



**Diseño e ingeniería básica para el proyecto de generación fotovoltaica**

Juan José Restrepo Villa

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Electricista

Asesor

Melisa de Jesús Barrera, Doctora en Ingeniería Eléctrica

Robinson Narvárez, Ingeniero Electricista

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

---

Cita

J.J. Restrepo Villa [1]

**Referencia**

[1] J.J. Restrepo Villa, "Diseño e ingeniería básica para el proyecto de generación fotovoltaica", Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.

---



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

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

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano/Director:** Julio César Saldarriaga Molina

**Jefe departamento:** Nombres y Apellidos.

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.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN	11
II. OBJETIVOS	12
A. Objetivo general	12
B. Objetivos específicos	12
III. MARCO TEÓRICO	13
Energía solar Fotovoltaica	13
Radiación solar	13
El panel fotovoltaico	13
Orientación de los paneles	13
Inversor	14
SketchUp	14
Archelios	14
Normativa y regulación	14
IV. METODOLOGÍA	17
V. ANTECEDENTES	18
CONSIDERACIONES AMBIENTALES	19
Radiación	19
VI. DISEÑO PLANTA GENERADORA Y SELECCIÓN DE COMPONENTES	21
PANEL MONOCRISTALINO	21
Especificaciones eléctricas del Módulo	21
Características Mecánicas	22

INVERSORES	22
Entrada CC	23
Salida (CA) del lado de media tensión	23
Datos generales	23
ALIMENTACIÓN PARA LOS INVERSORES	24
TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE MEDIA TENSIÓN PARA INVERSORES	24
DISPOSICIÓN FÍSICA DE LA PLANTA	25
Determinación del ángulo óptimo de inclinación y separación de las mesas de paneles	25
VI. RESULTADOS	28
Producción de energía para probabilidad de excedencia P50	29
Producción de energía para probabilidad de excedencia P90	30
VI. ANÁLISIS	35
VII. CONCLUSIONES	36
REFERENCIAS	37

## LISTA DE TABLAS

TABLA I ÁREAS DISPONIBLE DEL PROYECTO .....	16
TABLA II SIMULACIÓN DE LOS ARREGLOS EN ARCHELIOS PRO .....	29
TABLA III CAPACIDAD INSTALADA EN LA ZONA.....	30
TABLA IV PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PRIMER AÑO P50.....	31
TABLA V PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MEDIA P50 .....	32
TABLA VI PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PRIMER AÑO P90.....	34
TABLA VII PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MEDIA P90.....	34

## LISTA DE FIGURAS

Fig 1. Demarcación de las áreas disponibles del proyecto solar [8] .....	16
Fig 2. Servidumbres ambientales en el terreno del proyecto [8].....	17
Fig 3. Resumen de radiación TMY P50 + TMY P90 con un periodo de tiempo de 21 años [1]...	18
Fig 4. Sumatorias mensuales y anuales de Irradiación Horizontal global GHI [1].....	18
Fig 5. Sumatorias mensuales y anuales de Irradiación normal Directa DNI [1].....	18
Fig 6. Sumatorias mensuales y anuales de Irradiación Horizontal Difusa DIF [1].....	19
Fig 7. Sumatorias mensuales y anuales de Irradiación global de inclinación GTI [1].....	19
Fig 8. Sumatorias mensuales y anuales de Temperatura promedio durante el día a 2m [1] .....	19
Fig 9. Dimensiones panel monocristalino [8] .....	21
Fig 10. Inversor Huawei SUN2000-105KTL-H1.[8].....	23
Fig 11. Alimentación del inversor desde la salida AC. [8] .....	23
Fig 12. Ángulos de posicionamiento respecto al sol.....	25
Fig 13. Diagrama solar para el solsticio de invierno en el proyecto .....	26
Fig 14. Separación entre mesas de paneles .....	27
Fig 15. Área de circulación y servidumbre en el proyecto.....	28
Fig 16. Planimetría conceptual.....	30
Fig 17. Producción media mensual para el proyecto [P50].....	32
Fig 18. Producción media anual para el proyecto [P50] .....	33
Fig 19. Producción media mensual para el proyecto [P90].....	34
Fig 20. Producción media anual para el proyecto [P90] .....	35

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>UPME</b>	La unidad de planeamiento minero energética
<b>MME</b>	Ministerio de Minas y Energía
<b>ZNI</b>	Zonas no interconectadas
<b>STDEV</b>	Desviación estándar

---

## RESUMEN

La preocupación por el cambio climático ha acelerado la adopción de energías renovables en todo el mundo. Colombia no es ajena a este problema y ya avanza con su transición energética para diversificar su matriz y así reducir el impacto al medio ambiente. En este proyecto se realizó el dimensionamiento y diseño de un sistema solar fotovoltaico.

Para cumplir con el objetivo, el lote designado para el proyecto pasó por un estudio ambiental para determinar limitaciones y servidumbres presentes. En la ubicación del proyecto se analizó el comportamiento de la radiación solar y así aprovechar de mejor manera el recurso. Adicionalmente se muestra la sección de los paneles y el tipo de inversor a usar, con esto se plantea una disposición física de paneles en el proyecto y mediante el software Archelios se obtuvieron estimaciones de capacidad instalada y producción de energía. Finalmente se realizó un análisis y conclusiones que permiten tomar decisiones financieras y técnicas a la hora de ejecutar el proyecto.

***Palabras clave*** —sistema solar fotovoltaico, servidumbre, panel solar, inversor, capacidad, energía.



---

## ABSTRACT

Concern over climate change has accelerated the adoption of renewable energy around the world. Colombia is no stranger to this problem and is already advancing with its energy transition to diversify its matrix and thus reduce the impact on the environment. In this project, the sizing and design of a photovoltaic solar system was carried out.

To meet the objective, the lot designated for the project underwent an environmental study to determine limitations and present easements. At the location of the project, the behavior of solar radiation was analyzed in order to make better use of the resource. Additionally, the section of the panels and the type of inverter to be used are shown, with this a physical arrangement of panels in the project is proposed and through the Archelios software, estimates of installed capacity and energy production were obtained. Finally, an analysis and conclusions were made that allow financial and technical decisions to be made when executing the project.

***Keywords*** — **photovoltaic solar system, easement, solar panel, inverter, capacity, energy.**

---

## I. INTRODUCCIÓN

La empresa IEB Ingeniería Especializada está estructurada en tres unidades de negocios: Energía, Infraestructura e Industria. Las actividades del presente trabajo están enfocadas en realizar estudios y diseños requeridos para sectores industriales, y diseño de sistemas fotovoltaicos, siendo participe el área de industria de la empresa IEB.

Con la firma del Acuerdo de París en el 2015, donde se establecen medidas para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la principal causa del cambio climático. Como consecuencia de lo anterior la economía mundial debe dejar atrás la generación de energía a partir de combustibles fósiles, como carbón, petróleo o gas y pasar a energías renovables.

En Colombia el uso de las energías renovables en especial la energía solar, se ha convertido en una alternativa cada vez más popular especialmente para la generación de electricidad. La posición geográfica del país es ventajosa para la irradiación solar y los beneficios tributarios de la Ley 1715 2014 han creado en Colombia un lugar excelente para la construcción de proyectos grandes y pequeños basados en generación fotovoltaica. La unidad de planeamiento minero energética (UPME) y el Ministerio de Minas y Energía (MME) estiman que para antes de 2030 cerca de 10% del consumo energético en Colombia va a provenir de proyectos fotovoltaicos o solares.

---

## II. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Realizar el diseño de ingeniería básica referente a la disposición física de los equipos y memoria de cálculo para la planta de generación fotovoltaica.

### *B. Objetivos específicos*

- Seleccionar y caracterizar el panel solar.
- Seleccionar y caracterizar el inversor.
- Crear una disposición física de paneles en la planta solar mediante el software SketchUp.
- Calcular mediante el software Archelios la capacidad instalada de la planta solar.

---

### III. MARCO TEÓRICO

#### *Energía solar Fotovoltaica*

La energía proveniente del sol es una fuente inagotable y renovable, que se puede encontrar en todos los lugares del mundo; es utilizada en diversas actividades humanas, contribuyendo al desarrollo sostenible. Cuando la energía solar es utilizada para la generación de electricidad se denomina energía solar fotovoltaica, es decir que la energía de los rayos del sol se convierte en energía eléctrica. Para poder aprovechar la energía solar se usan celdas fotovoltaicas, fabricadas con materiales semiconductores que son sensibles a la luz solar, cuando la celda entra en contacto con la luz solar se produce el movimiento de electrones y se genera una corriente eléctrica.

#### *Radiación solar*

Se conoce por radiación solar al conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. No toda la radiación alcanza la superficie de la tierra, pues las ondas ultravioletas, más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera fundamentalmente por el ozono. Además, al hacer contacto con los paneles solares se presentan algunas pérdidas por el polvo o ángulo de inclinación de los paneles. Para calcular la producción de energía de un sistema fotovoltaico, es importante conocer la cantidad de radiación solar en el plano correspondiente al sistema solar y la trayectoria del sol en ese lugar en las distintas épocas del año.

La irradiancia solar es la potencia por unidad de área recibida del Sol en forma de radiación electromagnética. La irradiancia solar se mide en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) en unidades del sistema internacional.

#### *El panel fotovoltaico*

Los módulos fotovoltaicos o paneles solares son los encargados de la transformación de la energía solar en energía eléctrica; están formados por un conjunto de células fotovoltaicas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos. En la generación de energía a partir del sol se

da mediante la transformación de la radiación solar a energía eléctrica, obteniendo corriente continua (CC).

### *Orientación de los paneles*

El valor de radiación que incide sobre un módulo fotovoltaico depende de la inclinación que adopte el panel y por lo tanto del ángulo de incidencia  $\theta$  entre la normal a la superficie del módulo y el haz de radiación solar.

Si la radiación solar es perpendicular a la superficie del módulo fotovoltaico, la captación de energía será máxima. Para recolectar la mayor cantidad posible de energía se puede recurrir a sistemas de seguimiento del sol para hacer que la superficie de los paneles siempre esté perpendicular a la radiación solar, pero es un sistema costoso que requiere de mantenimiento continuo. Así la orientación del panel puede ser norte o sur, en los países del hemisferio sur se orienta hacia el norte, y su inclinación óptima va a depender de la latitud en la que se encuentre el proyecto.

### *Inversor*

Es el equipo encargado de transformar la energía recibida del generador fotovoltaico en forma de corriente continua y cambiarla a corriente alterna para poder suministrar a la red.

Los inversores vienen caracterizados principalmente por la tensión de entrada, que se debe adaptar al generador, la potencia máxima que puede proporcionar y la eficiencia.

Aspectos importantes que deben de cumplir los inversores:

- Deberán tener una eficiencia alta, pues en caso contrario se habrá de aumentar innecesariamente el número de paneles para alimentar la carga.
- Estar adecuadamente protegidos contra cortocircuitos y sobrecargas.
- Incorporar rearme y desconexión automáticos.
- Admitir demandas instantáneas de potencia mayores del 150% de su potencia máxima.
- Cumplir con los requisitos que establece el Reglamento de Baja Tensión.
- Baja distorsión armónica.

- 
- Bajo consumo.
  - Aislamiento galvánico.
  - Sistema de medidas y monitorización.

### *SketchUp*

Es un programa de diseño gráfico y modelación 3D. Es muy utilizado en la ingeniería, dado que su característica más fuerte es poder realizar diseños 3D de forma muy sencilla.

### *Archelios*

Es un programa profesional que facilita el diseño, cálculo y simulación de sus plantas solares.

### *Normativa y regulación*

La normativa vigente para el uso de sistemas fotovoltaicos en Colombia está regulada por la UPME, a través de la Ley 1715 del 2014. Por medio de ésta, se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, y tiene como objetivo promover su desarrollo, buscando la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y la seguridad del abastecimiento energético, buscando también promover la gestión eficiente de la energía. Esta ley, busca incentivar la inversión de proyectos con fuentes renovables no convencionales de generación de energía, el desarrollo de este tipo de tecnologías, la eficiencia de la energía eléctrica, suplir necesidades en las zonas no interconectadas (ZNI) del país y ayudar al medio ambiente con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

---

#### IV. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados, se aplicó la siguiente metodología. Después de que la planta de generación pasó por su respectivo estudio de conexión y el lote pasó por su respectivo estudio ambiental, se comenzó planteando la sección de los paneles y el tipo de inversor a usar. Para completar el objetivo se implementaron fichas técnicas de paneles e inversores y se analizaron diseños anteriores de sistemas solares.

La disposición física se realizó mediante el software SketchUp. Para el manejo del software antes del inicio del proyecto se realizaron capacitaciones brindadas por la empresa IEB. La ubicación física de los paneles se realizó teniendo en cuenta recomendaciones y estudios sobre ubicación de paneles, además se debe considerar el número de celdas en paralelo y serie con referencia al inversor previamente seleccionado. Para tener un estimativo de cuanta potencia se puede instalar en una superficie, fue posible hacer un cálculo aproximado teniendo la siguiente información:

- Área aproximada
- Área del cada panel
- Potencia de cada panel

Después de seleccionar los equipos y terminar la disposición física, se usó el software Archelios para obtener cálculos y características de la granja solar. En el software se pueden ingresar las características de los equipos, el archivo creado en SketchUp y además una base de datos de radiación solar en la zona de interés para tener una mejor precisión en los cálculos.

Para finalizar el proyecto se realizó un informe técnico con las características de la instalación fotovoltaica.

## V. ANTECEDENTES

Con el fin realizar la ingeniería para este proyecto solar fotovoltaico, el cliente entregó la siguiente demarcación del área disponible que podemos ver en la figura 1.

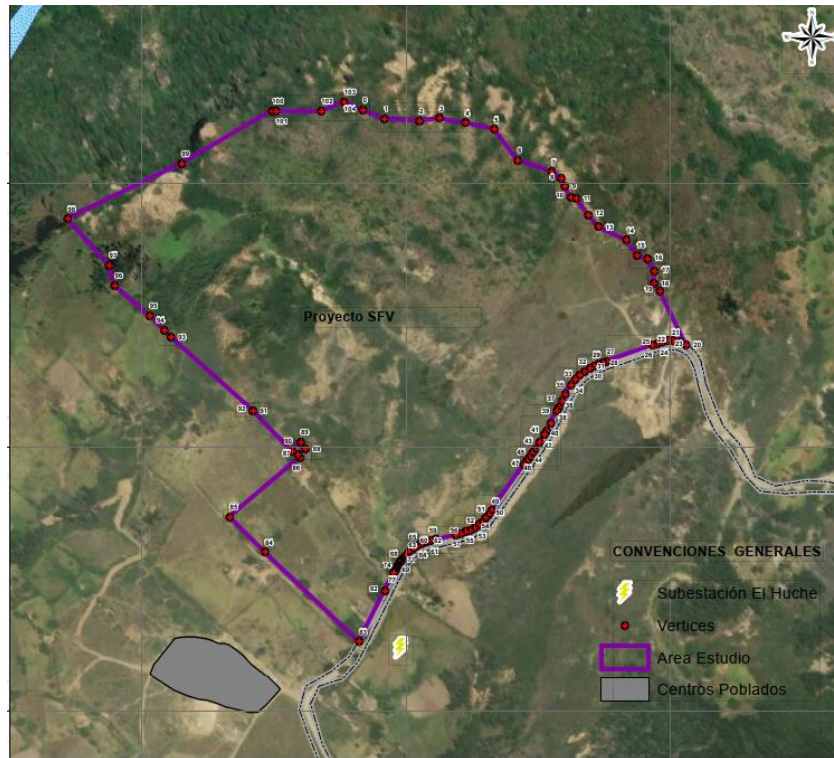


Fig 1. Demarcación de las áreas disponibles del proyecto solar [8]

La distribución de los paneles se realizará en la zona como se indica en la siguiente tabla.

TABLA I  
ÁREAS DISPONIBLE DEL PROYECTO

Zona	Área [ $m^2$ ]
1	63,955
2	42,542
3	16,279
Total	122,776



En total se disponen de 15,43 ha de terreno, de las cuales se podrán utilizar 12,28 ha, debido al área de servidumbre ambiental que hay que disponer para el nacimiento de agua y los drenajes simples intermitentes encontrados.

El lote debió pasar por una evaluación ambiental con el fin de identificar: redes de energía, árboles, canalizaciones, sombras, hidrantes y/o nacimientos de agua, huecos, tuberías, áreas reservadas para los procesos de la planta, etc. con el fin de demarcar aquellas que no se pueden aprovechar y los objetos que podrían generar sombras a los paneles. El resultado de la evaluación indicó que no toda la zona es apta para instalaciones industriales de este tipo, debido a que se evidenció un nacimiento de agua y un drenaje de agua intermitente en el terreno objeto de la ingeniería para el desarrollo del proyecto solar, y se recomienda mantener las servidumbres establecidas por las autoridades regionales, tal como se indica en la siguiente figura.

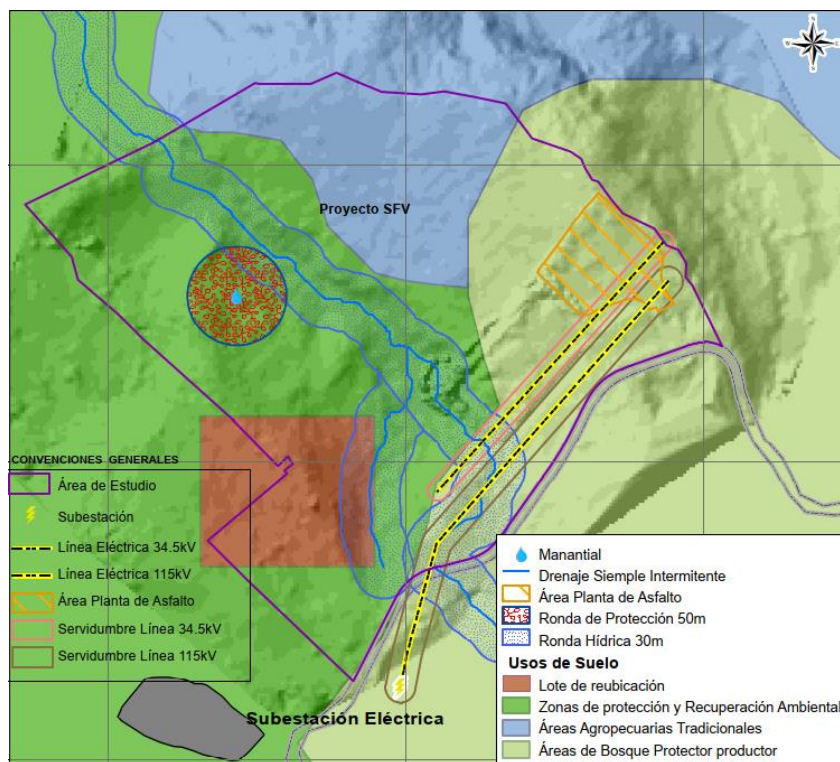


Fig 2. Servidumbres ambientales en el terreno del proyecto [8]

CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Irradiación

Las condiciones de irradiación solar del terreno se obtienen de la base de datos del Solargis TMY P50 + TMY P90. A continuación, se presentan los valores de irradiación anuales promedios a largo plazo calculados a partir de series de tiempo (TS) representadas desde 1999 hasta 2019, para el terreno en cual se realizará el proyecto solar.

	TS	TMY P50	TMY P90	
Global Horizontal Irradiation	<b>1887</b>	1887	1742	kWh/m <sup>2</sup>
Direct Normal Irradiation	<b>1556</b>	1556	1315	kWh/m <sup>2</sup>
Diffuse Horizontal Irradiation	<b>866</b>	883	866	kWh/m <sup>2</sup>
Global Tilted Irradiation (fixed inclination: 14.0° azimuth: 315.0°)	<b>1799</b>	--	--	kWh/m <sup>2</sup>
Air Temperature at 2 m	<b>15.1</b>	14.8	14.9	°C

Fig 3. Resumen de radiación TMY P50 + TMY P90 con un periodo de tiempo de 21 años [1]

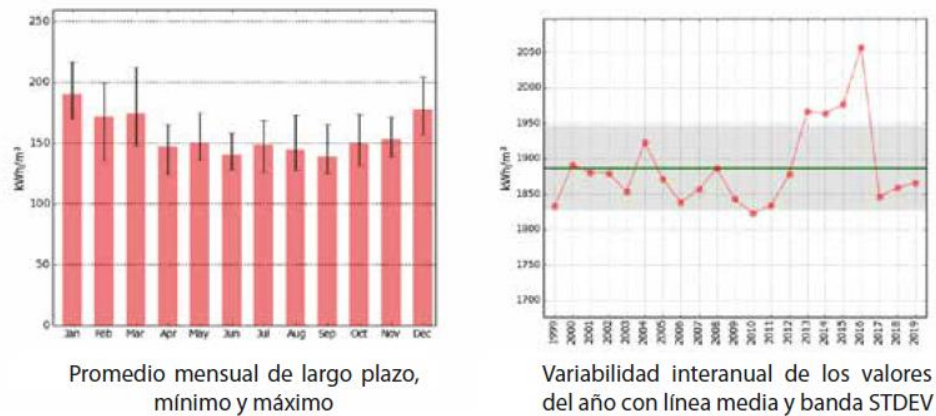


Fig 4. Sumatorias mensuales y anuales de Irradiación Horizontal global GHI [1]

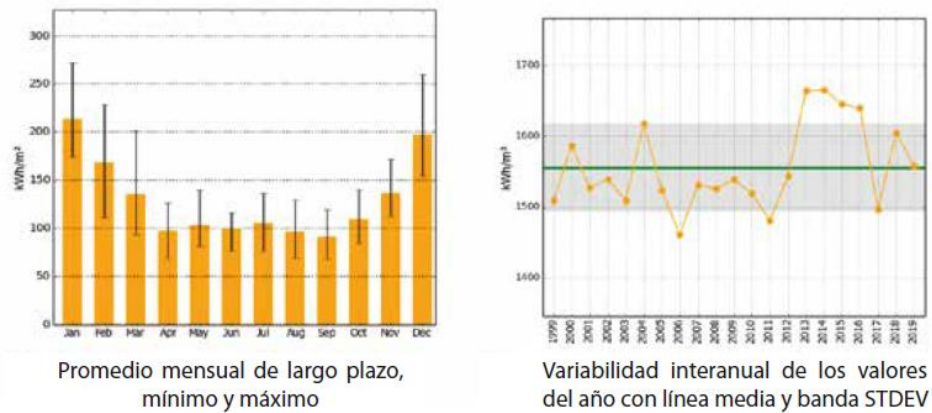


Fig 5. Sumatorias mensuales y anuales de Irradiación normal Directa DNI [1]

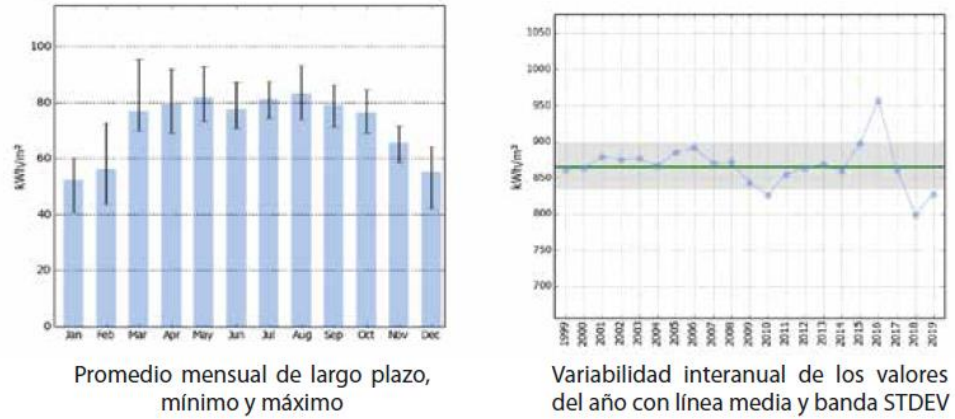


Fig 6. Sumatorias mensuales y anuales de Irradiación Horizontal Difusa DIF [1]

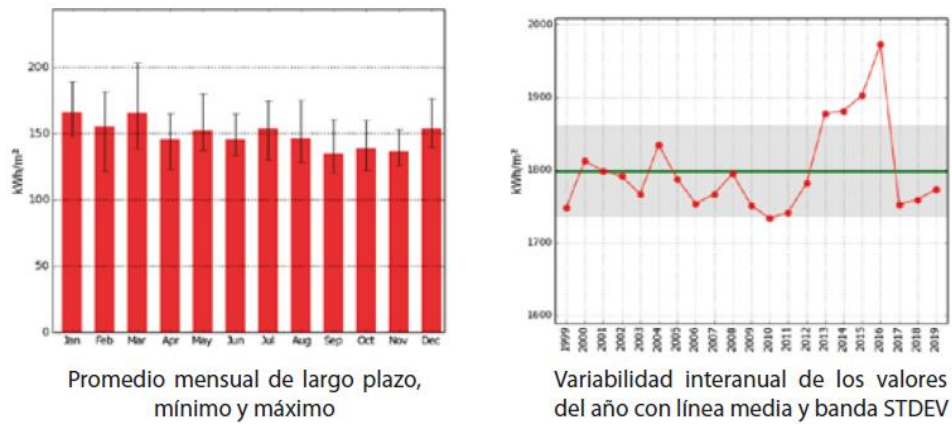


Fig 7. Sumatorias mensuales y anuales de Irradiación global de inclinación GTI [1]

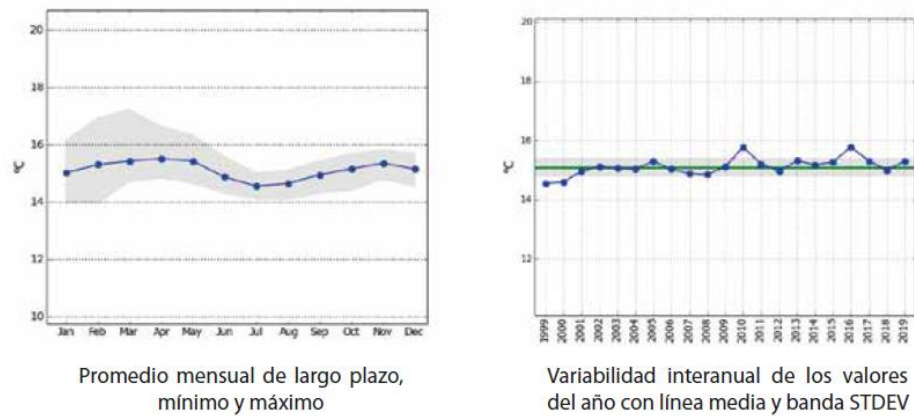


Fig 8. Sumatorias mensuales y anuales de Temperatura promedio durante el día a 2m [1]

## VI. DISEÑO PLANTA GENERADORA Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

Para el proceso de diseño de una instalación solar es recomendable tener de base el tipo de panel fotovoltaico a instalar, así como el inversor a utilizar de forma previa, con el fin de poder diseñar

en función de los parámetros de funcionamiento de los componentes y optimizar la cantidad de energía a producir para el área determinada. Es por esto que a continuación, se presentan los componentes escogidos.

### *PANEL MONOCRISTALINO*

El módulo escogido para llevar a cabo las sensibilidades de capacidad instalada es el CS3W-455MS del fabricante CanadianSolar. Es un panel 455 Wp monocristalino de 144 células, y se ha escogido este tipo de panel ya que en la actualidad presenta una de las mejores eficiencias en el mercado, con una conversión de energía del 20,6%. Además, se escogió a CanadianSolar como fabricante debido a que en los últimos años ha sido uno de los fabricantes con mejores indicadores de producción y banqueabilidad.

#### *Especificaciones eléctricas del Módulo*

- Tipo de módulo: CS3W-455MS 455Wp
- Mono-Cristalino
- Máxima potencia: 455 Wp
- Tensión a máxima potencia: 41,3 V
- Corriente a máxima potencia: 11,02 A
- Tensión de circuito abierto: 49,3 V
- Corriente de corto circuito: 11,66 A
- Eficiencia: 20,6%
- Temperatura de operación: -40 / + 85°C
- Máxima tensión del sistema: 1500 VDC
- Máxima capacidad del fusible: 20 A
- Tolerancia de potencia: 0 + 10W
- Coeficiente de potencia Pmax: -0,35%/°C
- Coeficiente de tensión Voc: -0,27%/°C
- Coeficiente de corriente Isc: 0,05%/°C

### *Características Mecánicas*

- Número de células: 144 (2 x (12 x 6))
- Dimensiones (H x W x D): 2108 x 1048 x 40 mm
- Peso: 24,9 kg
- Vidrio frontal: 3,2 mm, vidrio templado.
- Estructura: Aleación de aluminio anodizado, barra transversal mejorada.
- Caja de conexiones: IP68
- Tipo de conector: Serie T4 o H4 UTX o MC4-EVO2.

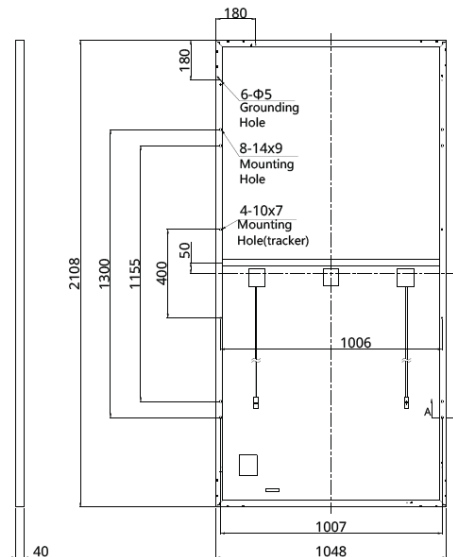


Fig 9. Dimensiones panel monocristalino [8]

### *INVERSORES*

Los inversores que se seleccionaron son los SUN2000-105KTL-H1 Smart String Inverter del Fabricante HUAWEI.

Este es un tipo de inversor con una capacidad de 105 kW con una máxima eficiencia del 99%; viene provisto de 6 Seguidores de Máximo Punto de Potencia (MPPT), lo cual resulta ser una característica crucial debido a las características que presenta este proyecto en lo que se refiere a la presencia de pendientes e inclinaciones que puedan afectar la producción de energía. Este inversor viene provisto de un sistema de monitoreo integrado para corrientes residuales.

---

*Entrada CC*

- Rango de tensión MPP  $V_{cc}$ / tensión asignada de entrada: 600 V a 1500 V / 650 V
- Tensión de entrada max.  $V_{cc}$  max: 1500V
- Corriente de entrada max.  $I_{cc}$  máx: 2 A
- Corriente de cortocircuito máx.  $I_{cc}$  sc: 33 A
- Número de entradas CC: 12

*Salida (CA) del lado de media tensión*

- Potencia aparente nominal de CA: 116 kVA
- Potencia asignada nominal de CA: 105 kW
- Corriente nominal de CA  $I_{CA}$  nom. = Corriente máx. de salida  $I_{CA}$  máx: 75,8 A
- Coeficiente de distorsión máx.: <3% a potencia nominal
- Tensión nominal CA: 800 V
- Frecuencia de red de CA/rango: 60 Hz
- Factor de potencia a potencia asignada / factor de desfase ajustable: 1 / 0.8 LG 0.8 LD

*Datos generales*

- Dimensiones (ancho x alto x fondo): 1075 mm/ 605 mm/ 310 mm
- Peso: 79 kg
- Topología: Sin transformador
- Rango de temperatura de servicio: -25°C a 60°C
- Humedad relativa: 0 a 100 %.
- Grado de protección: IP65
- Conector AC impermeable + terminal OT/DT



Fig 10. Inversor Huawei SUN2000-105KTL-H1.[8]

### ALIMENTACIÓN PARA LOS INVERSORES

En la figura 11 se presenta el esquema de alimentación del inversor, donde está alimentados desde la salida AC del mismo inversor.

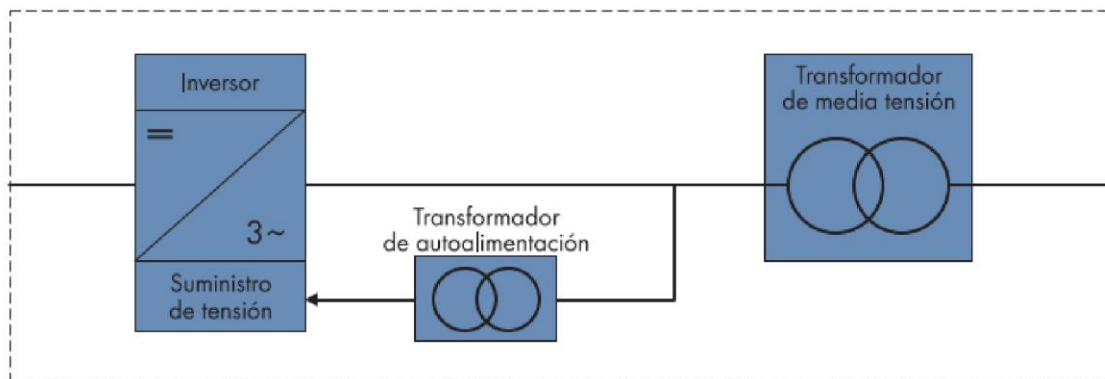


Fig 11. Alimentación del inversor desde la salida AC. [8]

### TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE MEDIA TENSIÓN PARA INVERSORES

Para el proyecto solar fotovoltaico se requieren cuatro transformadores elevadores de 800 V a 34,5 KV, dos de 2,5 MVA y dos de 2,1 MVA. Deben soportar una sobrecarga entre el 15% al 20% de su capacidad. Se deben seguir las especificaciones sugeridas por el fabricante. Se recomienda un fabricante que se acople a los requerimientos del sistema fotovoltaico.

A continuación, se enuncian los requisitos para los transformadores de MT:

- El transformador de media tensión debe ser sumergido en líquido (debido al tamaño del proyecto solar, no se realizará construcción de una subestación colectora, por tanto, los transformadores secos no son una buena opción ya que se requieren equipos que se puedan instalar a la intemperie).
- El transformador de media tensión debe estar diseñado en sus devanados de baja tensión para las tensiones que se generen con el funcionamiento por impulsos del inversor.
- La conexión de potencia usada debe poseer una resistencia del aislamiento adecuada, ya que en el funcionamiento por impulsos del inversor se generan tensiones a tierra de hasta un máximo de  $\pm 2400$  V.
- El transformador de media tensión debe estar diseñado en sus devanados de baja tensión para tensiones que presenten una pendiente de tensión  $dU/dt$  de hasta  $500$  V/ $\mu$ s a tierra. Las tensiones entre fases son senoidales.
- Se recomienda prever un devanado blindado conectado a tierra en la caldera entre los devanados de baja tensión y los devanados de alta tensión. Este sirve como un filtro  $dU/dt$  adicional.
- Las tensiones en los devanados de baja del transformador deben corresponder con la tensión de salida de CA del inversor.
- El nivel de tensión del lado de alta del transformador debe elegirse de acuerdo con el nivel de tensión en el punto de conexión a la red. El transformador de media tensión debe conectarse a la red de media tensión o a la red de alta tensión.
- Deben ser diseñados para ser operado en presencia de corrientes armónicas producidas por los inversores de acuerdo con los requisitos técnicos.
- Deben ser diseñados para ser alimentados por uno o múltiples inversores.
- Deben garantizar según pedido la Impedancia entre devanados (AT-BT y BT-BT).
- Aptos para operar en intemperie con exposición directa a la luz solar.

### *DISPOSICIÓN FÍSICA DE LA PLANTA*

Con base en la ubicación geográfica del proyecto, es necesario determinar en primera instancia la orientación, inclinación y configuración de las mesas de paneles, para posteriormente escoger la ubicación óptima de los inversores.



*Determinación del ángulo óptimo de inclinación y separación de las mesas de paneles.*

El ángulo óptimo con la horizontal se halla con el objetivo de maximizar la generación de energía anual.

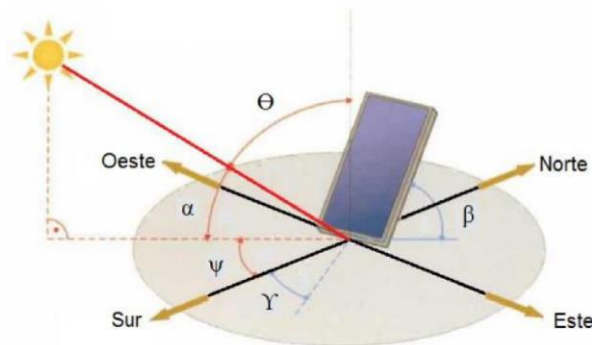


Fig 12. Ángulos de posicionamiento respecto al sol

Dónde:

$\Theta$ : Ángulo de incidencia

$\alpha$ : Ángulo de elevación solar

$\beta$ : Ángulo de inclinación del panel

$\Psi$ : Acimut del sol

$\gamma$ : Acimut del panel

Para la definición de la inclinación adecuada de los módulos se debe reconocer que la latitud de la zona escogida para la instalación es de  $5^{\circ}58'36.34''$  en dirección norte lo cual traduce a una latitud en grados de  $5,976^{\circ}$ ; esto significa que de forma estricta los paneles deberían estar montados con una inclinación de  $7,81^{\circ}$  aproximadamente en dirección norte-sur, sin embargo, debido a condiciones externas como la acumulación de suciedad sobre los paneles frontales de vidrio de los módulos y/o la evacuación de agua lluvia se recomienda escoger un valor más alto que para este caso sería de 14 grados de acuerdo a diseños preliminares suministrados JP ENERGY.

Según el atlas de viento presentado por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), la zona del municipio de Tasco presenta velocidades promedio del orden de los 7 km/h, pueden ocurrir vientos de 8,6 km/h en los días más ventosos. Según esto el efecto

“ala aerodinámica” causada por el viento no efectuaría fuerzas considerables sobre las estructuras de los paneles con la inclinación propuesta de entre 10 y 15 grados norte-sur con respecto a la superficie.

Para la separación entre mesas de paneles se considera la ecuación estandarizada de sombras proyectadas por un panel solar.

$$d_1 = \frac{l \sin(\beta)}{\tan(\alpha)} \quad (1)$$

Para la ingeniería conceptual se establece usar mesas de 3 paneles en configuración *portrait* con separación entre mesas de 3,5 m, se busca validar estos resultados para los nuevos paneles propuestos.

El ángulo de elevación solar  $\alpha$  se obtiene del diagrama solar para el solsticio de invierno, el cual fue obtenido del Solar Radiation Monitoring Laboratory perteneciente a la Universidad de Oregon y el cual permite obtener diagramas solares para cualquier ubicación y día del año.

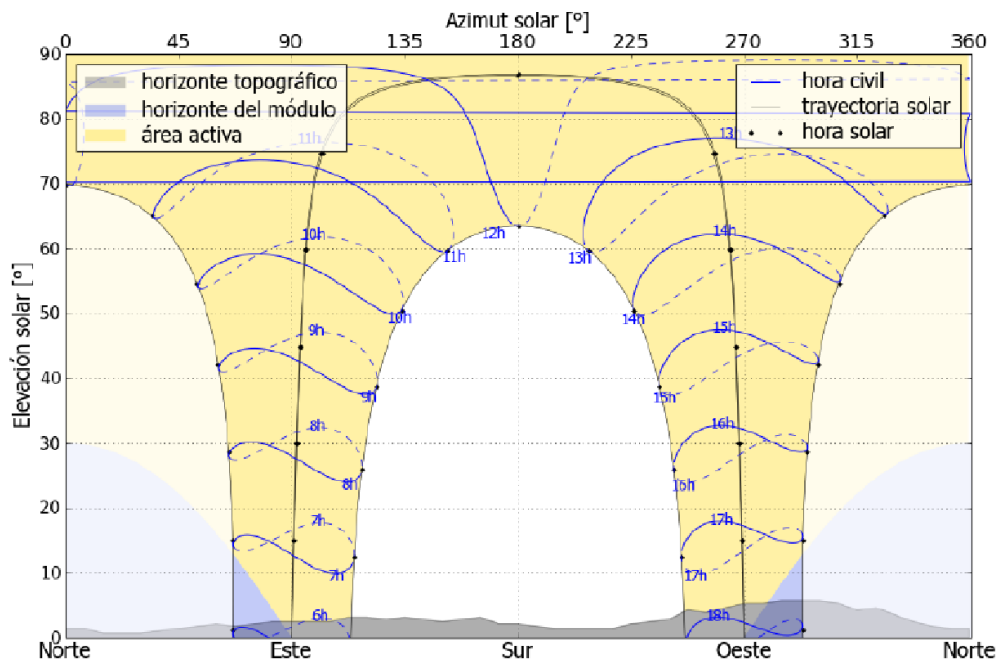


Fig 13. Diagrama solar para el solsticio de invierno en el proyecto

Con el fin de garantizar un intervalo de 6 horas alrededor del mediodía en las cuales no se proyecten sombras sobre las mesas de paneles y así obtener el máximo de producción de energía, se obtiene un ángulo de elevación solar  $\alpha=38^\circ$

Por lo tanto, la distancia inicial se calcula para el panel monocristalino:

$$cd1 = \frac{(mm * 3) \sin \sin (14^\circ)}{\tan (38^\circ)} = 1.875 \text{ mm}$$

La distancia entre mesas de paneles propuesta en el proyecto de 3 m es adecuada y garantiza con holgura las 6 horas sin sombras proyectadas por la distribución de los paneles.

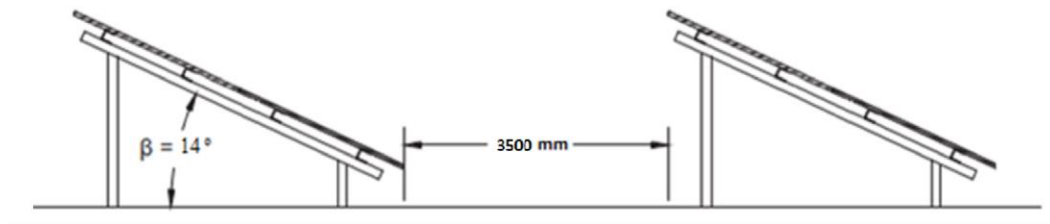


Fig 14. Separación entre mesas de paneles

### CONSIDERACIONES DE SERVIDUMBRE

Con el fin de tener un valor más cercano a la realidad y teniendo en cuenta la utilización del terreno para servicios auxiliares como inversores, subestación, circulación de personal, vehículos y encerramiento se proponen las siguientes consideraciones en cuanto a la utilización del área disponible:

- 5 m para áreas de circulación de personal y vehículos alrededor de todo el proyecto y también para atenuar el efecto de las pérdidas por ensuciamiento, efecto que se pueden producir debido a los vientos de la zona.
- La configuración de las mesas de paneles es tipo *portrait* con 3 filas de paneles por mesa como se ve en la Figura 14
- El ángulo óptimo de inclinación de las mesas es de  $14^\circ$  respecto del eje Norte
- 3,5 m de separación entre mesas de paneles, para evitar las pérdidas por sombreado.
- $48 \text{ m}^2$  para las Estaciones de transformación, las cuales incluyen la subestación tipo pedestal y los tableros de distribución.

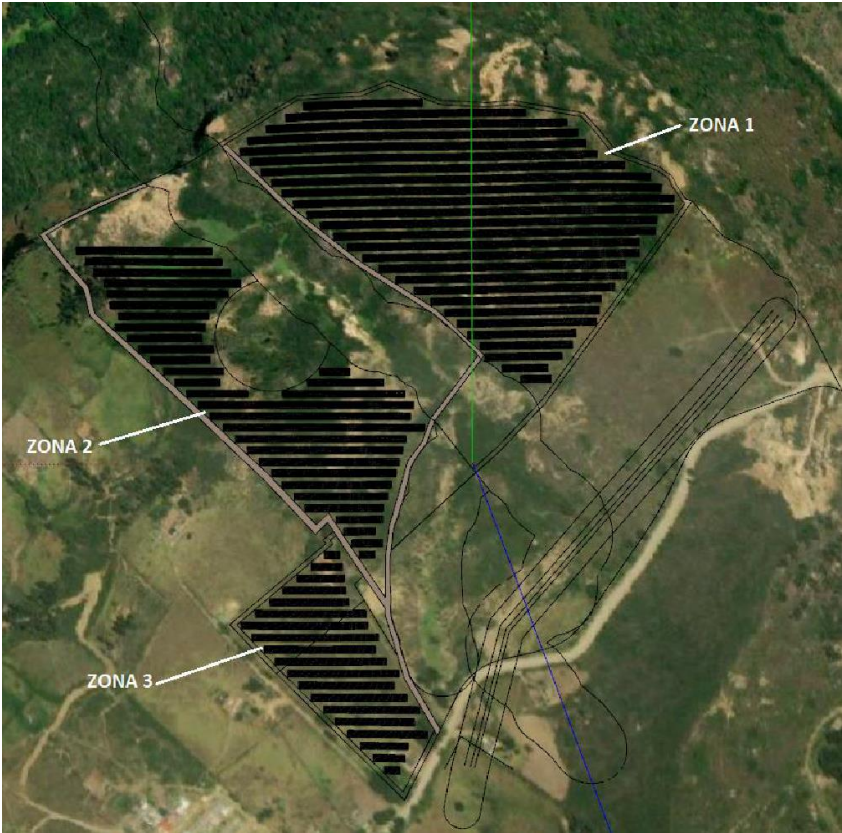


Fig 15. Área de circulación y servidumbre en el proyecto

## VI. RESULTADOS

### SIMULACIÓN DEL CONEXIONADO EN ARCHELIOS PRO

Se dimensionó de forma preliminar como quedarían distribuidas las cargas en los inversores al estimar un número de paneles en serie y cadenas en paralelo; sin embargo, teniendo en cuenta el área del proyecto, su capacidad instalada, la distancia y la cargabilidad se realiza un arreglo mediante el software Archelios Pro con sus respectivos inversores.

Con esta herramienta se realizó la distribución de los paneles, teniendo como objetivo respetar los límites operacionales del inversor, es decir, vigilar que no se supere el voltaje máximo de entrada y la corriente máxima permisible (considerando un factor de sobrecarga del 30%). Se han obtenido los siguientes resultados:

TABLA II  
SIMULACIÓN DE LOS ARREGLOS EN ARCHELIOS PRO

Cantidad de paneles	Potencia Instalada [MWp]	Inversor	Cantidad de inversores	Paneles/Cadena	Número de cadenas en paralelo	Cargabilidad del inversor [%]
25632	11,66	SUN2000-105KTL-H1 HUAWEI	89	24	12	124,8

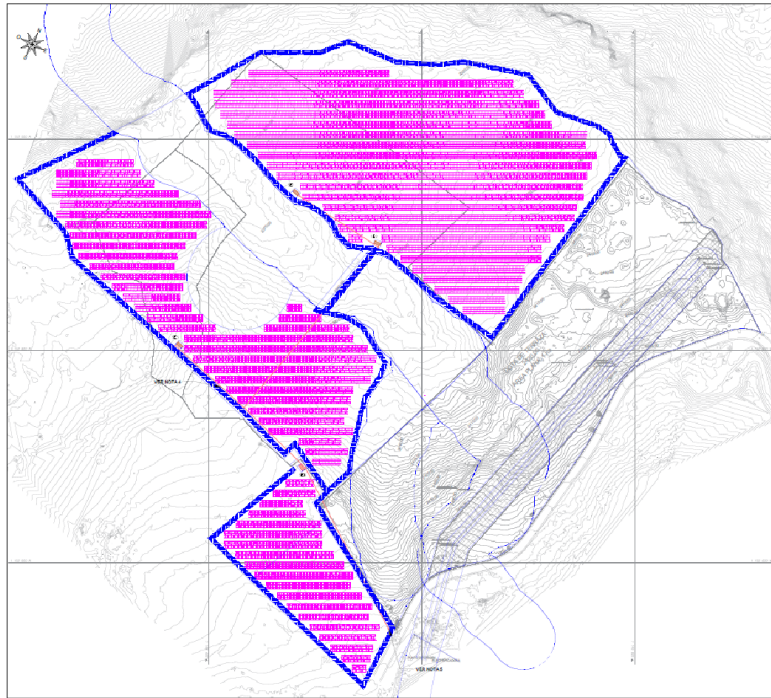


Fig 16. Planimetría conceptual

## SIMULACIÓN DE LA MÁXIMA CAPACIDAD INSTALADA

Para determinar la máxima capacidad instalada de acuerdo con el área disponible se hizo uso del software Sketchup pro, versión 2020; junto con el plugin de Archelios Pro para cargar la información específica de los paneles reportada por el fabricante.

TABLA III  
CAPACIDAD INSTALADA EN LA ZONA

Área [m <sup>2</sup> ]	Referencia del panel	Cantidad de Paneles	Potencia Instalada [kWp]	MW/Ha	Referencia de inversores	Cantidad de inversores
154300	CS3W- 455MS	<b>25632</b>	<b>11662,56</b>	0,76	SUN2000- 105KTL- H1 HUAWEI	<b>89</b>
Hectáreas	<b>15,43</b>					

## PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PARA EL DISEÑO PROPUESTO CON PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA P50 Y P90

A continuación, se presentan los resultados de producción de energía para el proyecto Juana María para las probabilidades de excedencia P50 y P90. Los resultados fueron obtenidos mediante simulación con el software ArcheliosPRO.

### *Producción de energía para probabilidad de excedencia P50*

En la tabla 4 se presenta la producción de energía del primer año con una proyección a 50 años de los datos de radiación solar y la tabla 5 muestra la producción media de la granja solar para una probabilidad de excedencia de P50.

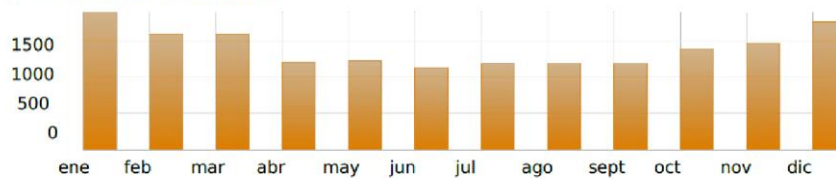
TABLA IV  
PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PRIMER AÑO P50

Resultados 1er Año						
Tecnología/Montaje	Capacidad Instalada [kWp]	Producción AC Anual P50 [GWh/año]	Producibile Específico P50 [kWh/kWp]	Factor de planta (P50) [%]	Coeficiente de rendimiento [%]	Emisiones Evitadas [Ton CO2]
Mono cristalina/Estructura Fija-Inclinación de 14°	11662,56	17,938	1538	17.6 %	82,23 %	2949

**TABLA V**  
**PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MEDIA P50**

Resultados Promedio 25 Años						
Tecnología/Montaje	Capacidad Instalada [kWp]	Producción AC Anual P50 [GWh/año]	Producible Específico P50 [kWh/kWp]	Factor de planta (P50) [%]	Coefficiente de rendimiento [%]	Emisiones Evitadas [Ton CO2]
Mono cristalina/Estructura Fija-Inclinación de 14°	11662,56	16,798	1440	16,4 %	77,0 %	68987

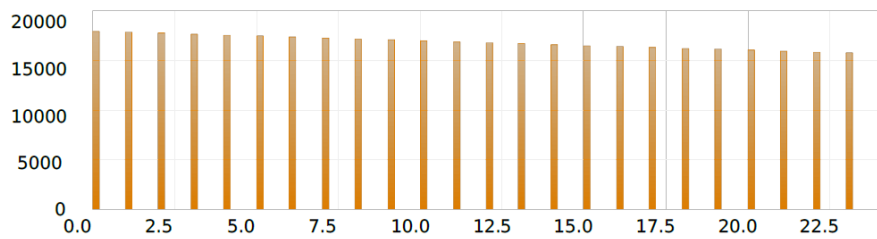
**Producción CA mensual (MWh/mes):**



Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
MWh	1,890	1,594	1,591	1,202	1,221	1,127	1,186	1,191	1,191	1,382	1,461	1,763

Fig 17. Producción media mensual para el proyecto [P50]



**Producción CA por año (MWh):**

Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MWh	17,938	17,842	17,746	17,649	17,553	17,456	17,360	17,263	17,167	17,071

Años	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
MWh	16,975	16,879	16,783	16,687	16,592	16,496	16,401	16,306	16,212	16,118

Años	21	22	23	24	25
MWh	16,024	15,930	15,836	15,743	15,651

Fig 18. Producción media anual para el proyecto [P50]

En la figura 17 podemos ver una gráfica que muestra la producción de energía media mensual del proyecto y en la figura 18 la producción de energía media anual, ambas con una probabilidad de excedencia de P50.

Principales indicadores:

Capacidad instalada: 11,662 MWp

Producción P50: 16,798 GWh/año

Coefficiente de rendimiento: 77,00%

Factor de planta: 16,4%

#### *Producción de energía para probabilidad de excedencia P90*

En la tabla 6 se presenta la producción de energía del primer año con una proyección a 90 años de los datos de radiación solar y la tabla 7 muestra la producción media de la granja solar para una probabilidad de excedencia de P90.

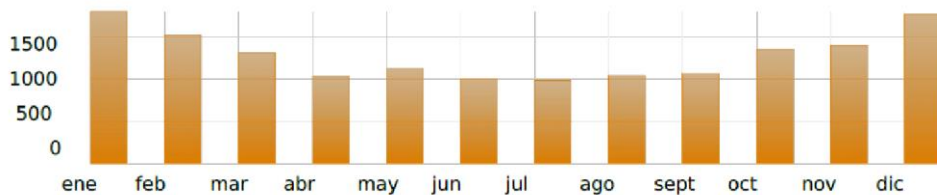
**TABLA VI**  
**PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PRIMER AÑO P90**

Resultados 1er Año						
Tecnología/Montaje	Capacidad Instalada [kWp]	Producción AC Anual P50 [GWh/año]	Producibile Específico P50 [kWh/kWp]	Factor de planta (P50) [%]	Coefficiente de rendimiento [%]	Emisiones Evitadas [Ton CO2]
Mono cristalina/Estructura Fija-Inclinación de 14°	11662,56	16,524	1417	16,2 %	81,96 %	2716

**TABLA VII**  
**PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MEDIA P90**

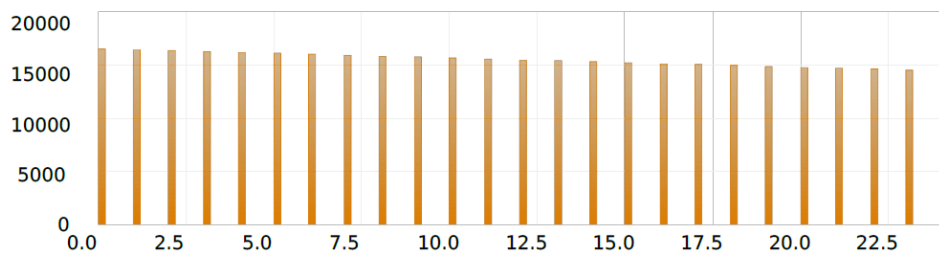
Resultados Promedio 25 Años						
Tecnología/Montaje	Capacidad Instalada [kWp]	Producción AC Anual P50 [GWh/año]	Producibile Específico P50 [kWh/kWp]	Factor de planta (P50) [%]	Coefficiente de rendimiento [%]	Emisiones Evitadas [Ton CO2]
Mono cristalina/Estructura Fija-Inclinación de 14°	11662,56	15,485	1328	15,2 %	76,8 %	63587

**Producción CA mensual (MWh/mes):**



Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
MWh	1,809	1,532	1,322	1,034	1,128	1,006	991	1,048	1,074	1,357	1,407	1,776

Fig 19. Producción media mensual para el proyecto [P90]

**Producción CA por año (MWh):**

Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MWh	16,524	16,436	16,348	16,261	16,173	16,085	15,997	15,909	15,821	15,734

Años	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
MWh	15,646	15,558	15,471	15,383	15,296	15,209	15,122	15,035	14,948	14,861

Años	21	22	23	24	25
MWh	14,775	14,688	14,602	14,516	14,431

Fig 20. Producción media anual para el proyecto [P90]

En la figura 19 podemos ver una gráfica que muestra la producción de energía media mensual del proyecto y en la figura 20 la producción de energía media anual, ambas con una probabilidad de excedencia de P90.

Principales indicadores:

Capacidad instalada: 11,662 MWp

Producción P90: 15,485 GWh/año

Coefficiente de rendimiento: 76,80%

Factor de planta: 15,2%

---

## VI. ANÁLISIS

Debido a que el sol es una fuente variable de energía, la cantidad y costo de energía que produce un sistema solar es muy variable y debe entenderse para la financiación de proyectos. A medida que crecen los proyectos, se necesita más esfuerzo para comprender y evaluar el rendimiento potencial de los paneles solares.

Las estimaciones de producción solar se basan en una serie de factores, algunos pueden controlarse y modelarse con un alto grado de certeza, otros implican más especulaciones sobre el futuro. Dado que se trata de estimaciones, necesitamos establecer un nivel de confianza para cada estimación.

El nivel de confianza de la cantidad de energía que producirá un sistema solar se mide en niveles de producción P50 y P90.

P50 significa que hay un 50 % de probabilidad en un año determinado de que la producción sea al menos una cantidad específica. Para el dato de producción anual P50 de 16,798 GWh/año, tiene como significado que en cualquier año durante los 25 años de vida útil del proyecto, tiene el 50% de probabilidad de que la producción de energía de ese año sea por lo menos 16,798 GWh.

La producción de P90 significa que hay un 90 % de posibilidades de que en un año determinado la producción sea al menos la cantidad específica. Es decir, que solo hay un 10% de probabilidad de que la producción sea inferior a la cantidad indicada. Para el dato de producción anual P90 de 15,485 GWh/año, tiene como significado que en cualquier año durante los 25 años de vida útil del proyecto, tiene el 90% de probabilidad de que la producción de energía de ese año sea por lo menos 15,485 GWh.

La diferencia entre la producción P50 y P90 es de 1.313 GWh, lo que representa que las estimaciones de producción P90 son un 7,82% menores a la estimación de producción P50.

Si se asume que cada kWh vale exactamente la misma cantidad, esto significa que el costo de la electricidad producida con el P90 probablemente será un 7,82 % menor en comparación con el P50. Sin embargo, se puede tener más seguridad de que se alcanzará el nivel de producción de P90 cada año.

---

## VII. CONCLUSIONES

- Para la evaluación del terreno disponible, se tuvo en cuenta la información suministrada por el cliente, en donde se observó algunos obstáculos que por su naturaleza representan restricción en algunos sitios parciales del terreno para el diseño del proyecto de generación fotovoltaica, que en su mayoría son drenajes simples intermitentes y un nacimiento del agua; los cuales se respetaron y se realizó la ingeniería respetando dichas servidumbres ambientales.
- Con base en las consideraciones hechas sobre la servidumbre necesaria, la disposición de las mesas de paneles y las áreas para las estaciones inversoras se determina que es posible instalar 25.632 paneles de la referencia CS3W-455MS del fabricante CANADIANSOLAR, lo que equivale a 11,66 MWp, y se requiere de 89 inversores SUN2000-105KTL-H1 del fabricante HUAWEI.
- Como criterio de diseño, los sistemas fotovoltaicos se instalan con una sobrecarga cercana al 30% de lo admitido por el inversor, esto se debe a que en operación normal se cuenta con sombras, es decir que la operación de los módulos tiene una potencia distinta a la nominal, y las pérdidas entre otros factores provocan que el sistema no sobrecargue los inversores, además a medida que pasa el tiempo los módulos pierden potencia y esta sobrecarga garantiza una operación cerca de la nominal durante toda la vida útil de la instalación, por lo que la potencia excedente que se le exige disipar al inversor no es más de la que eventualmente puede manejar. Sin embargo, para realizar dicha sobrecarga, se debe consultar con el proveedor de los inversores, el cual dará su visto bueno a la sobrecarga que se le proponga, de tal forma que no se afecte la garantía.
- Debido a la degradación de los módulos (modelo de degradación lineal con 0,60% de la potencia nominal por año aproximadamente) la potencia de la instalación se ve reducida en un 11,47% al final de la vida útil de 25 años.
- Cuanto mayor sea la variabilidad del clima en un área específica, mayor será la variabilidad entre P50 y P90 porque los niveles de radiación solar explican la mayor parte de la variabilidad en la producción.

## REFERENCIAS

- [1] “Solargis ::”[Online]. Available:  
<https://solargis.info/imaps/#tl=Google:hybrid&bm=satellite&loc=5.976761,-2.753164&c=5.976761,-72.753164&z=14>. [Accessed: 23-Nov-2020].
- [2] University of Oregon, “UO SRML: Sun chart program,” 2015. [Online]. Available:  
<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>. [Accessed: 15-Jul-2019].
- [3] P. Rios Jesús Iram and M. Benavides Arturo, “Productividad de paneles solares monocristalinos,” 2017.
- [4] Diseño de un Sistema Eléctrico Fotovoltaico para una Comunidad Aislada, Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería Eléctrica,
- [5] Diseño de una planta Solar Fotovoltaica de 50 MW, Santiago Machado, Mauro Stocco, Rafael Bruno.
- [6] Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación, “NTC 2050. Código Eléctrico Colombiano,” 1998.
- [7] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, “Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE,” 2013.
- [8] IEB-087-20-IB-DT-04 - DISEÑO E INGENIERÍA BÁSICA PARA EL PROYECTO DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA