**Título del proyecto: Planeación de corredores verdes para líneas de transmisión usando optimización multi-criterio.**

**Tipo: Investigación aplicada**

**CONTENIDO DEL PROYECTO**

1. **RESUMEN DEL PROYECTO:**

En la etapa de planeación de una línea de transmisión, encontrar la ruta óptima es un problema complejo que involucra aspectos ambientales, geográficos, geológicos, sociales, económicos, de transporte y de distancias, entre otros. No significa que únicamente se deba encontrar la ruta más corta, o la ruta que provea más capacidad de transmisión, o la ruta más económica, es más bien encontrar un compromiso óptimo de múltiples aspectos. Muchos criterios considerados en la planeación del corredor de una línea de transmisión pueden ser correlacionados geográficamente, tales como: capacidad, peso, costos de servidumbre, accesos y rutas existentes, cimentación, niveles de corrosión, recursos hídricos y características de terreno, entre otros. Es decir, los indicadores de los diferentes criterios cambian de acuerdo a una ubicación georreferenciada en un mapa. Cada uno de estos criterios puede generar un mapa de calor, cuyo indicador es el costo geográfico según una escala de nivel definida. De esta manera, se pueden tener *n* mapas de costos, asociados a *n* criterios de interés. Los mapas se pueden fusionar para generar una superficie de costos integrada (SCI), la cual se consolida como el espacio multi-criterio sobre el cual se pueden realizar procesos de optimización de rutas. La ruta óptima resultante corresponde al denominado corredor verde o corredor sostenible, el cual ofrece el mejor compromiso entre los criterios de interés. La solución que se propone consiste en mejorar los procesos actuales empleados en la toma de decisiones y planeación en el campo del estudio geográfico y espacial, con procesos de optimización matemática y técnicas del campo de la inteligencia artificial. La metodología de solución óptima multicriterio se usará en el desarrollo de una herramienta computacional que integre los procesos de optimización matemática y sistemas de información geográficos para la construcción del corredor verde. Con la posibilidad de simulación de la solución propuesta, se pueden obtener múltiples corredores verdes que conforman una frontera de Pareto, en la cual se pueden analizar diferentes relaciones de beneficio/costo. La SCI involucra aspectos ambientales, constructivos y sociales, entre otros. Por lo tanto, un adecuado diseño del sistema de información, ajustado a la realidad de la información al alcance de las empresas de energía, es un importante valor del proyecto. La aplicación de métodos de inteligencia artificial en este tipo de procesos es de gran interés académico y empresarial en la actualidad. Esta propuesta abarca el diseño del sistema de información para la construcción de la superficie de costo integrada y la aplicación de técnicas novedosas y eficientes de optimización. Al respecto de las técnicas de optimización, el grupo de investigación DINOP cuenta con gran experiencia en el campo de los sistemas eléctricos de potencia y, particularmente, en optimización de rutas y planeación de redes. ﻿

1. **DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO:** 
   1. **Planteamiento de la pregunta o problema de investigación y su justificación en términos de necesidades y pertinencia:**

En la planeación de los corredores de las líneas de transmisión siempre es necesario involucrar criterios tales como:

* Capacidad de transmisión de energía de las líneas.
* Peso de la estructura: puede ser mayor o menor de acuerdo a la composición del terreno.
* Costos de servidumbre: costo diferenciado de los predios según características del suelo.
* Facilidad de labores de mantenimiento y transporte: de acuerdo a las vías existentes.
* Impacto visual: según la zona y la cercanía de comunidades.
* Volúmenes de concreto en la cimentación: de acuerdo a la composición del suelo.
* Niveles de corrosión: según la acides del suelo y su nivel de corrosión.
* Valor agregado a las comunidades y afectación forestal: ubicación de bosques, zonas protegidas, reservas, comunidades, entre otros.
* Facilidad de recursos hídricos: arroyos, ríos y fuentes de agua por zona (hidrografía).
* La pendiente del terreno y deslizamientos de tierra, entre otros.

Los procesos actuales de planeación, comúnmente usados por las empresas del sector, se basan en complejas estrategias desacopladas, que incorporan varias etapas no automatizadas basadas en la experiencia, lo cual acarrea ineficiencias y sobrecostos en el diseño final de la línea de transmisión. Recientemente la empresa Intercolombia S.A. (ISA) lanzó un concurso público en el que se intentaba dar solución a este problema de planeación integrada de corredores en líneas de transmisión. La información del concurso está disponible en:

<http://investigacion.unal.edu.co/boletin/notas-boletin-un-investiga/news/desafio-de-innovacion-abierta-lts-isa/>

El concurso se denominó “Líneas de transmisión sostenible” (LTS), en donde se argumenta lo siguiente:

“En la actualidad, en el desarrollo de proyectos de infraestructura lineal, se exige la búsqueda constante y el cumplimiento de condiciones de sostenibilidad. ISA y sus empresas, con el compromiso de ser cada vez más sostenibles y aportar soluciones a las problemáticas ambientales que afrontan nuestros países y el mundo, están en búsqueda permanente de soluciones que permitan minimizar los impactos negativos al medio ambiente que puede llevar consigo el desarrollo de proyectos de líneas de transmisión. Particularmente, enfocados en temas como el paisajismo y minimización del impacto visual en los proyectos con el desarrollo de estructuras que se adapten mejor a las condiciones visuales de las regiones, asimismo, en la búsqueda de nuevos materiales que reduzcan la huella de carbono y que representen en todo el ciclo de vida del proyecto (diseño, fabricación, construcción y operación) menores consumos energéticos y, por lo tanto, un menor impacto en contaminación de manera integral.”

Lo anterior muestra el gran interés de las empresas del sector por generar estrategias y soluciones alrededor de la planeación y construcción de corredores verdes. Así, en esta propuesta, se genera la siguiente pregunta de investigación, que está alineada con las necesidades del sector eléctrico en lo referente a LTS:

**¿Cómo desarrollar corredores óptimos de líneas de transmisión que involucren, de forma integrada, aspectos ambientales, económicos, prediales, estructurales y sociales?**

En la actualidad, a nivel nacional e internacional, las restricciones ambientales y sociales que se presentan en algunas regiones dificultan la intervención de éstas e incluso pueden inviabilizar la ejecución de un proyecto de transporte de energía. Los impactos de la solución propuesta se ven reflejados en beneficios como: facilidad en los métodos constructivos, menor impacto social, disminución o mitigación de impactos ambientales y reducción de costos que se ven reflejados en menores costos al usuario final. En el ámbito internacional existen algunas referencias bibliográficas en la literatura especializada [1], [2] y [3], no obstante, el alcance de esta investigación aplicada abarca el diseño del sistema de información necesario y ajustado a la realidad de las empresas colombianas, para la construcción de la superficie de costo integrada y la aplicación de técnicas novedosas y eficientes para obtener el corredor verde óptimo. Así, la formulación de una técnica de construcción de la superficie de costos integrada que involucre todos los criterios de interés, la codificación matemática del problema que represente la superficie y que reduzca el espacio de búsqueda, la aplicación de una técnica metaheurística eficiente que permita obtener un corredor multicriterio y la presentación de un conjunto de datos de prueba, consolidan la generación de nuevo conocimiento en el ámbito nacional e internacional.

Para ilustrar el proceso de construcción de la SCI, la figura 1 muestra algunos mapas de calor de diferentes criterios, discretizados en tres niveles de costo (alto, medio, bajo) en una región arbitraria. La Figura 1.a corresponde al criterio de capacidad de transmisión de energía del sistema si la línea pasara por diferentes zonas. La zona de color rojo indica un mayor costo de inversión para la empresa debido a que la capacidad de transmisión de energía es menor en esta zona. Similarmente, la Figura 1.b corresponde al costo de inversión según la calidad de la red de transporte y la Figura 1.c presenta el costo de inversión de acuerdo a la distribución de bosques según la altura de la vegetación.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| a. Cap. de transmisión | b. Costo de inversión | c. Altura vegetación |

Figura 1. Mapas de calor de diferentes criterios. Imágenes tomadas de [3]

De esta manera, se pueden tener n mapas de costos, asociados a n criterios de interés para la empresa. Todos estos mapas se pueden fusionar para generar una “superficie de costos integrada”, como se muestra en la Figura 2.

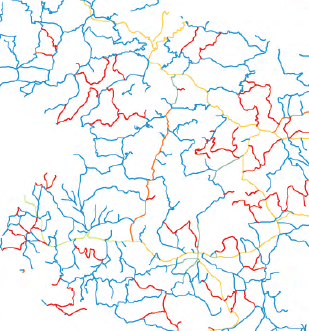
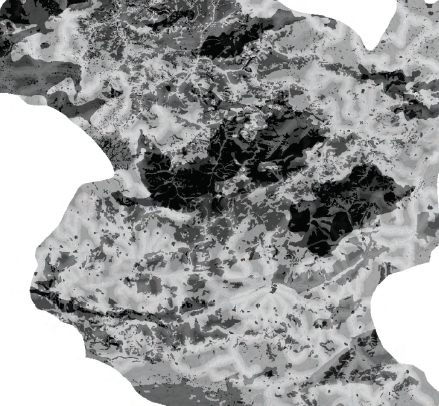


Figura 2. Construcción de la superficie de costo integrada. Imágenes tomadas de [3]

La SCI se consolida como el espacio multi-criterio sobre el cual se pueden realizar procesos de optimización de rutas. La ruta óptima resultante corresponde a la ruta de mínimo costo de inversión involucrando todos los criterios que se hayan considerado en el sistema de información geográfico. Así, es posible obtener un diseño óptimo de un corredor verde, que involucre los criterios mencionados anteriormente.

* 1. **Marco teórico y estado del arte:**

La planeación del sistema eléctrico de potencia se ha consolidado como un problema clásico de optimización, enfocado principalmente a obtener la conectividad eléctrica de la red considerando de forma desacoplada aspectos eléctricos, técnicos y, en los últimos tiempos, ambientales y sociales. Generalmente, tres tipos de algoritmos son usados para resolver este problema: i) algoritmos heurísticos constructivos, ii) optimización clásica usando modelos matemáticos exactos y iii) técnicas metaheurísticas que buscan encontrar el óptimo global de un problema no convexo. Las técnicas metaheurísticas han sido usadas ampliamente en los últimos años para resolver este tipo de problemas. En [1] los autores una técnica de planeamiento óptimo de rutas para transmisión de energía basado en un sistema de información geográfico (SIG). La técnica de optimización se basa en un sistema multi-agente coordinado por una técnica de inteligencia artificial distribuida (IAD). Un agente inteligente consiste en un algoritmo computacional diseñado para reaccionar de forma autónoma, en un área espacial, buscando un objetivo individual pero estableciendo una comunicación con otros agentes de las áreas vecinas. Esta comunicación genera información global que es utilizada por un algoritmo de IAD para buscar un óptimo del sistema global. Los SIG han sido utilizados desde 1960 para buscar la solución de múltiples problemas de planeación en áreas tales como: agricultura, transporte, medicina, militar, biología e industria, entre muchas otras. La aplicación de técnicas basadas en agentes inteligentes artificiales que se mueven sobre un SIG es una temática más reciente que requiere la aplicación de métodos de aprendizaje de máquina [4].

La búsqueda permanente de técnicas que permitan la construcción de líneas de transmisión más cortas y económicas sin violar las restricciones técnicas y eléctricas de la red ha llevado a la formulación de problemas con múltiples objetivos en conflicto de alta complejidad matemática y computacional. Buscando soluciones integradas, en [2] los autores proponen una técnica heurística para la reducción del espacio de búsqueda utilizando variables discretas de decisión y un modelo de flujo DC. La técnica propuesta permite obtener un conjunto reducido de rutas candidatas que son posteriormente procesadas por un algoritmo metaheurístico para obtener la ruta óptima final. En este trabajo sólo dos criterios son considerados para minimización: i) el déficit de energía y ii) los costos de inversión.

En [5], los autores presentan una revisión de diferentes métodos para la planeación de líneas de transmisión considerando: i) la ruta de mínimo costo, ii) la definición simultánea de dos rutas, iii) varias líneas dentro de un mismo corredor y iv) la no generación de rutas en un corredor posible. Los autores presentan un intento por integrar aspectos económicos y ambientales, utilizando imágenes de satélites y asignando diferentes pesos cualitativos por subregiones para obtener la mejor ruta posible. Este trabajo presenta las ventajas y desventajas de los diferentes métodos analizados y se consolida en una interesante revisión del estado del arte hasta el año 2018.

Una revisión de los trabajos en el área de planeación de líneas de transmisión de los últimos 5 años permite concluir que, en la actualidad, el diseño de una línea de transmisión es esencialmente un problema en el campo de los métodos de análisis espacial y estudios geográficos. Recientemente, en [6] los autores presentan un nuevo método para el diseño de líneas de transmisión aéreas considerando información geográfica, eléctrica, técnica y de costos. El método considera la construcción de una superficie de costo integrada basada en información georreferenciada. Esta superficie es dividida en micro-áreas, en donde cada una tiene asociado un costo por pasar el corredor sobre ella. Otros trabajos que utilizan superficies de costo integradas son propuestos en [7] y [8]. El factor común de las propuestas que utilizan superficies de costo integradas es que el proceso de optimización se realiza a través de el algoritmo de Dijkstra, el cual busca encontrar la distancia más corta entre dos puntos.

En la revisión del estado del arte, realizada en esta propuesta, se identifica una brecha en la formulación del problema de diseño de líneas de transmisión, ya que no se encontraron trabajos que involucren corredores ya existentes en la planeación de las rutas de las líneas de transmisión y a la vez que integren múltiples criterios. En Colombia considerar este aspecto es fundamental debido a que empresa como ISA realizan los diseños teniendo en cuenta los predios y corredores que ya son propiedad de la empresa. De esta manera no es necesario adelantar tramites ambientales en estos predios y se generan beneficios de tiempo de implementación, económicos y de impacto social y ambiental.

En esta propuesta de investigación se plantea utilizar un conjunto más amplio de algoritmos y técnicas de planeación propias del campo de ruteo óptimo de vehículos, que permitan resolver el problema de planeación considerando corredores existentes y una superficie de costo integrada. Al respecto, el grupo de Desarrollo en Investigación Operativa (DINOP) posee la experiencia necesaria en la aplicación, a problemas de planeación, de técnicas heurísticas, metaheurísticas y exactas, así como también en la formulación matemática y codificación de diferentes problemas de construcción de rutas [9], [10].

El carácter innovador de la propuesta se justifica en las siguientes contribuciones:

* Presentar un modelo matemático del problema actual de planeación de líneas de transmisión, considerando múltiples criterios y corredores existentes.
* Presentar un sistema de información georreferenciado y multicriterio.
* Contribuir al mejoramiento del proceso actual de planeación de líneas de transmisión.
* Construir una herramienta informática que permita la solución del modelo matemático del problema de forma óptima.
  1. **Objetivos**
     1. **Objetivo general**

Desarrollar una metodología de planeación de corredores óptimos de líneas de transmisión, existentes y nuevas, que integre aspectos ambientales, económicos, prediales, estructurales y sociales.

* + 1. **Objetivos específicos**
* Realizar una revisión del estado del arte alrededor de modelos del problema de planeación multicriterio de líneas de transmisión y técnicas de solución.
* Desarrollar un sistema de información geográfico y multi-criterio según información típica disponible en las empresas.
* Definir un modelo matemático general y una técnica de solución eficiente.
* Desarrollar pruebas del modelo y de la técnica de solución para validar la eficiencia de la metodología.
* Implementar un prototipo del modelo en una herramienta de desarrollo de software.
* Redactar informes y artículos científicos.
  1. **Metodología:**

La metodología para el desarrollo del proyecto se presenta por etapas, las cuales son:

**Etapa 1 (E1).** Revisión del estado del arte de modelos. Se emplean bases de datos internacionales como IEEE y Science Direct, así como revistas indexadas nacionales e internacionales, memorias de congresos, y tesis de maestría y doctorado. Se utilizará como recurso un estudiante de pregrado y uno de maestría durante 4 meses.

**Etapa 2 (E2).** Revisión del estado del arte de técnicas de optimización. Se utilizan los mismos recursos mencionados en la E1.

**Etapa 3 (E3).** Definición y estudio del modelo matemático que describe el problema de planeación abordado. En esta etapa se define también el sistema de información inicial que alimenta el modelo. Se realizan las primeras pruebas de prototipado. Para construcción del sistema de información se realizarán entrevista con empresas del sector que diseñen líneas de transmisión y se utilizará información de la literatura. El sistema de información se implementara en un base de datos gratuita como por ejemplo MySQL o PostGreSQL. Como recurso se utilizará un estudiante de pregrado y uno de maestría durante 6 meses.

**Etapa 4 (E5).** Definición y estudio de una técnica de optimización eficiente. Se implementa la técnica de optimización definida y se realizan los primeros prototipos para evaluación de eficiencia. En esta etapa se utilizará como recurso dos estudiantes de maestría con conocimientos en modelaje y técnicas de optimización y un estudiante de pregrado, durante 6 meses.

**Etapa 5 (E5).** Implementar un prototipo funcional que integre el modelo y la técnica de solución para realizar pruebas del sistema completo. Esta etapa incluye pruebas y ajuste. Esta etapa requiere de dos estudiantes de maestría con conocimiento en desarrollo de software y programación computacional y un estudiante de pregrado, durante 8 meses.

**Etapa 6 (E6).** Implementación de la herramienta computacional. Esta etapa incluye la integración de los prototipos y desarrollo en un ambiente profesional. Esta etapa requiere de dos estudiantes de maestría con conocimiento en desarrollo de software y programación computacional y un estudiante de pregrado, durante 10 meses.

**Etapa 7 (E7).** Depuración, validación y pruebas. Esto se hará en paralelo con la ejecución de las etapas E5 y E6 utilizando los recursos de cada etapa, respectivamente.

**Etapa 8 (E8).** Publicar resultados obtenidos en revista indexada, elaborar informes y analizar resultados. Es importante darle visibilidad a la metodología y los resultados obtenidos, con el fin de ponerla en discusión ante la comunidad académica. Esta etapa requiere dos estudiantes de pregrado y dos estudiantes de maestría durante 4 meses.

* 1. **Cronograma de Actividades:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ACTIVIDAD** | **MES 1** | **MES 2** | **MES 3** | **MES 4** | **MES 5** | **MES 6** | **MES 7** | **MES 8** | **MES 9** | **MES 10** | **MES 11** | **MES 12** | **MES 13** | **MES 14** | **MES 15** | **MES 16** | **MES 17** | **MES 18** | **MES 19** | **MES 20** | **MES 21** | **MES 22** | **MES 23** | **MES 24** |
| **E1** | **X** | **X** | **X** | **X** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **E2** | **X** | **X** | **X** | **X** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **E3** |  |  |  |  | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **E4** |  |  |  |  |  |  |  |  | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **E5** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** |  |  |  |  |
| **E6** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** |
| **E7** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** | **X** |
| **E8** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | **X** | **X** | **X** | **X** |

* 1. **Productos esperados:** Estos deben ser coherentes con los objetivos específicos y con la metodología planteada.

**PRODUCTOS MÍNIMOS ESPERADOS**

**Ver cuadro 001 para descripción de cada producto**

|  |  |
| --- | --- |
| Tipos de Producto | |
| Productos de Generación de Nuevo Conocimiento | Cantidad |
| Artículo de investigación publicado en revista ubicada en cuartiles Q1, Q2,Q3 (índice de impacto) | 1 Artículo Q1 |
| Libros resultados de investigación | 1 Libro de investigación |
| **Productos de Formación de Recursos Humanos** | Cantidad |
| Trabajo de grado de Pregrado | 1 tesis de pregrado |
| Trabajo de grado de Maestría | 1 tesis de maestría |
| **Productos resultados de actividades de investigación, desarrollo e innovación** | Cantidad |
| Productos tecnológicos certificados o validados: Software | 1 herramienta computacional |
| **Productos de Apropiación Social del Conocimiento** | Cantidad |
| Circulación del conocimiento especializado | 1 artículo en congreso internacional |

* 1. **Bibliografía**:

﻿[1] ﻿Demircan, S., Aydin, M., & Durduran, S. S. (2011). Finding optimum route of electrical energy transmission line using multi-criteria with Q-learning. Expert Systems with Applications, 38(4), 3477-3482.

﻿[2] ﻿de Mendonça, I. M., Junior, I. C. S., Dias, B. H., & Marcato, A. L. (2016). Identification of relevant routes for static expansion planning of electric power transmission systems. Electric Power Systems Research, 140, 769-775.

﻿[3] ﻿EROĞLU, H., & Aydin, M. (2015). Optimization of electrical power transmission lines' routing using AHP, fuzzy AHP, and GIS. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 23(5).

[4] Demircan, S. (2009). The road optimization of energy transmission line with multi agent systems. Konya: Selcuk University Graduate School of Natural and Applied Sciences.

[5] Shandiz, S. G., Doluweera, G., Rosehart, W. D., Behjat, L., & Bergerson, J. A. (2018). Investigation of different methods to generate Power Transmission Line routes. Electric Power Systems Research, 165, 110-119.

[6] Santos, A. H. M., de Lima, R. M., Pereira, C. R. S., Osis, R., Medeiros, G. O. S., de Queiroz, A. R., ... & Junior, E. L. C. (2019). Optimizing routing and tower spotting of electricity transmission lines: An integration of geographical data and engineering aspects into decision-making. Electric Power Systems Research, 176, 105953.

[7] C. Monteiro, I. Ramírez-Rosado, V. Miranda, et al., GIS spatial analysis applied to electric line routing optimization, IEEE Trans. Power Deliv. 20 (2) (2005) 934–942, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839724>.

[8] R.M. Lima, R. Osis, A.R. de Queiroz, A.H.M. Santos, Least-cost path analysis and multi-criteria assessment for routing electricity transmission lines, IET Gener. Transm. Distrib. 10 (16) (2016) 4222–4230, https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1119.

[9] http://scienti.colciencias.gov.co:8080/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000002504

[10] https://www.researchgate.net/profile/Mauricio-Granada-Echeverri

1. **Presupuesto:** Se adjunta formato en Excel con el presupuesto detallado (Anexo 4 Grupos.xlsx).

















