

Algoritmos Genéticos como herramienta de Optimización para la ubicación de parques eólicos

Genetic algorithms as an optimization tool for the location of wind farms

Fernando Fanelli Peñarrubia, Eduardo Vargas Cano

Palabras clave: parques eólicos, algoritmo genético, impacto ambiental, procesos evolutivos

Key words: wind farms, genetic algorithm, environmental impact, evolutionary processes

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación es conocer los algoritmos genéticos como una herramienta para optimizar la ubicación de los parques eólicos, buscando maximizar la eficiencia y minimizar los impactos ambientales. Para lograr esto, se utilizaron las metaheurísticas, específicamente los algoritmos genéticos, una técnica de optimización inspirada en la evolución biológica. Este artículo se basa en una revisión de literatura sobre el uso de algoritmos genéticos en la ubicación de parques eólicos. El algoritmo genético funciona mediante la simulación de procesos evolutivos, como selección, recombinación y mutación, para generar una población de posibles soluciones al problema. Al encontrar la configuración óptima de los aerogeneradores, se puede maximizar la producción de energía y reducir el impacto ambiental que ocasionan estos proyectos. Esto no solo beneficia a los creadores de parques eólicos, sino también al medio ambiente, al promover una mayor generación de energía limpia. Los resultados tienen un impacto en la industria de la energía renovable a nivel mundial, al proporcionar herramientas eficientes y efectivas para la toma de decisiones en la ubicación de parques eólicos.

ABSTRACT

The main objective of this research is to understand genetic algorithms as a tool to optimize the location of wind farms, seeking to maximize efficiency and minimize environmental impacts. To achieve this, metaheuristics were used, specifically genetic algorithms, an optimization technique inspired by biological evolution. This article is based on a literature review on the use of genetic algorithms in wind farm location. The genetic algorithm works by simulating evolutionary processes, such as selection, recombination, and mutation, to generate a population of possible solutions to the problem. By finding the optimal configuration of wind turbines, energy production can be maximized and the environmental impact caused by these projects can be reduced. This not only benefits wind farm developers, but also the environment, by promoting greater generation of clean energy. The results have an impact on the renewable energy industry worldwide, by providing efficient and effective tools for decision making in the location of wind farms.

INTRODUCCIÓN

El algoritmo genético (AG) es una técnica de optimización que se inspira en la evolución biológica y la selección natural. Fue desarrollado por John Henry Holland en los años 70 (Verdecia y García, 2020) y desde entonces ha sido utilizado en diversos campos, y constituyen una herramienta matemática que se utiliza para resolver problemas asociados con la búsqueda de soluciones óptimas (Restrepo et al, 2009). Los AG son parte de la computación evolutiva. Es un área creciente de la inteligencia artificial que está basada en la evolución natural biológica y pueden adaptarse a la resolución de múltiples problemas (Borges et al, 2017).

En tal sentido, el AG funciona mediante la simulación de procesos evolutivos, como la herencia, la mutación y el cruzamiento, para generar una población de posibles soluciones al problema que se está abordando (Maronda et al, 2022). Estas soluciones se representan como individuos en una población y se someten a acciones aleatorias, similares a las que ocurren en la evolución biológica, como mutaciones y recombinaciones genéticas. Luego, se seleccionan los individuos más adaptados de acuerdo con algún criterio y se descartan los menos aptos.

Cabe destacar, que la idea central del AG es que a través de la reproducción y la selección de los individuos más aptos, se pueden generar soluciones cada vez mejores en cada generación. Esto se logra

mediante la aplicación de operadores genéticos, como el cruce y la mutación, que permiten explorar el espacio de soluciones y encontrar soluciones óptimas o cercanas a la óptima. Los AG se utilizan en una amplia variedad de problemas, desde la optimización de funciones matemáticas hasta la resolución de problemas complejos en áreas como la ingeniería, la logística y la planificación. Borges et al (2017) señalan que La aplicación más común de los algoritmos genéticos ha sido la solución de problemas de optimización, en donde han mostrado ser muy eficientes y confiables.

Es importante acotar que cuando se habla de energía limpia, la eólica es una de las primeras energías limpias que pasa por la mente, tiene numerosos beneficios, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles.

Además, la energía eólica es una fuente de energía renovable inagotable, ya que el viento es un recurso natural abundante y disponible en muchas regiones del mundo, sin embargo, "según datos oficiales, la construcción y operación de parques eólicos pueden generar consecuencias ambientales, como la alteración de hábitats naturales, la afectación de la fauna y a flora local, y la generación de ruido y sombras parpadeantes.

En este orden de ideas, estos impactos pueden variar dependiendo de la ubicación y el diseño de estos parques (Guerrero et al, 2017). Una herramienta poderosa para

abordar este problema es el uso de AG. En el contexto de la optimización de la ubicación de parques eólicos, los algoritmos genéticos pueden ser utilizados para encontrar la disposición óptima de los aerogeneradores en función de diversos criterios, como la velocidad y dirección del viento, la topografía del terreno y las restricciones ambientales.

Aquí es donde la aplicación de AG a la selección de áreas o zonas específicas parques eólicos cobra vital importancia. Inspirados en la evolución natural, estos algoritmos ofrecen una herramienta poderosa para evaluar una gran cantidad de variables y elegir el sitio con el mayor potencial eólico y el menor impacto ambiental. Esto se debe a que la construcción y operación de parques eólicos pueden tener consecuencias ambientales significativas, como la alteración de hábitats naturales, la afectación de la fauna y la flora local, y daños físicos de tipo visual y al suelo propiamente (Echavarría et al, 2022). Estos impactos pueden variar dependiendo de la ubicación y el diseño de los parques eólicos.

Al respecto, para disminuir este impacto negativo, es crucial realizar una evaluación exhaustiva de los recursos eólicos en el área de interés. Esto implica identificar las zonas con mayor potencial de generación de energía eólica, utilizando técnicas y modelos de evaluación como la toma de viento, datos geográficos de la zona y posibles impactos ambientales ocasionados en su construcción y puesta en marcha, los algoritmos genéticos pueden ser una

herramienta útil para abordar este problema. Estos algoritmos, inspirados en la selección, recombinación y mutación, pueden ayudar a encontrar soluciones óptimas a problemas complejos de optimización. Específicamente, los algoritmos genéticos pueden ayudar a encontrar la mejor combinación de ubicaciones de los parques eólicos para que maximicen la generación de energía y minimicen el impacto ambiental.

Es preciso acotar que el algoritmo genético inicia el proceso a partir de un conjunto de configuraciones (población inicial) que puede ser obtenida aleatoriamente o usando algoritmos heurísticos constructivos simples y rápidos. En cada iteración es obtenido un nuevo conjunto de configuraciones (nueva población) a partir de la población corriente usando los operadores de selección, recombinación y mutación (Chavaje et al, 2021). En cada nueva iteración son encontradas configuraciones de mejor calidad y, eventualmente, en este proceso iterativo se puede encontrar una solución óptima. En otras palabras, un algoritmo genético realiza una búsqueda usando un conjunto de soluciones y a través de un proceso iterativo (selección, recombinación, mutación) son encontradas nuevas configuraciones candidatas (Espitia y Mendoza, 2021).

La selección consiste en identificar las posibles ubicaciones de estos parques eólicos, con la finalidad de crear nuevas combinaciones. Su selección dependerá principalmente de aquellas ubicaciones que tengan un mejor resultado en la

función a la problemática, estos serán seleccionados y los otros serán descartados. Primeramente, se deberán seleccionar las variables y se iniciará el proceso de comparación. Luego de la selección se hará una comparación en cuanto a aquel que beneficie más a la función objetivo, este será seleccionado y el otro será descartado. La finalidad es ir descartando las diferentes opciones hasta encontrar una mejor, que se adapte a la función objetivo.

La recombinación radica en combinar las opciones para generar la mitad de la población como una segunda generación, a partir de la preselección anterior y su combinación, esta es de manera aleatoria y de esa muestra se tomarán dos y se realizará la recombinación, tomando cierta información potencial, a esto se le llama descendiente.

Así entonces, la mutación se obtiene a partir de las distintas opciones obtenidas, o de intercambiar y/o modificar información dentro del mismo individuo. La mutación se puede presentar en una sola opción o en todas, eso dependerá del tamaño de la población.

De este modo, se pueden plantear una serie de objetivos, variables e hipótesis que pueden ayudar a optimizar la ubicación geográfica de los parques eólicos, considerando los aspectos más significativos, sobre todo los de carácter ambiental.

En este orden de ideas, para la preparación de una lista de actividades susceptibles de producir impacto, haciendo énfasis en el medio ambiente y la eficiencia, las actividades se clasificaron según su

importancia dentro de las fases de un proyecto: diseño, construcción y operación del parque eólico.

Al utilizar algoritmos genéticos, se puede explorar un amplio espacio de soluciones y encontrar configuraciones óptimas que maximicen la producción de energía y minimicen los impactos negativos de tipo medio ambientales. Al considerar que estos algoritmos permiten considerar múltiples variables y restricciones, los hace adecuados para abordar problemas complejos de optimización en la ubicación de parques eólicos.

Es pertinente aclarar que se han dado varias investigaciones a lo largo del tiempo, el primer trabajo publicado fue el de Mosetti et al. (1994), el cual aborda el problema de la optimización de la disposición o emplazamiento de los aerogeneradores en un parque eólico. Su trabajo presentó un novedoso enfoque del problema en grandes parques eólicos, en el que se optimizó la distribución de las turbinas eólicas en un emplazamiento dado para conseguir la máxima extracción de energía con los mínimos costos de instalación posibles.

Diez años después Ozkurt y Norman (2004), publican un segundo trabajo sobre optimización del emplazamiento de las turbinas en un parque eólico. Utilizan el mismo modelo de costos del parque eólico que Mosetti et al. (1994). Aunque su función objeto es ligeramente diferente, coinciden en la conveniencia de discretizar el terreno.

Del año 2006 hasta la actualidad solamente el grupo de autores Castro et al (2007) y

Castro (2008) realizaron trabajos de optimización de parques eólicos con relevancia, tanto en sus resultados como en su idea renovadora. En el 2007, Mora y González, plantean un modelo de planeación y optimización de parques eólicos utilizando una vez más el algoritmo genético cuyo objetivo principal es maximizar el valor actual neto (VAN) de la planta eólica determinado como: la suma de flujos de caja actualizados menos la inversión inicial.

De las investigaciones más recientes, en relación a esta problemática, se encuentra el trabajo de Valcarce (2020) cuyo objetivo era la aplicación de algoritmos genéticos en la optimización de la ubicación de parques eólicos, esto ha sido objeto de investigación y estudio. Por ejemplo, un proyecto de investigación realizado en la E.T.S.I. de Minas y Energía de la Universidad Politécnica de Madrid, utilizó algoritmos genéticos para optimizar la disposición de los aerogeneradores en un parque eólico,

METODOLOGÍA

Se revisó el estado del arte del tema relacionado con los algoritmos genéticos como una herramienta para optimizar la ubicación de los parques eólicos. Para ello se procedió a una revisión y análisis crítico de la literatura, así como el conocimiento existente sobre dicho tema a través de una investigación documental exhaustiva que buscó identificar, sintetizar y evaluar las principales prácticas, metodologías y resultados a través de una revisión de

minimizando el efecto de las estelas y maximizando la producción de energía.

En las diversas revisiones bibliográficas, se ha encontrado que el uso de algoritmos genéticos es una alternativa viable y eficiente en el diseño de parques eólicos. Estos algoritmos permiten considerar múltiples variables y características intrínsecas del recurso eólico, lo que facilita la planificación inteligente de los recursos y la optimización de la distribución de turbinas, maximizando la eficiencia en la generación de energía eólica y reducir los costos de producción.

Los principales problemas de la inadecuada ubicación de los parques eólicos han generado impactos negativos en el entorno natural, principalmente afectando la biodiversidad de la zona, también la dificultad del acceso al parque eólico para su construcción, mantenimiento y operación son factores importantes a considerar.

artículos científicos, tesis de grado de maestrías y estudios doctorales, los cuales permitieron conocer los avances y enfoques existentes, identificar las variables relevantes y comprender las limitaciones y desafíos asociados.

La hipótesis planteada es la aplicación de algoritmos genéticos a la selección de áreas para parques eólicos, lo que permitirá la identificación de áreas con un mayor potencial eólico y menor impacto ambiental.

RESULTADOS

La revisión de los artículos y trabajos de investigación, y estudios relacionados, dieron como resultado indicar que los AG se consideran como una excelente alternativa para la ubicación óptima de los parques eólicos debido a que esta metaheurística se usa principalmente en problemas de optimización, estudiando las diversas problemáticas, involucrándolas y entrelazándolas, hasta obtener las posibles mejores opciones de ubicación y así, aprovechar al máximo el recurso eólico.

Sin embargo, puede variar ampliamente dependiendo del país y el entorno en que se esté realizando el estudio, ya que se observó gran variabilidad de problemáticas, cada una de ellas viéndose más en unas regiones en comparación con otras.

Se destaca la viabilidad del uso de algoritmos genéticos en el diseño inteligente de parques eólicos, ya que esta herramienta maximiza la eficiencia y reduce los costos de producción de energía. Estos algoritmos permiten considerar variables como la cantidad de aerogeneradores y su posicionamiento óptimo dentro del parque.

Entre las investigaciones observadas, se estudiaron diversos autores, y siguiendo con la idea de variabilidad de problemáticas, éstas van asociadas al país de estudio y a ciertas características que las diferencian ampliamente, sin embargo ambas convergen en que la problemática central es disminuir los costos de producción y minimizar el impacto

ambiental de la construcción de estos parques.

Por lo tanto, el AG puede ser utilizado por los diseñadores de parques eólicos, dejando de lado herramientas poco eficientes que no consideran ciertas variables importantes en la etapa previa del proyecto, como por ejemplo las pérdidas de energía ocasionadas por los efectos estela, que arrojan como resultado la incapacidad de lograr el objetivo principal de los parques eólicos de generar la máxima cantidad de energía mediante el aprovechamiento del recurso del viento a partir de un definido número de aerogeneradores, y evitando al máximo el daño al medio ambiente promoviendo la sustentabilidad ambiental a través del aprovechamiento óptimo de los recursos renovables como lo es el recurso del viento, el cual se ha convertido en uno de los recursos más propicios para sustituir a los combustibles fósiles como fuente de energía alternativa.

También, Falces (2016) exploró la aplicación de AG en la selección de áreas para parques eólicos en La Rioja, Argentina. Analizó las diversas etapas necesarias para asegurar el éxito de los recursos eólicos en la región. Estas variables, además de la identificación preliminar del área y un análisis técnico-económico, incluían la realización de estudios sociales, legales y medioambientales de la zona, encontrando que los AG son una herramienta efectiva para la selección de espacios para parques

eólicos, pues permite identificar sitios con un alto potencial eólico y un bajo impacto ambiental.

Discusión

En esta investigación se exploró el uso de la metaheurística AG para optimizar la ubicación de los parques eólicos y así, maximizar su producción y disminuir el daño al medio ambiente. De acuerdo a este problema, este artículo se enfocó en evidenciar el fenómeno que afecta principalmente el aprovechamiento óptimo del recurso del viento con la finalidad de obtener la mayor producción de energía verde y disminuir el daño al medio ambiente.

El uso del AG como heurística asociada, efectivamente sí logra resolver estos problemas de optimización, pero las problemáticas pueden variar ampliamente de un país a otro. Es por eso que se recomienda hacer estudios exhaustivos de cada región para obtener los mejores resultados asociados al comportamiento de las distintas variables en el entorno. Al existir diversos tipos de AG con diferentes características y estrategias de búsqueda, es importante seleccionar un algoritmo que se ajuste a las necesidades específicas del proyecto y a las complejidades de los diversos problemas.

Por ello, la calidad y la precisión de los datos utilizados para preparar el AG son fundamentales para obtener resultados

confiables. Se recomienda realizar un procesamiento exhaustivo, cuidadoso y metódico, que incluya limpieza de datos, eliminación de valores inconsistentes, normalización y transformación de variables, entre otros. La integración de datos relevantes como la velocidad del viento, la topografía del terreno, la cobertura vegetal y las restricciones ambientales son cruciales para la precisión del modelo.

Es fundamental validar la exactitud del modelo de AG mediante su comparación con datos reales de parques eólicos existentes o mediante la simulación de diferentes escenarios. También, se recomienda realizar un análisis de los resultados obtenidos por el AG para identificar las áreas con mayor potencial eólico, evaluar la viabilidad del proyecto y tomar decisiones informadas sobre la ubicación del parque eólico. Otro aspecto fundamental es validar la precisión del modelo mediante su comparación con datos reales de parques eólicos existentes o mediante la simulación de diferentes escenarios.

Se recomienda hacer estudios de producción de vientos puntuales de cada zona para facilitar el proceso de diseño y planificación. Además, evaluar la capacidad del AG para manejar múltiples variables, la eficiencia de la búsqueda y la robustez frente a diferentes escenarios.

REFLEXIONES FINALES

En la presente investigación documental de tipo estado del arte, se realizó un revisión de investigaciones realizadas a los largo de treinta años, para el diseño de parques eólicos, planteándose como un problema el optimizar la ubicación de estos parques con el objeto de disminuir los problemas medio ambientales que pueden ocasionar y sobre todo aprovechar al máximo el recurso natural como es el viento.

La toma de decisiones aplicada a la selección de ubicación óptima de parques eólicos utilizando AG es un proceso que busca identificar las alternativas posibles en la búsqueda de soluciones eficientes para problemas complejos y de alta incertidumbre. Estos algoritmos permiten combinar técnicas evolutivas con sistemas de información geográfica para facilitar el proceso de diseño y planificación de los parques eólicos. Esto debido a que los parques eólicos representan las instalaciones más ampliamente extendidas y construidas en los últimos años.

Como en cualquier otra explotación, el principal objetivo perseguido por los inversores en un parque eólico es la rentabilidad económica de su inversión. En este sentido, citando a (Falces, 2016, p.26), es de vital importancia la selección adecuada del emplazamiento del parque en aquellas zonas con mayor potencial eólico (mayores velocidades de viento y mayores frecuencias) ya que son en estas áreas donde se obtendrá una mayor producción de energía eléctrica. De allí la

importancia de utilizar un proceso de optimización controlado por un AG implantado sobre un sistema de información geográfica.

Cabe destacar, que los AG al determinar la ubicación geográfica y disposición de turbinas ideal para la construcción de parques eólicos, permiten analizar una cantidad de información acerca del terreno, el viento, la topografía, la vegetación, la infraestructura y las regulaciones locales, identificando a su vez las zonas con mayor potencial eólico y menor impacto ambiental.

Adicionalmente, favorecería evaluar diferentes escenarios al simular el comportamiento del parque eólico en diferentes ubicaciones y condiciones climáticas, lo cual permitiría predecir la producción de energía, los costos operativos y el impacto ambiental del parque eólico.

Esta herramienta también sirve para comparar diferentes opciones y seleccionar la ubicación que maximice la producción de energía, minimice los costos y cumpla con las regulaciones locales. En tal sentido, los AG conllevan una serie de ventajas para optimizar la ubicación geográfica de los parques eólicos, aportando precisión, eficiencia, flexibilidad al adaptarse a diferentes tipos de terrenos, condiciones climáticas y objetivos específicos y sostenibilidad que puede ayudar a minimizar el impacto ambiental de los parques eólicos.

REFERENCIAS

- Borges Vasconcellos, D., Puch González, P., & Frías González, G. (2017). Control de demanda eléctrica aplicando algoritmos genéticos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 25 (3), 389-398. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052017000300389>
- Castro, J. (2008). *Optimización global de parques eólicos mediante algoritmos evolutivos*. [Trabajo de grado Maestría, Universidad de Sevilla]. Repositorio Cátedra Endesa – Universidad de Sevilla. http://catedrasempresa.esi.us.es/endesared/documentos/Tesis_Jose_Castro_Mora.pdf
- Castro, J., Calero, J. M., et al. (2007). An evolutive algorithm for wind farm optimal design. *Neurocomputing*, 70(16-18), 2651-2658. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2006.05.017>
- Chavaje, L., Ortiz, F., Pérez, R., (2021). Optimización de corte de rollos mediante un algoritmo genético Optimization of rolls cutting by a genetic algorithm. *Conciencia Tecnológica*, 62, 1-14. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8574627>
- Echavarría-Chairez, FG, Alvarado-Sabag, MN, Serna-Pérez, A., Medina-García, G., & Casas-Flores, JI (2023). Acumulación y pérdida de suelo por erosión eólica en el norte de Zacatecas. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1649>
- Espitia-Méndez, JA y Mendoza-Rojas, GL (2021). Metodología basada en un algoritmo genético para programar la producción de una empresa del sector textil. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 22(4), 1-16. <https://doi.org/10.14482/INDES.30.1.303.661>
- Falces, A. (2016). *Planificación de Parques eólicos mediante sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos* [Tesis Doctoral. Universidad de la Rioja]. Repositorio Institucional Universidad de la Rioja. <https://investigacion.unirioja.es/documentos/5c13b16dc8914b6ed37768a0>
- Grady, S. A., Hussaini, M. Y. & Abdullah, M.M. (2005). Placement of wind turbines using genetic algorithms. *Renewable Energy*, 30(2), 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.05.007>
- Guerrero Enamorado, A., Pérez Pupo, I., Ventura, S., Morell, C., & Piñero Pérez, PY (2017). Evaluación de proyectos usando sistemas basados en algoritmos genéticos de aprendizaje de reglas. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 11 (4), 39-56. <https://rcci.uci.cu/?journal=rcci&page=article&op=view&path%5B%5D=1583&path%5B%5D=582>
- Maronda-Tarrasa, I., Sánchez-Orgaz, EM, Muñoz Pellicer, D., & Martínez-Sanchís, S. (2022). Diseño optimizado del perfil de pala de un aerogenerador doméstico de 700 W mediante algoritmo genético. *Revista UIS Ingenierías*, 21 (1), 127-141. <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022011>
- Mosetti, G., Poloni, C. & Diviacco, B. (1994). Optimization of wind turbine positioning in large wind farms by means of a genetic algorithm. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51(1), 16-105. [https://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)90080-9](https://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(94)90080-9)
- Ozturk, U.A. & Norman, B. A. (2004). Heuristic methods for wind energy conversion system positioning. *Electric Power Systems Research*, 70(3), 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2003.12.006>
- Restrepo, C., Molina, J., & Torres, C. (2009). Algoritmo genético para la ubicación óptima de sensores en un robot seguidor de línea. *Scientia*

et Technica, 1(44), 87-92.
<https://doi.org/10.22517/23447214.1759>
Valcarce, D. (2020). *Optimización mediante algoritmos genéticos de la disposición de los aerogeneradores de un parque eólico minimizando el efecto de las estelas* [Trabajo Final de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. <https://oa.upm.es/58710/>

Verdecia, J. & García, J. (2020). Optimización estructural de una torre autoportada mediante Algoritmos Genéticos. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 14(2), 2020.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193963490003>

Autores

Fernando Fanelli Peñarrubia. Ingeniero Civil, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela. Maestrante Gerencia de la Construcción, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9555-395X>

Email: fafp90@gmail.com

Eduardo Vargas Cano. Ingeniero Industrial, Magister en Gerencia de la Construcción; Docente e Investigador, Universidad de Carabobo, Venezuela.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1293-1550>

Email: eevargas1@uc.edu.ve

Recibido: 26-11-2023

Aceptado: 21-03-2024