

# RESOLVIENDO EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE PARQUES EÓLICOS EMPLEANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

## SOLVING THE WIND FARM LAYOUT OPTIMIZATION PROBLEM USING GENETIC ALGORITHMS

**Abelardo Buentello Duque**

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México  
*M1703073@itcelaya.edu.mx*

**Salvador Hernández González**

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México  
*salvador.hernandez@itcelaya.edu.mx*

**José Alfredo Jiménez García**

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México  
*alfredo.jimenez@itcelaya.edu.mx*

### Resumen

La construcción de parques eólicos está destinada a incrementarse en los países que buscan la sustentabilidad ambiental. Una etapa importante en la construcción de parques eólicos es resolver el problema de optimización del diseño del parque, el cual consiste en distribuir un conjunto de aerogeneradores de tal manera que las pérdidas de energía ocasionadas por los efectos estela se minimicen y la producción de energía esperada se maximice. El efecto estela es un fenómeno que debe ser tomado en cuenta para obtener la mejor configuración de un campo eólico. Este problema es considerado por la comunidad científica como un problema de optimización NP-Duro, causando suma atención y relevancia. En esta investigación se implementa una metaheurística evolutiva, específicamente algoritmos genéticos para encontrar la ubicación óptima de aerogeneradores, considerando el efecto estela. Los resultados demuestran que el método metaheurístico provee una solución de configuración de alta calidad en un tiempo computacional razonable.

**Palabras Clave:** Algoritmos Genéticos, Aerogeneradores, Campos Eólicos, Efecto Estela, Optimización combinatoria.

## **Abstract**

*The construction of wind farms is destined to increase in countries that seek environmental sustainability. An important phase in the construction of wind farms is solving the wind farm layout optimization problem, which consists of distributing a set of wind turbines in such a way that the energy losses caused by wake effects are minimized and the expected energy production maximized. The wake effect is a phenomenon that must be taken into account to obtain the best configuration of a wind farm. This problem is considered by the scientific community as an NP-Hard optimization problem, causing a lot of attention and relevance. In this research an evolutionary metaheuristic is implemented, specifically genetic algorithms to find the optimal location of wind turbines, considering the wake effect. The results demonstrate that the metaheuristic method provides a high quality configuration solution in a reasonable computational time.*

**Keywords:** Combinatorial Optimization, Genetic Algorithms, Wake Effect, Wind Farms, Wind Turbines.

## **1. Introducción**

Las energías renovables se han convertido en un tema de gran interés en los últimos años debido a que las fuentes naturales utilizadas para la generación de estas energías son inagotables y no contaminantes. De hecho, la sustentabilidad ambiental exige la considerable reducción del uso de combustibles fósiles, los cuales son sumamente contaminantes e insostenibles [Fischetti & Monaci, 2016]. Asimismo, una grave contaminación ambiental está amenazando la salud humana, por lo que se han suscitado muchas inquietudes públicas [Chen, Li, Jin, & Song, 2013]. Como consecuencia, muchos países han propuesto planes ambiciosos para la producción de energía verde, incluida la energía eólica. Es por ello que el mercado de la energía eólica está expandiéndose rápidamente en todo el mundo [AWEA, 2019]. La transformación de la energía eólica en energía eléctrica se lleva a cabo a través de aerogeneradores, los cuales generalmente se agrupan o distribuyen en parques eólicos con el propósito de explotar los rendimientos asociados a las economías de escala, tales como: menores costos de instalación y mantenimiento

[Samorani, 2013]. La optimización del diseño es uno de los métodos para aumentar la producción de energía esperada en un campo eólico [Chen et.al, 2013]. Además de que buen diseño de parque eólico aumenta la producción de energía, simultáneamente garantiza la rentabilidad del proyecto. Un diseño o distribución inadecuada de aerogeneradores podría provocar una producción de energía menor a la esperada, dando lugar a beneficios no rentables. El problema de optimización del diseño de parques eólicos consiste en encontrar una asignación óptima de aerogeneradores en un sitio determinado de tal modo que la energía de salida se maximice. Este problema estratégico es extremadamente difícil de resolver en la práctica debido al tamaño de las instancias en aplicaciones reales como por la presencia de aspectos no lineales a considerar [Fischetti & Monaci, 2016]. Un aspecto no lineal muy importante a tomar en cuenta para el diseño óptimo de un parque eólico es un fenómeno de interacción entre dos o más aerogeneradores, conocido como efecto estela. El efecto estela es un fenómeno derivado de la interacción para lo cual, si dos turbinas están ubicadas una cerca de la otra, la primera turbina que interactúa con el viento incidente crea una sombra o turbulencia sobre una segunda turbina detrás de la primera. La primera turbina al absorber energía cinética del viento crea a su vez el efecto estela, causando una reducción significativa en la velocidad del viento, provocando que la segunda turbina disponga de una menor cantidad de energía cinética o en su defecto menor velocidad de viento para generar la energía nominal para la cual fue construida. En los grandes parques eólicos, los efectos estela provocan una pérdida de energía considerable [Méchali et.al, 2006], por lo que lo ideal es minimizar estos efectos de tal forma que la producción de energía esperada se maximice.

El modelado del efecto estela es un componente fundamental para analizar el comportamiento turbulento del viento tras pasar sobre un aerogenerador, así como también permite evaluar los déficits de velocidad en el viento provocados por dicho fenómeno y con ello calcular la producción de energía real de cada uno de los aerogeneradores afectados. En [Shakoor, Hassan, Raheem, & Wu, 2016] se presenta una recopilación y revisión de los diferentes modelos del efecto estela, indicando a través de una comparación; que el modelo de Jensen es un modelo

sumamente útil para solucionar el problema de optimización en campos eólicos debido a su simplicidad y al alto grado de precisión. Por lo tanto, en el presente trabajo se considera el modelo de Jensen para calcular los déficits de velocidad causados por los efectos estela con la finalidad de evaluar la producción individual de energía de cada aerogenerador y consecuentemente de todo el parque eólico. Aunque el modelo de Jensen se considera una aproximación del entorno real, brinda resultados valiosos para efectos de esta investigación. Una ventaja principal de este modelo es la posibilidad de lidiar implícitamente con una cantidad considerable de instancias, lo cual es muy conveniente para intereses prácticos [Fischetti & Monaci, 2016].

La comunidad científica ha catalogado el problema de optimización del diseño de parques eólicos como un problema de optimización NP-Duro, lo cual significa que no existe un algoritmo que pueda resolverlo en un tiempo computacional polinómico. A pesar del enorme crecimiento de proyectos relacionados con la construcción de parques eólicos, existe una escasa información sobre la optimización del problema de posicionamiento de aerogeneradores. Esto se debe probablemente a su complejidad. El problema presenta múltiples soluciones óptimas (convexidad), por lo que no se puede describir completamente en una forma analítica ya que algunas variables toman valores no permitidos (espacio de solución no conectado) y algunas otras variables son discretas. Esto hace que el problema se convierta en no derivable, impidiendo el uso de cualquiera de las técnicas clásicas de optimización analítica [González, 2010], debido a que estas técnicas o algoritmos exactos invertirían una cantidad no razonable de recurso computacional para resolverlo. A causa de esto, surge la idea de implementar un enfoque metaheurístico, el cual brinde una solución de buena calidad en un tiempo de cómputo razonable a este problema de optimización. En la literatura revisada se presenta una cantidad considerable de técnicas y métodos heurísticos que se han implementado para resolver dicho problema de optimización de campos eólicos, entre los que destacan principalmente los algoritmos genéticos [DuPont & Cagan, 2016] [Emami & Noghreh, 2010], aunque también se presentan otros algoritmos como el algoritmo

de colonia de hormigas [Eroğlu & Seçkiner, 2012] y el algoritmo de enjambre de partículas [Wan, Wang, Yang & Zhang, 2010].

Por consiguiente, en este trabajo se propone la implementación de una metaheurística evolutiva, específicamente algoritmos genéticos para optimizar las ubicaciones de los aerogeneradores de tal forma que se logre la mejor configuración o diseño del campo eólico, garantizando obtener la mayor cantidad de energía instalada considerando las pérdidas de energía provocadas por los efectos estela a través del modelo de Jensen.

## **2. Métodos**

En esta sección se explican cada uno de los métodos empleados en esta investigación para solucionar el problema del diseño de campos eólicos. Cabe mencionar que para efectos del presente trabajo se omite el análisis de factibilidad del terreno o sitio ventoso donde se pretende construir un campo debido a que el interés se centra en optimizar campos eólicos instalados, en planes de instalación o aquellos para los que al menos se cuenta un diseño o configuración inicial. El primer método corresponde a la discretización del campo eólico. Con la finalidad de reducir la complejidad del problema de optimización, se propone la discretización o división del parque eólico a través de pequeñas celdas o cuadrículas. En la presente investigación solamente se considera la optimización de campos eólicos planos ya sean cuadrados o rectangulares y aerogeneradores de la misma altura. La figura 1 muestra un diseño propuesto o instancia pequeña para un parque eólico de 1 x 1 km. En dicha figura se puede apreciar la discretización del terreno. El centro de cada cuadrícula corresponde a una posible localización denominado centroide (representado por un anillo), en la cual podría asignarse o instalarse un aerogenerador. Para este escenario en especial se cuenta con un conjunto predefinido de 16 posibles ubicaciones discretas con dimensiones de 250 x 250 m cada una. En este escenario propuesto se tiene un total de 8 aerogeneradores instalados (representados por los anillos rellenos de color negro), así como también se considera un viento incidente con velocidad inicial  $U_0$  y con una dirección dominante de Este a Oeste. Para esta instancia pequeña, el número de

combinaciones o maneras posibles de diseñar el parque eólico asciende a un total de 12,870. La discretización corresponde a un método de gran utilidad debido a que si un parque eólico no se discretizará, el algoritmo invertiría mucho tiempo en encontrar una solución dentro de un espacio de solución continuo.

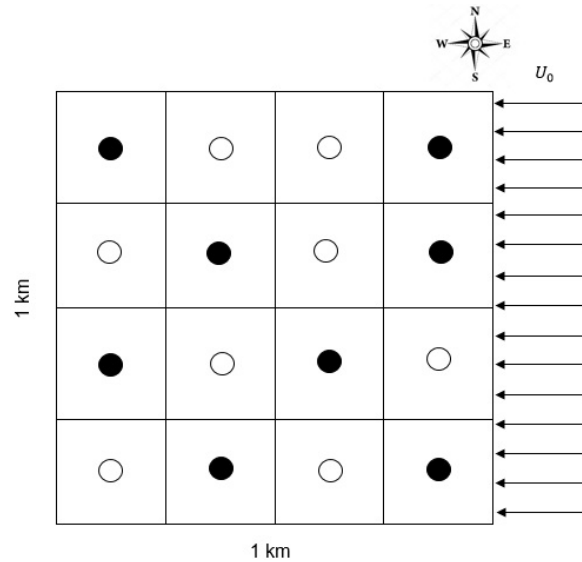


Figura 1 Campo eólico discreto.

El segundo método corresponde al modelado del efecto estela. La figura 2 exhibe de manera ilustrativa el efecto estela entre dos aerogeneradores.  $U_0$  representa la velocidad del viento incidente puro (sin turbulencia) y  $U_B$  representa la velocidad del viento resultante (con turbulencia) al pasar por el Aerogenerador A.

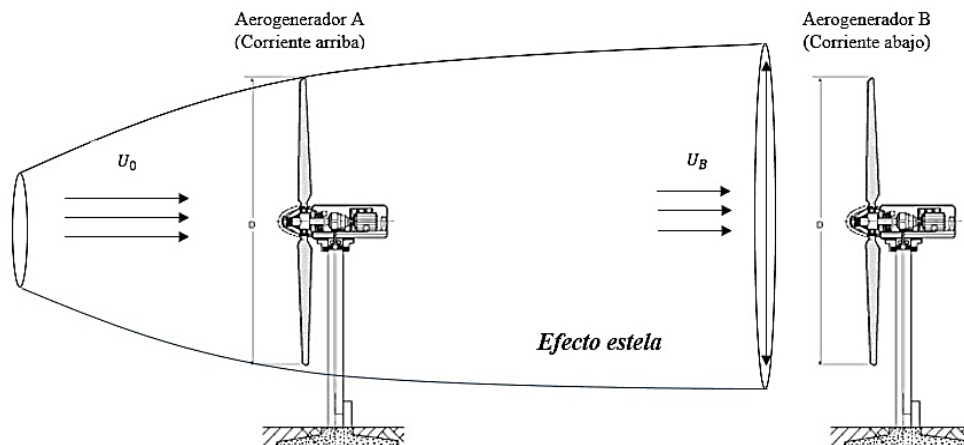


Figura 2 Efecto estela entre dos aerogeneradores.

La modelación del efecto estela para calcular los déficits de velocidad en el viento ha sido causa de muchas investigaciones, por lo que se han propuesto diversos modelos para analizar las características de este fenómeno aerodinámico, tal como: velocidad con la que se expande el efecto estela, diámetro del efecto, etc. Por lo tanto, para el modelado del efecto estela, en esta investigación se considera el modelo de Jensen propuesto en [Samorani, 2013], el cual a su vez es un modelo equivalente al propuesto en [Lackner & Elkinton, 2007].

El tercer método corresponde a los algoritmos genéticos. Los algoritmos genéticos son técnicas robustas de optimización que buscan el mínimo o máximo de un problema o función, los cuales están basados en los principios inspirados de la genética natural y los mecanismos de evolución observados en la naturaleza. Estos algoritmos utilizan múltiples rutas de búsqueda en lugar de un solo punto de partida, utilizando soluciones codificadas (cromosomas, comúnmente representadas por un código binario), en lugar de sus valores reales. Su principio fundamental es la preservación de una población (soluciones o individuos codificados) que se desarrolla durante un cierto número de iteraciones (generaciones), guiando a la población hacia la mejor solución posible [González, 2010]. Para encontrar las mejores soluciones, los algoritmos genéticos emplean tres operadores básicos: selección, cruzamiento y mutación.

En este artículo, se utilizó el código libre del Algoritmo Genético (GA, por sus siglas en inglés) desarrollado por [Gatscha, 2016] y el cual se encuentra disponible en el paquete 'windfarmGA' (Versión 1.2.1) del software Rstudio (Versión 1.1.456). El GA incluido en el paquete se utilizó con la finalidad de encontrar el mejor diseño o configuración de aerogeneradores en un campo eólico, considerando los efectos estela a través del modelo de Jensen. El paquete utilizado considera el modelo de Jensen para calcular los déficits de velocidad en el viento entre los aerogeneradores afectados por los efectos estela. En esta investigación, el valor codificado de 0 en una cadena binaria o cromosoma representa que no existe un aerogenerador instalado en un centroide o posible localización, en cambio el valor de 1 en un cromosoma representa que existe un aerogenerador instalado en el centroide o posición correspondiente. Asimismo, en este trabajo un cromosoma se considera

un individuo o posible solución, el cual representa un específico del parque eólico. El algoritmo considera dos criterios de paro; el algoritmo se detiene cuando la cantidad de iteraciones ejecutadas alcanza el número de iteraciones preestablecido o cuando se encuentra un diseño de campo eólico con una eficiencia del 100%.

Las ecuaciones 1, 2 y 3 presentan la función objetivo a optimizar. Dicha función representa la energía total producida por el campo eólico mediante la suma individual de la energía generada por cada aerogenerador. La tabla 1 muestra el pseudocódigo del algoritmo genético.

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^N P_i x_i \quad (1)$$

$$\text{s. a.} \quad x_i \leq 1 \quad (2)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad (3)$$

Donde:

$Z$  = Energía total producida.

$P_i$  = Energía instantánea generada por la turbina  $i$ .

$N$  = Número de aerogeneradores a instalar.

$x_i = 1$  Si un aerogenerador es instalado en el sitio  $i$ .

$x_i = 0$  Otro caso.

Tabla 1 Pseudocódigo del algoritmo genético.

---

**Algoritmo Genético**

---

- 1:  $t \leftarrow 0$ ; /\* contador de iteraciones \*/
- 2: *inicializar* ( $Pa$ ) /\*Inicializa la población \*/
- 3: **mientras** *no hay criterio de parada* ( $t, Pa$ ) **hacer**
- 4:      $Padres \leftarrow$  *selección* ( $Pa$ ); /\* Seleccionar padres \*/
- 5:      $Hijos \leftarrow$  *reproducción* ( $Padres$ ) /\* Cruce \*/
- 6:     *mutación* ( $Hijos$ ) /\* mutar los hijos \*/
- 7:     *evaluar* ( $Hijos$ ) /\* evaluar los hijos \*/
- 8:     *nuevaGeneración = reemplazo* ( $Pa, Hijos$ ) /\* reemplazo la población por la actual \*/
- 9:      $t \leftarrow t + 1$  /\* Una iteración más \*/
- 10: **fin mientras**
- 11: **Retornar:** mejor solución encontrada.

---



### 3. Resultados

En la presente sección se optimiza un caso de parque eólico hipotético. El caso corresponde a una instancia con 100 posibles localizaciones y 30 aerogeneradores a instalar. La figura 3 muestra las características y dimensiones del parque eólico, en este caso el parque eólico mide un total de 16 km<sup>2</sup> (4 x 4 km). Cada cuadrícula discreta del parque eólico tiene una dimensión (resolución) de 400 x 400 m. Los rotores de los aerogeneradores considerados en la optimización miden un radio de 40 m. La altura de los aerogeneradores es de 60 m. La rugosidad de la superficie se consideró de 0.14 m, dicho valor es típico de parques eólicos construidos en terrenos que cuentan con algunos obstáculos bajos [Gatscha, 2016]. La figura 4 exhibe la rosa de los vientos, la cual indica la dirección y velocidad con la que se propaga el viento considerado en este escenario. Por lo tanto, en este escenario se considera un viento incidente con una dirección de 45° (Noreste-Suroeste) con una velocidad uniforme de 12 m/s.

**Resolution: 400 m and prop: 0.99**  
**Total Area: 15.999 km<sup>2</sup>**  
**Number Grids: 100**  
**Sum Grid size: 15.999 km<sup>2</sup>**

1 +	2 +	3 +	4 +	5 +	6 +	7 +	8 +	9 +	10 +
11 +	12 +	13 +	14 +	15 +	16 +	17 +	18 +	19 +	20 +
21 +	22 +	23 +	24 +	25 +	26 +	27 +	28 +	29 +	30 +
31 +	32 +	33 +	34 +	35 +	36 +	37 +	38 +	39 +	40 +
41 +	42 +	43 +	44 +	45 +	46 +	47 +	48 +	49 +	50 +
51 +	52 +	53 +	54 +	55 +	56 +	57 +	58 +	59 +	60 +
61 +	62 +	63 +	64 +	65 +	66 +	67 +	68 +	69 +	70 +
71 +	72 +	73 +	74 +	75 +	76 +	77 +	78 +	79 +	80 +
81 +	82 +	83 +	84 +	85 +	86 +	87 +	88 +	89 +	90 +
91 +	92 +	93 +	94 +	95 +	96 +	97 +	98 +	99 +	100 +

Figura 3 Características y dimensiones del parque eólico a optimizar.

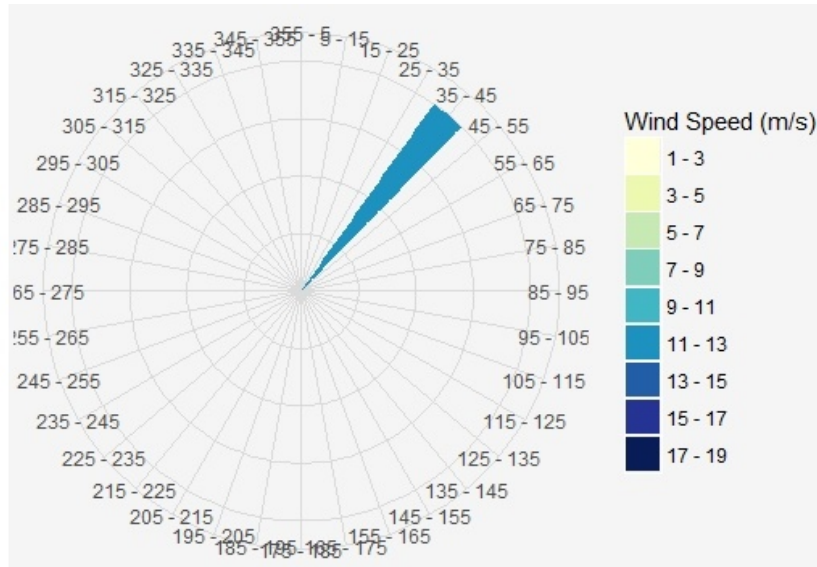


Figura 4 Dirección y velocidad del viento incidente.

Los valores de los parámetros o variables de entrada utilizados en el algoritmo para ejecutar la corrida de optimización se presentan en la tabla 2.

Tabla 2 Variables de entrada para algoritmo de optimización.

Variable de entrada	Valor	Descripción
Iteración	100	Número de iteraciones o generaciones
Selección	“FIX”	Este valor de la variable de selección elige un valor constante del 50% del total de individuos de la población para procrear nuevas soluciones (individuos) en la próxima generación
Cruce	“RAN”	Este valor de la variable de cruce divide el código genético en ubicaciones aleatorias
Mutación	0.006%	Tasa de mutación que modifica aleatoriamente parte del código genético de los individuos para evitar la convergencia prematura en óptimos locales
Elitismo	“Verdadero”	Este valor de la variable de elitismo activa la selección elitista, lo cual garantiza seleccionar los mejores individuos en cada iteración

El empleo de los valores de los parámetros de cruce, mutación y selección se fundamenta debido a que una investigación previa reveló que bajo estos valores; el algoritmo es capaz de explorar y converger hacia soluciones de muy alta calidad invirtiendo poco esfuerzo computacional. Cabe considerar que la corrida de optimización se llevó a cabo utilizando computación en paralelo con 2 núcleos en

una computadora con las siguientes especificaciones: Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU @ 2.50 GHz, 2701 MHz, 2 procesadores principales, 4 procesadores lógicos y memoria física instalada (RAM) de 8 GB.

Por consiguiente, considerando los datos y especificaciones anteriormente descritos, la mejor solución de diseño o configuración para el parque eólico hipotético se presenta en la figura 5.

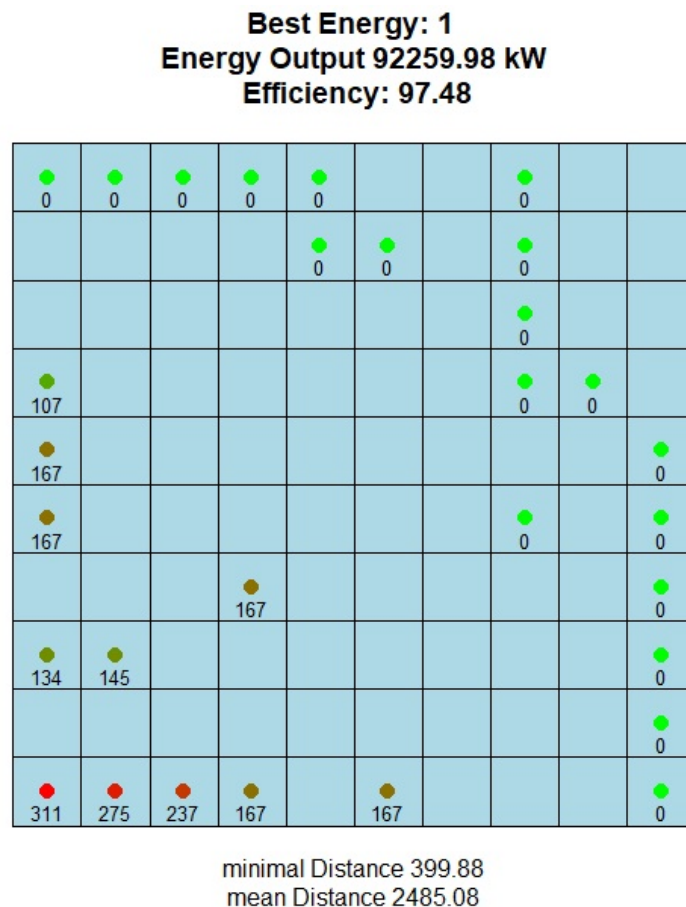


Figura 5 Mejor solución de diseño encontrada por el algoritmo.

La energía total esperada con esta solución de configuración es de 92259.98 kW con una eficiencia del 97.48%. Asimismo, en la figura 5 se pueden apreciar los puntos (forma de representar los aerogeneradores a escala) dentro de las cuadrículas donde se encuentran instalados los aerogeneradores de acuerdo a la mejor solución encontrada. Los colores y los valores que se muestran debajo de estos puntos indican la pérdida de energía provocada por los efectos estela. Los

puntos donde las pérdidas de energía provocadas por los efectos estela son mínimas se representan en color verde, mientras que los puntos donde las pérdidas de energía provocadas por los efectos estela son significativas se presentan en color rojo. De igual manera, la figura 6 también muestra la distancia mínima y la distancia promedio a la que se encuentran los aerogeneradores de acuerdo a la mejor solución encontrada. El tiempo de CPU que el algoritmo invirtió para encontrar tal solución utilizando computación en paralelo con 2 núcleos fue de 395.02 segundos.

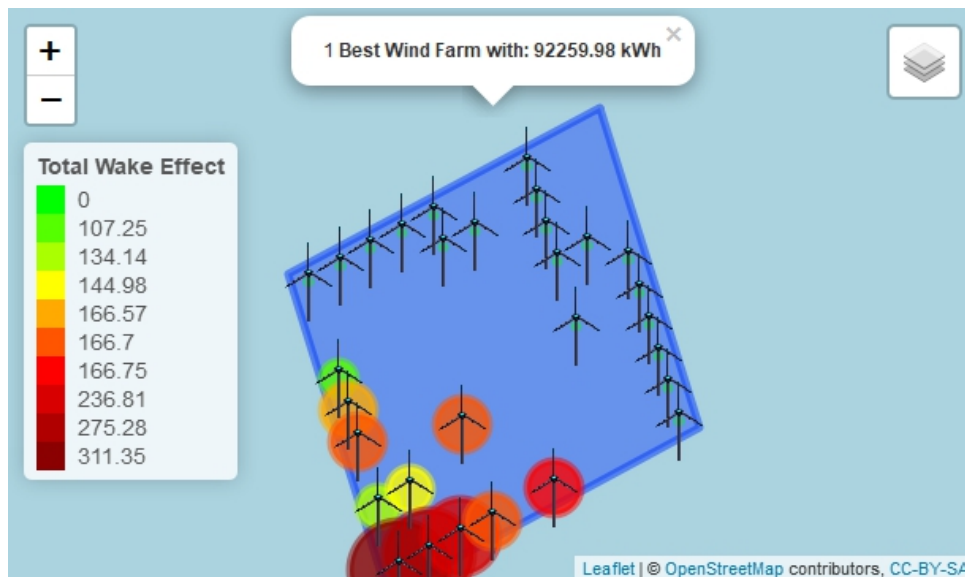


Figura 6 Representación alternativa del diseño del parque eólico.

La figura 6 muestra la solución idéntica presentada en la figura 5, pero desde una perspectiva más real o parecida a un parque eólico. En tal figura también es posible apreciar que los aerogeneradores sombreados de color verde son los menos afectados por los efectos estela, mientras que aquellos sombreados de color rojo son afectados en mayor medida por los efectos estela.

La figura 7 muestra el progreso porcentual de la cantidad de energía producida (eficiencia energética) en cada una de las generaciones o iteraciones, los valores porcentuales máximos alcanzados por un individuo o solución en cada generación se representan en color verde, los valores porcentuales promedio en azul y los valores mínimos en rojo. La figura 8 presenta el desarrollo de la cantidad de energía

producida (en unidades kW) en cada iteración, se interpreta de la misma forma que la figura 7, solamente que en unidades de energía.

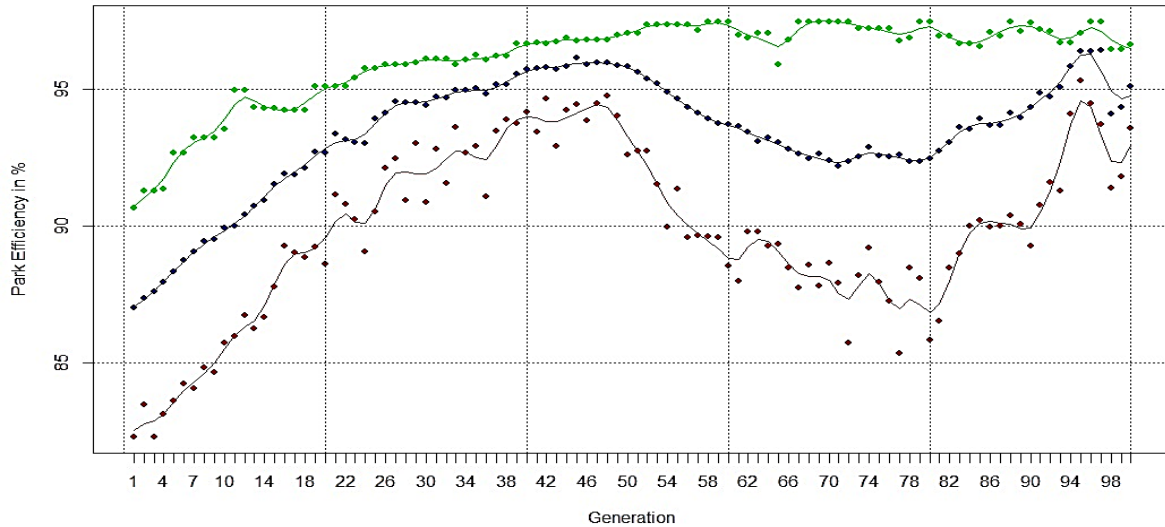


Figura 7 Progreso de los valores de aptitud en porcentaje.

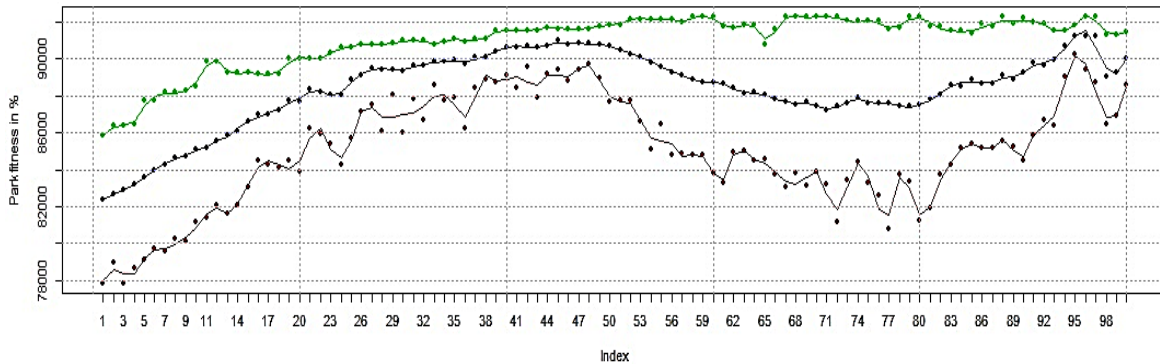


Figura 8 Progreso de los valores de aptitud en unidades de energía.

La figura 9 muestra la cantidad de individuos de cada población a lo largo de las iteraciones. El número de individuos en cada iteración se cuentan después de la función de aptitud, selección y cruce. El número de individuos en cada iteración es la misma tanto para la función de aptitud como para la función de cruce. Los puntos de color negro representan la cantidad de individuos después de la función de aptitud, los puntos rojos la cantidad de individuos después de la función de selección y los puntos color verdes indican el número de individuos una vez realizado el cruzamiento.

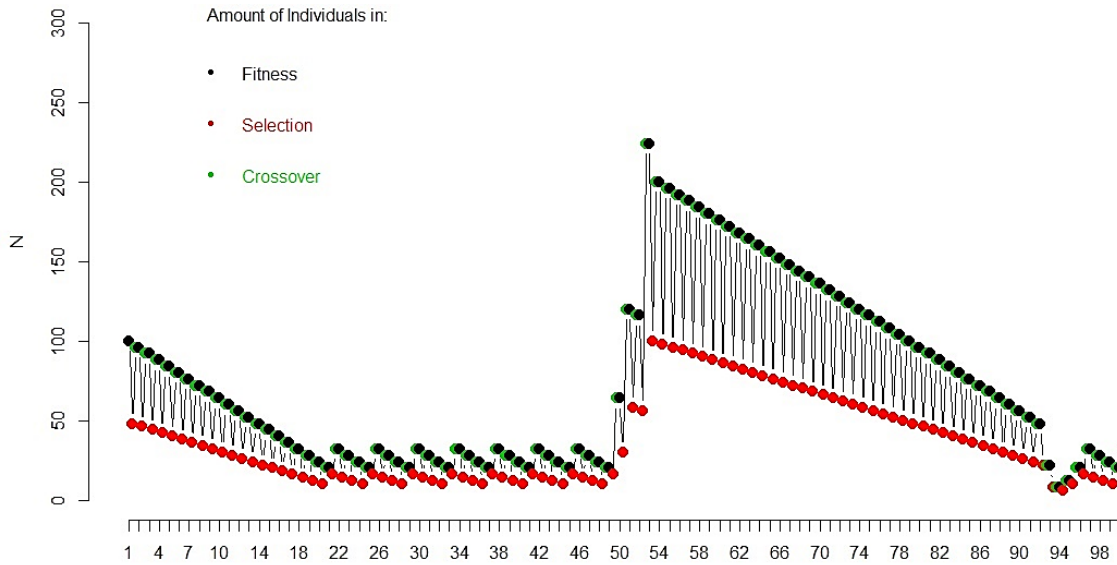


Figura 9 Cantidad de individuos en cada iteración.

La figura 10 muestra la influencia de la mutación de acuerdo a los valores de eficiencia energética. De igual forma dicha figura muestra la evolución de las eficiencias energéticas durante todas las generaciones.

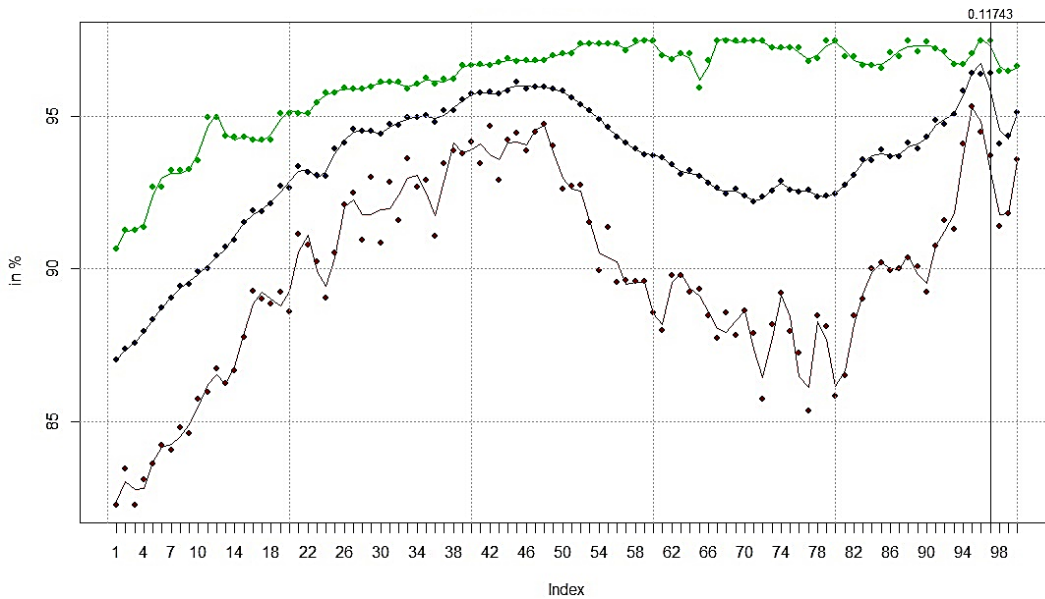


Figura 10 Influencia de la mutación variable para la búsqueda de nuevas soluciones.

Los valores máximos de eficiencia energética encontrados en cada iteración se representan de color verde, los valores promedio en azul y los valores mínimos en rojo. Las líneas verticales indican en cuales iteraciones se utilizó una tasa de

mutación variable en lugar de una tasa de mutación fija. En este caso, el algoritmo requirió solamente en una ocasión activar la mutación variable para explorar otras regiones del espacio de soluciones. El algoritmo está diseñado para activar una tasa de mutación variable. La figura 11 exhibe la evolución de las eficiencias energéticas del parque eólico durante cada una de las generaciones, así como también presente líneas verticales verdes para las generaciones en las que el porcentaje de selección fue mayor al 75%. De acuerdo a la figura 9, algunas iteraciones contienen una cantidad de individuos bastante baja, esto es porque el algoritmo remueve en cada iteración 4 de los peores individuos. Por lo tanto, para evitar la extinción de la población, el algoritmo acudió en 12 ocasiones a un porcentaje de selección del 100% para después cruzarlos y crear más individuos (figura 11).

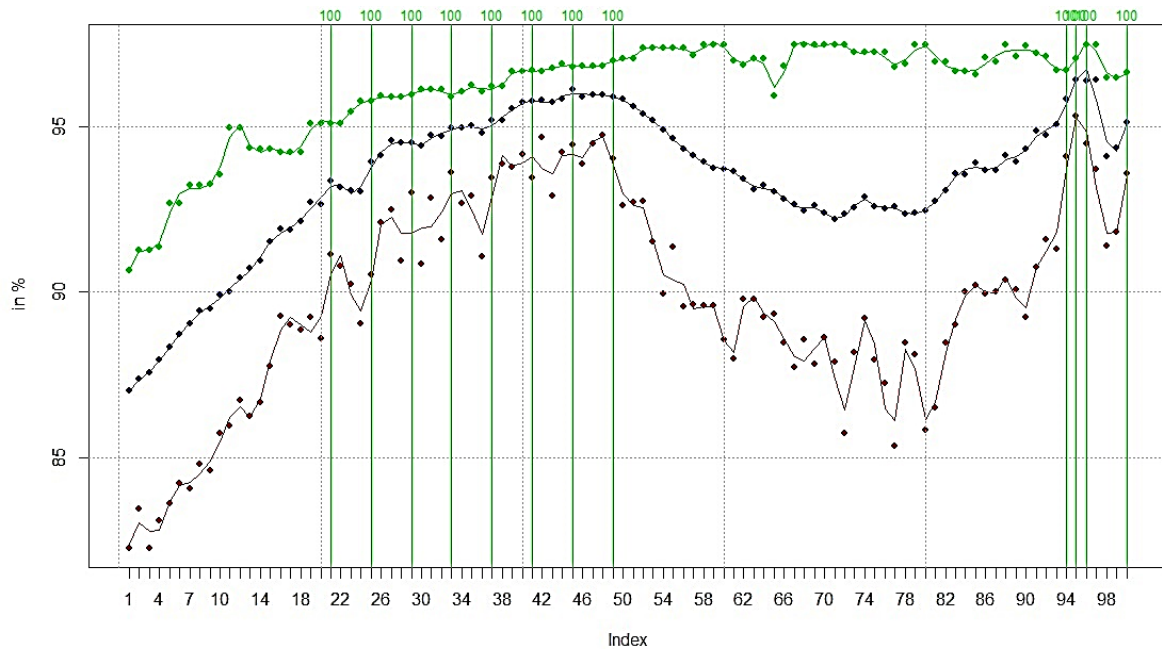


Figura 11 Influencia de la selección de individuos en cada generación.

La figura 12 presenta las eficiencias energéticas para cada una de las generaciones, así como también muestra líneas verticales rojas para las generaciones en las que el número de partes cruzadas fue mayor que 2. Por lo tanto, de acuerdo a dicha figura el algoritmo utilizó 3 partes de cruce con el mismo propósito de evitar la extinción de la población. Las ocasiones en las que el algoritmo recurrió a 3 partes de cruce fueron suficientes debido a que de acuerdo a la figura 9 una vez que se

incrementó el número de partes de cruce, el tamaño de la población aumentó significativamente tal como ocurrió en la iteración  $t = 52$ .

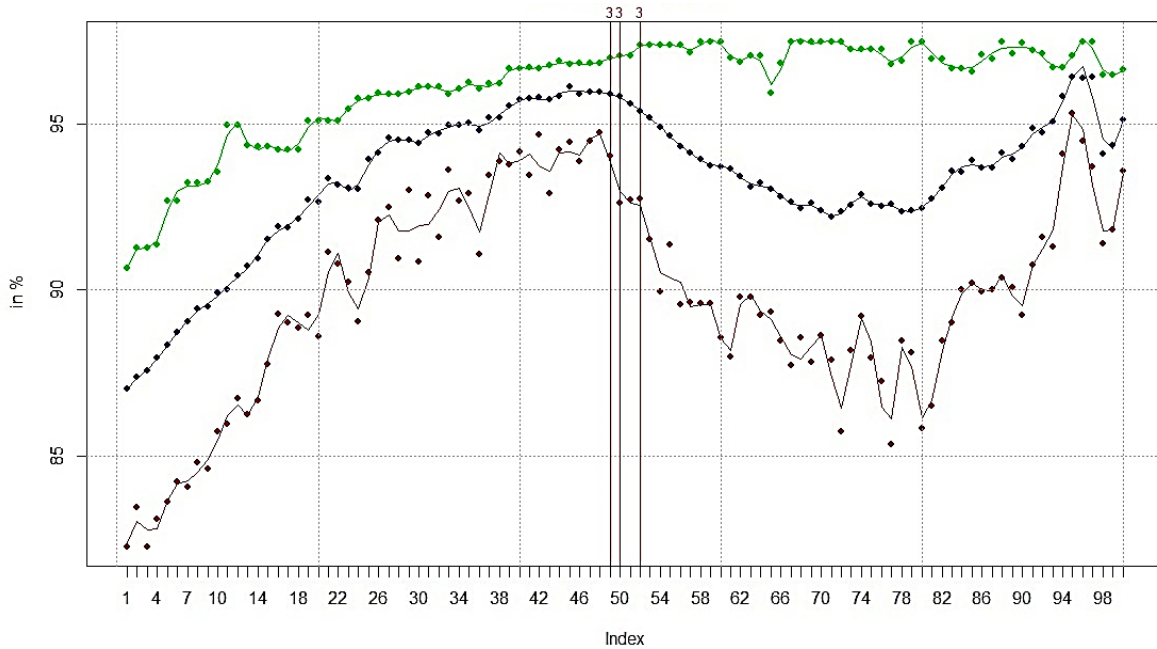


Figura 12 Influencia del cruzamiento de individuos con 3 partes de cruce.

#### 4. Discusión

En esta investigación se abordó brevemente el auge que la energía eólica ha tomado a nivel mundial, así como las dificultades a los que los diseñadores de parque eólicos podrían enfrentarse, tal como es el problema de optimización del diseño de parques eólicos. De acuerdo a este problema, este artículo se enfocó a mostrar y atacar el fenómeno que afecta principalmente el aprovechamiento óptimo del recurso del viento con la finalidad de obtener la mayor producción de energía verde. A pesar de que en esta investigación se resolvió un escenario propuesto, el algoritmo de optimización descrito en este manuscrito puede implementarse en la práctica debido que el modelo de efecto estela considerado (Modelo de Jensen) corresponde a una aproximación excepcional de la realidad para resolver instancias prácticas. Por lo tanto, el algoritmo puede ser utilizado por los diseñadores de parques eólicos debido a que muchas veces recurren a un diseño poco eficiente ya que no consideran las pérdidas de energía ocasionadas por los efectos estela, dando como resultado la incapacidad de lograr el objetivo principal de un parque



eólico, el cual es generar la máxima cantidad de energía mediante el aprovechamiento del recurso del viento a partir de un definido número de aerogeneradores. Otro de los objetivos principales de esta investigación es promover 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.

Por último, los resultados de la instancia solucionada demostraron que el método metaheurístico brindó una solución de buena calidad en un tiempo de cómputo razonable al problema de optimización del diseño de parques eólicos.

## **5. Revisores, recepción y aceptación de artículo**

**Recepción artículo:** 13/marzo/2019      **Aceptación artículo:** 22/abril/2019

### **Revisor 1:**

Nombre: Sarilú Cárdenas Rodríguez  
Institución: TecNM / Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de la Región Carbonífera  
Cédula Profesional: 7702252  
Área de conocimiento: Administración  
Correo electrónico: subinvestifacion@tec-carbonifera.edu.mx

### **Revisor 2:**

Nombre: José Israel Hernández Vázquez  
Institución: TecNM / Instituto Tecnológico de León  
Cédula Profesional: 8521871  
Área de conocimiento: Investigación de Operaciones  
Correo electrónico: israel\_leon12@hotmail.com

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Fischetti, M., & Monaci, M. (2016). Proximity search heuristics for wind farm optimal layout. *Journal of Heuristics*, 22(4), 459-474.

- [2] Chen, Y., Li, H., Jin, K., & Song, Q. (2013). Wind farm layout optimization using genetic algorithm with different hub height wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 70, 56-65.
- [3] AWEA: <https://www.awea.org/>. Febrero 2019.
- [4] Samorani, M. (2013). The wind farm layout optimization problem. In *Handbook of wind power systems* (pp. 21-38). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [5] Méchali, M., Barthelmie, R., Frandsen, S., Jensen, L., & Réthoré, P. E. (2006). Wake effects at Horns Rev and their influence on energy production. In *European wind energy conference and exhibition* (Vol. 1, pp. 10-20). Citeseer.
- [6] Shakoor, R., Hassan, M. Y., Raheem, A., & Wu, Y. K. (2016). Wake effect modeling: A review of wind farm layout optimization using Jensen' s model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1048-1059.
- [7] González, J. S., Rodriguez, A. G. G., Mora, J. C., Santos, J. R., & Payan, M. B. (2010). Optimization of wind farm turbines layout using an evolutive algorithm. *Renewable energy*, 35(8), 1671-1681.
- [8] DuPont, B., & Cagan, J. (2016). A hybrid extended pattern search/genetic algorithm for multi-stage wind farm optimization. *Optimization and Engineering*, 17(1), 77-103.
- [9] Emami, A., & Noghereh, P. (2010). New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithms. *Renewable Energy*, 35(7), 1559-1564.
- [10] Erođlu, Y., & Seçkiner, S. U. (2012). Design of wind farm layout using ant colony algorithm. *Renewable Energy*, 44, 53-62.
- [11] Wan, C., Wang, J., Yang, G., & Zhang, X. (2010, June). Optimal micro-siting of wind farms by particle swarm optimization. In *International Conference in Swarm Intelligence* (pp. 198-205). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [12] Lackner, M. A., & Elkinton, C. N. (2007). An analytical framework for offshore wind farm layout optimization. *Wind Engineering*, 31(1), 17-31.
- [13] Gatscha, S. (2016). *Generic Optimization of a Wind Farm Layout using a Genetic Algorithm* (Master's thesis). University of Natural Resources and Life Science, Vienna.