



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

OSCAR LUCERO MOYA

FACULTAD INFORMÁTICA Y MATEMÁTICA

Trabajo de Diploma para optar por el título de Ingeniero Informático

Diseño de la infraestructura eléctrica de parques eólicos a través de técnicas de optimización por colonia de hormigas

Autor: Julio Antonio Ricardo Fernández

Tutor: Ing. Adrián Pino Angulo

2013-2014

Dedicatoria

A mi familia por la educación recibida a lo largo de estos años

Agradecimientos

A mi profesor Ricardo,
A mi tutor Adrián,
A mi profesora María,
A mi mamá,
A mis hermanas,
A mi esposa y
A todos

Resumen

Los problemas de optimización discreta deben afrontarse con estrategias particulares por sus características, pues para encontrar la mejor solución se deben obtener todas las combinaciones existentes en un espacio de búsqueda finito y compararlas de forma exhaustiva.

Generalmente calcular todas las combinaciones no es una opción aceptable desde el punto de vista computacional. Las metaheurísticas son herramientas, algoritmos creados con el fin de encontrar, en problemas complejos, una solución cercana a la óptima global y en tiempo aceptable. La optimización por colonia de hormigas se presenta como una reconocida metaheurística poblacional, utilizada comúnmente para resolver problemas combinatorios complejos.

En la presente investigación se realiza un estudio de este tipo de algoritmos de optimización, para diseñar la infraestructura eléctrica de un parque eólico. Los desempeños son estadísticamente comparados, para definir qué método de optimización por colonia de hormigas se adapta mejor a la resolución de esta problemática.

Abstract

The problems of discrete optimization should be dealt with specific strategies according to its characteristics, as we all know, in order to find the best solution; all the existent combinations should be obtained in a space of finite search and then compare them exhaustively.

Generally, calculating all combinations is not a very accurate option from the computer science point of view. The so called metaheuristics are tools: algorithms created with the purpose of finding, in the case of complex problems, the closer global optimal solution in an acceptable period of time. The optimization by *ant colony* is represented as a recognized metaheuristic population commonly used to solve complex combinatorial problems.

In this research, a study has been carried out regarding the types of optimization algorithms with the main objective of designing an electrical infrastructure of an eolic park. Each performance is statically compared in order to determine which optimization method by ant colony better adjusts to the solution of the problem discussed in this thesis.

Índice

Índice de figuras	7
Índice de tablas	8
Introducción	9
Capítulo I: Fundamentos Teóricos de la Optimización del Diseño en Redes Eólicas y	
Técnicas de ACO	14
1.0 Energía Eólica	14
1. 1 Características fundamentales de los campos eólicos	15
1.1.1 Características físicas de los campos eólicos	15
1.1.2 Características económicas de los campos eólicos	17
1.2 Generación de energía eólica en Cuba	18
1.3 Trabajos relacionados con la optimización del diseño de redes eólicas	19
1.4 Técnicas de Optimización por Colonia de Hormigas	25
1.4.1 Modo de funcionamiento y estructura genérica de la Optimización por Colonia	
de Hormigas	25
1.4.2 Sistema de Hormigas	26
1.4.3 Sistema de Colonia de Hormigas	28
1.4.4 Sistema de Hormigas Max-Min	29
1.4.5 Sistema de Colonia de Hormigas en dos etapas	30
1.4.6 Conclusiones Parciales	32
Capítulo II: Construcción del Modelo para el Problema de Optimización de la	
Infraestructura Eléctrica de Redes Eólicas y Análisis de los Resultados	33
2.1 Construcción del Modelo Matemático para el Problema de Optimización de la	
Infraestructura Eléctrica de Redes Eólicas	33
2.1.1 Restricciones físico-eléctricas	33
2.1.2 Modelo económico matemático	34
2.2 Adaptación de ACO al Modelo Matemático	35
2.3 Experimentación de los algoritmos de ACO	37
2.3.1 Experimento 1: Validación de la adaptación de los algoritmos ACO	37
2.3.2 Experimento 1.1: Configuración	37
2.3.3 Experimento 1.1: Resultados	39
2.3.4 Experimento 1.2: Resultados	40
2.3.5 Conclusiones Parciales	41
2.3.6 Experimento 2: Configuración y Resultados	41
2.3.7 Conclusiones Parciales	42
Conclusiones	43
Recomendaciones	44
Bibliografía	45
Anexos	46

Índice de figuras

Figura 1 - Aerogenerador.....	14
Figura 2 - Anemómetro	15
Figura 3 - Campo Eólico	16
Figura 4 - Potencial Eólico en Cuba.....	19
Figura 5 - Comparación de pérdidas.....	20
Figura 6 - Comparación de compras.....	21
Figura 7 - Comparación de distribuciones.....	21
Figura 8 - Proceso general de Optimización por Colonia de Hormigas.....	26
Figura 9 - Proceso de Sistema de Colonia de Hormigas en dos etapas	31
Figura 10 Comportamiento de las hormigas	36

Índice de tablas

Tabla 1 - Caso 3	22
Tabla 2 - Caso 4	22
Tabla 3 - Casos	23
Tabla 4 - Resultados	24
Tabla 5 - Campos eólicos	38
Tabla 6 - Conductores	38
Tabla 7 - Parámetros de ACO	39
Tabla 8 - Resultados del experimento 1	39
Tabla 9 - Ranking de Friedman	40
Tabla 10 - Resultados del Test de Bergmann-Hommel	41
Tabla 11 - Resultados del experimento 2	42

Introducción

El costo de la energía es alto y creciente, del mismo modo aumenta la demanda de los combustibles fósiles. La producción de petróleo pasó de seis millones de toneladas anuales en 1896, a doce millones de toneladas diarias, en 2005. Con la reducción de las reservas del petróleo a menos de la mitad, la excesiva dependencia de este combustible se vuelve una peligrosa decisión.

Las energías renovables constituyen una vía para la creación de electricidad, especialmente, la eólica cuya mayor importancia reside en ser energía verde, pues para su generación se utiliza un recurso renovable y su producción no afecta el medioambiente. Es una energía limpia y fácil de obtener, donde se transforma la energía cinética en electricidad, y es la menos costosa de producir. Tal es así, que constituye actualmente una solución económica en países como Alemania, España y Estados Unidos.

Con las posibilidades que brinda la energía eólica y los planes de implementación trazados en el país para el año 2020, será determinante establecer diseños que respondan a las necesidades generales de la Política Energética Nacional, para condiciones de óptimo aprovechamiento del recurso eólico, y operaciones consecuentes de las instalaciones. (AIN, 2012)

El diseño de parques, conlleva a establecer inversiones en aerogeneradores, obra civil e infraestructura eléctrica. Para esta última, que ejercerá acción siempre que se explote el parque, es preciso confeccionar y configurar una instalación eléctrica que disminuya las pérdidas por efecto *Joule*, ligadas al proceso de transmisión de energía eléctrica.

Esto afecta el aprovechamiento de la instalación y es energía producida que se disipa al ambiente antes de llegar al Sistema Electroenergético Nacional, y provoca ineficiencia del sistema generador.

Las experiencias de los parques eólicos en Cuba demuestran que su conexión a las líneas de alta tensión están separadas del centro de generación, lo que provoca pérdidas mayores; también las subestaciones diseñadas no se encuentran en una ubicación exacta que optimice el dimensionado de la red de evacuación de energía eléctrica, y la necesidad de una línea de alta tensión cercana a las inmediaciones del parque que logren disminuir estas dimensiones. (Segura, 2013) Estos elementos

provocarán mayores pérdidas al implementarse parques eólicos de mayor generación, los cuales en el futuro se implementarán en Cuba.

Esto constituye la problemática a analizar: estudiar la posibilidad de diseñar infraestructuras eléctricas que logren reducir las pérdidas por efecto Joule en el proceso de generación y distribución de energía eléctrica en los parques eólicos desde perfiles de optimización de las secciones de conductores que produzca un ahorro energético y económico apreciable.

Por otra parte, las metaheurísticas se presentan como herramientas para la solución de problemas complejos, en los cuales un enfoque de solución tradicional determinístico sería de alta complejidad computacional. Las metaheurísticas poblacionales proporcionan un mecanismo de exploración paralela del espacio de soluciones, y su eficacia depende, en gran medida, de cómo se manipule dicha población (Navarro, 2010). No se garantiza la solución óptima, pero permite hallar una solución de “fácil” y en un tiempo prudencial. Es un enfoque heurístico de amplio propósito, que guía a otras heurísticas hacia regiones promisorias del espacio de búsqueda. Puede aplicarse a distintos problemas de optimización, al requerir solo pequeños y objetivos ajustes de entorno.

En base a la literatura revisada (Grendeau, 2010) una de las metaheurísticas con mejor desempeño en problemas discretos y combinatorios es el método de optimización por colonia de hormigas (ACO por sus siglas en inglés). Esta técnica ha evolucionado dando lugar a la aparición de varios algoritmos que siguen la idea general de la técnica original propuesta por Marco Dorigo a inicios de los '90, pero han logrado mejores resultados en cuanto a calidad de las soluciones y el tiempo de procesamiento de las mismas.

En nuestro país actualmente no existe un modelo matemático preciso para optimizar el diseño de la infraestructura eléctrica de las redes eólicas. Esto trae como consecuencia que las conexiones actuales generen gastos adicionales debido a que para su diseño no se tuvieron en cuenta los valores óptimos de diferentes parámetros como la relación que existe entre la distancia, los aerogeneradores y el material que se utiliza para la transmisión de energía que ellos producen.

A partir de lo expresado en los párrafos anteriores surge el problema científico que motivó este trabajo investigativo: **¿Cómo favorecer el proceso de diseño de redes eólicas para minimizar la pérdida de la energía asociada y el costo total de la obra?**

El cual queda enmarcado en el objeto de estudio: **Diseño de la infraestructura eléctrica de redes eólicas mediante la utilización de técnicas de optimización por colonia de hormigas.**

Con la intención de resolver el problema científico, se propone como objetivo: **Crear un modelo matemático de optimización por colonia de hormigas para el diseño de redes eólicas.**

Dado el objetivo queda determinado el campo de acción: **Optimización del diseño de la infraestructura eléctrica de campos eólicos a través de técnicas de optimización por colonia de hormigas.**

Las preguntas científicas siguientes constituyen una guía del trabajo de investigación:

- ¿Cuáles son las bases teóricas de la optimización de redes eólicas?
- ¿Cuáles son los métodos de optimización por colonia de hormigas que se pudieran adaptar al problema de optimización en redes eólicas?
- ¿Cómo adaptar los métodos de optimización por colonia de hormigas para el diseño de la infraestructura eléctrica de redes eólicas?
- ¿Cuán efectiva será la solución propuesta para la optimización del diseño de la infraestructura eléctrica de redes eólicas?

Para guiar esta investigación, se realizaron las siguientes tareas científicas:

1. Estudiar el marco teórico de la optimización del diseño de redes eólicas.
2. Estudiar las diferentes técnicas de ACO para la optimización en redes.
3. Adaptar varios algoritmos de ACO al problema de optimización de redes eólicas.
4. Implementar una herramienta para modelar y resolver el problema de optimización del diseño de redes eólicas a través de ACO.
5. Evaluar empíricamente los métodos de ACO en problemas reales y artificiales.
6. Realizar un estudio del grado de factibilidad del diseño de las redes actuales en nuestro país y proponer otros diseños óptimos según los parámetros a evaluar.
7. Evaluar la sostenibilidad de los métodos implementados para el análisis del diseño de redes eólicas.

Para ejecutar dichas tareas se utilizaron los siguientes métodos teóricos de investigación:

- Análisis y síntesis: apoya a la realización del análisis detallado del marco teórico de los métodos de optimización en redes eólicas.
- Inducción - Deducción: se aprovecha a lo largo de la investigación para arribar a conclusiones generales partiendo de algunas particulares y viceversa.
- Histórico- Lógico: facilita la comprensión e ilustración de los métodos de optimización en redes eólicas.
- Enfoque sistémico estructural: se empleó en el diseño de una estructura adecuada para la implementación de los algoritmos de solución.

Por otra parte, entre los métodos empíricos que se utilizaron se encuentran:

- Revisión de documentos: de gran importancia en la comprensión de los modelos y métodos de solución utilizados en el problema del diseño de redes eólicas, su estado actual a nivel mundial, las principales técnicas existentes y las proyecciones futuras.
- Experimentación: empleada durante la comparación estadística entre los algoritmos de solución descritos en el documento.

Entre los métodos Estadísticos – Matemáticos

- Prueba no paramétricas de Friedman: para comparar el rendimiento de todos los algoritmos utilizados y observar si existen diferencias significativas de manera general.
- Prueba post-hoc de Bergmann-Hommel: se utiliza para detectar diferencias significativas en el rendimiento de pares de algoritmos de solución.

Este trabajo de investigación tiene sus bases en la optimización de redes, con particular énfasis en las eólicas. En torno a esta, se realizó un estudio exhaustivo del estado del arte. También se realizó una comparación analítica experimental para detectar diferencias significativas entre los algoritmos de solución de problemas reales de nuestro país y problemas artificiales.

El documento está estructurado en introducción, dos capítulos, conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro, referencias bibliografía, glosario de términos y anexos.

En el capítulo I se introduce el tema de las redes eólicas donde se definen las principales características de las mismas y se describen algunas de ellas. También se presenta la descripción de varias técnicas de ACO a través del análisis de su evolución.

Por otra parte, en el Capítulo II se presenta el modelo matemático para la optimización de la infraestructura eléctrica de los parques eólicos. Además se realiza un estudio experimental en redes eólicas reales y artificiales para varios algoritmos de ACO.

Capítulo I: Fundamentos Teóricos de la Optimización del Diseño en Redes Eólicas y Técnicas de ACO

En este capítulo se abordan las principales características a tener en cuenta al realizar un proyecto y posterior construcción de un parque eólico, además se realiza un estudio del proceso de evolución de las técnicas de ACO, a medida que se proponen nuevas variaciones y mejoras del proceso en general.

1.0 Energía Eólica

La energía del viento es utilizada mediante el uso de máquinas eólicas capaces de transformar la energía eólica en energía mecánica de rotación para la producción de energía eléctrica. El sistema de conversión, que comprende un generador eléctrico con sus sistemas de control y de conexión a la red, es conocido como aerogenerador (Figura 1).



Figura 1 - Aerogenerador

En un aerogenerador la energía eólica mueve una hélice y mediante un sistema mecánico se hace girar el rotor de un generador, normalmente, un alternador produce la energía eléctrica. Para que su instalación resulte rentable, suelen agruparse en concentraciones denominadas parques eólicos.

El número de aerogeneradores que componen un parque es muy variable, y depende, fundamentalmente, de la superficie disponible y de las características del viento en el emplazamiento. Antes de montar un parque eólico, se estudia el viento en el emplazamiento elegido durante un tiempo que suele ser superior a un año. Para ello se instalan veletas y anemómetros (Figura 2).

Con los datos recogidos se traza una rosa de los vientos que indica las direcciones predominantes y su velocidad. Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones diurnas, nocturnas y estacionales de los vientos, la variación

de la velocidad con la altura sobre el suelo, la existencia de las ráfagas en intervalos breves, y valores máximos ocurridos en series históricas de datos.

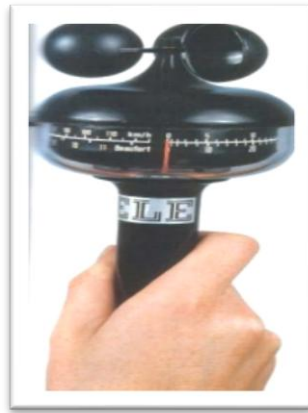


Figura 2 - Anemómetro

Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima, que está en dependencia del aerogenerador que se vaya a utilizar, pero que suele empezar entre los 3 m/s (10 Km. /h) y los 4 m/s (14,4 Km. /h).

1. 1 Características fundamentales de los campos eólicos

El diseño de una instalación eólica, destinada a la generación de energía eléctrica y su correcta explotación a lo largo del tiempo, es una tarea extraordinariamente compleja y multidisciplinaria en la que intervienen Ingenierías Eléctrica, Electrónica, Automática, Informática, Telecomunicaciones, Civil, Mecánica y Aeronáutica, la Topografía, Meteorología o las ciencias medioambientales, así como la Economía y el Derecho.

1.1.1 Características físicas de los campos eólicos

Los principales factores que inciden en el proyecto y explotación de una instalación eólica y que, por tanto, hay que considerar en su diseño, es la identificación de un lugar adecuado para instalar una central eólica o parque eólico hay que considerar tres factores clave:

Disponibilidad de viento. Promedio anual de velocidad de viento elevado, que garantice cierta cantidad de energía generada y un bajo nivel de turbulencias, que atenuará la incidencia de problemas graves de rotura asociados a mayor fatiga mecánica de los componentes.

Disponibilidad y acceso a la red de transporte y distribución de energía eléctrica. Es necesario disponer de una línea eléctrica próxima, con suficiente capacidad de transporte disponible para la evacuación de la energía producida.

Disponibilidad y acceso al terreno. Debe haber espacio suficiente para instalar los aerogeneradores y acceso por carretera para los vehículos de transporte pesado que deberán transportar al lugar los componentes de las turbinas (palas, secciones de las torres, etcétera). No debe haber impedimentos de tipo social, de protección ecológica o de cualquier tipo, ya que podrían dificultar, demorar o incluso impedir la obtención de los permisos administrativos pertinentes. (Mora, 2008)

Estos tres factores son los más importantes, pero no los únicos. Conviene que el terreno no sea zona de huracanes o de otras catástrofes naturales. También hay que considerar factores administrativos, como la consecución de autorizaciones y permisos o los relativos a la aceptación o rechazo social (impacto visual y ruido, daños a la agricultura, la flora y la fauna, zonas naturales protegidas o presencia de restos arqueológicos).

Cualquier proyecto de parque eólico implica incurrir en unos costes de instalación, como pueden ser los de adecuación del terreno, realización de caminos y acondicionamiento de los accesos disponibles o las infraestructuras eléctricas de distribución interior del parque y de conexión a la red de transporte y distribución de energía eléctrica.

Una vez que ha sido localizada una zona con potencial suficiente para instalar un parque eólico (Figura 3), se proyecta la ubicación geográfica individual de cada una de las turbinas, que se realiza de forma heurística por procedimientos de prueba y error.



Figura 3 - Campo Eólico

Usualmente, esta ubicación preliminar tiene en cuenta las principales restricciones de orden técnico, social, medioambiental o de cualquier otra índole. A partir de esta implantación preliminar, el proyectista del parque suele utilizar algún paquete comercial de micro-emplazamiento a fin de evaluar la cantidad de energía potencialmente generable con esa distribución geográfica de los aerogeneradores, teniendo en cuenta las características topográficas del terreno y del viento disponible en la zona. De esta forma y tras unas cuantas iteraciones de prueba y error, el proyectista llega a una implantación de la que se espera una cierta cantidad de energía potencialmente admisible.

A estas pérdidas en la energía capturada (o producida) en el parque debidas a la disposición de las turbinas, hay que añadir las pérdidas por efecto *Joule* en la instalación interior de distribución del parque (generadores, transformadores, cables y líneas) y el consumo de los propios servicios auxiliares, ya que esta energía eléctrica generada no estará disponible para su inyección en la red. Por último, la indisponibilidad de las turbinas, ya sea por avería u operaciones de mantenimiento, supone otro capítulo de energía no suministrada, que hay que detraer de la potencialmente generable (una vez considerados los efectos de las estelas), pues es energía que podría haberse generado y tampoco estará disponible para su inyección en la red.

- Efecto estela o apantallamiento entre turbinas: 5-10 % del potencial teórico
- Indisponibilidad de las turbinas: ~ 5 % del potencial teórico
- Pérdidas *Joule* en instalación eléctrica del parque: 3-5 % del potencial teórico.

1.1.2 Características económicas de los campos eólicos

El análisis económico de la energía eólica debe tener en cuenta los siguientes aspectos básicos:

- Los costos de inversión
- Los costos anuales de explotación:, operación y mantenimiento
- Los costos anuales de financiamiento.

Los costos de inversión más importantes, en el proyecto de un parque eólico terrestre, y su participación en el costo total, se presentan seguidamente:

- Costos de estudios de viabilidad: <2%. Incluyen el estudio del recurso eólico, análisis del emplazamiento, diseño inicial, estudio de impacto ambiental, estudio de rentabilidad y gestión de proyecto, entre otros gastos iniciales.
- Costos de equipamiento (aerogenerador): 65-84%. Incluyen los de producción de la turbina y equipos auxiliares, y la transportación hasta el sitio de emplazamiento e instalación
- Costos de obra civil: 4-15%. Incluyen la transportación interna dentro del emplazamiento de la turbina y la torre, la construcción de la cimentación y carreteras, y otros costos relacionados con la infraestructura necesaria para la instalación y puesta en marcha de las turbinas
- Costos de conexión a la red: 9-16%. Incluyen el cableado, las subestaciones y las líneas eléctricas necesarias
- Otros costos de inversión: 4-10%. Por ejemplo, costos financieros durante la construcción, ingeniería, permisos legales y de uso del terreno, licencias, consultas, seguros y, además, los sistemas de monitoreo.

Los datos anteriores aparecen en el *Irena Working Paper*, de junio de 2012, referenciado por el Doctor Conrado Moreno Figueredo (Moreno, 2010).

Tratar de reducir estos costos impulsa la búsqueda del diseño de la instalación que mejor se adapte a cada proyecto en cuestión. La dificultad de esta búsqueda, desde un punto de vista técnico, económico y matemático, concede a la problemática un alto nivel de complejidad, por la necesidad de utilizar equipos informáticos para encontrar las soluciones que mejor se aplican al problema del diseño de un parque eólico.

1.2 Generación de energía eólica en Cuba

La generación de energía eólica en Cuba comenzó con la instalación en el año 1999 del parque demostrativo de Turiguanó, situado en la provincia de Ciego de Ávila, Este parque cuenta con un par de aerogeneradores capaces de aportar una potencia de 0,45 MW, lo cual constituye una discreta contribución al Sistema Electroenergético Nacional.

En el año 2005, la experiencia continuó profundizándose con diferentes estudios y experimentaciones que trajeron la puesta en marcha en febrero del 2007 del parque eólico de Los Canarreos, en Isla de la Juventud, creado con tecnología francesa y

capaz de generar hasta 1,65 MW. En el año 2008, con mayor experiencia en la tecnología, se procede a la instalación del primer parque en Gibara, situada en la región norte del oriente de Cuba, con una capacidad de 5,1 MW de tecnología Española, y completándose la capacidad nacional con el segundo parque de Gibara, de tecnología China, con alcance de 4,5 MW en el año 2010. La ubicación geográfica de los campos eólicos antes mencionados se aprecia en la figura 4.

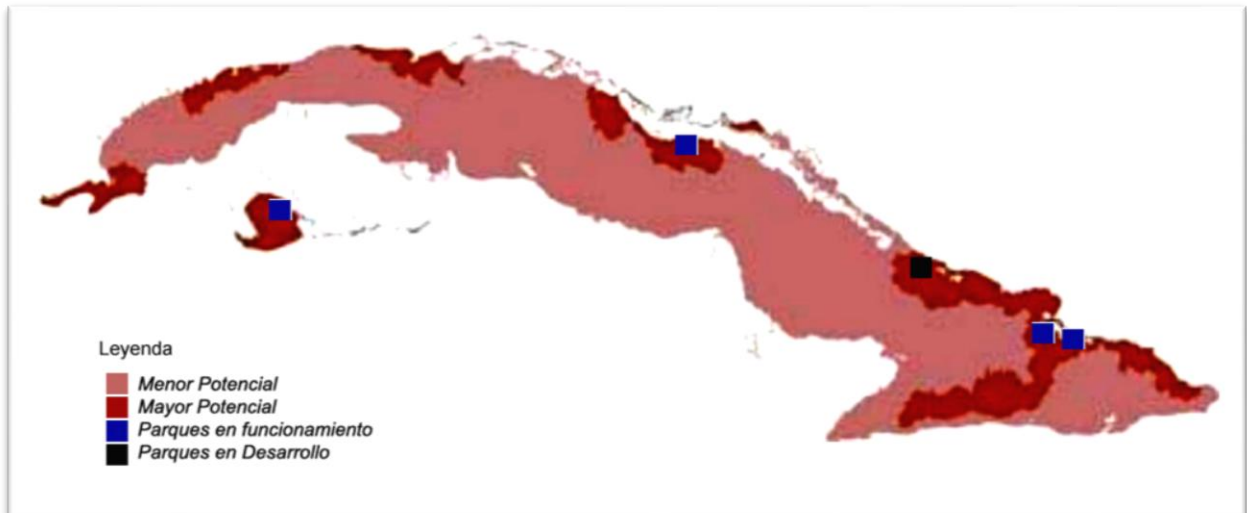


Figura 4 - Potencial Eólico en Cuba

Con las transformaciones electroenergéticas desarrolladas en Cuba, la generación de energía eléctrica a través de las energías renovables se convierte en una necesidad estratégica para la seguridad del país. La energía eólica constituye una alternativa en desarrollo en los últimos años en Cuba, con posibilidades de expansión en el futuro inmediato (ONEI, 2012). La capacidad de generación de energía eléctrica, a partir de la energía eólica, para el caso de Cuba cerró en el año 2012 con cuatro parques en funcionamiento, con una potencia de 11,70 MW. Esta capacidad es aún muy discreta pues se cuenta con una penetración eólica abundante (Figura 4), como lo demuestran las más de cien estaciones de medición de viento en numerosas zonas del país. Esto presupone que la ampliación de la misma se acometerá en breve.(AIN, 2012)

1.3 Trabajos relacionados con la optimización del diseño de redes eólicas

La optimización de la infraestructura eléctrica de las redes eólicas, mediante la comparación de diseños con diferentes secciones de conductor, surge como objeto de estudio en varias publicaciones nacionales e internacionales. Principalmente por la importancia global de la investigación pues, disminuye las pérdidas de energía por

efecto *Joule*, genera una mayor ganancia electroenergética, aumenta la fiabilidad de la inversión y perfecciona la explotación de los parques eólicos.

Una de las primeras aproximaciones, dentro de la optimización del diseño de las infraestructuras eléctricas, se encuentra en (Arias y Henríquez, 2000). El artículo muestra el desarrollo de una aplicación para estudiar la reconfiguración de redes de distribución. El programa basa su trabajo en un algoritmo genético, que optimiza tres funciones objetivos principales: reducción de pérdidas por efecto *Joule*, compra óptima de energía y balance de carga. Respecto de la reducción de pérdidas, como se aprecia en la figura 5.

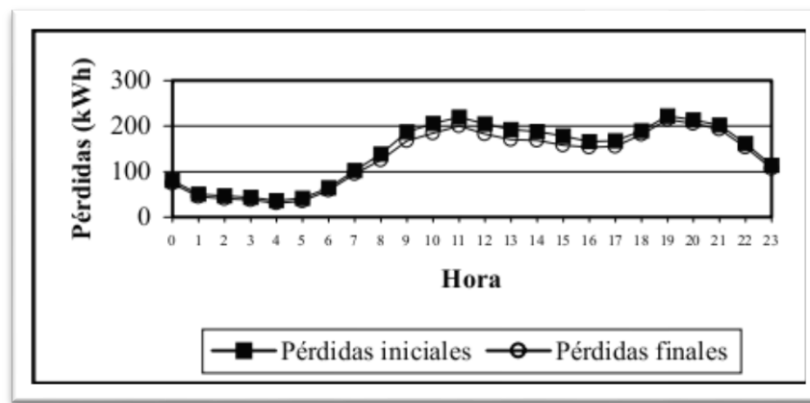


Figura 5 - Comparación de pérdidas

Hora a hora se obtuvo una reducción total de las pérdidas de un 8,13 %. El monto total de éstas no es tan significativo, porque las pérdidas aumentan considerablemente con la longitud y la cantidad de tramos de línea que contenga el sistema en estudio y en este caso los tramos son cortos (Figura 6). Respecto a la función objetivo compra óptima de energía, a lo largo del estudio, se consiguió en todo momento una reducción del costo de la energía, lo que arrojó una cifra total de ahorro de \$250,35.

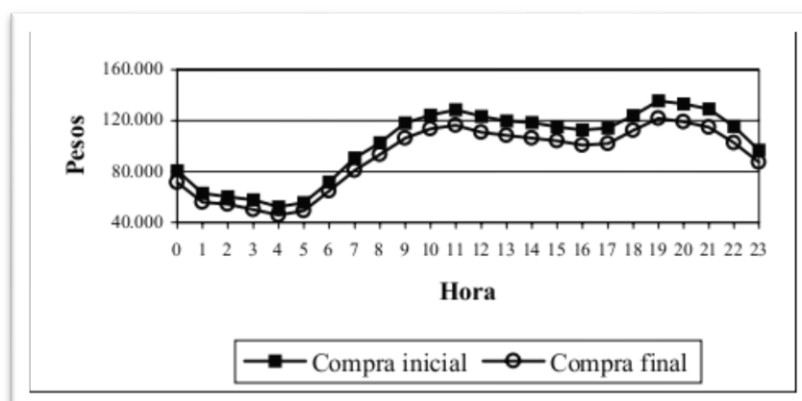


Figura 6 - Comparación de compras

Respecto del estudio de balance de carga, se puede percibir en la Figura 7 que en todas las horas del estudio, se alcanzó una desviación estándar respecto del promedio de porcentaje de carga, inferior al 1%; dicho de otra forma, independiente de las condiciones iniciales de consumo, el programa de reconfiguración entregó como solución una topología que balancea los consumos casi en forma perfecta.

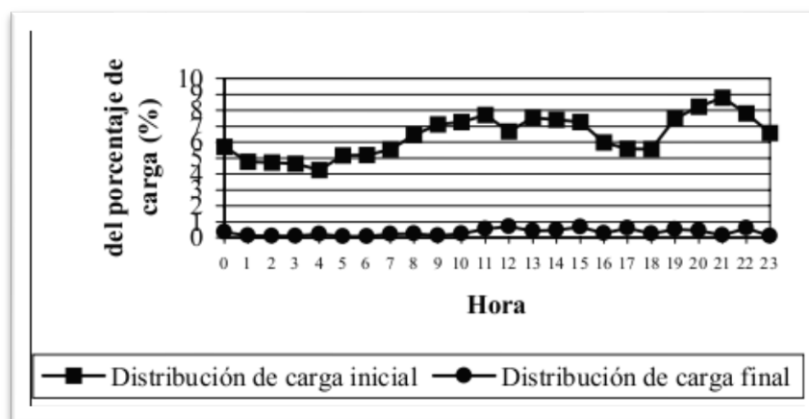


Figura 7 - Comparación de distribuciones

La utilización de algoritmos genéticos, en la solución de este problema de optimización combinatoria es apropiada si se desea operar sistemas de distribución en tiempo real, ya que garantiza resultados satisfactorios con poco tiempo de cálculo y además es fácil de programar y adaptar a las necesidades del problema que se desee solucionar.

Por otra parte, en (Mora, 2008) se separa el problema del diseño global de un parque eólico en dos problemas: el problema del emplazamiento individual de las turbinas y el problema del diseño y configuración de la red eléctrica. Para la resolución del problema de la elección de las máquinas y emplazamientos óptimos, según el criterio de máxima rentabilidad expuesto, se propone el diseño y desarrollo de un algoritmo evolutivo basado en el lenguaje de programación de *MatLab*. La función objetivo (FO) considerada corresponde con la rentabilidad económica de cada solución potencial, identificada por su valor absoluto neto. Una vez obtenida la población en cada iteración, cada individuo es evaluado mediante el cálculo de la inversión necesaria, los flujos de caja anuales durante toda la vida útil de la instalación y los costes de desmantelamiento y valor residual asociados. Además se presenta un modo simplificado de calcular la FO, donde la producción de energía se considera constante

para todos los años y no se tienen en cuenta los gastos de operación y mantenimiento.

Los resultados son comparados con publicaciones anteriores al trabajo, y relacionados directamente con el tema tratado en el mismo. El autor compara el desempeño del algoritmo propuesto, en las mismas condiciones presentadas en las publicaciones referenciadas en (Mora, 2008).

Se analizan varios casos en cuestión, pero los mejores resultados son obtenidos en la resolución del caso 3 y 4 (Tablas 1 y 2).

Tabla 1 - Caso 3

Método	Número Turbinas	Potencia (kW)	FitGr·10 ³	VAN (M€)	Generaciones	Individuos	Coste Computac. (GEN·IND)
Algoritmo de Grady	39	17430 (17220)	1.545 (1.566)	116.7	3000	600	1800·10 ³
Algoritmo Propuesto	39	17806	1.512	119.9	132	~950	125.4·10 ³
Mejora	-	2.1%	-2.1%	3.2 2.7 %	1:23	1.6:1	1:14.35

De esta manera se demuestra que: el algoritmo formulado en este trabajo supera a los anteriores en determinadas situaciones, dado principalmente por la estructura del algoritmo, que permite obtener mejores disposiciones finales a un menor coste computacional.

Tabla 2 - Caso 4

Método	Número Turbinas	Potencia (kW)	FitGr ·10 ⁻³	VAN (M€)	Generaciones	Individuos	Coste Computac. (GEN·IND)
Algoritmo de Grady	39	32057 (32038)	0.840 (0.803)	241.8	1000	600	600·10 ³
Algoritmo Propuesto	39	32617	0.825	246.6	72	~950	68.4·10 ³
Mejora	-	1.72 %	-1.75 %	4.80 2.0 %	1:14	1.6:1	1:8.77

Para dar solución al segundo problema del diseño y configuración de la red eléctrica, se tiene en cuenta las pérdidas de producción, a lo largo de toda la vida útil del parque eólico, con el fin de comprobar la capacidad para gestionar la optimización de la red eléctrica del parque se experimentan varios casos de prueba con diferentes características. A partir de una misma distribución de aerogeneradores y líneas de

alta tensión, se van incorporan diferentes limitaciones y restricciones, que el algoritmo deberá tomar en consideración (Tabla 3).

En se desarrolla una herramienta de ayuda, basada en el uso de algoritmos evolutivos, que permite abordar la optimización global del parque eólico, considerando conjuntamente la implantación y la infraestructura eléctrica de forma integral, como partes de un único problema global. El algoritmo propuesto, no sólo considera los costes de adquisición y montaje de los equipos, sino que también tiene en cuenta las pérdidas de producción a lo largo de toda la vida útil en producción del parque, principalmente debidas al efecto de las estelas y a las pérdidas por efecto *Joule* en la instalación eléctrica. La herramienta de ayuda desarrollada también permite el tratamiento desacoplado de los problemas, por lo que puede ser útil también para la obtención de las soluciones óptimas de los problemas parciales de emplazamiento e infraestructura eléctrica. La unión de estas dos soluciones parciales se convierte en la solución óptima (global) secuencial.

Tabla 3 - Casos

CARACTERÍSTICA	CASO						
	1	2	3	4	5	6	7
Minimización de los costes de los caminos auxiliares	X	X	X	X	X	X	X
Zonas con diferente capacidad portante		X	X	X	X	X	X
Existencia de zonas prohibidas			X	X	X	X	X
Zonas de viento con diferentes factores de forma				X	X	X	X
Elección entre distintos tipos de máquina					X	X	X
Viento uniformemente distribuido en todas direcciones						X	X
Limitación por capacidad de inversión							X

Luego, en el año 2011 se realiza un estudio para reducir al máximo el coste de instalación de los futuros parques eólicos en España, dado que se ajusta el diseño a las características de cada parque en concreto (Galgón, 2011). El orden de magnitud del coste de instalación vendrá marcado, sobre todo, por la tecnología disponible en términos de aerogeneradores en la industria, el conexionado interno del parque y el dimensionamiento de sus cables, evita pérdidas económicas y reduce el precio por kW h generado.

Tras el desarrollo del trabajo, se concluye con una comparación de costes del sistema eléctrico, entre el parque eólico Cruz de Carrutero en su configuración de 40MW y la configuración resultante del proyecto de 50MW. Esta comparación tiene una doble finalidad: comprobar que el proceso de diseño desarrollado por el proyecto es válido y

en consecuencia definir la configuración óptima para el parque Cruz de Carrutero. La optimización matemática mediante un algoritmo determinista, con ayuda de asistentes matemáticos, es el método fundamental utilizado para la optimización del diseño. El informe (Galgón, 2011) no presenta datos estadísticos que permitan apreciar las diferencias económicas logradas o tiempo de procesamiento del algoritmo, solo especifica que se consigue un ahorro en inversión inicial de un 13,27% y una disminución de la longitud de cable empleada de un 6,89%.

Finalmente, la optimización energética de las infraestructuras eléctricas de parques eólicos en Cuba es abordada en (Segura, 2013). El autor propone la reducción de las pérdidas por efecto *Joule* de las infraestructuras eléctricas de parques eólicos en Cuba, mediante la optimización de las secciones de los conductores, comparando diseños con diferentes de secciones obtenidos por un algoritmo genético. Dicha investigación se dirigió al cálculo del costo de la red interna de distribución y evacuación de energía del parque, según dos apartados: costos unitarios (por unidad de longitud) de líneas, tanto de alta tensión (AT) como de media tensión (MT), y los costos de subestación transformadora (una subestación es una instalación, en local abierto o cerrado, donde, como mínimo, hay un transformador y los elementos necesarios para maniobra, protección y medida).

Para la resolución del problema del trazado de las subestaciones y líneas de MT con las líneas de AT, según el criterio de máxima reducción de pérdidas por efecto *Joule*, se propone el diseño de un AG basado en el lenguaje de programación JAVA. La metodología propuesta desarrolla un trazado óptimo de las redes de media tensión, alta tensión y subestación, recomendada para las condiciones de Cuba, además de la capacidad de la misma para evitar limitaciones como la presencia de zonas prohibidas.

Tabla 4 - Resultados

Costo para conductor 300 mm² (CUC)	90 720
Costo para conductor 240 mm² (CUC)	83 160
Inversión de cambio (CUC)	7 560
Dinero ahorrado (CUC)	82 317,60
Energía ahorrada MW	499,32

En el capítulo II de dicho trabajo, son confrontados los funcionamientos de las infraestructuras eléctricas de los parques eólicos, demostrando que al aumentar la sección de los conductores se logra la disminución de pérdidas por efecto *Joule*

(Tabla 4) con costos competitivos en contra de utilizar conductores con menor sección y menores costos fijos iniciales.

Los resultados evidencian que la utilización de una sección adecuada en los conductores de las infraestructuras eléctricas de los parques eólicos provocan una menor resistencia eléctrica y un mejor desenvolvimiento técnico del elemento, por disminución del calentamiento que crea el propio proceso de transmisión de energía, esto elevó la eficiencia electroenergética de la infraestructura eléctrica del parque eólico y aumentó su rentabilidad económica, lo cual es un importante indicador de sostenibilidad.

1.4 Técnicas de Optimización por Colonia de Hormigas

En base a la literatura revisada (Grendeau, 2010) una de las metaheurísticas con mejor desempeño en problemas discretos y combinatorios es el método de optimización por colonia de hormigas (**ACO** por sus siglas en inglés). Esta técnica ha evolucionado con el tiempo y dio lugar a la aparición de varios algoritmos, que siguen la idea general de la técnica original propuesta por Marco Dorigo a inicios de los '90, pero han logrado mejores resultados en cuanto a calidad de las soluciones y el tiempo de procesamiento de las mismas.

1.4.1 Modo de funcionamiento y estructura genérica de la Optimización por Colonia de Hormigas

La idea básica del modelo ACO es usar una forma de comunicación indirecta artificial para coordinar sociedades de hormigas artificiales para resolver problemas de optimización discretos. Este modelo asume que la cantidad de feromona sobre un camino es proporcional a la cantidad de hormigas que usaron el mismo en el pasado y expresa cuan deseado ha sido ese trayecto. Con idea de aumentar la exploración del espacio de búsqueda, cierta cantidad de feromona se evapora con el tiempo para facilitar que no todas las hormigas tomen los mismos caminos de otras.

```
Proceso general de ACO {  
Iniciar valores de feromona  
n_ciclo = 0  
Repetir  
Actividades programadas  
Construir soluciones  
Actualizar feromonas  
Proceso demonio  
Fin actividades  
n_ciclo = n_ciclo + 1  
  
Mientras condición de parada  
}
```

Figura 8 - Proceso general de Optimización por Colonia de Hormigas

Una hormiga artificial es un procedimiento estocástico, que construye incrementalmente una colonia, agregando componentes a la solución parcial en construcción, además presentan diferencias con las hormigas naturales, en que tienen alguna memoria, no son completamente ciegas, y viven en un ambiente donde el tiempo es discreto. El proceso general de búsqueda de ACO se presenta a continuación en pseudo-código. En el cual la condición de parada se puede establecer cuando se alcanza un número máximo de ciclos, o se logra una solución con la calidad deseada, o se converge continuamente a la misma solución.

La técnica original es propuesta por Marco Dorigo a inicios de la década de los '90 (Grendeau, 2010), sin embargo a partir de este punto han surgido varias adaptaciones o variantes que siguen la misma filosofía de ACO, pero han resultado más eficientes en la resolución de problemas complejos (Grendeau, 2010).

1.4.2 Sistema de Hormigas

Conocido por sus siglas en inglés AS (*Ant System*), o Sistema de Hormigas es la primera variación de ACO desarrollada por Dorigo, Maniezzo y Colorni en 1991 (Grendeau, 2010). Inicialmente, se presentaron 3 variantes distintas, Hormiga-Densidad, Hormiga-Cantidad y Hormiga-Ciclo, que se diferenciaban en la manera en que se actualizaban los rastros de feromona. En los dos primeros, las hormigas depositaban feromona, mientras que construían sus soluciones, con la diferencia de que la cantidad de feromona depositada en el hormiga-densidad es constante, mientras que la depositada, en hormiga-cantidad, dependía directamente de la deseabilidad heurística de la transición. En la tercera variante hormiga-ciclo, la deposición de feromona se lleva a cabo una vez que la solución está completa. Esta

última variante era la que obtenía mejores resultados y es por ello que se conoce, generalmente, como la actual AS (Grendeau, 2010). En AS todos los rastros de feromona se reducen en un factor constante, implementándose de esta manera la evaporación de feromona (1):

$$t_{ij} = (1 - \rho) * \tau_{ij}, \rho \in (0,1) \quad (1)$$

Donde ρ se conoce como constante de evaporación y es la encargada de reducir los rastros de feromona para evitar el estancamiento de las soluciones y τ_{ij} la cantidad de feromona asociada al arco a_{ij} . Luego cada hormiga de la colonia deposita una cantidad de feromona que es función de la calidad (2):

$$t_{ij} = \tau_{ij} + \Delta t^k, \forall a_{ij} \in (S^k) \quad (2)$$

En el que $\Delta t^k = f(C(S^k))$, es decir la cantidad de feromona, a depositar en cada arco, a_{ij} que pertenece a la solución S^k de la hormiga k depende totalmente de la calidad $C(S^k)$ de la solución encontrada por dicha hormiga. En cada paso de construcción, una hormiga k escoge ir al siguiente nodo con una probabilidad dada por (3):

$$P_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}^\alpha * (n_{ij})^\beta}{\sum_j \tau_{ij}^\alpha * (n_{ij})^\beta} \quad (3)$$

En el cual N_i^k vecindarios alcanzables por la hormiga k cuando se encuentra en el nodo i , los parámetros alfa (α) y beta (β), controlan el proceso de búsqueda. Para $\alpha = 0$ se tiene una búsqueda heurística estocástica clásica, mientras que para $\beta = 0$ solo el valor de la feromona tiene efecto. Un valor de $1 < \alpha$ lleva a una rápida situación de convergencia. P_{ij}^k , es un vector de probabilidades de visitar cada uno de los nodos de la vecindad N_i^k por la hormiga k , τ_{ij} el valor del elemento i, j en la matriz de feromona y n_{ij} , se denomina función de visibilidad o función heurística que depende totalmente de las características del problema que se va a resolver. Las primeras pruebas de AS fueron para dar solución al problema del vendedor viajero o TSP por sus siglas en inglés (*Traveling Salesman Problem*), sus principales logros fueron promesas a un trabajo futuro, pues no competía con algoritmos del estado del arte actual en su momento (Grendeau, 2010). Sin embargo fue la estimulación necesaria para comenzar la búsqueda de variantes de AS, que obtuvieran un mejor resultado en el TSP y en otra variedad de problemas combinatorios complejos.

1.4.3 Sistema de Colonia de Hormigas

El Sistema de Colonia de Hormigas (*Ant Colony System*, ACS) es uno de los primeros sucesores del AS. El mismo ha mostrado un desempeño mejor que su antecesor (Grendeau, 2010), facilitado, principalmente, por sus tres substanciales diferencias. El ACS usa una regla de transición distinta y más agresiva, denominada regla proporcional pseudo-aleatoria. Sea k una hormiga situada en el nodo r , q^0 un parámetro entre $[0,1]$ y q un valor aleatorio entre $[0,1]$, el siguiente nodo i , se elige aleatoriamente mediante la siguiente distribución de probabilidad:

Si $q \leq q^0$

$$P_{ij}^k = \frac{1 \text{ si } j_{\max}}{0} = \frac{\tau_{ij}^a \cdot (n_{ij})^\beta}{\text{otros casos}} \quad (4)$$

Si no

$$P_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}^a \cdot (n_{ij})^\beta}{\sum_j \tau_{ij}^a \cdot (n_{ij})^\beta} \quad (5)$$

Como puede observarse, la regla tiene una doble intención: cuando $q \leq q^0$, explota el conocimiento disponible, y elige la mejor opción, respecto a la información heurística y los rastros de feromona (4). Sin embargo, si $q > q^0$ se aplica una exploración controlada (5), tal como se hacía en el AS. En resumen, la regla establece un compromiso entre la exploración de nuevas conexiones y la explotación de la información disponible en ese momento. (Grendeau, 2010)

Como segunda diferencia en el ACS las hormigas aplican una actualización en línea paso a paso de los rastros de feromona que favorece la generación de soluciones distintas a las encontradas. Cada vez que una hormiga viaja por una arista a_{ij} , aplica dicha regla (6).

$$t_{ij} = (1 - \varphi) \cdot t_{ij} + t^0 \quad (6)$$

En la cual φ entre $(0,1]$ es un segundo parámetro de evaporación de feromona. La regla de actualización, en línea paso a paso, incluye tanto la disminución de feromona como la de posición de la misma. Ya que la cantidad de feromona depositada es muy pequeña, t^0 es el valor del rastro de feromona inicial y se escoge ese de tal manera que, en la práctica, se corresponda con el límite menor de rastro de feromona.

Con la elección de las reglas de actualización de feromona del ACS ningún rastro de feromona puede caer por debajo de t^0 , la aplicación de esta regla hace que los rastros

de feromona, entre las conexiones recorridas por las hormigas disminuyan. Así, esto lleva a una técnica de exploración adicional del ACS, ya que las conexiones atravesadas por un gran número de hormigas son cada vez menos atractivas, para el resto de hormigas que las recorren en la iteración actual, lo que ayuda claramente a que no todas las hormigas sigan el mismo camino.

Finalmente, como tercera diferencia con respecto al AS, en el sistema de colonia de hormigas solo el proceso demonio actualiza la feromona y no cada hormiga individualmente, es decir, se realiza un manejo de la feromona fuera de la línea de los rastros. Para llevarla a cabo, el ACS sólo considera una hormiga concreta, la que generó la mejor solución global. La actualización de la feromona se hace evaporando primero los rastros de feromona en todas las conexiones utilizadas por la mejor hormiga global (7).

$$t_{ij} = (1 - \rho) * t_{ij}, \forall a_{ij} \in S_{mejorGlobal} \quad (7)$$

A continuación el demonio deposita feromona a los arcos que pertenecen a la mejor solución encontrada hasta el momento (8).

$$t_{ij} = t_{ij} + \Delta t, \forall a_{ij} \in S_{mejorGlobal} \quad (8)$$

Donde $\Delta t^k = f(C(S_{mejorGlobal}))$, es decir la cantidad de feromona, está en dependencia de la calidad de la mejor solución encontrada hasta el momento $C(S_{mejorGlobal})$.

1.4.4 Sistema de Hormigas Max-Min

El Sistema de Hormigas Max-Min (Max-Min Ant System, MMAS) es una nueva extensión del AS, con una mayor explotación de las mejores soluciones y un mecanismo adicional para evitar el estancamiento de la búsqueda, propuesta por T. Stützle, H.H. Hoos, en el año 1996 (Grendeau, 2010). Las características que diferencian a MMAS es que el mismo, aunque mantiene la regla de transición del AS cambia el mecanismo de actualización, este es más agresivo al evaporar todos los rastros y aportar sólo en los de la mejor solución, además define unos toques mínimo y máximo para los rastros de feromona y reinicia la búsqueda cuando se estanca.

En el caso del mecanismo de actualización de la feromona sólo se considera la mejor solución (9), ya sea de la iteración actual o la global, y se evaporan todos los rastros de feromona.

$$\tau_{rs}(t) = (1 - \rho) \cdot \tau_{rs}(t-1) + \Delta \tau_{rs}^{mejor} \quad (9)$$

Donde mejor es *Smejor-global* o *Smejor-actual*. Al establecer unos límites en los valores posibles de feromona en los rastros $\tau_{\min} \leq \tau_{rs}(t) \leq \tau_{\max}$ los cuales son calculados de forma heurística, se facilita la inicialización de la feromona en el valor máximo τ_{\max} , así al aplicar la regla de actualización, los arcos de las buenas soluciones mantienen valores altos mientras que, los de las malas reducen el valor de sus rastros. Lo que da lugar a una mayor exploración al comienzo de la ejecución del algoritmo. Por último, y no menos importante, cuando se detecta que la búsqueda está estancada, se aplica una re-inicialización de la búsqueda, y se vuelven a poner todos los rastros de feromona a τ_{\max} . La combinación de estas tres adaptaciones establece un buen balance exploración-explotación y reduce la posibilidad de estancamiento de la búsqueda por lo que MMAS es, hoy en día, el algoritmo de ACO más competitivo.

1.4.5 Sistema de Colonia de Hormigas en dos etapas

El algoritmo ACS en dos etapas (*Two-Step Ant Colony System*, TS-ACS) se basa en la idea de dividir el proceso de búsqueda realizado por las hormigas en dos etapas, de modo que en la primera se alcancen resultados preliminares, soluciones parciales que sirven de estado inicial para la búsqueda realizada por las hormigas en la segunda etapa (Puris y Bello, 2008). De modo que el propósito es el siguiente: Sea E_i un estado inicial generado aleatoriamente, u obtenido por cualquier otro método sin un costo computacional significativo, E_i^* un estado inicial generado por algún método M , que lo acerca al estado final con un costo $C_M(E_i^*)$, y sea $CC_{ABH}(x)$ el costo computacional de encontrar una solución, desde el estado x usando el algoritmo de búsqueda heurística. Entonces el objetivo es que $C_M(E_i^*) + CC_{ABH}(E_i^*) < CC_{ABH}(E_i)$.

Antes de comenzar el TS-ACS se define la cantidad total de hormigas (m) a usar, ya sea como dato de entrada o por algún método dependiente u otro criterio. Luego, en el primer paso se construyen caminos que sirven de estados iniciales, para las hormigas en la segunda etapa. Como en ambas etapas se utiliza el mismo método, la división entre etapas se logra dando valores distintos a algunos de los parámetros del

modelo en cada paso. Para establecer los valores de los parámetros del algoritmo, en cada etapa se establece un factor de proporcionalidad r , el cual indica en qué medida cada etapa abarca el proceso de búsqueda completo. Este factor está en el intervalo $(0,1)$, $0 < r < 1$. Por ejemplo, si $r=0.3$, esto significa que el primer paso cubrirá el 30% del proceso de búsqueda completo y el segundo paso el resto. Los parámetros cuyos valores son dependientes del factor r fueron la cantidad de hormigas m a usar en cada paso, el número de ciclos a ejecutar en cada paso nc y la cantidad de mejores soluciones cs del primer paso, que serán utilizadas como posibles estados iniciales en el segundo, el cual se calcula a partir de tomar un por ciento de las soluciones generadas en el primer paso.

P1: Paso 1.

P1.1: Calcular los parámetros para el primer paso.

$$m1 = r * m$$

$$nc1 = r * nc$$

P1.2: Aplicar el algoritmo ACS.

P1.3: Caminos Candidatos \leftarrow Caminos generados por ACS en la primera etapa.

P2: Paso 2.

P2.1: Calcular los parámetros para el segundo paso:

$$m2 = r * m$$

$$nc2 = r * nc$$

El = Seleccionar un % de cs del conjunto de caminos candidatos.

P2.2: Aplicar el algoritmo ACS utilizando como estados iniciales para las hormigas en cada ciclo caminos seleccionados desde el conjunto El.

Figura 9 - Proceso de Sistema de Colonia de Hormigas en dos etapas

Como se puede apreciar la elección del factor r debe tener una alta incidencia en el desempeño del algoritmo. Un valor alto de r , es decir cercano al valor 1, hace que el estado inicial E_i^* se acerque más al estado objetivo, de modo que el valor de $C_{ACS}(E_i^*)$ debe aumentar y el de $CC_{ACS}(E_i^*)$ disminuir. Pero, además de este balance entre los costos de $C_{ACS}(E_i^*)$ y $CC_{ACS}(E_i^*)$, existe la problemática de cuánto se explora el espacio de búsqueda; mientras mayor sea el valor de r el proceso de búsqueda, en la segunda etapa, disminuye por varias razones pues existen menos hormigas trabajando, además la cantidad de ciclos decrece, y aunque la cantidad de posibles estados iniciales para la segunda etapa debe crecer cuando crezca r , ya esa cantidad está acotada por el resultado de la etapa previa.

1.4.6 Conclusiones Parciales

Es evidente que el diseño de un parque eólico es un proyecto que ocupa un gran número de variantes y elementos que no pueden ser desestimados. La optimización depende, fundamentalmente, de si se quiere aumentar la energía producida o lograr el diseño más económico. Los gastos referentes a la red eléctrica se encuentran alrededor del 15 % de la inversión general, pero es el único por ciento que puede ser manejado a voluntad. Esto implica que realizar un óptimo diseño eléctrico, para un mejor aporte energético global de la instalación, puede aumentar también el valor absoluto que reporte el parque eólico en general. Recortando así el tiempo en que se alcanza la inversión inicial.

La optimización basada en colonia de hormigas es una metaheurística que ha mostrado buenos resultados en la solución de problemas de optimización discretos. El comportamiento de los algoritmos ACO es sensible a los valores de los parámetros del modelo, mayor α produce una mayor intensificación así como una menor α origina mayor diversificación.

Capítulo II: Construcción del Modelo para el Problema de Optimización de la Infraestructura Eléctrica de Redes Eólicas y Análisis de los Resultados.

En este capítulo se explica, de forma detallada, el modelo matemático utilizado para dar representación al problema de diseñar una red eléctrica para la infraestructura de un parque eólico. También se muestra la forma en que se adaptan los algoritmos AS, ACS y MMAS, para el manejo de las soluciones y las representaciones del problema. Se presenta el prototipo de los experimentos que se llevan a cabo para en una etapa inicial validar los algoritmos, compararlos estadísticamente, para encontrar cuál de ellos posee diferencias significativas con el resto y en una etapa final, proponer algunos cambios a parques eólicos actuales que pueden ser optimizados según los parámetros analizados.

2.1 Construcción del Modelo Matemático para el Problema de Optimización de la Infraestructura Eléctrica de Redes Eólicas.

Para modelar artificialmente un campo eólico se deben tener en cuenta las restricciones físico-eléctricas y un modelo económico matemático que permita conocer el costo de cada posible solución.

2.1.1 Restricciones físico-eléctricas

En el análisis de la infraestructura eléctrica del parque eólico, se conocen las posiciones de los aerogeneradores y de las líneas de evacuación existentes en las proximidades de la instalación. Para un número de aerogeneradores declarados y líneas de evacuación determinadas el trazado de la red eléctrica debe originarse sobre la base de disminución de los costos y reducción de pérdidas en la transportación de la energía eléctrica generada y cumplir una serie de restricciones como son:

- Todos los puntos de generación deben quedar conectados con alguna de las líneas de alta tensión ya existentes mediante una red radial, para que la energía capturada, por un aerogenerador cualquiera, sea evacuada a través de una subestación transformadora y su línea de alta tensión, en un circuito que puede compartir con otros aerogeneradores

- El número máximo de subestaciones conectadas a cada una de las líneas de alta tensión se limita al máximo de una y su potencia no puede superar la máxima capacidad admisible de la línea de alta tensión
- Cada una de las subestaciones del parque eólico se conecta a una de las líneas de alta tensión mediante su correspondiente línea de evacuación de energía
- La potencia de cualquier subestación (suma de las potencias de los aerogeneradores conectados a ellas) estará limitada a la máxima capacidad de la línea de evacuación disponible en línea de alta tensión de la red de transporte y distribución a la cual pretende conectarse. Al conocerse las posibles líneas de evacuación y para un determinado conjunto de aerogeneradores y ubicación especificados, se trata de obtener la configuración de cables que minimice las pérdidas.

2.1.2 Modelo económico matemático

Como el objetivo central es determinar el tipo de cable más apropiado para cada sección, las variables de decisión son discretas (X_{ij}) y representan el tipo de cable i que se puede utilizar en la sección j .

En cuanto a la función objetivo se determinó que los costos que repercuten para optimizar monetariamente el diseño de la infraestructura eléctrica son: los costos de inversión (CI) y los costos por pérdidas de energía asociada a la transmisión (CP).

$$CT = CP + CI \quad (10)$$

$$CT = \frac{P_{kw}}{T_e} * \frac{X_i L_i W_i}{T_a^2} + (C_{xi} L_i - C_{ri} L_i) \quad (11)$$

Donde P_{kw} es el precio del kilo watts hora en el mercado internacional en dependencia del país donde se encuentre el parque analizado. T_e es el tiempo en horas en que se realiza el estudio, X_i es la resistencia del cable i , L_i la longitud de la sección actual analizada, W_i es la potencia que es transportada en la sección i y T_a la constante de tensión definida en la ecuación física para especificar la energía perdida por una tensión W que es transportada por un cable de longitud L con una resistencia X . (12)

$$CP = \text{Energía Perdida} = \frac{X_i L_i W_i}{T_a^2} \quad (12)$$

Además en (11) se define C_{xi} como el costo que relacionado con la compra del cable i en proporción con la cantidad de metros L_i que se requieran para la sección i de la propuesta, C_{ri} costo asociado con la compra del cable i en proporción con la cantidad de metros L_i que se requieran para la sección i en el diseño actual del campo eólico.

Entre las restricciones se plantea que, para una solución ser considerada como la mejor global en una iteración, debe cumplir que:

$$\frac{P_{kw}}{T_e} * \frac{X_i L_i W_i}{T_a^2} + C_{xi} L_i - C_{ri} L_i < \frac{P_{kw}}{T_e} * \frac{R_i L_i W_i}{T_a^2} \quad (13)$$

Nótese que el miembro izquierdo es la **FO**, y el miembro derecho no es más que el costo de las pérdidas que genera el diseño actual, solo se diferencia en la variable **R_i** que representa la resistencia del conductor **i** del diseño actual (13).

Además, el monto con el que se cuenta para la inversión (**DD**) debe ser especificado (si se tiene) para determinar una solución factible teniendo en cuenta esta restricción:

$$C_{xi} L_i - C_{masEconomico} L_i \leq \text{DineroDisponible} \quad (15)$$

Donde el miembro izquierdo es la diferencia entre el costo del diseño propuesto, menos el costo del diseño más económico y debe ser menor o igual (15) al dinero con que se cuenta para invertir en el campo eólico.

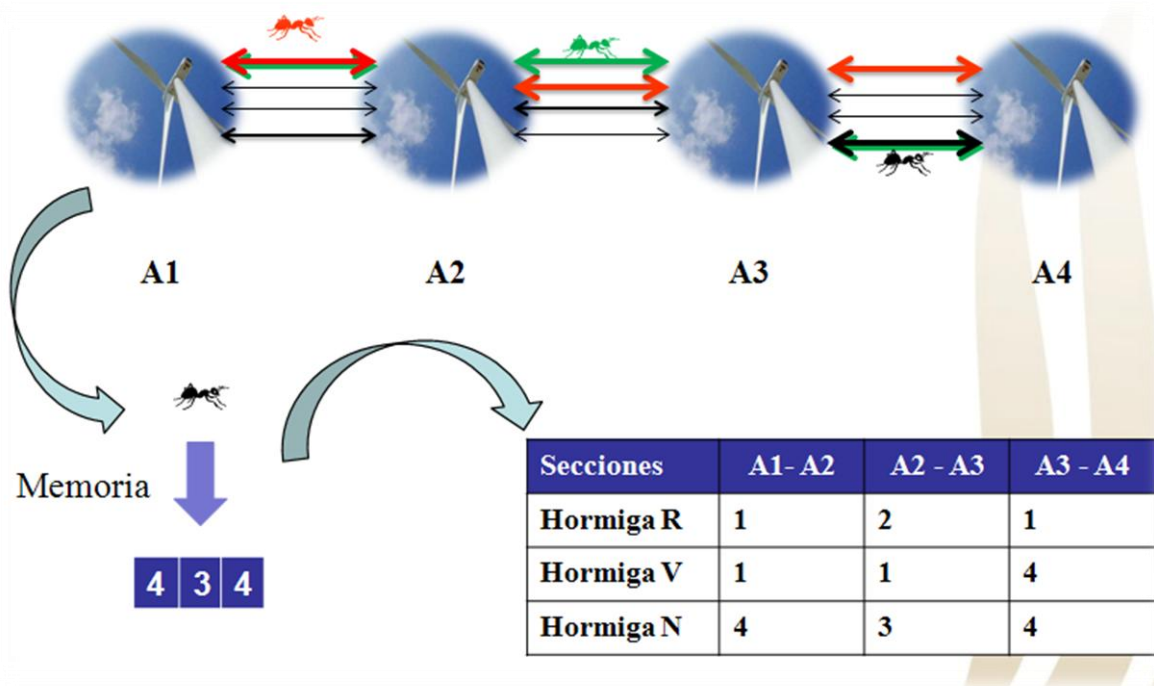
2.2 Adaptación de ACO al Modelo Matemático

En general, para aplicar la ACO a un problema, es necesario que pueda ser representado en forma de grafo con pesos, donde cada arco o arista contendrá dos tipos de información.

La Información heurística o preferencia heurística del arco, es completamente dependiente al problema analizado, las hormigas no modifican su valor durante la ejecución del algoritmo y como segunda información, la memorística o deseabilidad del arco, que se representa por la cantidad de feromona depositada en él, es modificada por las hormigas durante el algoritmo (Navarro, 2010).

Para adaptar las variantes de la metaheurística ACO, al problema del diseño de la infraestructura eléctrica, se tuvieron en cuenta varios aspectos. Como se muestra en la figura 10, el paso de una hormiga de un estado a otro es, simplemente, la selección (a través de una función de calidad) de un tipo de cable para la sección adyacente a aquella donde se encuentra. De esta manera, cuando una hormiga recorra el campo, tendrá almacenada una variación de conductores, en forma de lista donde el conductor que se encuentra en la posición **i** de la lista, fue el seleccionado por la hormiga para pertenecer a la sección **i**. El vector de memoria de una hormiga representa un posible diseño del campo eólico, ordenado por secciones adyacentes con sus respectivas elecciones de conductor.

Figura 10 Comportamiento de las hormigas



Como se muestra en la ecuación (3) la regla de transición de estados está determinada por la multiplicación entre la función de feromona y la función heurística. Para esta última se utilizó el resultado de la función (16). En la cual se calcula una medida entre el costo de la energía perdida por el cable i y el costo de la compra del cable i .

$$\frac{XLW}{T_a^2} + C_i \quad (16)$$

Estos valores son calculados previamente e insertados en una matriz nombrada como la matriz de valores heurísticos. Está construida por la cantidad de conductores, como filas, y la cantidad de secciones, como columnas. En caso de necesitar un valor de función heurística, solamente con conocer el conductor i y la sección k se puede encontrar el valor heurístico. Por otro lado, en la matriz de feromona sucede algo parecido, la cantidad de filas está determinada por el número de conductores conocidos y las columnas por las secciones del parque eólico. El rastro de feromona de un conductor i , en una sección k , especifica el grado de deseabilidad que ha recibido el mismo conductor en la sección analizada, este valor de feromona representa la cantidad de hormigas que han decidido utilizar el cable i en la sección k .

2.3 Experimentación de los algoritmos de ACO

En esta sección se muestran los resultados del experimento para evaluar el comportamiento de algunos de los algoritmos descritos en la sección anterior. El experimento 1, se divide en dos partes fundamentales: la parte 1.1, donde las comparaciones finales se realizan tomando en cuenta el costo total del diseño y la parte 1.2, una vez obtenidos los resultados, en la cual se aplican test estadísticos, con motivo de buscar diferencias significativas entre el comportamiento de las variantes de ACO seleccionadas.

2.3.1 Experimento 1: Validación de la adaptación de los algoritmos ACO

Una vez seleccionados los algoritmos a utilizar en el experimento 1 (MAX-MIN, AS, ACS), es necesario realizar pequeñas adaptaciones a las variantes originales de ACO, para lograr el correcto funcionamiento de las mismas. Las variaciones de ACO sufrieron diversos cambios, por ello la necesidad de validarlos si son acordes al comportamiento y funcionamiento de los algoritmos.

La forma escogida para validar si las nuevas variaciones de los algoritmos no modificaron su funcionamiento estándar es, a modo de prueba y competencia. Se prueba corriendo los algoritmos sobre campos eólicos reales, de los cuales se posee el diseño actual utilizado. Estos diseños actuales se manejan como óptimos locales, y se realiza una búsqueda, donde el algoritmo ACO que se encuentra en prueba, debe obtener diseños cercanos o mejores al diseño actual y tomar en cuenta los costos de su construcción y la energía perdida asociada a cada diseño.

Si se encuentra al menos un diseño que cumpla con las características anteriormente nombradas, se concluye que esa variante funciona correctamente y las adaptaciones realizadas a la misma son correctas. De esta forma se define el primer experimento. En la siguiente sección se presenta la configuración utilizada en las corridas de los algoritmos.

2.3.2 Experimento 1.1: Configuración

Para la evaluación experimental, y por la naturaleza estocástica de ACO se realizaron 6 corridas (cada corrida con 1 hora de duración) por algoritmo en cada campo eólico, para luego utilizar el promedio como resultado final. Cada algoritmo fue

experimentado en 9 campos eólicos de diferentes características como se muestran en la tabla 5.

Tabla 5 - Campos eólicos

Campo Eólico	Acrónimo	Generadores	País	Costo Actual Infra. Eléctrica
España A	Esp-A	20	España	438861,0
España B	Esp-B	10	España	585237,0
España C	Esp-C	10	España	590866,0
España D	Esp-D	10	España	661455,0
España E	Esp-E	5	España	531388,0
Greater G1	GGA	102	Inglaterra	4734500,0
Greater G2	GGB	43	Inglaterra	1772250,0
Ormonde	OOA	30	Inglaterra	592310,0
Walney	WOA	45	Inglaterra	1079090,0

Para realizar los experimentos se utilizaron conductores reales existentes en el mercado actual, comerciados por varias compañías asiáticas y europeas, con diferentes precios y propiedades. Como se detalla en la tabla 6 se deciden utilizar 10 cables, organizados en forma decreciente, se escogieron los términos medios en cuanto a precios y características. Para de esta forma no favorecer ni los precios más altos, ni los más económicos.

Tabla 6 - Conductores

Compañía Comercializadora	Precio/Km	Tensión	Material	Sección	Resistencia
Henan Xuchang S'O, Cable Co.	58300	33 kv	Cu	150	0,224
Hebei New Baofeng Wire & Cable. Co	50000	33 kv	Cu	125	0,275
Hongliang Cable .Co	48000	33 kv	Cu	110	0,317
Xi'an Galaxy Imp & Exp .Co	42500	33 kv	Cu/Al	95	0,374
España Cable*	42014	13 kv	Cu	175	0,161
España Cable*	36646	10 kv	Cu	150	0,262

Zhengzhou Yilan Cable Co., Ltd.	30500	33 kv	Cu/Al	70	0,443
Zhengzhou Power Cable .Co	30000	33 kv	Cu	70	0,526
España Cable*	30000	7 kv	Cu	95	0,403
España Cable*	24600	6 kv	Cu	95	0,614

Como parámetros de ACO, se utilizaron los recomendados en (Puris y Bello, 2012) que se presentan a continuación en la tabla 7.

Tabla 7 - Parámetros de ACO

Parámetros	Valores
Hormigas	30
Const. Evap	0,1
Alpha, Beta	1
Valor q_0 (ACS)	0,6

2.3.3 Experimento 1.1: Resultados

Los resultados demuestran que la solución actual de los campos eólicos puede ser mejorada. Los algoritmos MAX-MIN y ACS lograron encontrar como promedio las mejores soluciones con pequeños valores de desviación típica. Como se puede apreciar en tabla 8 los mejores resultados son obtenidos por el MAX-MIN, a excepción del campo GGA en el cual el ACS encontró el mejor diseño.

Tabla 8 - Resultados del experimento 1

Campos	Generador	Costo en CUC			
		MAX-MIN	AS	ACS	Diseño Actual
EspA	20	290912,2	645959,2	374918,7	438861,0
EspB	10	292800,0	336615,5	336616,3	585237,0
EspC	10	287799,0	1076269,2	604816,7	590866,0
EspD	10	388859,0	1175291,5	1207977,0	661455,0
EspE	5	146400,0	569008,0	382592,0	531388,0

GGA	102	3255507,8	4789318,5	2893766,8	4734500,0
GGB	43	1047254,0	1871645,8	1148601,3	1772250,0
OOA	30	422984,5	790526,7	518881,0	592310,0
WOA	45	1026872,0	1852667,7	1127627,3	1079090,0

Para todos los casos analizados, es decir para los 9 parques eólicos se lograron encontrar diseños que optimizan los utilizados actualmente. Es importante indicar que se tomaron en cuenta conductores similares a los utilizados en los campos eólicos y que no existe una gran diferencia entre los precios de los conductores en los años en que se realizaron las obras a los precios del mercado actual. Para más información acerca de las pruebas realizadas a los restantes campos ver los anexos del informe.

2.3.4 Experimento 1.2: Resultados

A partir de los resultados en la primera parte del experimento 1, se inician los preparativos para realizar la segunda parte del experimento. Para este caso se utilizó la ayuda del Framework acreditado como Friedman.jar, el mismo utiliza los datos de la forma descrita en tabla 8. Como resultados de mayor importancia, concebidos por el *Framework*, se encuentra el ranking de Friedman (tabla 9), el cual aporta un promedio de la posición obtenida generalmente. El p-valor arrojado por la prueba de Friedman para los algoritmos es $p=0,000399983$, por lo que se concluye que existen diferencias significativas entre pares de algoritmos.

Tabla 9 - Ranking de Friedman

Algoritmo	Ranking
MAX-MIN	1,111111
ACS	2,444444
D. Actual	2,777778
AS	3,666667

Una prueba post-hoc se realiza para detectar diferencias significativas entre todos los pares de algoritmos. El test utilizado en este estudio es Bergmann-Hommel como se recomienda en (García y Herrera, 2008). Como se puede apreciar en la tabla 10 el

test afirmó, con una seguridad de 95%, que entre los algoritmos MAX-MIN / AS y MAX-MIN / D. Actual existen diferencias significativas.

Tabla 10 - Resultados del Test de Bergmann-Hommel

Pares de algoritmos	P valor
MAX-MIN vs .AS	1,61E-04
MAX-MIN vs. D. Actual	3,08E-02
MAX-MIN vs .ACS	1,14E-01
AS vs .ACS	1,34E-01
AS vs. D. Actual	2,88E-01
ACS vs. D. Actual	5,84E-01

2.3.5 Conclusiones Parciales

A partir de los resultados del experimento 1 se puede concluir que los diseños actualmente en explotación, no son los óptimos según el mercado actual de conductores. Además, el algoritmo MAX-MIN, de las variantes de ACO analizadas, se presenta como la mejor opción para resolver el problema del diseño de la infraestructura eléctrica de los parques eólicos analizados. De forma general los algoritmos ACO son completamente adaptables al problema del correcto diseño de la infraestructura eléctrica de los parques eólicos.

2.3.6 Experimento 2: Configuración y Resultados

Debido al resultado del experimento 1, se selecciona como mejor algoritmo el MAX-MIN, pues demuestra ser el que mejores resultados obtiene, el único que presentó diferencias significativas con los diseños actuales. Por ello, se utiliza como punto de partida para realizar el experimento 2, donde comprobar el estado de los diseños actuales en los campos eólicos y proponer nuevos diseños, es la tarea fundamental a efectuar. La principal diferencia del experimento 2 respecto al 1, es que las nuevas corridas de MAX-MIN(2) se realizan a partir del diseño actual como base, es decir se parte de una solución inicial y se aplica el algoritmo en búsqueda de nuevas soluciones óptimas cercanas al diseño actual. Como se aprecia en la tabla 11.

Tabla 11 - Resultados del experimento 2

Campos	Aerog	Costo en CUC		
		MAX-MIN(1)	MAX-MIN (2)	Diseño Actual
EspA	20	290912,2	298133,7	438861,0
EspB	10	292800,0	352671,3	585237,0
EspC	10	287799,0	428025,3	590866,0
EspD	10	388859,0	404477,3	661455,0
EspE	5	146400,0	379916,0	531388,0
GGA	102	3255507,8	3966739,4	4734500,0
GGB	43	1047254,0	1494376,8	1772250,0
OOA	30	422984,5	443472,0	592310,0
WOA	45	1026872,0	1029003,0	1079090,0

Se realizan nuevas corridas, 6 por campo, cada corrida de una hora de duración y se utilizan para el algoritmo los mismos parámetros antes mencionados, con la pequeña diferencia que, inicialmente, parte del diseño en funcionamiento del parque eólico en cuestión. Se logra optimizar los diseños actuales, a partir de la solución previa, sin embargo dichas soluciones no mejoran a las anteriores encontradas por el mismo MAX-MIN (1) para estos campos.

2.3.7 Conclusiones Parciales

A partir de los resultados del experimento 2 se puede concluir que para MAX-MIN comenzar la búsqueda de una solución a partir de otra, no fue una mejor opción que iniciarla desde cero. El algoritmo encontró buenas soluciones, pero no mejores a las que el mismo retornó anteriormente. Se puede agregar que los diseños de los campos actuales están alejados de los óptimos globales del espacio de búsqueda.

Conclusiones

- Luego de establecidas las bases teóricas del diseño de la infraestructura eléctrica de los parques eólicos se concluye que: la metodología ACO es adecuada y perfectamente adaptable para dar solución a la problemática. Como representación, se determinó utilizar las tres variaciones: Sistema de Hormigas, Sistema de Colonias de Hormigas y Sistema de Hormigas MAX-MIN.
- Mediante los test estadísticos se comprobó la eficiencia de las variantes, se evidencia como mejor propuesta la MAX-MIN. A partir de esto, se afirma que para los campos eólicos analizados el algoritmo MAX-MIN tiene el mejor comportamiento.
- Fue resuelto el problema científico planteado pues se optimizaron los diseños actuales en los campos eólicos analizados. Los diseños, propuestos por el algoritmo MAX-MIN, alcanzan niveles competitivos desde el punto de vista económico y energético.
- Quedó demostrado que la variante óptima es realizar pequeñas inversiones y comprar cables rentables, pues los cables de altos precios provocan que la inversión inicial sea muy grande y el campo eólico se convierta en una opción no rentable.
- La producción de cables con altos precios de venta es innecesaria. Los algoritmos deciden utilizar cables baratos, con características discretas, a utilizar los conductores de mejores características pero, con altos precios de mercado, pues la energía perdida, asociada a los conductores, no es del todo determinante para realizar la compra de los mismos. El efecto Joule, con los precios actuales del Kw hora, no representa un factor de pérdida de energía considerable.

Recomendaciones

- Implementar un software que realice el proceso general de diseño de un parque eólico, utilizando como módulo para la infraestructura eléctrica el paquete de algoritmos creados en este trabajo.
- Estudiar el comportamiento de diferentes metaheurísticas, con motivo de analizar el comportamiento de las mismas para dar solución al problema de la infraestructura eléctrica.
- Estudiar el comportamiento de ACO para resolver el problema del diseño de la infraestructura eléctrica de los parques eólicos al variar los parámetros Alpha, Beta, cantidad de hormigas y la constante de evaporación.
- Generalizar los resultados de esta investigación dentro de la Facultad de Informática para que sirva a investigaciones futuras sobre las metaheurísticas poblacionales.

Bibliografía

- 1) AIN. (2012). Cuba promueve el uso de la energía eólica.
- 2) Arias, M., & Henríquez, C. (2000). Implementación computacional de algoritmos genéticos para reconfiguración de redes de distribución.
- 3) Avila, D., & Garc, F. (2010). Coste del kWh eólico generado en Cuba, 13(3), 38–45.
- 4) Electrica, E. (2010). Andia Parque Eolico de España.
- 5) Galgón, E. (2011). Distribución de un parque eólico.
- 6) Garcia, M., & Herrera, G. (2008). Test estadísticos.
- 7) Grendeau, M. (2010). Handbook of Metaheuristics.
- 8) Herrero Galdón, E. (2010). Distribución de un parque eólico.
- 9) <http://Alibaba.com>. (2014). --.
- 10) <http://www.lorc.dk/>. (2014). --.
- 11) Mora, J. C. (2008). Optimización global de parques eólicos mediante algoritmos evolutivos, 24.
- 12) Moreno, C. (2010). ¿Cuánto cuesta un parque eólico?
- 13) Navarro, R. (2010). Métodos heurísticos de solución de problemas.
- 14) ONEI, D. de I. y M. A. (2012). Energía renovable Cuba 2011.
- 15) Puris, A., & Bello, R. (2008). Optimización basada en colonias de hormigas en dos etapas para el problema de asignación cuadrática.
- 16) Puris, A., & Bello, R. (2012). Two Step-ACO en TSP.
- 17) Rodríguez, J. (2011). Análisis de la instalación eléctrica del parque eólico experimental sotavento, 1–55.
- 18) Segura, F. (2013). Aplicación de los Algoritmos Genéticos en la optimización energética de las infraestructuras eléctricas de parques eólicos en Cuba.

Anexos

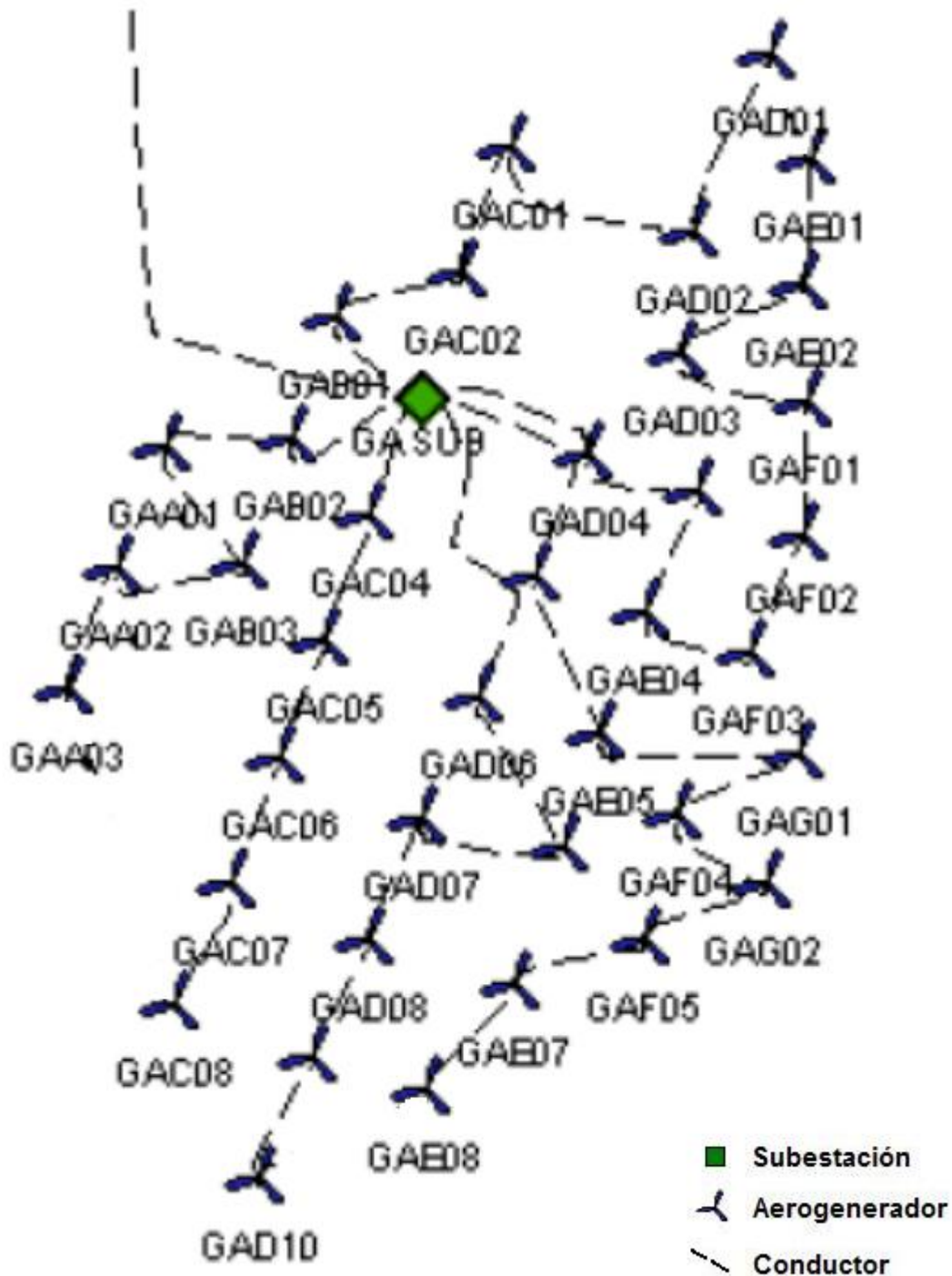
Anexo 1: Parque eólico Gibara 1.



Anexo 2: Parque eólico Greater-Gabbard.



Anexo 3: Parque eólico Greater Galloper.



Anexo 4: Características de los conductores

Compañía Comercializadora	Precio/Km	Tensión	Material	Secc mm	Resistencia
Shanghai Bluewin Wire & Cable Co., Ltd.	120000	33 kv	Cu	500	0,059
Guangzhou LX Sail Import & Export Co., Ltd.	100000	33 kv	Al	500	0,067
Henan Amity Industry Co., Ltd.	100000	33 kv	Cu	500	0,059
Shenzhen Bendakang Cables Holding Co., Ltd.	100000	33 kv	Cu	500	0,059
Verified Supplier - Zhengzhou Yilan Cable Co., Ltd.	100000	33 kv	Cu	500	0,059
Zhengzhou Quanxiang Cable Manufacturing Co., Ltd.	100000	33 kv	Cu	500	0,059
Shenzhen Bendakang Cables Holding Co., Ltd.	99000	33 kv	Cu	400	0,075
Hongliang Cable Co., Ltd.	98650	33 kv	Cu	300	0,104
Hongliang Cable Co., Ltd.	98000	33 kv	Cu	240	0,133
Red-Flag Cable Electrical Instrument Group Co., Ltd.	90000	33 kv	Cu	200	0,163
Henan Zms Cable Import And Export Co., Ltd.	70000	33 kv	Al	185	0,178
España Cable	58897	19 kv	Cu	210	0,102
Henan Xuchang Sunlight Optical And Electric Wire & Cable Co., Ltd.	58300	33 kv	Cu	150	0,224
Hebei New Baofeng Wire & Cable Co., Ltd.	50000	33 kv	Cu	125	0,275
- Hongliang Cable Co., Ltd.	48000	33 kv	Cu	110	0,317
X'ian Galaxy Imp & Exp Co., Ltd.	42500	33 kv	Al	95	0,374
España Cable	42014	13 kv	Cu	175	0,161
España Cable	36646	10 kv	Cu	150	0,262
Zhengzhou Yilan Cable Co., Ltd.	30500	33 kv	Al	70	0,443
Zhengzhou Power Cable Co., Ltd.	30000	33 kv	Cu	70	0,526
España Cable	30000	7 kv	Cu	95	0,403
España Cable	24600	6 kv	Cu	95	0,614
Shenzhen Shenlangxun Electrical Cable Co., Ltd.	15000	33 kv	Cu	70	0,526
Guangdong Win-Win Cables (Mfg) Co., Ltd.	10000	33 kv	Cu	70	0,526
Henan Kington Cable Co., Ltd.	10000	33 kv	Cu	70	0,526
Henan Amity Industry Co., Ltd.	9000	33 kv	Cu	55	0,688
Henan Jiapu Cable Co., Ltd.	1000	33 kv	Cu	33	1,218

Anexo 5: Resultados de las 6 corridas para los 3 algoritmos en el campo ESP-A.

Campo Eó.	MAX-MIN	AS	ACS	D.Actual
ESP-A C1	284263,0	651692,0	374421,0	438861,0
ESP-A C2	277180,0	637412,0	401182,0	438861,0
ESP-A C3	294727,0	664151,0	342009,0	438861,0
ESP-A C4	296789,0	617810,0	359723,0	438861,0
ESP-A C5	297001,0	682707,0	414449,0	438861,0
ESP-A C6	295513,0	621983,0	357728,0	438861,0
Promedio	290912,2	645959,2	374918,7	438861,0
DesvT	8247,6	25117,7	27792,6	0

Anexo 6: Resultados de las 6 corridas para los 3 algoritmos en el campo ESP-B.

Campo Eó.	MAX-MIN	AS	ACS	D.Actual
ESP-B C1	292800,0	334600,0	342960,0	585237,0
ESP-B C2	292800,0	307392,0	315600,0	585237,0
ESP-B C3	292800,0	359523,0	342960,0	585237,0
ESP-B C4	292800,0	333861,0	333861,0	585237,0
ESP-B C5	292800,0	325701,0	358616,0	585237,0
ESP-B C6	292800,0	358616,0	325701,0	585237,0
Promedio	292800,0	336615,5	336616,3	585237,0
DesvT	0	19967,8	15052,5	0

Anexo 7: Resultados de las 6 corridas para los 3 algoritmos en el campo ESP-C.

Campo Eó.	MAX-MIN	AS	ACS	D.Actual
Esp-C C1	289416,0	1073374,0	617593,0	590866,0
Esp-C C2	296328,0	1062544,0	589842,0	590866,0
Esp-C C3	293250,0	1097010,0	585558,0	590866,0
Esp-C C4	282600,0	1073692,0	614973,0	590866,0
Esp-C C5	282600,0	1060024,0	610218,0	590866,0
Esp-C C6	282600,0	1090971,0	610716,0	590866,0
Promedio	287799,0	1076269,2	604816,7	590866,0
DesvT	6101,8	14924,0	13605,1	0

Anexo 8: Resultados de las 6 corridas para los 3 algoritmos en el campo ESP-D.

Campo Eó.	MAX-MIN	AS	ACS	D.Actual
Esp-D C1	388859,0	1170159,0	1207977,0	661455,0
Esp-D C2	388859,0	1191416,0	1207977,0	661455,0
Esp-D C3	388859,0	1157159,0	1207977,0	661455,0
Esp-D C4	388859,0	1150183,0	1207977,0	661455,0
Esp-D C5	388859,0	1191416,0	1207977,0	661455,0
Esp-D C6	388859,0	1191416,0	1207977,0	661455,0
Promedio	388859,0	1175291,5	1207977,0	661455,0
DesvT	0	18791,3	0	0

Anexo 9: Resultados de las 6 corridas para los 3 algoritmos en el campo ESP-E.

Campo Eó.	MAX-MIN	AS	ACS	D.Actual
Esp-E C1	146400,0	569008,0	416188,0	531388,0
Esp-E C2	146400,0	569008,0	370868,0	531388,0
Esp-E C3	146400,0	569008,0	416188,0	531388,0
Esp-E C4	146400,0	569008,0	360720,0	531388,0
Esp-E C5	146400,0	569008,0	360720,0	531388,0
Esp-E C6	146400,0	569008,0	370868,0	531388,0
Promedio	146400,0	569008,0	382592,0	531388,0
DesvT	0	0	26416,1	0

Anexo 10: Resultados de las 6 corridas para los 3 algoritmos en el campo GGA.

Campo Eó.	MAX-MIN	AS	ACS	D.Actual
GGA-C1	3209511,0	4872104,0	2876033,0	4734500,0
GGA-C2	3384090,0	4792955,0	2855199,0	4734500,0
GGA-C3	3292838,0	4763024,0	2958045,0	4734500,0
GGA-C4	3217864,0	4684340,0	2737234,0	4734500,0
GGA-C5	3250262,0	4860838,0	2863986,0	4734500,0
GGA-C6	3178482,0	4762650,0	3072104,0	4734500,0
Promedio	3255507,8	4789318,5	2893766,8	4734500,0
DesvT	74054,3	69863,9	112363,0	0

Anexo 11: Resultados de las 6 corridas para los 3 algoritmos en el campo GGB.

Campo Eó.	MAX-MIN	AS	ACS	D.Actual
GGB-C1	1060999,0	1802153,0	1120189,0	1772250,0
GGB-C2	1024373,0	2050080,0	1247925,0	1772250,0
GGB-C3	1040167,0	1794296,0	1071452,0	1772250,0
GGB-C4	1036925,0	1841580,0	1132638,0	1772250,0
GGB-C5	1047503,0	1820321,0	1118439,0	1772250,0
GGB-C6	1073557,0	1921445,0	1200965,0	1772250,0
Promedio	1047254,0	1871645,8	1148601,3	1772250,0
DesvT	17670,8	98660,2	64079,7	0

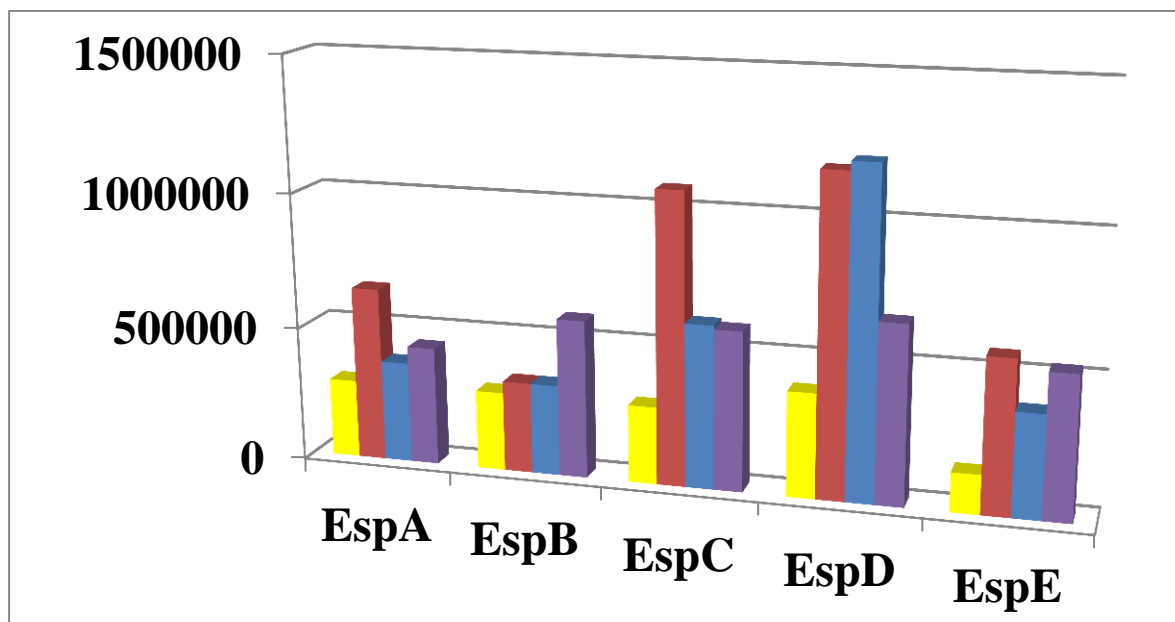
Anexo 12: Resultados de las 6 corridas para los 3 algoritmos en el campo WOA.

Campo Eó.	MAX-MIN	AS	ACS	D.Actual
WOA-C1	984267,0	1794863,0	1196830,0	1079090,0
WOA-C2	1007436,0	1881901,0	1213569,0	1079090,0
WOA-C3	1012073,0	1854809,0	1136332,0	1079090,0
WOA-C4	1048849,0	1876853,0	1115260,0	1079090,0
WOA-C5	1069321,0	1893059,0	1047122,0	1079090,0
WOA-C6	1039286,0	1814521,0	1056651,0	1079090,0
Promedio	1026872,0	1852667,7	1127627,3	1079090,0
DesvT	31147,9	39679,0	69170,0	0

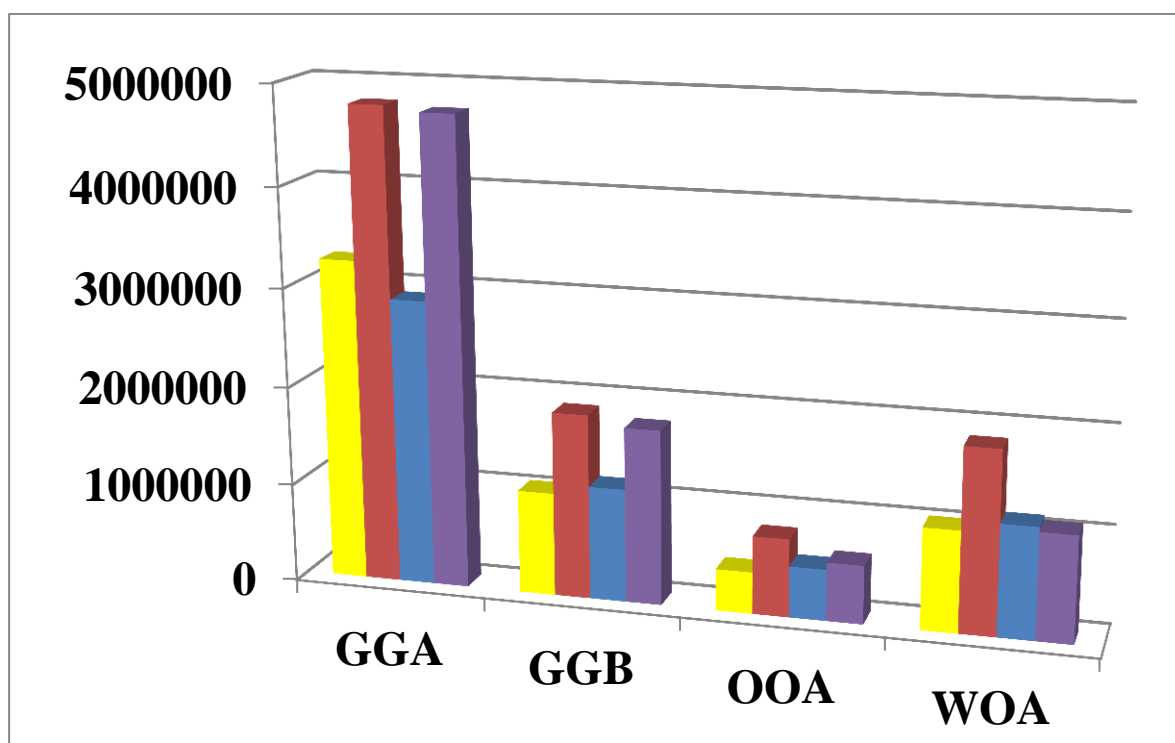
Anexo 13: Resultados de las 6 corridas para los 3 algoritmos en el campo OOA.

Campo Eó.	MAX-MIN	AS	ACS	D.Actual
OOA-C1	419663,0	728709,0	515214,0	592310,0
OOA-C2	419527,0	829133,0	582760,0	592310,0
OOA-C3	417193,0	813380,0	453381,0	592310,0
OOA-C4	438424,0	804087,0	490851,0	592310,0
OOA-C5	411997,0	752857,0	580661,0	592310,0
OOA-C6	431103,0	814994,0	490419,0	592310,0
Promedio	422984,5	790526,7	518881,0	592310,0
DesvT	9813,7	40089,1	52529,5	0

Anexo 13.1: Graficas de los resultados.



■ **MAX-MIN**
 ■ **AS**
 ■ **ACS**
 ■ **Diseño Actual**



Anexo 14: Resultados de las 6 corridas para el algoritmo MAX-MIN en el campo ESP-A.

Campo Eó.	MAX-MIN	D.Actual
ESP-A C1	298831,0	438861,0
ESP-A C2	292058,0	438861,0
ESP-A C3	303512,0	438861,0
ESP-A C4	303512,0	438861,0
ESP-A C5	292058,0	438861,0
ESP-A C6	292058,0	438861,0
Promedio	297004,8	438861,0
DesvT	5611,4	0

Anexo 15: Resultados de las 6 corridas para el algoritmo MAX-MIN en el campo ESP-B.

Campo Eó.	MAX-MIN	D.Actual
ESP-B C1	336300,0	585237,0
ESP-B C 2	373960,0	585237,0
ESP-B C 3	347754,0	585237,0
ESP-B C 4	336300,0	585237,0
ESP-B C 5	373960,0	585237,0
ESP-B C 6	347754,0	585237,0
Promedio	352671,3	585237,0
DesvT	13764,6	0

Anexo 16: Resultados de las 6 corridas para el algoritmo MAX-MIN en el campo ESP-C.

Campo Eó.	MAX-MIN	D.Actual
Esp-C C1	410851,0	590866,0
Esp-C C 2	424896,0	590866,0
Esp-C C 3	448329,0	590866,0
Esp-C C 4	448329,0	590866,0
Esp-C C 5	448329,0	590866,0
Esp-C C 6	410851,0	590866,0
Promedio	431930,8	590866,0
DesvT	16230,6	0

Anexo 17: Resultados de las 6 corridas para el algoritmo MAX-MIN en el campo ESP-D.

Campo Eó.	MAX-MIN	D.Actual
Esp-D C1	404514,0	661455,0
Esp-D C2	410363,0	661455,0
Esp-D C3	398555,0	661455,0
Esp-D C4	404514,0	661455,0
Esp-D C5	410363,0	661455,0
Esp-D C6	404514,0	661455,0
Promedio	405470,5	661455,0
DesvT	4437,1	0

Anexo 18: Resultados de las 6 corridas para el algoritmo MAX-MIN en el campo ESP-E.

Campo Eó.	MAX-MIN	D.Actual
Esp-E C1	378175,0	531388,0
Esp-E C2	378785,0	531388,0
Esp-E C3	382788,0	531388,0
Esp-E C4	378785,0	531388,0
Esp-E C5	382788,0	531388,0
Esp-E C6	378175,0	531388,0
Promedio	379916,0	531388,0
DesvT	2241,3	0

Anexo 19: Resultados de las 6 corridas para el algoritmo MAX-MIN en el campo GGO.

Campo Eó.	MAX-MIN	D.Actual
GGA-C1	3965261,0	4734500
GGA-C2	3918747,0	4734500
GGA-C3	4003921,0	4734500
GGA-C4	3987360,0	4734500
GGA-C5	3958408,0	4734500
GGA-C6	3918747,0	4734500
Promedio	3958740,7	4734500
DesvT	29121,8	0

Anexo 20: Resultados de las 6 corridas para el algoritmo MAX-MIN en el campo GGB.

Campo Eó.	MAX-MIN	D.Actual
GGB-C1	1518362,0	1772250
GGB-C2	1488871,0	1772250
GGB-C3	1457048,0	1772250
GGB-C4	1519262,0	1772250
GGB-C5	1488341,0	1772250
GGB-C6	1519262,0	1772250
Promedio	1498524,3	1772250
DesvT	23173,7	0

Anexo 21: Resultados de las 6 corridas para el algoritmo MAX-MIN en el campo WOA.

Campo Eó.	MAX-MIN	D.Actual
WOA-C1	1041777,0	1079090
WOA-C2	1024250,0	1079090
WOA-C3	1024964,0	1079090
WOA-C4	1022596,0	1079090
WOA-C5	1031428,0	1079090
WOA-C6	1022596,0	1079090
Promedio	1027935,2	1079090
DesvT	7126,2	0

Anexo 22: Resultados de las 6 corridas para el algoritmo MAX-MIN en el campo OOA-A.

Campo Eó.	MAX-MIN	D.Actual
OOA-C1	429855,0	592310
OOA-C2	425151,0	592310
OOA-C3	444561,0	592310
OOA-C4	463226,0	592310
OOA-C5	454567,0	592310
OOA-C6	454567,0	592310
Promedio	445321,2	592310
DesvT	15087,5	0

Anexo 22.1: Grafica de los resultados.

