



Análisis de Factibilidad para la Implementación de Centrales de Concentración Solar de Potencia (CSP) en el Departamento de La Guajira.

Proyecto de grado presentado para obtener el título de:

MAGÍSTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Por

Alberto José Bermúdez Arias

Asesor: Guillermo Andrés Jiménez Estévez, Ph.D
Coasesor: Carlos Arturo Saldarriaga Cortés, Ph.D

Tesis sustentada el 14 de diciembre de 2021 a:

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

Comité de Tesis:

- *Asesor:* Guillermo Andrés Jiménez Estévez Ph.D, Profesor Asociado, Universidad de los Andes.
- *Coasesor:* Carlos Arturo Saldarriaga Cortés Ph.D, Profesor Asociado, Universidad Tecnológica de Pereira.
- *Jurado:* Michael Bressan Ph.D, Profesor Asociado, Universidad de los Andes
- *Jurado:* Rodrigo Sebastian Barraza Vicencio Ph.D, Universidad Técnica Federico Santa María

Agradecimientos

“Dios, gracias por darme la oportunidad de vivir y haberme dado salud, inteligencia, paciencia, perseverancia, fortaleza para lograr este sueño. ”.

A mis padres José Alberto Bermúdez y Blanca Arias, por su infinito amor puro y verdadero, por sus esfuerzos incansables para darme siempre lo mejor, por siempre creer en mí y brindarme su apoyo incondicional.

A mi asesor Guillermo Andrés Jiménez Estévez y coasesor Carlos Arturo Saldarriaga Cortés por sus asesorías y orientaciones en el desarrollo de esta tesis.

A Colciencias y a la Gobernación de La Guajira por el apoyo brindado a esta investigación.

Contenido

1	Introducción	3
2	Objetivos	4
2.1	Objetivo General	4
2.2	Objetivos Específicos	4
3	Estado del Arte	5
4	Propuesta Metodológica	6
4.1	Primera etapa - Zonas Potenciales	6
4.1.1	Restricción del terreno	7
4.1.2	Restricción irradiación directa normal (DNI)	7
4.1.3	Restricción pendiente del terreno	7
4.1.4	Restricción parques naturales	7
4.1.5	Restricción área parques eólicos	7
4.1.6	Restricción velocidad del viento	7
4.1.7	Otras restricciones	7
4.2	Segunda etapa - Cálculo del LCOE	11
4.3	Operación y parámetros de una planta CSP-Torre central	11
4.4	Modelo del LCOE para plantas CSP-Torre central	13
4.4.1	CAPEX	13
4.4.2	OPEX	15
4.4.3	Producción de energía	15
5	Impactos social y ambiental	17
5.1	Social	17
5.2	Ambiental	19
6	Resultados y discusión	20
7	Conclusiones y trabajos futuros	22

Lista de Figuras

4.1	Gráfico de la propuesta metodológica	6
4.2	4.2(a) Irradiación directa normal (DNI), 4.2(b) Pendiente del terreno	8
4.3	4.3(a) Área restringida parques naturales, 4.3(b) Acceso a la red	9
4.4	4.4(a) Área restringida por parques eólicos, 4.4(b) Velocidad del viento	10
4.5	Modelo de plantas CSP-Torre central	12
4.6	Generación de energía eléctrica anual durante la vida útil de una planta CSP, en el departamento de La Guajira (11.77, -71.9)	16
5.1	Fases del proceso de la consulta previa	17
6.1	Mapa resultante de las zonas potenciales	20
6.2	Mapa resultante del LCOE mínimo	21

Lista de Tablas

4.1	Parámetros de diseño de la planta CSP-Torre central	12
4.2	CAPEX para una planta CSP-Torre central de 120 MW con 13 horas de almacenamiento térmico	14
4.3	CAPEX de las líneas de transmisión en función de la distancia	14
4.4	CAPEX de las subestaciones eléctricas	14
4.5	OPEX de las líneas de transmisión en función de la distancia	15
4.6	OPEX de las subestaciones eléctricas	15
5.1	Principales impactos sociales	18
5.2	Principales impactos ambientales	19
6.1	Table resumen de los resultados obtenidos	21

Abstract

This thesis presents a feasibility analysis for the implementation of a central tower Concentrating Solar Power (CSP) plant in the department of La Guajira. Potential zones were determined based on the minimum necessary resources such as normal direct irradiation, available land, slope of the terrain, areas restricted by natural parks, areas licensed by wind farms under construction and access to the existing grid. The levelized cost of energy (LCOE) was calculated for the potential zones, the CAPEX and OPEX are a function of the location of the CSP plant. A 120 MW CSP-Central Tower plant with 13 hours of thermal storage was proposed. Some national and international best practices are suggested in reference to the social and environmental impacts that can be caused by the implementation of a CSP plant in the communities of the department of La Guajira. The results revealed areas with potential for the development of large-scale CSP-Central Tower plants. The best area shows a LCOE of 118 USD/MWh.

Keywords: Concentrating Solar Power (CSP), Levelized Cost of Energy (LCOE), Electric power generation, CSP tower plant, Thermal energy storage.

Esta tesis presenta un análisis de factibilidad para la implementación de una planta de concentración solar de potencia (CSP) de torre central en el departamento de La Guajira. Se determinaron las zonas potenciales a partir de los recursos mínimos necesarios como irradiación directa normal, terreno disponible, pendiente del terreno, áreas restringidas por parques naturales, áreas licenciadas por los parques eólicos en construcción y acceso a la red existente. El costo nivelado de la energía (LCOE) fue calculado para las zonas potenciales, el CAPEX y el OPEX están en función de la ubicación de la planta CSP. Se propuso una planta CSP-Torre central de 120 MW con 13 horas de almacenamiento térmico. Se sugieren algunas buenas practicas nacionales e internacionales en referencia a los impactos sociales y ambientales que puede ocasionar la implementación de una planta CSP en la comunidades del departamento de La Guajira. Los resultados revelaron zonas con potencial para el desarrollo de plantas CSP-Torre central a gran escala. La mejor zona muestra un LCOE de 118 USD/MWh.

Palabras Claves: Concentración Solar de Potencia (CSP), Costo nivelado de la energía (LCOE), Generación de energía eléctrica, Planta CSP-Torre central, Almacenamiento de energía térmica .

1. Introducción

Las centrales de concentración solar de potencia (CSP) son tecnologías de generación de electricidad, utilizan como fuente primaria de energía la irradiación solar directa normal (DNI), debido a esto hacen parte de las energías renovables no convencionales, no producen gases de efecto invernadero y emisiones de material particulado [1]. Las plantas CSP tienen la capacidad de almacenar la energía de forma térmica, logrando incrementar su factor de planta, y a su vez entregar energía firme las 24 horas del día. Otra característica a destacar es su fiabilidad y estabilidad a la red, esto es producto de su operación interhoraria, tiempos de arranque rápidos, inercia de la máquina rotativa y control de frecuencia primaria y secundaria [2].

Existen varias tecnologías CSP: Cilindro Parabólicos, Torre de recepción central, Reflectores lineales de fresnel y los Disco parabólicos [1]. Cada tecnología presenta sus ventajas en particular, en esta investigación solo se centrará en la tecnología de torre de recepción central, esto es debido a su capacidad de operar con temperaturas mucho más alta que las demás tecnologías, logrando así una mayor eficiencia en el bloque de potencia donde la energía térmica se convierte en electricidad, esto proporciona un menor costo en la generación de energía [3].

El LCOE de las plantas CSP varía de acuerdo a los recursos disponibles del sitio donde se desea implementar. Es muy importante seleccionar las zonas potenciales basándose en los siguientes criterios: la irradiación solar directa normal (DNI) debe ser superior a $1800 \text{ kWh/m}^2 - \text{año}$, la disponibilidad del terreno que dependerá de la potencia instalada, la pendiente del terreno que debe encontrarse entre el 1%–3%, el acceso a infraestructuras viales, la disponibilidad del recurso del agua y la conexión a la red de transmisión de energía existente [4]. En [5–7] presentan un modelo matemático para el LCOE de plantas CSP-Torre central, los costos de inversión CAPEX y los costos de operación y mantenimiento OPEX están basados en costos locales reales presentados en el departamento de La Guajira.

A nivel mundial, actualmente se cuenta con 6.246 MW de potencia instalada de tecnología CSP [8], a esto se le suma 1.424 MW en construcción y 1.492 MW en desarrollo, sumando en total 9.162 MW de potencia instalada en tecnología CSP en los próximos años [9,10]. En Colombia, actualmente no cuenta con ninguna planta CSP a gran escala en su matriz energética. No existe mucha información sobre estudios de factibilidad para la implementación de la tecnología CSP en Colombia, incluso solo la empresa Promigas S.A E.S.P ha realizado un estudio de viabilidad para sustentar el desarrollo de la tecnología CSP en instalaciones comerciales e industriales en Colombia, según un anuncio de licitación publicado por la Agencia de Desarrollo y Comercio de Estados Unidos (USTDA) [11,12]. Otro principal obstáculo es su alto costo de inversión en comparación con las demás tecnologías renovables. Es por eso que esta investigación brinda un análisis técnico-económico en términos del costo nivelado de la energía LCOE para una planta CSP-Torre central de 120 MW con 13 horas de almacenamiento térmico simulada en las zonas potenciales encontradas en el departamento de La Guajira.

El documento está estructurado de la siguiente manera: En primer lugar, se presenta una revisión de la literatura en la sección 3. La metodología propuesta se explica en la sección 4, en esta se mencionan los pasos a seguir para encontrar las zonas potenciales, y el cálculo del LCOE. También se describe la operación de una planta CSP-Torre central. El modelo del LCOE utilizado para plantas CSP-Torre central es detallado en esta misma sección. La sección 5 menciona los principales impactos sociales y ambientales que pueden presentarse en la implementación de plantas CSP-Torre central en el departamento de La Guajira. Los resultados y discusión se visualizan en la sección 6. Finalmente, conclusiones y trabajos a futuro se muestran en la sección 7.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Realizar un análisis de factibilidad para la implementación de centrales de Concentración Solar de Potencia (CSP) en el departamento de La Guajira

2.2 Objetivos Especificos

- Realizar una revisión del estado del arte sobre el análisis técnico-económico de centrales de Concentración Solar de Potencia (CSP).
- Determinar la viabilidad técnica para la implementación de centrales CSP en el departamento de La Guajira.
- Evaluar la viabilidad económica para la construcción de plantas CSP en el departamento de La Guajira.
- Estudiar el impacto social y ambiental que puede generar la incorporación de centrales CSP en las comunidades del departamento de La Guajira.
- Elaborar el análisis integral de la propuesta y presentar las respectivas conclusiones.

3. Estado del Arte

En la literatura, se proponen diferentes tipos de metodologías para la selección de las zonas potenciales, y el cálculo del LCOE en plantas CSP-Torre central. El objetivo de estas es encontrar los lugares más óptimo y el LCOE mínimo.

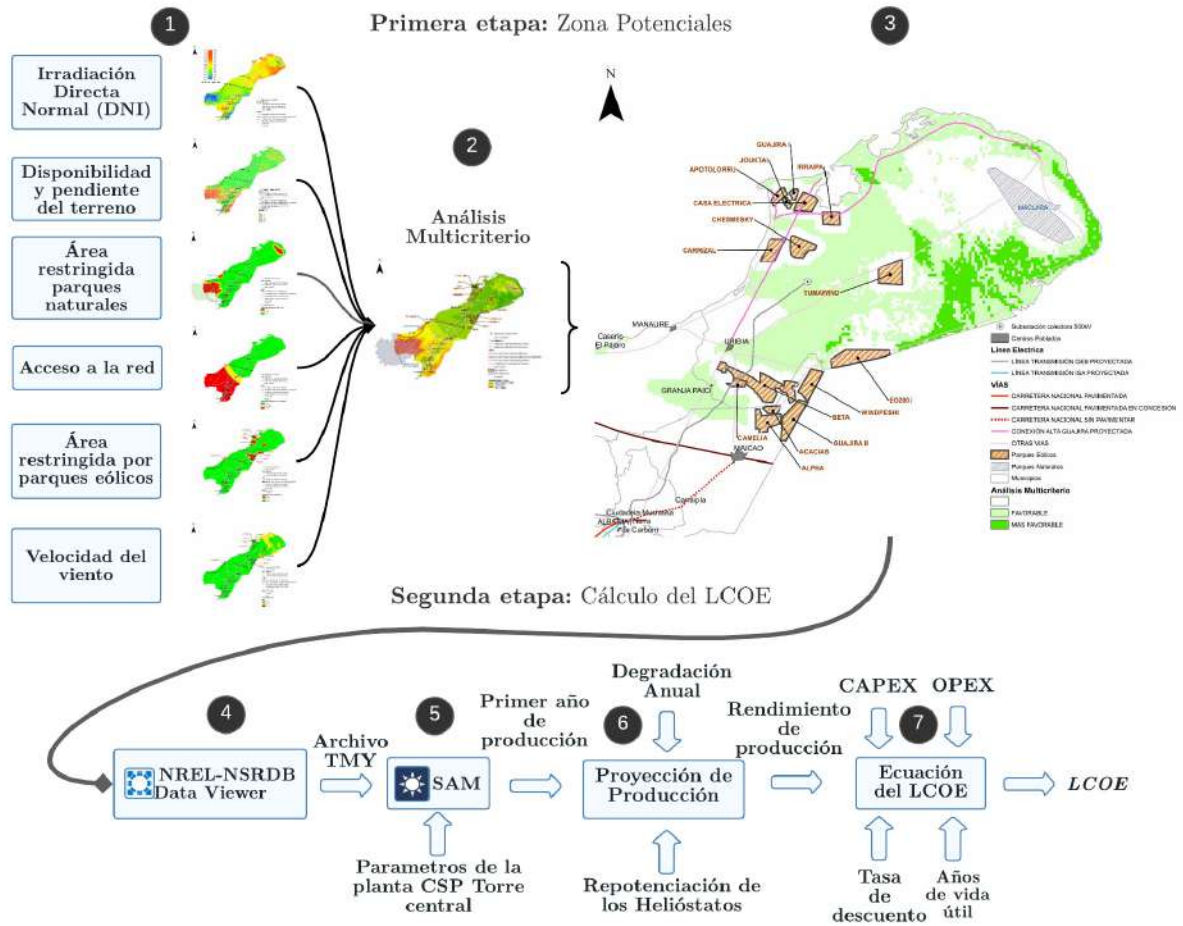
A nivel nacional, en [13], se realiza la selección de la zona potencial, solo apoyándose en bases de datos de irradiación directa normal y acercamiento a la red de transmisión existente. Para el cálculo del LCOE, los costos asociados al OPEX variable por generación son referenciados a nivel mundial, y no a costos reales presentados en el departamento de La Guajira. Otros autores [14], definen el lugar de análisis a elección, no presentan alguna metodología para la selección de las zonas potenciales. El CAPEX y el OPEX son referenciados al proyecto Gemasolar desarrollado en España.

A nivel internacional, en [15], se estudian cinco metodologías para evaluar las zonas potenciales donde se pueda construir y operar plantas CSP en el territorio español. Cuatro de las metodologías analizadas son propuestas por diferentes organizaciones (IDAE, Greenpeace, NREL y DLR), la quinta es propuesta por los autores llamada LRS (Land Constrains, Radiation y Slope). No se considera la estimación del LCOE para los lugares encontrados. Para el cálculo del LCOE para plantas CSP-Torre central, algunos autores [5, 7] proponen un modelo matemático para realizar una proyección del LCOE entre 2010-2050. No se considera la selección de los lugares potenciales. En [16], se propone una metodología para estimar el LCOE y FP (Factor Planta) en todo el territorio Chileno. Es una excelente herramienta para determinar la ubicación más apropiada para instalar una planta CSP-Torre central en términos del LCOE y FP. No se considera las áreas restringidas y ocupadas del terreno.

Los análisis técnico-económico realizados hasta la fecha en el departamento de La Guajira para la implementación de plantas CSP, carecen de una metodología integral para la selección de las zonas potenciales, y la estimación del LCOE. A nivel internacional en la literatura revisada, se denota que la metodología de la selección de los lugares potenciales y del cálculo LCOE, se analizan de forma independiente. Debido a lo anterior, esta investigación propone una metodología para encontrar la zonas potenciales y la estimación del LCOE de una planta CSP-Torre central en el departamento de La Guajira. De esta manera se adapta la metodología LRS presentada por [15] para la selección de las zonas potenciales, agregándole las áreas restringidas por los parques naturales, las áreas licenciadas por la ANLA para la construcción de parques eólicos y la velocidad del viento. Para la estimación del LCOE se dispone de la metodología propuesta por [16], cambiando todos los parámetros de entrada: zonas de estudio, recurso solar, parámetros del diseño de la planta CSP-Torre central, producción de energía, CAPEX y OPEX referenciados a la ubicación de la planta CSP en el departamento de La Guajira.

4. Propuesta Metodológica

La propuesta metodológica se divide en dos principales etapas. La primera etapa consta de los tres primeros pasos para encontrar las zonas potenciales del territorio que se desea estudiar, mientras que la segunda etapa es calcular el LCOE de las zonas potenciales encontradas en la primera etapa.



Figuras 4.1: Gráfico de la propuesta metodológica

4.1 Primera etapa - Zonas Potenciales

La metodología que ha sido utilizada para encontrar las zonas potenciales es la LRS (Land, Radiation, Slope). De acuerdo a [15] esta metodología se basa en las limitaciones del terreno, la irradiación directa normal y el porcentaje de la pendiente del terreno. En esta investigación se agregaron las siguientes restricciones reales presentadas en el territorio bajo estudio que es el departamento de La Guajira, limitaciones como el terreno ocupado por los parques naturales, de igual forma el área actualmente licenciada por la ANLA a los diferentes parques eólicos en construcción, y por último la velocidad del viento.

El primer paso es acudir a los sistemas de información geográfica (SIG), se debe obtener las diferentes capas georeferenciadas de los recursos necesarios: irradiación directa normal, disponibilidad y pendiente del terreno, acceso a la red de transmisión eléctrica existente, área restringida por los parques naturales,

área licenciada por los parques eólicos a ser construidos, y por último la velocidad del viento. El segundo paso es utilizar el software ArcGIS [®] [17] para la gestión de las diferentes capas encontradas, en este se procede a ingresar las limitaciones o restricciones en cada capa correspondiente. El tercer paso es ejecutar un translope de todas las capas con sus respectivas restricciones; es decir, realizar un análisis multicriterio con el software ArcGIS para obtener como salida las zonas potenciales para implementar una planta CSP.

4.1.1 Restricción del terreno

De acuerdo a [15] se debe disponer de un área de 2 km^2 para la implementación de una planta CSP, el área a utilizar dependerá de la potencia instalada [18], para nuestro análisis se referencia el área empleada en el proyecto Cerro dominador de 110 MW construido en Chile, que es de 700 hectareas [2].

4.1.2 Restricción irradiación directa normal (DNI)

El recurso mínimo necesario de irradiación directa normal para que una planta CSP sea económicamente atractiva debe ser superior a $1800 \text{ kWh/m}^2 - \text{año}$ o $5 \text{ kWh/m}^2 - \text{día}$ [4, 15]. Los datos georeferenciados para la capa de irradiación directa normal mostrada en la figura 4.2(a) fueron tomados de SolarGIS [19].

4.1.3 Restricción pendiente del terreno

Una pendiente entre el 1% – 3% es el rango aceptable, siendo el 1% el más favorable económicamente [20]. La capa georeferenciada en la figura 4.2(b) pendiente del terreno fue referenciada de acuerdo a ASF Data Search [21].

4.1.4 Restricción parques naturales

En el departamento de La Guajira cuenta con dos parques naturales: Sierra Nevada de Santa Marta y Macuira [22]. El área ocupada por los parques naturales, en este estudio fueron tomadas como áreas restringidas. La capa observada en la figura 4.3(a) fue referenciada de acuerdo al Sistema de Información Ambiental de Colombia [23].

4.1.5 Restricción área parques eólicos

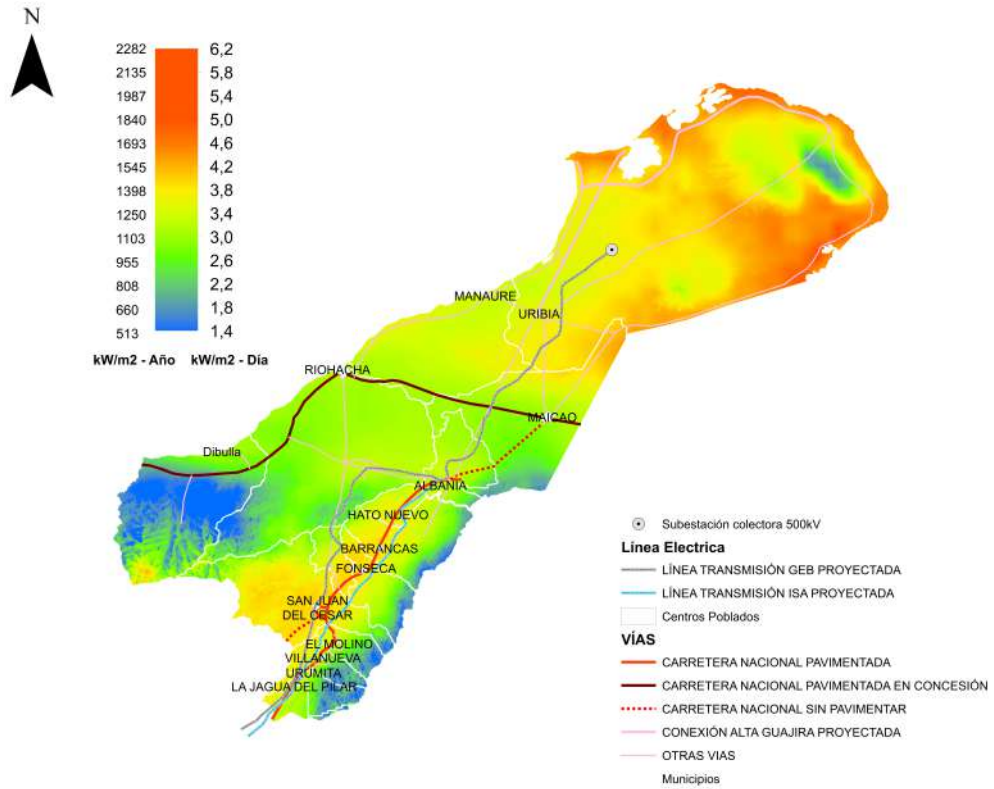
El terreno ocupado por la construcción de parques eólicos ha sido utilizado en este estudio como una área restringida, En la figura 4.4(a) se muestran los polígonos licenciados a la actualidad por la ANLA, es de mencionar que existe una proyección de construir más parques eólicos de acuerdo a [24, 25]; es decir, a futuro habrán más áreas ocupadas. Los polígonos de cada parque eólico fueron referenciados de sus licencias ambientales otorgadas por la ANLA y CORPOGUAJIRA [26, 27].

4.1.6 Restricción velocidad del viento

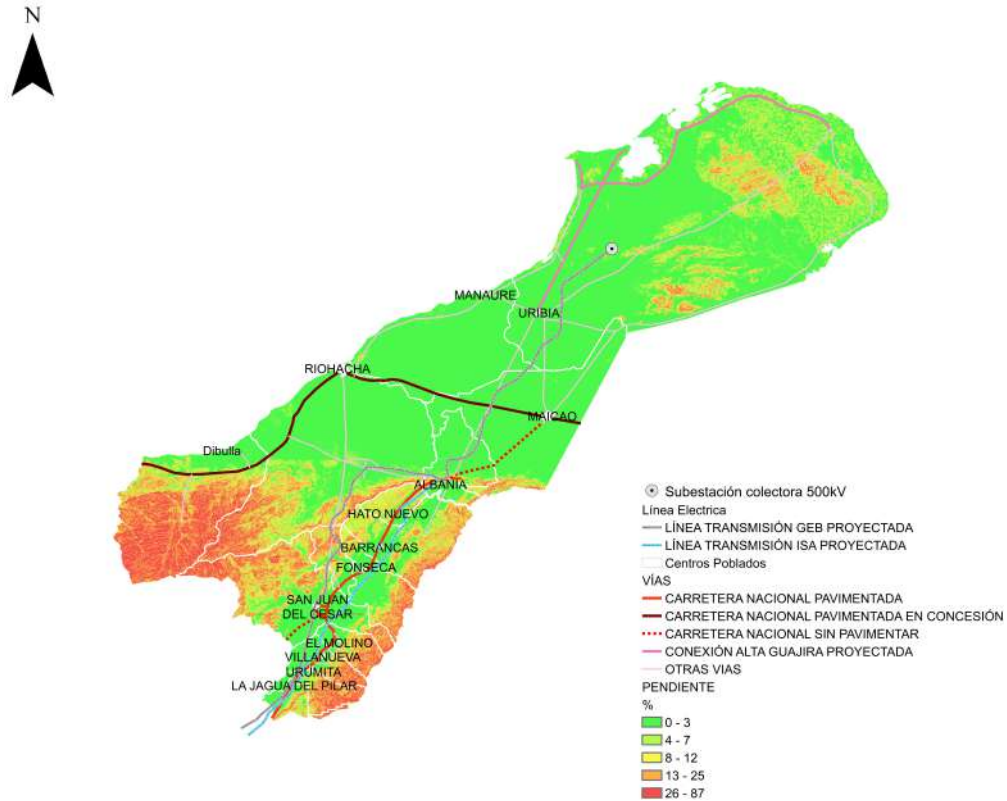
De acuerdo al diseño de los Helióstatos, estos pueden operar en cierto rango de velocidad del viento. De acuerdo a estudios [28, 29] el mejor rango de operación es velocidades inferiores a 10 m/s. Los datos georeferenciados para la capa de velocidad del viento en la figura 4.4(b) fueron tomados de Global Wind Atlas [30].

4.1.7 Otras restricciones

Es muy importante también tener en cuenta las restricciones de la disponibilidad del recurso del agua y el acceso a la red de transmisión de energía existente [20]. Debido a lo anterior se ha tenido en cuenta la subestación colectora como punto de conexión existente [31].

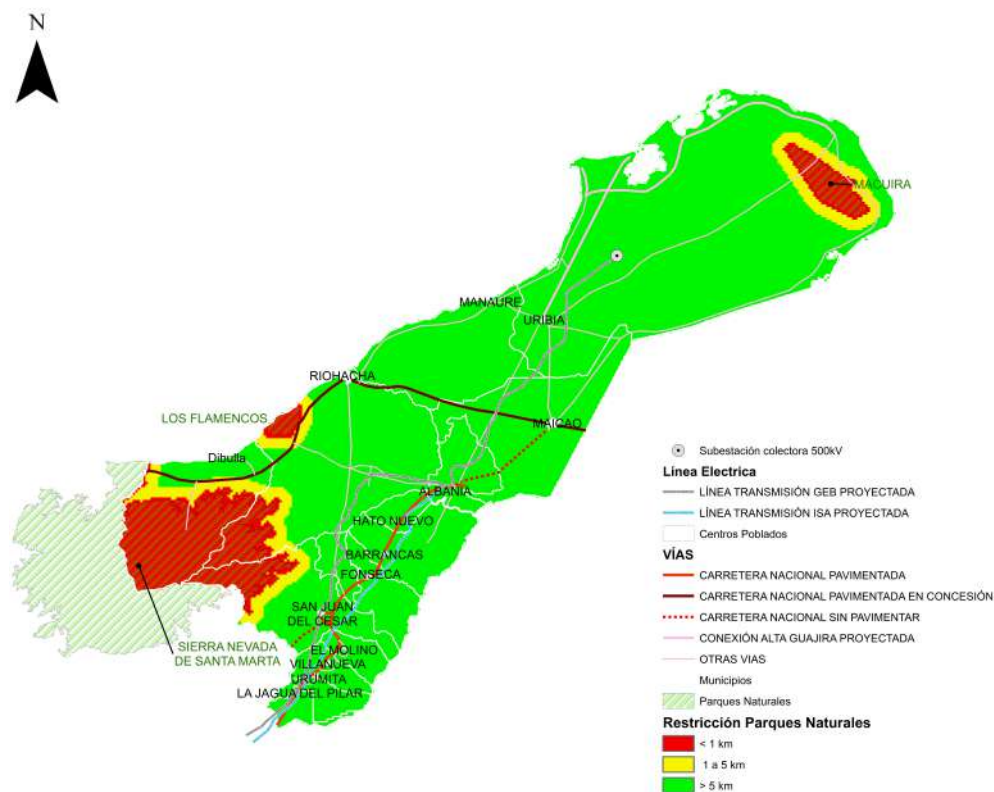


(a)

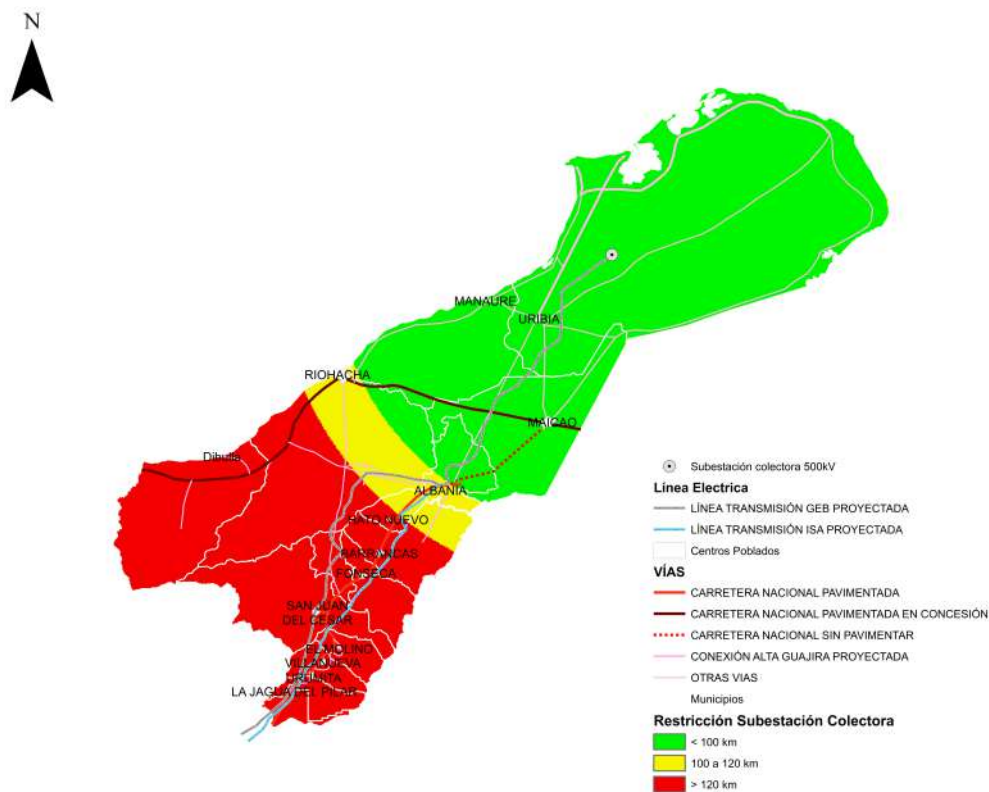


(b)

Figuras 4.2: 4.2(a) Irradiación directa normal (DNI), 4.2(b) Pendiente del terreno

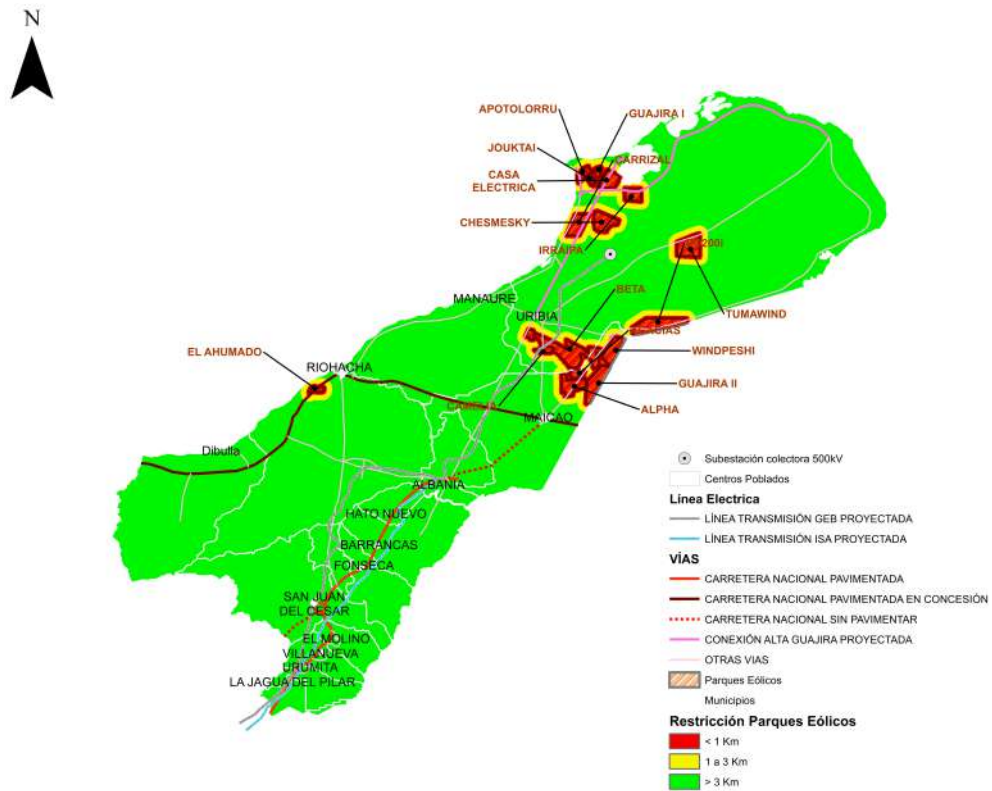


(a)

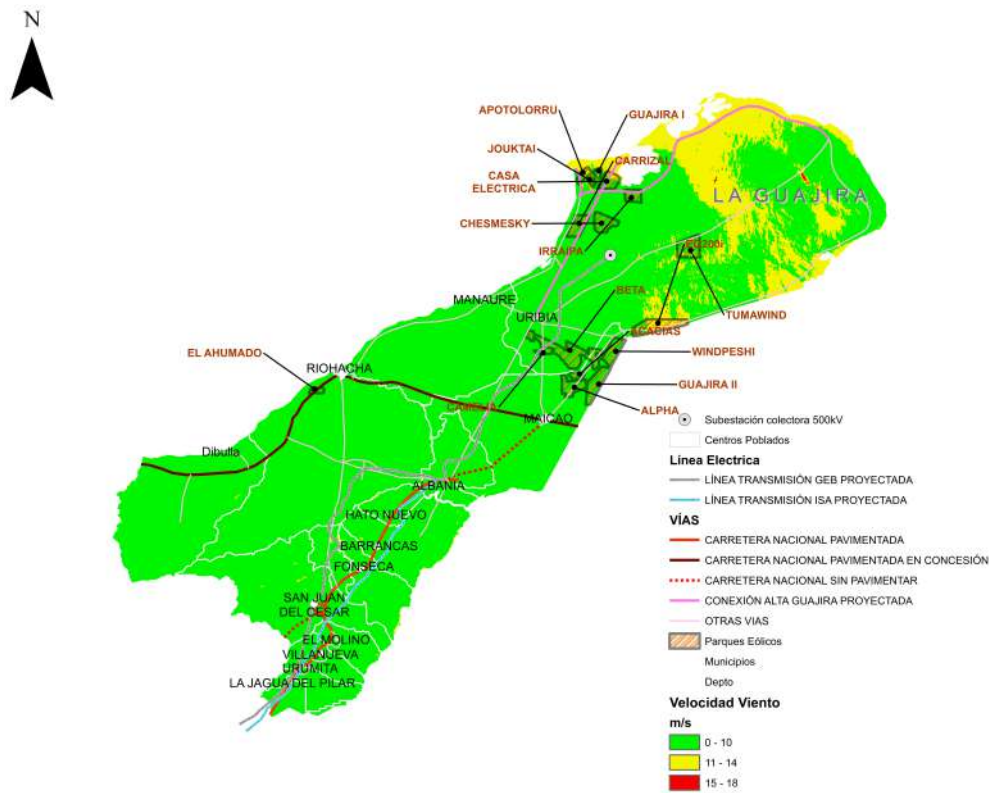


(b)

Figuras 4.3: 4.3(a) Área restringida parques naturales, 4.3(b) Acceso a la red



(a)



(b)

Figuras 4.4: 4.4(a) Área restringida por parques eólicos, 4.4(b) Velocidad del viento

4.2 Segunda etapa - Cálculo del LCOE

En la segunda etapa, se realiza el cálculo del LCOE de las zonas potenciales encontradas en la primera etapa. La metodología utilizada para el cálculo del LCOE es referenciada por algunos autores [16]. Siguiendo los pasos desde la primera etapa, el cuarto paso es obtener los datos del recurso solar y ambientales de las zonas potenciales, esto es realizado mediante archivos de un año meteorológico típico (TMY) conseguidos en NREL-NSRDB Data Viewer [32].

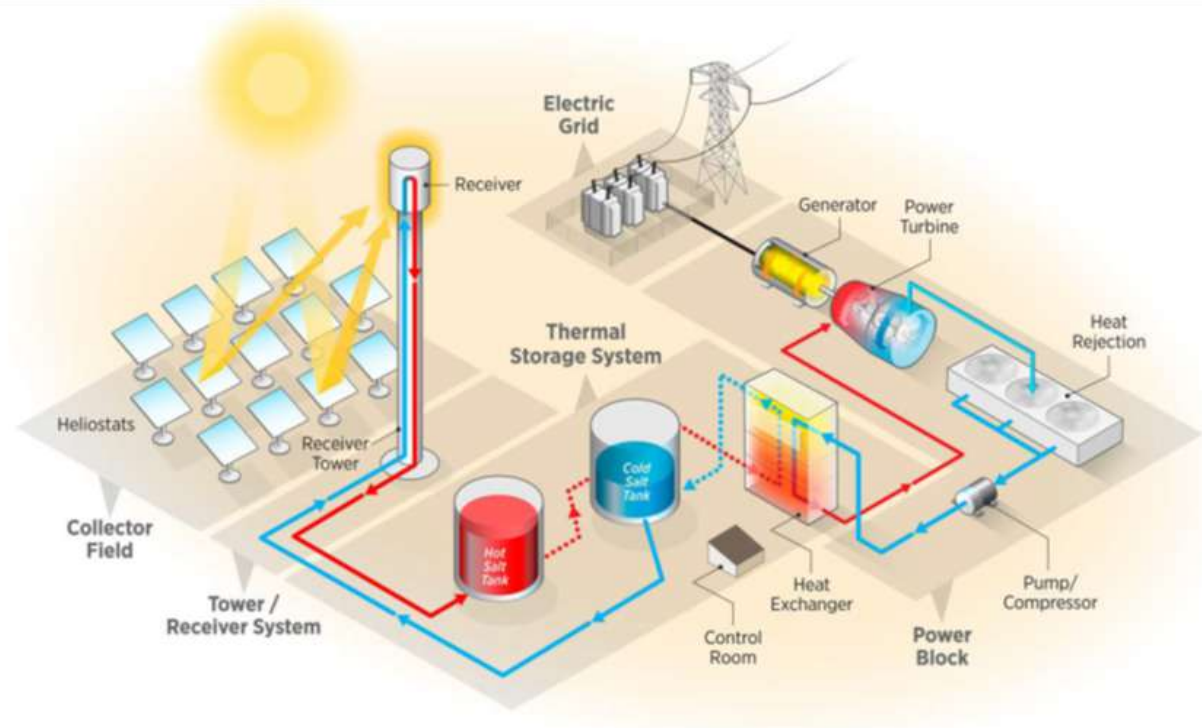
El quinto paso es realizar la simulación en el software SAM Versión 2020 11.29 para evaluar el desempeño del primer año de la planta CSP-Torre central en las zonas potenciales. Para esta simulación es necesario los archivos TMY ya encontrados en el cuarto paso, y los parámetros de diseño de la planta CSP-torre central que se desea evaluar.

El sexto paso es la estimación del rendimiento de la planta CSP-Torre central durante toda su vida útil, para esto se considera una tasa de degradación anual debido a la disminución de la eficiencia de los helióstatos, esto disminuye la generación anual de electricidad. También se tiene en cuenta una repotenciación de los helióstatos entre los años 15 y 19 de operación [16].

Como último paso, el LCOE se calcula sumando el valor presente de los costos de inversión CAPEX y los costos de operación y mantenimiento OPEX, dividiendo lo anterior por el valor presente de la producción de energía eléctrica durante toda la vida útil de la planta CSP-Torre central.

4.3 Operación y parámetros de una planta CSP-Torre central

En la figura 4.5 se muestra una planta CSP-Torre central convencional. Su fuente primaria de energía es la irradiación directa normal (DNI), esta impacta sobre los espejos con seguimiento solar a dos ejes llamados helióstatos, que su función es reflejar la radiación solar hacia un mismo punto llamado receptor solar, ubicado en la parte más alta de la torre solar. Luego, en el interior del receptor solar se hace circular un fluido que absorbe el calor (HTF) de los rayos concentrados, alcanzando temperaturas mayores a 550 °C, estos fluidos son principalmente sales fundidas o aceites sintéticos [33]. El fluido caliente baja por la torre y se almacena en dos tanques especiales que conservan el calor, un tanque frío que contiene sal fundida a 287 °C y el otro tanque caliente a 565°C, esto es llamado el almacenamiento de energía térmica. Posteriormente, el fluido caliente se hace circular por un intercambiador de calor para calentar agua y producir vapor. Este vapor es enviado a una turbina que se encuentra acoplada al rotor de un generador eléctrico, el vapor hace girar la turbina y a la vez el rotor del generador, haciendo que este produzca la electricidad. Esta energía eléctrica producida, es transmitida por las líneas de alta tensión. Por último, las plantas CSP-Torre central son de ciclo Rankie; es decir, el vapor ya utilizado en la turbina se circula hacia el área de refrigeración, en esta etapa el agua vuelve a su estado líquido, y nuevamente esta es inyectada al intercambiador de calor.



Figuras 4.5: Modelo de plantas CSP-Torre central

Fuente: [34]

Table 4.1: Parámetros de diseño de la planta CSP-Torre central

Fuente: [35]

Campo Solar	Valor
Número de Helióstato	10308
Área	1.15 km ²
Torre y receptor solar	
Altura de la torre	165 m
Altura del receptor	40 m
Diámetro del receptor	17 m
Almacenamiento térmico	
Capacidad de almacenamiento	13 h
Temperatura en frío y caliente	287 °C - 565° C
Bloque de potencia	
Potencia instalada	120 MWe

La generación de electricidad de una central CSP-Torre central depende de la irradiación solar directa normal (DNI) disponible y a las pérdidas ópticas (ángulo de inclinación, sombreado, atenuación atmosférica y ensuciamiento), estas pérdidas afectan el DNI que es reflejado por los heliostatos hacia el receptor solar. La reflectividad de los heliostatos se reduce debido a la presencia de polvo en estos, por eso es muy importante determinar una frecuencia de limpieza óptima. En este estudio se estableció una reflectividad de los heliostatos del 90% , y una pérdida de atenuación atmosférica promedio del 2% [36], se asumió este porcentaje debido a la poca información encontrada de estos dos factores (suciedad y atenuación atmosférica) en el Departamento de La Guajira. Las demás pérdidas (Coseno y sombreado) se determinaron para cada ubicación mediante el archivo TMY de NREL-NSRDB Data Viewer [32]. Solar Pilot es la herramienta integrada en el software SAM para determinar las pérdidas ópticas de las CSP-Torre central [37].

Como se mencionó anteriormente las plantas CSP-Torre central, son de ciclo Rankine. Por lo tanto, utilizan el recurso del agua para la generación de vapor, enfriamiento del ciclo de vapor, y la limpieza de los heliostatos. La península desértica de La Guajira es el lugar más seco de Colombia, por lo cual, el uso del agua es limitado. Por lo anterior, la planta CSP-torre central propuesta en este estudio, su condensador será a base de aire (Enfriamiento seco). Al utilizar el enfriamiento seco reduce el uso del agua en 90%, pero su costo de inversión aumenta y su eficiencia en el bloque de potencia disminuye [38, 39].

4.4 Modelo del LCOE para plantas CSP-Torre central

El LCOE es la relación entre el costo de construir y operar una planta de generación de energía eléctrica, y la producción total de electricidad a lo largo de toda su vida útil. Este parámetro es útil para comparar directamente los costos con las diferentes tecnologías de generación de energía. La ecuación (4.1) muestra la expresión matemática para el LCOE para plantas CSP tipo torre de acuerdo a [5]. El CAPEX hace referencia a los costos de inversión de capital, y el OPEX a los costos de operación y mantenimiento (O&M). La tasa de descuento t utilizada es del 9,06% [40], y la vida útil de una planta CSP-Torre central es de 30 años [7, 41]. El LCOE se calcula en base nominal [42].

$$LCOE = \frac{\sum_{i=0}^N \frac{CAPEX_i}{(1+t)^i} + \sum_{i=1}^N \frac{OPEX_i}{(1+t)^i}}{\frac{Producción_i}{(1+t)^i}} \quad (4.1)$$

Donde:

$LCOE$: Costo nivelado de la energía.

$CAPEX_i$: son los gastos necesarios para lograr la operación comercial en un año determinado i .

$OPEX_i$: Costos de operación y mantenimiento O&M representan los gastos anuales i requeridos para operar y mantener una planta de CSP solar durante su vida útil N .

$Producción_i$: Generación de energía eléctrica en el año i

t : tasa de descuento

N : Vida útil de la planta de generación.

4.4.1 CAPEX

El CAPEX necesario para la implementación de una planta CSP-Torre central incluye: La preparación del sitio, construcción del campo solar de heliostatos, la torre solar, el receptor solar, el almacenamiento de energía térmica (TES), el bloque de potencia y las contingencias, estos serían los costos directos. Para los costos indirectos se tiene: El EPC (Engineering, Procurement and Construction) esto es la construcción y montaje de la obra, el costo total del terreno y por último el impuesto sobre las ventas [34].

El CAPEX se determinó basado en los costos actualizados a 2020 de NREL a través de su software SAM (System Advisor Model) Versión SAM 2020 11.29. El costo de la preparación del sitio se estimó en $16 \text{ USD}/m^2$, mientras que el costo del campo solar de heliostatos se ajustó a $122 \text{ USD}/m^2$ de acuerdo a la información proporcionada en el proyecto a ser construido en Chile Copiapó Solar [16, 35]. El costo de la torre solar está en función de; altura de la torre, altura del receptor y altura del heliostato, de acuerdo a esto el costo para nuestra planta en estudio es de 13 MUSD [16]. El receptor solar su costo fue determinado en 63 MUSD . La inversión para el almacenamiento de energía térmica se determinó en $22 \text{ USD}/kWh$. El costo del bloque de potencia se estimó en $685 \text{ USD}/kWe$. El costo de la preparación del sitio y las contingencias se definió en un 5 % del costo total directo.

El costo total indirecto, esta conformado por el costo del EPC, este se estimó en un 10% del costo total directo. El costo total de los terrenos fue definido en 18 MUSD , y por último el impuesto sobre las ventas se determinó en un 5% del costo total directo [41].

Table 4.2: CAPEX para una planta CSP-Torre central de 120 MW con 13 horas de almacenamiento térmico

Fuente: [35]		
Elemento	CAPEX (MUSD)	Porcentaje(%)
Preparación terreno	21	5%
Campo Solar	140	33%
Torre solar	13	3%
Receptor solar	63	15%
TES	76	18%
Bloque de potencia	89	21%
Contingencias	21	5%
Costo total directo	423	100%

El departamento de la Guajira actualmente cuenta con una subestación de 220kV conectada al SIN (Sistema Interconectado Nacional) llamada Cuestecia, ubicada en la zona de la media Guajira. Actualmente, se encuentra en fase de construcción la subestación colectora de 500 kV de acuerdo a la convocatoria UPME 06 -2017 [43]. Este proyecto, su objetivo es lograr transmitir la energía renovable generada en la alta Guajira al SIN, es por eso que el modelo contempla la inversión de una línea de transmisión a un nivel de tensión de 110 kV. Esta inversión esta en función de la distancia entre la subestación colectora y la planta CSP-Torre central, siendo la distancia más corta la más favorable para el costo de la línea de transmisión, y la optimización del LCOE.

Table 4.3: CAPEX de las líneas de transmisión en función de la distancia

Fuente: [44-46]		
Línea (kV)	Proyecto	CAPEX (MUSD/km)
220	Windpeshi-Cuestecita	0,2538
110	Riohacha-Maicao	0,1526

Table 4.4: CAPEX de las subestaciones eléctricas

Fuente: [46, 47]		
Tensión (kV)	Proyecto	CAPEX (MUSD)
220	S/E San Juan	8,9
110	S/E Cuestecita	8,4

En la tabla 4.3 y 4.4 se referencian los proyectos de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas construidos o en fase de construcción en el departamento de La Guajira, se designaron estos con el objetivo de ajustar los costos de inversión a la realidad del Departamento.

4.4.2 OPEX

El OPEX de una planta CSP-Torre central se basa en los costos de operación y mantenimiento (O&M), los recursos humanos área operativa y administrativa, el transporte, el agua necesaria para la limpieza de los heliostatos y producción de la energía eléctrica.

Una planta CSP-Torre central de 110 MW bajo estudio, de acuerdo a [16] requiere 40 empleados, de los cuales 8 trabajan en tareas administrativas y 32 son operadores. Estos laboran 24 horas y 365 días en turnos de 7x7, donde los colaboradores laboran 7 días y descansan 7 días.

El OPEX para la planta CSP-Torre central, se determinó con un costo fijo por capacidad de 66 USD/kW-año, y un costo variable por generación de 3,5 USD/MWh, estos fueron referenciados a los costos actualizados al año 2020 del software SAM (System Advisor Model) Versión SAM 2020 11.29 [34,41,48]. El costo variable por generación en nuestro modelo esta en función del costo del transporte del agua necesaria para la limpieza de los heliostatos y la operación del bloque de potencia. El agua será transportada por camiones cisterna desde el municipio de Uribia que es el centro poblado más cercano en la alta guajira hasta donde estará ubicada la planta CSP. El costo del transporte del agua fue determinado de acuerdo a los precios de la empresa de acueducto del municipio de Uribia (Alcanterillado, Aseo y Energía Eléctrica de Uribia S.A.S E.S.P), este fue calculado en función de la distancia 0,54 USD/m³-km [49].

Table 4.5: OPEX de las líneas de transmisión en función de la distancia

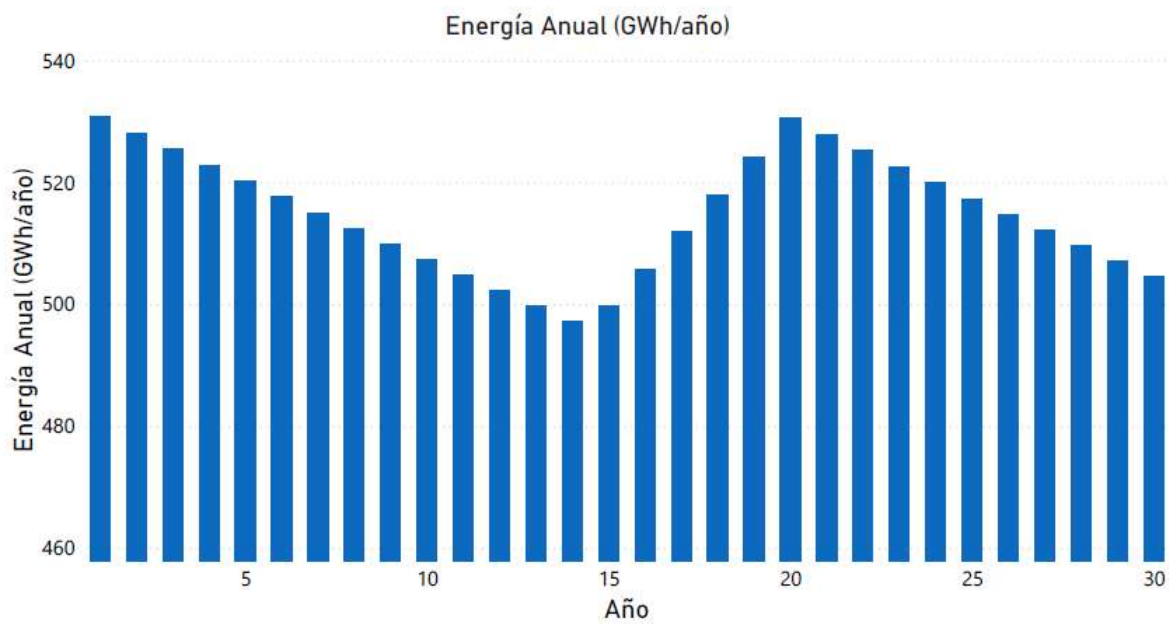
Fuente: [44–46]		
Línea (kV)	Proyecto	(MUSD/km-año)
220	Windpeshi-Cuestecita	0,0045
110	Riohacha-Maicao	0,0012

Table 4.6: OPEX de las subestaciones eléctricas

Fuente: [46,47]		
Tensión (kV)	Proyecto	OPEX (MUSD/año)
220	S/E San Juan	0,31
110	S/E Cuestecita	0,19

4.4.3 Producción de energía

La producción de energía depende del DNI, las pérdidas ópticas y el almacenamiento térmico de energía. Se utilizó el software SAM con el objetivo de obtener la producción de electricidad del primer año de operación, esto se realizó a través de los archivos TMY de NREL-NSRDB Data Viewer [32], los cuales poseen los datos de DNI y condiciones climáticas de la ubicación que se desea simular. Además, se consideró una tasa de degradación anual del 0,5% en referencia a la reflectividad inicial de los espejos. Esta degradación es proporcionada por las condiciones climáticas del lugar y el desgaste del material de la superficie de los heliostatos [50]. En la figura 4.6, se observa la producción de energía eléctrica anual durante la vida útil de la planta CSP-Torre central bajo estudio. En el decimoquinto año, la producción de energía de la planta aumenta, esto es debido a la repotenciación de los heliostatos viejos por el cambio de unos nuevos, este cambio se realiza entre los años 15 y 19 de operación, Anualmente se sustituye el 20% de los heliostatos [16].



Figuras 4.6: Generación de energía eléctrica anual durante la vida útil de una planta CSP, en el departamento de La Guajira (11.77, -71.9)

5. Impactos social y ambiental

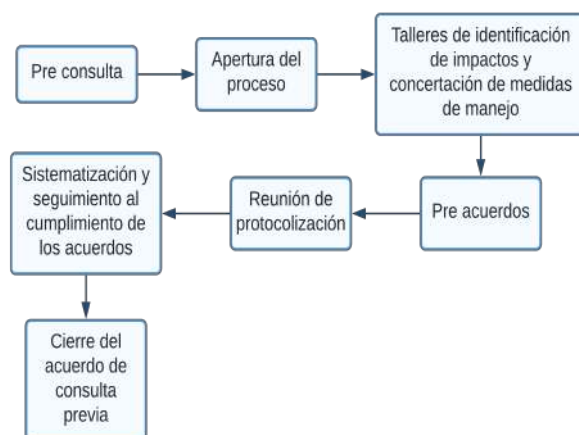
De acuerdo a las zonas potenciales resultante de la sección ??, Los habitantes de estas zonas (Alta Guajira) son las comunidades indígenas Wayúu. El pueblo Wayúu es la comunidad indígena más numerosa de Colombia, pues cuenta con 380.460 personas, esto representa el 20.2 % de los indígenas del País [51]. En esta investigación se nombrarán los principales impactos sociales y ambientales que pueden presentarse en la implementación de una planta CSP tipo torre. Se tomarán como referencia las buenas practicas aplicadas a nivel nacional con los proyectos de parques eólicos en construcción en el departamento de La Guajira, y a nivel internacional los proyectos desarrollados o en etapa de desarrollo de plantas CSP-Torre central en Chile, como Cerro dominador y Copiapó Solar.

5.1 Social

Las comunidades indígenas wayúu, carecen de la cobertura de los servicios públicos en sus rancherías, pues solo el 22,2% de la población cuenta con energía eléctrica. Por otro lado, el 9,4% de la población Wayúu cuenta con servicio de acueducto; el 6,6% con alcantarillado; el 8,7% cuenta con recolección de basura; el 5,7% cuentan con servicio de gas; y solo el 2,4% cuenta con servicio de internet [51]. Para el nivel educativo alcanzado por la población Wayúu de 5 años y más, de acuerdo al DANE [51], el 4,2% de la población tiene un nivel educativo de preescolar, el 41,1% primaria, el 15,9% básica secundaria, el 9,3% media académica, el 0,9% media técnica, el 0,4% normalista, el 1,7% técnica profesional o tecnológica, el 2,8% universitaria, y 23,5% no cuenta con ningún grado de escolaridad. El DANE, calcula el indicador de Necesidades Básicas Insatisfechas - NBI, siendo uno de los indicadores más utilizados en América Latina para medir condiciones de pobreza, el 81,8 % de la población Wayúu carece de Necesidades Básicas Insatisfechas, y el 53,3% se encuentra en situación de miseria [51].

Debido a lo anterior, es muy importante que la implementación de este tipo de proyectos de energías renovables ayuden a mejorar la calidad de vida de las comunidades indígenas aledañas al área de influencia del proyecto. Es por eso que en primera medida se debe cumplir con el requisito de la consulta previa, y garantizar de que por parte de las comunidades exista un consentimiento previo, libre e informado, pues de acuerdo a [25] de esto depende buena parte de la seguridad jurídica del proyecto.

De acuerdo a la directiva presidencial 01 del 2010 - Garantía del derecho fundamental a la consulta previa de los grupos étnicos nacionales, se deben cumplir las siguientes fases en el proceso de consulta previa:



Figuras 5.1: Fases del proceso de la consulta previa

A continuación, en la tabla 5.1 se mencionan algunos de los principales impactos sociales que pueden presentarse.

Table 5.1: Principales impactos sociales

Impactos Favorables	Medidas de Compensación
Información y comunicación con la comunidad	Cumplimiento de la consulta previa [25].
Generación de empleo	Contratación de la mano obra local. Para lograr el nivel de competencia de mano de obra se deben realizar capacitaciones y formaciones específicas requeridas para cada perfil de cargo [52].
Fortalecimiento de la economía	Planes de compras de insumos del proyecto, priorizar realizarlas con proveedores locales. Aumento en la ocupación de hospedaje y restaurantes. Ingresos municipales por concepto de industria y comercio a partir de la entrada de operación comercial de la planta de generación [52].
Impactos Desfavorables	
Alteración del reguardo por demanda de espacio	Reubicación de estas comunidades con todas sus necesidades básicas necesarias [53]
Afectación de la infraestructura vial	Pavimentación y arreglos de las vías [53]
Afectación del patrimonio arqueológico	Monitoreo arqueológico durante la construcción del proyecto . Divulgación de los estudios con la comunidad (charlas, capacitación) [52].
Afectación de la dinámica comunitaria local	Establecer programas de capacitación a las comunidades para la adaptación a la nueva realidad y nuevas condiciones de vida por la presencia del proyecto de generación en su territorio, procurando aprovechar las ventajas y oportunidades que éste ofrece [52].
Potenciación de conflictos con la comunidad por la presencia de personal foráneo	Definición y establecimiento de una estrategia de comunicación entre el proyecto y los diferentes actores sociales e institucionales, que se adapte a las particularidades culturales de la comunidad Wayúu, esto es realizado en la face c) de la consulta previa [25].

5.2 Ambiental

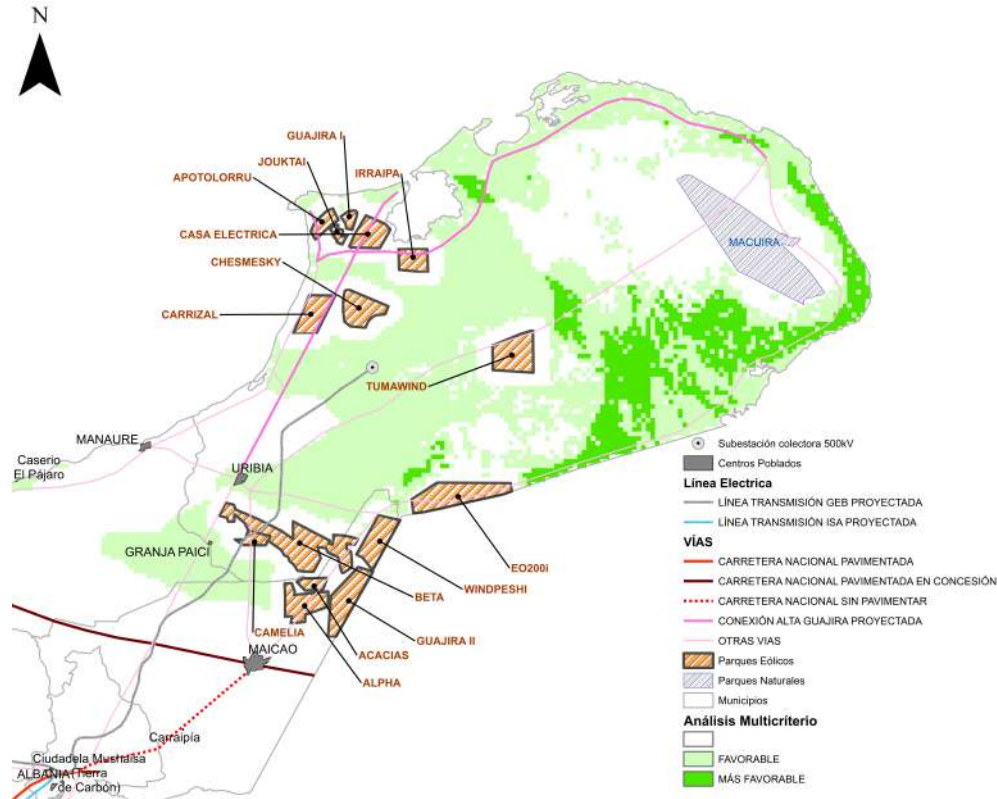
Los potenciales impactos ambientales que pueda generar la implementación de plantas CSP tipo torre, deben ser identificados con la participación activa de las comunidades aledañas al área de influencia del proyecto, esto debe ser realizado en el proceso de consulta previa, en la fase "Talleres de identificación de impactos y definición de medidas de manejo". A continuación, en la tabla 5.2 se mencionan algunos de los principales impactos ambientales que pueden presentarse.

Table 5.2: Principales impactos ambientales

Impactos Favorables	Medidas de Compensación
Generación de energía limpia	Suministrar un porcentaje de la energía eléctrica producida por la planta CSP a las comunidades aledañas al proyecto o Suministrar energía eléctrica por medio de energía solar fotovoltaica en las casas ubicadas en la comunidad, con las acometidas eléctricas [25].
Impactos Desfavorables	
Contaminación del aire por aumento temporal de vehículos en la zona	Pavimentación y arreglos de las vías, mantener húmedas las vías, aplicación de supresor de polvo [54].
Cambios del uso actual y/o potencial de los suelos	Compensación por el uso del terreno, establecer un valor fijo anual acordado con la comunidad por MW instalado, este recurso será destinado para educación, salud, saneamiento básico y demás necesidades [53].
Deterioro de las coberturas vegetales	Restauración de la vegetación en los sectores que serán intervenidos durante la construcción del proyecto [52].
Consumo del Agua	Construcción de una planta desalinizadora con sistema de distribución de agua para las comunidades aledañas al proyecto [25].
Incremento en los niveles de ruido	En caso de comunidades muy cercanas al proyecto se vean afectadas por los niveles de ruido, estas se deben reubicar con todas sus necesidades básicas necesarias .
Alteración del paisaje	Instalación de un mirador habilitado para el acceso público con bancas e informativos respecto a las energías renovables y características de la planta [54].
Muerte de animales domésticos y silvestres por atropellamiento	Capacitación a los transportadores en temáticas ambientales, con el objetivo de prevenir cualquier afectación a la fauna [54].
Muertes de Aves por colisión o electrocución en líneas de transmisión	Implementar un sistema de ahuyentamiento sonoro como medida disuasiva ante eventuales colisiones de avifauna [54]. Implementar un sistema de monitero de colisiones. La línea de transmisión o debe incluir la instalación de "salvapájaros" modelo Birdmark BMAG3 en el cable de guarda para resaltar su visibilidad [55] .

6. Resultados y discusión

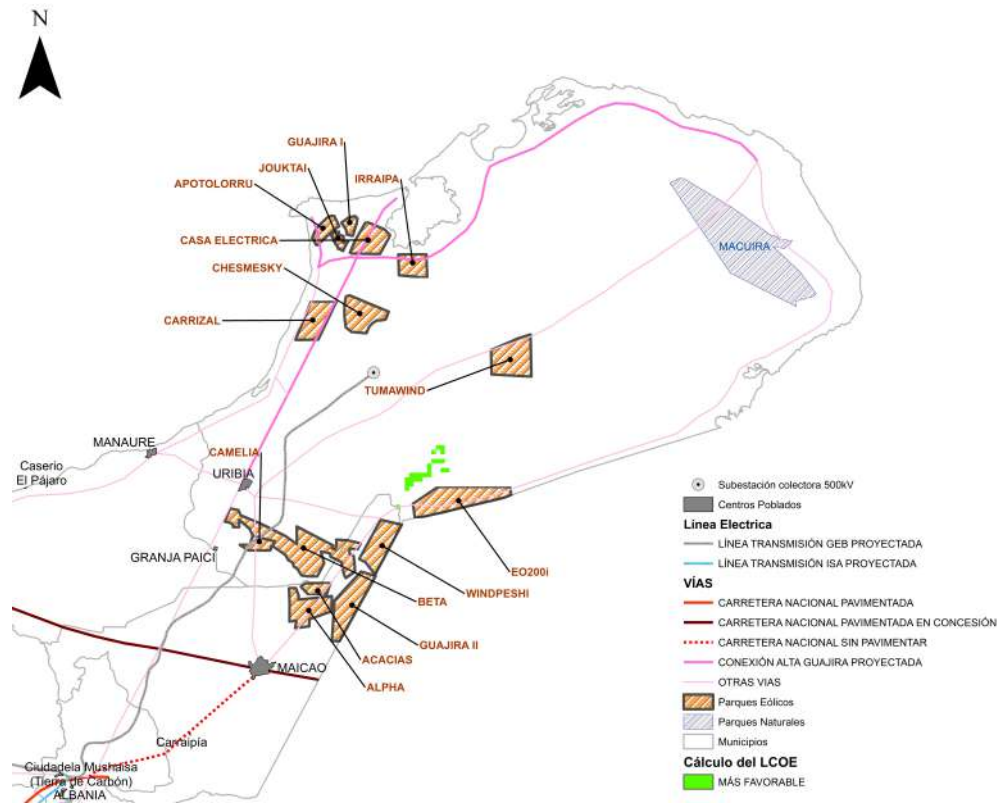
En la figura 6.1, se puede observar las zonas potenciales encontradas en el departamento de La Guajira a través de la metodología propuesta en la sección 4. estas zonas cumplen la restricción mínima de la irradiación directa normal mayor $5 \text{ kWh}/\text{m}^2 - \text{día}$.



Figuras 6.1: Mapa resultante de las zonas potenciales

Las áreas cercanas a la costa, estas presentan muy buena irradiación directa normal, pero debido a su gran potencial en la velocidad del viento que superan los 10 m/s, el análisis multicriterio no las selecciona como zonas más potenciales, debido a la restricción de operación de los heliostatos.

La zona potencial más cerca a la subestación colectora se encuentra aproximadamente a 18 km, y la más lejana aproximadamente a 98 km, mientras que la zona potencial más cerca al centro poblado de Uribia se encuentra aproximadamente a 30 km, y la más lejana a 130 km.



Figuras 6.2: Mapa resultante del LCOE mínimo

En la figura 6.2, se presenta el área resultante con el LCOE mínimo encontrado de 118 USD/MWh, con una tasa de descuento del 9,06%, y 30 años de vida útil. Su ubicación geográfica es (11.77, -71.9). El DNI promedio de esta zona se encuentra en $6,2 \text{ kWh/m}^2 - \text{día}$, y la velocidad del viento en promedio $6,4 \text{ m/s}$.

Esta zona resultante con el LCOE más favorable, es la más cercana a la subestación eléctrica colectora aproximadamente a unos 18 km, de igual forma es la más próxima al centro poblado de Uribia aproximadamente unos 30 km, esto hace que el CAPEX de la línea de transmisión sea el más favorable, igualmente pasa con el OPEX que es variable por generación, este está en función de la distancia del transporte del agua.

Table 6.1: Table resumen de los resultados obtenidos

	Valor	
Energía producida (año 1)	530,9	GWh
Factor Planta	54,30	%
Consumo de agua anual	77,076	m^3
LCOE	118	USD/MWh
CAPEX	516,5	MUSD
OPEX (año 1)	10,4	MUSD
Tasa de descuento nominal	9,06	%
Años de vida útil	30	años

7. Conclusiones y trabajos futuros

- Las Plantas CSP-Torre central requieren para su implementación unos recursos mínimos necesarios como lo es la irradiación directa normal (DNI), disponibilidad y pendiente del terreno, acceso al recurso del agua, infraestructuras viales y disponibilidad de conexión a la red de transmisión existente, todos estos factores impactan directamente al LCOE. De acuerdo a los resultados de este estudio, existen zonas potenciales en el departamento de La Guajira que cumplen con los criterios anteriormente mencionados, lo cual las hace técnicamente factible. Una de las restricciones mencionadas es el acceso al recurso del agua, el departamento de La Guajira es la zona más desértica y seca de Colombia; por lo tanto, este recurso es escaso. Este tipo de proyectos deben originar la construcción de plantas desalinizadoras para beneficio propio y de las comunidades aledañas al proyecto.
- La mejor zona potencial en el departamento de la Guajira presentó un LCOE de 118 USD/MWh. Este lugar muestra una irradiación directa normal (DNI) en promedio de $6,2 \text{ kWh/m}^2 - \text{día}$, se encuentra a 18 km aproximadamente de la subestación eléctrica colectora, y a 30 km aproximadamente del centro poblado de Uribia. En el cálculo del LCOE se consideró una tasa de descuento del 9,06% y una vida útil de 30 años. El costo de inversión total de la planta es de 516 MUSD, siendo el campo solar y el bloque de potencia los elementos mas costoso con 33% y 21% respectivamente.
- El resultado del LCOE se encuentra dentro las proyecciones a nivel mundial presentadas por IRENA (Agencia Internacional de Energía Renovables-2020), pero aún así, sigue siendo una tecnología costosa en comparación con las demás tecnologías renovables, siendo esto la mayor barrera. Es por esto, que las Plantas CSP-Torre central no pueden entrar a competir a día de hoy en una subasta de energía renovables, donde se este compitiendo contra parques solares y eólicos, ya que el resultado va ser negativo. A nivel mundial países como Chile y España han vivido estos resultados. Debido a lo anterior, las planta CSP-Torre central deben competir directamente es con las plantas termoeléctricas a carbón y gas que se necesitan a futuro en la matriz energética de un País, en términos de estabilidad y flexibilidad en su sistema de potencia.

Trabajos Futuros

- Realizar esta misma metodología propuesta para plantas híbridas CSP+FV, con el objetivo de evaluar si su LCOE es más competitivo.
- Estudiar la integración de plantas desalinizadoras en el departamento de La Guajira a partir de la tecnología CSP.

Referencias

- [1] K. Lovegrove, W. Stein, Concentrating solar power technology: Principles, developments, and applications (2020).
- [2] C. Dominador, Energía inteligente para un futuro sostenible, <https://cerrodominador.com/>, accedido en junio de 2021.
- [3] P. Heller, The performance of concentrated solar power (CSP) systems: analysis, measurement and assessment, Woodhead Publishing, 2017.
- [4] B. Belgasim, Y. Aldali, M. J. Abdunnabi, G. Hashem, K. Hossin, The potential of concentrating solar power (csp) for electricity generation in libya, Renewable and sustainable energy reviews 90 (2018) 1–15.
- [5] J. Hernández-Moro, J. Martínez-Duart, Csp electricity cost evolution and grid parities based on the IEA roadmaps, Energy policy 41 (2012) 184–192.
- [6] C. Parrado, A. Marzo, E. Fuentealba, A. Fernández, 2050 LCOE improvement using new molten salts for thermal energy storage in CSP plants, Renewable and Sustainable Energy Reviews 57 (2016) 505–514.
- [7] R. Musi, B. Grange, S. Sgouridis, R. Guedez, P. Armstrong, A. Slocum, N. Calvet, Techno-economic analysis of concentrated solar power plants in terms of levelized cost of electricity, in: AIP Conference Proceedings, Vol. 1850, AIP Publishing LLC, 2017, p. 160018.
- [8] REN21, Renewables 2021 global status report, <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>, accedido en Marzo de 2021.
- [9] SolarPACES, Csp projects around the world, <https://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world/>, accedido en Marzo de 2021.
- [10] NREL, Concentrating solar power (CSP) power projects, <https://solarpaces.nrel.gov/>, accedido en Marzo de 2021.
- [11] C. FOCUS, Colombia’s promigas launches tender for concentrated solar power studies, http://www.cspfocus.cn/en/market/detail_2592.html, accedido en Agosto de 2021.
- [12] H. CSP, Colombia’s promigas launches tender for concentrated solar power studies, <https://helioscsp.com/colombias-promigas-launches-tender-for-concentrated-solar-power-studies/>, accedido en Agosto de 2021.
- [13] C. A. Argumedo Quintero, Estudio para la implementación de una central solar térmica considerando tecnologías de cilindro parabólico y torre solar en la Guajira (2019).
- [14] J. Granados, L. Duitama, Balance ambiental de un sistema híbrido solar térmico de receptor central eólico, utilizado para la generación de energía eléctrica en zonas no interconectadas de La Guajira, Colección Documentos Ciemat, Editorial Ciemat, 2017.
URL <https://books.google.com.co/books?id=10RIzQEACAAJ>
- [15] A. A. Navarro, L. Ramírez, P. Domínguez, M. Blanco, J. Polo, E. Zarza, Review and validation of solar thermal electricity potential methodologies, Energy Conversion and Management 126 (2016) 42–50.
- [16] C. Hernández, R. Barraza, A. Saez, M. Ibarra, D. Estay, Potential map for the installation of concentrated solar power towers in Chile, Energies 13 (9) (2020) 2131.
- [17] ESRI, ArcGIS software 10.8, 2021.

- [18] S. Ong, C. Campbell, P. Denholm, R. Margolis, G. Heath, Land-use requirements for solar power plants in the united states, Tech. rep., National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States) (2013).
- [19] SolarGIS, Datos meteorológicos y software para invertir en energía solar, <https://solargis.com/es>, accedido en Febrero de 2021.
- [20] Q. Hang, Z. Jun, Y. Xiao, C. Junkui, Prospect of concentrating solar power in china—the sustainable future, *Renewable and sustainable energy reviews* 12 (9) (2008) 2505–2514.
- [21] E. DATA, Asf data search, <https://search.asf.alaska.edu/#/>, accedido en Febrero de 2021.
- [22] P. Naturales, Parque nacionales naturales de colombia, <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/>, accedido en Marzo de 2021.
- [23] SIAC, Sistema de información ambiental de colombia, <http://sig.anla.gov.co:8083/>, accedido en Marzo de 2021.
- [24] UPME, Unidad de planeación minero energética, <https://www1.upme.gov.co/Paginas/default.aspx>.
- [25] C. G. Posso, J. Barney, El viento del este llega con revoluciones-multinacionales y transición con energía eólica en territorio wayúu, INDEPAZ/Heinrich Böll Stiftung Bogota: Bogotá, Columbia (2019) 19–12.
- [26] ANLA, Portal de búsqueda licencias otorgadas, <https://www.anla.gov.co/>, accedido en Mayo de 2021.
- [27] CORPOGUAJIRA, Gaceta ambientales - resolución, <https://corpoguajira.gov.co/wp/gaceta-ambiental/resoluciones-gaceta-ambiental/page/4/>, accedido en Mayo de 2021.
- [28] S. Benammar, K. F. Tee, Structural reliability analysis of a heliostat under wind load for concentrating solar power, *Solar Energy* 181 (2019) 43–52.
- [29] M. J. Emes, M. Arjomandi, G. J. Nathan, Effect of heliostat design wind speed on the levelised cost of electricity from concentrating solar thermal power tower plants, *Solar Energy* 115 (2015) 441–451.
- [30] G. W. ATLAS, <https://globalwindatlas.info/>, note = Accedido en Agosto de 2021, language= spanish,.
- [31] UPME, Upme 06 - 2017 subestación colectora 500 kv y líneas asociadas, <https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/InformacionInversionistas/Paginas/UPME-06-2017-Subestacion-Colectora-500-kV.aspx>, accedido en Marzo de 2021.
- [32] NREL, Nsrdb data viewer, <https://nsrdb.nrel.gov/>, accedido en mayo de 2021.
- [33] M. Blanco, L. R. Santigosa, *Advances in concentrating solar thermal research and technology*, Woodhead Publishing, 2016.
- [34] N. Blair, N. Diorio, J. Freeman, P. Gilman, S. Janzou, T. Neises, M. Wagner, Software system advisor model (sam) general description (version 2017.9. 5), National Renewable Energy Laboratory Technical Report (2018).
- [35] S. de Evaluacion Ambiental-SEA, planta de concentracion solar de potencia copiapo solar, https://seia.sea.gob.cl/archivos/2014/10/16/DIA_PCSP_Copiapo_Solar_-_Capitulo_06.pdf, accedido en Agosto de 2021 (2014).
- [36] V. Estrada, Estudio de las tasas de ensuciamiento y efectos en espejos plantas concentradoras de potencia, Tesis de maestría, Universidad Tecnica Federico Santa Maria: (2019).

- [37] M. J. Wagner, T. Wendelin, Solarpilot: A power tower solar field layout and characterization tool, *Solar Energy* 171 (2018) 185–196.
- [38] J. Macknick, R. Newmark, G. Heath, K. Hallett, Review of operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies, Tech. rep., National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States) (2011).
- [39] J. Macknick, R. Newmark, G. Heath, K. C. Hallett, Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature, *Environmental Research Letters* 7 (4) (2012) 045802.
- [40] M. Mehos, C. Turchi, J. Vidal, M. Wagner, Z. Ma, C. Ho, W. Kolb, C. Andraka, A. Kruienza, Concentrating solar power gen3 demonstration roadmap, Tech. rep., National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States) (2017).
- [41] C. S. Turchi, G. A. Heath, Molten salt power tower cost model for the system advisor model (sam), Tech. rep., National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States) (2013).
- [42] S. Abdelhady, D. Borello, A. Shaban, Techno-economic assessment of biomass power plant fed with rice straw: Sensitivity and parametric analysis of the performance and the lcoe, *Renewable Energy* 115 (2018) 1026–1034.
- [43] UPME, Upme 06 - 2017 subestación colectora 500 kv y líneas asociadas, <https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/InformacionInversionistas/Paginas/UPME-06-2017-Subestacion-Colectora-500-kV.aspx>, accedido en Junio de 2021.
- [44] ANLA, Resolución 06842-línea eléctrica de transmisión parque eólico windpeschi – subestación cuestecita, http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/auto/_6842_14112018_ct_6916.pdf, accedido en Julio de 2021.
- [45] WSP, Parque eólico windpeschi, <https://www.wsp.com/es-CL/proyectos/parque-eolico-windpeschi>, accedido en Julio de 2021.
- [46] UPME, Upme str 06-2016 refuerzo eléctrico de la guajira: Cuestecitas - riahacha - maicao, <https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/InformacionInversionistas/Paginas/UPME-STR-06-2016-Refuerzo-Guajira-Cuestecitas-Riahacha-Maicao.aspx>, accedido en Junio de 2021.
- [47] UPME, Upme 04-2018 nueva subestación san juan 220 kv y líneas de transmisión asociadas, <https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/InformacionInversionistas/Paginas/UPME-04-2018-Nueva-subestacion-San-Juan-220kv.aspx>, accedido en Junio de 2021.
- [48] C. S. Turchi, M. Boyd, D. Kesseli, P. Kurup, M. S. Mehos, T. W. Neises, P. Sharan, M. J. Wagner, T. Wendelin, Csp systems analysis-final project report, Tech. rep., National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States) (2019).
- [49] SUPERSERVICIOS, Acueducto alcantarillado aseo y energia electrica de uribia s.a.s e.s.p id- 23504, <http://webdav.superservicios.gov.co:8080/es1/Acueducto-Alcantarillado-Aseo/Pequenos-prestadores/Evaluaciones-integrales/La-Guajira/Acueducto-Alcantarillado-y-Aseo-de-Uribia-S.A.S.-E.S.P.>, accedido en Agosto de 2021.
- [50] M. Karim, S. Naamane, I. E. A. E. Hassani, C. Delord, S. Belcadi, P. Tochon, A. Bennouna, Towards the prediction of csp mirrors wear: Methodology of analysis of influencing parameters on the mirrors surface degradation: Application in two different sites in morocco, *Solar energy* 108 (2014) 41–50.

- [51] DANE, Información sociodemográfica del pueblo wayúu, <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/informes-de-estadistica-sociodemografica-aplicada>, accedido en Octubre de 2021.
- [52] EPM, Parque eólico jepirachí - estudio de impacto ambiental, <https://documents1.worldbank.org/curated/en/427541468248967090/pdf/multi0page.pdf/>, accedido en Octubre de 2021.
- [53] W. S. E. e ISAGEN S.A E.S.P, Estudio de impacto ambiental - parque eólico guajira i.
- [54] SEA, Declaración de impacto ambiental planta de concentración solar de potencia copiapó solar, <https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2128879356>, accedido en Octubre de 2021.
- [55] P. eólico Puelche sur, Plan de medidas de mitigación, compensación y reparación eia parque eólico puelche sur, <https://www.idbinvest.org/es/download/9449>, accedido en Agosto de 2021.