



**Título: Desarrollo de una metodología para la estandarización de procesos en el diseño y construcción de Minigranjas solares en la empresa SOLENIUM: Caso de estudio**  
**Minigranja El Roble Departamento de Sucre.**

David Martínez Vallejo

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor

Jorge Armando Castro Escudero, Magíster (MSc) en Ingeniería Civil

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

---

<b>Cita</b>	(Martínez, 2024)
<b>Referencia</b>	(Martínez, 2024). <i>Desarrollo de una metodología para la estandarización de procesos en el diseño y construcción de Minigranjas solares en la empresa SOLENIUM: Caso de estudio El Roble Departamento de Sucre</i> . Trabajo de grado profesional. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	

---



Biblioteca Carlos Gaviria Diaz

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

A mis padres, Carlos Martínez y Claudia Vallejo, que, aunque nuestro camino juntos haya sido intermitente, reconozco el papel que han desempeñado en mi vida. Este trabajo es un reconocimiento a su presencia, aún en la distancia, y a las lecciones que he aprendido a través de nuestras experiencias compartidas.

A mis valientes amigas de la universidad, Laura Cardona y Evelin Ortega, por ser mi compañía y fuente de alegría en los momentos más difíciles a lo largo de nuestra travesía académica. Este logro es también suyo, como un reflejo de nuestra colaboración y amistad.

A mi estimado profesor y asesor de práctica, Jorge Castro, por su orientación experta, su paciencia infinita y su compromiso con mi crecimiento académico y profesional. Este trabajo es un testimonio de su influencia en mi desarrollo al hacer las cosas bien y con pasión.

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a la Universidad de Antioquia por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios universitarios y conocer la diversidad cultural en su campus.

Su excelencia académica y compromiso con la formación integral de sus estudiantes han sido fundamentales en mi desarrollo personal y profesional.

Agradezco sinceramente a la empresa SOLENIUM por abrirme sus puertas y permitirme realizar mis prácticas académicas en su entorno laboral. La experiencia adquirida durante este periodo ha sido única e invaluable, valoro mucho el impacto que dan al mundo.

Quiero reconocer y agradecer a mi asesor de prácticas y a los profesores que me guiaron y enseñaron a lo largo de mi carrera. Su dedicación, orientación y apoyo han sido esenciales para mi formación académica y para la realización de este trabajo de grado.

Mi agradecimiento se dirige también a los profesionales del grupo de investigación al que pertenezco, PFA, por brindarme la oportunidad de crecer, aprender y contribuir al avance del conocimiento en nuestra área.

A cada una de estas instituciones y personas, gracias por su invaluable contribución a mi formación académica y por su apoyo incondicional en la culminación de este proyecto.

## Tabla de contenido

Resumen .....	11
Abstract .....	12
Introducción .....	13
1 Planteamiento del problema .....	14
1.1 Antecedentes .....	16
2 Justificación.....	18
3 Objetivos .....	19
3.1 Objetivo general .....	19
3.2 Objetivos específicos.....	19
4 Marco teórico .....	20
5 Metodología .....	26
6 Resultados .....	29
6.1 Revisión de literatura y fuentes de información.....	29
6.1.1 Identificación de Actividades y Estandarización .....	29
6.1.2. Viabilidad Técnica.....	32
6.1.3. Viabilidad Financiera y Licencias: .....	33
6.1.4. Diseño Civil y Estructuras .....	34
6.1.5 Ejecución en Campo .....	39
6.2 Análisis de datos.....	43
6.2.1 Resultados de la Implementación de la Metodología PERT/CPM.....	43
6.2.2 Resultados de la Implementación del Diagrama de Gantt .....	47
6.3 Desarrollo de la Metodología de Comparación.....	50
7 Discusión.....	57

7.1. Implicaciones de la Metodología PERT/CPM. Análisis Interno .....	57
7.2. Implicaciones de la Metodología por Diagrama de Gantt. Análisis Comparativo.....	58
7.3. Ajustes Propuestos .....	59
7.3.1. Gestión de Licencias de Construcción y Permisos Ambientales .....	59
7.3.2. Obras de Contención y Manejo de Aguas.....	60
8 Conclusiones .....	61
Referencias .....	63

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> Método estandarizado PARTE A.....	30
<b>Tabla 2</b> Método estandarizado PARTE B.....	31
<b>Tabla 3</b> Método PERT/CPM para la identificación de la ruta crítica y tiempo del proyecto .....	44
<b>Tabla 4</b> Rutas posibles y Ruta Crítica. Método PERT/CPM para caso de estudio El Roble, Sucre .....	45
<b>Tabla 5</b> Actividades desarrolladas por SOLENIUM respecto a GENSOL.....	50
<b>Tabla 6</b> Duración de actividades en obra civil por Solar Mango .....	54

## Lista de Gráficas

<b>Gráfica 1</b> Convenciones PERT/CPM.....	23
<b>Gráfica 2</b> Diseño de ruta metodológica .....	26
<b>Gráfica 3</b> Diagrama de Red, ruta crítica y ejecución metodología PERT/CPM.....	45
<b>Gráfica 4</b> Diagrama de Gantt GENSOL .....	48
<b>Gráfica 5</b> Diagrama de Gantt y ruta crítica, caso de estudio minigranja El Roble, Sucre .....	49
<b>Gráfica 6</b> Diagrama de Gantt y ruta crítica, caso de estudio minigranja El Roble, Sucre .....	53

### **Siglas, acrónimos y abreviaturas**

<b>CAR.</b>	Corporaciones Autónomas Regionales
<b>CPM.</b>	Critical Path Method
<b>DC-BT</b>	Corriente Directa – Baja Tensión
<b>ENEL.</b>	Ente Nazionale per l'Energia Elettrica
<b>EPC.</b>	Engineering, Procurement and Construction
<b>EPM.</b>	Empresas Públicas de Medellín
<b>GD.</b>	Generación Distribuida
<b>IDEAM.</b>	El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<b>INVIAS.</b>	Instituto Nacional de Vías
<b>MT.</b>	Media Tensión
<b>NSR.</b>	Norma Sismo-Resistente
<b>NTC.</b>	Normas Técnicas Colombianas
<b>PEN.</b>	Plan Energético Nacional
<b>PERT.</b>	Program Evaluation and Review Techniques
<b>RETIE.</b>	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas
<b>SEA.</b>	Servicio de Evaluación Ambiental
<b>SPT.</b>	Sistema de Puesta a Tierra



---

## Resumen

El presente trabajo de grado se centra en el apoyo a la empresa SOLENIUM S.A.S mediante la construcción de una ruta metodológica que permita la estandarización de los procesos internos en las etapas de diseño y ejecución de minigranjas solares. Este objetivo se llevó a cabo mediante la identificación de procesos ajustados a la normativa nacional e internacional que permiten establecer un orden adecuado en las etapas de cada proyecto, identificando las rutas críticas, procesos que se puedan realizar en simultaneo, así como la caracterización y construcción de una línea base de los procesos que actualmente se desarrollan en la empresa. Para la construcción de la línea base se empleará como caso de estudio el proyecto El Roble en el departamento de Sucre.

Al realizar el análisis comparativo entre los procesos actuales de la empresa SOLENIUM y aquellos ajustados a las normativas y procesos estandarizados en países con más trayectoria en el área, se identifica que el nivel de desfase de las actividades actuales y los tiempos de ejecución de estas respecto a la ruta de estandarización es del 11.11% y del 9.36% respectivamente. En este informe se presentan una serie de diagramas y tablas como ruta metodológica que le permita a la empresa SOLENIUM S.A.S incluir e implementar, si así lo desea, los procesos necesarios para alinearse con el modelo de estandarización identificado. La empresa podrá evaluar la propuesta y estandarizar sus procesos vigentes, disminuir los tiempos en la gestión a nivel de campo y sedes administrativas de acuerdo con los ajustes propuestos al final del documento.

*Palabras clave: Minigranjas solares, Ejecución de proyectos, CPM, PERT,*

*Estandarización de procesos, Diagrama de Gantt, Brecha de ejecución*

---

### Abstract

This degree work is focused on supporting the company SOLENIUM S.A.S. through the construction of a methodological route that allows the standardization of internal processes in the stages of design and implementation of solar mini-farms. This objective was carried out through the identification of processes adjusted to national and international regulations that allow establishing an adequate order in the stages of each project, identifying critical routes, processes that can be performed simultaneously, as well as the characterization and construction of a baseline of the processes that are currently developed in the company. For the construction of the baseline, the El Roble project in the department of Sucre will be used as a study case.

The comparative analysis between SOLENIUM's current processes and those adjusted to the regulations and standardized processes in countries with more experience in the area, shows that the level of gap between the current activities and their execution times with respect to the standardization route is 11.11% and 9.36%, respectively. This report presents a series of diagrams and tables as a methodological route that allows SOLENIUM S.A.S. to include and implement, if desired, the necessary processes to align with the identified standardization model. The company will be able to evaluate the proposal and standardize its current processes, reduce management times in the field and administrative offices according to the adjustments proposed at the end of the document.

*Key words:* Solar mini-farms, Project execution, CPM, PERT, Standardisation of processes, Gantt chart, Execution gap

---

## Introducción

La preocupación por el cambio climático ha llevado al mundo a la búsqueda e implementación de nuevas fuentes de energía. La energía solar es una fuente esencialmente no contaminante, pues libera bajas cantidades de CO<sub>2</sub> a comparación de la energía generada mediante combustibles fósiles, y es prácticamente ilimitada (Laborde & Williams, 2016), por lo que se considera una buena opción en lugares donde se tienen índices de radiación óptimos para la instalación de proyectos solares. La implementación de minigranjas solares en Colombia se empieza a llevar a cabo a partir de que la Comisión de regulación y Gas de Colombia (CREG, 2021) actualizara la Resolución 174 de 2021 donde SOLENIUM S.A.S instaló la primera minigranja solar del país, que se ubica en Luruaco, Atlántico (La República, 2023). En este contexto, y debido a la buena acogida por parte de inversionistas se incita a continuar con este tipo de proyectos, mayormente en los departamentos de La Guajira y Sucre en Colombia pues se presentan como un área estratégica para el desarrollo de proyectos solares, debido a su alta radiación (IDEAM, 2017).

Para la implementación de las minigranjas no solo se requiere la intervención de la Ingeniería Eléctrica, sino que al igual que para otros proyectos que impliquen obras de carácter civil, se necesita del diseño y construcción de infraestructura orientada a su buen funcionamiento. Para la ejecución de estas labores se debe seguir una secuencia adecuada de etapas desde la concepción de la obra, hasta la construcción y entrega de esta, con el fin de evitar pérdidas de tiempo y dinero en reprocesos constructivos, de diseños y logística de la empresa en general.

Debido a que las minigranjas solares son un campo relativamente nuevo en el país, el objetivo de este proyecto se centra en la identificación de los vacíos actuales en los procesos

---

operativos y logísticos en el desarrollo de plantas solares. Actualmente en Colombia se cuenta con la capacidad de instalar 2500 minigranjas, de las cuales solo se han construido 15, lo que hace muy importante la implementación de un alineamiento en cuanto a la concepción, diseño y ejecución de dichas obras ya que el campo de acción es bastante amplio. La empresa SOLENIUM S.A.S al considerarse pionero en el mercado debe ser quien marque una ruta para estandarizar las etapas de diseño y de construcción de minigranjas, considerando los requerimientos mínimos nacionales e internacionales para la ejecución de este tipo de proyectos.

El desarrollo de este proyecto contempló la elaboración de un flujograma de procesos con análisis de rutas críticas mediante la metodología PERT/CPM, listas de control y chequeo, diagramas de Gantt y definición de indicadores que ayuden a disminuir la brecha identificada mediante la comparación entre el cumplimiento de estos. Adicionalmente, se planteó una serie de alternativas y sugerencias para ajustarse a los estándares alcanzando las metas.

## **1 Planteamiento del problema**

Con el continuo avance de las tecnologías, han surgido nuevas actividades relacionadas con el aprovechamiento de la energía solar, lo que ha generado la necesidad de adaptar métodos constructivos nacionales e internacionales y realizar actualizaciones para optimizar los puntos críticos en proyectos de energía solar a pequeña escala, como lo son las minigranjas. Frente a estas necesidades, surge la pregunta de cuál sería la metodología más apropiada para abordar estos proyectos tan específicos. La selección de la metodología adecuada implica considerar varios factores clave, como la eficiencia energética, la viabilidad económica, la durabilidad de las actividades, la disponibilidad de recursos locales y las consideraciones medioambientales. Es

---

esencial elegir una metodología que permita maximizar el aprovechamiento del tiempo y recursos desde la concepción de un nuevo proyecto hasta su ejecución y puesta en marcha.

Los procesos constructivos en el ámbito civil siguen un conjunto de fases estándar, como para cualquier proyecto, que abarcan desde el anteproyecto hasta el control posterior de las obras. Cada fase implica una serie de tareas y evaluaciones, incluyendo la viabilidad del proyecto y la consideración de las condiciones de servicio que determinarán su uso futuro. Este criterio es fundamental incluso en el diseño estructural, donde se deben contemplar los requisitos particulares de cada proyecto. Las obras de infraestructura o construcción civil en el ámbito de la generación de energía no son ajenas a estos procesos pues se requiere de un programa de concepción y ejecución bien ordenado. Las granjas solares son obras que, si bien tienen un propósito de generación de energía, para poder realizar el montaje y puesta en marcha de las mismas se deben conocer y mejorar cada vez más los procesos constructivos, adaptados a las condiciones específicas de un país y zona de construcción.

La empresa SOLENIUM S.A.S actualmente posee un equipo de Ingeniería capacitado para ejecutar las obras correspondientes a minigranjas solares y proyectos de autoconsumo. Hasta el momento se han validado, diseñado y ejecutado diferentes proyectos en los departamentos de Atlántico y Sucre, sin embargo, se observa que la compañía se encuentra en constante actualización de sus rutas de diseño desde la ingeniería Eléctrica como de la ingeniería Civil.

La actualización de las rutas se debe a la alta demanda de proyectos los cuales impulsan a los ingenieros de la empresa SOLENIUM S.A.S a mejorar sus técnicas para la optimización de tiempos y disminución de reprocesos constructivos. Adicional a esto, se identifica que no se cuenta con un manual constructivo establecido ni un marco legal y normativo que justifique la totalidad de la infraestructura que se debe adecuar en las obras. Es por esto por lo que el presente

---

proyecto de grado define y aborda esta temática durante la estancia de práctica académica, definiendo una ruta metodológica la cual por medio de la estandarización de los procesos internos en las etapas de diseño y ejecución de minigranjas solares, ayude a disminuir o evite los retrasos y reprocesos que se generan empleando las rutas actuales en la logística de construcción.

### **1.1 Antecedentes**

En 2015, los líderes mundiales en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) acordaron el histórico Acuerdo de París con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático (UN, 2015). Dado que gran parte de estas emisiones provienen del uso de combustibles fósiles y la generación de energía térmica, los proyectos de energías renovables, como la solar y eólica, son fundamentales para mitigar este problema al evitar la emisión de miles de toneladas de CO<sub>2</sub> por cada proyecto. Actualmente, los fenómenos hidrológicos y climáticos están afectando el ciclo del agua, impactando la disponibilidad del recurso debido a cambios en los patrones de precipitación y en el caudal de los cuerpos de agua. Según López (2020), en Colombia la mayoría de la generación de energía eléctrica proviene de fuentes hidroeléctricas, lo que refleja la dependencia directa entre el cambio climático, el aumento de temperatura y el suministro de energía de estas centrales.

Por lo anterior, la energía solar se considera una fuente de energía de alto potencial, una alternativa digna de ser explorada con un amplio campo de acción en el país. Como lo indica Maldonado et al. (2019), Colombia no cuenta con un desarrollo suficiente para aprovechar sus recursos renovables por lo que han sido pocos los proyectos de energía solar, sin embargo, el

---

potencial es alto por su índice promedio de irradiación justamente en las zonas no interconectadas y alejadas del centro del país.

Actualmente los países pioneros en el aprovechamiento de la energía solar por medio de celdas fotovoltaicas son China, EE. UU, Japón, India, entre otros países asiáticos y europeos ocupando los 20 primeros lugares (Guarín & Sánchez, 2021), lo que indica que en América latina es poca la implementación de estas nuevas tecnologías, resultando en la adecuación de marcos normativos y protocolos internacionales para la ejecución de los proyectos en el país. A medida que se implementan estas tecnologías, se deben resolver los desafíos asociados con esta implementación, identificando problemáticas en cuanto a disposición de espacios, diseños y protocolos de ejecución proporcionando valiosas lecciones y recomendaciones para mejorar la viabilidad y sostenibilidad de estos proyectos.

Hoy en día se cuenta con trabajos e investigaciones alrededor de la metodología e implementación mayormente del campo de la ingeniería eléctrica en los proyectos solares, los cuales han sido citados en la presente investigación tales como: Marín & González, 2020; Marín & Quintero, 2017; ENEL, s.f. Sin embargo, es poca la información encontrada para el campo de la ingeniería civil, pues se menciona superficialmente las obras que se deben tener en cuenta. Una base sólida es la Guía Pública Para la Descripción de Proyectos de Centrales Solares SEA en Chile, citado como SEA, 2017 en el presente trabajo.

Para el desarrollo de la metodología se han considerado dichos autores, teniendo en cuenta que ya se rigen bajo la normativa internacional, adicionando las subetapas y procesos conocidos por SOLENIUM S.A.S.

---

## 2 Justificación

En Colombia la matriz energética está constituida mayormente por energías renovables convencionales, pues según Daza (2023), el 60% de dicha matriz corresponde a la generación de energía por medio de centrales hidroeléctricas. La participación del campo solar fotovoltaico al año 2022 fue de aproximadamente 1%, para el año 2023 fue del 2.5% y se espera que debido a las actualizaciones normativas que incentivan la generación de energías limpias renovables no convencionales, para el año 2027 se tenga una participación de cerca del 40% en la matriz de capacidad eléctrica en Colombia. El campo para la instalación de proyectos de energía solar fotovoltaica es amplio, pues El Plan Energético Nacional (PEN) para los años 2020-2050, incluye la generación de esta energía no convencional en diversos escenarios, estén o no delimitados en zonas conectadas a la red. (Araujo & Cabré, 2023).

Incluido el cumplimiento al Acuerdo de París el cual contribuye a la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> y el apoyo gubernamental para la transición energética en Colombia, la justificación de este proyecto se encamina a la consolidación de un marco legal y normativo para los procesos de diseño y ejecución en la construcción de los proyectos de minigranjas solares, pues como se ha evidenciado tiene un amplio campo de acción.

Se destaca la necesidad de adecuar una metodología clara que proporcione ubicación espacial y temporal para guiar el diseño y la ejecución civil de proyectos empresariales es crucial. En este contexto, el presente documento busca ofrecer esta herramienta, mejorando la comprensión de los flujos procedimentales actuales y necesarios, según el marco normativo implementado y las guías adoptadas por la empresa

---

### 3 Objetivos

#### 3.1 Objetivo general

Diseñar una ruta metodológica para optimizar los tiempos de ejecución de las obras de la empresa SOLENIUM S.A.S, a través de una propuesta de estandarización en las etapas de diseño y construcción de minigranjas: caso de estudio, proyecto El Roble en Sucre.

#### 3.2 Objetivos específicos

- Consultar las fuentes bibliográficas en bases de datos científicas y de carácter legal, relacionadas con la construcción de granjas solares.
- Identificar las etapas y la secuencia de procesos requerido en la construcción de granjas solares en el contexto nacional e internacional que permita la construcción una metodología estandarizada aplicable a la empresa SOLENIUM S.A.S.
- Caracterizar los procesos de diseño y construcción de minigranjas solares realizados por la empresa SOLENIUM S.A.S mediante el análisis de un caso de proyecto de minigranja en el departamento de Sucre.
- Establecer las actividades a realizar por parte de la empresa SOLENIUM S.A.S para generar una propuesta de ruta metodológica que conduzca a disminuir la brecha entre los procesos actuales y el modelo estandarizado propuesto.

---

#### 4 Marco teórico

La generación de energía se puede clasificar de acuerdo con su obtención a través de recursos renovables (hidráulica, eólica, solar, biomasa, mareomotriz) y no renovables (petróleo, gas, carbón), adicionalmente identificando si son convencionales o no convencionales.

Actualmente debido a las problemáticas ambientales se está migrando a alternativas renovables, aunque lamentablemente el ritmo al que se desarrollan no alcanza a recuperar las continuas emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por los combustibles fósiles. Según Guerrero 2021, se espera que para dentro de 10 años la matriz energética en América del sur se modifique aumentando significativamente la participación de la energía solar y eólica (energías renovables no convencionales), y disminuyendo la generación por mecanismos hidráulicos y por uso de combustibles fósiles (energía no renovable y contaminante).

La radiación por energía solar que se recibe en la tierra mediante fotones depende de varios factores como la hora del día, coordenadas de latitud y longitud del lugar y la orientación de la superficie que está expuesta, lo que hace que no sea uniforme (SOLAR, P. ,2020). En el campo de la producción de energía, la aplicación práctica de la radiación solar convertida en electricidad se da por medio de celdas o paneles solares gracias a un conjunto de equipos eléctricos y electrónicos, que según Lamigueiro (2013), constituyen el elemento fundamental para la ejecución de proyectos de energía solar al ser el receptor encargado de absorber los fotones emitidos por el sol y realizar la respectiva conversión por liberación de electrones. La eficiencia de los paneles solares es determinante para reducir los costos de los sistemas fotovoltaicos, ya que su producción es la más cara de todo el sistema.

---

En SOLENIUM S.A.S se trabaja con una patente propia, la cual se denomina Zentrack, con el fin de aumentar la eficiencia de los paneles solares y a su vez el rendimiento y viabilidad de proyectos. Zentrack es un seguidor solar patentado en el año 2017 por SOLENIUM S.A.S, el cual constituye la estructura de las minigranjas solares, aumentando la producción de energía en un 25% a comparación de los paneles fijos, brindando mayor eficiencia en la instalación de los proyectos.

Las Minigranjas solares son el concepto de energía solar plasmado físicamente mediante la construcción de estructuras para la implantación de paneles solares y posterior generación de energía eléctrica. Aunque la palabra minigranja no se encuentra de manera popular registrada en el vocabulario, hace referencia a la generación distribuida de energía (GD) para proyectos no mayores a 2.5 hectáreas de uso de suelo y con una producción igual o menor a 1MW, donde la GD es la generación de energía eléctrica mediante pequeñas y diferentes fuentes, siendo una alternativa importante para la prestación de dicho servicio, más aún en lugares alejados de cascos urbanos. Para Ramos (2020), representa la generación lo más cerca a la red de distribución de energía, con la opción de comprar o vender energía eléctrica en el sistema interconectado, disminuyendo y compensando las pérdidas de energía (disipada por equipos y líneas), favoreciendo a la empresa de distribución, consumidores y a la demanda de energía en general.

En la empresa SOLENIUM S.A.S, el desarrollo de nuevas tecnologías a través del diseño de minigranjas es una labor que consta de diferentes fases, al igual que un proyecto general. Según la Online Bussiness School (2016) se comprenden de la siguiente manera las fases de un proyecto:

- 
- Inicio e identificación del proyecto: se debe evaluar el alcance que se desea tener y seleccionar el equipo de trabajo, así mismo se estudia la viabilidad de mercado y se definen parámetros a tener en cuenta.
  - Planificación: consta en la identificación de necesidades futuras y la manera en que se va a abordar la ejecución del proyecto, debe trazar la ruta a seguir asumiendo costos, equipo de trabajo y procesos necesarios.
  - Ejecución: se completan las actividades programadas por la planificación del proyecto por medio de la asignación de actividades, seguimiento del uso de recurso tiempo y dinero, corregir y modificar acciones que redirijan al objetivo.
  - Control: se identifican áreas donde se deben realizar cambios y/o ajustes ayudando a mejorar la planificación de proyectos futuros mediante la creación de planes de contingencia o de corrección.
  - Cierre: comprende los procesos necesarios para completar formalmente el proyecto, verificando cumplimientos contractuales, realizando la valoración del proyecto y garantizando su continuación.

Adicionalmente para el análisis de un proyecto se debe comprender la dinámica de las diversas actividades u operaciones unitarias que deben ser caracterizadas y relacionar la secuencia o simultaneidad que éstas deben seguir. Según Hillier & Lieberman (2010), la ruta crítica es la trayectoria que toma más tiempo en la ejecución de las actividades de un proyecto y es en esencia quien lo controla pues el cumplimiento de sus actividades determina si el proyecto se ejecuta o no a tiempo, usualmente las actividades y procesos críticos son aquellas con mayor dependencia respecto a las actividades que le proceden por lo que pueden generar inconvenientes. En la planificación de proyectos se han desarrollados dos metodologías que ayudan en la determinación de la ruta crítica: el Método CPM y PERT. El Método CPM, de sus siglas en inglés Critical Path Method, y el Método PERT, de sus siglas Program Evaluation and Review

Technique, son aquellos que trabajan de la mano con el fin de determinar la ruta crítica por medio de una representación visual y cuantitativa. Estos métodos de planificación y control consideran el tiempo de cada actividad y la dependencia entre ellas. Es un modelo matemático lógico que ayuda a aumentar la eficiencia de los grupos de trabajo e identificar la necesidad o no de los refuerzos a las actividades (Contreras, 2014). La elaboración de un diagrama y la realización de los cálculos matemáticos serán de suma importancia para la estimación de tiempos de ejecución del proyecto, sirviendo como indicador de la relevancia de las actividades.

Para el correcto análisis de los cálculos a partir de las actividades/ítems se tiene la gráfica 1 con las relaciones, tal que:

### Gráfica 1.

*Convenciones PERT/CPM. Elaboración propia, base Método PERT/CPM*



Donde el círculo rojo corresponde a las actividades pertenecientes a la Ruta Crítica, con holgura cero, y además las siguientes anotaciones:

ES: Tiempo inicial más temprano. Lo más pronto que puede iniciar la actividad.

EF: Tiempo final más temprano. Lo más pronto que puede finalizar la actividad.

LS: Tiempo inicial más tardío. Lo más tarde que puede iniciar la actividad sin generar afectaciones.

---

LF: Tiempo final más tardío. Lo más tarde que puede finalizar la actividad sin generar afectaciones.

D: Duración de la actividad en días.

H: Holgura de la actividad. Es el margen libre que se tiene de tiempo para cada actividad. Corresponde al retraso máximo que puede tener una actividad sin modificar el plazo total de ejecución (Jiménez, 2005).

En la empresa SOLENIUM S.A.S, los proyectos son analizados y desarrollados desde su concepción inicial hasta su completa ejecución, actualmente aplicando ajustes durante el proceso. Esto implica una serie de etapas que abarcan desde la negociación y adquisición de terrenos, pasando por la legitimación legal y evaluación de la viabilidad económica y ambiental, hasta llegar al diseño, construcción y puesta en funcionamiento de los proyectos. Haciendo un enfoque en el trabajo de la ingeniería civil, esta se desarrolla en el área EPC Engineering, Procurement and Construction, qué significa “Ingeniería, Compras y Construcción”. Es un tipo de proyecto y contrato donde todas las actividades recaen en el contratista, desde el diseño de ingeniería, pasando por suministro de materiales y finalizando con la construcción y entrega (Barriga, 2023).

Las Etapas de un proyecto solar fotovoltaico, según Marín (2019), comprenden la identificación y levantamiento georreferenciado del sitio que se va a intervenir, el estudio de prefactibilidad legal, ambiental y de insumos de conectividad con el fin de que el proyecto no tenga impedimentos que puedan cancelarlo, el estudio de factibilidad financiera, autorizaciones y permisos ante los operadores de red pertinentes e inversionistas públicos o privados, la etapa de diseño de detalle tanto civil como eléctrico consignando las cantidades de material necesario, la

---

ejecución en campo/construcción a partir de los diseños establecidos, y finalmente la energización de la planta con sus respectivas pruebas de rendimiento.

La Ingeniería de diseño es el proceso de concepción y planificación inicial del proyecto y comprende el componente tanto eléctrico como civil. El diseño eléctrico se encarga de distribuir las líneas de tensión desde los paneles hasta los transformadores para luego conectarse a la red; también diseña la disposición de los paneles y realiza los respectivos cálculos eléctricos. El diseño civil comprende la adecuación del terreno, diseño de cerramientos, obras preliminares, vías de acceso, rutas, fijaciones mecánicas, drenajes, obras hidráulicas cuando corresponda y detalles constructivos de la subestación de transformación, además de las cimentaciones del proyecto. También es necesario analizar sombras y reflejos, calcular cantidades de obra, contratar proveedores y verificar estudios geotécnicos.

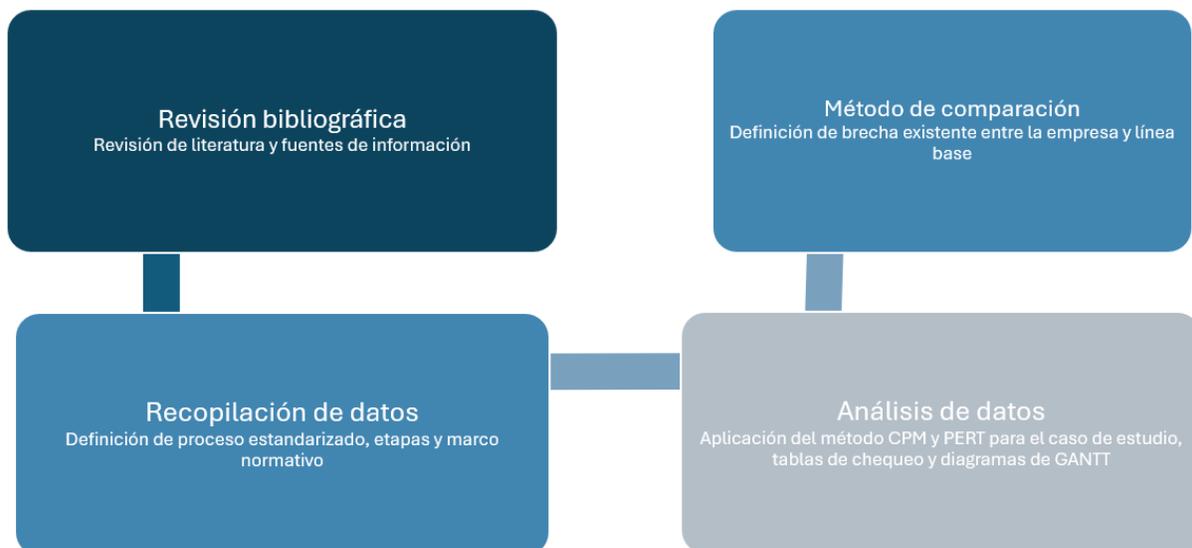
Todo lo anterior está en función de entender los procesos constructivos de este tipo de proyectos, donde es fundamental cumplir con los requerimientos mínimos de construcción establecidos por la legislación nacional o, en su defecto, por entidades internacionales con experiencia en este campo. Las obras civiles necesarias para parques o minigranjas solares demandan un cronograma y planificación detallada para cada etapa. Entre las actividades clave se incluye la preparación del terreno con limpieza y marcación topográfica, el diseño y construcción del vallado perimetral y acceso a la planta, la creación de viales internos con zanjas de drenaje adecuadas, así como el diseño y construcción de la subestación y la caseta de inversores. Este enfoque meticuloso en la planificación y ejecución de las actividades civiles es esencial para asegurar la calidad y la durabilidad de los proyectos fotovoltaicos.

## 5 Metodología

Para lograr el objetivo principal del trabajo se plantea la implementación de una metodología de tipo mixto, lo que implica la recolección y análisis de datos tanto numéricos como descriptivos debido a que se desarrolla el método PERT/CPM pues es el que determina la ruta crítica del caso de estudio, además de la caracterización de las etapas de un proyecto solar fotovoltaico desde el marco normativo internacional ajustado a Colombia. Con la metodología propuesta, se esperaba encontrar una alternativa de solución a los retrasos o inconvenientes que actualmente se presentan en los procesos logísticos y constructivos de la empresa mediante el análisis del caso de estudio mencionado. En la Gráfica 2 se muestran las etapas a seguir en esta propuesta:

### Gráfica 2.

*Diseño de ruta metodológica. Elaboración propia.*



La revisión bibliográfica se realizó teniendo en cuenta las bases de datos que brinda la Universidad de Antioquia en asociación al portal de Sistema de Bibliotecas obteniendo informes, ensayos, trabajos de grado y libros que sirvieron como fuente bibliográfica para el presente trabajo. Además de esto se tuvieron en cuenta revistas digitales y prensa en general a favor de las noticias sobre la actualidad del tema abordado. Para las referencias y citaciones se hace uso tanto de Mendeley como de Google Académico con la última actualización de las normas APA.

La obtención de datos se hizo con el fin de recopilar los procesos que desarrollan diferentes entidades que sirven como referentes a nivel nacional para realizar el diseño y construcción de parques solares tanto desde la ingeniería eléctrica como ingeniería civil para obtener un panorama amplio en cuanto a las granjas y minigranjas solares, adicionalmente se plantea el protocolo aplicado, en la empresa SOLENIUM, del proyecto El Roble en el departamento de Sucre en Colombia como caso de estudio para la aplicación de las metodologías de gestión de proyectos PERT/CPM y Gantt. Para el reconocimiento de las labores que se deben desarrollar obtenidas en la recopilación de datos y la realización de los análisis correspondientes a la línea base, se detallaron los criterios de viabilidad técnica, legal, diseño y ejecución civil para ser objeto guía y de análisis en la determinación de la distribución de tareas y cronogramas para el caso de estudio y la comparación con el mercado del sector energético.

Teniendo en cuenta las actividades que ejecuta la empresa SOLENIUM se planteó la construcción de la metodología PERT/CPM para la identificación de la ruta crítica. Adicionalmente para el análisis y reconocimiento de los posibles vacíos respecto a la metodología internacional se desarrollaron diagramas de Gantt comparables entre el caso de estudio y el cronograma civil para la construcción de un proyecto solar por empresas de países

---

con mayor desarrollo en el campo de parques solares, bajo una medida estandarizada de producción de energía en MW.

Para realizar la comparación entre las actividades desarrolladas propiamente en la empresa con respecto a empresas extranjeras, se siguieron los pasos a continuación, partiendo de la hipótesis de que se siguen los estándares y el marco normativo en ambos casos:

- Revisión de las actividades a la empresa extranjera: Se desglosó el cronograma de implementación de las obras civiles en actividades específicas, incluyendo sus duraciones y dependencias, tomando como fuente los diagramas de Gantt encontrados en la revisión bibliográfica. Se identificaron las actividades que difieren respecto al desarrollo implementado por la empresa SOLENIUM.
- Identificación de la ruta crítica para el caso de estudio: Se determinó el diagrama de Gantt que se maneja para el proyecto que es caso de estudio, identificando la ruta crítica mediante MS Project para identificar las actividades que no tienen holgura y que, por lo tanto, son determinantes para la duración total del proyecto.
- Comparación de actividades: Se compararon la totalidad de actividades desarrolladas en el campo civil por las empresas extranjeras y por SOLENIUM.
- Comparación con el cronograma de empresa extranjera: Se compararon las duraciones individuales de las actividades y la duración total del proyecto con los tiempos de referencia identificados en la búsqueda bibliográfica, identificando si los tiempos coinciden, si se está tomando más tiempo por parte de SOLENIUM o por el contrario se realiza con mayor prontitud.

---

## **6 Resultados**

### **6.1 Revisión de literatura y fuentes de información**

La investigación bibliográfica inicial para la recopilación de datos proporciona una base sólida sobre conocimientos y mejores prácticas provenientes de los antecedentes mencionados y protocolos internacionales.

#### ***6.1.1 Identificación de Actividades y Estandarización***

A partir de la revisión bibliográfica se generó una lista de verificación detallada que abarca todos los aspectos esenciales para llevar a cabo el proyecto de manera integral y eficiente. Esta lista de verificación se organizó y sintetizó en las Tablas 1 y 2, donde se presentan las diversas etapas necesarias para la ejecución del proyecto.

Las tablas se construyeron a partir de modelos y estándares reconocidos en el mercado, adaptados y personalizados para ajustarse al proceso interno que maneja la empresa. Dentro de la lista se pueden diferenciar las subetapas pertenecientes al campo de la ingeniería civil, de los cuales cada ítem posteriormente se desarrolla teniendo en cuenta las tareas específicas que deben llevarse a cabo y, además, se realiza una revisión y mención detallada del marco normativo aplicable en el país asegurando el cumplimiento de todas las regulaciones y requisitos legales pertinentes. Es importante destacar que estas tablas no solo sirven como una guía para el equipo de ingeniería civil EPC, sino que también actúan como un punto de referencia clave para todas las partes interesadas involucradas en el proyecto.

**Tabla 1.**

*Método estandarizado PARTE A. Adecuación propia de Marín & Quintero (2017), ENEL (s.f), SEA (2017) y Marín (2020)*

ETAPAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA MINIGRANJA SOLAR FOTOVOLTAICA			
Etapa	Contenido	Características	Aplica a EPC CIVIL
1. Levantamiento de Información	<b>Validación Técnica</b> Comprende la validación ambiental, social y de requisitos técnicos en la búsqueda de terrenos	Terreno con pendientes < 11° para disminuir actividad por movimiento de tierras	
		Niveles de Radiación óptimos	
		Verificar punto de conexión. Distancia máxima al proyecto 500m	
		Riesgo de inundación	
		Aceptación social	
	<b>Validación legal</b> Comprende la verificación de documentos y legalidad del terreno a ocupar, así como la disposición de servidumbres y rondas hídricas	Delitos en la zona, presencia criminal	
		Acercamiento con propietarios	
		Conseguir derechos del terreno (compra o arrendamiento mínimo para la vida útil del proyecto de 30 años)	
		Estudio de títulos	
		Verificación legal: existencia de títulos mineros, restitución de tierras, actividades de uso anteriores, implicaciones de comunidades indígenas, riesgos arqueológicos	
2. Viabilidad del proyecto	<b>Viabilidad Técnica</b> Comprende la verificación en campo de la información levantada inicialmente, la cual se consigna oficialmente para presentar a inversionistas	Delimitar servidumbres de redes de tensión, caminos y rondas hídricas	
		Visitas para inventario forestal y validación del terreno	
		Visitas para topografía y Estudios geotécnicos ( identificación de obras antópicas o naturales, levantamiento de curvas de nivel, clasificación de suelos). Gestión y contratación	
		Solicitud a punto de conexión al operador de red OR	
		Simulaciones de circuito y sombras	
	<b>Viabilidad Financiera y permisos</b> Comprende la evaluación y modelo financiero, Bill of Quantities y licencias necesarias para comenzar el diseño real de la minigranja	Pedido de insumos	
		Evaluación económica del proyecto: CAPEX, modelo financiero	
		Beneficios tributarios	
		Seguros	
		Financiación del proyecto y asignación de recursos	
Licencias: Obtención de permisos ambientales y de construcción			

**Parte A. Levantamiento de información y viabilidad del proyecto.** Se estudia la viabilidad técnica, ambiental, legal y financiera del proyecto específico mediante las visitas y verificaciones estipuladas en la tabla. En estas etapas la ingeniería civil desarrolla actividades de reconocimiento del terreno mediante estudios geotécnicos, geológicos, topográficos y cuando se considere necesarios estudios hidrológicos. Adicionalmente se adelantan procesos administrativos en cuanto al estudio de títulos para el predio seleccionado, en conjunto con la obtención de los documentos necesarios para tramitar la licencia de construcción ante la municipalidad correspondiente.

**Tabla 2.**

*Método estandarizado PARTE B. Adecuación propia de Marín & Quintero (2017), ENEL (s.f), SEA (2017) y Marín (2020).*

Una vez se confirma la viabilidad del proyecto se activa el diseño mecánico de las estructuras metálicas (hincas, torquetubo, paneles)			
3, Diseño de Ingeniería	<b>Diseño Eléctrico</b> Comprende cálculos eléctricos, disposición óptima de paneles y distribución de las redes DC-BT, MT, COM, AC, SPT	Ajuste de distribución de paneles, S/E, Inversores	
		Estudios de conexión simplificados	
		Diseño de SPT estructuras metálicas	
		Diseño óptimo de rutas AC-DC-BT-MT-COM	
		Orientación de los paneles	
		Coordenadas de hincas y luminarias	
	<b>Diseño Civil</b> Comprende distribución de obras, cálculo de cantidades, contratación de proveedores y verificación de estudios	Diseño estratégico sobre planos topográficos	
		Análisis de Estudios de suetos	
		Análisis de Estudio hidrológico y de inundabilidad	
		Diseño de cerramiento, cerco eléctrico y centro de control	
		Diseño de vías y accesos	
		Detalle constructivo de zanjas para redes	
		Definición de áreas de circulación y obras provisionales	
		Definición de movimientos de tierras y pendientes	
4. Ejecución	<b>Plan de Ejecución</b> Comprende cronogramas por Ing. de Proyectos para seguimiento de diseño, inventarios, compras	Simulación de paneles en terreno original	
		Cronograma de actividades	
		Cantidades de obra y compra de materiales	
		Logística de importaciones y materiales en campo	
	<b>Ejecución en Campo</b> Comprende las actividades en sitio de instalación del proyecto segun los planos	Personal en obras	
		Adecuación del terreno	
		Marcación topográfica para vías, accesos y cerramiento	
		Excavaciones para cerramiento, zanjas, pilotes	
		Levantamiento del cerramiento	
		Construcción de la subestación de transformación	
Instalaciones mecánicas y eléctricas			
Finalmente para la puesta en funcionamiento el proyecto se energiza con el punto de inyección teniendo un constante monitoreo tanto de los seguidores solares como de la producción de energía. Comprende la realización de pruebas de rendimiento y tramites de energización para la comercialización de energía.			

**Parte B. Diseño por parte de ingeniería y Ejecución.** Se realizan los diseños mostrando la distribución y ubicación real del proyecto mediante la presentación de planos, layouts y demás insumos a los clientes o inversionistas para su aprobación. Seguido a esto se genera un plan de ejecución en campo con sus respectivos protocolos y se espera al cierre de la obra y puesta en marcha para disponer de la energía eléctrica de acuerdo con el uso que se haya estipulado sea para consumo propio o para venta al operador de red que aplique.

Dentro de las etapas enunciadas en las Tablas 1 y 2 se encuentran actividades específicas marcadas correspondientes al área EPC civil, las cuales constituyen el campo de acción de las prácticas académicas siendo éstas objetivo de análisis. Con el fin de aplicar las metodologías PERT/CPM y Gantt a un caso de estudio, se realizó la caracterización bajo el marco normativo

---

nacional de las actividades que se deben desarrollar para posteriormente realizar el respectivo cronograma y la medición de tiempos, como se muestra a continuación.

### **6.1.2. Viabilidad Técnica**

Se debe verificar en sitio la información del proyecto que ha sido recopilada a través de las negociaciones. Se realiza a través de visitas acompañadas por profesionales forestales y civiles con el fin de enviar a las áreas respectivas de diseño las cuales se encargan de simular y dimensionar la planta y la estructura que se usará en el proyecto.

**6.1.2.1 Visitas Para Estudios Geotécnicos y Topografía:** Inicialmente se debe gestionar y dirigir la comisión topográfica que delimite la localización del proyecto, el cual debe ser identificado en cuanto a área (ha) y pendiente (%). En esta visita es necesario consignar en planos las obras antrópicas o naturales, levantamiento de curvas de nivel, árboles, cuerpos de agua, puntos de conexión y fotogrametría de la zona. Según la empresa pfNEXUS (2023), la cual tiene experiencia en la construcción de más de 200 proyectos solares fotovoltaicos, la topografía del terreno debe ser plana, con pendiente máxima idealmente de  $11^\circ$ , sin árboles o con una cantidad máxima definida por la empresa misma en acuerdo con la Autoridad Ambiental correspondiente, en el caso de Colombia aplica la Corporación Autónoma Regional (CAR) del departamento. Adicionalmente se debe evaluar que el proyecto no esté ubicado sobre una llanura inundable para evitar dañar los equipos. En la representación cartográfica se debe indicar la siguiente información: escala, norte, simbología, grilla de referencia indicando coordenadas y sistema de referencia

---

*Marco normativo: Los trabajos topográficos deberán estar georreferenciados al sistema de referencia MAGNA SIRGAS, según Resolución 471 de 2020 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.*

De manera simultánea o posterior al levantamiento topográfico se debe gestionar y enviar una comisión que realice el estudio geotécnico y de suelos al terreno. Este servicio se requiere para la identificación de la geología regional y local del proyecto, el perfil estratigráfico del suelo y el posterior diseño de las estructuras del proyecto. El profesional geotecnista debe recomendar dimensiones para la cimentación de pilotes y la profundidad de hincado para perfiles de soporte a los paneles solares, se debe evaluar la capacidad portante del suelo mediante ensayos de corte y compresión, además de los demás protocolos de caracterización. Se recomienda realizar pruebas químicas al suelo para determinar su índice de corrosividad y su agresividad ante los perfiles metálicos, y proponer el respectivo impermeabilizante en el caso que se requiera.

*Marco normativo: Los trabajos por concepto geotécnico deberán estar regidos por el Título H de la norma NSR-10. Adicionalmente para el alcance por corrosividad se debe seguir la norma ISO 14713.*

### **6.1.3. Viabilidad Financiera y Licencias:**

**6.1.3.1. Obtención de licencia de construcción y permisos ambientales:** Se deben solicitar en las alcaldías municipales y a las CAR correspondientes la expedición de licencias de construcción para las obras que lo requieren como cerramiento y subestación de transformación. El ingeniero civil encargado debe proveer las memorias de cálculo

---

correspondientes, planos de ubicaciones y disposición de obras. Es necesario indicar la localización político-administrativa del proyecto a nivel regional, provincial y comunal.

*Marco normativo: El trámite y expedición de la licencia se rige de acuerdo con lo estipulado en el ARTÍCULO 2.2.6.1.1.7 DECRETO 1077 DE 2015.*

#### **6.1.4. Diseño Civil y Estructuras**

**6.1.4.1 Análisis de Estudio de Suelos:** Se deben realizar de acuerdo con lo mencionado en el numeral 6.1.2.1 y su análisis comprende el diseño para la profundidad de hincado de los perfiles metálicos. Se realizan perfiles con la superposición de la estructura metálica de los paneles solares en el terreno natural y se analiza la gradación del suelo, su plasticidad y demás propiedades para determinar su posterior uso como material de lleno para zanjas y vías.

*Marco normativo: Remitirse a Título H norma NSR-10, ART 311-13 del INVIAS*

**6.1.4.2 Estudio hidrológico y de inundabilidad:** Es esencial para comprender y gestionar el comportamiento del agua en los proyectos, como sistemas de drenaje y control de inundaciones. El análisis hidrológico se enfoca en estudiar factores como precipitaciones, escorrentía y evapotranspiración para comprender el ciclo del agua en la respectiva cuenca hidrográfica. Por otro lado, el análisis hidráulico se centra en el movimiento del agua en canales, ríos, tuberías y otros elementos, calculando el flujo, las velocidades y las presiones para diseñar la infraestructura hidráulica en caso de que se requiera.

---

*Marco normativo: Para la ejecución de estos estudios e informes es esencial remitirse a los protocolos brindados por el IDEAM.*

**6.1.4.3. Diseño estratégico sobre planos topográficos:** Se realiza la distribución del proyecto sobre los planos topográficos donde se evidencien las curvas de nivel, idealmente cada 50 cm. Se debe identificar la dirección de la pendiente para la correcta ubicación de las estructuras y evitar que estas queden en puntos bajos, también se identifica la existencia de árboles y cuerpos de agua. Estructura según pendiente del terreno, área restringida. Según Marín & Quintero (2017), las distribuciones de las celdas solares se deben realizar teniendo en cuenta el espacio para las vías de acceso y perimetrales, así como de obras temporales teniendo en cuenta las distancias mínimas o áreas restringidas que se deben respetar. El diseño sobre la topografía georreferenciada es una herramienta donde se tienen dimensiones y distancias reales plasmadas en campo, además da una vista global sobre la necesidad de generar nivelaciones del terreno mediante cortes y llenos.

*Marco normativo: Remitirse a la Resolución 471 de 2020 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Para la distribución de paneles el área eléctrica debe regirse por lo estipulado en la RETIE.*

**6.1.4.4 Diseño de cerramiento, cerco eléctrico y centro de control:** Se realizará un vallado perimetral para el conjunto de instalaciones fotovoltaicas donde se abarquen todos los elementos del proyecto. En algunos casos, y dependiendo de la seguridad de la zona, se puede elegir si cerrar solo el proyecto o todo el lote adquirido, también la

---

implementación de cerco eléctrico se debe evaluar bajo criterios propios de la empresa.

En general el vallado perimetral debe ser en malla metálica, con una altitud mínima de 2 metros, postes espaciados cada 2.5 metros y rematada en la parte superior con alambre de púas. Se requiere de puertas de dos alas con las dimensiones necesarias para el acceso y salida de los vehículos de carga pesada.

*Marco normativo: Las demás especificaciones constructivas para el cerramiento en malla eslabonada se rigen por la NTC 3311-16 y NC-MN-OC08-07 de EPM.*

**6.1.4.5 Diseño de Vías y Accesos:** Se deben diseñar las vías de acceso al proyecto desde la carretera principal que llega al predio, siendo de gran importancia delimitar el camino desde el acceso principal hasta los centros de transformación y otro camino adicional para los recorridos de operación y mantenimiento. Para la correcta identificación, el Servicio de Evaluación Ambiental SEA (2017) indica que cada camino dentro del plano debe describir su longitud en metros, un corte del ancho de la calzada y cuneta, representación cartográfica georreferenciada del trazado, coordenadas, tipo de material de la carpeta de rodadura de acuerdo con la gradación del suelo in situ, y especificar si es una adecuación de vía nueva o existente. El camino principal en el parque fotovoltaico debe contar con un ancho que permita la circulación de vehículos de carga pesada, teniendo en cuenta en el diseño sus radios de giro. Adicionalmente se define la sección de la cuneta para la esorrentía de aguas de lluvia.

*Marco normativo: El dimensionamiento de las vías de acceso se debe realizar de acuerdo con la normativa vigente del INVIAS en el Manual de Diseño Geométrico de Vías*

---

*Capítulo 2. La gradación y delimitación del material que se debe usar se rige por el Artículo 311-13 de la misma entidad y la NC-MN-OC04-01 de EPM.*

**6.1.4.6 Diseño Constructivo Para Zanjas de Cableado:** Las canalizaciones que comunican las estructuras de los paneles con los inversores de energía, la subestación de transformación y la conexión final a la línea de media tensión tienen especificaciones diferentes pues depende de la cantidad de cables que deben viajar a lo largo del parque solar, los diámetros y cantidad de tuberías, cruces entre canalizaciones, pasos bajo canales de agua o pasos bajo vías transitables. El ingeniero civil encargado debe conocer las profundidades y dimensiones que se deben respetar bajo la normativa legal vigente, adicional de manejar adecuadamente el protocolo de excavaciones y material de relleno para identificar si existe la necesidad de obtener material de préstamo.

*Marco normativo: El diseño de zanjas y la selección de material de relleno para las mismas se debe regir por la norma NC-MN-OC04-01, RS0-002, RS1-004, y lo demás estipulado por la RETIE.*

**6.1.4.7 Definición de Áreas de Circulación y Obras Provisionales:** Normalmente se requiere un lugar para resguardar y mantener las actividades durante la construcción del proyecto, además de destinar zonas de desechos de residuos, almacén de materiales, baños portátiles... etc. A todo lo anterior se le denomina obras provisionales y dependen de la cantidad de personas que van a hacer presencia en el montaje del proyecto y serán retiradas una vez el proyecto entre en funcionamiento. Existen otras obras fijas u obras no provisionales como la subestación de transformación, la cual tiene especificaciones en

---

cuanto a su cimentación y construcción para mantenerse de acuerdo con la normativa colombiana. Las instalaciones de apoyo se deben describir indicando su ubicación georreferenciada, representada en cartografía, y superficie. Además, se deben identificar los recintos destinados a distintos usos si se es o no provisional.

*Marco normativo: Las construcciones permanentes se deben realizar mediante la normativa NSR-10 para garantizar su estabilidad.*

**6.1.4.8 Definición de Movimientos de Tierras y Pendientes:** Teniendo en cuenta la guía del SEA (2017), en el proceso de movimiento de tierra es esencial distinguir las acciones de excavación y de relleno, las cuales deben ser detalladas de acuerdo con los siguientes aspectos: la cantidad de material a ser removido en metros cúbicos (m<sup>3</sup>), el destino del material (ya sea su uso en la obra o su gestión como residuo, o ambas opciones), y las especificaciones del relleno o terraplén mediante un estudio preliminar plasmado en planimetría, incluyendo la cantidad de material requerido en m<sup>3</sup>, el origen y la cantidad del material de relleno. Otros aspectos que se deben tener en cuenta son la maquinaria que se va a utilizar y el personal necesario que debe intervenir.

*Marco normativo: Además de contemplar la necesidad del permiso para movimiento de tierras ante la municipalidad correspondiente, la actividad se debe regir por la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales, principalmente para tener en cuenta la regulación de las acciones que se desarrollan.*

**6.1.4.9 Simulación de Paneles en Terreno Original, Fijaciones Mecánicas:** Mediante la implementación de softwares especializados o cálculos matemáticos y geométricos se

---

debe identificar la generación de sombras por parte de árboles, postes, luminarias, subestación, etc., pues según Orbezo (2010) cuando se tiene un ángulo menor a 20° entre la cima de la estructura de paneles y la cima de cualquier otro objeto se puede generar calentamiento de las celdas por el efecto de las sombras debido a que la energía que debe correr a través de estas experimenta resistencia. También funciona para identificar la profundidad real de hincado de los perfiles metálicos/hincas en el terreno después de haber realizado el movimiento de tierras o descapote necesario.

*Marco normativo: Se debe regir de acuerdo con el software implementado y sus resultados para la identificación de sombras, además del manual y memoria estructural de la hincas compartido por el proveedor de estructura metálica que corresponda.*

### **6.1.5 Ejecución en Campo**

**6.1.5.1 Adecuaciones del Terreno:** De acuerdo con pfNEXUS (2023), el inicio de la fase de construcción implica la preparación del terreno del sitio. Esta etapa consiste en la eliminación de vegetación, escombros y demás que puedan entorpecer el progreso de las obras. En esta etapa el terreno debe quedar nivelado y limpio en toda la zona donde se va a disponer el proyecto. Se debe incluir también la disposición final de todos los materiales provenientes de las operaciones de desmonte y limpieza.

*Marco normativo: El procedimiento y la maquinaria a utilizar se dan de acuerdo con la norma de EPM NC-MN-OC01-02 y directamente del INVIAS Art.200.*

**6.1.5.2 Marcación Topográfica de Vías, Accesos y Cerramiento:** Según el diseño de la planta solar se desarrolla un plano de coordenadas donde se tiene la disposición final de

---

todo tipo de estructuras: cerramiento, inversores, hincas, subestación, cajas de inspección, adecuación de vías, entre otros. El plano debe estar georreferenciado correctamente y se debe comunicar al topógrafo el sistema de coordenadas utilizado para que a su vez se dispongan los equipos topográficos correspondientes. El marcaje debe ser con estaca delgada o puntilla de 5 pulgadas, con cintas de colores o bolsas que demarquen precaución. Este tipo de replanteo se debe realizar bajo el acompañamiento del ingeniero civil residente una vez el terreno esté limpio.

**6.1.5.3 Adecuación de Vías:** De acuerdo con lo mencionado en el numeral 6.1.4.5 para el diseño de las vías de acceso, se deben tener en cuenta las características de la adecuación de la vía y mediante la normativa aplicable verificar si el material existente cuenta con la granulometría aceptada para vías en afirmado. El ingeniero residente debe verificar mediante la planimetría que el alineamiento se esté generando correctamente.

*Marco normativo: El dimensionamiento de las vías de acceso se debe realizar de acuerdo con la normativa vigente del INVIAS en el Manual de Diseño Geométrico de Vías Capítulo 2. La gradación y delimitación del material que se debe usar se rige por el Artículo 311-13 de la misma entidad y la NC-MN-OC04-01 de EPM.*

**6.1.5.4 Levantamiento del Cerramiento:** De acuerdo con lo mencionado en el numeral 6.1.3.4 para el diseño del cerramiento, la empresa encargada de realizar la obra debe mantener la mayor cantidad de líneas rectas estipuladas en la planimetría entregada. Se debe tener sumo cuidado en los lugares donde haya paso de canalizaciones de agua y demás zonas de interés pues se debe realizar reforzamiento en los dados de concreto. Es

---

importante tener conocimiento de los linderos del terreno y las servidumbres tanto por red eléctrica, por ronda hídrica, gaseoductos y demás antes de la instalación.

*Marco normativo: Las demás especificaciones constructivas para el cerramiento en malla eslabonada se rigen por la NTC 3311-16 y NC-MN-OC08-07 de EPM.*

#### **6.1.5.5 Excavaciones Para Zanjas, Estructuras de Inversores, Cajas e Hinchamiento**

**de Pilotes:** La excavación para el soporte de la estructura del inversor, al igual que las demás excavaciones debe tener una profundidad adecuada según la cantidad de paneles a instalar, las condiciones del terreno y la intensidad del viento que se presente en la zona.

La base puede ser de aluminio, acero galvanizado o con tratamiento ante agentes corrosivos, también puede ser de madera o fibra de vidrio. (Marín & Quintero, 2017).

Dichas excavaciones se deben realizar una vez esté el cerramiento del proyecto y haya comenzado la ejecución de las obras de este. Se debe tener claro el direccionamiento de las zanjas y la posterior disposición de cableado para no cometer errores en el orden de ejecución de las actividades. También se debe especificar si los perfiles del suelo serán hincados, con dados de concreto o si llevarán algún tipo de impermeabilizante.

*Marco normativo: Además de lo mencionado para las excavaciones anteriormente se debe tener en cuenta la normativa DIN 50929-3:2018-03 sobre estimación de la corrosión e implementación de impermeabilizantes ante agentes corrosivos.*

#### **6.1.5.6. Construcción de la Subestación de Transformación y Cajas de Inspección:**

Consiste en el diseño estructural de una edificación destinada a ser subestación eléctrica, que consta de un nivel de piso y otro de cubierta, considerando criterios de ductilidad,

rigidez y diseño plástico, abordando cargas permanentes y de uso. La subestación debe estar diseñada contemplando la necesidad de espacio para manipular el transformador eléctrico y demás celdas de manipulación. La ubicación de esta estructura se debe realizar estratégicamente pues se deben respetar las distancias por concepto de generación de sombra, distancia máxima al punto de conexión y debe además situarse en cotas altas evitando zonas propicias a inundación.

Son igualmente obras en concreto las cajas de inspección que se instalan para la comunicación entre zanjas de canalización, las cuales se disponen cada cambio de dirección o cada 40 metros según lo estipulado por la RETIE.

*Marco normativo: La estructura se diseña siguiendo los parámetros del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistencia NSR-10. Las cajas de inspección se diseñan de acuerdo con la norma SB-325 y SB-310.*

**6.1.5.7. Instalaciones Mecánicas y Eléctricas:** Comprende el montaje del torquetubo, el cual es el tubo eje a través de las hincas donde se van a instalar los seguidores solares, ensamble de los paneles y demás elementos electrónicos. Se realiza desde la ingeniería eléctrica la distribución a través de las zanjas de todo el cableado BT, sistema puesta a tierra SPT, comunicaciones y posterior MT una vez construida la subestación.

Luego de todas estas prácticas el parque o minigranja solar quedan dispuestos a pruebas de rendimiento para la posterior conexión y entrega de energía al operador de red.

*Marco normativo: Las instalaciones eléctricas se realizan de acuerdo con la RETIE.*

## **6.2 Análisis de datos**

Se desarrollaron las metodologías PERT/CPM para realizar un análisis interno respecto a el caso de estudio e identificar la ruta crítica actual de la empresa. Adicionalmente se plantearon diferentes diagramas de Gantt pertenecientes a dos empresas asiáticas para generar la comparación en cuanto a las actividades y tiempos de ejecución que las mismas ejercen para sus proyectos, con respecto a la empresa SOLENIUM.

### ***6.2.1 Resultados de la Implementación de la Metodología PERT/CPM***

A continuación, se presenta la Tabla 3 que detalla las actividades necesarias para el diseño y ejecución del área civil del proyecto, sus dependencias (precedencias) y la duración estimada de cada una. Esta información es fundamental para construir el diagrama PERT/CPM, calcular los tiempos más tempranos y tardíos de inicio y finalización de cada actividad, y así determinar la ruta crítica. Mediante la elaboración de esta metodología se busca identificar las actividades que necesitan mayor atención interna dentro de la empresa, analizando las diferentes rutas que pueden tomarse y el tiempo de holgura que corresponda a las demás labores.

**Tabla 3.**

*Método PERT/CPM para la identificación de la ruta crítica y tiempo del proyecto. Elaboración propia, base caso de estudio El Roble, Sucre.*

CÓDIGO	ACTIVIDADES	PRECEDENCIA	DURACIÓN (días)
A	Visitas para Topografía y Estudios geotécnicos	-	10
B	Informes de Topografía, Estudios de suelos e inundabilidad	A	20
C	Diseño estructural de subestación eléctrica	B	7
D	Diseño estratégico sobre planos topograficos: disposición	B	3
E	Licencias: permisos ambientales y de construcción	C	35
F	Diseño de cerramiento y ubicación de obras	D	1
G	Diseño de vías y accesos	F	2
H	Detalle constructivo de zanjas para redes	G	3
I	Definición de áreas de circulación y obras provisionales	G	1
J	Definición de movimientos de tierras y pendientes	H, I	5
K	Simulación de paneles en terreno original	J	2
L	Adecuación del terreno	E, K	12
M	Marcación topográfica para vías, accesos y cerramiento	L	2
N	Excavaciones para cerramiento, zanjas, pilotes	M	12
Ñ	Levantamiento del cerramiento y adecuación de vías	N	20
O	Construcción de la subestación de transformación	Ñ	45
P	Instalaciones mecánicas y eléctricas	O	23

Dentro de la Tabla 3 se identifican las diferentes secciones pertenecientes a diseño y ejecución civil. Inicialmente el flujo determina las actividades de servicios de estudios, planimetría y gestión de permisos necesarios, los cuales funcionan como precedencias para la totalidad de la ejecución de las obras.

Continuando con la metodología para la identificación de las rutas que se pueden seguir en el proyecto, se plantean tres posibles caminos, evidenciando que la ruta crítica es la ruta 1, siendo la única que contempla el ítem E acerca de la solicitud de licencias de construcción y usos del suelo. En la Tabla 4 se muestran las tres posibles rutas y los ítems que cada una de ellas considera.

**Tabla 4.**

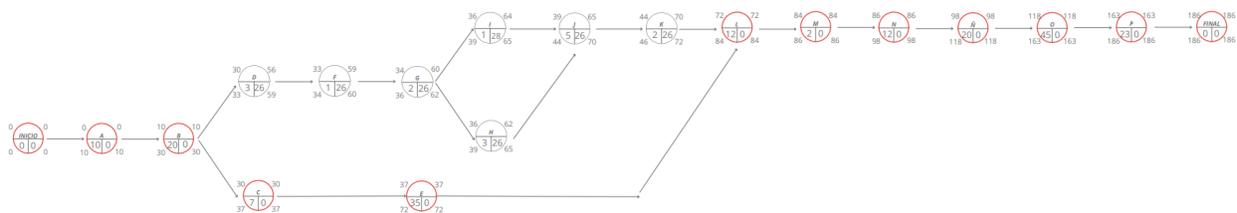
*Rutas posibles y Ruta Crítica. Método PERT/CPM para el caso de estudio El Roble, Sucre. Elaboración propia.*

	Ruta	Duración (Días)
1	A, B, C, E, L, M, N, Ñ, O, P	186
2	A, B, D, F, G, H, J, K, L, M, N, Ñ, O, P	160
3	A, B, D, F, G, I, J, K, L, M, N, Ñ, O, P	158

El tratamiento de datos da resultado a la Gráfica 3, la cual constituye un diagrama de red representativo del método, mostrando en rojo la ruta crítica y plasmando para mejor comprensión visual las precedencias y alternativas a la hora de desarrollar el proyecto. Es de suma importancia el análisis de las holguras de cada actividad pues estas ayudan a identificar las actividades que tienen margen de maniobra y pueden ajustarse sin poner en riesgo el cronograma del proyecto, además de mostrar que las actividades con cero de holgura, aquellas que pertenecen a la ruta crítica, son las que más riesgos presentan en términos de retrasos del proyecto. Un retraso en cualquier actividad de la ruta crítica se traduce directamente en un retraso en la finalización del proyecto.

**Gráfica 3.**

*Diagrama de Red, ruta crítica y ejecución metodología PERT/CPM. Elaboración propia.*



---

### **6.2.1.1. Análisis Interno de la Ruta Crítica.**

Entendiéndose como análisis interno aquel que se realiza con el fin de evaluar el desarrollo del proceso dentro de la empresa SOLENIUM S.A.S, comprende la identificación de las actividades que pertenecen a la ruta crítica del proyecto, determinar las condiciones que definen esta ruta, y analizar la existencia de holguras y tiempos de acción.

### **6.2.1.2 Rutas del Diagrama de Red**

Para cada duración en los tiempos de ejecución se debe tener en cuenta que los primeros 30 días de las actividades A, B corresponden a etapas tempranas de negociación, validación y viabilidad.

**Ruta 1:** Esta ruta comprende 10 actividades y es considerada la ruta crítica con una duración de ejecución de 186 días. En este escenario el diagrama de red se bifurca entre las actividades C y D, siendo la única ruta en abarcar las actividades C y E: Diseño estructural de la subestación eléctrica y Licencia de construcción, respectivamente. Estas dos actividades suman un total de 42 días para su ejecución, mientras que las actividades suplementarias de las rutas 2 y 3 suman hasta 16 días únicamente.

Si suprimimos por ejemplo la actividad C de esta alternativa, obtenemos una duración de 35 días, por lo que podemos afirmar que la actividad E: Licencias: permisos ambientales y de construcción es la actividad determinante que define la condición crítica.

Todas las labores pertenecientes a esta ruta cuentan con una holgura total de 0 días, pues al pertenecer a la ruta crítica cualquier tardanza o modificación de la actividad en cuanto al tiempo afecta la duración total del proyecto.

---

**Ruta 2:** Esta ruta comprende 14 actividades y aunque comprende más actividades que la ruta 1, estas son de menor tiempo y tiene en total una duración de ejecución de 160 días. En esta ruta la actividad que marca la diferencia es la H: Detalle constructivo de zanjas para redes, la cual cuenta con una holgura de 26 días pues su actividad siguiente es la definición de movimiento de tierras. Dentro del trabajo de oficina se puede tomar este tiempo para realizar correcciones y modificaciones dirigidas por parte de la ingeniería eléctrica de la empresa.

Las actividades diferenciales en cuanto a la ruta crítica son netamente de la fase de diseño y corresponden a planimetría, las cuales cuentan todas con holguras superiores a 25 días. El tiempo que se toma en la expedición de las licencias de construcción se puede emplear completamente en el adelanto y modificación de planos.

**Ruta 3:** Esta ruta comprende igualmente 14 actividades y tiene una duración de ejecución de 158 días. En esta ruta la actividad que marca la diferencia es la I: Definición de áreas de circulación y obras provisionales, la cual cuenta con una holgura de 28 días. Estos 2 días adicionales de holgura corresponden al tiempo de ejecución de la actividad H la cual se puede realizar en simultáneo. Al igual que en la ruta anterior se concluye que la holgura de todas las actividades diferenciales respecto a la ruta crítica es amplia, lo que indica que hay un desbalance en cuanto al tiempo de espera y transición de diseño a ejecución civil de las minigranjas solares.

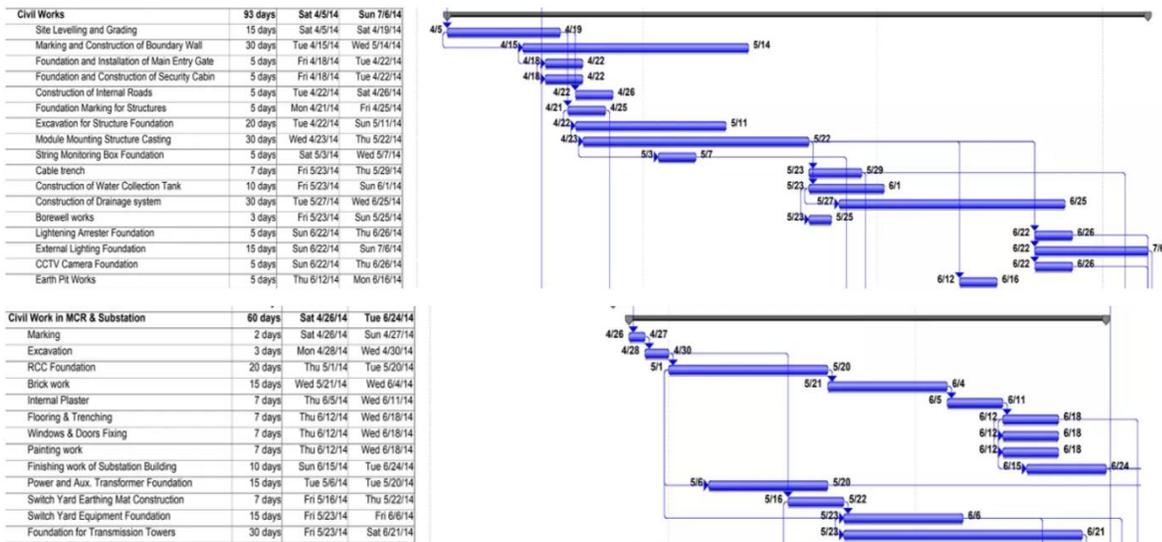
### ***6.2.2 Resultados de la Implementación del Diagrama de Gantt***

En la Gráfica 4 se presenta un diagrama de Gantt desarrollado en MS Project para el proyecto de diseño y construcción de una minigranja solar entre 1 MW y 10 MW en la India

(GENSOL, 2014). Este diagrama no solo muestra la duración, las dependencias y la ruta crítica del proyecto, sino que también sirve como base para realizar una comparación de tiempos y actividades respecto al caso de estudio específico que estamos desarrollando.

**Gráfica 4.**

*Diagrama de Gantt GENSOL, India. Calendario de implementación. MS Project - Implementation Schedule (GENSOL, 2014)*



Las minigranjas solares, definidas por su capacidad de producción de hasta 1 MW, representan una escala de proyectos que, aunque relativamente pequeños en comparación con las grandes plantas solares, requieren una planificación y ejecución precisas. Para este análisis, se plantea relacionar y comparar el cronograma de implementación de las obras civiles de nuestro proyecto solar con un estándar de referencia.

Según Solar Mango (2015), los proyectos solares con una capacidad entre 1 a 5 MW suelen tardar entre 4 y 5 meses en completarse. Esta referencia temporal sirve como base para evaluar y comparar el cronograma específico de nuestro proyecto para el caso de estudio de la

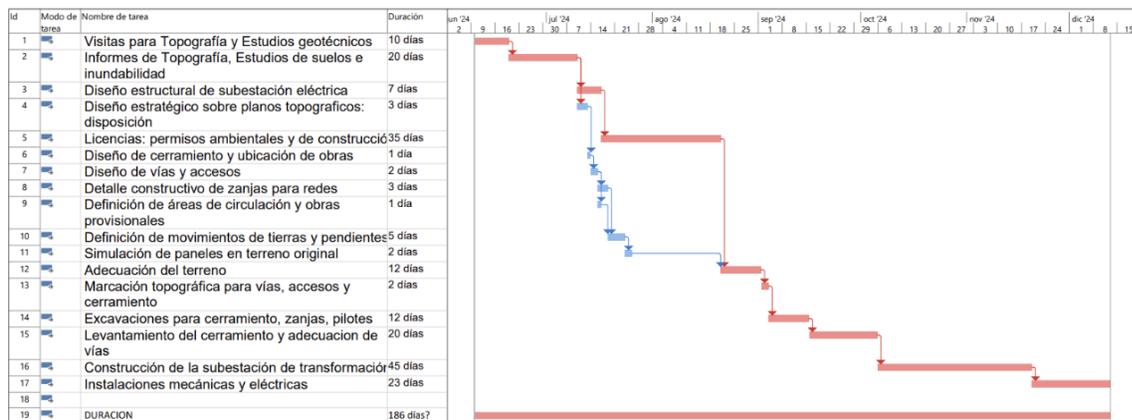
minigranja solar El Roble, Sucre de 1 MW de generación, obteniendo un diagrama de Gantt específico tal como se describe en la Gráfica 4.

### 6.2.2.1 Desarrollo de Diagrama de Gantt para el Caso de Estudio

Para realizar la comparación de actividades y tiempos respecto a la Gráfica 4 donde se desarrolla el diagrama de Gantt elaborado por GENSOL, se plantea la Gráfica 5 donde se muestra el diagrama de Gantt desarrollado en MS Project para el diseño y construcción del caso de estudio. Al comparar el cronograma de SOLENIUM con el de GENSOLAR, podemos evaluar nuestra eficiencia actual, identificar áreas donde se deben aplicar mejoras y así disminuir la brecha con respecto a la industria internacional. Con este enfoque, SOLENIUM puede optimizar la gestión de sus proyectos, garantizando la finalización exitosa dentro de los plazos y presupuestos previstos. Para el diagrama de Gantt la ruta crítica del proyecto se plasma de una manera más didáctica la cual corresponde a las barras de color rojo y está directamente determinada por la expedición de las licencias de construcción y permisos ambientales.

#### Gráfica 5.

*Diagrama de Gantt y ruta crítica, caso de estudio minigranja El Roble, Sucre. Elaboración propia.*



### 6.3 Desarrollo de la Metodología de Comparación.

El propósito de este análisis es evaluar si la duración total del cronograma de nuestro proyecto está dentro del rango de 4 a 5 meses. Cualquier desviación significativa será analizada para identificar las causas y proponer soluciones.

- Desglose de las actividades GENSOL:** Se desarrolla la Tabla 5 para evaluar la aplicabilidad y cumplimiento de las actividades de la empresa SOLENIUM de acuerdo con las actividades de la gráfica 4 de GENSOL.

**Tabla 5.**

*Actividades desarrolladas por SOLENIUM respecto a GENSOL. Elaboración propia*

CIVIL WORKS GENSOL	Aplicabilidad
Site leveling and grading	Trabajos ejecutados por área civil
Marking and construction of boundary wall	Trabajos ejecutados por área civil
Foundation and installation of main entry gate	Trabajos ejecutados por área civil
Foundation and construction of security cabin	Trabajos no ejecutados
Construction of internal roads	Trabajos ejecutados por área civil
Foundation marking for structures	Trabajos ejecutados por área civil
Excavation for structure foundation	Trabajos ejecutados por área civil
Module mounting structure casting	Trabajos ejecutados por área eléctrica
String monitoring box foundation	Trabajos ejecutados por área civil
Cable trench	Trabajos ejecutados por área civil
Construction of drainage system	Trabajos próximos a implementar
Construction of water collection tank	Trabajos no ejecutados
Borewell works	Trabajos ejecutados por área civil
Lightening arrester foundation	Trabajos ejecutados por área eléctrica
External lightning foundation	Trabajos ejecutados por área eléctrica
CCTV camera foundation	Trabajos ejecutados por área eléctrica
Earth Pit works	Trabajos ejecutados por área eléctrica
Civil work for substation	Trabajos ejecutados por área civil

Trabajos ejecutados por área civil  
 Trabajos no ejecutados  
 Trabajos ejecutados por área eléctrica  
 Trabajos próximos a implementar

Se evidencia que las actividades ejecutadas por SOLENIUM son en un 50.00% las mismas actividades ejecutadas por GENSOL. El porcentaje restante corresponde a actividades

---

que internamente la empresa ha ejecutado desde el área eléctrica en un 33.33%, un 11.11% son actividades que no se implementan pues se ha evaluado la no necesidad al ser proyectos que no necesitan personal presente después de su puesta en marcha, y el 5.56% actividades que ya se tienen identificadas y se comenzarán a implementar prontamente.

- **Ruta actual del caso de estudio:** Respecto a lo analizado en el ítem anterior, la empresa SOLENIUM cuenta con una ruta clara para la ejecución de las actividades. En el ejemplo de comparación con GENSOL no se incluyen los lineamientos de diseño y validación de los proyectos, por lo que solo se tiene en cuenta la aplicabilidad en cuanto a ejecución, cumpliendo en un 83.33%. La brecha actual se rige únicamente en un 11.11% por actividades que la empresa reconoce y decide no realizar, y un 5.56% de actividades próximas a realizar, obteniendo un 88.89% de aplicabilidad en el desarrollo de actividades ante la industria de este campo a nivel internacional.

Las actividades que corresponden al 11.11% son: Construcción de cabina de seguridad, la cual es sustituida por un campamento provisional dado a que los proyectos son monitoreados de manera remota en SOLENIUM. La otra actividad corresponde a la construcción e implementación de tanques de recolección de agua, los cuales son sustituidos por carrotanques que proveen el servicio y baños portátiles durante la ejecución del proyecto. Para la solución a esta diferencia se propone revisar nuevamente la necesidad de migrar hacia las actividades desarrolladas por GENSOLAR evaluando la diferencia en presupuestos y tiempos.

- **Comparación de actividades:** Las empresas SOLENIUM, GENSOL y Solar Mango tienen enfoques particulares a la hora de consolidar sus actividades para desarrollar los proyectos solares, aunque comparten la mayoría de sus labores principales. La Gráfica 6 muestra un análisis comparativo de las fases de las cuales se encargan y sus respectivas actividades.

SOLENIUM se destaca por su enfoque EPC al incluir las etapas desde concepción y obtención de los predios hasta la puesta en marcha. Difiere de las demás empresas en la construcción de cabinas de seguridad y de tanques para almacenamiento de agua.

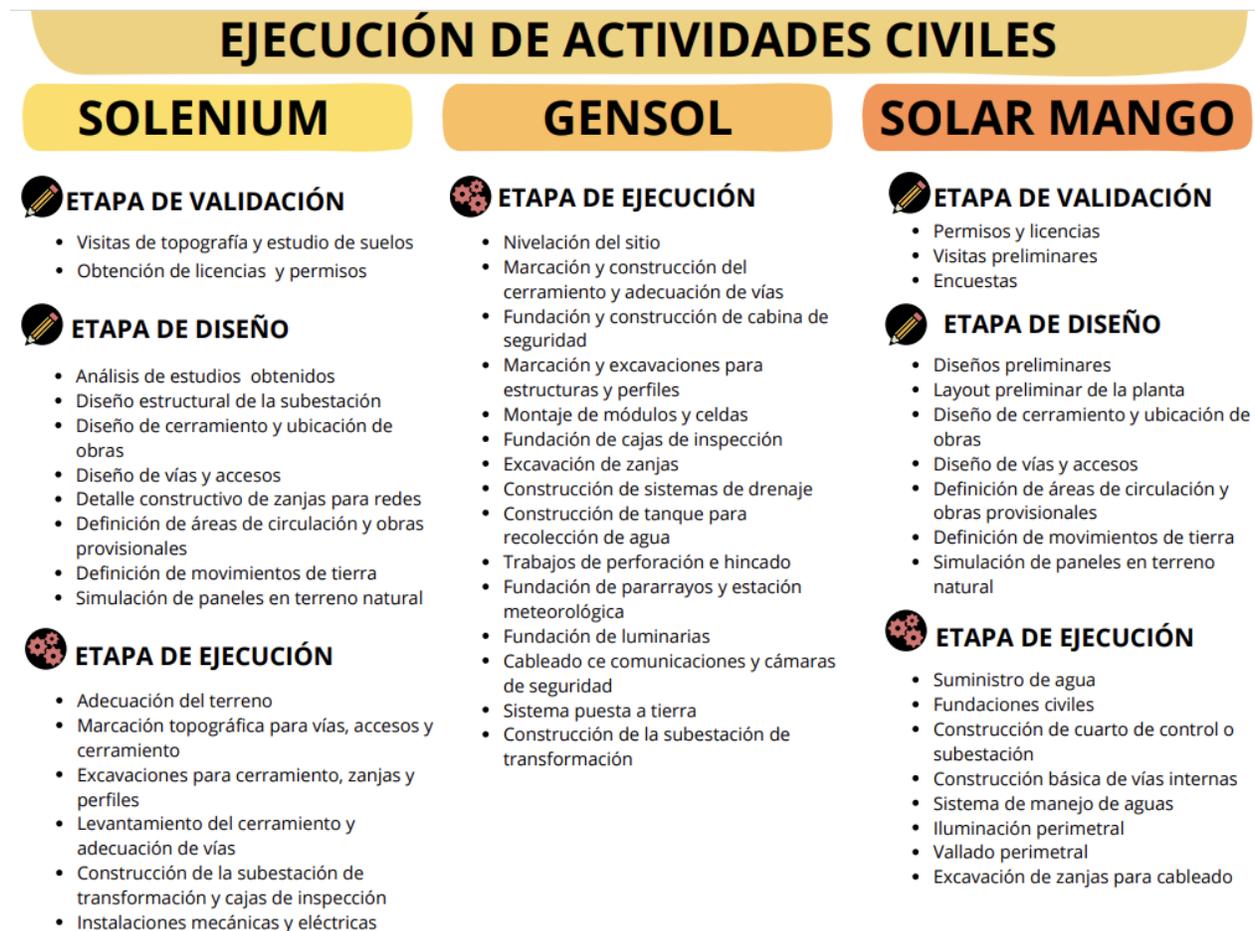
GENSOL se enfoca netamente en la ejecución de los proyectos, pues realizan tareas adicionales a SOLENIUM y Solar Mango, como se había mencionado, son ejecutadas por el área eléctrica. Su proceso de construcción es con menos subdivisiones y se caracteriza por una atención al detalle en ejecución. Su fuerte se debe a que la empresa se dedica a la construcción de proyectos a gran escala. Solar Mango, por otro lado, comparte características con SOLENIUM y se considera como una unión entre las anteriores empresas mencionadas pues consolida todas las actividades que se deben desarrollar.

A pesar de las pocas diferencias en sus métodos y enfoques, las tres empresas comparten un patrón similar en su orden y consecuencia de actividades, asegurando así la calidad y eficiencia en la construcción de minigranjas solares.

## Gráfica 6.

*Definición y comparación de actividades en obra civil de SOLENIUM, GENSOL y Solar Mango.*

*Elaboración propia*



- **Comparación de cronogramas:** Para este análisis es necesario validar las duraciones de actividades específicas como la preparación del sitio, replanteos para marcaciones, adecuación de las vías internas y accesos, entre otros, con los estándares de referencia. El objetivo principal es identificar las actividades que pueden estar tomando más tiempo del esperado y explorar razones y soluciones. GENSOL detalla las actividades únicamente de ejecución, por lo que es necesario

incluir la duración aproximada de las actividades publicado por Solar Mango para la construcción de un proyecto solar entre 1 y 5 MW en la India, para lo cual se tiene prevista una duración de 4 meses desde el diseño hasta la puesta en marcha del proyecto. Ver Tabla 6.

**Tabla 6.**

*Duración de actividades en obra civil por Solar Mango. Adecuación tomada de: Timelines of a MW Solar Project Installation in India, Solar Mango (2015)*

CIVIL WORKS SOLAR MANGO	WEEK			
All approvals and permits for the project				
Preliminary design and site approach				
Slope profile and mounting structure				
Detailed civil engineering				
Approach and water supply				
Civil foundations				
Control room and inverter rooms				
Internal roads				
Water management system				
Yard lighting				
Boundary fencing				
Cable trenches				
Mounting structures	10 weeks after cable trenches			

Para Solar Mango las actividades pueden dividirse en tres fases: Preliminar, diseño de detalle y ejecución, siendo esta la misma concepción que tiene SOLENIUM para sus proyectos, donde se hace una validación inicial, luego un diseño de ingeniería y de disposiciones para finalmente realizar la ejecución.

Inicialmente, para la etapa preliminar se considera que los permisos y requerimientos para desarrollar el proyecto toman 15 días en su gestión y se pueden desarrollar paralelo a los diseños preliminares cuando se realice la aproximación al sitio, es decir cuando se tengan estudios topográficos y se realice la distribución del proyecto, lo cual toma igualmente 15 días. En

---

SOLENIUM se ha determinado que para estas dos actividades se dispone de un tiempo de 35 y 20 días respectivamente. Es en estas actividades, específicamente la solicitud de permisos de construcción, donde se está generando la cualidad crítica y de retraso en el proyecto. Este análisis ya se había desarrollado internamente en el diagrama de red, donde se manifiesta la importancia que se le debe brindar a la expedición de licencias. Esta etapa sobrepasa el límite sugerido.

Para la segunda etapa de diseño de ingeniería, Solar Mango propone 3 semanas, es decir aproximadamente 20 días calendario para la realización de todo tipo de diseños preliminares en cuanto a planimetría e ingeniería de detalle se refiere. En SOLENIUM se ha determinado para estas actividades un total de 17 días calendario, donde incluso varias de ellas se pueden hacer en simultáneo. En esta etapa se cumplen los límites sugeridos.

Finalmente, para la ejecución del proyecto, Solar Mango propone desarrollar las actividades en campo en un lapso de tres semanas, excluyendo el montaje de las estructuras el cual tarda 10 semanas y asumiendo que la planta solar será dirigida por medio de un sistema diferente a una subestación eléctrica. En SOLENIUM se han determinado duraciones entre los 12 y los 23 días para el desarrollo de estas actividades tales como adecuación de vía, construcción de cerramiento, excavación de zanjas para cables, entre otros, lo cual supone igualmente un cumplimiento en los límites propuestos para no sobrepasar los 4 meses en el proyecto.

La subestación de energía tiene un tiempo propuesto por GENSOL de 60 días calendario para su ejecución, mientras que SOLENIUM lo ejecuta exitosamente en 45 días calendario siempre y cuando no haya imprevistos.

En cuanto al desarrollo de las obras de manejo de aguas y drenaje, se tienen contabilizados entre 20 (Solar Mango) y 30 días (GENSOL) para la finalización de estas, por lo que la empresa SOLENIUM debe incluir este tiempo en su cronograma, teniendo en cuenta que

GENSOL (2014) propone en su cronograma realizar la actividad a la par de la subestación eléctrica o cuando está haya sido ejecutada en un 50%.

En general la empresa SOLENIUM cuenta con un tiempo estimado de 186 días, sin embargo, se recomienda sustraer los primeros 20 días correspondientes a la validación y entrega de estudios pues no se encuentra estipulado dentro de la ruta de diseño y ejecución civil de las empresas con las cuales se realiza la comparación. Teniendo este panorama, la empresa tarda aproximadamente 166 días calendario para la realización de sus actividades en el área de la ingeniería civil, lo cual corresponde a 5 meses y medio obteniendo una brecha en cuanto a programación de 15 días, es decir un 9.64%.

---

## 7 Discusión

Realizar el anterior análisis interno utilizando el método PERT/CPM y la comparativa con los diagramas de Gantt de acuerdo con el cronograma de ejecución de empresas pioneras, tiene varias implicaciones positivas para la empresa. Este enfoque permite identificar objetivos clave que son esenciales para la gestión efectiva de los proyectos. A continuación, se detallan las implicaciones para la empresa SOLENIUM S.A.S:

### 7.1. Implicaciones de la Metodología PERT/CPM. Análisis Interno

- **Reasignación eficiente de recursos:** Las actividades con holgura, las cuales corresponden únicamente a la etapa de diseño y planimetría, pueden ser retrasadas sin afectar la fecha de finalización del proyecto. Esto permite reasignar tareas o avanzar en otros proyectos y diligencias incluso hasta cumplir 15 días después de expedida la gestión para obtener los permisos de construcción. También se maximiza la eficiencia pues se evita la sobrecarga de recursos y personal en actividades que no son críticas, reduciendo así costos. Se debe contabilizar y monitorear hasta qué punto la o las personas encargadas en diseñar tienen un buen ritmo de trabajo sin exceder o encarecer sus responsabilidades.
- **Mejora en la productividad:** Al enfocar los recursos en actividades críticas como la expedición de licencias de construcción y permisos ambientales, la empresa puede asegurar que los trabajos se completen a tiempo, mejorando la productividad y eficiencia general del proyecto. La empresa SOLENIUM S.A.S puede, una vez disminuya la brecha de programación mejorando la gestión de permisos, equipararse al promedio internacional en la ejecución de proyectos solares.

- 
- Identificación de puntos críticos: Las actividades correspondientes a estudios preliminares de topografía, diseño estructural de la subestación eléctrica, solicitud de licencias y toda la etapa de ejecución corresponden a la ruta crítica y no tienen margen de error en términos de tiempo. Con esta información, la empresa puede priorizar la supervisión y el control sobre estas actividades para evitar cualquier retraso.

## **7.2. Implicaciones de la Metodología por Diagrama de Gantt. Análisis Comparativo**

- Optimización del cronograma: Basándonos en los resultados del análisis comparativo respecto a las dos empresas que cuentan con trayectoria en Europa y Asia, se han identificado las áreas donde se puede reducir el tiempo sin comprometer la calidad y seguridad del proyecto, lo cual recae únicamente en el tiempo dedicado a la gestión de licencias. Se ha concluido que la empresa SOLENIUM S.A.S en el resto de sus labores se rige al cronograma internacional lo cual es positivo al no generar varios puntos de enfoque de cambio.
- Gestión del proyecto: Se demuestra la necesidad de implementar cuanto antes las obras de drenaje y manejo de aguas dentro del cronograma y presupuestos del proyecto. Si bien estas obras pueden tomar hasta 30 días en su ejecución, es probable que no generen extensión en el cronograma actual de 186 días puesto que puede iniciarse a la par con la subestación eléctrica. Además de esto, las obras de drenaje disminuyen el riesgo por inundación en los proyectos lo cual sería considerado como una mayor pérdida.

### **7.3. Ajustes Propuestos**

Se propone realizar el ajuste de los dos ítems anteriores en la planificación y gestión del proyecto para futuras minigranjas solares, incorporando las lecciones aprendidas de la comparación y análisis pues son las actividades que pueden poner en riesgo el cumplimiento de los cronogramas y la seguridad de los proyectos.

#### ***7.3.1. Gestión de Licencias de Construcción y Permisos Ambientales***

Una de las áreas críticas identificadas es la gestión temprana de licencias de construcción y permisos ambientales. Se recomienda iniciar estos trámites desde una etapa mucho más temprana del proyecto. Esto incluye:

- **Contratación de profesionales capacitados:** Es esencial contar con un profesional capacitado y con experiencia específica en la gestión de licencias y permisos. Este profesional debe estar familiarizado con los requisitos que expiden las diferentes alcaldías, el formulario único nacional, y la documentación requerida por las Corporaciones Autónomas Regionales, además es ideal tener una red de contactos con las autoridades pertinentes para facilitar y agilizar los procesos.
- **Seguimiento:** Implementar un sistema de seguimiento proactivo que permita monitorear el estado de las solicitudes de licencias y permisos en tiempo real, creando un canal virtual específicamente para este campo. Esto asegurará que cualquier problema o retraso se pueda abordar de inmediato, minimizando el riesgo de retrasos en el cronograma general del proyecto.

### ***7.3.2. Obras de Contención y Manejo de Aguas***

Otra área clave es la adecuada planificación y ejecución de las obras de contención y manejo de aguas. Actualmente la empresa se encuentra en el proceso de mejora para esta actividad, teniendo en cuenta:

- **Análisis y diseño preliminar:** Realizar un análisis de las necesidades de contención y manejo de aguas desde la fase de diseño preliminar del proyecto, es decir desde los estudios iniciales de suelos, análisis de riesgos de inundación y diseño de sistemas de drenaje adecuados.
- **Contratación de personal capacitado:** También es esencial contar con un profesional en el área que identifique como las direcciones de los flujos de agua van a afectar las diferentes áreas del proyecto, detectar posibles empozamientos y demás complicaciones por incidencia del agua.

El panorama general en cuanto a las brechas encontradas respecto a la implementación de proyectos solares a nivel internacional es positivo. Las comparaciones indican que son pocas las actividades que requieren un enfoque especial, y las soluciones para estas actividades son bastante alcanzables.

Las brechas identificadas son manejables y no representan desafíos insuperables. Con los ajustes propuestos, las actividades críticas pueden ser gestionadas de manera más eficiente, reduciendo significativamente el riesgo de retrasos y mejorando la seguridad de los proyectos.

---

## 8 Conclusiones

La incorporación de las recomendaciones implementadas en el apartado de discusión en la planificación y gestión de proyectos futuros permitirá a SOLENIUM S.A.S. optimizar sus procesos y minimizar riesgos. Al enfocarse en las áreas críticas identificadas y adoptar mejores prácticas, la empresa podrá asegurar el cumplimiento de los cronogramas y la seguridad de los proyectos solares. En cuanto a los objetivos propuestos para el presente documento, se concluye que:

- Se han diseñado una serie de diagramas y listas de chequeo donde se reconocen las actividades que se deben desarrollar y encaminan a todos los profesionales que pertenecen a la empresa, a comprender la dinámica y la relación entre las actividades.
- Se han propuesto modificaciones para optimizar los tiempos de ejecución y así mismo disminuir la brecha existente, aunque es poca, en cuanto a tiempos y labores respecto al campo energético solar a nivel internacional.
- Las diferentes fuentes bibliográficas y el análisis al respecto durante todo el proyecto han confirmado que se debe mejorar la implementación del marco normativo para cada una de las actividades y así justificar cada decisión que se toma.
- El caso de estudio para la minigranja El Roble cumple en un 88.89% con las características necesarias para la totalidad de actividades a ejecutar y en un 90.36% con el tiempo de finalización para este tipo de proyectos. Los ajustes necesarios para borrar la brecha en estos dos aspectos de tiempo y actividades son sencillos y consta

únicamente de la adición de personal enfocado en gestión y en el aumento de requerimientos en el área de diseño.

- La implementación del marco normativo es un enfoque necesario para la correcta presentación y respaldo de propuestas constructivas para todas las obras civiles. Uno de los factores de retraso puede considerarse en los cambios generados por la implementación tardía de la normativa nacional e internacional.
- Actualmente se tienen en desarrollo los cambios necesarios para disminuir los tiempos de ejecución, identificando que uno de los factores clave es gestionar adecuadamente las licencias y permisos.

---

## Referencias

- Araújo, J. A. V., & Cabré, M. M. (2023). Solar and wind power in Colombia: 2022 policy overview. Stockholm: Stockholm Environment Institute (SEI). <https://doi.org/10.51414/sei2023>, 15.
- Barriga Davila, J. Y. (2023). Coordinación del proyecto EPC de sistemas secundarios para el grupo ISA del proyecto Chincha Nueva y Cahuachi 220 Kv en la provincia de Ica.
- CONTRERAS, C. F. F., Fernando, C., & Sosa Rodríguez, M. A. (2014). El método CPM en procesos constructivos (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO).
- CREG (2021) Resolución 174 del 2021. <https://creg.gov.co/publicaciones/14153/la-creg-actualizo-las-reglas-de-autogeneracion-a-pequena-escala-y-generacion-distribuida/>
- Daza Vargas, M. A. (2023). Los proyectos hidroeléctricos y su aporte la matriz de generación de energía en Colombia.
- Empresas Públicas de Medellín, EPM (s.f). NC-MN-OC08 Cerramientos  
<https://www.epm.com.co/content/dam/epm/proveedores-y-contratistas/RS1-015.pdf>
- Guarin Echavez, D y Sanchez Parra, M. (2021). Estudio de factibilidad para la implementación de energía limpia con paneles solares. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingenierías, Ingeniería Industrial, Barrancabermeja. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12494/34697>
- GENSOL. (2014). MS Projects - 10 MW Implementation Schedule. <https://www.gensol.in/>
- Guerrero, A. L. (2021). Geopolítica de la Transformación Energética Global y Dinámicas Territoriales de la Transición Energética en Sudamérica. Ambiente & Sociedade, 24, e00263.
- Hillier, S. y Lieberman, G. (2010) Modelos de optimización de redes. En Introducción a la Investigación de Operaciones. (371-375) México: McGraw-Hill/Inter Americana Editores.
- IDEAM. (2017). Atlas solar en Colombia. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. (2020). Resolución 471 de 2020. <https://www.igac.gov.co/transparencia-y-acceso-a-la-informacion-publica/normograma/resolucion-no-471-de-2020>
- Instituto Nacional de Vías, INVIAS (2013). Artículo 311-13 Afirmado. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/normatividad>
- Jiménez Trejo, J. (2005). Novedoso procedimiento de ruta crítica enfocado a la construcción. URI: <http://hdl.handle.net/11191/272>

- 
- Laborde, M. A., & Williams, R. (2016). Energía solar. Buenos Aires: Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Lamigueiro, O. (2013). Energía Solar Fotovoltaica. Revista de Obras Públicas, 160(Enero), 174.
- La República. (2023). Empresa colombiana Solenium inicia exportación de tecnología de energía solar a Brasil. <https://www.larepublica.co/empresas/empresa-colombiana-solenium-inicia-exportacion-de-tecnologia-de-energia-solar-a-brasil-3519412>
- Lopez Hurtado, O. E. (2020). Energías renovables como estrategia para la diversificación de la matriz energética de Colombia.
- Maldonado, Y. A. M., Roncancio, G. D. A., & Saavedra, J. D. S. (2019). Evaluación del potencial de energía solar en Santander, Colombia. Prospectiva, 17(2), 1.
- Marín Cano, E., & Quintero Moreno, D. (2017). Metodología para el desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica y eficiencia energética en el sector rural del eje cafetero.
- Marín Jiménez, J. D., & González-Cruz, P. J. (2020). Lecciones aprendidas del diseño de parques solares fotovoltaicos: Un enfoque de las características técnicas. I+ D Tecnológico, 16(1), 54-60.
- Martínez, G. G., Medina, D. M., Borrueal, A. F., Rosell, E. U., Criado, R. A., & Pardal, L. N. (2019). La adaptación del estudio geotécnico para proyectos eólicos y fotovoltaicos: condicionantes geotécnicos y propuestas de optimización. Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente, (272), 30-34.
- Ministerio de Minas y Energía (2008). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE. Bogota, Colombia: Ministerio de Minas y Energía
- Naciones Unidas, UN (2015). Acuerdo de París, Convención Marco sobre el Cambio Climático. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Norma Sismo-Resistente Colombiana, NSR (2010). Título H Estudios Geotécnicos. <https://www.scg.org.co/Titulo-H-NSR-10-Decreto%20Final-2010-01-14.pdf>
- Normas Técnicas Colombianas, NTC (2016). NTC 311-16. Alambre de acero de bajo carbono recubierto con zinc (galvanizado) para armaduras. <https://www.icontec.org/wp-content/uploads/2020/01/CD-2019-12-10.pdf>
- Orbegozo, C., & Arivilca, R. (2010). Energía solar Fotovoltaica. Manual técnico para instalaciones domiciliarias. Green Energy, Costa Rica.
- Organización Internacional de Normalización, ISO (2009). ISO 14713. Directrices y recomendaciones para la Protección frente a la corrosión de estructuras de hierro y acero. <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/04/34/43432.html?browse=ics>

---

pfNEXUS. (2023). A Detailed Guide To The Solar Project Development Process.

<https://www.pfnexus.com/blog/solar-project-development-process>

Ramos, E. (2020). La generación distribuida: El camino hacia la producción descentralizada de electricidad y pautas para su reglamentación. Forseti. Revista de derecho, 8(11), 07-35.

Servicio de Evaluación Ambiental SEA. (2017). Guía para la descripción de proyectos de centrales solares de generación de energía eléctrica en el SEIA. Diciembre de 2017, [https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2018/01/24/guia\\_centrales\\_solares.pdf](https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2018/01/24/guia_centrales_solares.pdf)

Solar Mango. (2015). Timelines of a MW Solar Project Installation in India. Diciembre 2015. <https://www.solarmango.com/2015/12/14/timelines-of-a-mw-solar-project-installation-in-india/>

SOLAR, P. (2020). O que é Energia Solar. Acesso em, 15(03), 202013-2014.