation	2	☒	☒																
28	2020	Simulation and modelling of micro-grid with energy storage system	4																		
29	2022	Photovoltaic-storage energy system management considering wireless data communication	3																		
30	2020	Load Shifting Based DSM Strategy for Peak Demand Reduction in a Microgrid	5																		
31	2016	Load shifting technique for reduction of peak generation capacity requirement in smart grid	3	☒	☒																
32	2012	A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox	2																		
33	2022	The configuration optimized design method based on real-time efficiency for the application of vanadium redox flow battery in microgrid	1	☒	☒																
34	2011	Investigation of Methods for Reduction of Power Fluctuations Generated From Large Grid-Connected Photovoltaic Systems	2																		



## ESTUDIO DINÁMICO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA GESTIÓN DE ENERGÍA - EMS EN MICRO-REDES ELÉCTRICAS EN AC.

45	2022	Optimización y control predictivo basado en modelos de una microrred con recursos de generación renovable	2		✗		✗	✗		✗			✗				✗		✗	✗	✗	✗				
46	2022	Optimización del Flujo de Energía en Instituciones de Asistencia Médica Utilizando Técnicas Heurísticas	3			✗		✗	✗		✗			✗					✗							
CANTIDAD:				18	29	8	9	13	10	7	19	4	10	13	3	4	15	5	14	3	11	8	15	17	13	14



7.2 Resumen de Indicadores

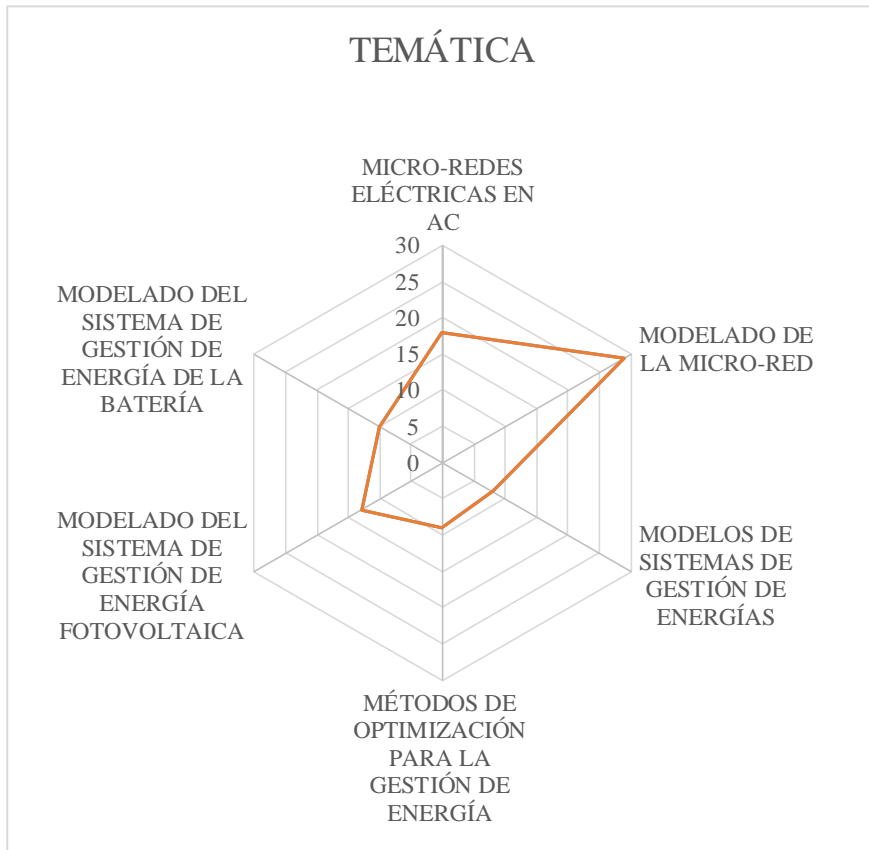


Figura 9. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

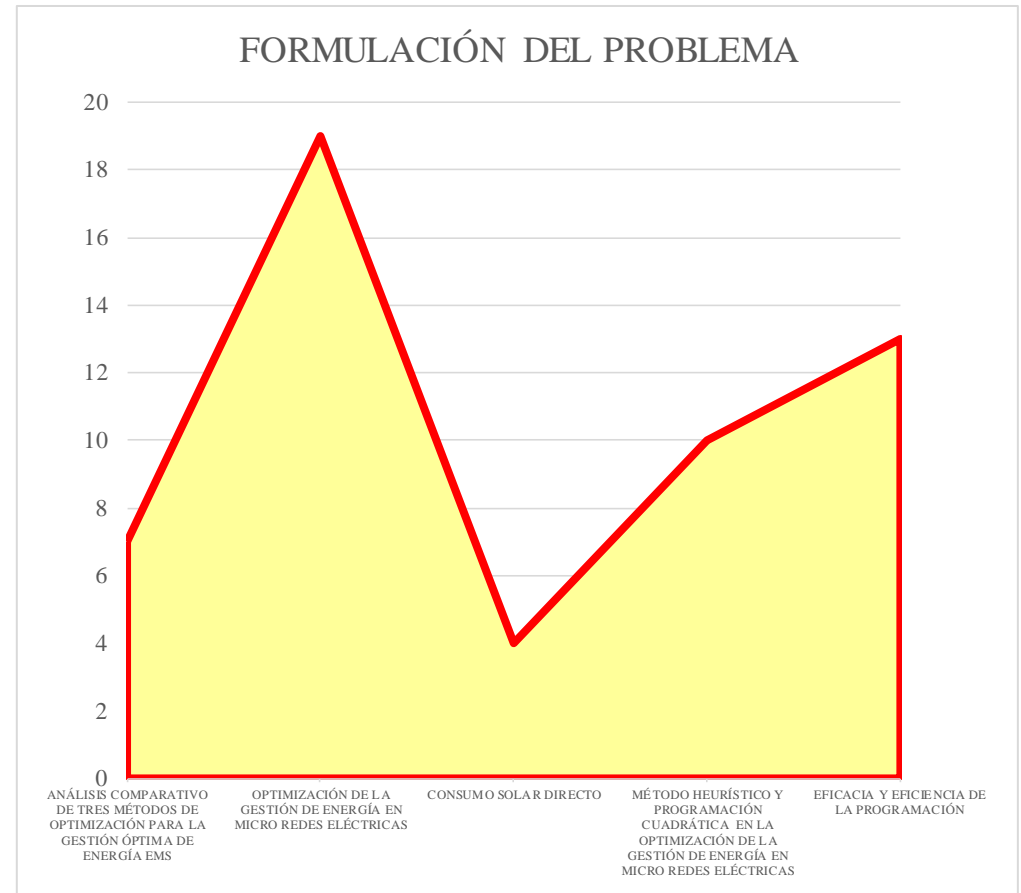


Figura 10. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

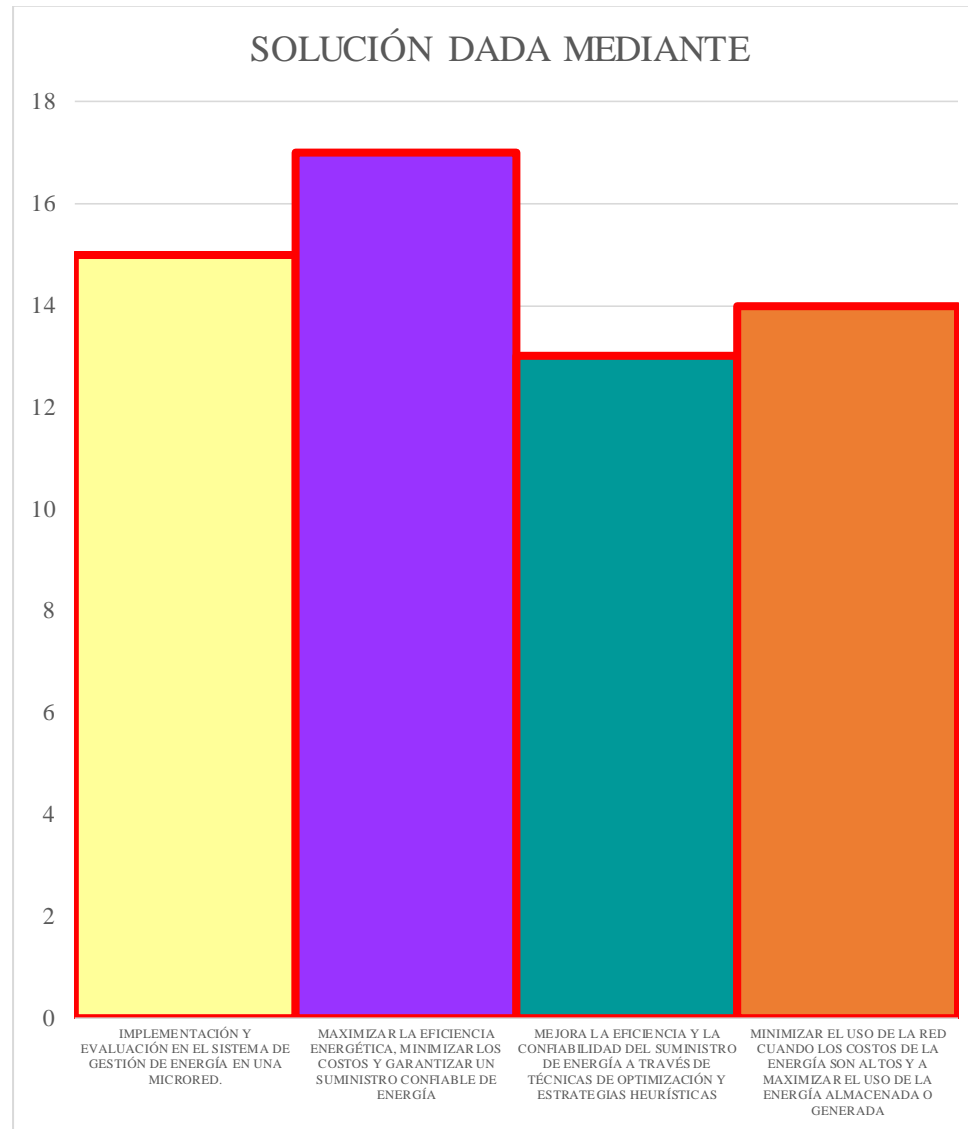


Figura 11. Indicador de solución - Estado del arte.