

**Selección de zonas óptimas para localización de plantas fotovoltaicas como apoyo a red de alumbrado público en la Provincia de Soto a partir de un modelo de programación multiobjetivo**

**Camilo Andrés Torres Quijano, Daniel Fernando Pulido Montaña**

**Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Industrial**

**Director:**

**Henry Lamos Díaz**

**PhD en Física- Matemática**

**Codirector:**

**Edwin Alberto Garavito Hernández**

**Magister en Ingeniería Industrial**

**Universidad industrial de Santander**

**Facultad de ingenierías fisicomecánicas**

**Escuela de estudios industriales y empresarial**

**2018**

## AGRADECIMIENTOS

*Primero que todo agradezco a mis padres por haberme dado el soporte y apoyo para llegar a la culminación de esta etapa de mi vida, quienes desde siempre han sido participes en cada uno de mis logros académicos y personales.*

*A Dios por guiarme durante el proceso abriéndome las puertas correctas para continuar con mi camino. A mi motor de vida, mi hijo Aaron Matías quien, desde la distancia con sus risas, llantos, me ha inspirado a lograr todo lo que me propongo.*

*Agradezco a la señora Myriam quien me ha acogido como un hijo más en la pensión, aguantando todos mis caprichos y mis desordenes.*

*A mi compañero Camilo quien ha soportado todas las etapas de un proyecto de grado con Daniel, y que, con sus regañones, muchas veces necesarios, lo hacía siempre por el bien de los dos, finalmente a mi compañera de camino que me brindó su apoyo en los meses más duros del proceso.*

Daniel Fernando Pulido Montaña

*Le doy gracias a Dios y a las personas que hicieron posible la finalización de este proyecto, especialmente a mi familia que confiaron y siempre estuvieron con nosotros en las etapas más difíciles durante su elaboración.*

*De igual forma, agradezco enormemente al PhD Javier Gil Quijano por su conocimiento, paciencia y gran dedicación que presto a nuestro proyecto.*

*Por último, quiero agradecer a todos los Docentes de la Universidad Industrial de Santander que nos brindaron su conocimiento, experiencia y guía durante este proceso de aprendizaje.*

Camilo Andrés Torres Quijano

**Tabla De Contenido**

Introducción ..... 14

1. Revisión de la Literatura ..... 16

1.1 Análisis bibliométrico..... 17

1.2 Análisis preliminar de la Literatura ..... 22

2. Planteamiento del Problema y justificación de la investigación ..... 26

Objetivos ..... 31

3. Marco de referencias ..... 32

Marco de Antecedentes..... 32

4. Marco teórico ..... 33

Energía fotovoltaica ..... 34

4.1.1 Energía Solar:..... 34

4.1.2 Radiación Solar ..... 35

4.1.3 Constante solar ..... 40

4.1.4 Energía Fotovoltaica ..... 40

4.1.5 Irradiancia en Santander ..... 41

4.1.6 Célula fotovoltaica..... 43

4.1.7 Modulo fotovoltaico ..... 44

Programación Multiobjetivo ..... 46

4.1.8 Métodos de Solución ..... 47

4.1.9 Modelo General ..... 51

4.1.10 Algoritmo Genético..... 53

4.1.11 Algoritmo NSGA II ..... 61

5. Marco normativo ..... 63

6. Metodología ..... 66

6.1 Fase I Búsqueda y selección ..... 66

6.1.1 Demanda energética..... 66

6.1.2 Elección de zonas para la construcción de las plantas solares..... 68

6.1.3 Selección de nodos..... 68

6.1.4 Verificación del funcionamiento de los nodos..... 70

6.1.5 Radiación y brillo solar en los nodos ..... 70

6.1.6 Costos..... 72

6.1.7 Impacto Ambiental..... 83

6.2 Fase II Construcción del modelo Multiobjetivo ..... 84

6.2.1 Identificación del modelo ..... 85

6.2.2 Caracterización de variables ..... 85

6.2.3 Modelo matemático ..... 85

6.3 Implementación de las variables de decisión en el algoritmo NSGA-II..... 96

6.4 Implementación de la función objetivo en el algoritmo NSGA-II ..... 100

6.5 Parámetros de algoritmo NSGA-II ..... 104

7. Experimentos y resultados ..... 104

7.1 Análisis del efecto del tamaño de la población y del número de generaciones ..... 104

7.2 Análisis del efecto de las probabilidades de mutación (pm) y de crossover (pc)..... 106

7.3 Análisis del tiempo de ejecución del algoritmo ..... 108

7.4 Experimento final y solución del problema de optimización ..... 109

8. Conclusiones ..... 112

9. Recomendaciones..... 115

Referencias Bibliográficas ..... 117

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Demanda de energía Municipios Provincia de Soto.....	67
Tabla 2. Irradiancia y brillo solar promedio ubicaciones candidatas.....	71
Tabla 3. Especificaciones Técnicas Panel solar TSM 375 .....	73
Tabla 4. Relación panel Inversor-Costo.....	76
Tabla 5. ....	78
Tabla 6. ....	82
Tabla 7. Intervalos de clasificación cantidad de emisiones evitadas .....	83
Tabla 8. Espacio de búsqueda para cada uno de los municipios cuando se aplican las restricciones R1 y R5. Los índices numéricos de las variables x han sido reemplazados por el nombre del municipio representado .....	92

**Lista de Figuras**

Figura 1. Publicaciones por países adaptado de Vantage Point..... 18

Figura 2. Instalaciones de plantas de energía solar en Estados Unidos ..... 19

Figura 3. Nube de palabras sobresalientes por medio de la ecuación de búsqueda..... 21

Figura 4. Publicaciones por año de modelos multiobjetivo o problemas de localización. .... 22

Figura 5. Radiación incidente y reflejada ..... 36

Figura 6. Tipos de radiación solar en un panel. .... 39

Figura 7. Mapa de radiación solar IDEAM ..... 42

Figura 8. Fabricación modulo fotovoltaico..... 43

Figura 9. Descripción gráfica de célula fotovoltaica. .... 44

Figura 10. Caso de selección por Ruleta..... 58

Figura 11. Caso de selección por Ranking..... 59

Figura 12. Mapa Multianual promedio de velocidad del viento ..... 69

Figura 13. Panel solar Tallmax M plus ..... 72

Figura 14. Inversor SC 900-750-500CP XT ..... 75

Figura 15. Inversor Tripower 60000TL-US..... 76

Tabla 4. Relación panel Inversor-Costo..... 76

Figura 16. Frontera de Pareto..... 94

Figura 17. Eficiencia del algoritmo con respecto a los scores promedio F(1) y F(2) para diferentes valores de numero de generaciones (gen) y de tamaños de la población (pob)..... 106

Figura 18. Eficiencia del algoritmo con respecto a los scores promedio F(1) y F(2) para diferentes valores de probabilidades de crossover (pc) y de mutacion (pm), con la restricción  $pc + pm = 1$ . ..... 107

Figura 19. Tiempo de ejecución del algoritmo NSGA-II. .... 108

Figura 20. Resultados de los diferentes experimentos. El experimento N° 51 (en línea discontinua) contiene el frente Pareto dominante (la mejor solución encontrada)..... 110

Figura 21. Población del experimento N° 51 que define el frente Pareto dominante (la mejor solución encontrada) ..... 110

Figura 22. Solución escogida para el problema de optimización. .... 111

**Lista de Apéndices**

**(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)**

Apéndice A. Tesis “Método para localización óptimas de centrales de energía renovables” .....28

Apéndice B. Artículo “A stochastic methodology to evaluate the optimal multi-site investment solution for photovoltaic plants” .....

Apéndice C. Artículo “Optimization Methods applied to renewable and sustainable energy: A review” .....

Apéndice D. Artículo “A Niched Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization” ....

Apéndice E. Archivo de excel “Parámetros del Modelo” .....

Apéndice F. Artículo “A fast elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II” .....

Apéndice G. Archivo de Excel “Tabla de datos Terreno y Costos”

Apéndice H. Archivo de Excel “Demandas”

Apéndice I. Tesis “Selección de alternativas de inversión en generación de energía eléctrica a partir de técnicas de optimización multiobjetivo y multicriterio”

Apéndice J. Ficha técnica Panel Solar TSM DD14A.....

Apéndice K. Código Matlab.....

Apéndice L. Parámetros (Data) para el Algoritmo.....

**RESUMEN**

**TITULO:** Selección de zonas óptimas para localización de plantas fotovoltaicas como apoyo a red de alumbrado público en la provincia de Soto a partir de un modelo de programación multiobjetivo<sup>1</sup>

**AUTORES:** Camilo Andrés Torres Quijano, Daniel Fernando Pulido Montaña<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Programación Multiobjetivo, Localización-Asignación, Algoritmo Genético

El problema de localización de instalaciones durante años ha sido estudiado a partir de diferentes métodos de optimización que pueden llevar cada vez a soluciones más factibles, dependiendo de qué tan reales y precisos sean los datos seleccionados para el estudio. En el siguiente proyecto se trata un problema de optimización multiobjetivo en la localización de plantas energía fotovoltaica en la provincia de Soto Santander, teniendo en cuenta la minimización de costos e impacto ambiental, en el cual se plantea un modelo lineal de programación y por medio de un algoritmo genético, que es un método que se basa en la teoría de Darwin imitando la evolución de los seres, se obtiene una población inicial de la cual se genera un cromosoma compuesto por genes para luego reproducirlos y mutarlos donde finalmente se obtiene una generación que representa las soluciones más factibles, este es alimentado con los parámetros de costos de instalación, operación, mantenimiento y distribución; igualmente para el impacto ambiental se tiene en cuenta la evaluación de los factores de Deforestación, Emisión de CO<sub>2</sub> y cercanía al casco urbano de cada una de los terrenos candidatos para la ubicación de las plantas. Basándose en la revisión de literatura la programación del algoritmo se realizó con el tipo NSGA-II, debido a su utilización en distintos problemas de localización, para lo cual fueron utilizadas las herramientas de optimización multiobjetivo y algoritmos genéticos disponibles en el software Matlab.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industrial y Empresariales. Director: Henry Lamos Diaz

**ABSTRACT**

**TITLE:** Selection of optimal zones for the location of photovoltaic plants as support for the public lighting network in the province of Soto, based on a multi-objective programming model<sup>3</sup>

**AUTHORS:** Camilo Andrés Torres Quijano, Daniel Fernando Pulido Montaña<sup>4</sup>

**KEYWORDS:** Multi-objective Programming, Location-Allocation, Genetic Algorithm

The problem of location of facilities for years has been studied from different optimization methods that can lead each time to more feasible solutions, depending on how real and precise the data selected for the study. The following project deals with a problem of multiobjective optimization in the location of photovoltaic power plants in the province of Soto Santander, taking into account the minimization of costs and environmental impact, in which a linear programming model is proposed and by means of a genetic algorithm, which is a method based on Darwin's theory imitating the evolution of beings, where is get an initial population of which generates a chromosome composed of genes to then reproduce and mutate where finally is get a generation that represents the most feasible solutions, this is fed with the parameters of installation, operation, maintenance and distribution costs; also for the environmental impact, the evaluation of the factors of Deforestation, CO<sub>2</sub> emission and proximity to the urban area of each of the candidate lands for the location of the plants is taken into account. Based on the literature review, the programming of the algorithm was performed with the NSGA-II type, due to its use in different localization problems, for which the multiobjective optimization tools and genetic algorithms available in the Matlab software were used.

---

<sup>3</sup> Bachelor thesis

<sup>4</sup> Physicomechanical Engineering Faculty. Industrial and Business studies School. Director: Henry Lamos Diaz

## Introducción

En el mundo existe una gran tendencia en la utilización de energías renovables o alternativas para cubrir la creciente demanda sin ocasionar mayor contaminación, debido al incremento de defensores del medio ambiente y naciones interesadas en la reducción de emisiones de dióxido de carbono, la producción de energía a partir de combustibles fósiles ha ido disminuyendo por su gran contribución al calentamiento global, logrando así intereses de países desarrollados y grandes compañías en investigación e implementación de nuevas fuentes de energía eléctrica.

Colombia es un país rico en recursos naturales y grandes extensiones de tierra, grandes reservas de agua y estrellas fluviales, que garantizan el suministro de agua, por esto, es un país donde su principal fuente de energía eléctrica es la hidroeléctrica, seguida de la forma tradicional (combustibles fósiles).

Debido a cambios en el clima por consecuencia del calentamiento global y la creciente demanda de este recurso, la disponibilidad ha ido disminuyendo, ocasionando la preocupación por parte del gobierno colombiano de no poder suplir en algún momento la creciente demanda energética del país, por esto, se ha comenzado a incentivar el uso de energías alternativas que puedan apoyar la hidroeléctrica cuando no posea la capacidad suficiente para suplir la demanda por causa de los fuertes veranos, debido a esto surge la idea de implementar la energía fotovoltaica y eólica, las cuales son perfectas analizando que Colombia se encuentra ubicado en la línea ecuatorial, donde se encuentran gran diversidad de pisos térmicos, geomorfología entre otras ventajas para la utilización de esta fuente de teniendo climas que van desde los más calurosos hasta los más fríos, contando solamente 2 estaciones (invierno, verano).

El creciente interés a nivel mundial por la utilización de energía fotovoltaica, han generado grandes investigaciones y avances, logrando conocer factores que afectan la productividad, costos

asociados en la construcción de las plantas con capacidad de suplir la creciente demanda y también en la reducción de grandes extensiones de tierra utilizadas, por esto, Colombia gracias a su ubicación posee en promedio de 4.5 kW/H y 6.0 kW/H de radiación solar al día, siendo estos valores calculados en los departamentos del Cauca, Huila, Valle del Cauca, Tolima, Meta, Casanare, Boyacá, los Santanderes, Antioquia 1 entre otros.

Siendo en estos momentos la provincia de Soto la zona objeto de esta investigación, se realizará la búsqueda de todos los factores que podrían restringir la ubicación de plantas solares que sirvan como apoyo para el alumbrado público de estos municipios, para cumplir este objetivo. nace la idea del diseño de un mapa donde se puedan encontrar zonas óptimas para la producción de energía, teniendo en cuenta diversos factores como: Económicos, sociales, ambientales, también factores técnicos que puedan afectar la producción y el aprovechamiento de la energía solar.

Existen métodos de optimización aplicables a problemas reales que permiten obtener soluciones por medio de su programación. En la actualidad se ha superado el paradigma de la optimización, lineal, en el que se limitaban todos los mapas de radiación solar global sobre una superficie plana UPME, influenciándose únicamente por un proceso de decisión a unidades monetarias, comenzando con un enfoque más realista teniendo en consideración criterios de tipo social, medioambiental o que reflejan características no necesariamente económicas del problema a abordarse (Allueva, González, & Alejandre, 1999)

Al encontrar estos factores se tiene que plantear el problema de localización donde su solución contemple cada uno de ellos, para esto se recurre a la programación multiobjetivo, debido a que:

*“La programación lineal tradicional es incapaz de dar respuesta a este tipo de planteamientos, es decir los métodos clásicos de programación lineal están enfocados a resolver problemas con un objetivo, y por tanto no son capaces de resolver este tipo de*

*problemas. Estos inconvenientes, en general, obligan a los decisores a elegir un solo objetivo para poder resolver el problema, teniendo como consecuencia cierta rigidez al aplicar la programación matemática clásica a los problemas en la vida real” (Pliego, 2012)*

De esta manera el alcance de este proyecto de investigación es la identificación de zonas óptimas para construcción de Zonas Optimas en la Provincia de Soto en Santander, por medio del modelo en el que se aplicará programación multiobjetivo esto ayudará en un futuro a la región de Santander en la construcción de plantas solares con gran productividad capaces de suplir tres aspectos importantes: “primero, la importancia de diversificar la canasta energética nacional para dar flexibilidad al sistema de suministro de energía, necesario frente a un futuro lleno de incertidumbres frente. Segundo, la importancia de las FENR frente a los problemas causados principalmente por el impacto ambiental del uso de los combustibles fósiles y el agotamiento de sus reservas. Y, tercero, las FENR pueden jugar un papel importante en el suministro de energía en zonas remotas y aisladas, en las que aproximadamente un millón de familias en Colombia carecen de un servicio confiable de energía eléctrica.” (Murcia, 2009)

## **1. Revisión de la Literatura**

En la revisión de literatura se realiza un análisis del tema a profundidad en donde se observan los trabajos y proyectos ya realizados frente a plantas de energía fotovoltaica localizadas por medio de distintos métodos de optimización, y de esta manera se busca ampliar la información que permitirá llegar a cumplir los objetivos definidos en esta investigación.

### 1.1 Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico fue realizado por medio de la Base de datos WEB OF SCIENCE, acceso que se obtuvo gracias a los recursos electrónicos disponibles para la Universidad Industrial de Santander. Se realizó una búsqueda por medio de conectores que relacionan palabras generando los artículos que contienen el tema o fracciones de este, que ayudan a la investigación.

La ecuación de búsqueda utilizada en la Base de Datos de WEB OF SCIENCE fue:

(Photovoltaic) AND (Energy) AND (Street lighting) AND (Multiple criteria decision) OR (Solar Energy) AND (Location problems) AND (Optimization) OR (Optimum ubication) AND (Renewable energy)

Luego de obtener la lista de artículos que contenían investigaciones relacionadas con la óptima localización de plantas fotovoltaicas teniendo en cuenta múltiples criterios, fue necesario utilizar Vantage Point, una herramienta de análisis de texto que permite una mayor facilidad de manejo a artículos en gran cantidad, generando puntos de vista de relaciones entre los textos, sus autores, sus revistas, entre otros.

Por medio de la ecuación de búsqueda se obtuvieron 51 artículos que relacionan las palabras clave que se utilizaron. Al realizar un análisis de los países en los cuales se encuentran investigaciones relacionadas al tema, se obtuvo que:

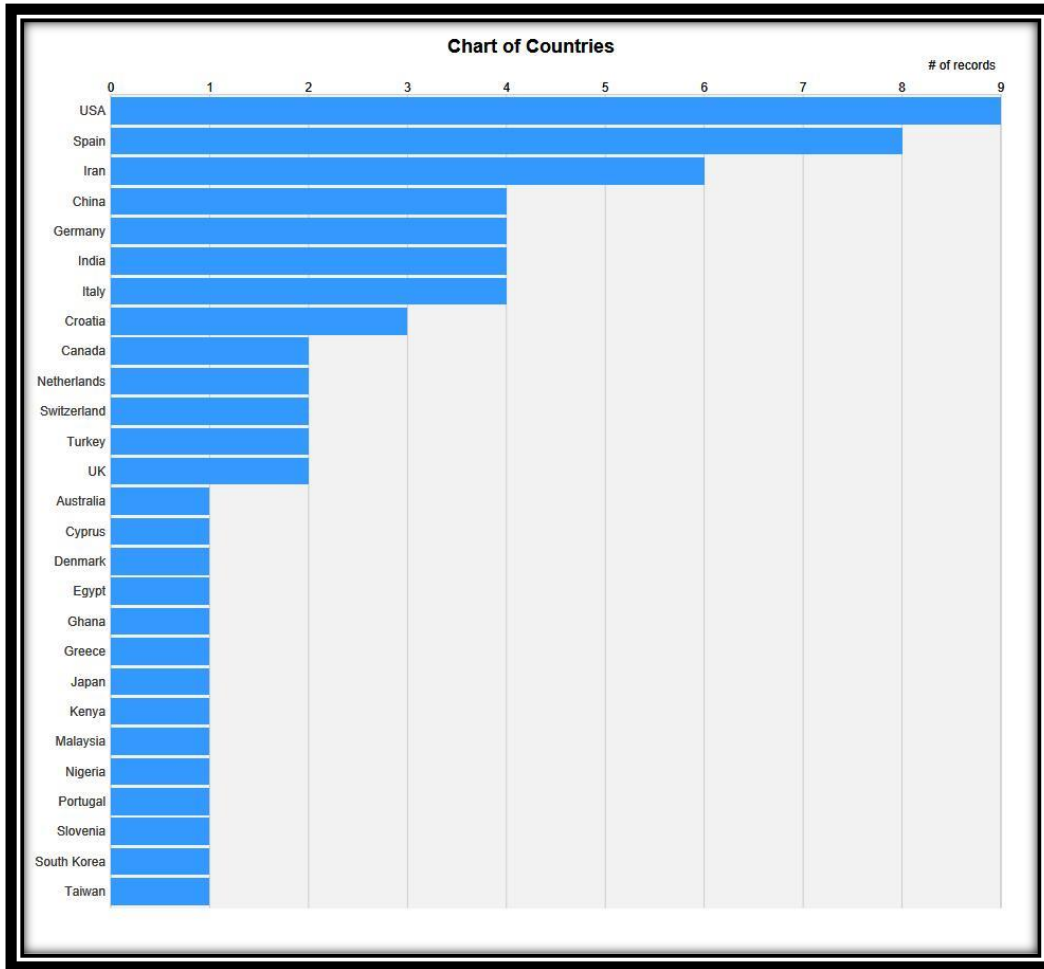


Figura 1. Publicaciones por países adaptado de Vantage Point

El país con mayor número de publicaciones de artículos en el mundo es Estados Unidos, encabezando la lista con una cantidad de 9 artículos. En la siguiente figura se puede observar el incremento de instalaciones de energía solar en Estados Unidos desde el año 2010 hasta el año 2016.

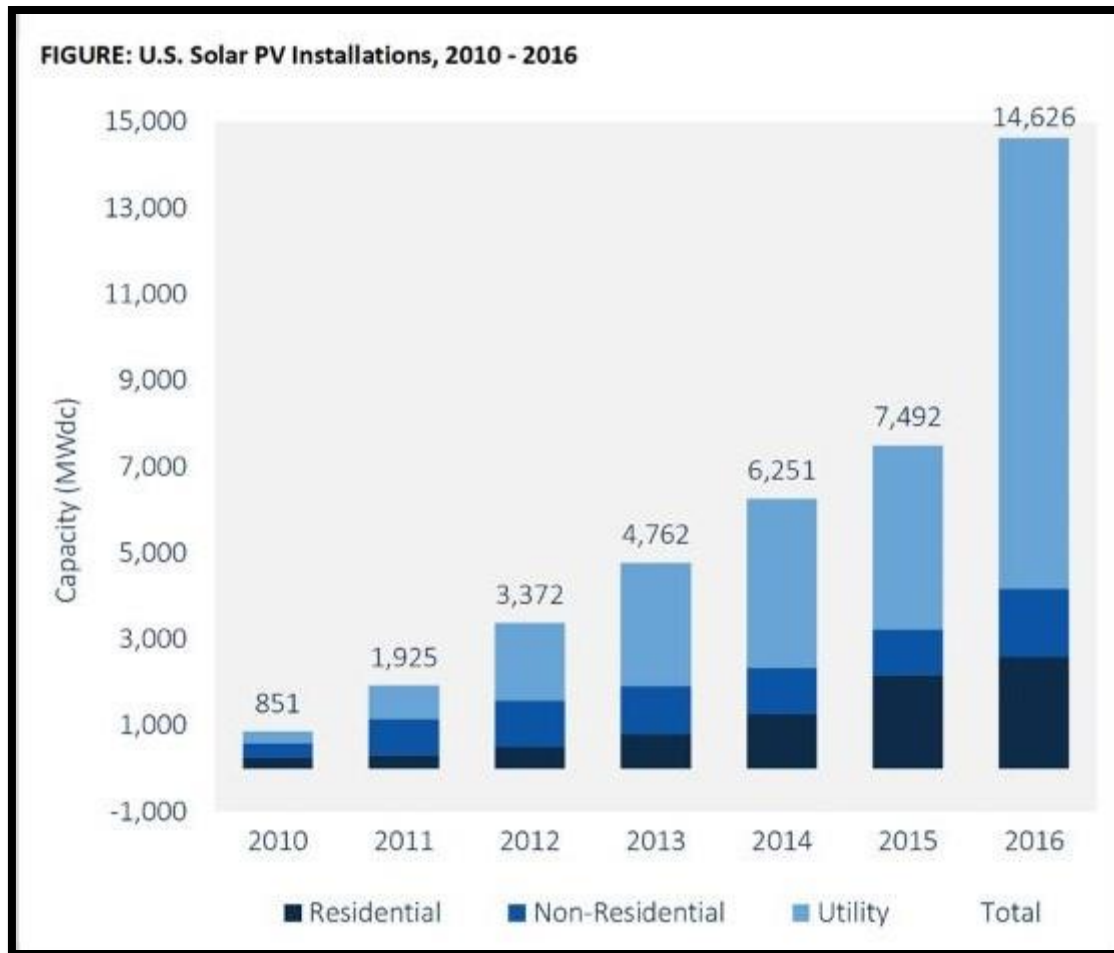


Figura 2. Instalaciones de plantas de energía solar en Estados Unidos adaptado de GTM Research.

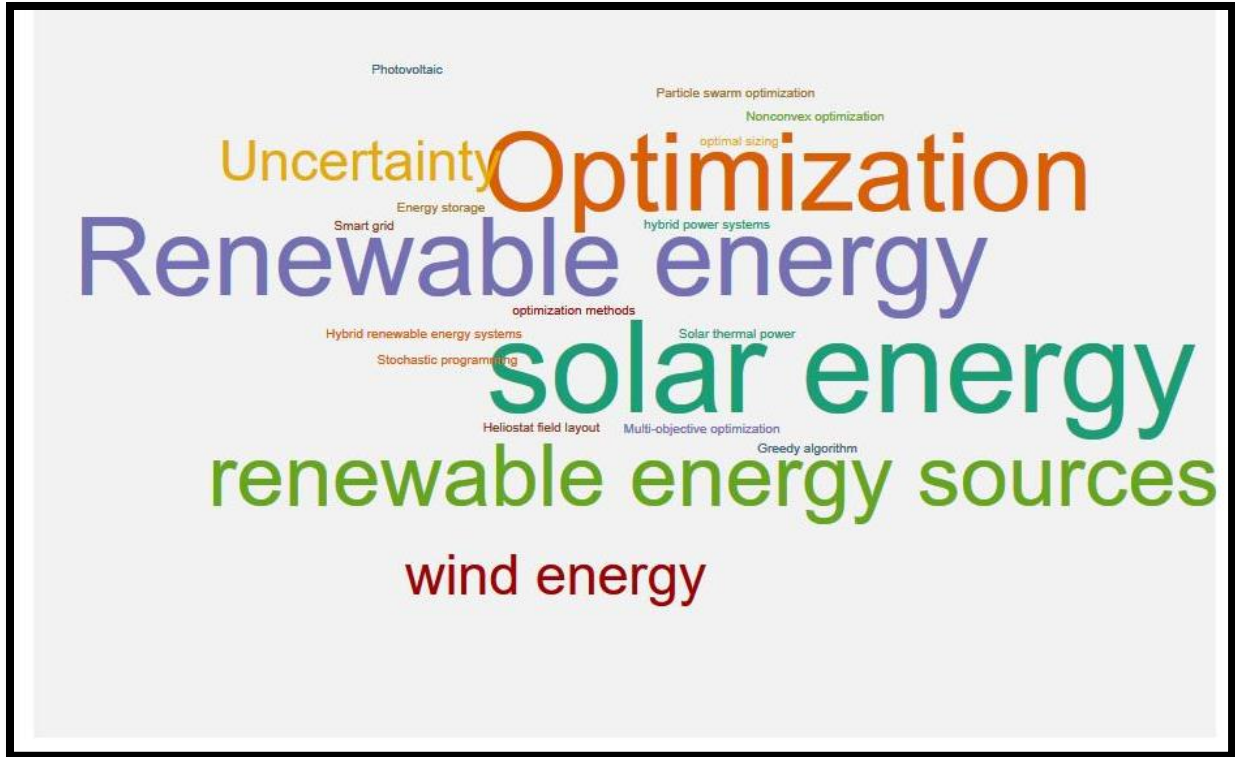
U.S Solar Market Insight Report

Durante los años Estados Unidos se ha dado a conocer como una de las grandes potencias en el mundo, mostrando un gran desarrollo en diferentes campos; parte de su progreso se ha visto reflejado en gran medida en la implementación de energías alternativas no solo en procesos industriales, sino también en los hogares de familias estadounidenses, tal y como se refleja en la figura, para el año 2010 este país contaba con 851 instalaciones de energía solar distribuidas en mayor medida hacia la industria, mientras que para el año 2016 se observó un incremento del

1718% aproximadamente, siendo esta una cifra significativa que representa un interés de este país en la búsqueda de nuevas formas de energía para el consumo residencial e Industrial.

En la figura 1 también se refleja un buen posicionamiento de los países del continente europeo, teniendo en cabeza a España con 8 publicaciones, seguida de Alemania con 4. Es importante tener en cuenta que dichos países han evolucionado constantemente en la implementación de Energías Alternativas, llevando a colación diferentes factores, buscando una reducción en los costos de instalación de estas plantas.

En la nube de palabras, representada en la figura 3, se resaltan “Optimization” y “Solar energy”, siendo estas las más importantes y utilizadas en los 51 artículos obtenidos por medio de la ecuación de búsqueda. Teniendo en cuenta que las cuatro palabras más sobresalientes en los textos se encuentran inmersas en la ecuación, cabe destacar la presencia de otras palabras como “Uncertainty”, “Wind Energy”, las cuales representan los diferentes modelos de probabilidad e incertidumbre utilizados para la búsqueda de soluciones, así mismo, se refleja que la energía Eólica es en la que más se han enfocado los investigadores durante los últimos doce años.



*Figura 3.* Nube de palabras sobresalientes por medio de la ecuación de búsqueda adaptado de Vantage Point

Por medio de la figura 4 se observa el número de publicaciones relacionadas al tema de investigación de soluciones de energías alternativas para con la sociedad realizadas desde el año 2003 hasta el año 2017, la gráfica de barras evidencia un crecimiento con comportamiento exponencial, siendo el año 2015 el año con un número mayor de publicaciones, donde se puede deducir que este año existió gran preocupación e interés por encontrar soluciones a la gran demanda de energía en el planeta.

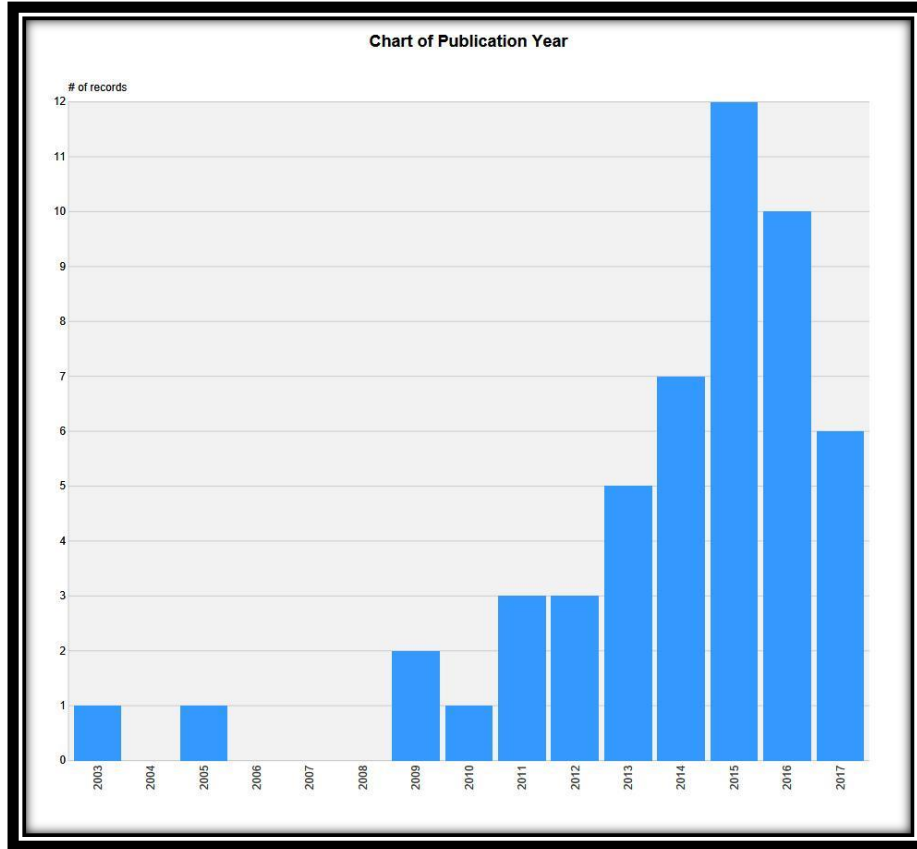


Figura 4. Publicaciones por año de modelos multiobjetivo o problemas de localización. Adaptado de Vantage Point

### 1.2 Análisis preliminar de la Literatura

La situación actual del planeta frente a los cambios climáticos ha llevado a generar investigaciones frente a los temas de energías renovables que ofrecen soluciones a la sociedad; estas soluciones energéticas deben ser planeadas desde diferentes puntos de vista, pues lo que se busca es que generen gran beneficio sin incurrir en mayores inversiones, como también teniendo en cuenta que estas soluciones no generen impactos negativos para las comunidades o el ambiente, Schallenberg et al (2008) afirma que:

*“El sistema energético actual está fundamentalmente basado en los combustibles fósiles. El ritmo de consumo es tal que en un año la humanidad consume lo que la naturaleza tarda*

*un millón de años en producir, por lo que el posible agotamiento de las reservas existentes es una realidad que no admite discusión.”*

Muchas de las investigaciones enfocadas a las energías renovables actualmente manejan modelos matemáticos utilizados para la óptima selección de lugares, (Chang, 2015) expone un tema en el que se tienen en cuenta cuatro posibles instalaciones de aerogeneradores con el objetivo de ser localizadas en cinco ubicaciones diferentes, en este modelo se destaca un modelo determinístico, definiendo entradas y salidas del mismo tipo sin tener en cuenta las variaciones presentadas en un contexto definido, tales como las variables de costos o variables de impactos sociales o ambientales.

Sin embargo, autores de temas dentro de este campo de investigación consideran de gran importancia la localización de plantas de energía solar y Eólica a pequeña escala; un proyecto de este tipo fue realizado en Brasil, en el cual se destacó la importancia de los atributos de localización, área y forma, para las plantas de energía. (Duailibe, Cardoso, & Moreira, 2016)

Se observan algunos proyectos con el enfoque ya mencionado anteriormente; (Sánchez, García, & Lamatac, 2015) se enfocaron en la búsqueda de la solución óptima para la localización de una central termoeléctrica solar, en la que por medio de la utilización de un SIG (Sistema de Información Geográfica) y un modelo de decisión multi-criterio, se tuvo como objetivo identificar las mejores, teniendo como base diferentes criterios tales como el medio ambiente, la orografía, Ubicación y climatología.

Existen contextos en los que se pueden evidenciar procesos de toma de decisiones más complejos, resueltos mediante la programación multi-objetivo, en las que es necesario tener en cuenta familias de parámetros, relacionados como cuantitativos o cualitativos, donde cada uno de ellos agrupados en familias, tenga como mínimo un elemento similar a los demás.

Para el caso de una cadena de suministro, en la que se deben tener en cuenta factores de diferentes tipos que puedan generar pérdidas económicas, es necesario realizar un estudio anterior muy exhaustivo. Estas cadenas de suministro tienen que asegurar un excelente cubrimiento a la demanda de los consumidores, para que, por medio de esta, la empresa u organización pueda competir en el mundo real. (Mirzapour, Malekly, & Aryanezhad, 2010) consideraron “una cadena de suministro que incluía Múltiples proveedores, múltiples fabricantes y múltiples clientes, dirigiéndose a un multi-sitio, multiperiodo, Problema de planificación de producción agregada (APP) multi-producto bajo incertidumbre”.

Para la optimización de estas cadenas fueron utilizados dos objetivos; la primera función objetiva fue “minimizar las pérdidas totales de la cadena de suministro, incluidos los costos de producción, contratación, despido y capacitación, primas, el material y el inventario de producto final que sostiene el coste, el transporte y el coste de escasez”; la segunda función objetivo la definen minimizando la suma de la cantidad máxima de “niveles de trabajo, la productividad de los trabajadores, las horas extraordinarias, Subcontratación, capacidad de almacenamiento y plazos de entrega” considerando así la satisfacción del cliente (Mirzapour et al, 2010).

Dentro de las consideraciones que se tienen en cuenta para la selección de un proyecto que represente un beneficio económico tradicionalmente se tienen en cuenta indicadores económicos que permitan determinar si la selección es viable. “La evaluación económica de las inversiones en plantas que producen la electricidad procedente de fuentes alternativas “se aborda tradicionalmente na vez que la ubicación del sitio se selecciona mediante el análisis del valor actual neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (IRR), Costo de Electricidad Nivelado (LEC)”. (Bendato, Cassettari, Mosca, Williams, & Mosca, 2017).

(Seda, Ozge, & Basar, 2016) en su artículo, buscan ubicar plantas de energía renovable que logren ser ubicadas en lugares donde se permita hallar un equilibrio entre la demanda y oferta del servicio de energía, para que la inversión pueda ser cubierta mediante las políticas propias de la región en la que se implementa. El problema es abordado con programación lineal entera mixta, en el que se utiliza un enfoque de asignación de ubicación para resolver el modelo. Los problemas de ubicación y asignación se solucionan iterativamente. Es desarrollado un Algoritmo Genético para encontrar los resultados del problema p-mediana. Siguiendo a esto es solucionado el problema de asignación por medio del solucionador ILOG Cplex, para el problema de diseño se comparan resuelven para un sitio específico (Turquía) y posteriormente se comparan los resultados. Finalmente se obtiene que dentro los ensayos 10 territorios resultan con el mejor equilibrio entre demanda y oferta (Seda et al, 2016).

Este proyecto enfoca un diseño territorial, que consiste en agrupar zonas dependiendo de los criterios de planificación que se determinen, los cuales “pueden ser en términos económicos tales como potenciales de ventas promedio, carga de trabajo o número de clientes; demográficas tales como el número de habitantes, la población.”

Roa (2011), en el proyecto “Método para localización óptimas de centrales de energía renovables”<sup>5</sup> definió dos etapas de caracterización para la localización; la primera etapa estaba enfocada en la selección de los sitios de emplazamiento, la cual, “no resulta trivial si no se cuenta con un sistema geo-referenciado que contenga toda la información topográfica y climática, además de la ubicación de la infraestructura eléctrica ya existente (centrales, subestaciones y líneas de transmisión).” En este proceso el autor hizo uso de la herramienta Google Earth.

---

<sup>5</sup> Ver apéndice A. Tesis Método para localización óptimas de centrales de energía renovables

Al realizar un cruce entre la información estudiada en el proyecto para la identificación correcta, (Roa, 2011) definió 5 reglas que permiten sistematizar la selección de emplazamientos:

- 1- Para cada subestación del sistema, localizar la zona de alta abundancia de recursos más cercana.
- 2- Verificar que la zona encontrada sea un terreno plano, con pendiente menor al 5% en el caso de parques fotovoltaicos.
- 3- En caso de que la zona esté cercana a un centro urbano o poblado, asegurarse de que está a una distancia prudente de zonas pobladas para evitar posibles impactos en los habitantes del lugar.
- 4- Verificar que la extensión de terreno sea lo suficientemente grande para albergar el proyecto, lo que dependerá de la potencia instalada de este último.
- 5- Revisar, mediante Google Earth, si los caminos desde el puerto más cercano hasta el emplazamiento son aptos para el tránsito de camiones de gran longitud y alto tonelaje

Ya en la segunda etapa del proyecto, el autor define los posibles emplazamientos, que serán optimizados por medio del método de decisión multicriterio llamado PROMETHEE, considerado “efectivo para decidir el emplazamiento de un parque eólico o fotovoltaico en la medida que se consideren los criterios que describen el desempeño de cada alternativa” (Roa, 2011)

## **2. Planteamiento del Problema y justificación de la investigación**

En la actualidad uno de los insumos más importantes en el desarrollo social y económico es la energía eléctrica. Esta afirmación es soportada por la creciente necesidad de los objetos que hacen

parte del hogar hasta máquinas o elementos que hacen parte de procesos más complejos (como una línea de ensamblaje de una fábrica, procesos industriales, aeroespaciales entre otros); por esto los países y empresas invierten grandes sumas de dinero y capital humano en la investigación de futuras fuentes de energía.

Debido al crecimiento exponencial de la población mundial cada vez se demanda más cantidad de este servicio; también, el cambio climático que ha sufrido el Planeta Tierra por la utilización de fuentes de energía tradicionales (combustibles fósiles) ha despertado el interés por fuentes alternas no contaminantes pero que puedan suplir la creciente demanda y puedan sustituir las tradicionales.

Por esto Danella H. Meadows (1972) comenta en el informe al Club de Roma sobre el “Predicamento de la Humanidad”, en el libro los Límites del Crecimiento, los 5 problemas a los que la humanidad deberá enfrentarse en los próximos años: el crecimiento de la población, producción de alimentos, industrialización, agotamiento de los recursos naturales y contaminación. Dentro de ese informe se puede evidenciar que la contaminación es uno de los 5 problemas, por esto en la actualidad las empresas gastan grandes sumas de dinero para combatir dicho problema.

Debido al acelerado crecimiento de la población y otros factores como los cortos ciclos de vida de los productos (siendo como ejemplo: las empresas dedicadas a la fabricación de productos tecnológicos en lanzar nuevos productos en menos de un año y su funcionamiento demandan energía eléctrica) conlleva a que cada vez se necesite aún más de este insumo.

Actualmente el sector automotriz es uno en el cual su proyección de demanda energética es elevada, ocasionando problemas a los gobiernos y a las empresas que suministren este insumo. En consecuencia, se tienen que buscar nuevas alternativas no contaminantes que cumplan con los requisitos contemplados dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, generando

en algunas ocasiones sobrecostos en la prestación del servicio (los cuales serán asumidos por el cliente final), dificultando más la prestación de este servicio en países, comunidades y poblaciones vulnerables o con escaso poder adquisitivo lo que podría ralentizar la economía de los mismos.

Colombia un país con gran potencial de crecimiento en diferentes sectores como la construcción y el agroindustrial; sin embargo, en los últimos años a incursionado en la exportación de energía a países vecinos, gracias a ventajas geomorfológicas que favorecen la explotación de nuevas fuentes de energías renovables y poco contaminantes.

Por consiguiente, se tienen que incursionar en nuevas fuentes de energía, buscando dejar de lado las fuentes tradicionales, además de la destinación de recursos necesarios para realizar la explotación de estas ventajas dadas por su ubicación estratégica. A causa de esto nace el problema de cómo lograr ubicaciones óptimas, pero, para lograr entender bien acerca de eso, primero se necesita contextualizar acerca de las fuentes de energía alternativas.

Las fuentes de energía alternativas son todas aquellas que para producir energía eléctrica no se encuentran involucrados combustibles fósiles o procesos de transformación contaminantes de los mismos. No obstante, existen algunas de ellas que están catalogadas como renovables que a pesar de no utilizar combustibles fósiles pueden producir daños directamente al medio ambiente. Ejemplo de lo anterior es la energía hidráulica que para su funcionamiento se necesitan grandes extensiones de tierra para la acumulación de agua<sup>6</sup>. Sin embargo, este tipo de energías siguen siendo menos contaminantes comparadas con las que directamente involucran en sus procesos combustibles fósiles.

Según Fernández (2016), actualmente en Colombia “(...) un 70% de energía generada pertenece a la hidroeléctrica (producida en los embalses)”; este porcentaje es posible gracias a las

---

<sup>6</sup> Esto se hace con el objetivo de mover grandes turbinas, por medio de la gravedad, para transformación de energía cinética en energía eléctrica

cuencas hidrográficas con las que cuenta el país. Sin embargo, depender en gran medida de este tipo de fuente representaría un problema debido a que el cambio climático ha conllevado a veranos con temperaturas más altas, ocasionando reducción en las cuencas hidrográficas y afectando los niveles mínimos de agua en los embalses para su correcto funcionamiento. Por esto, el autor (ídem) afirma que “se requiere actualizar la política energética del Gobierno para que defina de forma clara cuánto debe ser la participación de cada una de ellas en la matriz energética y aprovechar la complementariedad de las mismas” para no depender de un sólo tipo de energía. A este efecto, la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) ha iniciado estudios en compañía de grupos de investigación de universidades expertas en la materia. Gracias a esto existen grandes avances en tema de Energía Fotovoltaica y Eólica, además del interés por el fortalecimiento en la investigación de energía geotérmica. Por otro lado, Acevedo (2016) afirma que el país tiene el potencial para la generación de energías limpias alternas a la hidráulica, las cuales no han sido aprovechadas por mala organización y mal manejo de los presupuestos destinados para tal fin.

Sin embargo, se encuentra que uno de los mayores problemas con respecto a este tipo de energías es la ubicación para el óptimo aprovechamiento del sol, el agua y el aire, lo que se traduce en la obtención de un mayor beneficio de las ventajas geomorfológicas ya existentes.

A pesar de tantas dificultades en la implementación de nuevas fuentes de energía se debe continuar con el estudio en esta materia para facilitar más adelante a la transición o el apoyo al suministro eléctrico. Por consiguiente, el problema abordado en este trabajo de investigación es *la solución de selección de zonas óptimas para la construcción de plantas fotovoltaicas en la provincia de soto del departamento de Santander mediante programación multiobjetivo*, el cual facilite la decisión de que ubicación más adecuada para la construcción de las plantas,

aprovechando condiciones climáticas y geomorfológicas entre otros factores que favorezcan la captación de la radiación solar necesaria para la producción de energía eléctrica.

En base a la revisión de literatura se definen 2 objetivos:

- El primero se relaciona con la reducción de costos para la prestación del servicio de energía fotovoltaica
- El segundo da cuenta el impacto ambiental orientado al uso del suelo y a la no emisión de CO<sub>2</sub>.

Estos objetivos serán desarrollados en mayor detalle en el capítulo correspondiente al planteamiento del modelo.

## Objetivos

### Objetivo general:

Diseñar un modelo de programación multiobjetivo para determinar la localización de múltiples plantas de Energía Fotovoltaica en la provincia de Soto, Santander.

### Objetivos específicos:

- Realizar la revisión bibliográfica de la literatura sobre plantas de energía fotovoltaica y de modelos de localización existentes.
- Revisar el marco normativo y en los Planes de Ordenamiento Territorial sobre plantas fotovoltaicas en Colombia.
- Construir un modelo de programación lineal multiobjetivo para la localización de plantas fotovoltaicas en la provincia de Soto, del departamento de Santander.
- Diseñar un algoritmo genético para la solución de un problema multiobjetivo de localización de plantas fotovoltaicas.
- Caracterizar los elementos asociados al modelo de programación lineal multiobjetivo
- Caracterizar las zonas óptimas propuestas para la construcción de plantas fotovoltaicas
- Elaborar un artículo de carácter publicable con base en los resultados obtenidos de la investigación realizada.

### 3. Marco de referencias

A partir de la revisión literaria hecha en los capítulos anteriores, a continuación, se muestran los autores destacados sus investigaciones tienen algunas similitudes con el planteamiento del problema anteriormente mencionado.

#### **Marco de Antecedentes**

La creciente demanda energética del país y los cambios en el clima, entre ellos aumentos de temperatura, veranos más fuertes, factores que han ido afectando en gran medida a las fuentes generadoras tradicionales e hidroeléctricas despiertan gran interés en optar por soluciones diferentes a las actuales.

Navarrete (2017) en su proyecto hace referencia a la importancia de criterios ambientales para la construcción de cualquier tipo de instalación generadora de electricidad, así como otros factores relacionados con la ausencia de conocimiento, malas administraciones de presupuesto y toma de decisiones apresuradas en busca del cumplimiento de la demanda energética.

Este proyecto tuvo como objetivo la definición del criterio ambiental e identificación de subcriterios que contribuyen al correcto desarrollo de un sistema de suministro de energía. Para esto, la definición se construyó en base a una revisión de impactos ambientales para 5 tecnologías (fotovoltaica, eólica, biomasa, hidráulica y convencional).

Al concluir su investigación manifiesta que: “el desarrollo de una metodología multicriterio se requiere un estudio previo de los parámetros asociados, además, que cada caso de desarrollo puede suponer nuevos criterios involucrados dependiendo de los objetivos y las limitaciones propias de cada contexto”. Esto indica que lo mostrado en su trabajo de investigación no es de aplicación general, pues este dependerá del contexto en que sea desarrollado el proyecto.

Por otra parte, (Mantilla, 2016) en su trabajo titulado “Selección de alternativas de inversión en generación de energía eléctrica a partir de técnicas de optimización multiobjetivo y multicriterio”, plantea un modelo de decisión multicriterio para resolver el problema de planeación energética en un horizonte de planeación de 10 años, lo cual hace un aporte en la toma de decisiones llegando a soluciones exactas con apoyo de herramientas computacionales en menos tiempo. También “(...) el modelo hace un aporte adicional a investigaciones anteriores y propone una metodología innovadora en nuestro país, porque involucra diversos criterios y realiza planeación energética simultáneamente”. El autor también manifiesta que este modelo puede ser de aplicación general, a diferencia del autor anteriormente mencionado.

(Roa, 2011) en su trabajo titulado “Método para la localización óptima de centrales de energías renovables” en la ciudad de Santiago de Chile desarrolló una metodología para la localización óptima de centrales eólicas y fotovoltaicas conectadas a la red; en este trabajo se evidenció el método multicriterio promethee-GAIA. Con la utilización de estas herramientas para encontrar soluciones para la localización de centrales de energías renovables, el autor llegó a la conclusión que en la implementación de las 2 tecnologías presentan gran similitud en temas logísticos y económicos. De igual forma “La creación de un sistema de búsqueda de emplazamientos común a ambas, en un nivel abstracto, que permita posteriormente ser adaptado en forma particular a cada una de éstas, dando como resultado un método compacto y no redundante”

#### **4. Marco teórico**

En este capítulo se abordarán los conceptos sobre los cuales se desarrollará el problema con el fin de brindar las bases técnicas para el entendimiento del proyecto. En primer lugar, se mostrarán los conceptos relacionados con la energía fotovoltaica; en segundo lugar, se analizarán los conceptos

relacionados con la selección de los paneles, tipos de paneles, tecnologías entre otros, necesarios para la toma de decisiones; por último, se abordarán los conceptos relacionados a la programación, los cuales son importantes para la construcción del modelo de programación multiobjetivo, revisión de conceptos relacionados con el diseño y solución del mismo.

### **Energía fotovoltaica**

A continuación, se presentan los conceptos básicos de la energía fotovoltaica, importantes para la descripción de elementos y consideraciones técnicas para el levantamiento de costos que alimentan el modelo multiobjetivo.

**4.1.1 Energía Solar:** Martínez (2010) define la energía solar como “la energía obtenida directamente del Sol”. Otra definición encontrada en la literatura es “(...) La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía renovable y, por tanto, inagotable, limpia y se puede aprovechar en el mismo lugar en que se produce” (Muñiz, Cuervo García, & S.A.U, 2010, p.15). Siguiendo la definición de estos dos autores, se percibe que la energía solar fotovoltaica podría ser la solución a futuro de una escasez o incumplimiento de la demanda energética por ser un recurso inagotable; por esto, la necesidad de continuar en la investigación de componentes más eficientes y métodos que puedan optimizar el aprovechamiento de esta fuente.

Además de ser la energía solar una fuente de iluminación, la radiación generada por el sol puede usarse a su vez de dos maneras (Martínez, 2010):

- **Transformación de la radiación solar en calor:**

*“(...) Consiste en transformar la radiación solar en calor, que puede aprovecharse para producir agua caliente destinada al consumo doméstico (calentamiento de piscinas, agua caliente sanitaria, calefacción, refrigeración por absorción). El calor también puede*

*utilizarse para producir energía mecánica mediante un ciclo termodinámico y, a través de un alternador, generar energía eléctrica: es la denominada energía solar termoeléctrica (Martínez, 2010)”*

- **Transformación de la radiación solar en electricidad:**

*“(…) Esta transformación se lleva a cabo en los elementos semiconductores que integran los paneles solares fotovoltaicos. La electricidad puede ser utilizada de forma directa, almacenada en baterías, e incluso se puede inyectar en la red de distribución eléctrica” (Martínez, 2010, pág. 18)*

**4.1.2 Radiación Solar** El sol es la estrella más cercana del Planeta Tierra ya que se encuentra a una distancia aproximada de 150.000.000 km con un diámetro de 1.400.000 km y una masa de  $1.99 \cdot 10^{30}$  kg (NASA, 2017). Esta estrella es el centro de nuestro sistema solar y una de las mayores fuentes de radiación electromagnética.

*“(…) Se dice a menudo que el Sol es una esfera de gas en ebullición. En concreto, la zona más interna del Sol, es decir la que abarca desde el centro hasta unos 0,2 radios solares, se encuentra a una temperatura muy elevada (hasta 15 millones de grados) y constituye, de hecho, un inmenso reactor nuclear. Como hemos mencionado, las tres cuartas partes de la masa del Sol están constituidas por átomos de hidrógeno. En la zona central del Sol, los átomos de hidrógeno fusionan para formar átomos de helio. El helio es un gas noble que fue detectado en el Sol antes de ser descubierto en la Tierra, de ahí proviene su nombre: de Helios, un dios solar de la antigua Grecia.*

*Mediante una cadena de reacciones nucleares conocida como cadena p-p (protón-protón), cada cuatro átomos de hidrógeno dan lugar a uno de helio. Pero en la conversión de*

hidrógeno a helio hay una pequeña fracción de masa (un 0,7 %) que se convierte en energía de acuerdo con la fórmula de Einstein  $E = mc^2$

Cada segundo en el interior del Sol unos  $3,4 \times 10^{38}$  protones se convierten en núcleos de helio, generando unos  $3,86 \times 10^{26}$  Watios. Dicho de otro modo, cada segundo unos 580 millones de toneladas de gas hidrógeno se convierten en helio, consumiéndose unos 5 millones de toneladas para producir unos 90 000 millones de megatones de energía pura. Para comparación digamos que una bomba nuclear tiene típicamente varios megatones o decenas de megatones”. (Bachiller, R. (2009), p.374)

Según Roa (2011) “(...) La radiación solar es el resultado indirecto de las reacciones de fusión que ocurre en el interior del sol.”. De acuerdo con lo anterior, se puede afirmar que el sol es un reactor nuclear funcionando, así como una central de energía con una gran capacidad, la cual puede ser aprovechada durante muchas décadas.

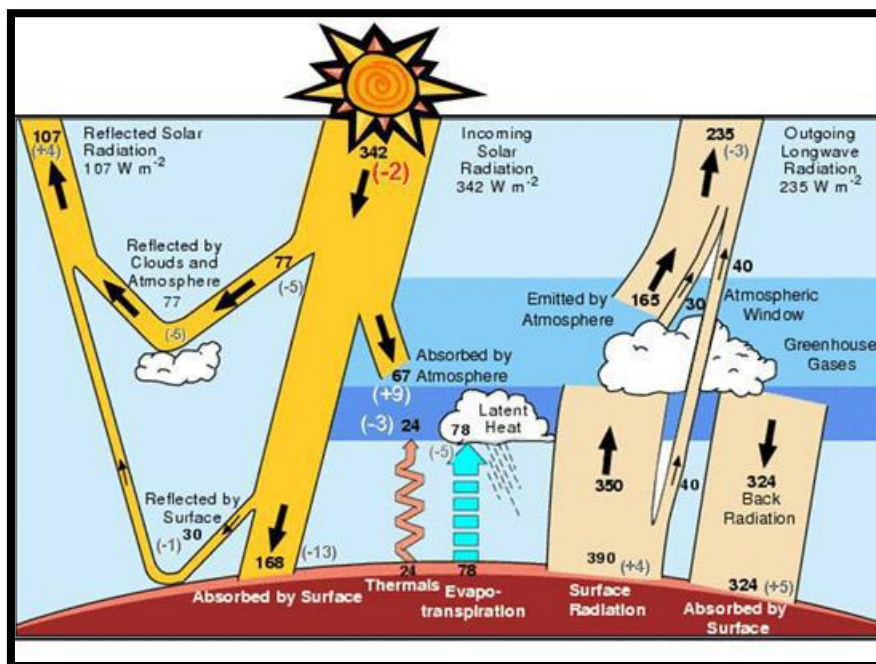


Figura 5. Radiación incidente y reflejada adaptado de (Roa, 2011)

Según la NASA (National Aeronautics and Space Administration), el Sol tiene una edad de 4.500.000.000 años, por lo que, aproximadamente, se encuentra en la etapa media de su vida. Tomando como promedio la edad media de las estrellas (10.000.000.000 años), aún le quedan al Sol alrededor de 5.500.000.000 años antes de convertirse en una gigante roja, por lo que se puede afirmar que la energía fotovoltaica en un futuro próximo podrá seguir siendo confiable.

*“(...) El Sol es un gran reactor nuclear de fusión que transforma cada segundo 600.000.000 toneladas de hidrógeno en 596.000.000 toneladas de helio. Se pierden, por tanto 4.000.000 de toneladas de materia cada segundo, que se transforman en energía, unos  $3,7 \cdot 10^{23}$  kW (...). De esta energía llegan a nuestro planeta unos  $1,74 \cdot 10^{14}$  kW (...).”*  
(Martínez, 2010)

Esto son datos aproximados, pero aun así se tienen márgenes de error muy pequeños, indicando que, con esa pequeña cantidad, y basados en estadísticas proporcionadas por la International Energy Agency (IEA), con un consumo mundial de  $21,962540 \cdot 10^{12}$  kW podría suministrar energía equivalente a 7,922580 veces (International Energy Agency, 2017). Aun así, no es suficiente basarse en estos datos ya que son variables y están constantemente cambiando.

Algunas definiciones básicas las cuales serán abordadas continuamente en el proyecto son las siguientes:

- **Espectro solar:** “Distribución espectral (en función de la longitud de onda o de la frecuencia) de la radiación electromagnética emitida por el sol” (Martínez, 2010, pág. 26)
- **Irradiación:** “Energía incidente por unidad de superficie sobre un plano dado, obtenida por integración de la irradiancia durante un intervalo de tiempo determinado, normalmente una hora o un día, se expresa en julios (energía) por metro cuadrado ( $J/m^2$ ), aunque también se expresa en  $Wh/m^2$  (potencia)” (Aparicio, 2010, pág. 16)

- **Irradiancia:** “Se define como el flujo de radiación solar que incide sobre una unidad de superficie en un tiempo dado. Se expresa normalmente en kW/m<sup>2</sup>” (Martínez, 2010, pág. 26)
- **Radiación circunsolar:** Martínez menciona que “(la) radiación dispersada por la atmósfera, de manera que parece provenir de la región del cielo adyacente al Sol. La radiación circunsolar causa la aureola solar” (Martínez, 2010, pág. 26). Otra definición es “Radiación dispersada por la atmósfera, de manera que parece provenir de la región del cielo adyacente al sol” (Real Academia de Ingeniería , 2017).
- **Albedo o reflejada:** “ (...) es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas” (Aparicio, 2010, pág. 14)
- **Radiación solar difusa:** “ (...) es la que sufre cambios en su dirección principalmente debidos a la reflexión y difusión en la atmosfera” (Aparicio, 2010, pág. 14).
- **Radiación solar directa:** “Es la recibida desde el Sol sin que se desvíe en su paso por la atmosfera” (Aparicio, 2010, pág. 14)
- **Radiación solar hemisférica:** “(la) radiación solar incidente en una superficie plana dada, recibida desde un ángulo sólido de  $2\pi$  estereorradianes (del hemisferio situado por encima de la superficie) (...)”. Para terminar Martínez menciona que la radiación solar hemisférica está compuesta por la radiación solar directa y de la difusa (Martínez, 2010, pág. 26).
- **Efecto fotoeléctrico:** Aparicio define el efecto fotoeléctrico como la conversión de la luz solar en electricidad, gracias a una célula fotovoltaica (Aparicio, 2010, pág. 46).

Colombia tiene una ubicación geográfica muy cercana a la Línea Ecuatorial, por lo que tiene dos estaciones: verano e invierno. Las estaciones en la dicha línea tienen una duración mayor a diferencia de los países que se encuentran en los trópicos, los cuales poseen más de 2 estaciones.

Los países que cuentan sólo con dos estaciones también se ven afectados por fenómenos climáticos con El Niño (responsable de veranos muy fuertes) y La Niña (con inviernos en igual escala).

El Fenómeno de La Niña cuando este comience será una temporada de baja producción energética por los paneles fotovoltaicos debido a la nubosidad según (Aparicio, 2010, pág. 14;15) menciona que la nubosidad provoca un aumento de radiación difusa y una disminución de la radiación directa denominándolos así días de poca radiación.

En consecuencia, Aparicio plantea que la radiación total es la suma de todas las radiaciones:

$$\text{Radiación Total} = \text{Radiación directa} + \text{Radiación difusa} + \text{Radiación de albedo}$$

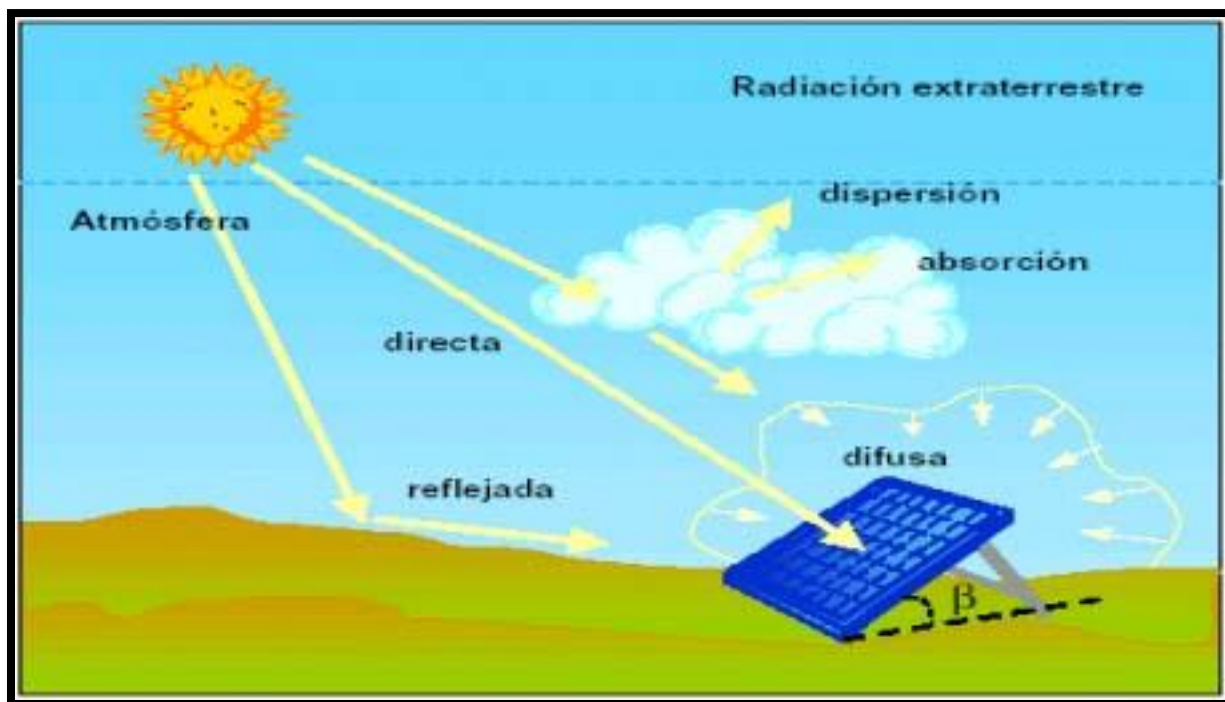


Figura 6. Tipos de radiación solar en un panel. Adaptado de: Eliseo, Sebastian.2013  
<http://eliseosebastian.com/inclinacion-panel-solar-fotovoltaico/>

También complementa que, debido a las propiedades direccionales de la radiación, el valor de la radiación difusa dependerá del ángulo el cual se ve afectado por factores geográficos.

**4.1.3 Constante solar** “se define la constante solar como la cantidad de energía por unidad de tiempo y área, que se alcanza sobre una superficie orientada normalmente hacia la dirección de los rayos solares en la atmósfera” (Aparicio, 2010, pág. 15) por otra parte *“(...) es la radiación recibida del sol por una superficie de 1 m<sup>2</sup> colocada en el límite exterior de la atmósfera terrestre y en un plano perpendicular a los rayos solares. Es, por tanto, independiente de las condiciones meteorológicas, pero varía con la distancia del sol a la tierra, siendo mayor en invierno (Perigeo) que es cuando la distancia es menor. (García-Badell, 1982, pág. 10)*

**4.1.4 Energía Fotovoltaica** Según (BUN-CA, 2002, pág. 4) “La energía solar fotovoltaica es aquella que se obtiene por medio de la transformación directa de la energía del sol en energía eléctrica (..)”.

Otra definición un poco más completa es:

*“(...) La energía fotovoltaica es la transformación directa de la radiación solar en electricidad. Esta transformación se produce en unos dispositivos denominados paneles fotovoltaicos. En los paneles fotovoltaicos, la radiación solar excita los electrones de un dispositivo semiconductor generando una pequeña diferencia de potencial. La conexión en serie de estos dispositivos permite obtener diferencias de potencial mayores. Aunque el efecto fotovoltaico era conocido desde el siglo XIX, fue en la década de los 50, en plena carrera espacial, cuando los paneles fotovoltaicos comenzaron a experimentar un importante desarrollo. Inicialmente utilizados para suministrar electricidad a satélites geoestacionarios de comunicaciones, hoy en día constituyen una tecnología de generación eléctrica renovable.*

*Una de las principales virtudes de la tecnología fotovoltaica es su aspecto modular, pudiéndose construir desde enormes plantas fotovoltaicas en suelo hasta pequeños paneles para tejados (...)" (APPA, 2017).*

**4.1.5 Irradiancia en Santander** Según estudios de la UPME (Unidad de Planeación Minero Energetica) y el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), se evidencia que Santander se encuentra dentro de los departamentos con mayor Irradiancia en Colombia (ver figura).

De igual forma compartiendo los tiempos de brillo solar más altos de la región dando como beneficio mayor tiempo de producción de energía y reduciendo el tamaño del terreno necesario para la producción de energía eléctrica.

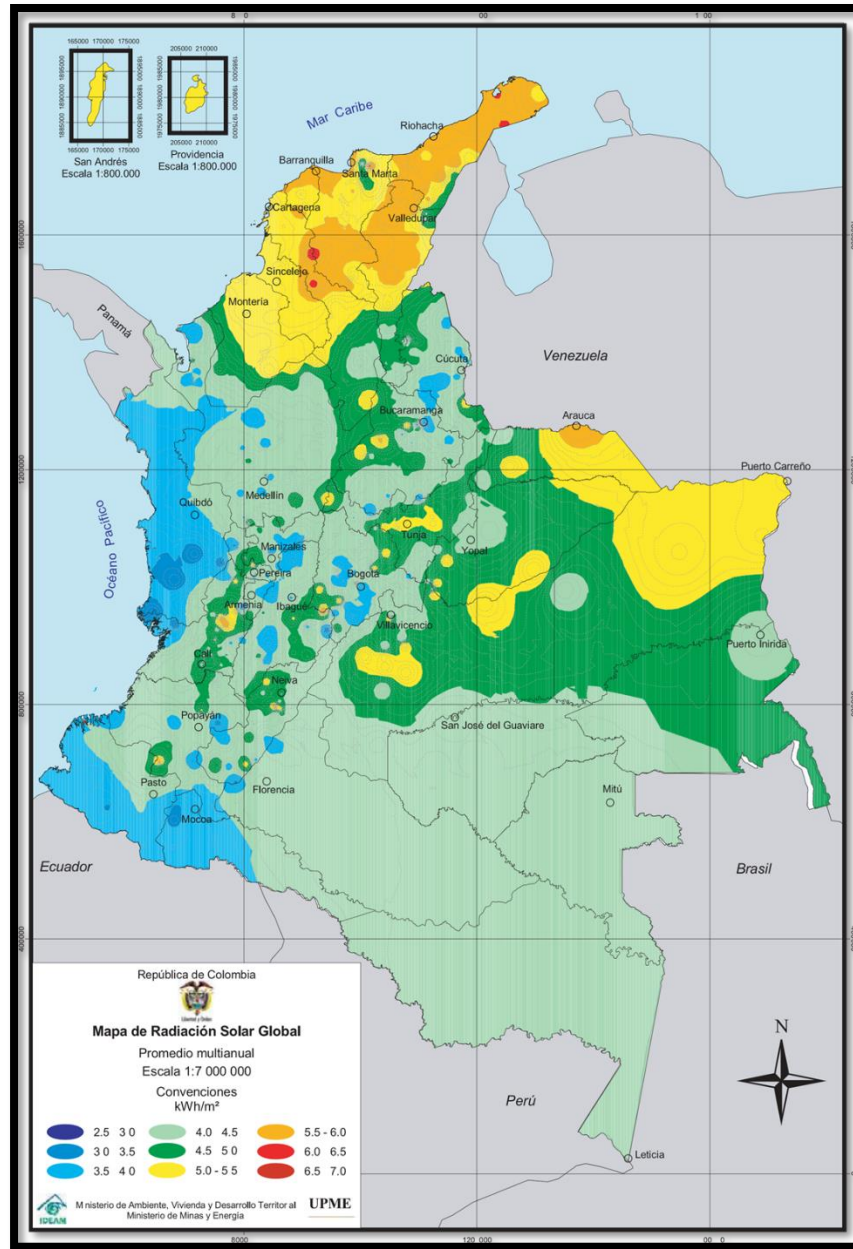


Figura 7. Mapa de radiación solar IDEAM

**4.1.6 Célula fotovoltaica:** Aparicio menciona que la célula fotovoltaica está compuesta por materiales semiconductores, principalmente silicio. “(...) Dispone de una capa de material del tipo n y otra capa de mayor espesor del tipo p, por separado su comportamiento eléctrico es neutro, pero al realizar la unión se generará un campo eléctrico en su interior (...)”.

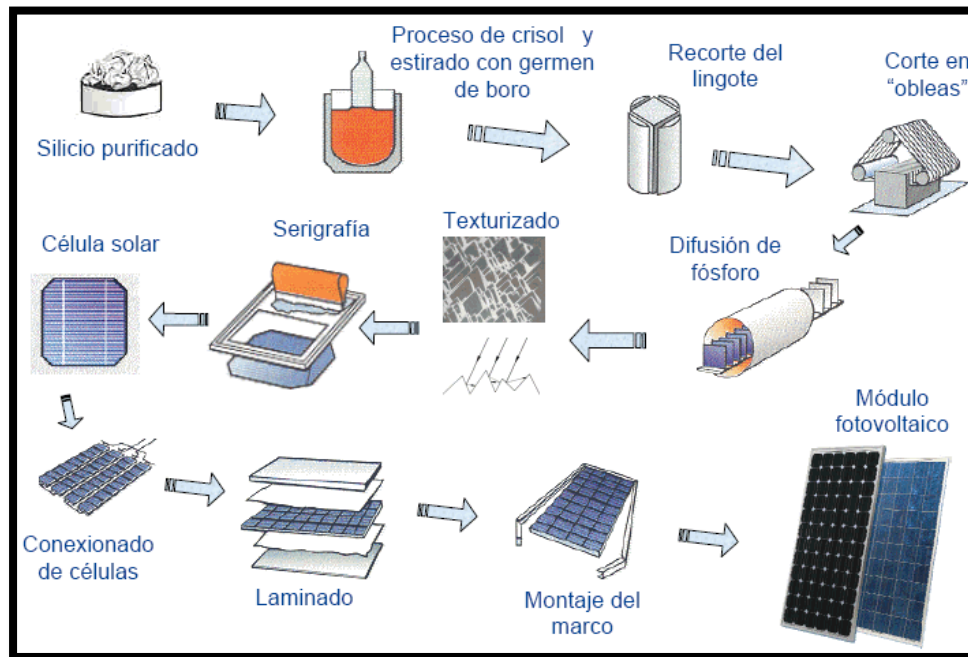
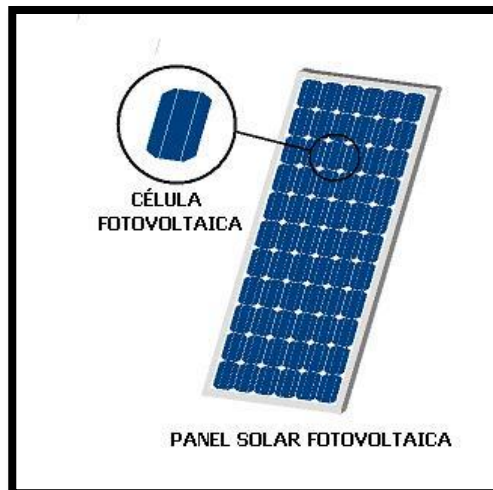


Figura 8. Fabricación módulo fotovoltaico. Adaptado de: <http://www.electricidad-gratuita.com/Images/fabricacion-modulo-fotovoltaico.gif>

“ (...) El uso de silicio es interesante porque es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y se presenta en forma de dióxido de silicio ( $SiO_2$ ), por lo que se requiere de cierto tratamiento químico hasta que finalmente se convierte en las láminas que formarán la unión PN” (Aparicio, 2010, pág. 49)



*Figura 9.* Descripción gráfica de célula fotovoltaica. Adaptado de: <https://ecodatahousing.wordpress.com/2011/07/21/grupo-b-energia-fotovoltaica-ecodatahousing-organstructures/>

**4.1.7 Modulo fotovoltaico** Está conformado por la interconexión de varias células fotovoltaicas en serie y/o paralelo para adaptar el módulo fotovoltaico a los niveles de tensión y corriente (Aparicio, 2010), para complementar (BUN-CA, 2002) menciona: “ La transformación directa de la energía solar en energía eléctrica se realiza en un equipo llamado módulo o panel fotovoltaico. Los módulos o paneles solares son placas rectangulares formadas por un conjunto de celdas fotovoltaicas protegidas por un marco de vidrio y aluminio anodizado”.

**4.1.7.1 Tipos de módulos** *En el mercado actualmente existen una variedad de paneles dependiendo de la cristalinidad del silicio, los cuales son:*

- Módulos de silicio mono cristalino: “son los más utilizados debido a su gran confiabilidad y duración, aunque su precio es ligeramente mayor que los otros tipos” (BUN-CA, 2002). Estos “se caracterizan porque los átomos están perfectamente ordenados en la red

cristalina. Es decir, todo el volumen de la célula es un único cristal de silicio, su eficiencia se sitúa entre un 16% y 25%” (Aparicio, 2010).

- Módulos de silicio policristalino: son ligeramente más baratos que los módulos de silicio mono cristalino, aunque su eficiencia es menor, según Aparicio esta puede estar entre un 10% y un 14%, al contar con una eficiencia más baja que el mono cristalino, su fabricación es mucho más económica lo cual lo hace atractivo por algunas empresas.
- Módulos de silicio amorfo: “tienen menor eficiencia que los 2 anteriores, pero un precio mucho menor. Además, son delgados y ligeros, hechos en forma flexible, por lo que se pueden instalar como parte integral de un techo o pared” (BUN-CA, 2002).

En la actualidad con el creciente interés de países más desarrollados y de grandes empresarios por incursionar en esta nueva fuente de energía han surgido nuevos elementos para reemplazar el silicio como el Arseniuro de Galio (Ga As), Teluro de Cadmio (Cd Te) entre otras más, de igual forma otro tipo de células denominadas de película delgada, las cuales poseen menos material y su grosor siendo entre 1 y 10 micras permiten implementarse en elementos más flexibles (Aparicio, 2010).

Los conceptos expuestos con anterioridad ayudan al entendimiento del objetivo de este proyecto, para así lograr identificar las necesidades para el correcto funcionamiento de la planta fotovoltaica. De igual forma, esto también ayudara al análisis de algunos criterios claves en el modelo de programación multiobjetivo.

Después de realizar la explicación de los conceptos necesarios para el entendimiento en la parte energética, se procederá de igual forma a realizarlo con el tema de programación multiobjetivo o multicriterio

### **Programación Multiobjetivo**

La programación multiobjetivo, es una de las ramas en las que se divide la toma de decisiones multicriterio, siendo la toma de decisiones multiatributo la otra rama que la compone.

*“La programación multiobjetivo puede definirse como una parte de la Investigación Operativa que trata de proporcionar métodos útiles –eficientes- para la toma de decisiones sobre problemas que incluyen diversidad de objetivos, a veces contradictorios, que son evaluados de acuerdo a múltiples criterios y donde no es evidente la mejor u óptima alternativa.”* (Antomil Ibias, Arenas Parra, Bilbao Terol, Jiménez, & Rodríguez Uría, S.F)

A diferencia de la programación lineal, en la programación multiobjetivo se tienen en cuenta como mínimo dos objetivos los cuales posibilitan obtener una solución óptima más acertada a nuestro problema. Muchos problemas financieros, o de transporte se pueden desarrollar con un solo objetivo sin embargo es recomendable usar otros métodos que los acerquen más a la realidad.

La necesidad de enfrentar aplicaciones reales en las investigaciones de proyectos, actividades, o tareas hace que el planteamiento de una única función objetivo sea optimizado sujeto a un conjunto de restricciones que ya no resultan adecuadas para ciertas situaciones, por lo que la introducción de un modelo de optimización multiobjetivo resulta siendo un método con el cual se puede administrar una mayor cantidad de información al abordar un problema.

Al tener varios objetivos de diferente tipo es difícil llegar a una solución óptima para el problema que se está tratando por lo que “la programación multiobjetivo en vez de buscar una

solución óptima, trata de encontrar un conjunto de soluciones eficientes no dominadas u óptima de Pareto.” (Aránguiz, 2002)

**4.1.8 Métodos de Solución** Existen dos métodos clásicos para poder generar las soluciones no-inferiores de un problema multiobjetivo: el método de los pesos y el método de las restricciones. Ambos métodos intentan generar todos los puntos no inferiores del espacio de objetivos, si bien que, una vez aplicados, no garantizan la obtención de todos ellos.

**4.1.8.1 El Método de la restricción** El método de la restricción consiste básicamente en la transformación del problema multiobjetivo en un problema con un único objetivo a maximizar o minimizar, para poder así utilizar los métodos de resolución clásicos como el Simplex. En esencia, todos los objetivos del problema, menos uno, se introducen en el conjunto de restricciones fijando arbitrariamente el lado derecho de cada nueva restricción (una por objetivo) Marglin (1967) demostró que la solución de este nuevo problema también da una solución eficiente. El procedimiento paso a paso es el siguiente para un problema bi-objetivo en donde los dos objetivos son de maximización:

En primer lugar, se soluciona el problema con el primer objetivo  $Z_1$  y, una vez obtenido el valor de las variables de decisión, calculando el valor del segundo objetivo  $Z_2$ . A continuación, se soluciona el problema con el segundo objetivo  $Z_2$  y una vez obtenido el valor de las variables de decisión, se calcula el valor del primer objetivo  $Z_1$ . Por ahora ya se tienen dos puntos eficientes del espacio de objetivos. El siguiente paso es escoger una de las funciones objetivo (por ejemplo, se escoge  $Z_1$ ) y ponerla como restricción. Suponiendo que  $L_2$  corresponde al valor de  $Z_2$  cuando

se maximiza  $Z_1$ . Si se añade la restricción  $Z_2 \leq L_2$  y se soluciona el problema, se volvería a obtener la misma solución para  $Z_1$ . Pero si se añade la siguiente restricción  $Z_2 \leq L_2 + \epsilon$ , en donde  $\epsilon$  es un valor positivo relativamente pequeño, y se soluciona el problema, es posible que la nueva solución de  $Z_1$  sea inferior o igual, pero obviamente nunca superior, ya que, al añadir una nueva restricción, se reduce el espacio de decisiones factible. Por lo tanto, a medida que se va incrementando el valor de  $\epsilon$  y resolviendo nuevas instancias del problema, se van generando nuevas soluciones de  $Z_1$ . El proceso se para cuando el lado derecho de la restricción,  $L_2 + \epsilon$ , alcanza el valor óptimo de  $Z_2$ . El problema reside en encontrar el valor de  $\epsilon$  adecuado para poder generar el máximo número de puntos eficientes en el espacio de objetivos. En otras palabras, se trata de encontrar el número adecuado de problemas lineales a resolver.

4.1.8.2 ***El Método de los Pesos*** El método de los pesos es otro procedimiento similar al de la restricción para generar los puntos eficientes del espacio de objetivos. También se trata de transformar el programa multiobjetivo en un programa con un único objetivo para poder utilizar el método Simplex y generar así soluciones eficientes. En este caso, básicamente se forma un único objetivo sumando los dos objetivos del modelo ponderados por unos pesos relativos. Para obtener diferentes puntos eficientes estos pesos relativos se van modificando. En cada modificación se resuelve el problema con el nuevo objetivo resultante.

4.1.8.3 ***Método simplex multiobjetivo*** Zeleny, 1973 citado por (Vegoña, 2009) dice lo define de la siguiente manera:

*“este método sólo es aplicable para objetivos y restricciones lineales. Se trata de una extensión del método simplex que evalúa en cada iteración la eficiencia de las soluciones básicas obtenidas (puntos extremos), obteniendo así todos los puntos extremos eficientes.*

*El conjunto eficiente serán todas las combinaciones lineales convexas de puntos extremos eficientes que sean adyacentes.”*

(Autran, y otros, 1998) en su libro “Evaluación y Decisión Multicriterio: Reflexiones y Experiencias” definen otros métodos, los cuales llaman “los principales métodos de evaluación y decisión multicriterio discretos” los cuales son cuatro.

El primer método es llamado “**Ponderación Lineal (scoring)**, el cual está definido por el autor como:

*“Un método con una fundamentación teórica ortodoxa y directa, que permite abordar situaciones de incertidumbre o con modestos niveles de información, y que consiste en construir una función de valor para cada alternativa. El método de Ponderación Lineal supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad. Es un método completamente compensatorio, y puede resultar dependiente, y manipulable, de la asignación de pesos a los criterios o de la escala de medida de las evaluaciones. Es un método intuitivo y sencillo de utilizar y, por ello, ampliamente difundido” (Saaty, 1998)*

**Utilidad multiatributo (MAUT)** es un método enfocado a la utilidad obtenida de cada una de las funciones objetivo, en el cual:

*“Para cada atributo se determina la correspondiente función de utilidad (parcial), y luego se agregan en una función de utilidad multiatributo de forma aditiva o multiplicativa. Al determinarse la utilidad de cada una de las alternativas se consigue una ordenación completa del conjunto finito de alternativas. El método de utilidad multiatributo supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad, utiliza ‘escalas de intervalo’, y acepta el principio de ‘preservación de orden’ (Rank preservation). Saaty, 1998 citado por (Autran, y otros, 1998)*

El **Análisis jerárquico (AHP)**, que “descompone una situación compleja y no estructurada en sus componentes, los ordena en una jerarquía, realiza comparaciones binarias y atribuye valores numéricos a juicios subjetivos, ..., y sintetiza los juicios, agregando soluciones parciales en una sola solución” *Saaty, 1998 citado por (Autran, y otros, 1998)*

Como último Saaty define los métodos de **Relaciones de superación (outranking, ‘surclassement’, sobreordenación, sobreclasificación)**, como los que “constituyen instrumentos relativamente sencillos para obtener una preselección de grupos de alternativas (elecciones) muy amplios.” Donde se encuentran algunos tales como “ÉLECTRE – Élimination Et Choix Traduisant la Réalité” y “PROMÉTHÉE. – Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations.

En este método Saaty dice que “el tamaño del conjunto de soluciones eficientes se reduce por medio de una partición en un subconjunto (núcleo de alternativas ‘más favorables’ y otro de ‘menos favorables’. Y es utilizado para dos alternativas que son “incomparables”.

Según Saaty “los centenares de métodos de ordenación propuestos en la literatura, podrían agruparse según el punto de vista expuesto, en las once grandes especies o categorías siguientes:”

- Ordinales y lexicográficos
- Utilidad Multiatributo
- Ponderación Lineal
- Método Jerárquico de Saaty (AHP)
- Concordancia
- Relaciones de Superación
- Comparación de alternativas

- Distancia al ideal
- Permutación
- Análisis multivariante
- Inteligencia artificial y Redes neuronales

**4.1.9 Modelo General** El problema de programación lineal con un sólo objetivo se plantea mediante un modelo matemático donde la función objetivo toma valores en  $\mathfrak{R}$  y las restricciones también cumplen condiciones de carácter lineal.

$$Max (Min) \ z = cx$$

s.a

$$Ax = b$$

$$x \geq 0$$

Con la función objetivo  $z$  a optimizar,  $c$  un vector renglón de  $n$  componentes,  $A$  la matriz de  $m \times n$ ,  $b$  un vector de columna de  $m$  componentes y  $x$  el vector renglón de las variables de decisión con  $n$  componentes.

Por otro lado, si ahora la función objetivo toma valores en  $\mathfrak{R}^p$ , considerando además las restricciones y las variables del problema de programación lineal, se obtiene un problema de programación lineal con  $p$  objetivos.

$$Max(Min) \ z = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)]$$

s.a

$$x \in X$$

$z$  consta de  $p$  componentes, donde cada una de ellas consta de una función objetivo-definida:

$$f_k(x) = c_{k1}x_1 + c_{k2}x_2 + \dots + c_{kn}x_n, \quad k = 1, \dots, p$$

El conjunto de restricciones está conformado sobre un espacio vectorial de dimensión  $n$ .

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2$$

⋮

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n$$

Este problema es el modelo general de un problema de programación lineal multiobjetivo (PPLMO) y se formula de la siguiente manera:

$$Max(Min) \quad z = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)]$$

s.a

$$Ax = b$$

$$x \geq 0$$

Función objetivo:  $z$  es un vector con  $p$  funciones objetivo

Restricciones:  $A$  es una matriz de  $m$  renglones y  $n$  columnas

Vector de términos independientes:  $b$  es un vector de  $m$  renglones

Variables de decisión:  $x$  es un vector de  $n$  componentes no negativas

**4.1.10 Algoritmo Genético** Los Algoritmos Genéticos son métodos adaptativos, generalmente usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros, basados en la reproducción sexual y en el principio supervivencia del más apto. Más formalmente, y siguiendo la definición dada por Goldberg,

*“Los Algoritmos Genéticos son algoritmos de búsqueda basados en la mecánica de selección natural y de la genética natural. Combinan la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de información estructurado, aunque aleatorizado, para constituir así un algoritmo de búsqueda que tenga algo de las genialidades de las búsquedas humanas”* Goldberg, 1989 citado por (Gestal, S.F)

Los Algoritmos Genéticos trabajan sobre una población de individuos. Cada uno de ellos representa una posible solución al problema que se desea resolver. Este proporciona un tipo de metaheurística que tiende a ser muy eficaz para explorar dentro de los lugares factibles y evolucionar de una manera progresiva hacia las soluciones de mayor factibilidad.

Este tipo de algoritmos son comparados con la teoría biológica de la evolución formulada por Charles Darwin a mediados del siglo XIX. Darwin observó que los individuos con variaciones que significan una ventaja de supervivencia a través de una mejoría en la adaptación al entorno tienen una posibilidad mayor de sobrevivir en la siguiente generación. (Frederick S. Hillier, 2010)

Las soluciones factibles de un problema definido hacen referencia a los miembros de una especie particular, donde la aptitud de cada uno de los miembros se mide por el valor de la función objetivo. En vez de hacer el tratamiento de una sola solución, como sucede con las formas básicas de la búsqueda tabú ahora se procesa una población completa de las soluciones en prueba. En el caso de cada generación de un algoritmo genético, la población que se tiene en cuenta en el proceso actual consiste en el conjunto de soluciones que se están contemplando como posibles óptimas de

la prueba. Estas soluciones de prueba se entienden como los miembros que se mantienen vivos. Algunos de los más jóvenes de la población (en especial los que son más aptos) “sobreviven en la adultez y se convierten en padres (aparejados de manera aleatoria) que después tienen hijos (nuevas soluciones de prueba) que tienen algunas de las características (genes) de ambos padres.” (Frederick S. Hillier, 2010) A medida que corre el proceso de un algoritmo genético, existe una mayor probabilidad de que los miembros al ser más aptos, ayuden a generar poblaciones mejoradas para las soluciones de prueba. Algunas veces ocurren mutaciones, de forma que puede ocurrir que los hijos adquieran características deseables de los padres en el proceso.

Este fenómeno ayuda a que el proceso de los algoritmos genéticos realice una exploración en la región de soluciones factibles, mejor a la realizada en procesos anteriores. Finalmente, la supervivencia del más apto se puede identificar generalmente como “una solución de prueba que al menos es cercana a la óptima.” (Frederick S. Hillier, 2010)

Para la generación de un algoritmo genético básico según Frederick S. Hillier 2010, es necesario seguir una serie de etapas definidas de la siguiente manera:

- Paso inicial. Donde se comienza con una población con soluciones de prueba factibles, que puede ser generadas en forma aleatoria, posteriormente se evalúa el valor de la función objetivo de cada miembro de la población.
- Iteración. En este paso se realiza un proceso aleatorio que esté inclinado hacia los miembros más aptos de la población en estudio para seleccionar una cantidad para que se convertirán en padres. Se reúnen los padres en forma aleatoria para que de ellos nazcan dos hijos que serán las nuevas soluciones de prueba factibles cuyas características representan una mezcla de las características de los padres, excepto por las mutaciones ocasionales. En los casos en los que las

mezclas aleatorias y mutaciones generan una solución no factible son considerados abortos y el proceso de generación se repite hasta obtener un hijo que corresponde a una solución factible. Es necesario conservar los hijos y una cantidad significativa de los mejores miembros de la población generada para continuar con la próxima iteración. En esta etapa finalmente se evalúa la aptitud (valor de la función objetivo) de cada nuevo miembro de la población.

- Regla de detención. Se utiliza una regla de detención que puede estar definida por un número fijo de iteraciones, una cantidad de tiempo de CPU fija o un número fijo de iteraciones consecutivas que no hayan generado una solución mejor a la obtenida hasta el momento. Finalmente se usa la mejor solución de prueba encontrada en cualquiera de las iteraciones como la solución final al problema.

En resumen, el esquema de un algoritmo genético inicia con la definición del tamaño de la población, la selección de padres, el cruzamiento que generará las características de los hijos, las mutaciones de estas características y el criterio o regla de detención.

**4.1.10.1 Codificación** Los individuos (posibles soluciones del problema), pueden representarse como un conjunto de parámetros (genes), los cuales agrupados forman lo que es llamado cromosoma. La representación de estos individuos no siempre está definida por el  $\{0,1\}$ , a pesar de que en la teoría una gran cantidad son definidos de esta manera.

Este conjunto de parámetros que representan un cromosoma particular se denomina fenotipo, el cual contiene la información requerida para construir un genotipo. La elección de la codificación dependerá también del problema que se esté manejando pues puede darse la situación en la que la

solución de un caso sea más óptima el uso de una codificación basada en números reales mientras que esa codificación complique la solución en otro caso. Así pues, hay que estudiar la codificación más óptima según el caso que se esté estudiando (Arranz de la peña, S.A). Estas codificaciones se conocen como:

- Codificación binaria. Siendo esta la codificación más extendida debido a que los primeros algoritmos genéticos desarrollados utilizaron este tipo. En esta codificación, los cromosomas están compuestos de bits (0 o 1). Es usado en problemas como el de la mochila, donde se tiene una mochila con cierta capacidad y una cantidad de objetos que se desea introducir. Estos objetos tienen un peso y un beneficio, la capacidad de la mochila es inferior a la suma de peso de todos los objetos, con este problema se busca que la suma de los beneficios o valores sea maximizada y al mismo tiempo que la suma de los pesos no supere la capacidad de la mochila
- Codificación Numérica. Esta codificación utiliza cadenas de números que representan un número en una secuencia. Se aplica en problemas en los que hay que ordenar algo. En algunos casos es necesario realizar correcciones a la cadena después de las relaciones o mutaciones generadas. El problema más usado con este tipo de codificación es el del agente viajero en el que se tiene una serie de ciudades que el comerciante debe recorrer y las distancias entre las mismas. El objetivo es que al partir de una ciudad origen, el comerciante recorra todas las ciudades y vuelva al origen, pero minimizando el número de kilómetros recorridos, por lo que es necesario encontrar la combinación de ciudades que sean factibles para en estos recorridos.
- Codificación por Valor Directo. Utilizada en problemas en donde se requiera el uso de valores de cifrado complicado como el caso de números reales. El cromosoma de este tipo de

codificación es una cadena de valores relacionados con el problema a estudiar, pudiendo ser desde números decimales, cadenas de caracteres o incluso una combinación de ellos. (Arranz de la peña)

- Codificación en Árbol. Se usa principalmente en la creación de programas o expresiones para programación genética. Cada cromosoma está compuesto por un árbol con

**4.1.10.2 Población** Para la realización de un algoritmo genético es indispensable iniciar por el proceso de selección de la población inicial, pues es la que muestra los detalles de la composición de los cromosomas que presentan las mutaciones y cruzamientos para la obtención de las soluciones óptimas.

**4.1.10.2.1 Tamaño de la población** Es necesario establecer un tamaño de población adecuado puesto que puede correr el riesgo de no cubrir adecuadamente el espacio de búsqueda, o de generar un costo computacional excesivo.

Según (Goldberg D.E, 1987) el tamaño óptimo de población para ristas (conjuntos) de longitud  $l$ , con codificación binaria, crece exponencialmente con el tamaño de la rista. Sin embargo (Alander, 1992) basándose en la evidencia empírica sugiere que el tamaño de población óptima está comprendida entre  $l$  y  $2l$ .

La población inicial de un algoritmo genético normalmente es escogida generando ristas al azar, donde cada gen puede contener uno de los posibles valores del alfabeto con probabilidad uniforme, es posible definir esta población inicial por medio de técnica heurística o de optimización local, sin embargo, muchas veces esto puede ocasionar una aceleración en la convergencia del algoritmo, lo que posiblemente evitaría algunas soluciones con mayor factibilidad.

**4.1.10.3 Selección**

4.1.10.3.1 *Selección por Rueda de Ruleta* Se crea para esta selección una ruleta con los cromosomas presentes en una generación. Cada cromosoma tendrá una parte de esa ruleta mayor o menor en función a la puntuación que tenga cada uno. Se hace girar la ruleta y se selección el cromosoma en el que se para la ruleta. Obviamente el cromosoma con mayor puntuación saldrá con mayor probabilidad. En caso de que las probabilidades difieran mucho, este método de selección dará problemas puesto que, si un cromosoma tiene un 90% de posibilidades de ser seleccionado, el resto apenas saldrá lo que reduciría la diversidad genética.

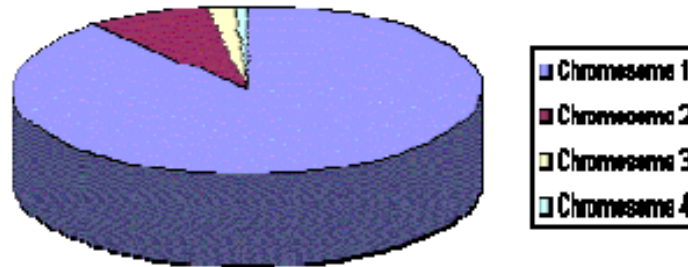
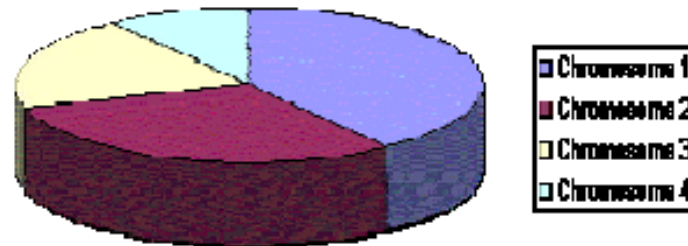


Figura 10. Caso de selección por Ruleta. Adaptado de: (Arranz de la Peña, S.A)

4.1.10.3.2 *Selección por Rango* En este método a cada cromosoma se le asigna un rango numérico basado en su aptitud y la selección se realiza en base a este ranking. Veamos la diferencia entre el caso anterior y este a través de un ejemplo gráfico.



*Figura 11.* Caso de selección por Ranking. Adaptado de: (Arranz de la peña, S.A)

Vemos como en este último caso se va a producir una variedad genética mucho más rica que en el primer caso. El problema de esta selección es que la convergencia puede ser más lenta ya que no existe tanta diferencia entre el mejor cromosoma y el resto como ocurría antes.

*4.1.10.3.3 Selección Elitista* En ciertas ocasiones puede suceder que, tras el cruce y la mutación, perdamos el cromosoma con mejor adaptación. Este método de selección copia el mejor cromosoma o alguno de los mejores en la nueva población. El resto se realiza de la misma forma que hemos visto anteriormente. El elitismo puede mejorar el funcionamiento de los algoritmos genéticos al evitar que se pierda la mejor solución. Una variación del elitismo es que el mejor cromosoma solo se copie a la siguiente generación en caso de que tras una reproducción/mutación no se haya generado un cromosoma mejor.

*4.1.10.3.4 Selección por Estado Estacionario* La descendencia de los individuos seleccionados en cada generación vuelve a la población genética preexistente, reemplazando a algunos de los miembros menos aptos de la anterior generación. Se conservan algunos individuos entre generaciones.

*4.1.10.3.5 Selección por Torneo* Se escogen de forma aleatoria un número de individuos de la población, y el que tiene puntuación mayor se reproduce, sustituyendo su descendencia al que tiene menor puntuación.

*4.1.10.3.6 Selección Escalada* Al incrementarse la aptitud media de la población, la fuerza de la presión selectiva también aumenta y la función de aptitud se hace más discriminadora.

Este método puede ser útil para seleccionar más tarde, cuando todos los individuos tengan una aptitud relativamente alta y sólo les distinguen pequeñas diferencias en la aptitud.

*4.1.10.3.7 Selección Jerárquica* En esta selección, los individuos atraviesan múltiples rondas de selección en cada generación. Las evaluaciones de los primeros niveles son más rápidas y menos discriminatorias, mientras que los que sobreviven hasta niveles más altos son evaluados más rigurosamente. La ventaja de este método es que reduce el tiempo total de cálculo al utilizar una evaluación más rápida y menos selectiva para eliminar a la mayoría de los individuos que se muestran poco o nada prometedores, y sometiendo a una evaluación de aptitud más rigurosa y computacionalmente más costosa sólo a los que sobreviven a esta prueba inicial.

*4.1.10.3.8 Otras Selecciones* Existen otras técnicas de selección que simplemente se comentarán a continuación. Una de ellas es la selección por prueba de aptitud en las que los cromosomas con más aptitud tienen más posibilidad de ser seleccionados, pero no la certeza.

La selección generacional en la que ningún miembro de la población anterior se encuentra en la nueva.

**4.1.11 Algoritmo NSGA II** Es un algoritmo muy efectivo, pero ha sido en general criticado por su complejidad computacional, falta de elitismo y por elegir el valor de parámetro óptimo para compartir el parámetro

Según (Kalyanmoy, Amrit, Sameer, & Meyarivan, 2002) los pasos ya definidos para la aplicación de un algoritmo genético de tipo NSGA II está definida como:

- Para cada individuo  $p$  en la población principal  $P$  haga lo siguiente:
  - Inicializar  $S_p = \emptyset$ ; este conjunto contendría a todos los individuos que están siendo dominados por  $p$ .
  - Inicializar  $n_p = 0$ . Esto sería el número de individuos que domina  $p$ .
  - Para cada individuo  $q$  en  $P$ 
    - \* Si  $p$  domina  $q$  entonces
      - Agregue  $q$  al conjunto  $S_p$ , es decir,  $S_p = S_p \cup \{q\}$
    - \* Si  $q$  domina a  $p$  entonces
      - Incrementar el contador de dominación para  $p$ , es decir,  $n_p = n_p + 1$
  - Si  $n_p = 0$ , es decir, ningún individuo domina  $p$  entonces  $p$  pertenece al primer frente; Establezca el rango del  $p$  individual a uno, es decir,  $p_{rank} = 1$ . Actualice el primer frente agregando  $p$  al frente uno, es decir  $F_1 = F_1 \cup \{p\}$
- Esto se lleva a cabo para todos los individuos en la población principal  $P$ .
- Inicializar el contador frontal a uno.  $i = 1$
- Siguiendo es llevado a cabo mientras el  $i^{\text{th}}$  frente está vacío, es decir,  $F_i \neq \emptyset$ 
  - $Q = \emptyset$ . El conjunto para almacenar los individuos para  $(i + 1)^{\text{th}}$  frente.
  - Para cada individuo  $p$  en el frente  $F_i$

\* Para cada individuo  $q$  en  $S_p$  ( $S_p$  es el conjunto de individuos dominado por  $p$ )

◦  $n_q = n_q - 1$ , disminuir el recuento de dominación para el individuo  $q$

◦ Si  $n_q = 0$  entonces ninguno de los individuos en el frente subsecuente dominaría a  $q$ .

Por lo cual establecer  $q_{rank} = i + 1$ . Actualizar el conjunto  $Q$  con el individuo  $q$  por ejemplo:

$$Q = Q \cup q.$$

- Incrementar el contador frontal en uno.
- Ahora el conjunto  $Q$  es el siguiente frente y por lo tanto  $F_i = Q$ .

Después del proceso de la no dominación, se realizan algunas otras programaciones para la ‘Crowding distance’, selección, para los operadores genéticos, y también para la recombinación y nueva selección. En la siguiente figura se puede observar la estructura básica de un Algoritmo genético NSGA-II aplicado a un proceso de laminación:

---

**Algoritmo 1** Ciclo principal de operaciones de NSGA-II.

---

```

1: Inicio
2: Repite.
3: Inicialización de parámetros
4: Genera individuos aleatorios  $\mu$ .
5: Evalúa a los individuos.
6: Si  $\mu$  es factible entonces
7:      $\mu \rightarrow P_t$ 
8:     Deshecha  $\mu$ 
9:     Hasta Criterios de término.
10:  $F$ =Ordenamiento no dominado ( $P_t$ )
11: Genera  $Q_t$  a partir de  $P_t$ 
12: Mientras (Criterio de parada) Repite
13:     Genera  $R_t = Q_t \cup P_t$ 
14:      $F$ =Ordenamiento no dominado rápido ( $R_t$ )
15:     Mientras  $|P_{t+1}| \geq N$  hacer
16:         Distancia de Agrupamiento ( $F_t$ )
17:          $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_t$ 
18:         Ordena ( $P_{t+1}, \geq n$ )
19:          $P_{t+1} = P_{t+1}[0 : N]$ 
20:          $Q_{t+1}$ =Genera nueva población  $P_{t+1}$ 
21:          $t = t + 1$ 
22:     Fin Mientras
23: Fin

```

---

Figura 12. Un algoritmo multi-objetivo NSGA-II para la programación de los pasos de laminación.

Adaptado de: (Hernández, Castilla, López, & Mancilla, 2016)

## 5 Marco normativo

En Colombia la realización de proyectos de energías renovables ha estado fuertemente afectada por la normatividad definida para la construcción y uso de las plantas con este tipo de energías, debido a que durante muchos años se han tenido como propósito de investigación, y no son vistas como posibles grandes beneficios.

El gobierno nacional en años anteriores definió normas como por ejemplo la Ley 697 del 3 octubre de 2012, basada en el uso racional de energía, que define el propósito nacional de llegar a

la utilización en pequeña escala de energías renovables, apoyándose en investigación básica y aplicada, que busque reducir costos y ampliar la capacidad de las distintas energías renovables. La ley 788 del 27 de diciembre de 2002 representa un gran beneficio para los empresarios líderes de proyectos con energías renovables, pues que se define para eximir del impuesto de renta durante los primeros 15 años de ventas de la energía, lo que genera un ingreso mayor, pero que sin embargo el 50% de este debe ser destinado a programas de beneficio social.

La ley de mayor impulso para las energías renovables es la 1715 del 13 de mayo de 2014, la cual tiene por objeto promover el desarrollo y uso de estas fuentes de energía, por medio de su “integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético.” (Giraldo O., 2017), sin embargo, la situación actual de estos incentivos en el país es incierta, puesto que la Ley 1715 de 2014 indicó que al ministerio de Minas y Energía era responsable de definir la reglamentación del tema, lo cual hasta la fecha no ha sido realizado, por lo que muchas inversiones en estas energías renovables han sido detenidas.

LEY 1715 DE 13 DE MAYO DE 2014, POR MEDIO DE LA CUAL SE REGULA LA INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES AL SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL.

Artículo 19. Desarrollo de la energía solar.

- 1. La energía solar se considerará como FNCR. Se deberá estudiar y analizar las condiciones propias de la naturaleza de la fuente para su reglamentación técnica por parte de la CREG.*
- 2. El Gobierno Nacional a través del Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Vivienda y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el marco sus funciones, fomentarán el*

*aprovechamiento del recurso solar en proyectos de urbanización municipal o distrital, en edificaciones oficiales, en los sectores industrial, residencial y comercial.*

*3. El Gobierno Nacional él través del Ministerio de Minas y Energía directamente o a través de la entidad que designe para este fin reglamentará las condiciones de participación da energía solar como fuente de generación distribuida estableciendo la reglamentación técnica y de calidad a cumplir por las instalaciones qua utilicen la energía solar, así como los requisitos de conexión, mecanismos de entrega de excedentes, y normas de seguridad para las instalaciones.*

*4. El Gobierno Nacional considerará la viabilidad de desarrollar la energía solar como fuente de autogeneración para los estratos 1, .2 Y 3 como alternativa al subsidio existente para el consumo de electricidad de estos usuarios.*

*5. El Gobierno Nacional, por intermedio del Ministerio de Ambiente, y Desarrollo Sostenible determinará los parámetros ambientales que deberán cumplir los proyectos desarrollados con energía solar, así como la mitigación de los impactos ambientales que puedan presentarse en su implementación.*

*6. El Gobierno Nacional incentivará el uso de la generación fotovoltaica como forma de autogeneración y en esquemas de GD con FNCER.*

*7. El Gobierno Nacional a través del Ministerio de Minas y Energía considerará esquemas de medición para todas aquellas edificaciones oficiales o privadas, industrias, comercios y residencias que utilicen fuentes de generación solar. El esquema de medición contemplará la posibilidad de la medición en doble vía (medición neta), de forma que se habilite un esquema de autogeneración para dichas instalaciones. (FEDEO, 2016)*

## 6. Metodología

El proyecto de investigación sobre selección de zonas óptimas para localización de plantas fotovoltaicas como apoyo a red de alumbrado público en la provincia de Soto a partir de un modelo de programación multiobjetivo, consiste en la solución de un problema de localización de plantas solares teniendo en cuenta 2 objetivos, el primero será un objetivo de minimización de costos y el segundo de minimización de impacto ambiental enfocado al uso del terreno, la formulación y solución de este problema se llevará a cabo por 3 fases principales (búsqueda y selección, construcción del modelo, interpretación de resultados)

### 6.1 Fase I Búsqueda y selección

En esta fase se realiza la búsqueda, selección y recopilación de la información necesaria para la construcción del modelo y de las plantas fotovoltaicas.

**6.1.1 Demanda energética** La provincia de Soto ubicada en el departamento de Santander, Colombia se encuentra integrada por 15 municipios, los cuales serán nuestros nodos clientes a los cuales las plantas solares suministrarán un porcentaje de apoyo a la demanda energética de alumbrado público.

En la tabla (1) se puede observar que Bucaramanga es el municipio con mayor demanda de energía seguido de Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Lebrija, Matanza y por último Rionegro.

Tabla 1.  
*Demanda de energía Municipios Provincia de Soto*

Municipio	Promedio Mensual [Kwh]	Total Anual [Kwh]	% Apoyo	Apoyo [Kwh]
Bucaramanga	2.259.352	27.112.225	100%	2.259.352
California	12.489	149.863	100%	12.489
Charta	5.912	70.945	100%	5.912
El Playón	41.978	503.740	100%	41.978
Floridablanca	731.838	8.782.055	100%	731.838
Girón	516.946	6.203.348	100%	516.946
Lebrija	142.656	1.711.877	100%	142.656
Los Santos	51.143	613.718	100%	51.143
Piedecuesta	499.317	5.991.802	100%	499.317
Rionegro	141.174	1.694.088	100%	141.174
Santa Barbara	2.378	28.530	100%	2.378
Suratá	14.064	168.773	100%	14.064
Tona	31.557	378.689	100%	31.557
Vetas	9.887	118.642	100%	9.887
Matanza	151.199	1.814.384	100%	151.199

Este fenómeno es atribuido a que son municipios con un tamaño de población y de su casco urbano alto, por esta razón se necesitan grandes extensiones de tierra solamente para cubrir al 100% la demanda de Bucaramanga, esto se convierte en un problema pues este municipio no cuenta con la extensión de terreno requerida para la producción de esta cantidad, en consecuencia,

la demanda debe ser atendida por otra planta en otra ubicación que si cumpla con estas características.

**6.1.2 Elección de zonas para la construcción de las plantas solares** En esta primera fase se realiza la revisión de los POT (Plan de Ordenamiento Territorial) de cada municipio con el fin de determinar las zonas candidatas para la construcción de las plantas solares.

se evidencia que 11 municipios pertenecientes a la Provincia de Soto, Santander, no se declara específicamente el uso del suelo para esta actividad, a diferencia de los municipios de Bucaramanga, Piedecuesta, Girón, Floridablanca se atribuye esta ausencia a que es una actividad nueva la cual no era de mayor importancia en los años en los que fue creado los POT de esos municipios, aunque esta actividad no se encuentre especifica se pueden tomar actividades en las cuales el impacto y el uso del suelo son similares, es decir: degradación, contaminación, toxicidad y seguridad. Por esta razón se determina que las zonas seleccionadas no serán ubicadas en el casco urbano sino en zonas rurales.

**6.1.3 Selección de nodos<sup>7</sup>** Se establece la selección de 9 ubicaciones para la construcción de las plantas solares las cuales cumplen con los requisitos a continuación:

1. Bucaramanga
2. Girón
3. Lebrija
4. Los Santos
5. Matanza
6. Piedecuesta

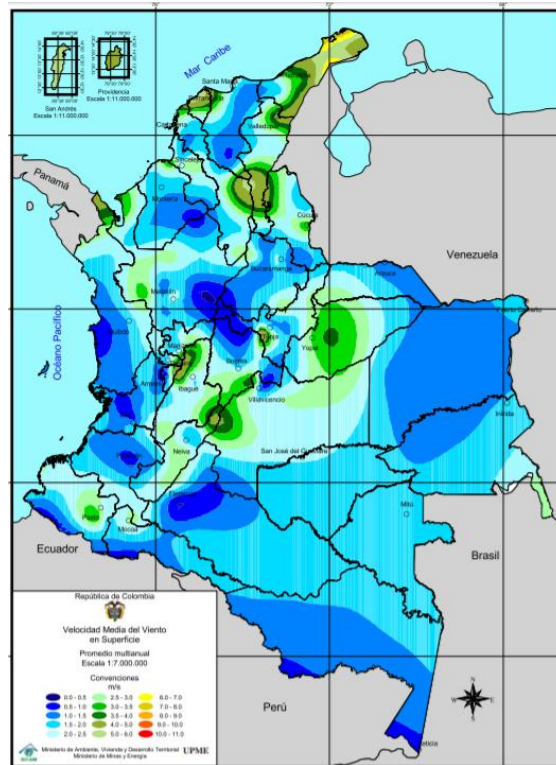
---

<sup>7</sup> Nodos se refiere a los puntos en los cuales irán ubicadas las plantas solares para la prestación del servicio de energía

- 7. Rionegro
- 8. Suratá
- 9. Tona

• **Técnico**

Las ubicaciones donde serán construidas las plantas solares cuentan con vientos promedios de 3 m/s, logrando así economizar en los anclajes al suelo de los paneles solares.



- **Puntos de interconexión a la red eléctrica**

La distancia entre las plantas solares no es mayor a 10 km, siendo esta misma la distancia máxima.

- **Accesibilidad**

Las zonas cuentan con vías de acceso, terrestre o aéreo, para el transporte seguro de los componentes necesarios para la construcción y funcionamiento de las plantas solares u otro requerimiento que se necesite para su implementación.

- **Seguridad**

Los nodos al no tener dificultad con sus vías de acceso pueden contar con un sistema de seguridad que permita la vigilancia de estos. Favoreciendo el correcto funcionamiento del sistema, evitando inconvenientes por robo de algunos componentes o por ser blanco de actos vandálicos.

**6.1.4 Verificación del funcionamiento de los nodos** Se comprueba nuevamente los criterios anteriormente mencionados para la selección de las ubicaciones, evitando así omitir información que pueda afectar el funcionamiento de estos.

**6.1.5 Radiación y brillo solar en los nodos** La radiación de los nodos está dada por  $\text{Kwh/m}^2$  y el brillo solar esta dado por exposición en horas, los datos analizados son tomados por la NASA.

Tabla 2.  
*Irradiancia y brillo solar promedio ubicaciones candidatas*

Ubicación	Irradiancia Promedio [Kwh/m <sup>2</sup> ]	Brillo solar promedio [Horas/día]
Bucaramanga	5,15	5,3
Girón	5,15	5,7
Lebrija	5,15	5,5
Los Santos	5,35	6,3
Matanza	4,8	5,8
Piedecuesta	5,34	5,8
Rionegro	5,15	6,0
Suratá	4,8	5,8
Tona	4,8	5,6

En la Tabla No 2 se evidencian las ubicaciones que podrán tener una mayor producción de energía eléctrica respecto a otras, pero esto no es posible afirmar completamente que esto sea así, pues, se necesitan analizar otros factores para llegar a esta conclusión.

**6.1.6 Costos** En esta sección se hace la estimación de los costos más relevantes relacionados con la construcción de las plantas solares entre otros costos incurridos para el funcionamiento y mantenimiento, de igual forma, se plantean algunas suposiciones necesarias para el dimensionamiento de las plantas fotovoltaicas para la comprobación del funcionamiento del modelo.

Por esta razón se hace una subdivisión de 3 costos (Costo de instalación, operación y mantenimiento, distribución)

#### **6.1.6.1 Costos de instalación**

**6.1.6.1.1 Selección de tipo de panel** Trina Solar en su amplio catálogo de paneles solares, es una compañía china destacada por la calidad de construcción de sus módulos fotovoltaicos y encontrada dentro del top 100 de mejores compañías dedicadas a esta actividad.



*Figura 13.* Panel solar Tallmax M plus Adaptado:

<http://www.trinasolar.com/es/product/tallmax/tallmaxmplus-de14aii>

Se selecciona el panel solar con referencia TALLMAX M PLUS - DD14A(II), destacado por una eficiencia del 19.3 %. según Trina solar el tipo de panel a utilizar es monocristalino, atribuyendo al mismo mayor potencia para instalaciones sobre el suelo. Disponible con la calificación 1500V UL/CEI líder del sector, es perfecto para proyectos solares con una superficie restringida, dado que su elevada eficiencia y densidad de potencia se han unido para maximizar la producción energética en espacios restringidos a la vez que soportan condiciones ambientales difíciles.

Estas características permiten mayor flexibilidad y adaptación a las condiciones de las ubicaciones seleccionadas de la Provincia de Soto, Santander, Colombia.

Tabla 3.

*Especificaciones Técnicas Panel solar TSM 375*

DATOS ELÉCTRICOS EN CONDICIONES TONC	TSM375
Potencia máx.-P <sub>MAX</sub> (Wp)	279
Tensión en el punto P <sub>máx</sub> -V <sub>MPP</sub> (V)	37,1
Corriente en el punto P <sub>máx</sub> -I <sub>MPP</sub> (A)	7,53
Tensión en circuito abierto-V <sub>OC</sub> (V)	45,1
Corriente de cortocircuito-I <sub>SC</sub> (A)	7,98
DATOS ELÉCTRICOS EN CONDICIONES STC	TSM375
Potencia nominal-P <sub>máx</sub> (Wp)*	375
Tolerancia de potencia nominal (W)	0/+5
Tensión en el punto P <sub>máx</sub> -V <sub>MP</sub> (V)	40
Corriente en el punto P <sub>máx</sub> -I <sub>MPP</sub> (A)	9,37
Tensión en circuito abierto-V <sub>OC</sub> (V)	48,5
Corriente de cortocircuito-I <sub>SC</sub> (A)	9,88
Eficiencia del módulo $\eta_m$ (%)	19,3

La tabla 3 presenta todas sus características de operación las cuales se deben tener en cuenta al momento de realizar el dimensionamiento de la planta solar. En el momento que no se cumplan el fabricante no se hará responsable por el daño del panel, debido a que son elementos muy frágiles y sensibles a cambios de voltaje.

El precio del panel solar está dado por una sola unidad, debido a la alta variación de precios de diferentes proveedores se hace una estimación, el alto precio según algunos proveedores es atribuido a sus altas prestaciones y altos estándares de calidad, según Trina Solar su relación costo-beneficio es la ideal para este tipo de proyectos a gran escala.

El costo de envío de los paneles se estiman en 6.700 COP aproximadamente, directamente con la empresa iContainers, este precio puede variar al momento de realizar el envío desde Valencia, España hasta Bucaramanga, Santander, esto debido a que la base de cálculo la realiza teniendo en cuenta la temporada y que tanta disponibilidad se tenga, este costo es por panel y tiene un tiempo de 2 a 3 meses en llegar al puerto, este costo es muy susceptible a cambios debido al tipo de negociación Incoterm que se utilice.

*6.1.6.1.2 Selección Inversor* Al momento de realizar la toma de decisión de que inversor se utiliza, se tienen en cuenta factores como: eficiencia, tensión de entrada, tensión de salida, temperatura del lugar donde será instalado, entre otras.

Por esta razón y siguiendo recomendaciones de diversos fabricantes de paneles solares y revistas especializadas (Solar News, Era Solar ,Home Power) se selecciona la marca SMA empresa con mayor facturación a nivel mundial y el más conocido en Alemania para instalaciones de este tipo con suministro de energía eléctrica a la red.

Se realiza la selección de 4 inversores donde 3 de ellos serán centrales los cuales permiten una mayor eficiencia, simplicidad, bajo coste y mayor potencia, dedicado exclusivamente a las plantas que la cantidad de paneles sea mayor a 2.000, el último inversor será para las plantas más pequeñas.

- Inversor central SC 900CP XT

Inversor central el cual permite una mayor entrega de potencia y eficiencia por un bajo costo en comparación a otros inversores. Este inversor está optimizado para soportar temperaturas desde  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta los  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , este inversor al igual que sus variantes SC700CP XT cuentan con gestión de la red, con capacidad de conexión de hasta 3100 paneles fotovoltaicos Trina Solar Tallmax M plus de 375W y un software de computadora optimizada para el uso en plantas de gran envergadura.



*Figura 14.* Inversor SC 900-750-500CP XT adaptado de (SMA, 2018)

- Inversor SC 750-500CP XT

Al igual que su hermano mayor el XC 750-500CP XT comparten similares características de funcionamiento, siendo este más pequeño y con capacidad de conectar hasta 2440 y 2240 paneles, otra diferencia es sus tamaños son ligeramente más pequeños y con menor potencia.

- SMA Sunny TriPower 60000TL-US-10 Inverter

Este es un tipo de inversor descentralizado utilizado especialmente en plantas de energía fotovoltaicas pequeñas o de menor envergadura, su capacidad está limitada a un máximo de 170 paneles solares de 375W Trina Solar, siendo una opción más económica ya que no se va tener un exceso de capacidad.



Figura 15. Inversor Tripower 60000TL-US Adaptado de (SMA, 2018)

Tabla 4.  
Relación panel Inversor-Costo

Inversores	Panel/ inversor	Precio [USD]	Precio [COP]
SC 900CP XT	3100	\$ 130.000	\$ 390.000.000
SC 500CP XT	2440	\$ 91.709	\$ 275.127.954
SC 750CP XT	2240	\$ 117.444	\$ 352.331.946
SMA Sunny TriPower 60000TL-US-10 Inverter	171	\$ 8.275	\$ 24.825.000

La tabla muestra los costos<sup>8</sup> asociados a los inversores que se van a tener en cuenta en el dimensionamiento del sistema, es de suma importancia que el tipo de inversor escogido depende

<sup>8</sup> El costo de los inversores se calcula con una tasa de cambio de 3.000 pesos colombianos.

estrictamente de la cantidad de paneles, esto para evitar subutilización del inversor generando sobrecostos.

El costo de envío del inversor ya se encuentra incluido en el precio, es notable aclarar que el precio que se presenta en la tabla 4 son estimaciones promedio hechas en base a datos de páginas de internet dedicadas al comercio de estos tipos de inversores.

*6.1.6.1.3 Costo del terreno.* Dentro de los parámetros de entrada para el modelo se tomó como referencia el costo del terreno. El uso de este parámetro tiene como objetivo brindar una aproximación en conjunto con otros costos para la toma de decisión en que parte pueden ser ubicadas las plantas fotovoltaicas. No obstante, es pertinente aclarar que la información es limitada y los diferentes institutos de información estadística nacional no permiten saber de forma certera el valor de los terrenos estudiados, por lo que se procedió a calcular este dato por medio de una estimación estadística que permita dar un valor estimado para los fines del modelo utilizado.

El procedimiento realizado se basó en tomar una muestra de 30 terrenos por cada municipio, en donde por medio de las búsquedas de los precios en COP por hectárea. Las fuentes de información fueron tomadas por páginas de Internet especializadas en finca raíz como FinsaRaiz.com, Casas.Mitula.com, entre otras páginas especializadas en la publicación de este tipo de activos.

En el proceso de recolección de datos se aplica un filtro de búsqueda en el cual no se van a tener en cuenta terrenos ubicados en el casco urbano, uso del terreno diferente al residencial, algunos datos también fueron recolectados vía telefónica a inmobiliarias locales de cada municipio para realizar la comprobación. Los datos consolidados son mostrados en la tabla a continuación:

Tabla 5.

Costos del terreno por municipio

#	Municipio	Costo Terreno [\$/m <sup>2</sup> ]	Costo Terreno [\$/Ha]
1	Rionegro	\$ 2.974	\$ 29.743.841
2	Tona	\$ 16.176	\$ 161.758.570
3	Girón	\$ 220.777	\$ 2.207.772.443
4	Los Santos	\$ 50.200	\$ 501.999.930
5	Bucaramanga	\$ 340.659	\$ 3.406.590.533
6	Lebrija	\$ 26.670	\$ 266.699.994
7	Matanza	\$ 98.316	\$ 983.157.221
8	Piedecuesta	\$ 193.414	\$ 1.934.142.347
9	Suratá	\$ 6.201	\$ 62.009.308

En la tabla 5 nos muestra los costos (COP) obtenidos después de aplicar el procedimiento anteriormente descrito, en algunos municipios se tuvo la necesidad de hacer el cálculo por cercanía de terrenos y se tuvieron en cuenta las características principales compartidas entre los municipios que no se tenían la información necesaria para la asignación del costo.

Analizando los datos obtenidos se podría inferir que los sitios donde se puede obtener menores costos son Rionegro Surata y Tona, por su bajo precio, obteniendo una ventaja frente a otros municipios también candidatas para la ubicación de las plantas.

*6.1.6.1.4 Alistamiento* Con el fin de evaluar el funcionamiento del modelo, el costo de alistamiento es una aproximación de cuánto dinero (COP) se necesita para realizar la adaptación, construcción de estructuras para el anclaje al suelo de los paneles solares, ya que este costo depende mucho del encargado del dimensionamiento de la planta.

Por esta razón este costo se estimó en base a revisión de algunos proyectos como la Planta solar de Yumbo (Valle del Cauca) y el proyecto de los Santos (Santander) estos dos proyectos bajo responsabilidad de CELSIA, igualmente este costo no se puede tomar como un valor fijo, por lo tanto para la alimentación del modelo se hace la suposición que la suma de todos estos costos (adaptación del terreno, estructuras, encerramiento es un valor aproximado de 22.000.000 COP por hectárea de trabajo, suponiendo que la zona es un ambiente ideal donde la intervención del terreno es mínima, la construcción de las estructuras de gran envergadura (soportes con una altura mayor a 2 metros) no es necesaria y en el encerramiento no es necesario la utilización de materiales especiales.

Las estructuras para el anclaje son sencillas, es decir su altura no es superior a un metro de altura, gracias a que los grados de inclinación del panel son de 8 grados según (Aparicio, 2010)

sugiere que los grados de inclinación deben ser similares a la latitud de la zona donde vayan a hacer instalados.

*6.1.6.1.5 Costo de Mano de Obra* En base a revisión de proyectos de construcción de otras plantas solares en Colombia anteriormente mencionadas y según (Portafolio, 2017) en un artículo de su revista, se toma como referencia la utilización de 110 personas distribuyéndose en un 60% de mano de obra calificada y el 40% restante no calificada, para un total de 35.000 módulos, basándose en esos datos se estima una relación de cuantas personas se necesitan por panel y se multiplica ese valor por la cantidad de paneles que se necesitan instalar en cada zona seleccionada, esto con el fin de obtener el total de trabajadores requeridos.

El cálculo del costo se calcula en base a 1 SMLV más prestaciones sociales por ley dando como un valor aproximado de 1'139.953 COP este valor corresponde a la mano de obra no calificada. para la mano de obra calificada se escoge un contrato por prestación de servicios con un valor de 2'500.000 COP el cual es el salario promedio que se devenga una persona calificada recién graduada en esta área.

Para obtener este valor fue necesaria la búsqueda de perfiles similares en páginas dedicadas a ofertas de empleo como Computrabajo y Eempleo.com

**6.1.6.2 Costos de Operación y mantenimiento** El costo de operación y de mantenimiento de una planta solar dependen directamente de las condiciones meteorológicas, estructuras y elementos empleados para el funcionamiento óptimo de los paneles, por esta razón (Gerlach, 2017) plantea que la definición de este costo es un porcentaje de la inversión inicial de la instalación, este costo varía entre 0.5-1.5%, de igual forma el autor plantea que este porcentaje depende directamente del encargado del proyecto, pues el deberá tener en cuenta factores como la altura sobre el nivel del mar, temperatura ambiente y la temperatura de operación a la que se encuentran operando, nivel de polvo (arena, tierra, smog) que se puedan llegar a acumular sobre el panel, siendo 1.5% para situaciones en donde se encuentren en climas casi al borde de las condiciones límite planteadas por el fabricante.

El porcentaje asignado para el proyecto es de un 0.8% siendo un valor neutral para las condiciones presentadas en las zonas candidatas, donde las temperaturas promedio son de 25 °C y el nivel de polvo es mínimo.

Se debe aclarar que la energía fotovoltaica es un tipo de generación de energía eléctrica donde su mantenimiento y costos de operación son muy bajos, debido a que no se emplean elementos con desgaste prematuro, el único factor que es de suma importancia es el alto cuidado que se debe tener al realizar la limpieza de los paneles de no utilizar elementos que puedan rayar el cristal al momento de limpiarlos, dado que a mayor transparencia del cristal y menor impurezas o elementos que obstruyan los rayos solares es mayor la eficiencia del panel. Por esta razón el mantenimiento de los paneles siempre se hará cuando la capacidad de energía tenga una disminución del 30%, puesto que la disminución es consecuencia de que la superficie se encuentre sucia.

**6.1.6.3 Costos de distribución** Este parámetro se tiene en cuenta viendo la distribución como un tipo de arrendamiento o cobro que la empresa prestadora del servicio cobraría por las líneas de transmisión de energía eléctrica, dicho costo aún no se encuentra estipulado por las empresas o es poco común, ya que este tipo de energías hasta ahora están comenzando a ser impulsadas, para el escenario del modelo se plantea la utilización de unos niveles de tarifas estipuladas por la ESSA (Empresa electrificadora de Santander), pero realizando una pequeña modificación la cual consiste en que cada nivel se encuentre relacionado con la distancia a que la energía debe viajar desde el punto de generación hasta el cliente.

Tabla 6.  
*Costo de distribución*

Nivel	Costo de Distribución [COP/Kwh]	Distancias [Km]
I	20,7336	0-30
II	49,8482	30-59
III	111,4827	59-88
IV	130,1643	88-117
V	173,5459	117-146

La tabla 6 plantea 5 niveles de costos de distribución los cuales poseen unos intervalos para la clasificación del costo, esta distancia será calculada desde la planta de energía fotovoltaica hasta el punto de conexión del cliente más cercano, pero no quiere decir que sea una regla que se deba cumplir, pues estos costos dependerán del tipo de negociación que se haga con la empresa que administre las redes de energía de la zona a la cual se le quiere suplir.

**6.1.7 Impacto Ambiental** En la actualidad se implementan diferentes metodologías para la evaluación del impacto ambiental han sido planteadas por diferentes autores, pero todos llegando a una conclusión y es: la evaluación del impacto ambiental siempre va a ser una cuantificación subjetiva propuesta por el evaluador, ya que dicha calificación puede variar en otra persona.

Por esta razón y con fin de encontrar un valor para el parámetro que permitirá la evaluación de este impacto en la función objetivo, se tienen en cuenta 3 factores: pérdida de árboles (medidas en hectáreas taladas), cantidad de emisión evitada de CO<sub>2</sub>, y cercanía al casco urbano.

Los factores de pérdida de hectáreas de árboles, cercanía al caso urbano son estimaciones hechas en base a la herramienta Google Earth y teniendo en cuenta la base de datos del Censo Nacional Agropecuario, para el caso de estos 2 factores se tiene en cuenta la escala dada a continuación.

La cantidad de emisión evitada es estimada gracias a un coeficiente de la UPME con un valor de 0.1990 KgCO<sub>2</sub>/kWh; este valor es multiplicado por la capacidad de generación de energía eléctrica correspondiente a cada terreno, obteniendo así la cantidad de CO<sub>2</sub> evitada en Kg. Este valor es clasificado en 5 niveles con su intervalo correspondiente:

Tabla 7.  
*Intervalos de clasificación cantidad de emisiones evitadas*

Intervalos	Escala
[0 - 5.833.741]	5
[5.833.741 - 11.667.482]	4
[11.667.482 - 17.501.222]	3
[17.501.222 - 23.334.963]	2
[23.334.963 - 29.168.704]	1

En la tabla 7 se puede observar con mayor detalle los intervalos pertenecientes a cada clase en este caso nivel, siendo 5 el mayor valor impacto y 1 el de menor impacto; estos intervalos son calculados así:

1. Se debe realizar el cálculo entre el valor máximo y el valor mínimo, el cual es denominado “Rango”.

$$Rango = Valor\ Máximo - Valor\ Mínimo$$

2. Se realiza el cálculo del ancho del intervalo con un valor de  $K=5$  (# de niveles).

$$Ancho = \frac{Rango}{K}$$

3. Se inicia con el valor mínimo de los datos al cual se le va a sumar el ancho del intervalo; para el caso de nuestra clasificación se toma como valor mínimo el 0.

$$L_{sn} = L_{sn-1} + Ancho$$

El cálculo planteado anteriormente sirve como referencia para el cálculo de los 2 factores restantes; la única diferencia es la clasificación de la escala pues es tomada de forma inversa, es decir, los niveles no irán de 5, 4, 3, 2,1 sino irán de 1,2, 3, 4 y 5 pero el cálculo de los intervalos es el mismo al procedimiento anteriormente planteado.

## 6.2 Fase II Construcción del modelo Multiobjetivo

A continuación, se expondrá el procedimiento final para la solución al problema planteado. Para ello, primero se especificará el modelo sobre el cual se definen una serie de parámetros y variables las cuales son necesarias para el funcionamiento del modelo, también serán planteado supuestos en algunos parámetros en que la información era deficiente o inexistente.

**6.2.1 Identificación del modelo** Para el modelo a realizar en este proyecto se tiene el problema clásico de localización asignación donde se cuenta con 22 terrenos disponibles con una capacidad de generación definida para la instalación de plantas de energía fotovoltaica que atienden la demanda energética, específicamente el consumo de alumbrado público de 15 municipios ubicados en la provincia de Soto en Santander. El modelo de optimización busca localizar los terrenos que se asignaran teniendo en cuenta la minimización de costos y la minimización del impacto ambiental (definidos en capítulos anteriores) sujeto a una serie de restricciones que permiten que la solución converja. Este modelo se basa en la programación entera mixta

**6.2.2 Caracterización de variables** Las variables utilizadas para el planteamiento del modelo están definidas como binarias las cuales son un artificio matemático que permite realizar problemas más complejos que los que se desarrollan con variables continuas, una variable binaria es aquella que puede tomarse como (0) o (1), lo que permite trabajar problemas en los que es necesario tomar una decisión tal como de producir o no, de abrir un lugar o no, entre otros.

### **6.2.3 Modelo matemático**

#### ***Conjuntos***

$i: \{1, 2, \dots, 22\}$  Terrenos

$j: \{1, 2, \dots, 15\}$  Nodos clientes (Municipios)

#### ***Parámetros de Entrada***

$D_j =$  Demanda del nodo cliente (Municipio)  $j$

$Q_i$  = Capacidad de la ubicación  $i$

$C_{ij}$  = Matriz de Costos

$L_{ij}$  = Distancia de la Ubicación  $i$  hasta el nodo cliente (Municipio)  $j$

$E_{ij}$  = Impacto ambiental causado por el terreno  $i$  en la ubicación  $j$

### 6.2.3.1 Función Costos

Sean los conjuntos:

- $I = \{ t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_{22} \}$  el conjunto de terrenos disponibles para construcción de plantas solares.
- $J = \{ n_1, n_2, \dots, n_j, \dots, n_{15} \}$  el conjunto de municipios (consumidores).
- $JI \subset J$  el conjunto de municipios donde se puede localizar una (o varias) planta(s) solar(es).

Sean las funciones:

- $localizacion(t): \begin{matrix} I \rightarrow JI \\ t \rightarrow n \end{matrix}$  que retorna el municipio ( $n \in JI$ ) en el que está localizado un terreno  $t \in I$
- $costo(t, n): \begin{matrix} I \times J \rightarrow \mathbb{R} \\ t \times n \rightarrow c \end{matrix}$  que retorna el costo ( $c \in \mathbb{R}$ ) de conectar una planta solar implantada en el terreno  $t \in I$  al municipio (consumidor)  $n \in J$
- $impactoAmbiental(t, n): \begin{matrix} I \times J \rightarrow \mathbb{R} \\ t \times n \rightarrow ia \end{matrix}$  que retorna el impacto ambiental ( $ia \in \mathbb{R}$ ) de conectar una planta solar implantada en el terreno  $t \in I$  al municipio (consumidor)  $n \in J$
- $distancia(t, n): \begin{matrix} I \times J \rightarrow \mathbb{R} \\ t \times n \rightarrow d \end{matrix}$  que retorna la distancia ( $d \in \mathbb{R}$ ) en kilómetros entre una planta solar implantada en el terreno  $t_i \in I$  y el municipio  $n_j \in J$

- $terrenosCercanos(n, dist): \begin{matrix} J \times \mathbb{R} \rightarrow I \\ n \times dist \rightarrow I_{dist}^n \end{matrix}$  que retorna el conjunto  $(I_{dist}^n \in I)$  de terrenos disponibles para la construcción de plantas que están a máximo la distancia  $dist (dist \in \mathbb{R})$  del municipio consumidor  $n \in J$
- $conexion(t, n): \begin{matrix} I \times J \rightarrow \mathbb{B} \\ t \times n \rightarrow con \end{matrix}$  que retorna la variable booleana ( $con \in \mathbb{B} = \{1, 0\}$ ) que determina si la planta solar implantada en el terreno  $t \in I$  está conectada ( $con = 1$ ) o no ( $con = 0$ ) al municipio (consumidor)  $n \in J$
- $demanda(n): \begin{matrix} J \rightarrow \mathbb{R} \\ n \rightarrow danual \end{matrix}$  que retorna la demanda en energía [KhW] anual ( $danual \in \mathbb{R}$ ) del municipio  $n \in J$
- $capacidad(t): \begin{matrix} I \rightarrow \mathbb{R} \\ t \rightarrow ganual \end{matrix}$  que retorna la capacidad de generación anual [KhW] ( $ganual \in \mathbb{R}$ ) de una planta localizada en el terreno  $t \in I$
- $plantasAlimentando(n): \begin{matrix} J \rightarrow I \\ n \rightarrow I_n \end{matrix}$  que retorna el conjunto  $(I_n \subset I)$  de plantas que alimenta el municipio  $n \in J$ .  $\forall t \in I_n \rightarrow connexion(t, n) = 1$
- $municipiosAlimentados(t): \begin{matrix} I \rightarrow J \\ t \rightarrow J_t \end{matrix}$  que retorna el conjunto  $(J_t \subset J)$  de municipios consumidores alimentados por la planta instalada en el terreno  $t \in I$ .  $\forall n \in J_t \rightarrow connexion(t, n) = true$

**6.2.3.2 Restricciones** Se trata de determinar el conjunto de terrenos  $T \subset I$  para la construcción de plantas solares que respectan las siguientes restricciones:

(R1.)  $\forall n \in J \exists I_n = plantasAlimentando(n), I_n \subset T \rightarrow Card(I_n) = 1$ , cada municipio consumidor es alimentado por una y únicamente una planta

(R2.)  $\forall n \in J, I_n = plantasAlimentando(n), I_n \subset T \rightarrow demanda(n) \leq \sum_{t \in I_n} capacidad(t)$ . El total de la suma de las capacidades de todas las plantas que alimentan el municipio consumidor  $n$  es suficiente para responder a la demanda de  $n$

(R3.)  $\forall t \in T, J_t = municipiosAlimentados(t) \rightarrow Card(J_T) \geq 1, capacidad(t) \geq \sum_{n \in J_t} demanda(n)$ . La capacidad de generación del terreno  $t$  es suficiente para responder a la suma de la demanda de todos los municipios consumidores conectados a dicha planta. Al menos un municipio consumidor está conectado a cada una de las plantas construidas. Esta restricción no genera excesos de capacidad puesto que la restricción R1 asegura que un municipio consumidor no puede ser alimentado por varias plantas a la vez.

(R4.)  $\sum_{t \in T} capacidad(t) \geq \sum_{n \in J} demanda(n)$ . La capacidad total (suma de las capacidades de todas las plantas instaladas) es suficiente para responder a la demanda total (suma de la demanda de los municipios consumidores).

(R5.)  $\forall n \in J, I_n = plantasAlimentando(n), I_n \subset T \rightarrow \forall t \in I_n distancia(t, n) \leq D_{max} = 65$ . La distancia entre cada uno de los municipios consumidores y el terreno de implantación de cada una de las plantas que lo alimentan debe ser inferior o igual a 65 Km ( $D_{max}$ )

(R6.)  $Bucaramanga \in J, I_{Bucaramanga} = plantasAlimentando(Bucaramanga), I_n \subset T \rightarrow I_{Bucaramanga} \subset \{t_3, t_4, t_{13}\}$ . El municipio consumidor de Bucaramanga solo puede ser alimentado por una de las plantas en el conjunto  $\{t_3, t_4, t_{13}\}$

La restricción R4 no es necesaria puesto que es una consecuencia de la restricción R3. R3 es más precisa/fuerte que R4. Por otro lado, si la restricción R3 se cumple, y dado que un municipio no puede ser alimentado que por una sola planta (R1), la restricción R2 también se cumple. Lo anterior indica que solo son necesarias las restricciones R1, R3, R5 y R6.

Y que responden a los siguientes objetivos:

$$(Ob1.) \operatorname{argmin}_{T \subset I} \sum_{t \in T} (\sum_{n \in J} (\operatorname{costo}(t, n) \times \operatorname{conexion}(t, n))).$$

$$(Ob2.) \operatorname{argmin}_{T \subset I} \sum_{t \in T} (\sum_{n \in J} (\operatorname{impactoAmbiental}(t, n) \times \operatorname{conexion}(t, n))).$$

El conjunto de terrenos  $T \subset I$  escogidos para la construcción debe permitir de minimizar los costos e impactos ambientales implicados por la construcción de la totalidad de las plantas localizadas en cada uno de los terrenos  $t \in T$ .

**6.2.3.3 Variables de decisión:** Dado que según la restricción R1, cada municipio consumidor debe estar conectado a una única planta, el problema se resume a encontrar cada una de las plantas que pueden conectarse a cada municipio y que permiten respetar todas las restricciones y alcanzar los objetivos.

Sean los conjuntos:

- $X = \{ x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_{15} \}$  el conjunto de variables de decisión, donde  $x_j \in X$  es el terreno en el que será localizada la planta que alimentará el municipio consumidor  $n_j$

- $I_{D_{max}}^{n_j} = \text{terrenosCercanos}(n_j, D_{max}) \subset T$  el conjunto de terrenos que están a una distancia inferior o igual a  $D_{max} = 65Km$  del municipio consumidor  $n_j \subset J$

Aplicando las restricciones R1 y R5 se puede decir:

Según la restricción R1:  $I_n = \text{plantasAlimentando}(n_j) = \{x_j\}, n_j \in J$

Según la restricción R5:  $x_j \in I_{D_{max}}^{n_j}$

Si se considera únicamente la restricción R1, cada municipio puede ser alimentado por una de las plantas localizadas en uno de los 15 terrenos disponibles (definidos en el conjunto I). Eso quiere decir que el espacio de búsqueda para cada variable  $x_j$  es igual al conjunto I y su tamaño es  $Card(I)$ . Puesto que una planta puede alimentar a varios municipios el espacio de búsqueda (EB) total está definido por la combinación de todos los espacios de exploración de cada una de las variables, es decir:

$$EB = \prod_{j=1}^{Card(X)} I$$

y su tamaño está dado por la expresión  $Card(EB) = \prod_{j=1}^{Card(X)} Card(I) = Card(I)^{Card(X)} = 22^{15}$

Si se integra la restricción R5, el espacio de búsqueda para la variable de decisión  $x_j$  es el conjunto  $I_{D_{max}}^{n_j}$  que le corresponde. El espacio total de búsqueda en estas condiciones esta definido por el conjunto:

$$EB_{R5} = \prod_{j=1}^{Card(X)} I_{D_{max}}^{n_j}$$

Se puede verificar fácilmente que  $Card(I_{D_{max}}^{n_j}) \leq Card(I)$ , puesto que solo algunas de los terrenos disponibles están a una distancia inferior o igual a  $D_{max}$  de un municipio en particular. Puesto que el tamaño del espacio de búsqueda  $EB_{R5}$  esta dado por la expresión : Se puede entonces concluir que el tamaño del espacio de búsqueda ( $EB_{R5}$ ):

$$Card(EB_{R5}) = \prod_{j=1}^{Card(X)} Card(I_{D_{max}}^{n_j}) \leq Card(I)^{Card(X)}$$

$$Card(EB_{R5}) \leq Card(EB)$$

En conclusión, aplicando las restricciones R1 y R5 antes de efectuar el proceso de optimización, nos permite reducir el espacio de búsqueda y aumentar las posibilidades de encontrar una mejor solución.

Dados los datos de entrada, el espacio de búsqueda  $EB_{R5}$  para cada una de las variables  $x_j$  es:

Tabla 8.

Espacio de búsqueda para cada uno de los municipios cuando se aplican las restricciones R1 y R5. Los índices numéricos de las variables  $x$  han sido reemplazados por el nombre del municipio representado

---

$x_{Bucaramanga} \in \{ t_3, t_4, t_{13} \}$
$x_{California} \in \{ t_2, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{16}, t_{17}, t_{20}, t_{22} \}$
$x_{Charta} \in \{ t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{16}, t_{17}, t_{18}, t_{19}, t_{20}, t_{21}, t_{22} \}$
$x_{ElPlayon} \in \{ t_1, t_2, t_3, t_4, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{16}, t_{17} \}$
$x_{Floridablanca}$
$\in \{ t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}, t_{15}, t_{16}, t_{17}, t_{18}, t_{19}, t_{20}, t_{21}, t_{22} \}$
$x_{Giron} \in \{ t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{16}, t_{17}, t_{18}, t_{19}, t_{20}, t_{21}, t_{22} \}$
$x_{Lebrija} \in \{ t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{16}, t_{17}, t_{18}, t_{19}, t_{20}, t_{21}, t_{22} \}$
$x_{LosSantos} \in \{ t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}, t_{15}, t_{16}, t_{17}, t_{21} \}$
$x_{Matanza} \in \{ t_1, t_2, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{16}, t_{17}, t_{18}, t_{19}, t_{20}, t_{21}, t_{22} \}$
$x_{Piedecuesta} \in \{ t_1, t_2, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}, t_{15}, t_{16}, t_{17}, t_{18}, t_{19}, t_{20}, t_{21}, t_{22} \}$
$x_{Rionegro} \in \{ t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{16}, t_{17}, t_{18}, t_{19}, t_{20}, t_{21}, t_{22} \}$
$x_{SantaBarbara} \in \{ t_9, t_{10}, t_{11}, t_{16}, t_{17}, t_{21} \}$
$x_{Surata} \in \{ t_1, t_2, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{16}, t_{17}, t_{20}, t_{21}, t_{22} \}$
$x_{Tona} \in \{ t_1, t_2, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{16}, t_{17}, t_{18}, t_{19}, t_{20}, t_{21} \}$
$x_{Vetas} \in \{ t_8, t_{16}, t_{17}, t_{20}, t_{22} \}$

---

Como se constata en la tabla precedente, solamente el municipio de Floridablanca puede ser alimentado por cualquiera de las 22 plantas solares. Para el espacio de búsqueda de la variable correspondiente al municipio de *Bucaramanga* se aplicó igualmente la restricción R6.

Este resultado confirma la afirmación en la que el espacio de búsqueda  $EB_{R5}$  es más pequeño que el espacio de búsqueda  $EB$ .

**6.2.3.5 Algoritmo de optimización** Los algoritmos genéticos que hacen parte de la familia de algoritmos meta-heurísticos de optimización son algoritmos generales que se aplican a toda forma de restricción (lineal o no), de objetivo (lineal o no) y de espacio de búsqueda (continuo o no).

*Principio general:* Este tipo de algoritmo se basa sobre la evolución continua de un conjunto de soluciones (población) durante un cierto número de iteraciones (generaciones). Cada solución en la población es llamada *individuo* y es en general un vector numérico que representa los valores de cada una de las variables de decisión. A cada individuo se afecta un score gracias a una función de evaluación que mide la calidad de la solución en cuanto a los objetivos definidos en el problema de optimización.

A cada generación se reactualiza la población en función del score de cada individuo en la población y de un cierto número de ‘operadores genéticos’ que permiten de construir una nueva población a partir de recombinaciones estocásticas de los individuos en la población actual.

Este tipo de algoritmo (como toda meta-heurística) tienen el defecto de no poderse garantizar el encontrar óptimos globales. La única garantía es que la convergencia hacia los óptimos globales se alcanza a un número muy grande de iteraciones (en general se garantiza únicamente la convergencia al infinito), pero en ciertos casos, la población puede quedar bloqueada en una zona del espacio de búsqueda lo que la conduce a producir óptimos locales (soluciones buenas pero que no son las mejores posibles).

Para la solución del problema de localización de plantas se escogió el algoritmo de optimización NSGA-II que pertenece a la familia de algoritmos genéticos multi-objetivos. El objetivo de este algoritmo multi-objetivo es de encontrar la población que es Pareto optima, es decir la población que representa la frontera de Pareto.

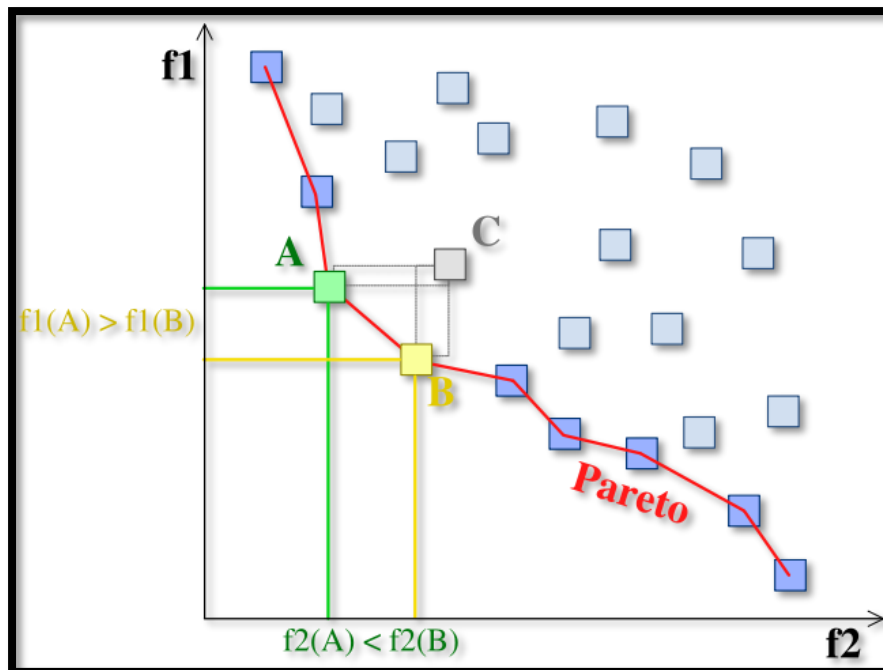


Figura 16. Frontera de Pareto. Adaptado de: [www.wikiwand.com](http://www.wikiwand.com)

Los cuadros de la figura representan las posibles soluciones que se tienen para las funciones objetivos definidas como  $f1$  y  $f2$ , donde se observa que los valores menores son los preferidos. La solución C como se muestra en la figura no está dentro de la frontera de Pareto puesto que es Dominado por A y B, soluciones que a su vez no se encuentran dominadas por ninguna otra y por lo tanto pertenecen a la frontera.

Una solución es Pareto optima es pareto-óptima cuando no existe otra solución tal que mejore en un objetivo sin empeorar al menos uno de los otros. Es el caso de las soluciones A y B, a mejora

el objetivo  $f_2$  ( $f_2(A) < f_2(B)$ ) pero empeora el objetivo  $f_1$  ( $f_1(A) > f_1(B)$ ) e inversamente B mejora el objetivo  $f_1$  pero empeora el objetivo  $f_2$ .

Se ha utilizado la implementación Matlab de este algoritmo disponible en la zona “File Exchange” del sitio web de Mathworks, con el archivo específico llamado “NSGA - II: A multi-objective optimization algorithm” (Seshadri, 2009). Esta implementación fue puesta a disposición según (Kalyanmoy, Amrit, Sameer, & Meyarivan, 2002) donde se expone el algoritmo NSGA-II

En esta implementación de NSGA-II cada solución está asociada a un vector de scores  $f$  de tamaño  $M$  ( $M$  es igual al número de objetivos definidos en el problema) y a dos scores adicionales:

- Rango (Rank) de la solución: Su posición con respecto al frente dominante actual. 1 significa que está en el frente dominante, 2 que está en el segundo frente, etc. El mejor valor de rango es 1.
- Medida de diversidad (Crowding distance): Es una medida utilizada para evaluar la diversidad de la población entre más grande es el promedio de la población con respecto a dicha medida, mayor es la diversidad de la población y más posibilidades de encontrar una población pareto-optimal son grandes.

El objetivo del algoritmo es de encontrar las soluciones con Rango = 1 que tienen una diversidad importante y que minimizan cada uno de los objetivos  $f(m), m \in \{1, \dots, M\}$

Para resolver un problema de optimización utilizando el algoritmo NSGA-II, es necesario realizar las siguientes acciones:

1. Escoger las variables de decisión y definir sus espacios de búsqueda

2. Implementar una función objetivo que permita de evaluar una solución (instancia de las variables de optimización) con respecto al alcance de los objetivos.
3. Parametrizar el algoritmo genético (tamaño de la población, numero de generaciones, etc..)

A continuación, se presenta una descripción de cada una de esas etapas con respecto al problema de implementación que referente al tema tratado en este documento:

### 6.3 Implementación de las variables de decisión en el algoritmo NSGA-II

Las variables de decisión que se implementarán y sus espacios de exploración fueron definidas en la sección 6.2.3.3. Se trata aquí de adaptar los espacios de exploración de dichas variables al formalismo utilizado en el algoritmo NSGA-II.

En efecto, en dicho algoritmo las variables de decisión son variables continuas cuyo espacio de exploración está definido por los valores mínimo y máximo que cada variable puede tomar. Las variables de decisión tal que han sido definidas en la sección 0 son variables discretas (el valor de la variable de decisión es  $x_j \in X$  es el terreno en el que será localizada la planta que alimentará el municipio consumidor  $n_j$ ) y por lo tanto sus espacios de exploración son igualmente discretos y están definidos por cada uno de los conjuntos  $I_{D_{max}}^{n_1}, I_{D_{max}}^{n_2}, \dots, I_{D_{max}}^j, \dots, I_{D_{max}}^{n_{15}}$ .

Es necesario entonces definir dos funciones de transformación, la primera que permita pasar de cada uno de los espacios discretos  $I_{D_{max}}^{n_j}$  a espacios continuos (interpretables por el algoritmo NSGA-II) y la segunda que permita pasar de los valores (para cada variable de decisión) escogidos

por el algoritmo en los espacios continuos a sus correspondientes valores en los espacios discretos iniciales.

Para tal efecto, se basó en la utilización de la función *round*<sup>9</sup> de Matlab. Esta función permite transformar un número real en el número entero más cercano, cuando se llama con un único parámetro (el número real a transformar). Para los reales positivos *round* funciona de la siguiente manera:

$$\forall r \in \mathbb{R}, \text{round}(r) = I, I \in \mathbb{N}, r \in [I - 0.5, I + 0.5)$$

Así por ejemplo  $\text{round}(1.5) = 2$ , mientras que  $\text{round}(1.49999) = 1$

Por otro lado en Matlab el primer índice de un arreglo numérico<sup>10</sup> es 1. Así, se puede asociar a cualquier arreglo numérico  $A$  de tamaño  $L$  un conjunto de índices  $\text{Indices}(A) = \{1, 2, \dots, L\}$ , donde dado  $i \in \text{Indices}(A)$ , entonces  $A(i)$  retorna el valor numérico en la posición  $i$  del arreglo  $A$ .  $L$  puede ser calculado utilizando la función Matlab *length*<sup>11</sup>:  $\text{length}(A) = L$

Teniendo en cuenta esas propiedades y funciones de Matlab, se transformaron las variables de optimización en índices representados de manera continua.

---

<sup>9</sup> <https://fr.mathworks.com/help/matlab/ref/round.html> . Sitio web visitado en enero 2018

<sup>10</sup> En Matlab un arreglo numérico es una matriz de dimensión  $1 \times L$  (renglón) o  $L \times 1$  (columna). Consideramos aquí únicamente arreglos de dimensión  $L \times 1$

<sup>11</sup> <https://fr.mathworks.com/help/matlab/ref/length.html> . Sitio web visitado en enero 2018

Así para la variable de decisión original  $x_j$  que puede tomar uno de los valores en el conjunto

$I_{D_{max}}^{n_1}$ , se definieron las siguientes transformaciones:

Dado el valor  $v_i \in I_{D_{max}}^n$  el  $i$ ésimo valor que puede tomar la variable de decisión  $x_j$  en el conjunto  $I_{D_{max}}^{n_1}$ , donde  $i \in Indices(I_{D_{max}}^n)$ , se definen las transformaciones como:

- $indexAReal(i): \mathbb{Z}^+ \rightarrow \mathbb{R}^2$   $_{i \rightarrow [rmin_i, rmax_i]}$  que retorna el intervalo de variación aceptable por la función round para el valor entero  $i \in Indices(I_{D_{max}}^n)$ , con  $rmin_i = i - 0.5, rmax_i = i + 0.49$
- $espacioExploracionReal(Indices(I_{D_{max}}^n)) : \mathbb{Z}^{+L} \rightarrow \mathbb{R}^2$   $_{Indices(I_{D_{max}}^n) \rightarrow [rmin_1, rmax_L]}$  que retorna el intervalo de variación que cubre el equivalente real de los valores en el conjunto  $Indices(I_{D_{max}}^n)$   $rmin_i = 0.5, rmax_L = L + 0.49, L = length(Indices(I_{D_{max}}^n))$
- $realAIndex(r): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{Z}^+$   $_{r \rightarrow i}$  que retorna el valor entero  $i$  calculado por la función round de Matlab:  $i = round(r)$

De esta manera se puede definir la variable de decisión transformada  $\bar{\bar{X}}_j$  cuyo espacio de exploración esta definido por el intervalo  $[rmin_1, rmax_L] = espacioExploracionReal(Indices(I_{D_{max}}^n))$ . Esta variable es utilizable por el algoritmo NSGA-

Para pasar de la variable  $\overline{\overline{X}}_j$  transformada a la variable original utilizamos:

- $realATerreno(r): \mathbb{R} \xrightarrow[r \rightarrow t]{I_{D_{max}}^{n_j}} t = I_{D_{max}}^{n_j}(realAIndex(r))$

Para clarificar estas transformaciones, se toma el ejemplo del municipio de Bucaramanga. Según la restricción R6, los posibles terrenos para instalar una planta que alimente al municipio de Bucaramanga son :  $\{t_3, t_4, t_{13}\}$ . Cada uno de esos terrenos cumple con la restricción de distancia R5 (distancia entre el terreno y el municipio consumidor inferior o igual a 65 Km ( $D_{max}$ )). Entonces es posible decir que  $I_{D_{max}}^{Bucaramanga} = \{t_3, t_4, t_{13}\}$ . La variable de decision  $x_{Bucaramanga}$  puede tomar cualquiera de los valores en el conjunto  $I_{D_{max}}^{Bucaramanga}$ , y puede entonces ser transformada en la variable continua :

$$\overline{\overline{x}}_{Bucaramanga} \in [rmin_1, rmax_L], \text{ con } rmin_1 = 1 - 0.5 = 0.5, rmax_L = L + 0.4999 = 3 + 0.4999, \text{ donde } L \text{ es el numero de elementos en el conjunto } I_{D_{max}}^{Bucaramanga}$$

Entonces:

$$\overline{\overline{x}}_{Bucaramanga} \in [0.5, 3.4999]$$

Así el algoritmo NSGA-II generara valores entre 0.5 y3.4999 para la variable  $\overline{\overline{x}}_{Bucaramanga}$ .

Cada valor generado por el algoritmo, para poder ser interpretado y poder calcular la función objetivo (ver siguiente sección) deberá ser transformado en su equivalente en valor de variable de decisión original  $x_{Bucaramanga}$  utilizando la función  $realATerreno(r)$ .

Así si el algoritmo genera  $\overline{\overline{x_{Bucaramanga}}} = 2.28$  su equivalente en variable de decisión es :

$$x_{Bucaramanga} = realATerreno(2.28) = I_{D_{max}}^{Bucaramanga}(realAIndex(2.28))$$

$$x_{Bucaramanga} = I_{D_{max}}^{Bucaramanga}(round(2.28)) = I_{D_{max}}^{Bucaramanga}(2)$$

$$x_{Bucaramanga} = t_4$$

El valor  $\overline{\overline{x_{Bucaramanga}}} = 2.28$  representa el segundo elemento en el conjunto  $I_{D_{max}}^{Bucaramanga}$  es decir, el terreno  $t_4$

#### 6.4 Implementación de la función objetivo en el algoritmo NSGA-II

NSGA-II es un algoritmo de optimización multi-objetivo, en la implementación Matlab que se ha utilizado de ese algoritmo para poder considerar los diferentes objetivos en la optimización, se debe modificar la función: `function f = evaluate_objective(x, M, V)`.

Como se puede ver en el encabezado de la función, esta recibe 3 parámetros:

- $x$  es el vector de valores de cada una de las variables de decisión. En nuestro caso cada variable de decisión corresponde al índice de uno de los terrenos disponibles.
- $M$  es el número de objetivos. En nuestro caso  $M = 2$  (objetivos OB1 y OB2)

- $V$  es el número de variables de decisión. En nuestro caso  $V = 15$  (una variable de decisión por municipio)

La función retorna el arreglo  $f$  que contiene el score de la solución representada por el vector  $x$  con respecto a cada uno de los objetivos. El arreglo  $f$  contiene  $M$  valores de score, uno por objetivo. La implementación por defecto del algoritmo NSGA-II tiene por meta, minimizar cada uno de dichos scores, esto quiere decir que entre más cercano el score  $f(m)$  está de 0 (cero) mejor es la solución  $x$  con respecto al objetivo  $m$ .

Para el problema de localización de plantas de energía fotovoltaica que se maneja, los objetivos son minimizar los costos (OB1) y el impacto ambiental (OB2) de construir las plantas solares necesarias para responder a la demanda de cada uno de los municipios clientes. Así se decidió calcular el score de cada uno de los objetivos para una solución dada como la suma de los costos (OB1) y como la suma de los impactos (OB2) de cada una de las plantas representadas en la solución. El valor de los scores para cada uno de los objetivos varía entre un valor mínimo (desconocido) y un valor máximo (desconocido)

$$\text{Min}_{f(m)} \leq f(m) \leq \text{Max}_{f(m)}, m \in \{1, \dots, M\}$$

Se espera entonces encontrar las soluciones que minimicen de manera equilibrada los scores de cada uno de los objetivos, es decir las soluciones para las cuales  $f(m)$  este lo más cercano posible a  $\text{Min}_{f(m)}$  para cada uno de los  $M$  objetivos.

A pesar que  $Max_{f(m)}$  sea desconocido, en el caso presentado se le pueden definir límites superiores, que es igual a la suma de todos los valores en la matriz de costos para el caso del objetivo OB1 y a la suma de todos los valores de la matriz de impacto ambiental para el caso del objetivo OB2. Lo cual se puede escribir de la manera siguiente:

$$Max_{f(1)} \leq Peor_{f(1)} = \sum_{t \in I} \sum_{n \in J} costo(t, n)$$

$$Max_{f(2)} \leq Peor_{f(2)} = \sum_{t \in I} \sum_{n \in J} impactoAmbiental(t, n)$$

Se define así el límite superior de cada uno de los scores como el valor  $Peor_{f(m)}$

Para tener en cuenta las restricciones y las relaciones que se definieron en el cálculo de los scores de los dos objetivos de nuestro problema, en la implementación de la función `evaluate_objective` debemos realizar las siguientes acciones:

1. *Transformar x en índices de terreno:* Como se presenta en la sección precedente, las variables de decisión (vector  $x$ ) son variables continuas, antes de poder evaluar los objetivos, la primera acción es transformar dichas variables continuas en índices de plantas utilizando la función  $realATerreno(r)$  (ver sección precedente). Aplicando dicha función a cada uno de los elementos del vector  $x$ , es transformado en una representación de la solución en forma de índices de terreno  $T$ :

$$x \xrightarrow{realTerreno(r), \forall r \in x} T$$

2. *Verificar las restricciones:* Una vez que se transforman los valores de las variables de decisión en índices de terrenos, debemos verificar que las restricciones son respetadas por la solución evaluada. En la sección 2 se identificaron 6 restricciones, de las cuales son solamente necesarias las restricciones R1, R3, R5 y R6 (las restricciones R2 y R4 están implícitas en la definición de las otras restricciones). En la sección 0 se utilizaron las restricciones R1, R5 y R6 para definir el espacio de búsqueda de las variables de decisión, no es necesario entonces verificar ninguna de esas 3 restricciones puesto que están impuestas en la definición del espacio de búsqueda. Por lo tanto, queda únicamente una restricción por verificar, es la restricción R2 que obliga a que la capacidad de la planta instalada en el terreno  $t \in T$ , debe ser superior o igual a la suma de las demandas de cada uno de los municipios conectados a dicha planta. Si la restricción no es respetada, la solución definida por el vector  $x$  no es aplicable y debe ser por lo tanto considerada como una solución pésima, es decir se le debe afectar valores de score más altos posibles,  $Peor_{f(1)}$  y  $Peor_{f(2)}$  para los objetivos OB1 y OB2 respectivamente.

3. *Calcular el score de la solución:* Se trata simplemente en esta etapa de calcular los valores de los scores para cada uno de los objetivos definidos:

$$f(1) = \sum_{i=1}^{V=15} \text{costo}(T(i), J(i))$$

$$f(2) = \sum_{i=1}^{V=15} \text{impactoAmbiental}(T(i), J(i))$$

### 6.5 Parámetros de algoritmo NSGA-II

La implementación del algoritmo NSGA-II que se ha utilizado en el presente proyecto necesita la definición de los siguientes parámetros:

- *pop* : Tamaño de la población
- *gen* : Numero de generaciones
- *pc* : probabilidad de crossover o cruzamiento, por defecto  $pc = 0.9$
- *pm* : probabilidad de mutación, por defecto  $pm = 1 - pc = 0.1$ .
- *mu*: parámetro de la densidad de probabilidad asociada al crossover. Por defecto  $mu = 20$ .
- *mum*: parámetro de la densidad de probabilidad asociada a la mutación. Por defecto  $mum = 20$ .

En los experimentos se han fijado *mu* y *mum* a sus valores por defecto y se ha hecho variación de los valores de *pop*, *gen*, *pc* y *pm* para evaluar su efecto en la calidad de las soluciones.

## 7. Experimentos y resultados

Al realizar la programación del modelo multiobjetivo y haciendo pruebas de ajustes de parámetros del algoritmo NSGA-II en búsqueda de las soluciones más óptimas obtenidas por medio del frente de Pareto, se obtuvieron

### 7.1 Análisis del efecto del tamaño de la población y del número de generaciones

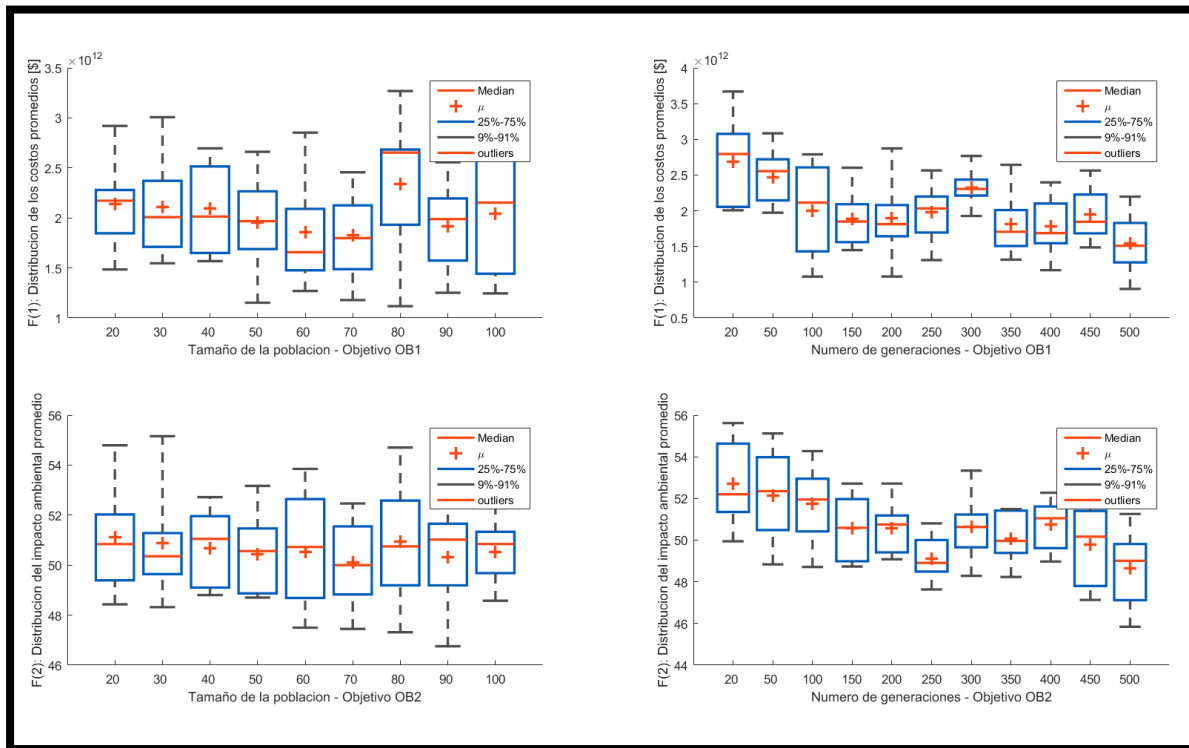
En una primera serie de experimentos se fijaron los valores de *mu*, *mum*, *pc* y *pm* a sus valores por defecto y se variaron únicamente los valores de los parámetros *pop* y *gen*. Para poder comparar

fácilmente los resultados de los diferentes experimentos se definieron dos scores globales de la población final de cada uno de los experimentos como sigue:

$$F(1) = \frac{\sum_{p=1}^{pop} f_p(1)}{pop}$$

$$F(2) = \frac{\sum_{p=1}^{pop} f_p(2)}{pop}$$

Donde  $f_p(1)$  y  $f_p(2)$  son respectivamente los valores de score para el objetivo OB1 y para el objetivo OB2 del individuo  $p$  de la población.  $F(1)$  y  $F(2)$  representan entonces los valores de score promedios de la población.



*Figura 17.* Eficiencia del algoritmo con respecto a los scores promedio F(1) y F(2) para diferentes valores de número de generaciones (gen) y de tamaños de la población (pob).

Adaptado de Matlab

En la figura anterior, son presentados los resultados de diferentes experimentos en los que se realizó una variación del tamaño de la población entre 20 y 100 individuos y para cada tamaño de población el número de generaciones entre 20 y 500. En total fueron desarrollados 9x11 experimentos. En la figura se observa que en cuanto al tamaño de la población se obtienen los mejores resultados para poblaciones de entre 60 y 70 individuos y con respecto al número de generaciones, se observa que hay un mínimo local que se alcanza en los alrededores de 250 y un mínimo global con 500 generaciones.

Se puede entonces decir que una población de tamaño  $pob = 70$  con  $gen = 500$  generaciones producen los mejores resultados.

## **7.2 Análisis del efecto de las probabilidades de mutación (pm) y de crossover (pc)**

Finalmente se estudió igualmente el efecto de variar las probabilidades de crossover (pc) y mutación (pm). En los próximos experimentos, fijando  $pob = 70$  y  $gen = 500$  y haciendo variar las probabilidades pc y pm.

En la implementación utilizada del algoritmo NSGA-II, existe la restricción  $pc + pm = 1.0$ , entonces es suficiente con controlar la variación de una de las probabilidades para hacer variar la otra.

Para obtener una distribución de los resultados, se desarrollaron 10 experimentos para cada uno de los pares de valores de (pc, pm) e hicimos variar pc entre 0.1 y 0.9 (respectivamente pm entre 0.9 y 0.1)

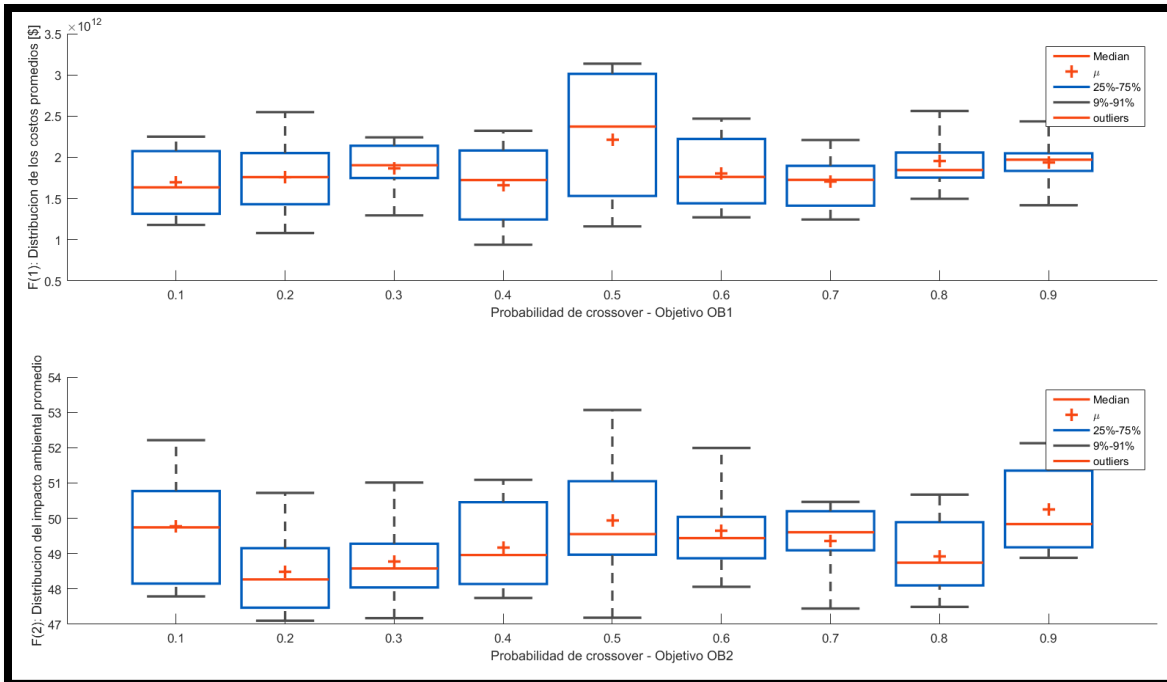


Figura 18. Eficiencia del algoritmo con respecto a los scores promedio F(1) y F(2) para diferentes valores de probabilidades de crossover ( $p_c$ ) y de mutación ( $p_m$ ), con la restricción  $p_c + p_m = 1$ . Adaptado de Matlab

Los resultados de estos experimentos son presentados en la figura precedente. Se observa que con respecto al objetivo OB1 se obtienen para valores de probabilidad de crossover  $p_c = 0.7$  ( $p_m = 0.3$ ), mientras que con respecto al objetivo OB2 los mejores resultados se obtienen para valores de probabilidad de crossover  $p_c = 0.2$  ( $p_m = 0.8$ ). Los valores optimos de las probabilidades son muy diferentes según se tenga en cuenta el uno o el otro de los objetivos. Al mismo tiempo se observa que para el objetivo OB2, los segundos mejores resultados se obtienen para probabilidades de crossover  $p_c = 0.8$  ( $p_m = 0.2$ ). Estos valores son mas cercanos a los valores optimos con respecto al objetivo OB1.

En consecuencia, decidimos escoger como probabilidades optimas **pc = 0.75 (pm = 0.25)**, es decir los valores promedios entre los mejores resultados para el objetivo OB1 y los segundos mejores para el objetivo OB2.

**7.3 Análisis del tiempo de ejecución del algoritmo**

Los distintos experimentos presentados en las secciones anteriores fueron realizados en un computador con un procesador Intel Core i7 @2.6GHz 2.8GHz con 16 Go de memoria RAM. En la siguiente figura son presentados los valores de tiempo de ejecución con respecto al tamaño de la población y del número de generaciones estudiadas.

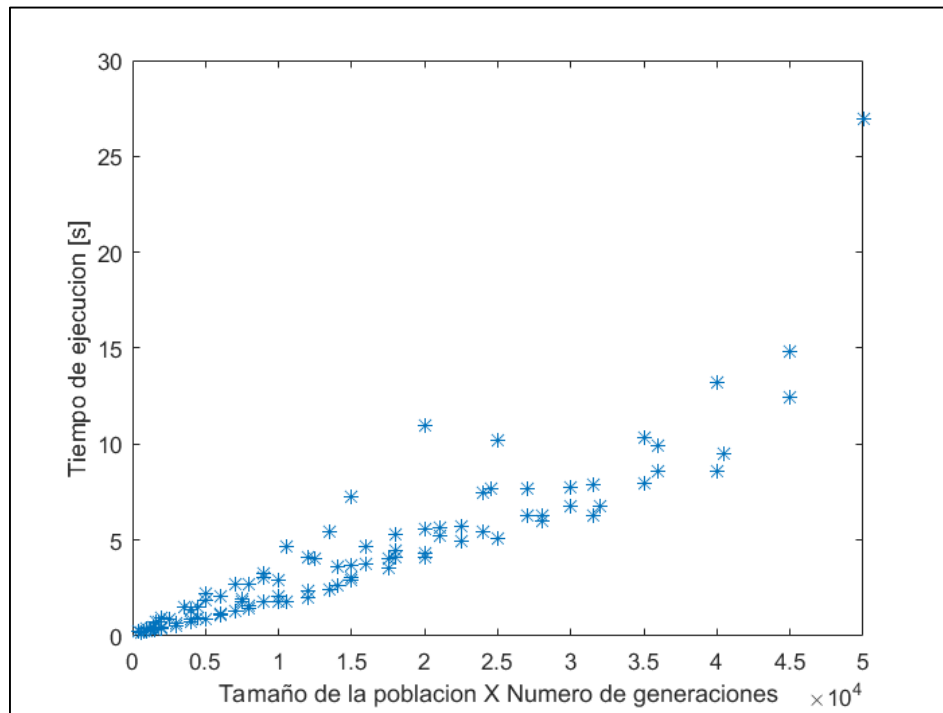


Figura 19. Tiempo de ejecución del algoritmo NSGA-II. Adaptado de Matlab

En la figura precedente, se presenta el tiempo de ejecución necesario para tratar el número total de individuos (pop X gen) de un experimento. Se observa una tendencia lineal del tiempo de ejecución a medida que aumenta el número de individuos a tratar. Los tiempos de ejecución son relativamente bajos, lo cual permitió efectuar un número importante de experimentos.

### 7.4 Experimento final y solución del problema de optimización

Los experimentos realizados en las secciones precedentes nos han permitido definir los mejores parámetros del algoritmo NSGA-II para resolver el problema de optimización planteado en la sección 2. Dichos parámetros son:

- Tamaño de la población  $pob = 70$
- Numero de generaciones  $gen = 500$
- Probabilidad de crossover  $pc = 0.75$
- Probabilidad de mutación  $pm = 1 - pc = 0.25$

Con ese conjunto de parámetros se realizaron 100 experimentos diferentes con el fin de seleccionar los mejores resultados y disminuir los efectos de la selección aleatoria propia al algoritmo genético. Los resultados de los mejores frentes de exploración (población final) se presentan en la figura siguiente:

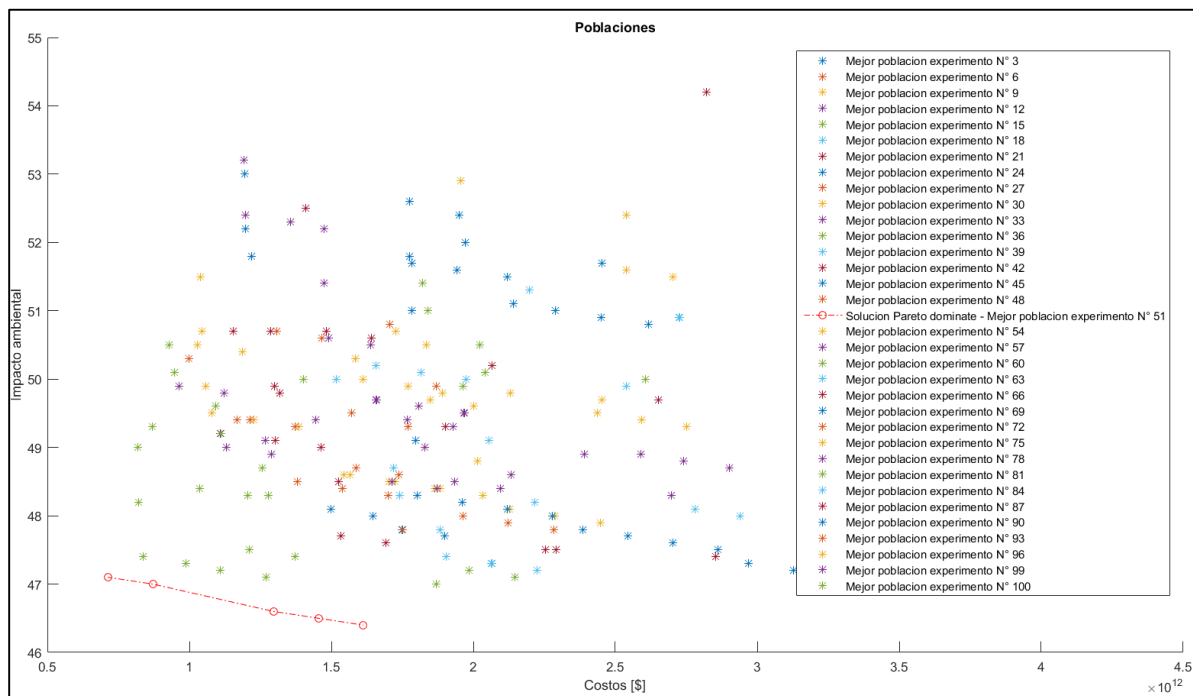


Figura 20. Resultados de los diferentes experimentos. El experimento N° 51 (en línea discontinua) contiene el frente Pareto dominante (la mejor solución encontrada) Adaptado de Matlab

En la figura se presentan las soluciones encontradas en los diferentes experimentos. Se observa que el experimento N° 51 (en línea discontinua) produce la solución que domina todas las otras. Esta solución es la que se seleccionó como resultado de la exploración y es presentada a continuación.

Como se puede observar en la figura, únicamente cinco (y no 70 que corresponde al tamaño de la población) individuos aparecen en el frente dominante. Esto se debe a que muchos de los individuos que componen la última población se repite. Así existen en realidad solamente 5 individuos distintos, que se presentan en la siguiente tabla:

California	Charta	El_Playon	Floridablanca Giron	Lebrija	Los_Santos	Matanza	Piedecuesta	Rionegro	Santa_Barbar Surata	Tona	Vetas	Costs [\$]	Impacto Amb.		
t_2	t_5	t_3	t_3	t_9	t_3	t_14	t_21	t_5	t_11	t_11	t_20	t_11	t_8	1,3E+12	46,6
t_2	t_5	t_3	t_3	t_9	t_3	t_14	t_22	t_5	t_11	t_11	t_20	t_11	t_8	7,1E+11	47,1
t_2	t_5	t_4	t_3	t_9	t_3	t_14	t_21	t_5	t_11	t_11	t_20	t_11	t_8	1,5E+12	46,5
t_2	t_5	t_4	t_3	t_9	t_3	t_14	t_22	t_5	t_11	t_11	t_20	t_11	t_8	8,7E+11	47
t_2	t_5	t_4	t_3	t_9	t_4	t_14	t_21	t_5	t_11	t_11	t_20	t_11	t_8	1,6E+12	46,4

Figura 21. Población del experimento N° 51 que define el frente Pareto dominante (la mejor solución encontrada)

Lo que quiere decir que una posible solución es utilizar:

- el generador 3 para alimentar El playón, Florida y Lebrija,
- el 2 para California
- el 5 para Charta y Piedecuesta
- el 9 para Girón
- el 14 para Los Santos
- el 21 para Matanza

- el 11 para Rionegro, Santa Bárbara y Tona
- el 20 para Surata
- el 8 para Vetas

Lo cual representa un costo total de 13 billones de pesos con un puntaje en los factores definidos de Impacto Ambiental de 46,6. Estas soluciones representan una lista de soluciones generadas por el algoritmo, en las que a partir de cambios en las restricciones por errores de convergencia y ajustes de calibración en los parámetros NSGA-II se logró llegar a las más óptimas.

Como se puede ver en la figura 21 el impacto ambiental de las diferentes soluciones es relativamente cercano (varía entre 46.4 y 47.1), en cambio el costo total presenta una variación mucho más importante, del orden de un factor 2 entre el valor más pequeño (7.17E+11) y el más grande (1.6E+12).

Dado la débil variación del impacto ambiental en las demás soluciones, lo más razonable es escoger como solución, la que minimiza los costos totales, ya que esta variación es significativa y sería necesario de aproximadamente un billón de pesos más al seleccionar alguna de las otras zonas para las plantas de energía fotovoltaica, es decir:

California	Charta	El_Playon	Floridablanca	Giron	Lebrija	Los_Santos	Matanza	Piedecuesta	Rionegro	Santa_Barbar	Surata	Tona	Vetas	Costs [\$]	Impacto Amb.
t_2	t_5	t_3	t_3	t_9	t_3	t_14	t_22	t_5	t_11	t_11	t_20	t_11	t_8	7,1E+11	47,1

Figura 22. Solución escogida para el problema de optimización.

## 8. Conclusiones

En el reciente trabajo de investigación se plantea un Modelo de programación Multiobjetivo para proporcionar un apoyo en la toma de decisiones relacionadas con la selección de ubicaciones para la construcción de plantas fotovoltaicas para la Provincia de Soto, Santander. El diseño planteado integra dos objetivos definidos como la minimización de costos y la minimización de impacto ambiental, los cuales a su vez presentan una serie de elementos que permiten la caracterización de cada una de las ubicaciones con el fin de llegar a una solución factible, en este caso teniendo como prioridad la minimización de costos frente a la ambiental, debido al rango de diferencia entre las mismas.

El análisis del impacto ambiental asociado con la construcción y operación de las plantas fotovoltaicas dependerá estrictamente del evaluador, pues se deben definir los factores a evaluar. Por lo tanto, para el reciente trabajo, solamente se tuvieron en cuenta 3 factores: hectáreas de terreno taladas, cercanía al centro urbano y emisiones de CO<sub>2</sub>, de las cuales salió el valor del parámetro para evaluar el funcionamiento del modelo.

El parámetro de entrada relacionado con el impacto ambiental el cual multiplica la variable de decisión en la función objetivo correspondiente puede ser recalculado, teniendo en cuenta más factores; es decir, el valor de este parámetro será responsabilidad del evaluador de seleccionar que método se utiliza para cuantificar este dato lo más exacto posible, así mismo contemplar que los datos suministrados deben estar relacionados directamente con la zona afectada, no se pueden seleccionar datos de otra área diferente ya que puede sesgar la solución.

Colombia es un país en el cual el desarrollo de modelos o diseños de construcción de plantas de generación de energía eléctrica con fuentes renovables no contaban con el apoyo suficiente por

parte del Gobierno; en consecuencia, no se cuenta con la suficiente información para el desarrollo de estas investigaciones.

Es necesario impulsar trabajos de campo para la recolección de datos necesarios para la alimentación de modelos como el planteado en la reciente investigación, ya que al no contar con datos confiables o con datos actualizados al momento de realizar la solución se pueden obtener resultados imprecisos. Por esta razón, se sugiere contar con bases de datos actualizadas.

Las zonas propuestas en la prueba de funcionamiento del modelo fueron seleccionadas a partir de criterios que permitieran una mayor factibilidad en las soluciones, ya que al limitar las localizaciones a lugares que inicialmente fueran al menos aptos para instalar una planta de energía fotovoltaica, se logró llegar a soluciones más factibles en comparación a un proceso realizado sin en un campo más amplio de ubicaciones

El marco normativo que legisla a las energías renovables en Colombia a pesar de no ser amplio presenta grandes oportunidades que permiten proyectar estas energías como sustento principal para el país, pues ofrece garantías para aquellos interesados en trabajar con este tipo de fuentes de energía, que se ven reflejadas en soportes económicos para los proyectos por medio de las leyes vigentes.

No es un mito que el proceso de generación de energía con este tipo de fuentes tiene altos costos de inversión, razón por la cual muchas veces los inversionistas optan por tomar otras fuentes, sin embargo, se observa que los costos de operación y mantenimiento pueden llegar a ser bajos; la recuperación de la inversión se puede hacer en un tiempo relativamente corto, razón por la cual es necesario continuar con investigaciones que aporten al conocimiento sobre los temas de energías renovables para que de esta manera a futuro sean tenidos en cuenta, proyectos que aporten positivamente al mundo, y se pueda mitigar el problema ambiental de los tiempos actuales. Como

también es necesario en Colombia adoptar los controles legales que se realizan en otros países que se encuentran con un desarrollo alto en proyectos de este tipo, pues de esta manera los inversionistas presentarían un mayor interés en llevarlos a cabo.

En el ámbito de trámites de licencias ambientales para la aprobación de este tipo de proyectos es un problema para los entes interesados, pues el tiempo, requisitos y algunos compromisos que se deben adquirir para que su aval sea positivo dificulta un poco el desarrollo de estos proyectos a mayor escala.

La devaluación del COP continua dificultando la creación de más proyectos de gran envergadura, causando incrementos en los costos de inversión y en la adquisición de nuevas tecnologías ya que en Colombia no se fabrican los elementos necesarios para esta actividad (inversores, paneles solares, controladores); en adición a esto, la infraestructura vial no es suficiente en las zonas donde se podría presentar la mayor producción de energía eléctrica, dado que no se cuentan con vías o las ya existentes no cuentan con las características para el transporte de los paneles solares, inversores o materiales necesarios.

Santander es un departamento con una alta disponibilidad de recursos que favorecen la producción de energía eléctrica a partir de energía solar, pero el poco interés y el poco apoyo de los entes gubernamentales, ocasiona que se esté perdiendo una buena oportunidad.

## 9. Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el presente proyecto se recomienda ampliar la información, principalmente la que alimenta el modelo de optimización, pues es posible tener en cuenta una mayor cantidad de costos de inversión en una planta de energía fotovoltaica al analizar con gran profundidad la parte eléctrica de las instalaciones, con costos desde el material de los cables de conducción de energía hasta los tipos de inversores utilizados para el tratamiento, ya que estos costos pueden generar una variación considerable en el resultado.

En una posible ampliación de la investigación también es necesario tener en cuenta que el estudio de impacto ambiental presentado en el proyecto actual fue tomado con una valoración de 3 factores resaltados por el evaluador, sin embargo se puede hacer un estudio del impacto con mayor precisión, realizando visitas a las zonas donde se busca localizar una planta, pues haciendo el trabajo de campo es posible identificar una mayor cantidad de factores que influyen en el impacto que será causado por la planta.

Para la aplicación de la investigación en un proyecto de inversión en plantas de energía fotovoltaica es posible implementar una mayor cantidad de restricciones sujetas a la parte técnica de los paneles y elementos necesarios dentro de la planta, puesto que existen muchas referencias que requieren estrictamente condiciones especiales para operar, tales como ángulos o potencia suministrada. Igualmente, en el modelo en general, se debe buscar que las restricciones establezcan un equilibrio en la convergencia puesto que como se observó en la revisión de literatura, muchas veces se pueden perder soluciones con mayor factibilidad al tener una convergencia inmediata y

de igual forma es posible que al demorar la convergencia, el problema se encuentre en ciclo que no permite hallar la verdadera factibilidad.

### Referencias Bibliográficas

- Acevedo, S. C. (13 de Marzo de 2016). *Portafolio*. Obtenido de Energía positiva: <http://www.portafolio.co/opinion/sergio-calderon-acevedo/analisis-crisis-energetica-colombia-492475>
- Alander, J. (1992). On optimal population size of genetic algorithms. *6th Annual European Computer Conference*, (págs. 65-70).
- Allueva, A., González, J., & Alejandre, J. (1999). *Programación multiobjetivo: ejemplos de aplicación en el sector agroalimentario*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Antomil Ibias, J., Arenas Parra, M., Bilbao Terol, A., Jiménez, M. P., & Rodríguez Uría, M. V. (S.F). *PROGRAMACIÓN MULTIOBJETIVO LINEAL EN AMBIENTE DIFUSO*.
- Aparicio, M. P. (2010). Radiación solar y su aprovechamiento energético. En M. P. Aparicio, *Radiación solar y su aprovechamiento energético* (pág. 16). Barcelona: Marcombo S.A.
- APPA. (08 de Septiembre de 2017). *Asociación de empresas de Energía Renovables*. Obtenido de ¿Qué es la Energía Solar Fotovoltaica?: [http://www.appa.es/09fotovoltaica/09que\\_es.php](http://www.appa.es/09fotovoltaica/09que_es.php)
- Aránguiz, I. (2002). *La programación multicriterio como herramienta de la ordenación territorial*. Santiago de Chile: LOM Ediciones.
- Arranz de la peña, J. (S.A). *Universidad Carlos III de Madrid*. Obtenido de Departamento de Ingeniería Telemática: <http://www.it.uc3m.es/jvillena/irc/practicas/06-07/05.pdf>
- Autran, L., Barba, S., Campos, E., Escudei, M., García, E., & Guillén, S. (1998). *Evaluación y decisión multicriterio*. Santiago de Chile: Universidad de Santiago.
- Bendato, I., Cassettari, L., Mosca, R., Williams, E., & Mosca, M. (2017). A stochastic methodology to evaluate the optimal multi-site investment solution for photovoltaic plants. *Cleaner Production*.
- BUN-CA. (2002). *Manuales sobre energía renovable, Solar Fotovoltaica*. San José de Costa Rica: BUN-CA.
- Chang, C.-T. (2015). *Multi-choice goal programming model for the optimal location of renewable energy facilities*.
- Duailibe, A., Cardoso, M., & Moreira, D. (2016). Electric energy generation from small-scale solar and wind power in Brazil: The influence of location, area and shape. *Science direct*.

- EcoDataHousing 1.0. (15 de 07 de 2017). *Energía Fotovoltaica*. Obtenido de EcoDataHousing: <https://ecodatahousing.wordpress.com/2011/07/21/grupo-b-energia-fotovoltaica-ecodatahousing-organstructures/>
- Electricidad Gratuita. (15 de 07 de 2017). *Energía Solar*. Obtenido de Electricidad Gratuita: <http://www.electricidad-gratuita.com/#>
- F. (s.f.).
- Frederick S. Hillier, G. J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. México: McGraw Hill.
- García-Badell, J. J. (1982). *Calculo de la energía solar*. Madrid: Ministerio de agricultura, pesca y alimentación; Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.
- Gerlach, C. B. (21 de Diciembre de 2017). *Q-cells*. Obtenido de Q-cells SE, Sonnenallee: [https://www.q-cells.nl/uploads/tx\\_abdownloads/files/11\\_GLOBAL\\_OVERVIEW\\_ON\\_GRID-PARITY\\_Paper\\_09.pdf](https://www.q-cells.nl/uploads/tx_abdownloads/files/11_GLOBAL_OVERVIEW_ON_GRID-PARITY_Paper_09.pdf)
- Gestal, M. (S.F). *Introducción a los algoritmos genéticos*. Coruña.
- Giraldo O., D. (2017). *El marco normativo de las energías alternativas en Colombia no garantiza su pleno desarrollo*. Bogotá, Colombia: unimilitar.
- Goldberg D.E, J. R. (1987). *Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization*.
- Hernández, C. A., Castilla, G., López, A., & Mancilla, J. E. (2016). <http://www.rcs.cic.ipn.mx>. Obtenido de [http://www.rcs.cic.ipn.mx/2016\\_120/Un%20algoritmo%20multi-objetivo%20NSGA-II%20para%20la%20programacion%20de%20los%20pasos%20de%20laminacion.pdf](http://www.rcs.cic.ipn.mx/2016_120/Un%20algoritmo%20multi-objetivo%20NSGA-II%20para%20la%20programacion%20de%20los%20pasos%20de%20laminacion.pdf)
- International Energy Agency. (2017). *International Energy Agency*. Obtenido de <https://www.iea.org>
- Kalyanmoy, D., Amrit, P., Sameer, A., & Meyarivan, T. (2002). A Fast Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6, 182 - 197.
- Mantilla, M. M. (2016). *Selección de alternativas de inversión en generación de energía eléctrica a partir de técnicas de optimización multiobjetivo y multicriterio*. Bucaramanga: UIS.
- Martínez, P. R. (2010). *Energía solar térmica, técnicas para su aprovechamiento*. Barcelona: Marcombo.

- Mirzapour, S., Malekly, H., & Aryanezhad, M. (2010). A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty. *Production economics*.
- Muñiz, J. M., Cuervo García, R., & S.A.U, E. I. (2010). *Energía solar fotovoltaica*. Madrid: FC EDITORIAL.
- Murcia, H. (15 de enero de 2009). *Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas*. Obtenido de Scientific electronic library online: <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n28/n28a12.pdf>
- Navarrete, J. M. (2017). *SELECCIÓN DE CRITERIOS AMBIENTALES PARA LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE ALTERNATIVAS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA*. Santiago de Cali: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE.
- PCE Inst. (24 de 06 de 2017). *Medidor de radiación Mac-Solar*. Obtenido de Medidor de detalles técnicos: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-radiacion/medidor-de-radiacion-macsolar.htm>
- Pliego, A. (2012). *Programación Lineal Multiobjetivo: Análisis, técnicas y casos de aplicación*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Portafolio. (05 de Diciembre de 2016). *Energías renovables, la apuesta que debe hacer el país*. Obtenido de Portafolio: <http://www.portafolio.co/innovacion/energias-renovables-en-colombia-502061#>
- Portafolio. (03 de Septiembre de 2017). *La planta de energía solar, Celsia Solar Yumbo, inició operaciones*. Obtenido de Portafolio: <http://www.portafolio.co/economia/infraestructura/celsia-solar-yumbo-inicio-operaciones-509308#>
- Real Academia de Ingeniería . (01 de Agosto de 2017). *Real Academia de Ingeniería* . Obtenido de Real Academia de Ingeniería : <http://diccionario.raing.es/es/lema/radiaci%C3%B3n-circunsolar>
- Roa, A. F. (2011). *Método para localización óptima de centrales de energías renovables*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Sánchez, J., García, M., & Lamatac, M. (2015). Evaluation of suitable locations for the installation of solar thermoelectric power. *Cleaner production*.

- Schallenber Rodriguez, Julieta C.; Piernavieja Izquierdo, Gonzalo; Hernandez Rodriguez, Carlos; Unamunzaga Falcón , Pedro; García Deniz , Ramón; Díaz Torres, Mercedes; Cabrera Pérez, Delia; Martel Rodríguez, Gilberto; Pardilla Fariña, Javier; Subiela Ortin , Vicente;. (2008). *Energías Renovables y Eficiencia Energética*. Canarias: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.
- Seda, Y., Ozge, S., & Basar, Ö. (2016). Designing sustainable energy regions using genetic algorithms and location-allocation approach. *Science Direct*.
- Seshadri, A. (19 de Julio de 2009). *Mathworks*. Obtenido de NSGA - II: A multi-objective optimization algorithm: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii--a-multi-objective-optimization-algorithm?requestedDomain=true>
- SMA. (19 de Enero de 2018). *SMA*. Obtenido de SMA: <https://www.sma.de/en/products/solarinverters/sunny-central-800cp-xt-850cp-xt-900cp-xt.html>
- UPME. (19 de 01 de 2018). *UPME*. Obtenido de UPME: <http://www.upme.gov.co/Docs/MapaViento/CAPITULO1.pdf>
- Vegoña, V. (2009). *Modelos operativos de Gestión*. Madrid.