

GESTIÓN ESTRATÉGICA DE COSTOS EN MICRORREDES INTELIGENTES: UN ENFOQUE DE SOSTENIBILIDAD BASADO EN ALGORITMOS GENÉTICOS

**STRATEGIC COST MANAGEMENT IN SMART MICROGRIDS:
A SUSTAINABILITY-DRIVEN APPROACH USING GENETIC ALGORITHMS**

Recibido: octubre 2024

Evaluado: noviembre 2024

Aprobado: diciembre 2024

Joseph Sosapanta Salas¹

Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2035-9323>

Ángela Melo Hidalgo²

Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5994-571X>

¹ Magíster en Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia.
Correo electrónico: j.sosapantasa@pascualbravo.edu.co

² Magíster en Administración, Universidad Nacional de Colombia.
Correo electrónico: mayellis.melo@unad.edu.co

RESUMEN

Introducción: Las microrredes, concebidas como sistemas autónomos de distribución de energía, requieren un controlador avanzado capaz de decidir de forma autónoma las fuentes óptimas de generación para alcanzar la autosuficiencia energética. **Metodología:** Esta investigación profundiza en la optimización integral de una microrred mediante la aplicación de algoritmos genéticos, considerando simultáneamente variables económicas y ambientales dentro de un enfoque de gestión sostenible. Se analizan dos métodos de reproducción –mutación y cruce– y su influencia en el desempeño del sistema. La mutación introduce cambios aleatorios que simulan la incorporación de innovaciones, mientras que el cruce combina material genético de configuraciones exitosas para generar soluciones potencialmente superiores. **Resultados:** Se evaluaron dos métodos de supervivencia –selección aleatoria y elitismo–, observándose que la selección aleatoria aporta diversidad e imprevisibilidad, mientras que el elitismo preserva las soluciones más eficientes. Los resultados demuestran que las mutaciones aleatorias incrementan la energía excedente producida, mientras que la combinación de mutación y elitismo mejora la eficiencia del sistema. Asimismo, el cruce combinado con elitismo arroja el mejor rendimiento al reproducirse solo con el cromosoma más destacado de cada generación. Estos hallazgos aportan evidencia sobre la aplicabilidad de los algoritmos genéticos en la gestión estratégica de costos y en la optimización sostenible de microrredes inteligentes.

Palabras clave: gestión sostenible, microrredes, optimización de costos, algoritmos genéticos, estrategias de gestión, transición energética

ABSTRACT

Introduction: Microgrids, conceived as autonomous power distribution systems, require an advanced controller capable of autonomously determining optimal generation sources to achieve energy self-sufficiency. **Methodology:** This study delves into the comprehensive optimization of a microgrid through the application of genetic algorithms, simultaneously considering economic and environmental variables within a framework of sustainable management. Two reproduction methods—mutation and crossover—were analyzed for their impact on system performance. Mutation introduces random variations that emulate the introduction of innovations, while crossover combines genetic material from successful configurations to generate potentially superior solutions. **Results:** Two survival methods—random selection and elitism—were evaluated, revealing that random selection enhances diversity and unpredictability, whereas elitism preserves the most

efficient solutions. The results show that random mutations increase the amount of excess energy produced, while combining mutation with elitism improves system efficiency. Likewise, crossover combined with elitism yields the best performance by reproducing only with the most elite chromosome of each generation. These findings provide evidence of the applicability of genetic algorithms in strategic cost management and sustainable optimization of smart microgrids.

Keywords: **sustainable** management, microgrids, cost optimization, genetic algorithms, management strategies, energy transition

INTRODUCCIÓN

En la vanguardia de la transición hacia una sociedad más sostenible y resiliente ante los desafíos climáticos actuales, las microrredes emergen como una solución prometedora para la descentralización de la generación de energía. Estas redes, caracterizadas por su capacidad para operar de manera autónoma y su adaptabilidad a fuentes de energía renovables, se presentan como un componente esencial en el esfuerzo por reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental de la producción energética (Rúa et al., 2017) (Ostos et al., 2017). Sin embargo, la optimización de su desempeño, especialmente en términos de costos operativos y eficiencia energética, representa un desafío complejo debido a la variabilidad de las fuentes renovables y las demandas energéticas.

Este estudio aborda este desafío mediante la aplicación de algoritmos genéticos, una técnica de optimización que simula los procesos de selección natural y mutación genética para encontrar soluciones óptimas en la configuración y operación de microrredes. El objetivo es doble: por un lado, minimizar los costos operativos y, por otro, promover el uso eficiente de fuentes de energía renovables, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental.

A partir de la hipótesis que plantea la implementación de algoritmos genéticos como una mejora significativa tanto en la eficiencia económica como ambiental de las microrredes, este estudio ofrece un acercamiento a metodologías innovadoras para la optimización de estos sistemas. Se desarrolla una investigación cuantitativa que incluye la comparación de distintas estrategias de

reproducción genética (mutación y cruce) y supervivencia (selección aleatoria y elitismo) para evaluar su impacto en la optimización de la microrred.

La importancia de este trabajo radica no solo en su potencial para mejorar la gestión y operación de las microrredes, sino también en su contribución al avance hacia sistemas energéticos más sostenibles y menos dependientes de combustibles fósiles. Al establecer un puente entre el conocimiento general sobre microrredes y el enfoque específico de los algoritmos genéticos para su optimización, este estudio se sitúa en la intersección entre la ingeniería energética y la sostenibilidad ambiental, ofreciendo perspectivas relevantes para investigadores, diseñadores de sistemas energéticos y responsables de políticas públicas en el sector.

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Las microrredes son esenciales en las zonas rurales, ya que descentralizan la generación de energía, ofrecen resiliencia y garantizan un acceso constante. Su adaptabilidad a fuentes locales sostenibles reduce la dependencia de los combustibles fósiles. Además, al impulsar la participación comunitaria, fortalecen la autosuficiencia y generan oportunidades económicas, destacándose como impulsores clave del desarrollo sostenible (Rúa et al., 2017) (Ostos et al., 2017).

En este sentido, las energías renovables son fundamentales para reducir las emisiones al sustituir los combustibles fósiles. La adopción de fuentes como la solar y la eólica no solo minimiza la dependencia de recursos agotables, sino que también mitiga las emisiones, fomenta la innovación y genera empleo. Esta transición no solo preserva el medio ambiente, sino que también fortalece la seguridad energética al descentralizar la producción y promover una sociedad más limpia y sostenible (Umbarila et al., 2015). Cuidar el medio ambiente es esencial para la sostenibilidad, la preservación de los recursos, la mitigación del cambio climático, la protección de la biodiversidad y el impulso de una economía sostenible. Esta acción representa además una responsabilidad intergeneracional orientada a asegurar un futuro habitable y equitativo (Vargas et al., 2017).

Las complejidades de la optimización de las microrredes pueden abordarse mediante la aplicación de técnicas de inteligencia computacional. Se examinan dos métodos de reproducción (mutación y cruce), junto con dos métodos de supervivencia (selección aleatoria y elitismo), con el propósito de identificar la combinación más eficaz para obtener resultados óptimos

(Ferreira et al., 2020). Al evaluar y comparar sistemáticamente estos métodos de reproducción y supervivencia, la investigación busca determinar la combinación más efectiva que maximice la eficiencia y adaptabilidad de la microrred (Donado et al., 2020). Comprender la interacción entre estos elementos resulta crucial para desarrollar controladores de microrredes resistentes y de alto rendimiento, contribuyendo al avance de sistemas de distribución de energía sostenibles y autosuficientes.

Los sistemas de generación de energía presentan diversas consecuencias socioeconómicas y ambientales, independientemente de la tecnología específica empleada, y en la Figura 1 se muestra una configuración típica de una microrred (Andrade & Olaya, 2023).

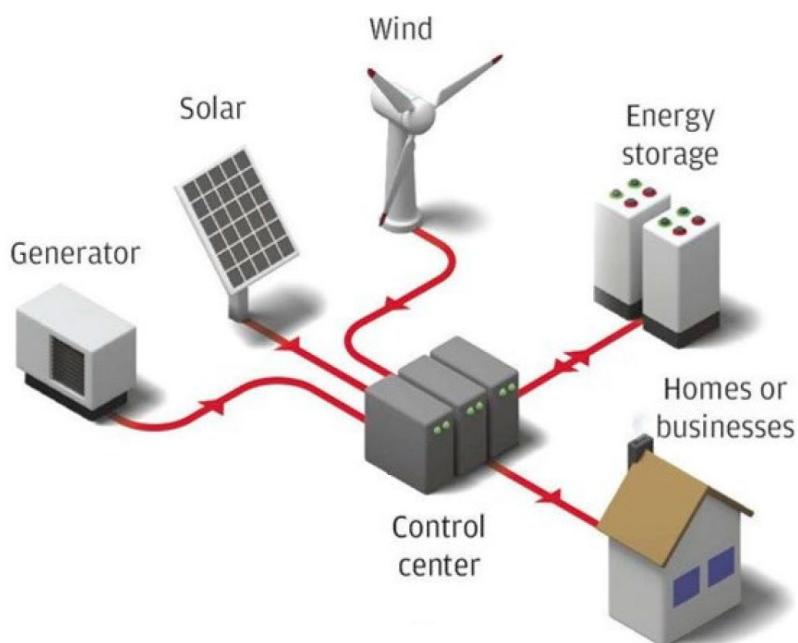


Figura 1. Configuración microrred (KvT, 2024).

Fuente: elaboración propia

En esta microrred se diseñó una serie temporal, con el fin que la energía se envíe a una zona residencial. El consumo sería bajo durante la noche y alto cuando los residentes están en casa después del trabajo. Para encontrar los valores, se proporcionó un rango para cada hora a lo largo del día. Se selecciona aleatoriamente un valor para cada hora dentro de estos rangos y se

puede producir un número determinado de días. Para suavizar la curva de carga, se utilizó un parámetro adicional para combinar un conjunto de días en un grupo y tomar la media aritmética. Las ecuaciones utilizadas para encontrar la idoneidad de estas optimizaciones se muestran en y para los costos y las emisiones (Majeed et al., 2023),

$$W = \frac{\text{cost-min}}{\text{max-min}} \quad (1)$$

$$W = \frac{\text{emission-min}}{\text{max-min}} \quad (1)$$

METODOLOGÍA

Para la fase metodológica de este estudio se implementó un enfoque cuantitativo sobre la optimización de microrredes mediante algoritmos genéticos. Según la metodología propuesta por Hernández Sampieri, se utilizó un diseño de investigación que permite la medición objetiva y el análisis estadístico de las variables de interés. Este enfoque se caracteriza por su rigor en la planificación, recolección y análisis de datos cuantitativos, lo que permite establecer patrones de comportamiento y comprobar hipótesis específicas relacionadas con la eficiencia y los costos operativos de las microrredes.

El diseño adoptado para este estudio es experimental, ya que se aplicaron y modificaron diferentes parámetros dentro de los algoritmos genéticos con el fin de observar y medir su impacto en la optimización de las microrredes. Este enfoque permite una manipulación controlada de variables independientes y una medición precisa de variables dependientes (costos operativos y eficiencia energética).

Basado en la revisión de la literatura y en estudios preliminares, se propone la siguiente hipótesis: "La aplicación de algoritmos genéticos con estrategias de mutación y cruce específicamente diseñadas mejora significativamente la eficiencia y reduce los costos operativos de las microrredes en comparación con los métodos de optimización tradicionales."

La población de estudio incluye una serie de microrredes simuladas que representan diferentes configuraciones y escenarios de operación energética. Dado el enfoque experimental de este estudio, no se seleccionó una muestra en el sentido tradicional, sino que se generaron datos a través de múltiples iteraciones de simulaciones computacionales en Matlab, asegurando una cobertura amplia de posibles condiciones operativas de las microrredes. Los datos se recolectaron mediante simulaciones realizadas con el software Matlab, ajustando en cada ejecución los parámetros de los algoritmos genéticos para evaluar su impacto en la optimización de la microrred.

Los algoritmos genéticos son técnicas de optimización inspiradas en la selección natural y la genética. Comienzan con una población de posibles soluciones a un problema, cada una representada como un cromosoma (Arabali et al., 2013). A través de generaciones iterativas, los individuos se seleccionan en función de su aptitud, se combinan mediante cruce para producir descendencia y se someten a mutaciones para mantener la diversidad. Este proceso tiene como objetivo imitar los principios evolutivos de selección, reproducción y mutación para refinar soluciones de manera iterativa (Chen, 2018). Con el tiempo, los algoritmos genéticos hacen evolucionar las poblaciones hacia mejores soluciones y finalizan cuando se cumple un criterio de parada, como alcanzar una solución satisfactoria o un número máximo de generaciones (Torkan et al., 2022). A través de este proceso, los algoritmos genéticos exploran de forma eficiente los espacios de solución, lo que los hace útiles para problemas de optimización complejos en los que los métodos tradicionales presentan limitaciones. En este estudio se emplean los siguientes métodos:

MÉTODOS DE REPRODUCCIÓN

1. *Mutación (Mutation)*: para iniciar la mutación, los cromosomas de la población se eligen aleatoriamente para su alteración. Si el cromosoma resultante es viable, se incorpora a la población. La selección de genes para la mutación es aleatoria.
2. *Cruce (Crossover)*: en este proceso se eligen aleatoriamente dos padres para la reproducción. Se generan dos descendientes en el punto de cruce, donde se dividen los cromosomas de los padres, lo que determina qué genes hereda la descendencia.

MÉTODOS DE SUPERVIVENCIA

1. *Selección aleatoria (Random selection)*: la selección aleatoria reduce el tamaño de la población al elegir aleatoriamente los cromosomas para su eliminación. Esto se logra generando una permutación aleatoria de índices para determinar qué cromosomas deben eliminarse.
2. *Elitismo (Elitism)*: este enfoque racionaliza la población al tamaño apropiado eliminando los cromosomas menos óptimos. Evalúa cada cromosoma y descarta aquellos con menor aptitud.

En los algoritmos genéticos, los métodos de reproducción crean descendencia a través de la selección de padres y operadores genéticos, mientras que los métodos de supervivencia determinan qué individuos de la descendencia permanecen en la población. Esto permite la evolución gradual de soluciones óptimas a lo largo de las generaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra la relación entre el costo (en USD) y el tiempo (en horas) para diferentes estrategias de optimización en una microrred utilizando algoritmos genéticos. Se presentan cuatro líneas que representan distintas combinaciones de métodos de reproducción y supervivencia. En la Figura 2, el eje de las abscisas representa las diferentes horas del día, lo que sugiere que el análisis se realiza en un período de 24 horas. El eje de las ordenadas muestra el costo asociado con la operación de la microrred en cada hora del día. Cada línea representa una estrategia de optimización distinta: mutación con selección aleatoria (azul), mutación con elitismo (roja), cruce con selección aleatoria (verde) y cruce con elitismo (naranja).

En todas las estrategias se observa un aumento significativo del costo durante las horas pico (alrededor de las 15 a 20 horas), lo que corresponde a un incremento en la demanda de energía cuando los residentes están en casa después del trabajo, como se anticipó en el marco teórico. Al comparar las estrategias, se evidencia que durante la mayor parte del día (excepto en las horas pico) todas tienden a mantener los costos relativamente bajos y similares entre sí. Durante las horas pico, la estrategia que utiliza cruce con elitismo (naranja) presenta los costos más elevados, lo que sugiere que esta combinación puede no ser la más eficiente bajo condiciones de alta demanda.

Las estrategias que emplean mutación con elitismo (rojo) y mutación con selección aleatoria (azul) resultan más eficientes durante las horas pico, ya que logran mantener los costos más bajos en comparación con las estrategias basadas en cruce. El elitismo parece generar resultados más estables y predecibles en términos de costos a lo largo del día, mientras que la selección aleatoria muestra una mayor variabilidad. Esto podría deberse a que el elitismo conserva de forma constante las soluciones más óptimas, evitando fluctuaciones bruscas en los costos.

La Figura 2 sugiere que las estrategias que involucran mutación son, en general, más efectivas para mantener los costos bajos en comparación con las que emplean cruce, especialmente durante las horas pico de consumo. Esto podría indicar que la mutación, como método de reproducción puede ser más efectiva para ajustar y adaptar las soluciones de generación de energía en la microrred a los patrones de consumo cambiantes a lo largo del día.

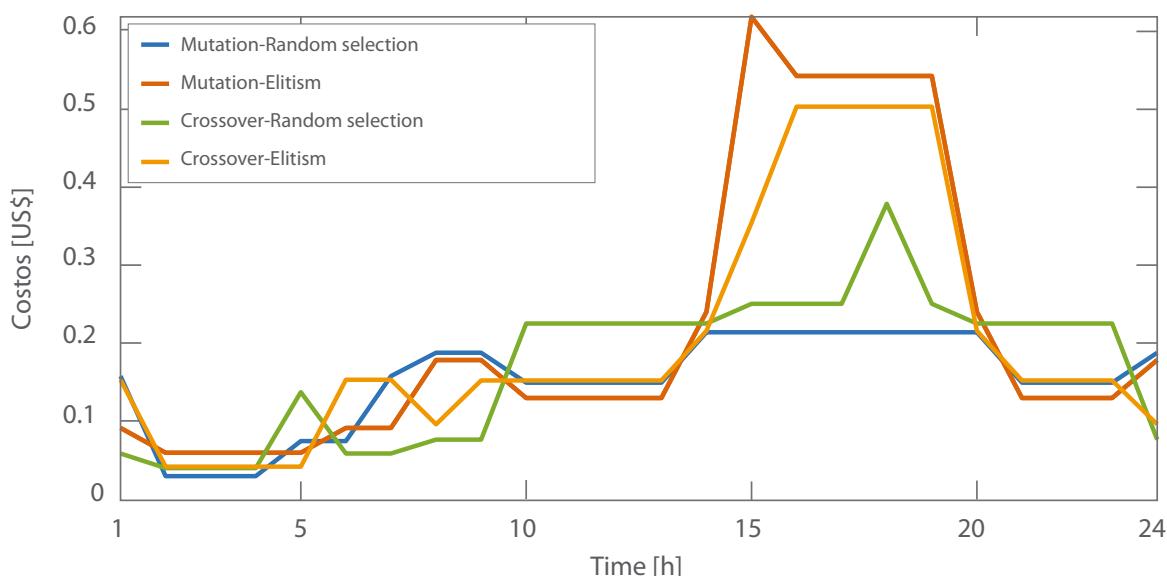


Figura 2. Impacto económico. Fuente: elaboración propia en Matlab.

El elitismo, como método de supervivencia, tiende a proporcionar resultados más consistentes y costos predecibles, lo que podría ser preferible desde una perspectiva de planificación y presupuestación económica. Para la toma de decisiones económicas informadas, es importante considerar no solo el costo mínimo, sino también la estabilidad de los costos a lo largo del tiempo y bajo diferentes

condiciones de demanda. Las estrategias que logran mantener costos bajos y estables resultan preferibles para la gestión eficiente de la microrred desde un punto de vista económico.

Por otra parte, la Figura 3 muestra la relación entre las emisiones de CO₂ (en toneladas métricas) y el tiempo (en horas) para las mismas cuatro estrategias de optimización descritas anteriormente, aplicadas a la operación de una microrred. Todas las estrategias presentan niveles bajos de emisiones durante las horas nocturnas y las primeras horas de la mañana (1 a 10 horas), lo cual coincide con el esperado bajo consumo de energía en estos períodos. A medida que avanza el día, en particular desde las 10 hasta las 20 horas, se observa un incremento en las emisiones de CO₂. Este aumento es más pronunciado durante las horas pico (alrededor de las 15 a 20 horas), lo que resulta coherente con el incremento de la demanda energética cuando los residentes regresan a sus hogares.

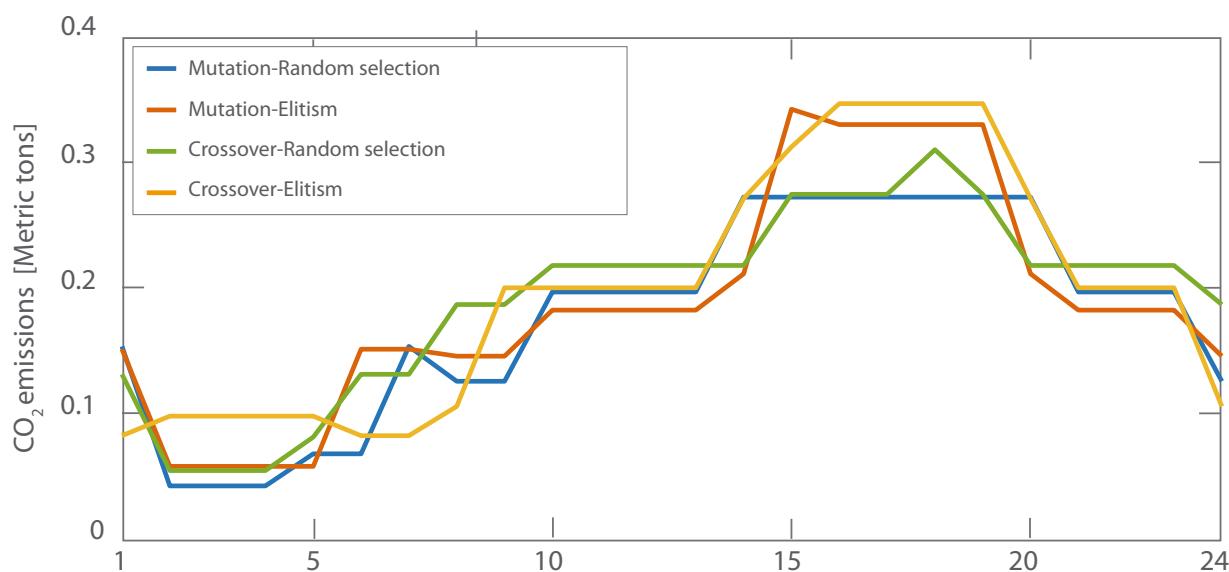


Figura 3. Impacto ambiental.
Fuente: elaboración propia en Matlab.

Las estrategias de mutación con elitismo (rojo) y mutación con selección aleatoria (azul) tienden a generar emisiones más bajas durante las horas pico en comparación con las estrategias que implican cruce. Así, las estrategias basadas en mutación podrían ser más efectivas para gestionar

la demanda energética de una manera ambientalmente sostenible. La estrategia de cruce con elitismo (naranja) presenta nuevamente las emisiones más altas durante las horas pico, lo que puede indicar una menor eficiencia en la integración de fuentes de energía renovables o en la gestión de la demanda. Las estrategias que logran mantener las emisiones de CO₂ más bajas, especialmente durante las horas de alta demanda, son más favorables desde una perspectiva ambiental, ya que evidencian una mayor eficiencia en la utilización de energías limpias y en la reducción del uso de combustibles fósiles. Además, las estrategias que presentan menor variabilidad y emisiones más estables a lo largo del día resultan beneficiosas para la planificación y la previsión ambiental.

La Figura 3 subraya la importancia de seleccionar estrategias de optimización que no solo sean económicamente viables, sino también ambientalmente responsables, reforzando así la sostenibilidad de las microrredes. En este sentido, las estrategias que utilizan mutación, particularmente en combinación con el elitismo, parecen ser más efectivas tanto en términos de costos como de sostenibilidad ambiental.

La Figura 4 presenta la relación entre la tasa de mutación en un algoritmo genético y las emisiones de CO₂ (en toneladas métricas), comparando dos métodos de supervivencia: selección aleatoria y elitismo. La interpretación se centra en la influencia de la tasa de mutación sobre las emisiones de CO₂ asociadas con la operación de una microrred, lo cual tiene implicaciones tanto en la sostenibilidad como en el costo económico del sistema. El eje de las abscisas representa la tasa de mutación dentro del algoritmo genético, con valores que varían de 0,1 a 1,0, lo que refleja la frecuencia con la que se introducen cambios aleatorios en los cromosomas (soluciones). El eje de las ordenadas muestra las emisiones totales de CO₂ asociadas con cada tasa de mutación, una métrica clave de impacto ambiental que también guarda relación con los costos derivados de créditos de carbono, impuestos y regulaciones ambientales.

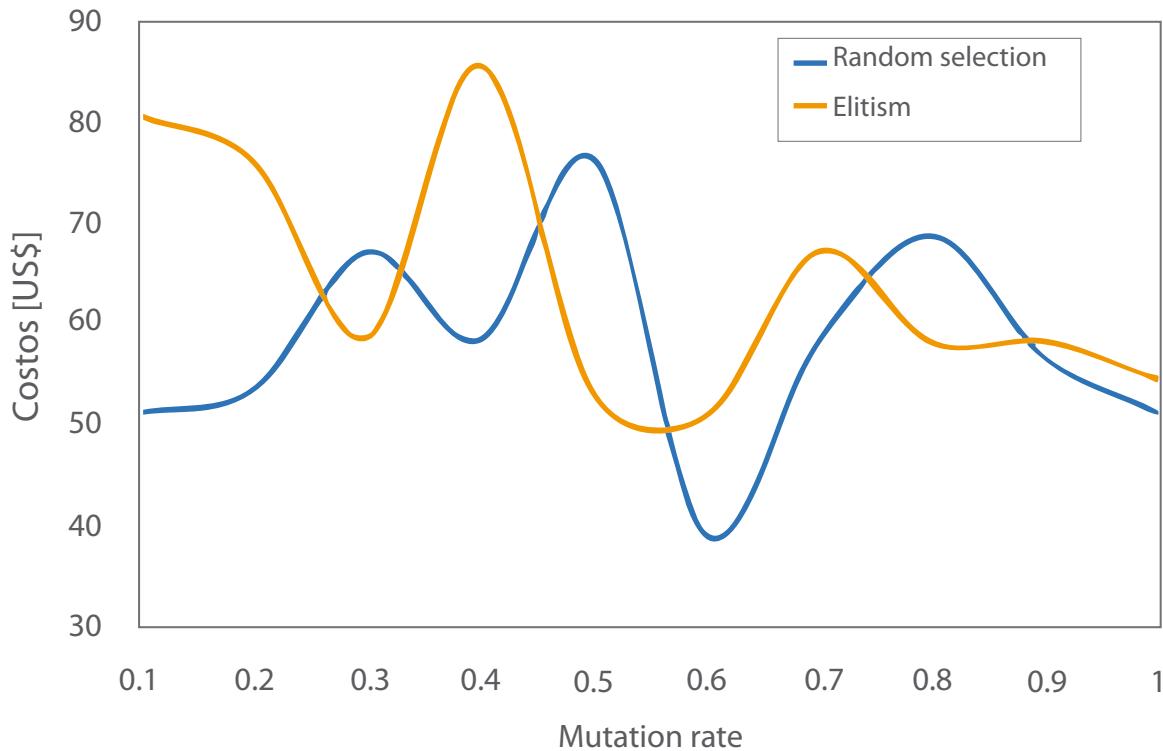


Figura 4. Análisis de costos para la mutación.

Fuente: elaboración propia en Matlab.

Ambas líneas muestran un comportamiento oscilante, lo que indica que la relación entre la tasa de mutación y las emisiones de CO₂ no es lineal ni monótona. Esto sugiere que existen tasas de mutación óptimas que minimizan las emisiones de CO₂ y, por lo tanto, podrían reducir los costos asociados con la generación de energía en la microrred.

La selección aleatoria (azul) presenta picos más pronunciados y una variabilidad más alta en las emisiones de CO₂ a medida que cambia la tasa de mutación. Esto puede interpretarse como una mayor sensibilidad del rendimiento ambiental del sistema ante las variaciones en la tasa de mutación cuando se utiliza este método de supervivencia. En cuanto al elitismo (naranja), muestra una curva más suave y parece estabilizarse en tasas de mutación más altas. Esto puede indicar que el elitismo proporciona una mayor consistencia en la calidad de las soluciones generadas por el algoritmo genético, a pesar de los cambios en la tasa de mutación.

Se observan puntos donde las emisiones de CO₂ se minimizan para ambas estrategias. Por ejemplo, en la curva correspondiente al elitismo, se identifica un punto alrededor de 0,5 en el que las emisiones son mínimas. La identificación de estas tasas óptimas es crucial para establecer la configuración del algoritmo genético que genere la menor huella de carbono y, en consecuencia, los costos más bajos relacionados con las emisiones. Por el contrario, las tasas de mutación que conducen a mayores emisiones de CO₂ pueden incrementar los costos operativos de la microrred, ya sea debido a impuestos sobre el carbono o al gasto adicional en créditos de carbono para cumplir con las regulaciones ambientales.

La Figura 5 ilustra cómo varían las emisiones totales de CO₂ de una microrred en función de la tasa de mutación aplicada en un algoritmo genético, diferenciando entre los métodos de supervivencia de selección aleatoria (azul) y elitismo (naranja). La selección aleatoria (azul) exhibe un comportamiento más volátil en respuesta a los cambios en la tasa de mutación, con picos y valles más pronunciados. Esto indica que las variaciones en la tasa de mutación pueden tener un impacto significativo en las emisiones de CO₂ bajo esta estrategia de supervivencia, lo que refleja una mayor sensibilidad ambiental. El elitismo (naranja) presenta una respuesta más suavizada y menos volátil frente a los cambios en la tasa de mutación, lo que sugiere que este método puede generar una mayor estabilidad en las emisiones de CO₂, incluso cuando la tasa de mutación varía.

Los puntos altos o picos en ambas curvas representan tasas de mutación en las que las emisiones de CO₂ son mayores, lo cual podría indicar configuraciones menos eficientes de la microrred en términos de consumo de combustible o integración de fuentes de energía renovable. Por su parte, los puntos bajos o valles reflejan tasas de mutación en las que el algoritmo ha identificado configuraciones más eficientes, resultando en menores emisiones de CO₂.

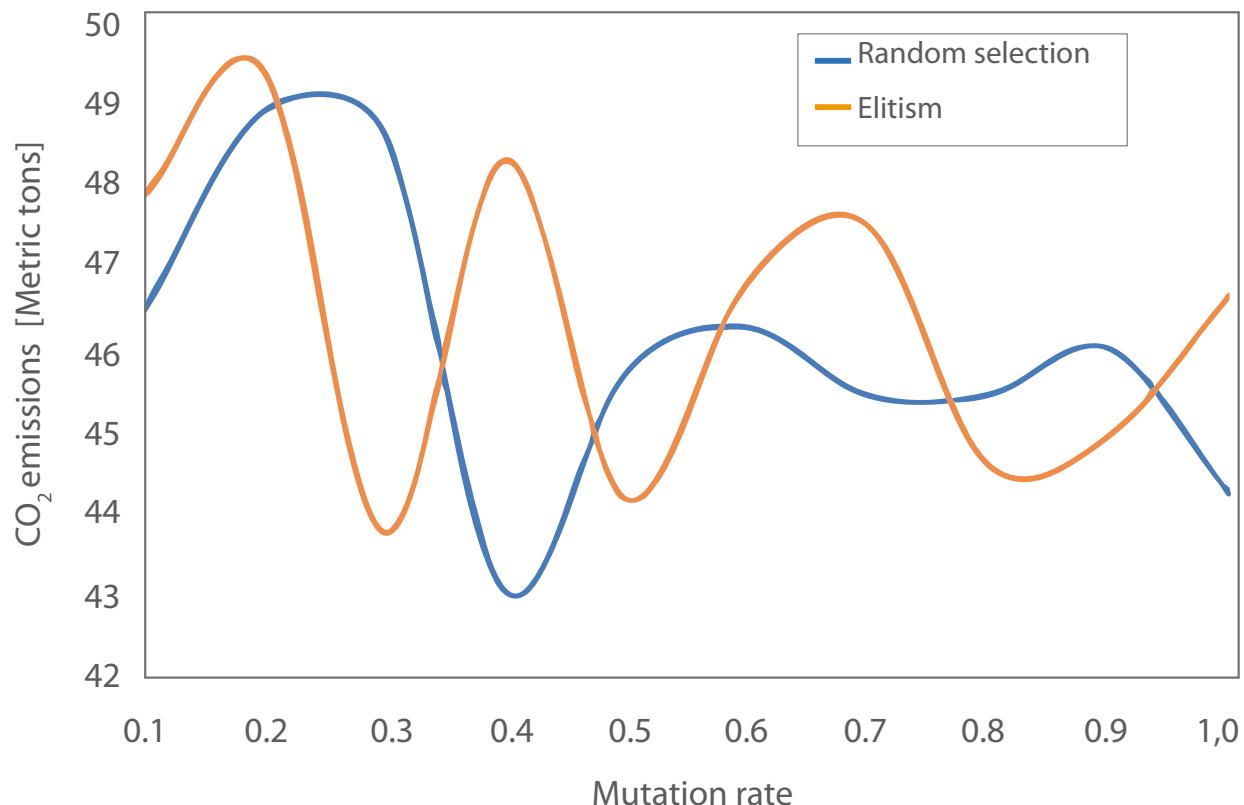


Figura 5. Análisis ambiental para la mutación.

Fuente: elaboración propia en Matlab.

Identificar una tasa de mutación óptima es crucial para lograr un equilibrio entre la exploración de nuevas soluciones y la explotación de las soluciones conocidas, minimizando el impacto ambiental de la microrred. Dado que la curva del elitismo es más plana, esta estrategia puede ser preferible si se busca mantener las emisiones de CO₂ consistentes y predecibles, lo que facilita la gestión y la planificación ambiental a largo plazo.

El análisis muestra que no existe una relación lineal entre la tasa de mutación y las emisiones de CO₂, lo que subraya la complejidad de optimizar sistemas de energía como las microrredes. La selección de la tasa de mutación adecuada es fundamental para la gestión ambiental de la microrred, ya que impacta directamente en la sostenibilidad del sistema. Los puntos óptimos de tasa de mutación, donde las emisiones son mínimas, resultan los más deseables para operar la microrred de manera ambientalmente sostenible. Por el contrario, las tasas de mutación que provocan un aumento en las emisiones de CO₂ podrían indicar una mayor dependencia de fuentes de energía no renovables o una eficiencia operativa más baja, lo cual tendría implicaciones negativas tanto para el medio ambiente como para la economía, considerando los posibles costos asociados con las emisiones de gases de efecto invernadero.

La Figura 6 muestra cómo los costos varían en relación con diferentes puntos de cruce en un algoritmo genético para dos métodos de supervivencia: selección aleatoria y elitismo. El eje de las abscisas representa el punto del cromosoma donde ocurre el cruce. Esto podría reflejar, por ejemplo, la posición en la secuencia de generación y consumo de energía donde se realiza la combinación con otra para crear nuevas soluciones. El eje de las ordenadas indica el costo asociado con cada punto de cruce en dólares estadounidenses.

La selección aleatoria (verde) exhibe una tendencia oscilante en los costos con los diferentes puntos de cruce. Los costos varían, pero no muestran un patrón claramente ascendente o descendente, lo que indica que el impacto del punto de cruce sobre los costos es variable. En cuanto al elitismo (amarillo), también presenta variabilidad en los costos, aunque se observa un aumento significativo alrededor del punto de cruce 9. Esto podría indicar que, en ese punto específico, la combinación de soluciones no resulta en una estrategia de generación de energía eficiente en términos de costos.

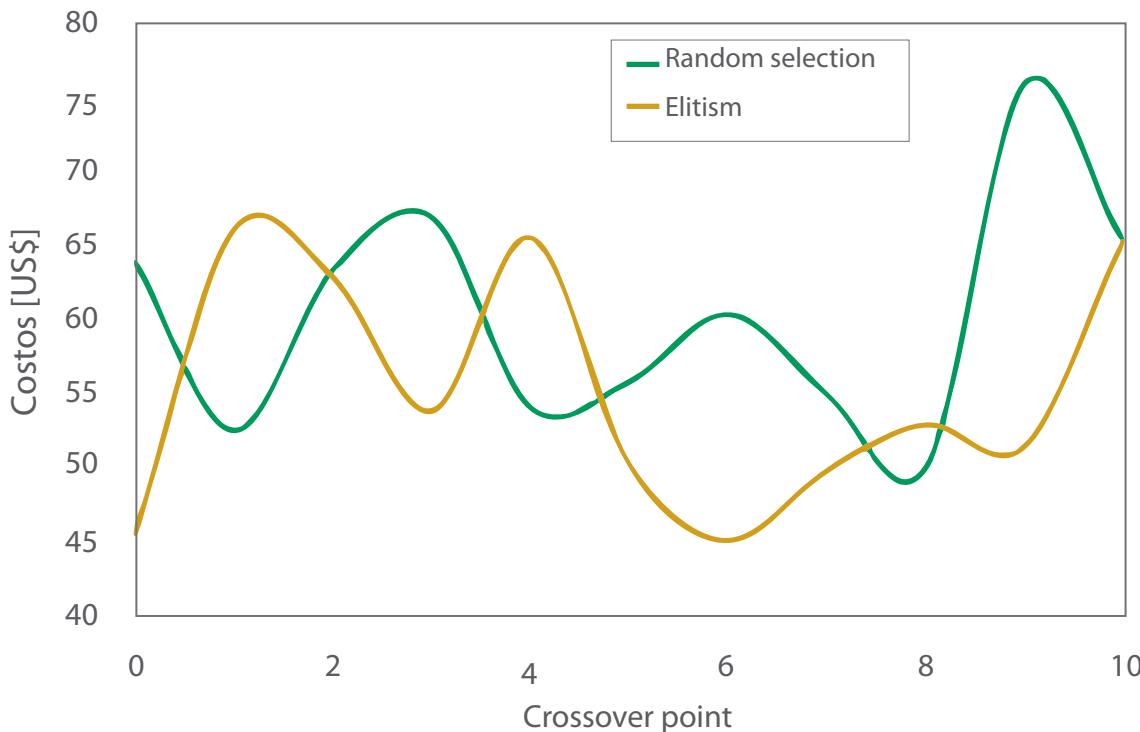


Figura 6. Análisis de costos para el cruce.

Fuente: elaboración propia en Matlab.

Los altibajos en las curvas sugieren que no todos los puntos de cruce son igualmente eficientes en términos de costos. Algunos puntos de cruce parecen ofrecer configuraciones más eficientes que otros. Un punto de cruce que genera un costo más bajo puede representar una combinación de generación y consumo de energía más rentable para la microrred. Los picos reflejan los puntos de cruce menos eficientes desde el punto de vista de los costos, lo que podría deberse a la combinación de soluciones parciales que no se complementan adecuadamente. Los valles, en cambio, indican puntos de cruce donde la combinación de soluciones parentales conduce a estrategias más costoeficientes. Este análisis puede emplearse para afinar la estrategia de cruce en la implementación del algoritmo genético, con el objetivo de reducir los costos de operación y mejorar la eficiencia general de la microrred. Resulta esencial realizar análisis adicionales para comprender por qué ciertos puntos de cruce provocan mayores costos y cómo pueden ajustarse las estrategias para evitar ineficiencias.

La Figura 7 muestra cómo las emisiones de CO₂ varían según los diferentes puntos de cruce en un algoritmo genético, comparando dos estrategias de supervivencia: selección aleatoria (verde) y elitismo (amarillo). La selección aleatoria exhibe una fluctuación significativa en las emisiones de CO₂ a lo largo de los distintos puntos de cruce. Se observa un pico particularmente alto en el punto de cruce 1, lo que sugiere que el cruce temprano en el cromosoma puede generar una solución menos eficiente en términos de emisiones de CO₂. El elitismo también presenta fluctuaciones, aunque, a diferencia de la selección aleatoria, muestra un valle notable (un punto de mayor eficiencia) alrededor del punto de cruce 6, donde las emisiones son considerablemente bajas. Sin embargo, las emisiones aumentan de forma pronunciada cerca del punto de cruce 10, lo que podría indicar una combinación de genes menos favorable para la sostenibilidad ambiental en esa configuración.

La Figura 7 evidencia que el punto de cruce en un algoritmo genético puede tener un impacto significativo en la sostenibilidad ambiental de las soluciones generadas. Este aspecto resulta especialmente relevante para la operación de una microrred, dado que la eficiencia no solo se mide en términos de costos económicos, sino también de impacto ambiental. La selección aleatoria muestra una mayor variabilidad en las emisiones en comparación con el elitismo, lo que podría hacerla menos predecible y, posiblemente, más riesgosa desde una perspectiva ambiental. Por su parte, el elitismo parece ofrecer una mayor estabilidad en las emisiones, excepto por el incremento observado al final, lo que podría hacerlo preferible para una gestión ambiental más consistente.

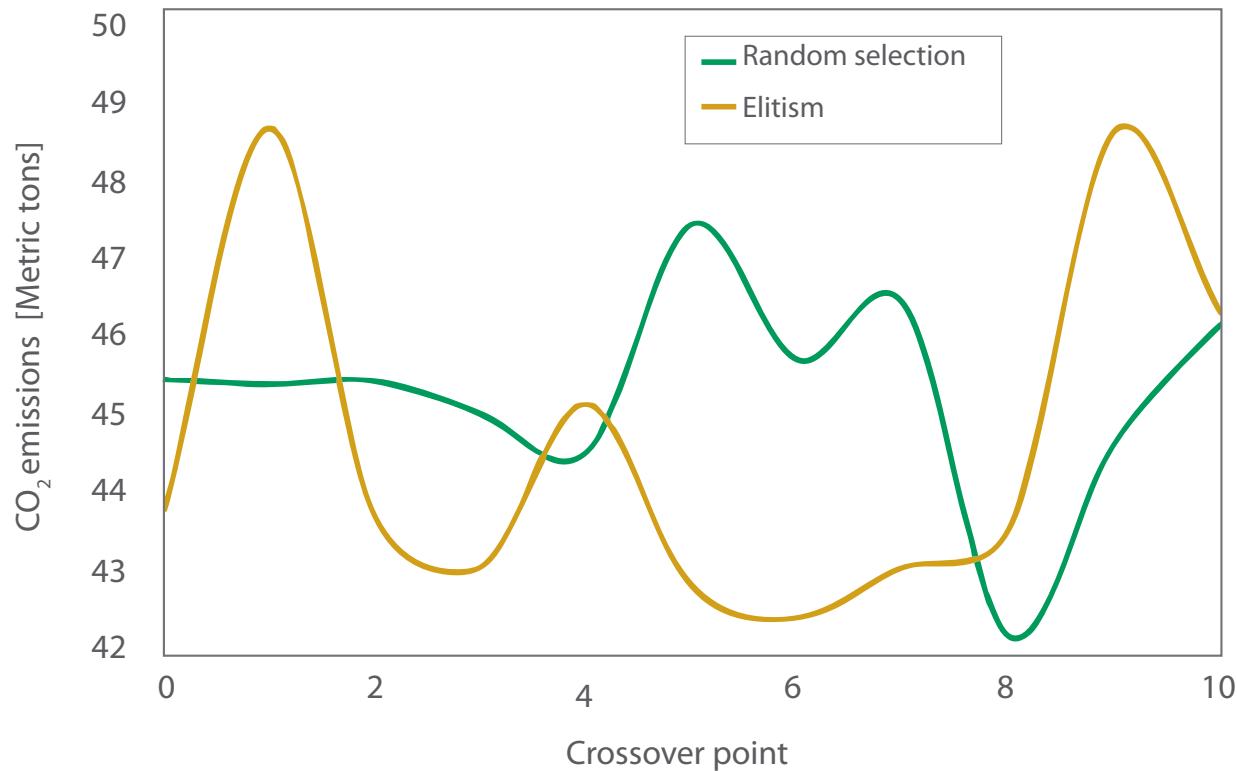


Figura 7. Análisis ambiental para el cruce.

Fuente: elaboración propia en Matlab.

El análisis de los puntos de cruce en relación con las emisiones de CO₂ puede contribuir a optimizar las estrategias de cruce para obtener soluciones más sostenibles. En este contexto, los operadores de microrredes podrían priorizar los puntos de cruce que han demostrado reducir las emisiones de CO₂, alineando así la operación de la microrred con los objetivos de sostenibilidad y eficiencia ambiental.

CONCLUSIONES

Los algoritmos genéticos ofrecen una poderosa capacidad de automatización para sistemas complejos al emular el proceso evolutivo, aunque su salida no siempre garantiza la solución óptima debido a su naturaleza probabilística y a la configuración de parámetros. Aun así, se consolidan como herramientas altamente útiles en entornos donde las restricciones de rendimiento no son extremadamente estrictas, permitiendo encontrar soluciones aceptables de manera rápida y

eficiente. Su verdadero potencial radica en la posibilidad de abordar problemas con un gran número de variables, donde la búsqueda manual sería impracticable, explorando amplios espacios de soluciones y descubriendo resultados prometedores que de otro modo pasarían desapercibidos, convirtiéndolos en una herramienta invaluable para la automatización de sistemas en diversos campos de aplicación.

En el contexto de las microrredes, la investigación demostró que la selección de estrategias adecuadas de reproducción y supervivencia influye directamente en los costos operativos y en las emisiones de CO₂. Las combinaciones que emplean mutación con elitismo mostraron ser las más eficientes y estables, mientras que las estrategias basadas en cruce tendieron a presentar mayores fluctuaciones y costos más elevados durante las horas de alta demanda. Asimismo, la identificación de tasas de mutación y puntos de cruce óptimos constituye un elemento clave para equilibrar la eficiencia económica con la sostenibilidad ambiental.

En conjunto, los resultados reafirman que los algoritmos genéticos pueden ser una herramienta estratégica para la gestión inteligente de microrredes, contribuyendo a una operación más sostenible, resiliente y orientada a la reducción del impacto ambiental.

REFERENCIAS

- Andrade, J., & Olaya, A., "Impactos ambientales asociados a las hidroeléctricas en Colombia," *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 14, no. 2, pp. 217–250, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22490/21456453.6074>
- Arabali, A., Ghofrani, M., Etezadi-Amoli, M., Fadali, M. S., & Baghzouz, Y., "Genetic-algorithm-based optimization approach for energy management," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 162–170, 2013. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2012.2219598>
- Chen, J., "Optimal sizing for grid-tied microgrids with consideration of joint optimization of planning and operation," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 237–248, 2018. <https://doi.org/10.1109/tste.2017.2724583>

Donado, K., Navarro, L., Quintero, M., & Pardo, M., "HYRES: A multi-objective optimization tool for proper configuration of renewable hybrid energy systems," *Energies*, vol. 13, no. 1, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13010026>

Ferreira, A. C., Silva, A., Teixeira, J. C., & Teixeira, S., "Multi-objective optimization of solar thermal systems applied to Portuguese dwellings," *Energies*, vol. 13, no. 24, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13246739>

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C., *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*, Ciudad de México, México: McGraw-Hill Education, 2018. ISBN: 978-1-4562-6096-5.

Janos, M., Szilagyi, A., & Grof, G., "Environmental and economic multi-objective optimization of a household-level hybrid renewable energy system by genetic algorithm," *Applied Energy*, vol. 269, 115058, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115058>

KvT, "Microgrid power solutions, the problem: Grid congestion," 2024. [Online]. Available: <https://www.kvt.nl/>

Leonori, S., Paschero, M., Frattale, F., & Rizzi, A., "Optimization strategies for microgrid energy management systems by genetic algorithms," *Applied Soft Computing Journal*, vol. 86, 105903, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105903>

Majeed, M. A., Phichaisawat, S., Asghar, F., & Hussan, U., "Optimal energy management system for grid-tied microgrid: An improved adaptive genetic algorithm," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 117351–117361, 2023. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3326505>

Ostos Rojas, I. M., Collazos Morales, C. A., Castellanos Acuña, H. E., & Fernández Arévalo, C. P., "Sistema híbrido fotovoltaico (FV) con interacción a la red para zonas rurales de Colombia," *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 8, no. 1, pp. 169–182, 2017. <https://doi.org/10.22490/21456453.1847>

Raghavan, A., Maan, P., & Shenoy, A. K. B., "Optimization of day-ahead energy storage system scheduling in microgrid using genetic algorithm and particle swarm optimization," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 173068–173078, 2020. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3025673>



Rúa, E., Barrera, A., & Gómez, M., "Análisis técnico, socioeconómico y ambiental de la electrificación con energía solar fotovoltaica aislada para vivienda rural en Hato Corozal, Casanare, Colombia," *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 8, no. 1, pp. 239–248, 2017. <https://doi.org/10.22490/21456453.1853>

Saiprasad, N., Kalam, A., & Zayegh, A., "Triple bottom line analysis and optimum sizing of renewable energy using improved hybrid optimization employing the genetic algorithm: A case study from India," *Energies*, vol. 12, no. 3, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12030349>

Torkan, R., Ilinca, A., & Ghorbanzadeh, M., "A genetic algorithm optimization approach for smart energy management of microgrids," *Renewable Energy*, vol. 197, pp. 852–863, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.055>

Umbarila, L., Alfonso, F., & Rivera, J., "Importancia de las energías renovables en la seguridad energética y su relación con el crecimiento económico," *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 6, no. 2, pp. 231–242, 2015. <https://doi.org/10.22490/21456453.1419>

Vargas Pineda, O. I., Trujillo González, J. M., & Torres Mora, M. A., "La economía verde: un cambio ambiental y social necesario en el mundo actual," *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 8, no. 2, pp. 175–186, 2017. <https://doi.org/10.22490/21456453.2044>