

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño de un sistema fotovoltaico para generación de energía en una
industria envasadora de gas.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Alexander Vicente Medina Bohórquez

Giancarlo Eduardo Suárez Guillén

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Dedico este Título a mis padres, hermanas y tíos por darme el apoyo y ejemplo de ser una persona fuerte a pesar de los obstáculos que deparan en la vida.

En especial a mis abuelos, ya que han sido los principales influyentes de mi desarrollo personal, brindándome una buena calidad de vida, instruyéndome con sus consejos para tener un gran futuro. Sobre todo, le dedico en memoria de mi abuelo Ab. Juan Suárez Méndez por ser siempre mi esencial fuente de inspiración.

Giancarlo Suárez Guillén

Dedico el siguiente trabajo a mi madre y mi padre los cuales han sido mi inspiración para seguir cada día, con sus consejos me han ayudado a no decaer frente a las circunstancias, a mis hermanos los cuales siempre han estado apoyándome en las decisiones que tomo y finalmente a mis amigos quienes a pesar de no pasar mucho tiempo juntos siempre me han deseado lo mejor.

Alexander Medina Bohórquez

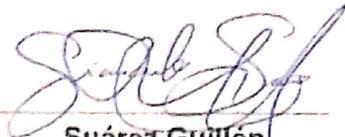
AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a nuestro tutor de Tesis, PhD. Juan Peralta por su aporte en conocimientos para el desarrollo de este proyecto. A nuestros profesores de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, ya que ellos han sido partícipes de nuestra formación profesional a través de sus cátedras.

También al Ing. David Valle y a la Ing. Camila Tamayo por permitirnos demostrar nuestros conocimientos adquiridos frente a una necesidad de carácter ingenieril.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Suárez Guillén Giancarlo Eduardo* y *Medina Bohórquez Alexander Vicente* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Suárez Guillén
Giancarlo Eduardo



Medina Bohórquez
Alexander Vicente

EVALUADORES

PhD. Miguel Quilambaqui Jara

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Juan Peralta Jaramillo

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Las emisiones de GEI por el sector industrial afectan al cambio climático, con un alrededor de 24% con respecto a 49 billones de toneladas de CO₂ generadas al año a nivel mundial. Esto perjudica al desarrollo humano como la salud, seguridad alimentaria, aspectos socioeconómicos y además de impactar al medio ambiente. Teniendo en cuenta estos antecedentes, en el siguiente proyecto se realizó el diseño de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica para una planta envasadora de gas, con la finalidad de cubrir parcialmente la demanda energética de dicha empresa, así como también estimar la reducción de la huella de carbono y evaluar la prefactibilidad del proyecto.

Se realizó un estudio climatológico del lugar previsto para el sistema FV para determinar parámetros como la radiación solar, velocidad de viento, temperatura y humedad. Se realizó un prediseño del sistema en el software PVsyst tomando en cuenta el área disponible de la empresa, la capacidad máxima permitida a nivel local por ARCONEL, el arreglo y tipo de módulos solares. Para el diseño se seleccionaron 168 módulos de capacidad de 545 Watts. Se tuvo una producción anual del sistema fotovoltaico de aproximadamente 160 MWh con un abastecimiento de al menos 23%, teniendo un arreglo de 12x14 paneles solares ubicados en el tejado de la planta de envasado.

La inversión del proyecto fotovoltaico es alrededor de \$101.264,53 con un retorno de 8 años. Finalmente se estima una reducción de 705,23 ton CO₂ al ambiente por el tiempo de vida del proyecto.

Palabras Clave: Emisiones de GEI, sistema fotovoltaico, estudio climatológico, abastecimiento, prefactibilidad.

ABSTRACT

GHG emissions from the industrial sector decrease due to climate change, at about 24% of the 49 billion tons of CO₂ generated per year worldwide. This harms human development such as health, food security, socioeconomic aspects, also impacts the environment. Considering these backgrounds, in the following project was carried out the design of a photovoltaic system connected on grid for a gas bottling plant, in order to partially cover the energy demand of said company, as well as to estimate the reduction of the carbon footprint and evaluate the pre-feasibility of the project.

A climatological study of the place planned for the PV system was carried out to determine parameters such as solar radiation, wind speed, temperature and humidity. A pre-design of the system was carried out in the PVsyst software, considering the available area of the company, the maximum capacity allowed locally by ARCONEL, the arrangement and type of solar modules. For the design, 168 modules with a capacity of 545 Watts were selected. There was an annual production of the photovoltaic system of approximately 160 MWh with a supplying of at least 23%, having an arrangement of 12x14 solar panels located on the roof of the packaging plant.

The investment of the photovoltaic project is around \$101,264.53 with a return of 8 years. Finally, a reduction of 705.23 tons of CO₂ into the environment is estimated for the life of the project.

Keywords: *GHG emissions, photovoltaic system, climatological study, supplying, pre-feasibility.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Definición y clasificación de energía	4
1.4.2 Plantas de generación de energía.....	5
1.4.3 Células Solares	6
1.4.4 Componentes del sistema fotovoltaico.....	8
1.4.5 Sistemas de paneles solares	10
1.4.6 Geometría solar.....	12
1.4.7 Radiación solar.....	14
CAPÍTULO 2.....	15

2.	METODOLOGÍA	15
2.1	Normas, Especificaciones y Restricciones	16
2.2	Datos del sistema	17
2.3	Estudio de radiación	18
2.3.1	Ubicación	18
2.3.2	Extracción de datos climatológicos	18
2.3.3	Cálculo de los ángulos solares.....	21
2.4	Prediseño del sistema fotovoltaico usando capacidad máxima 100kWp	26
2.4.1	Implementación del diseño del proyecto en un software de simulación .	26
2.4.2	Alternativa de solución	28
2.4.3	Cálculo de abastecimiento del sistema	29
2.4.4	Selección del Inversor	29
2.4.5	Pérdidas en el sistema	30
2.5	Diseño final del sistema	32
2.5.1	Arreglo del sistema FV en la ubicación estratégica de la planta	33
CAPÍTULO 3.....		34
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	34
3.1	Análisis energético.....	34
3.2	Análisis estructural.....	36
3.3	Análisis de costos	40
3.4	Estimación de reducción de huella de carbono	42
3.5	Esquema del sistema fotovoltaico	43
CAPÍTULO 4.....		44
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
4.1	Conclusiones	44

4.2	Recomendaciones	44
	BIBLIOGRAFÍA	46
	APÉNDICES	48

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GEI	Gases de efecto invernadero
MCI	Motores de combustión interna
MDL	Mecanismo de desarrollo limpio
IIGE	Instituto de Investigación Geológico y Energético
CENACE	Operador Nacional de Electricidad
NREL	National Renewable Energy Laboratory
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and A-C Engineers
NACE	National Association of Corrosion Engineer
ARCONEL	Agencia de Regulación y Control de Electricidad
GHG	Greenhouse gas

SIMBOLOGÍA

FV	Fotovoltaico
CO ₂	Dióxido de carbono
CdTe	Telurio de cadmio
CiS	Células de seleniuro de indio
Ton	Toneladas
m	metro
mm	milímetro
d	día
h	hora
cm ²	centímetros cuadrado
g	gramos
W	vatios
mV	milivoltio
mA	miliamperios
AC	corriente alterna
DC	corriente directa
MW	megavatios
USD	Dólar estadounidense
kWp	kilovatios pico
kN	kiloNewton
MPa	MegaPascales

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Generación de energía en el Ecuador en el periodo 2002-2014	2
Figura 1.2 Producción de energía en Ecuador según el tipo de planta en 2019.....	6
Figura 1.3 Silicio monocristalino	7
Figura 1.4 Silicio multicristalino.....	8
Figura 1.5 Componentes de un sistema fotovoltaico	9
Figura 1.6 Esquema de un sistema conectado a la red	10
Figura 1.7 Sistemas conectados a la Red	10
Figura 1.8 Sistemas aislados	11
Figura 1.9 Esquema de un sistema híbrido con una fuente eólica.....	12
Figura 1.10 Descripción de posición solar según ángulos solares	12
Figura 1.11 Esquema de la declinación solar	13
Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología de diseño.....	16
Figura 2.2 Ubicación del sistema fotovoltaico (Lat:-3,507, Long: -79,967)	18
Figura 2.3 Interfaz del programa “Power data access viewer”.....	18
Figura 2.4 Datos de albedo mensual obtenidos (2011-2021)	19
Figura 2.5 Datos de irradiancia difusa mensual obtenidos (2011-2021)	19
Figura 2.6 Datos de irradiancia directa mensual obtenidos (2011-2021).....	20
Figura 2.7 Datos de temperatura mensual obtenidos (2011-2021).....	20
Figura 2.8 Datos de velocidad de viento mensual obtenidos (2011-2021)	21
Figura 2.9 Declinacion solar por todo el año.....	22
Figura 2.10 Altitud solar durante el año	22
Figura 2.11 Ángulo cenital del sector durante el año	23
Figura 2.12 Factor geométrico del sistema	23
Figura 2.13 Captura PVsyst del diseño del proyecto.	27
Figura 2.14 Mapa de pérdidas por suciedad usando base de datos de SolarAnywhere (2006-2020)	30
Figura 2.15 Diagrama Sankey de pérdidas del sistema FV (anual) utilizando PVsyst	31
Figura 2.16 Arreglo del sistema fotovoltaico en la planta.....	33

Figura 3.1 Generación de energía FV (real y mínima) vs demanda energética de la planta 2021	35
Figura 3.2 Abastecimiento mensual (real y mínimo) del sistema FV en la planta	36
Figura 3.3 Fuerzas aplicadas en una viga longitudinal del galpón.....	37
Figura 3.4 Deformación de la viga del galpón.....	37
Figura 3.5 Fuerzas aplicadas en la estructura transversal del galpón	38
Figura 3.6 Esfuerzos máximos combinados en la estructura transversal del galpón.	38
Figura 3.7 Deformación en la estructura transversal del galpón	39
Figura 3.8 Esfuerzos máximos combinados en soporte vertical	39
Figura 3.9 Deformación en soporte vertical	40
Figura 3.10 Reducción de emisiones de CO ₂ del proyecto FV	42
Figura 3.11 Vista isométrica del proyecto fotovoltaico	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Consumo eléctrico de la planta en el año 2021	17
Tabla 2.2 Datos para la radiación promedio en el sistema FV (2011-2021)	24
Tabla 2.3 Radiación promedio total para el sistema FV.....	25
Tabla 2.4 Caracterización climatológica de la ubicación de la planta (2011-2021)....	26
Tabla 2.5 Valores obtenidos en la simulación de PVsyst para diferentes módulos FV.	27
Tabla 2.6 Costos de módulos fotovoltaicos para los sistemas FV	28
Tabla 2.7 Resumen del sistema fotovoltaico establecido	32
Tabla 3.1 Costos de implementación del proyecto	41
Tabla 3.2 Tiempo de retorno del proyecto	41
Tabla 3.3 VAN y TIR en los primeros 10 años del proyecto	41
Tabla 3.4 Reducción de emisiones de CO ₂ en el proyecto fotovoltaico.....	42

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno del cambio climático es una problemática surgida desde el comienzo de la industrialización. Con el paso del tiempo, el avance tecnológico ha ido en incremento solventando las necesidades del hombre, sin embargo, dichos avances dan como consecuencia una mayor demanda energética. La humanidad ha estado en constante búsqueda de la obtención de energía, desde la necesidad en manipular el fuego hasta la exigencia en crear medios de transporte. Estas prácticas se han estado incentivando y perfeccionando para que el aprovechamiento de la energía no repercuta en el cambio climático y todo lo relacionado tanto en aspectos desde lo ambiental hasta lo socioeconómico (Martínez, 2015, p.3).

En el siguiente proyecto se va a realizar el diseño de un sistema fotovoltaico para una empresa envasadora de gas.

Dicho proyecto está relacionado con actividades de sostenibilidad y planes de mejora continua realizada por la planta envasadora cuyo impacto comercial podrá a futuro ingresar en el mercado MDL o bonos verdes.

Este sistema debe cubrir parcialmente las necesidades de la industria, tomando en cuenta la disponibilidad de esta como el poder adquisitivo y espacio permitido.

El diseño del sistema fotovoltaico se lo realizará mediante un estudio de demanda energética y análisis de costos.

Se mostrarán planos del sistema y su estructura, como también cálculos sobre la capacidad de energía generada y la estimación de emisiones GEI ahorrados por la implementación del proyecto.

1.1 Descripción del problema

El sector industrial contribuye con las emisiones de gases de efecto invernadero aportando al cambio climático. Este problema trae consigo la carencia de recursos limpios, a su vez influye en el desarrollo humano como en la salud pública, seguridad alimentaria y aspectos socioeconómicos en la población (Martínez, 2015, p.4).

La producción de energía tanto eléctrica como calórica, son unas de las principales fuentes que impacta el cambio climático debido a la utilización de recursos no renovables como los combustibles fósiles, que estos son unos de los mayores agentes contaminantes para el entorno. Se estima que alrededor de un 60% de las emisiones de GEI en el mundo son atribuidos por la generación de energía convencional (Parra, 2013, p.2).

En la siguiente gráfica cuál se muestra la producción del tipo de energía en el Ecuador desde el año 2001 al 2014.

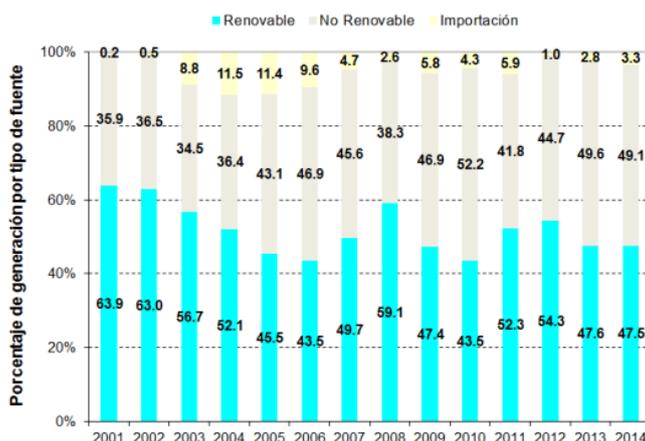


Figura 1.1 Generación de energía en el Ecuador en el periodo 2002-2014 [Parra, 2013, p.2].

El consumo de energía eléctrica, a pesar de que, en nuestro país, una cantidad considerable es generada de forma renovable, no deja de ser una fuente de emisión

que contribuye a este fenómeno, por ello, nace la necesidad de evaluar la factibilidad de alternativas eficientes y amigables con el ambiente, que a su vez representen un ahorro económico.

1.2 Justificación del problema

A lo largo de los años el hombre ha buscado múltiples alternativas de generación de energía aparte de la energía convencional que son a base de combustibles fósiles, estos tienen un efecto muy perjudicial en el medio ambiente ya que emiten gases que afectan la atmósfera. Para buscar alternativas que combatan este efecto negativo se han generado varias alternativas de fuentes renovables por medios de: fuentes eólicas, hídricas, solares donde sus fuentes son inagotables y limpias que no afectan el medio ambiente.

Una de las alternativas para poder suplir cierta parte de la demanda energética de una instalación se cuenta con paneles solares, pero para poder implementarlo se necesita de hacer un estudio energético de que equipos y que áreas se pueden suplir de este tipo de energía.

Algunas envasadoras de gas tienen la necesidad de cubrir la demanda energética de un área por paneles fotovoltaicos, los cuales están entre uno de sus planes de mejora continua para así poder ingresar al mercado de El Mecanismo para un Desarrollo Limpio “MDL” o bonos verdes.

“El Mecanismo para un Desarrollo Limpio es un término internacional establecido por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) mediante el Protocolo de Kyoto (PK)” (Ministerio del Ambiente, 2019). Estas se certifican en las reducciones de GEI, que es el principal beneficio que se obtiene para disminuir el impacto del cambio climático en el mundo (Ministerio del Ambiente, 2019).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Realizar el diseño de un sistema fotovoltaico de generación de energía que cubra parcialmente la demanda de consumo energético en la planta envasadora de gas, considerando el retorno de la inversión a corto plazo.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Dimensionar el sistema fotovoltaico por medio de un estudio de demanda de energía.
2. Evaluar la prefactibilidad de la solución energética mediante un análisis de costos.
3. Estimar la tasa de reducción de emisiones de CO₂ empleando criterios de movilidad sostenible.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Definición y clasificación de energía

La definición universal de energía se lo denota como la suficiencia que posee la materia para lograr realizar un trabajo. Se manifiesta de un sin número de formas. Entre las más perceptibles están la energía potencial, cinética, térmica, química, eléctrica, electromagnética, nuclear, entre muchos más (González, 2009, p.6).

El ser humano ha desarrollado técnicas para el empleo y aprovechamiento de energía, extrayendo de diferentes fuentes como los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas). Estas han sido las más utilizadas desde el inicio de la industrialización.

Por otra parte, existen otros métodos amigables con el medio ambiente denominadas energías renovables (González, 2009, p.17).

1.4.2 Plantas de generación de energía

Las plantas de generación eléctrica se basan en utilizar la energía de una sustancia o material, para que este accione a un mecanismo junto a un circuito eléctrico llamado generador, donde da comienzo a la electricidad.

Existen diferentes formas de conseguir la energía eléctrica. Estos van a depender del tipo de combustible o fuente:

Térmica. - Es la principal generación en donde se utilizan los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) para la elaboración de vapor de agua dentro de una caldera, este vapor fluye con mejor facilidad y con mayor energía que en estado completamente líquido (Díez, 2009, p.1).

Biomasa. - Se utiliza material orgánico como combustible, principalmente con productos leñosos. La caña de azúcar es mayormente utilizada en las industrias generadoras debido a su cosecha accesible y poder calórico (Debernardi, 2016, p.69).

Hidráulica. - Se aprovecha de la energía cinética y potencial del agua proveniente de cascadas y ríos.

Eólica. - Se extrae energía de las corrientes de aire circundante. (energía cinética). Se utilizan una cantidad de molinos eólicos conectados entre sí, para bombear agua y obtener electricidad.

Biogás. - Proviene de la biodegradación orgánica, como desechos humanos, animal y vegetal. Estas se almacenan en un reservorio, donde reaccionan microorganismos por la deficiencia de oxígeno obteniendo metano útil como biocombustible para plantas térmicas (Villa, 2011, p.2).

Solar. - Se origina debido a la radiación solar. Existen diversas aplicaciones, como utilizar los rayos del sol como energía térmica para aumentar

temperatura, como por ejemplo en los desalinizadores y hornos solares, y la otra aplicación es mediante los sistemas fotovoltaicos (Solar, 2014, p.152-170).

En el Ecuador se registra una cantidad considerable de plantas hidroeléctricas. En la siguiente gráfica se ilustra la producción de energía eléctrica bruta por el tipo de planta.

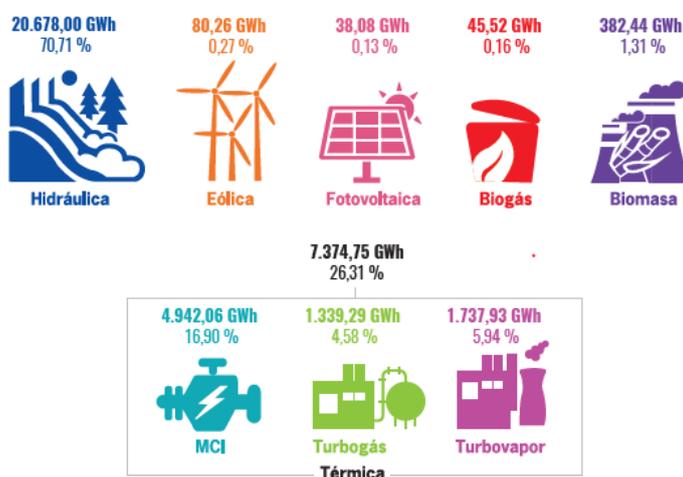


Figura 1.2 Producción de energía en Ecuador según el tipo de planta en 2019 [IIGE, 2019].

1.4.3 Células Solares

Células Solares. - Las células solares son un dispositivo en el cual se produce una conversión de energía solar a energía eléctrica, esto gracias a las propiedades de ciertos materiales de los que están compuesto denominados semiconductores y las estructuras o uniones pn que forman los mismos. (Grupo de Nuevas Actividades Profesionales, 2002, p.11).

Unión Pn. - Está formada por la unión de 2 tipos de materiales semiconductores n y p, por medio de esta unión se forma un paso de electrones desde la zona del material n al material p formándose una región denominada depleción de transición. De un extremo hay predominancia de huecos y del otro extremo electrones, dicha configuración produce una

diferencia de potencial en la unión la cual por medio de pequeñas perturbaciones ocasiona el flujo de electrones (Bermúdez, 2008, p.14).

Células de silicio cristalino. - Son el tipo de celda más fabricado en la actualidad para realizar los paneles fotovoltaicos, se dividen en monocristalina cuando solo está compuesta de una capa y policristalina cuando están compuesta de varias capas, las celdas solares pueden ofrecer eficiencias de hasta 85% al 90% (Ortega y Boada, 2013, p.55).

Células de silicio monocristalino. - Este cristal tiene una forma cilíndrica donde se le realiza cortes transversales que son usados como materia prima para elaborar los paneles, el silicio del que está compuesto es de gran pureza, pero su fabricación es muy costosa hoy en día (Ortega y Boada, 2013, p.55).



Figura 1.3 Silicio monocristalino [Jäger, 2014, p.144].

Células de silicio policristalino. - Se forman a partir de lingotes de silicio que ha sido fundido y recristalizado al igual que los monocristalinos se cortan en obleas finas y se montan en celdas. La eficiencia de este tipo de células es menor a las monocristalinas (Ortega y Boada, 2013, p.54).



Figura 1.4 Silicio multicristalino [Jäger, 2014, p.144].

Celdas de película delgada. - Adicionalmente a los materiales mencionados anteriormente, se cuenta con otros tipos como el CdTe y el CiS que también se usan para fabricar celdas solares. A diferencia de los anteriores tipos el costo de estas es más barato ya que no necesitan de laboratorios si no de procesos industriales, la desventaja que presenta es que los materiales son altamente tóxicos (Ortega y Boada, 2013, p.55).

Celdas de silicio amorfo. - Están formadas con depósito de silicio en una capa homogénea sobre su sustrato. Este silicio amorfo absorbe la luz más eficazmente por lo que sus celdas son más delgadas. Tiene la ventaja de permitir depositarse sobre una gran gama de sustratos ya sean rígidos o flexibles permitiéndoles moldearse en superficies planas y curvadas (Ortega y Boada, 2013, p.58).

1.4.4 Componentes del sistema fotovoltaico

En la siguiente imagen se mostrará un esquema de un sistema fotovoltaico convencional.

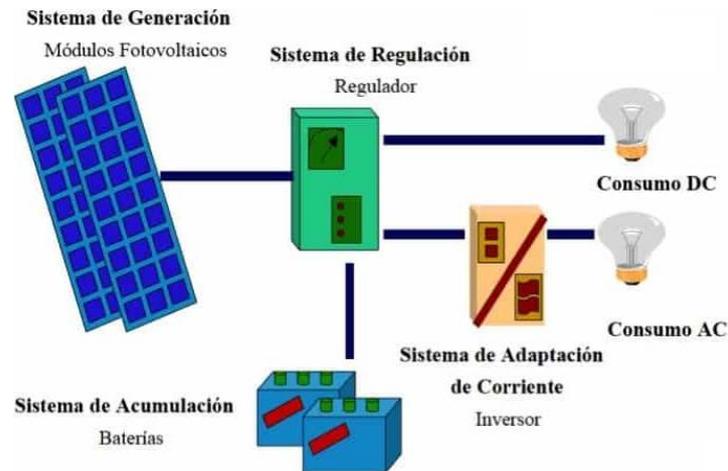


Figura 1.5 Componentes de un sistema fotovoltaico [Sunfield, 2005].

Paneles solares. - Un panel solar o panel fotovoltaico es una configuración de muchas celdas fotovoltaicas en serie para obtener lo que se denomina un módulo fotovoltaico, comúnmente estos funcionan a 12 voltios o un múltiplo de este. Un módulo estándar genera entre 70 y 200W (Ortega y Boada, 2013, p.59).

Regulador. - El regulador o controlador cuya funcionalidad en el sistema es de brindar seguridad al sistema completo y a las baterías, para que estas no estén sobrecargadas debido a la energía producida por los módulos fotovoltaicos (Enríquez, 2007, p.47).

Sistema de acumulación. - Las baterías almacenan la energía eléctrica proveniente de los módulos. Estas son liberadas en épocas del año cuando la radiación solar es baja, en invierno por los días nublados.

Inversores. - Los inversores cambian la configuración de la corriente, de DC a AC. Los módulos fotovoltaicos convierten la energía solar en corriente directa, está necesita del inversor ya que existen varios dispositivos receptores que trabajan con corriente alterna (Villegas, 2020, p.62).

1.4.5 Sistemas de paneles solares

Sistemas conectados a la red. – Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red consisten en una medida cuando surgen diferentes circunstancias. Cuando la generación energética por el sistema excede a la demanda local, dicha diferencia es enviada a la red eléctrica, obteniendo una ganancia adquisitiva por parte de la empresa eléctrica. El otro escenario es cuando la generación es baja respecto a la demanda, la energía eléctrica faltante es suministrada por la red eléctrica (González, 2003, p.140).

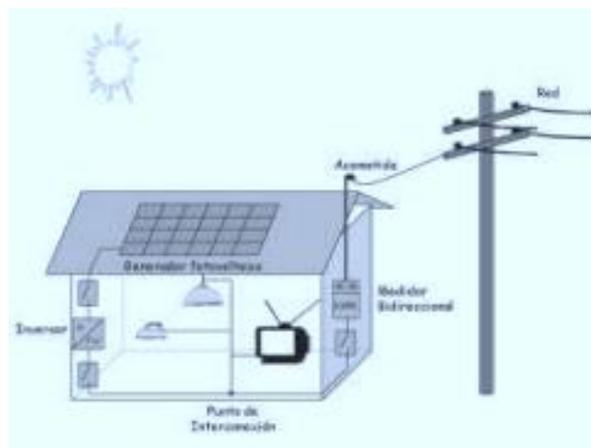


Figura 1.6 Esquema de un sistema conectado a la red [González, 2003, p.141].



Figura 1.7 Sistemas conectados a la Red [Grupo de Nuevas Actividades Profesionales, 2002, p.22].

Sistemas aislados de la Red. - Un sistema fotovoltaico aislado de la red o autónomo son sistemas que permiten satisfacer el consumo de cargas eléctricas no conectadas a la red, donde en momentos, la generación es menor al consumo que se requiere en sistemas de almacenamiento como baterías (Perpiñán, 2020, p.93).

Los sistemas que son domésticos consumen generalmente cargas continuas, lo que hace eliminar al inversor y abaratar costos. Sistemas como estos cuentan con el generador, acumulador electroquímico y un regulador de carga y descarga, en caso de que se necesite cargas de alterna se agrega el inversor (Perpiñán, 2020, p.93).

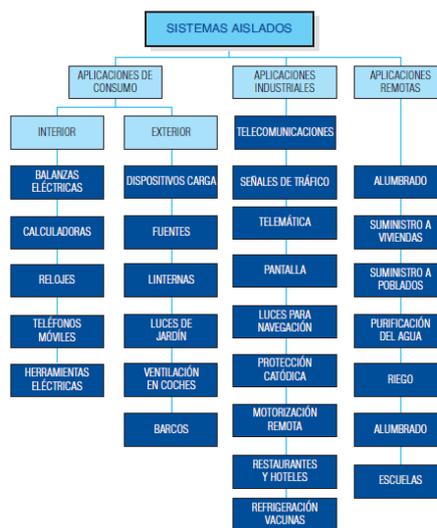


Figura 1.8 Sistemas aislados [Grupos de Actividades Profesionales, 2002, p.22].

Sistemas híbridos. – Los sistemas híbridos consisten en una configuración donde la generación de energía parte de algún otro mecanismo generador, además del sistema proveniente de los módulos fotovoltaicos.

Principalmente se instalan generadores de energía como motores, turbinas de vapor o gas, recursos renovables como las centrales eólicas o hidroeléctricas.

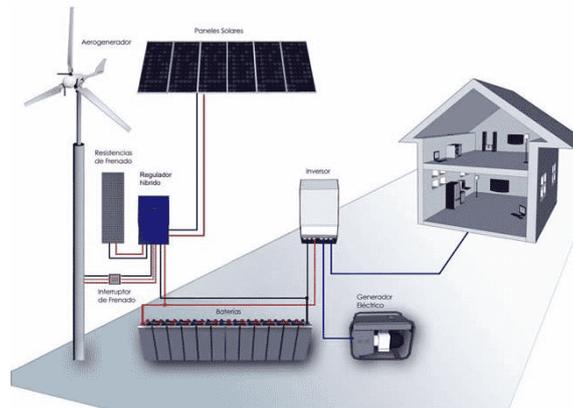


Figura 1.9 Esquema de un sistema híbrido con una fuente eólica [Cumbre Pueblos, 2019].

1.4.6 Geometría solar

Los rayos solares poseen diferentes direcciones debido al movimiento tanto de rotación como traslación de la Tierra. El estudio de los rayos solares corresponde a la parte inicial para un diseño ingenieril en donde involucra estos (Gómez, 2015, p.69).

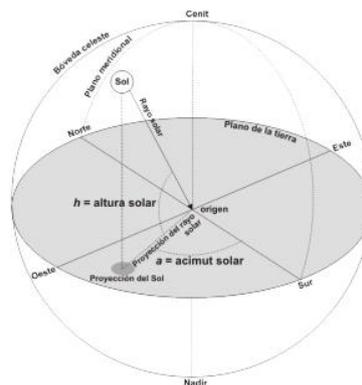


Figura 1.10 Descripción de posición solar según ángulos solares. [Gómez, 2015, p. 69].

Declinación solar. - Este ángulo representa una distancia angular entre el plano del ecuador y los rayos solares. Dicha provoca el cambio de las estaciones (ASHRAE,2021).

$$\delta = 23.45 \sin\left(360^\circ \frac{n+284}{365}\right) \quad (1.1)$$

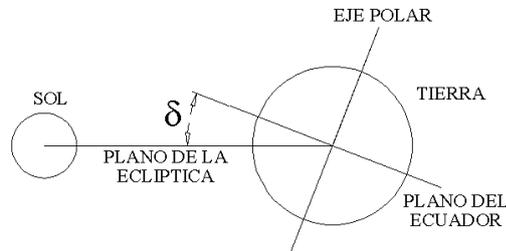


Figura 1.11 Esquema de la declinación solar [UNAM, 2004].

Ángulo horario. – Corresponde a un desplazamiento angular del sol que va de este a oeste a partir del meridiano de Greenwich causado por la rotación de la tierra (ASHRAE, 2021).

$$\omega = \frac{360(12-t)}{24} \quad (1.2)$$

Altitud solar. – Comprende un valor angular entre los rayos solares y su proyección sobre el plano horizontal (Kalogirou, 2014, p.60).

$$\sin(\alpha) = \sin(\lambda) \sin(\delta) + \cos(\lambda) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (1.3)$$

Donde λ es la latitud del sitio donde estará ubicado el sistema fotovoltaico.

Ángulo cenital. -Corresponde al ángulo entre los rayos solares y la vertical (Kalogirou, 2014, p.60).

$$\cos(\Phi) = \sin(\alpha) \quad (1.4)$$

Ángulo azimutal. – Corresponde al desplazamiento angular desde el sur de la proyección en el plano horizontal de la línea tierra/sol (Kalogirou, 2014, p.60).

$$\sin(z) = \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(\alpha)} \quad (1.5)$$

Ángulo Incidente. – Corresponde al valor angular entre los rayos solares y la normal en una superficie, para un plano horizontal este ángulo es igual al ángulo cenital (Kalogirou, 2014, p.62).

$$\cos(\theta) = \cos(\alpha) \cos(z) \sin(\beta) + \sin(\alpha) \cos(\beta) \quad (1.6)$$

1.4.7 Radiación solar

Irradiación Solar. - Corresponde a la energía solar recibida en un periodo de tiempo por unidad de superficie y sus unidades son Wh/m² (UNAM,2004). La irradiación solar posee 3 componentes:

Componente directa. - Es la energía que se recibe directamente desde el sol, sin desviarse por la atmósfera es la más importante en aplicaciones de sistemas fotovoltaicos (UNAM, 2004).

$$G_{D,T} = G_D R_D \quad (1.7)$$

Donde el RD es un factor de conversión de la radiación solar directa.

$$R_D = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\Phi)} \quad (1.8)$$

Componente difusa. - Es la energía que se recibe del sol, pero después de ser desviada por la dispersión atmosférica (UNAM, 2004).

$$G_{D,T} = G_d \left(\frac{1+\cos(\beta)}{2} \right) + (G_D + G_d) \rho_g \left(\frac{1-\cos(\beta)}{2} \right) \quad (1.9)$$

Componente Reflejada. - Es la reflexión de la energía directa y difusa en las superficies (UNAM, 2004).

$$G_T = G_D R_D + G_d \left(\frac{1+\cos(\beta)}{2} \right) + (G_D + G_d) \rho_g \left(\frac{1-\cos(\beta)}{2} \right) \quad (1.10)$$

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El proyecto se realizó siguiendo un proceso de diseño, el cual está detallado a continuación:

Se estudió la problemática, analizándola para identificar la necesidad del proyecto. Se verificaron los parámetros y normas para la implementación del sistema fotovoltaico.

Se establecieron los datos de entrada para el sistema como la ubicación geográfica para el estudio climatológico, la carga energética de la planta para conocer el porcentaje de abastecimiento del sistema FV, y el área disponible en donde se instalará el proyecto.

Se realizó el estudio de radiación para determinar los parámetros climatológicos presentes en el sistema.

Se elaboró un diseño preliminar utilizando el programa PVsyst, para hallar la energía generada por el sistema, además se realizó una comparación entre el uso de diferentes tipos de módulos FV. Se escogieron los módulos tomando en cuenta un breve análisis de costos.

Se determinó la rentabilidad del proyecto según análisis de costos, incluyendo el análisis estructural y el estudio energético que favorece la reducción de huella de carbono.

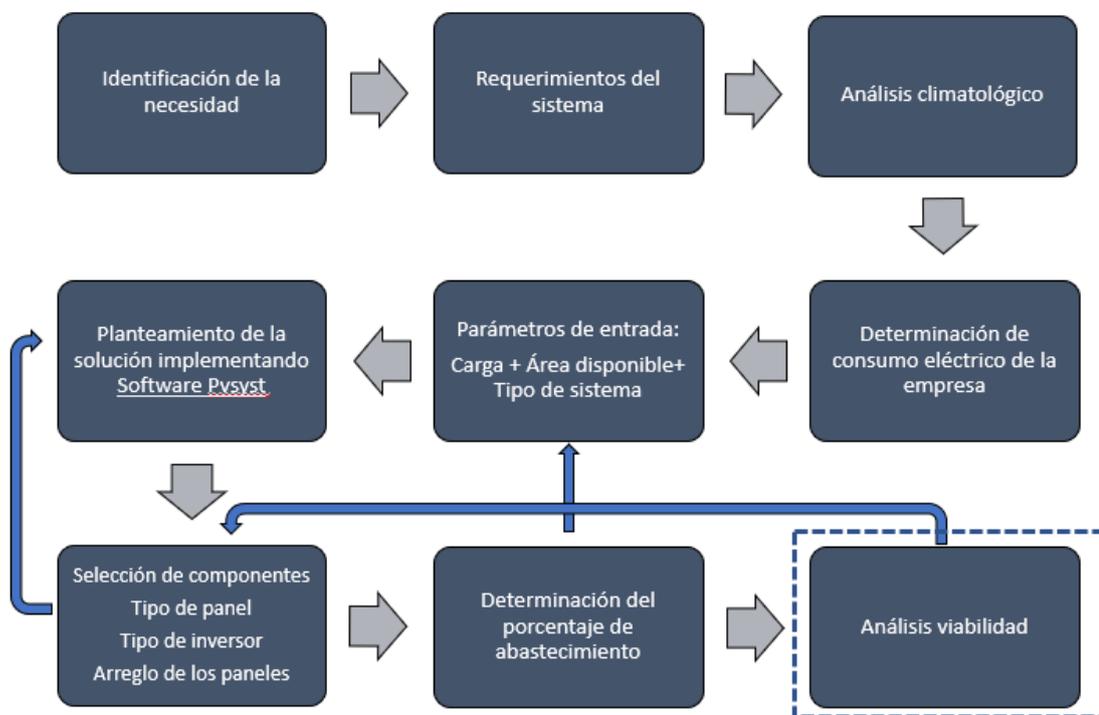


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología de diseño

2.1 Normas, Especificaciones y Restricciones

Paneles

La norma NTE INEN-IEC 61215 establece los requisitos de IEC para la cualificación del diseño y la homologación de módulos fotovoltaicos para uso terrestre adecuados para operación de larga duración en ambientes exteriores (INEN, 2014, p.7).

Cableado

La norma NEC 2008 código eléctrico nacional establece los parámetros eléctricos para los cables internos de los paneles fotovoltaicos.

Estructura

La norma NEC 11 en el capítulo de energías renovables establece los parámetros de construcción y seguridad para sistemas fotovoltaicos aislados y conectados a la red.

Instalación fotovoltaica

Por medio de la *Regulación Nro. ARCONEL-003/18* se establece un valor máximo de generación de 100 kW ya sea en medio o alto voltaje donde su producción pueda ser auto consumida y los excedentes inyectados a la red (ARCONEL, 2018, p.3).

2.2 Datos del sistema

Para poder desarrollar el problema y presentar una alternativa de solución se usó ciertos parámetros previstos por la industria envasadora de gas:

Ubicación Geográfica: El lugar donde se prevé instalar el sistema FV es una terraza de la planta.

Área Disponible: Se cuenta con un área disponible de 1373 m².

Carga del sistema: Se realizó un estudio energético de la planta sobre el consumo eléctrico en el año 2021.

Tabla 2.1 Consumo eléctrico de la planta en el año 2021

Meses	Carga eléctrica [kWh]
Enero	56888
Febrero	54131
Marzo	56517
Abril	57913
Mayo	57518
Junio	53544
Julio	55990
Agosto	56303
Septiembre	58019
Octubre	59522
Noviembre	54835
Diciembre	59252
TOTAL	680,4 MWh

2.3 Estudio de radiación

2.3.1 Ubicación

Para iniciar con el diseño del sistema fotovoltaico, primero se debió conocer la ubicación (latitud y longitud) de la planta envasadora de gas. En la siguiente imagen se muestra la ubicación.



**Figura 2.2 Ubicación del sistema fotovoltaico
(Lat: -3,507, Long: -79,967)**

2.3.2 Extracción de datos climatológicos

Con la ubicación exacta de la empresa (longitud y latitud) se procedió a consultar en una base de datos climatológicos denominada Power data access viewer cuyo enlace se comparte a continuación <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.

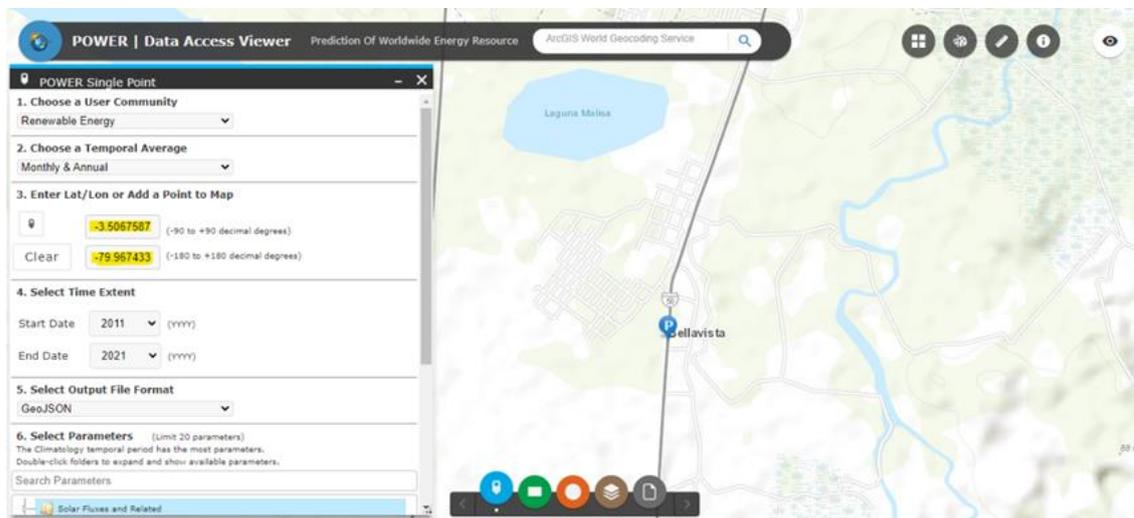


Figura 2.3 Interfaz del programa “Power data access viewer”

Para tener una mayor aproximación en valores futuros, se tomaron datos de los últimos 10 años (2011-2021). Los datos obtenidos a través de esta consulta fueron los siguientes:

Albedo

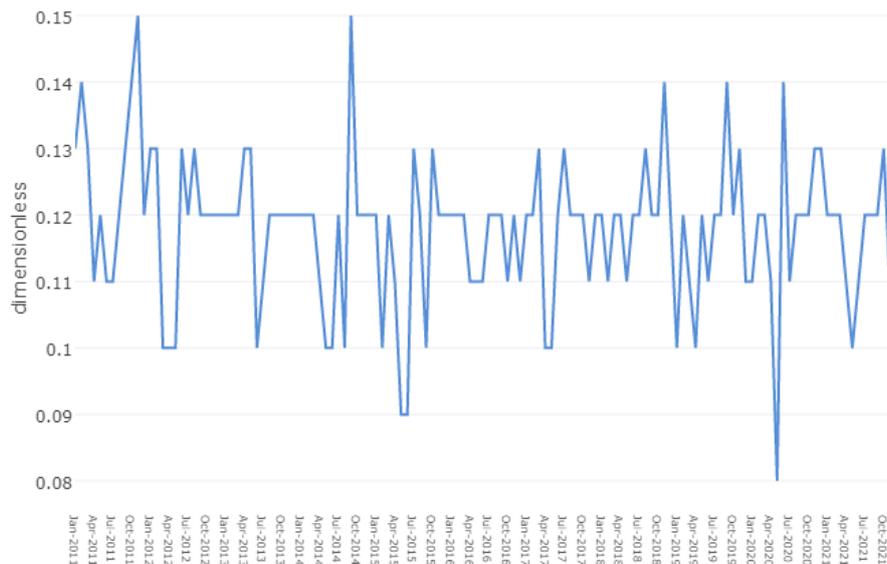


Figura 2.4 Datos de albedo mensual obtenidos (2011-2021)

Radiación difusa

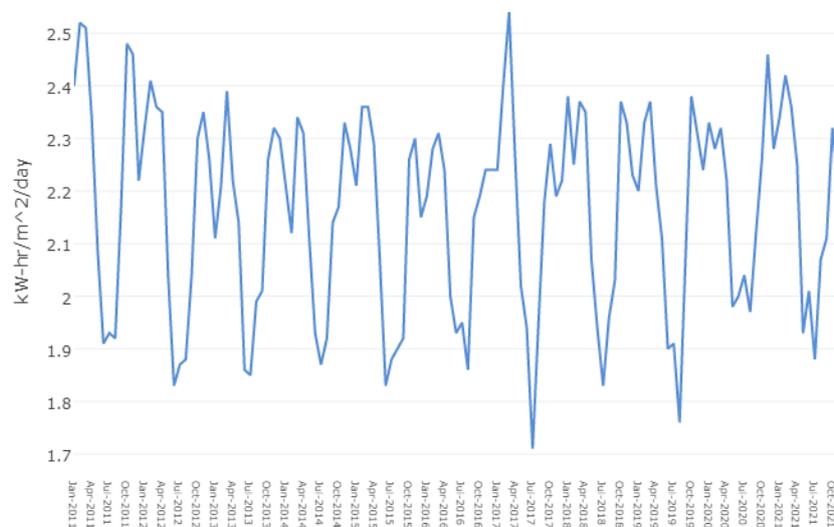


Figura 2.5 Datos de irradiancia difusa mensual obtenidos (2011-2021)

Radiación normal directa

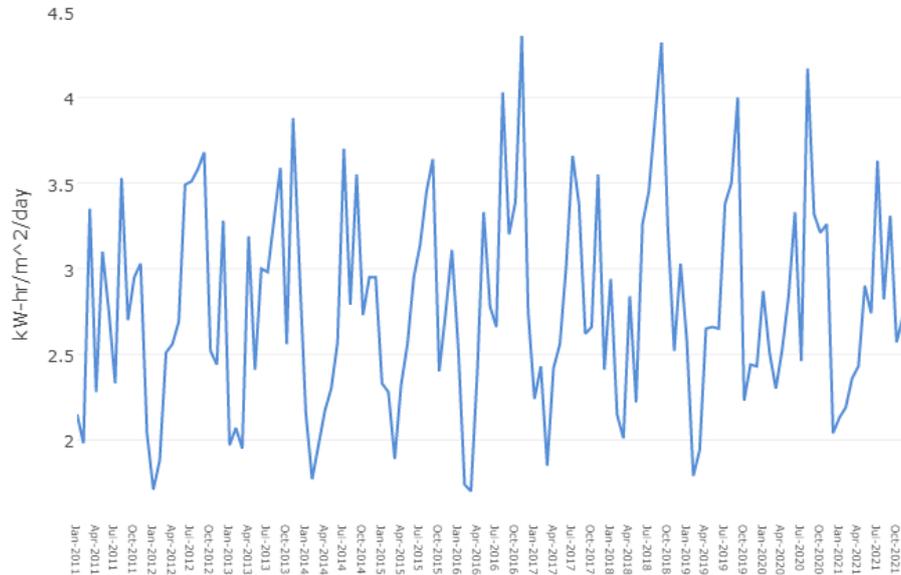


Figura 2.6 Datos de irradiancia directa mensual obtenidos (2011-2021)

Temperatura del viento a 2 metros

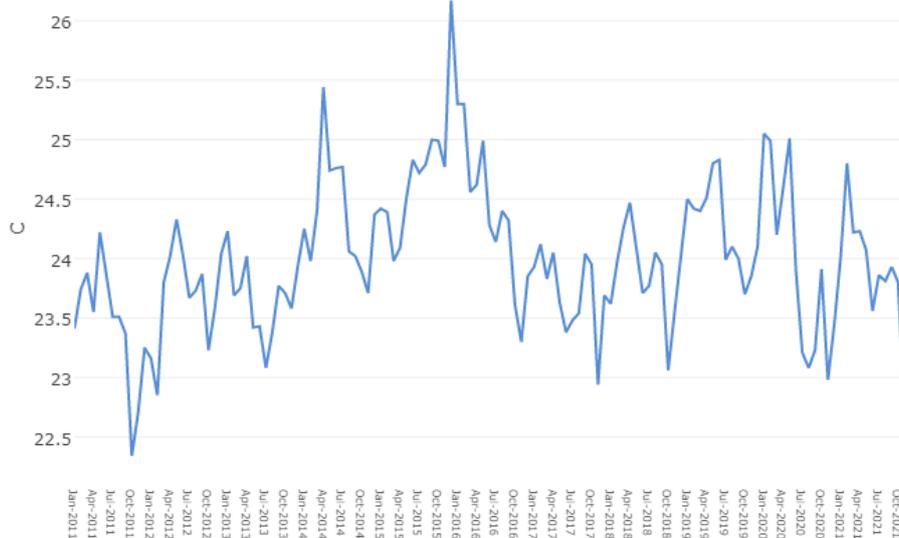


Figura 2.7 Datos de temperatura mensual obtenidos (2011-2021)

Velocidad de viento a 10 metros

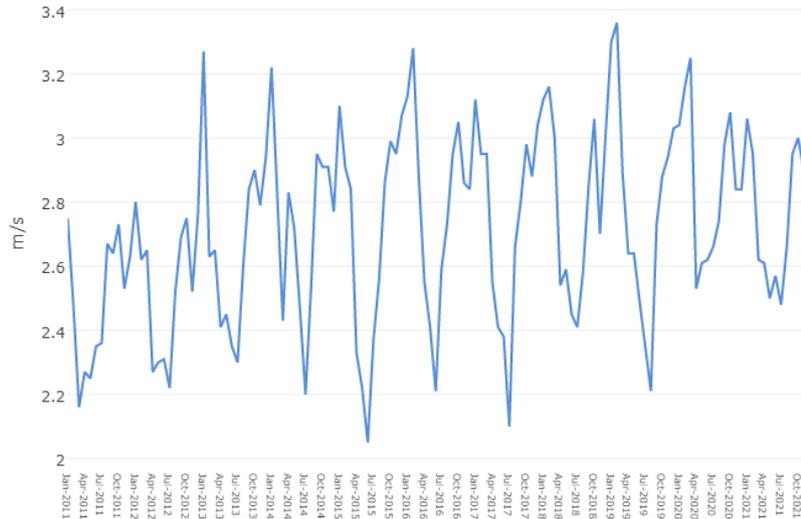


Figura 2.8 Datos de velocidad de viento mensual obtenidos (2011-2021)

2.3.3 Cálculo de los ángulos solares

Una vez obtenido los datos de los parámetros solares, también se requirió obtener valores de los ángulos solares ya que estos afectan a la eficiencia de la energía obtenida de la radiación solar por medio de los módulos fotovoltaicos. Se consideró posición del sol en el medio día (ángulo horario y ángulo azimutal igual a 0) debido a que esta es una condición máxima para la obtención de la energía solar.

Utilizando la Ecuación 1.1 de la declinación solar se obtuvo la siguiente gráfica.

$$\delta = 23,45 \sin \left(360^\circ \frac{n+284}{365} \right) \quad (1.1)$$

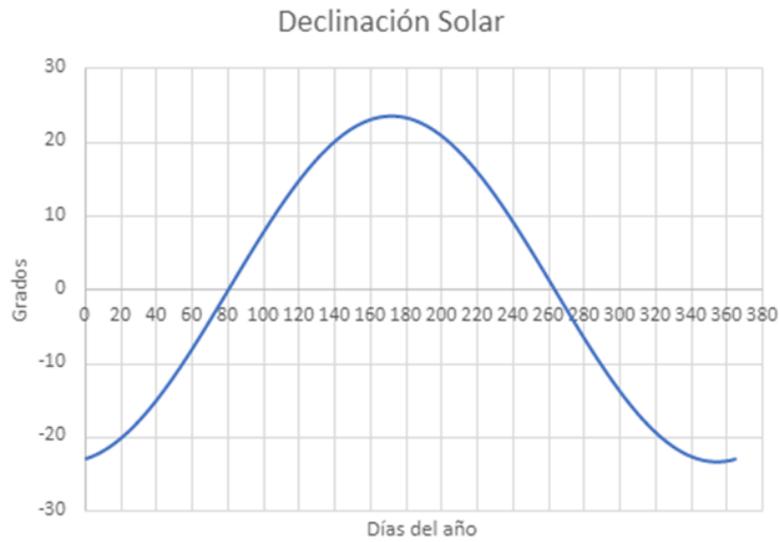


Figura 2.9 Declinacion solar por todo el año

Además, se encontró el ángulo cenital utilizando la Ecuación 1.3 y 1.4. Se obtuvo lo siguiente:

$$\sin(\alpha) = \sin(\lambda) \sin(\delta) + \cos(\lambda) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (1.3)$$

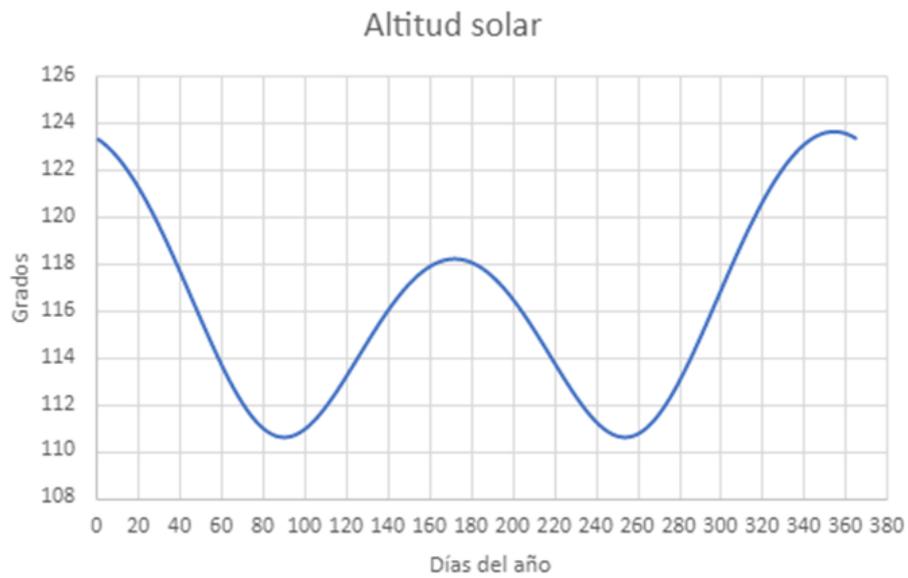


Figura 2.10 Altitud solar durante el año

$$\cos(\Phi) = \sin(\alpha) \quad (1.4)$$

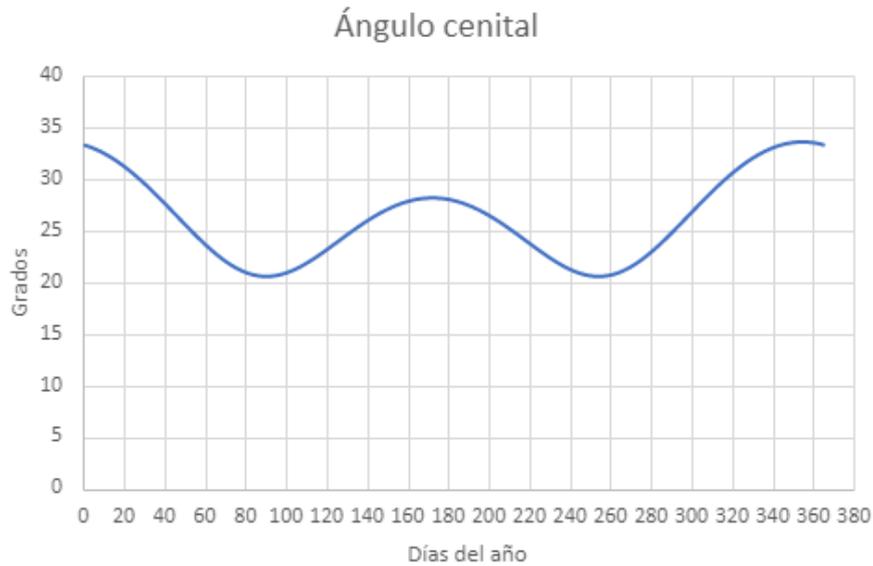


Figura 2.11 Ángulo cenital del sector durante el año

Finalmente se obtuvieron todos los ángulos para el factor geométrico que influyen a la captación solar. Además, se determinó el comportamiento de la inclinación de los módulos solares, utilizando valores de 10° a 20°. Se empezó desde 10 grados ya que es el ángulo donde las partículas de agua, producto de las precipitaciones, no podrán estancarse en los módulos.

$$\cos(\theta) = \cos(\alpha) \cos(z) \sin(\beta) + \sin(\alpha) \cos(\beta) \quad (1.6)$$

$$R_D = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\Phi)} \quad (1.8)$$

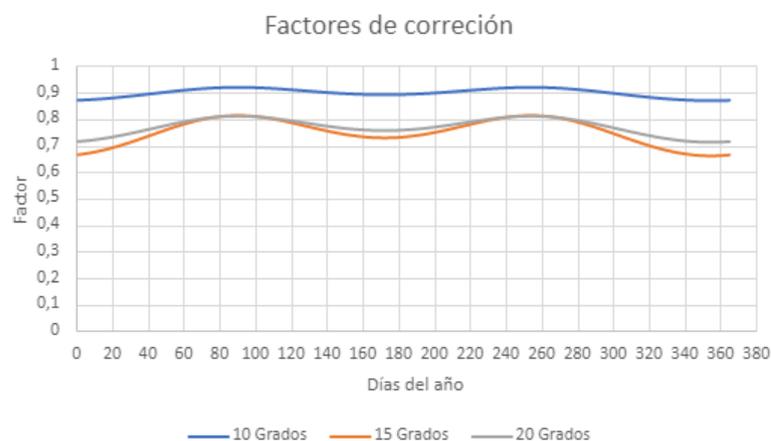


Figura 2.12 Factor geométrico del sistema

Una vez obtenido todos los valores se procedió a calcular el valor de radiación total presente en el sistema fotovoltaico utilizando la ecuación 1.10. Se realizó un promedio entre meses sobre los 10 últimos años.

$$G_T = G_D R_D + G_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + (G_D + G_d) \rho_g \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (1.10)$$

Donde:

$\rho_g = \text{Albedo}$

$G_D = \text{Radiación directa} \left[\frac{kWh d}{m^2} \right]$

$G_d = \text{Radiación difusa} \left[\frac{kWh d}{m^2} \right]$

$\beta = \text{Inclinación del módulo fotovoltaico}$

Tabla 2.2 Datos para la radiación promedio en el sistema FV (2011-2021)

Meses	Albedo	Difusa	Radiación directa	Factor geométrico (Inclinación)		
				10°	15°	20°
Enero	0,119	2,266	3,8372	0,8776	0,8061	0,7285
Febrero	0,12	2,325	3,7854	0,8978	0,8362	0,7683
Marzo	0,119	2,385	3,9445	0,9156	0,8628	0,8034
Abril	0,11	2,277	4,0509	0,9161	0,8636	0,8045
Mayo	0,105	2,051	3,8309	0,9023	0,8431	0,7773
Junio	0,113	1,916	3,7991	0,8926	0,8285	0,7581
Julio	0,119	1,884	3,9210	0,8973	0,8356	0,7675
Agosto	0,12	1,925	4,2810	0,9119	0,8572	0,7961
Septiembre	0,124	2,085	4,5136	0,9183	0,8669	0,8088
Octubre	0,123	2,298	4,3027	0,9050	0,8469	0,7825
Noviembre	0,125	2,318	4,5281	0,8829	0,8140	0,7390
Diciembre	0,119	2,242	4,0636	0,8704	0,7954	0,7144

Tabla 2.3 Radiación promedio total para el sistema FV

Radiación total $\left[\frac{kWh}{m^2 d}\right]$			
Meses	Inclinación		
	10°	15°	20°
Enero	5,6218	5,3330	5,0150
Febrero	5,7115	5,4634	5,1854
Marzo	5,9843	5,7606	5,5050
Abril	5,9763	5,7485	5,4883
Mayo	5,4970	5,2563	4,9857
Junio	5,2975	5,0421	4,7579
Julio	5,3935	5,1401	4,8573
Agosto	5,8197	5,5746	5,2972
Septiembre	6,2204	5,9761	5,6974
Octubre	6,1806	5,9169	5,6199
Noviembre	6,3049	5,9793	5,6203
Diciembre	5,7679	5,4491	5,1004
PROMEDIO	5,8146	5,5533	5,2609

Con los resultados de la radiación total, se obtuvieron valores máximos en el escenario cuando la inclinación del módulo fotovoltaico es de 10 grados. Por lo tanto, se debe considerar estos valores al momento de realizar la instalación del sistema.

Tabla 2.4 Caracterización climatológica de la ubicación de la planta (2011-2021)

MESES	Radiación total $\left[\frac{kWh}{m^2}\right]$	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Velocidad de viento $\left[\frac{m}{s}\right]$
Enero	5,6218	24,1709	73,3518	3,0827
Febrero	5,7115	24,2045	76,7391	2,9391
Marzo	5,9843	24,1164	78,5845	2,7564
Abril	5,9763	24,3264	76,4609	2,5027
Mayo	5,4971	24,3473	74,0218	2,4636
Junio	5,2975	24,0518	70,0782	2,3864
Julio	5,3935	23,8364	66,5682	2,3682
Agosto	5,8197	23,8591	64,1864	2,5882
Septiembre	6,2205	23,9545	64,1191	2,8400
Octubre	6,1806	23,6536	67,3855	2,9391
Noviembre	6,3049	23,4282	68,6764	2,8018
Diciembre	5,7679	24,0136	70,4764	2,8982
Variación	1,0074	0,91	14,46	0,71

2.4 Prediseño del sistema fotovoltaico usando capacidad máxima 100kWp

Se realizó un prediseño del sistema con la finalidad de determinar el máximo porcentaje de abastecimiento posible para la planta tomando en cuenta la restricción indicada en la norma de ARCONEL 003, en el cual detalla que la capacidad máxima permitida en los sistemas FV es de 100 kWp. (ARCONEL, 2018, p.3).

2.4.1 Implementación del diseño del proyecto en un software de simulación

Para realizar el diseño completo, se utilizó el programa de PVsyst. Se introdujeron los datos climatológicos de la ubicación de la planta citados en la tabla 2.4, y la orientación del arreglo de los módulos solares (inclinación con respecto al plano horizontal y azimut).

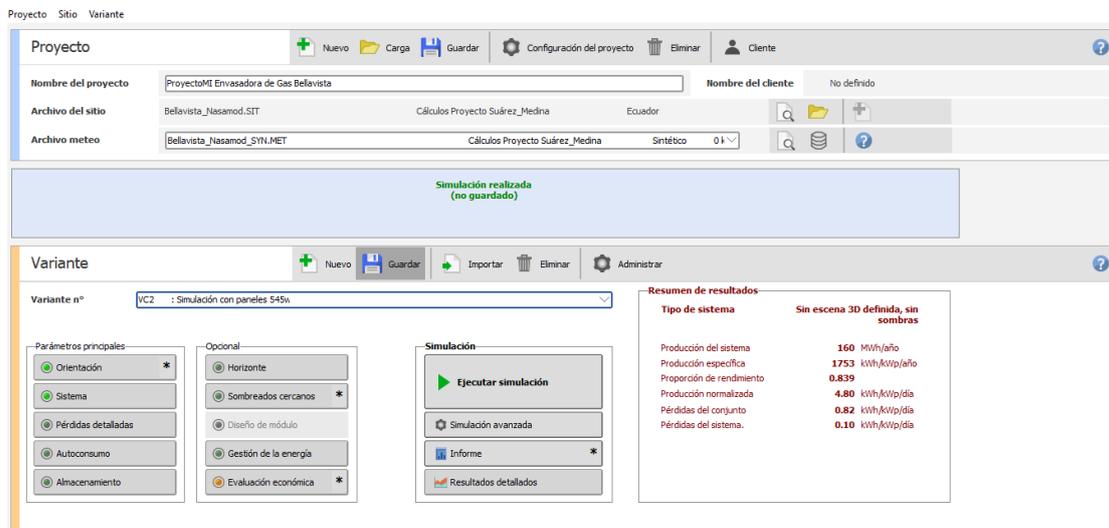


Tabla 2.5 Valores obtenidos en la simulación de PVsyst para diferentes módulos FV.

Figura 2.13 Captura PVsyst del diseño del proyecto.

PARÁMETROS	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS		
	JAM 72-S30-545-MR (545 W)	AE 400DGLM6-72 1500 (400 W)	AE 300M6-60 (300 W)
Número de paneles necesarios	168	250	324
Cadenas	12	25	18
Módulos en serie	14	10	18
Área disponible para módulos [m^2]	434	502	530
Potencia máxima nominal [kWp]	91,6	100	97,2
Producción del sistema [MWh_{anual}]	160	177	172
Producción específica [$\frac{kWh_{anual}}{kWp}$]	1753	1774	1773
Rendimiento	0,82	0,833	0,833
Producción normalizada [$\frac{kWh_{dia}}{kWp}$]	4,80	4,86	4,86
Pérdidas del sistema	0,18	0,16	0,16

2.4.2 Alternativa de solución

Se analizó el sistema con diferentes tipos de módulos FV con la finalidad de optimizar el diseño tomando en cuenta costos económicos, energía generada y espacio ideal disponible para la instalación.

Tabla 2.6 Costos de módulos fotovoltaicos para los sistemas FV

COSTOS	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS		
	JAM 72-S30-545-MR (545 W) Dimensiones:2279x1134x35 mm	AE 400DGLM6-72 1500 (400 W) Dimensiones:2002x1002x6 mm	AE 300M6-60 (300 W) Dimensiones:1650x992x35 mm
Precio unitario	\$265,82	\$239,99	\$209,99
Cantidad total de módulos en el sistema	168	250	324
Precio total en módulos	\$44657,76	\$59997,5	\$68036,76

Según el precio total de los módulos para el sistema FV, el más económico viene dado por el sistema con los paneles JAM 72-S30-545-MR (545 W), además de necesitar de menos espacio para la instalación.

Sin embargo, la producción del sistema con los paneles detallados anteriormente es menor a los módulos AE 400DGLM6-72 1500 (400 W) con 17MWh de diferencia. Tomando como valor referencial indicado por ARCONEL, es de \$0,089 USD/kWh por energía producida, el ahorro por valor energético debido a los 17MWh de diferencia es de \$1.513,00 USD, lo cual no es significativo por el costo total de paneles ya que utilizando los paneles de 500W se ahorran \$15.339,74 USD. (ARCONEL, 2018, pp.7).

Por lo tanto, para el proyecto se eligió el sistema con los módulos FV JAM 72-S30-545-MR (545 W).

2.4.3 Cálculo de abastecimiento del sistema

El sistema planteado generará 160MWh anuales, los cuales estarán inyectados a la red eléctrica. Para conocer el porcentaje de abastecimiento se tomó como datos el análisis de carga del 2021 de la planta detallado en la Tabla 2.1 de este documento.

$$\%abastecimiento = \frac{\text{Energía generada}}{\text{Consumo eléctrico}}$$

$$\%abastecimiento = \frac{160 \text{ MWh}}{680,4 \text{ MWh}}$$

$$\%abastecimiento = 23,52\%$$

El máximo porcentaje de abastecimiento del sistema FV para la planta envasadora de gas es de aproximadamente 23,52%.

2.4.4 Selección del Inversor

Para el diseño del sistema final se cuenta con una capacidad de aproximadamente 91,6 kWp para lo cual se requiere de una cantidad específica de inversores para el correcto funcionamiento.

Se seleccionó el inversor AS-IC01-15000-2 (15kw, three-phase with 2 MPPT) lo que se necesitará de 6 inversores para abastecer los 91,6 kWp del sistema.

2.4.5 Pérdidas en el sistema

Pérdidas por velocidad de viento

El factor de velocidad de viento afecta al sistema de captación ya que los módulos se encuentran a una temperatura de operación y debido a la corriente de aire, produce una variación de temperatura y por consiguiente una pérdida energética.

$$U = U_c + (U_v \cdot Vel \text{ viento})$$

Donde:

$$U_c = \text{Factor de pérdida constante } \frac{W}{m^2K}$$

$$U_v = \text{Factor de pérdida del viento } \frac{W}{m^2K\frac{m}{s}}$$

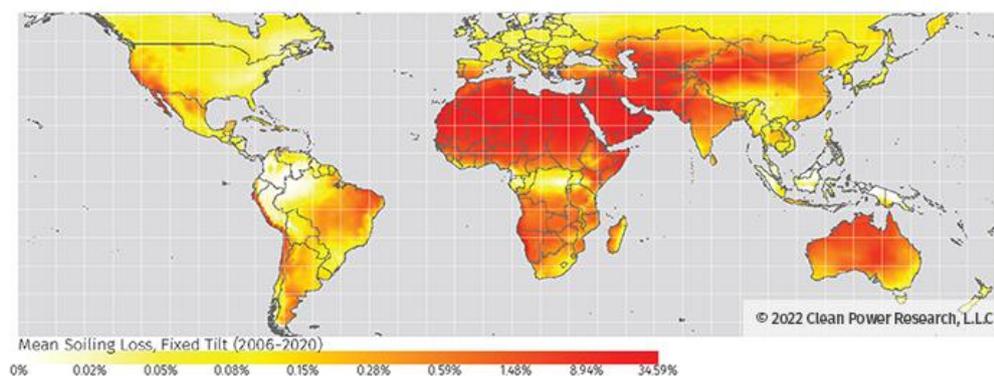
Pérdidas por temperatura

Las pérdidas por temperatura es uno de los factores o enemigo más importante en las instalaciones fotovoltaicas ya que debido a esto se puede perder hasta un 15% de la energía generada por el módulo. (Ecoinventos, 2022)

Pérdidas por suciedad

Las pérdidas por suciedad se producen debido a las partículas de polvo circundante en el medio ambiente. En el siguiente mapa se muestra el porcentaje de pérdidas por suciedad dependiendo de la ubicación del sistema FV.

Annual
Soiling Loss



SolarAnywhere (2006-2020) [SolarAnywhere,2022].

Como se muestra en la figura 2.15, según la ubicación donde se plantea instalar el sistema fotovoltaico, se tiene un factor de pérdidas por suciedad alrededor de 1,48%.

Diagrama Sankey del sistema FV

El diagrama Sankey representa las pérdidas generales del sistema. Utilizando el programa de PVsyst se introdujeron los datos detallados por pérdidas como la temperatura, velocidad de viento y suciedad dando como resultado el diagrama mostrado a continuación.

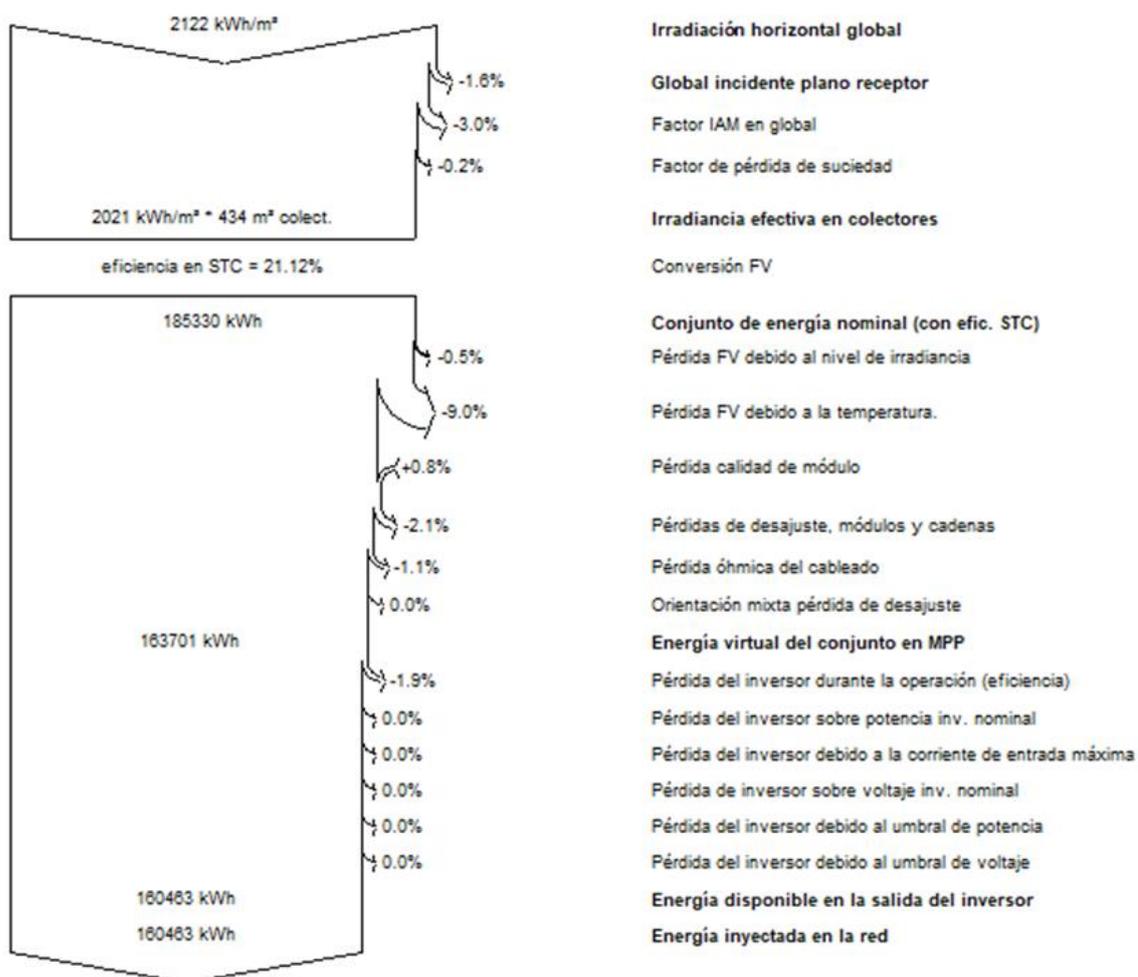


Figura 2.15 Diagrama Sankey de pérdidas del sistema FV (anual) utilizando PVsyst

En el diagrama Sankey del sistema fotovoltaico planteado se tiene un porcentaje de pérdidas totales de aproximadamente 18,2% ya que se tomaron en cuenta las pérdidas detalladas anteriormente como la velocidad de viento, suciedad y temperatura.

2.5 Diseño final del sistema

Una vez determinado el máximo porcentaje de abastecimiento y la selección del módulo FV, se estableció este como diseño final ya que el área necesitada para el sistema fotovoltaico se encuentra disponible en la planta envasadora.

En caso de no disponer suficiente espacio para el sistema FV, se deberá de ajustar dicho sistema tomando como parámetro el área permitida para el diseño.

Tabla 2.7 Resumen del sistema fotovoltaico establecido

PARÁMETROS	MODULO SOLAR JAM 72-S30-545-MR (545 W)
Número de paneles necesarios	168
Cadenas	12
Módulos en serie	14
Área disponible para módulos [m^2]	434
Potencia máxima nominal [kWp]	91,6
Producción del sistema [MWh_{anual}]	160
Producción específica $\left[\frac{kWh_{anual}}{kWp} \right]$	1753
Rendimiento	0,82
Producción normalizada $\left[\frac{kWh_{dia}}{kWp} \right]$	4,80
Abastecimiento anual del sistema	23,52%

2.5.1 Arreglo del sistema FV en la ubicación estratégica de la planta

Por medio del área que dispone la empresa para instalar el sistema con ayuda del software en línea HelioScope se realizó un bosquejo donde se observa la disposición ideal de los paneles en el área seleccionada donde cuenta con 12 Filas y 14 columnas, además de una separación entre filas de 1 metro.

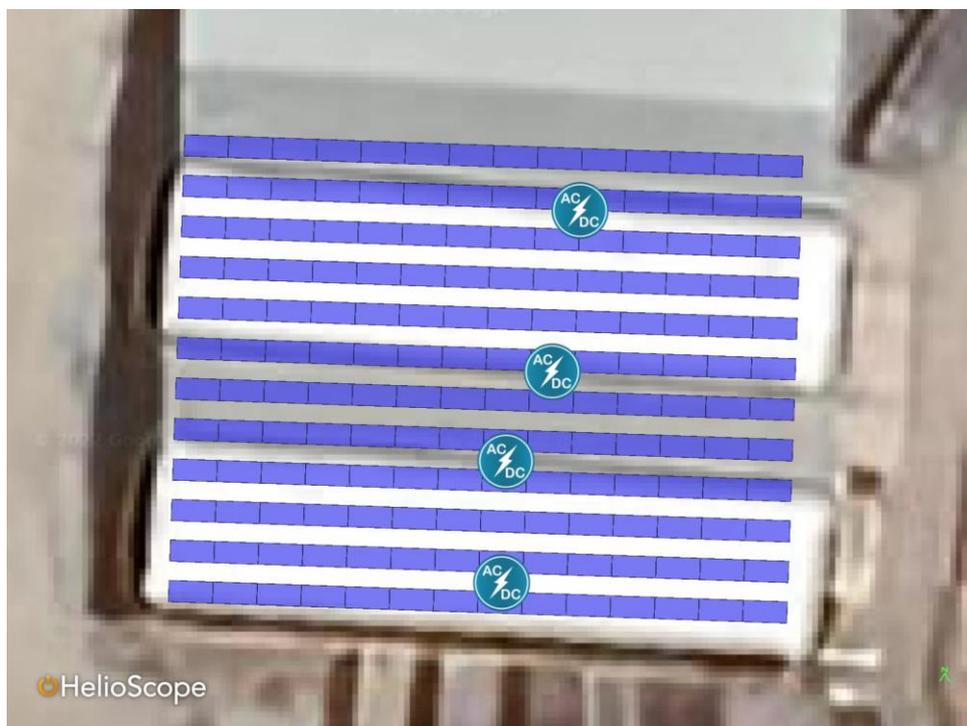


Figura 2.16 Arreglo del sistema fotovoltaico en la planta

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para la presentación de resultados se realizó un análisis energético acorde a la cantidad generada de electricidad por el sistema fotovoltaico y la demanda energética mensual de la planta envasadora de gas para determinar el análisis de producción y uso de energía del sistema propuesto.

Además, para la viabilidad del proyecto se realizó un análisis de costos tomando en cuenta el ahorro energético del sistema FV y costos generales. También se elaboró un análisis estructural en donde se instalará el sistema y los módulos FV.

Finalmente se presentó el análisis ecológico hallando el ahorro en la tasa de emisiones de CO₂ producto de la energía limpia del sistema fotovoltaico en la planta envasadora de gas.

3.1 Análisis energético

Para el siguiente análisis se tomó en cuenta la producción y abastecimiento del sistema FV, considerando los datos de radiación mensual real como se detalla en la Tabla 2.4.

Además, se consideró para un escenario crítico, cuando la captación solar es mínima. En este contexto, se utilizó el registro del mes con menor radiación cuyo valor fue $5,2975 \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$. La finalidad de esta comparativa es para determinar una cobertura del abastecimiento del sistema FV para la demanda energética de la planta envasadora de gas.

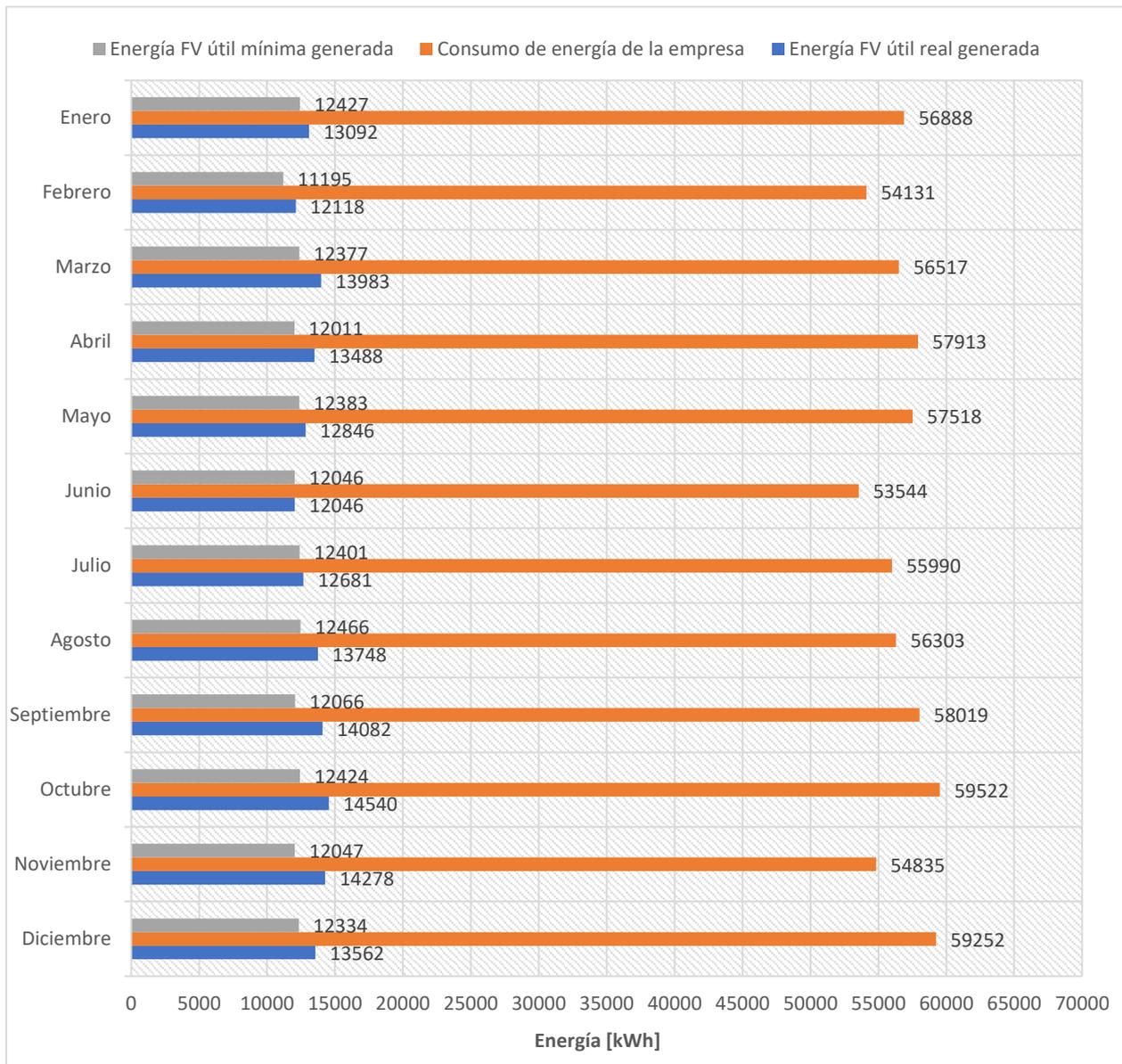


Figura 3.1 Generación de energía FV (real y mínima) vs demanda energética de la planta 2021

En la Figura 3.1 se puede observar los meses con menor generación de energía fotovoltaica correspondientes a febrero, junio y julio. Cabe mencionar que la generación fotovoltaica no depende exclusivamente de la radiación total sino de los otros parámetros climatológicos como son la velocidad de viento, la temperatura ambiente, entre otros.

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de la producción del sistema a lo largo del año.

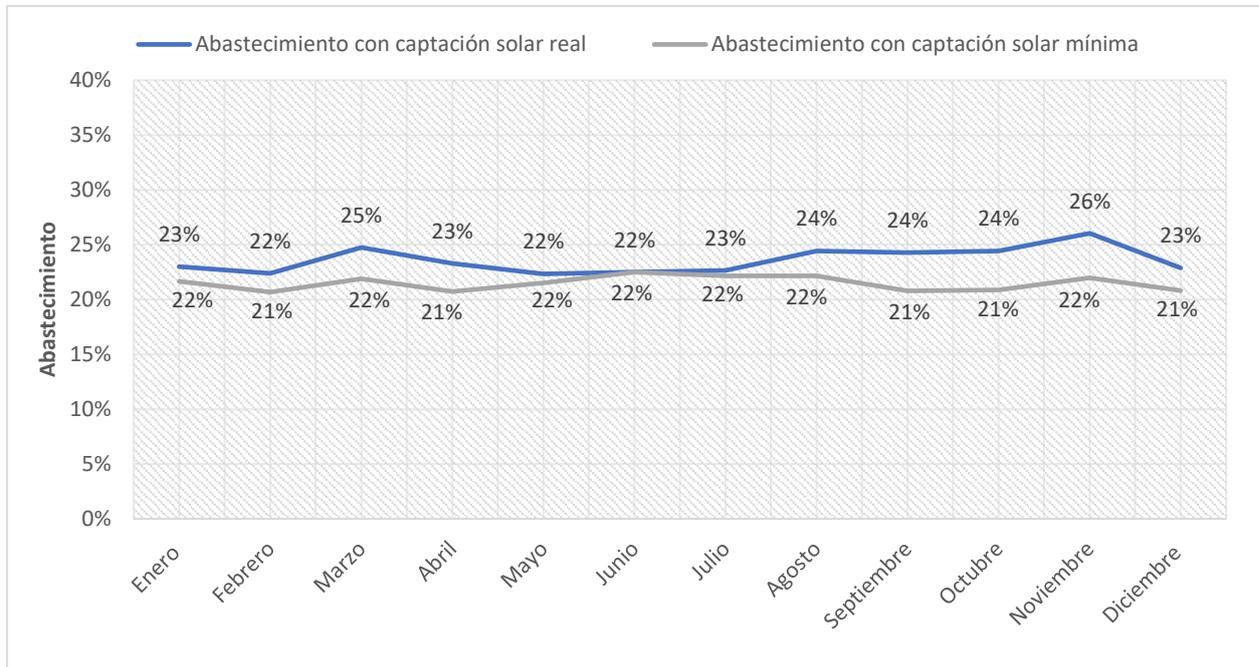


Figura 3.2 Abastecimiento mensual (real y mínimo) del sistema FV en la planta

A partir de la Figura 3.2 se estima una cobertura de abastecimiento entre 22% a 26% en el caso real, y en el caso más crítico una cobertura entre 21% a 22%. En la gráfica de abastecimiento real presenta valores mínimos en los meses entre mayo a julio. Hay que tomar en cuenta que estos resultados se ajustan al nivel de producción de la planta envasadora de gas en el año 2021.

3.2 Análisis estructural

Se consideró el análisis estructural para determinar el lugar donde se instalará el sistema fotovoltaico por medio del análisis del peso estructural del conjunto (sistema fotovoltaico y techo).

Se ha previsto ubicar el sistema en el tejado de dos galpones de la planta envasadora ya que estos poseen el área requerida, además de que en dicho lugar no se encuentra ningún tipo de obstrucción que genere sombras, teniendo como un buen lugar para la captación solar.

Seleccionado el sistema de soporte para el proyecto FV, se realizó un análisis de elementos finitos para la estructura del galpón para observar los esfuerzos aplicados por el peso de todo el conjunto. El peso total de todo el conjunto es de aproximadamente 59,9 kN.

Primero, se realizó el análisis en las vigas longitudinales del galpón que constan de 10 unidades con un largo de 31,74 m. Al ser 2 galpones, la carga distribuida que soportará cada viga será de aproximadamente 94,4 N/m. La viga está apoyada por 6 estructuras transversales, por lo que se realizó el análisis para determinar el lugar donde se genera la mayor fuerza y la deformación de esta.

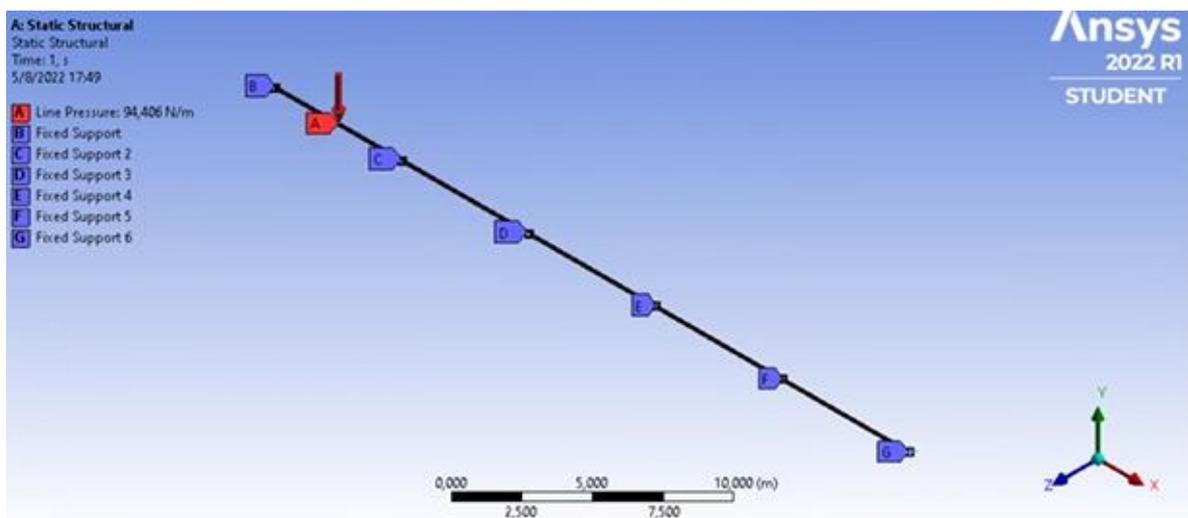


Figura 3.3 Fuerzas aplicadas en una viga longitudinal del galpón

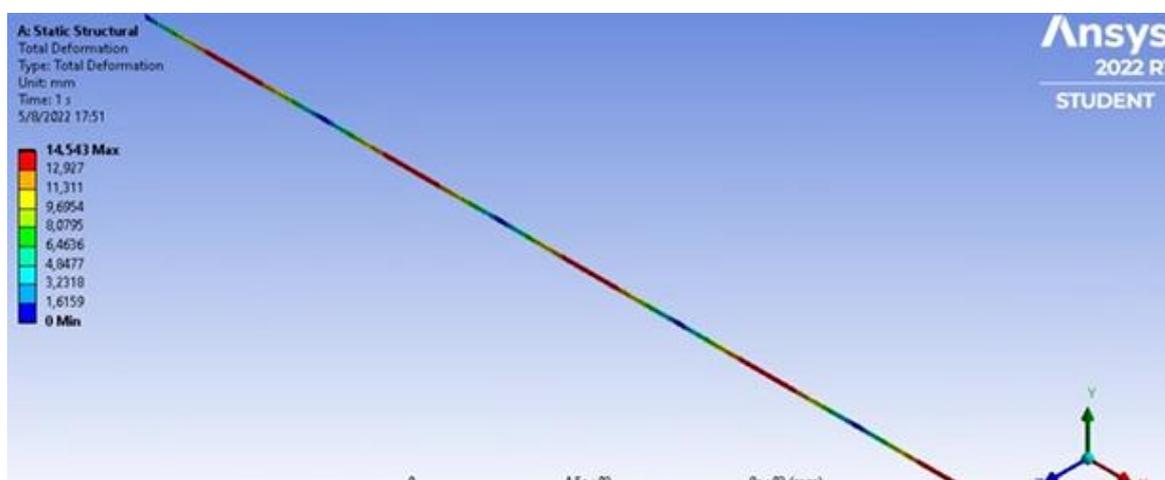


Figura 3.4 Deformación de la viga del galpón

Como se muestra en la Figura 3.4, la deformación máxima de la viga es de 14,54 mm. Es importante mencionar, que el acero estructural A36 permite una deformación máxima de 25 mm aproximadamente, por lo tanto, se puede estimar que la viga podrá resistir todo el peso del sistema fotovoltaico. Además, se determinó que la fuerza máxima aplicada en el soporte fue de aproximadamente 600 N. Por lo tanto, se realizará el siguiente análisis de elementos finitos para la estructura transversal con dicho valor crítico.

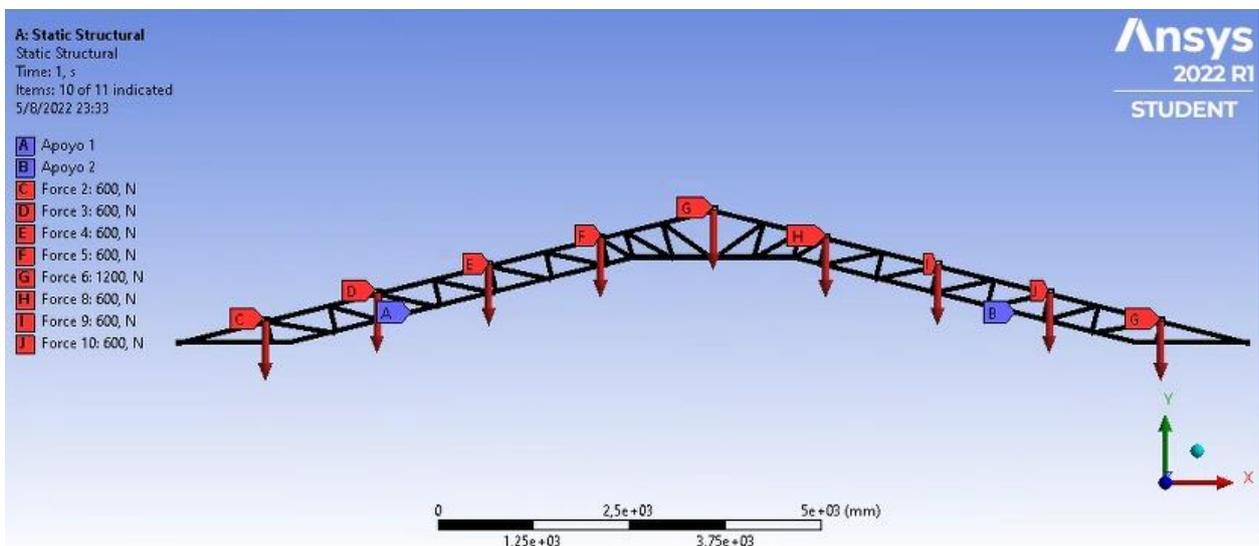


Figura 3.5 Fuerzas aplicadas en la estructura transversal del galpón

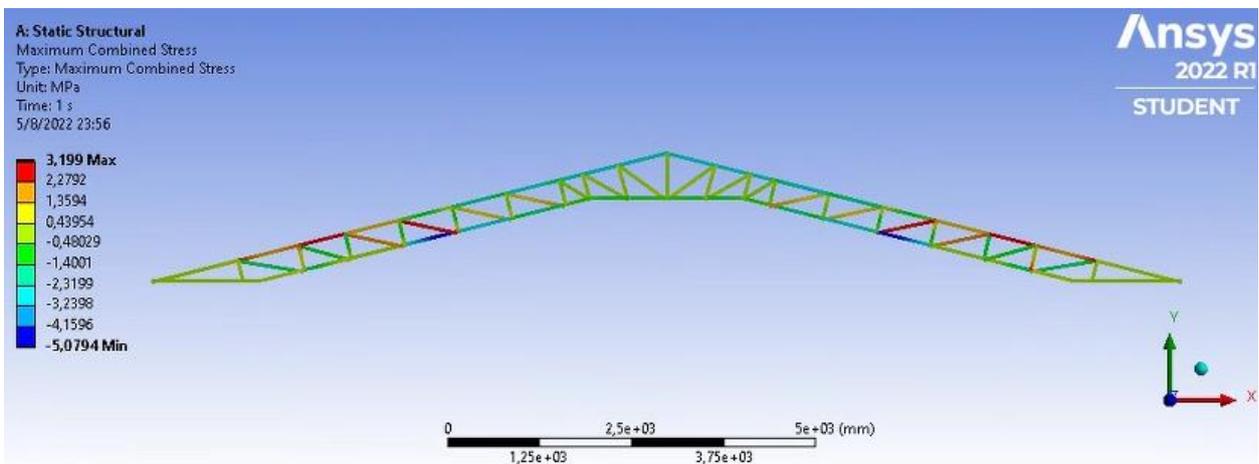


Figura 3.6 Esfuerzos máximos combinados en la estructura transversal del galpón

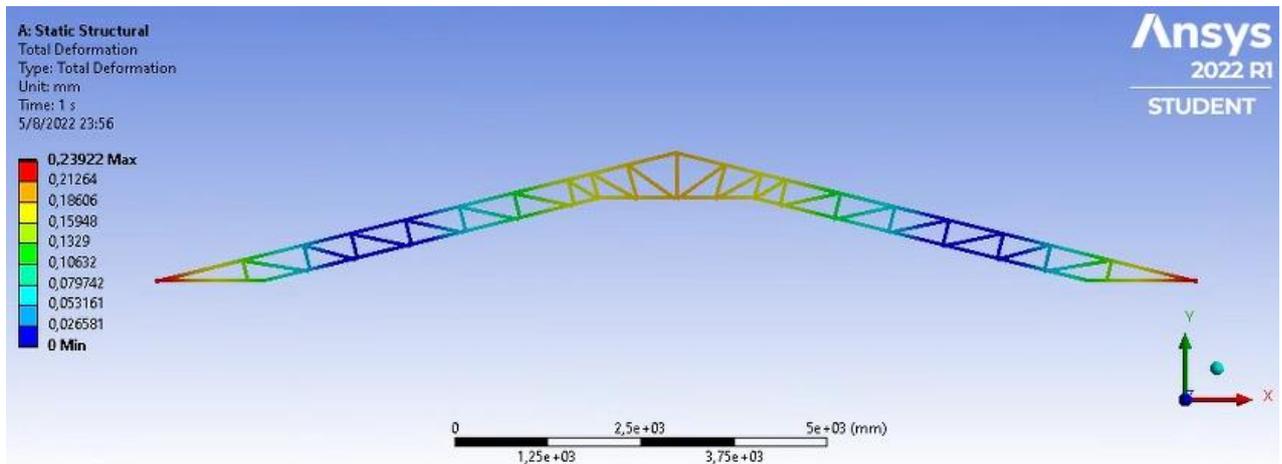


Figura 3.7 Deformación en la estructura transversal del galpón

La resistencia máxima a la tracción para el acero estructural A36 es de 250 MPa, y según el programa de análisis estructural Ansys el esfuerzo máximo producido es de 3,2 MPa, lo que indica a que esta estructura podrá soportar la carga del sistema fotovoltaico. Esto se evidencia también en la deformación máxima presente en la Figura 3.8 que es de 0,23 mm lo cual es despreciable.

Finalmente se realizó un análisis en los soportes verticales que permiten apoyar a la estructura detallada anteriormente como se puede observar en la Figura 3.6. Las fuerzas resultantes fueron de 3,04 kN y 3 kN en los ejes X y Y respectivamente.

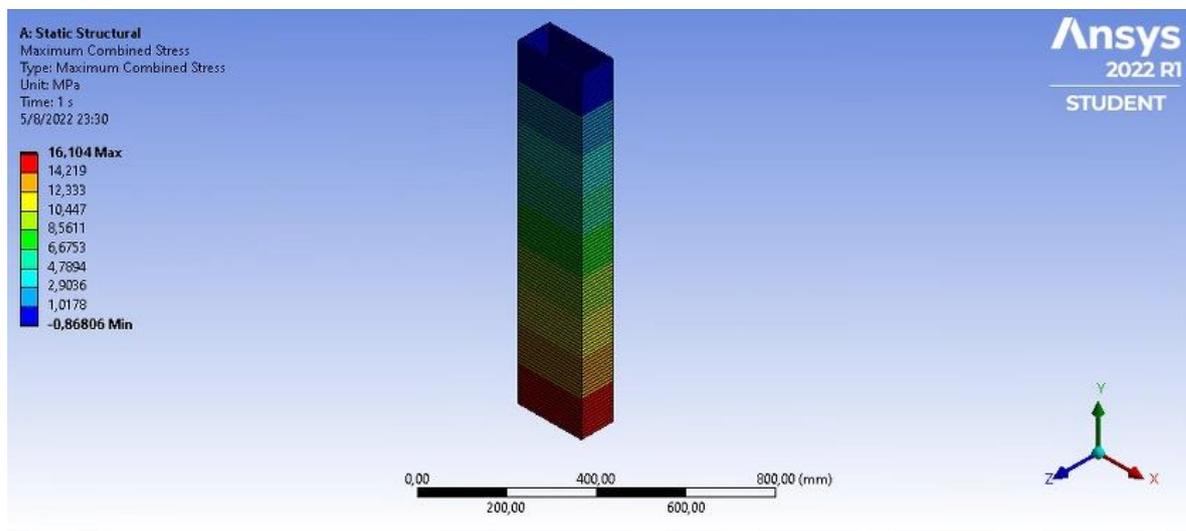


Figura 3.8 Esfuerzos máximos combinados en soporte vertical

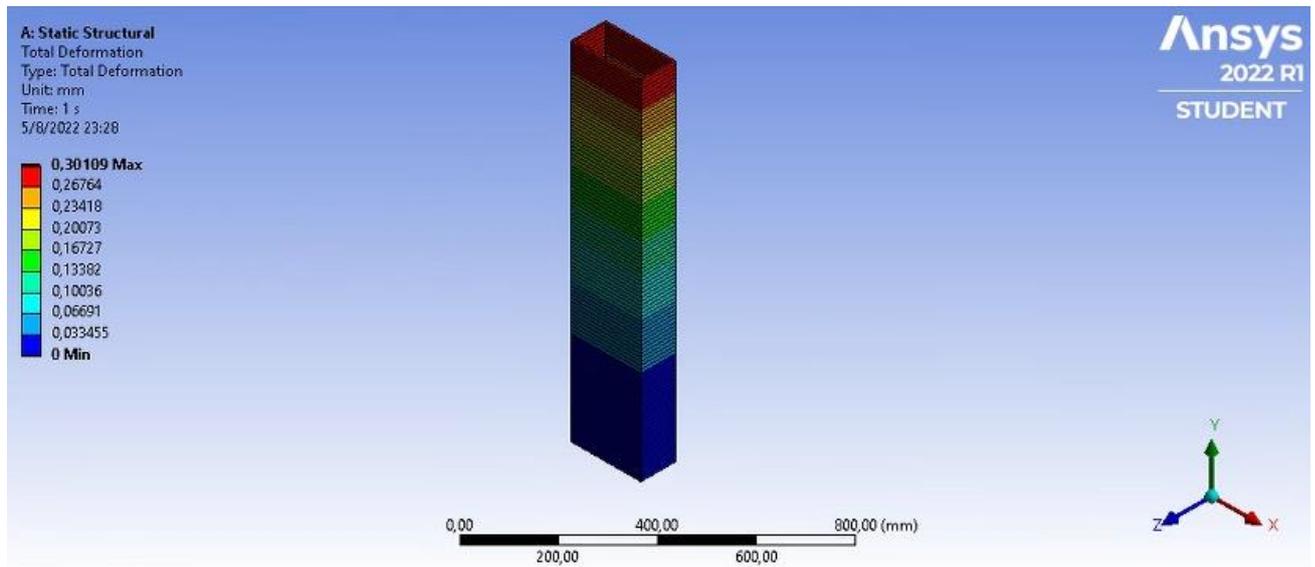


Figura 3.9 Deformación en soporte vertical

Como se observa en la Figura 3.9 y 3.10, los esfuerzos combinados y deformaciones son mínimas con relación a la resistencia del material, se puede citar que no se espera que exista un fallo en las columnas de los galpones en la planta envasadora.

3.3 Análisis de costos

La viabilidad de la propuesta se determina considerando el tiempo de retorno con relación al costo total del proyecto. Se tomó en cuenta el ahorro anual por el costo de energía producido por el sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica. Como el precio es de \$0,089 USD/kWh establecido por ARCONEL, y el sistema planteado genera alrededor de 160 MWh anuales, por lo tanto, se estima un ahorro de \$14.281,00 USD anuales (ARCONEL, 2018, pp.7).

Para conocer detalladamente el costo del proyecto, se realizaron cotizaciones en línea.

Tabla 3.1 Costos de implementación del proyecto

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Módulos FV JAM 72-S30-545-MR	168	\$ 265,82	\$ 44.657,76
Inversor AS-IC01-15000-2	6	\$ 2.812,50	\$ 16.875,00
Estructura paneles	56	\$ 142,00	\$ 7.952,00
Componentes eléctricos	-	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00
Instalación, transporte	168	\$ 70,00	\$ 11.760,00
Medidor bidireccional	1	\$ 170,00	\$ 170,00
Ingeniería	-	\$ 6.000,00	\$ 6.000,00
		Subtotal	\$ 90.414,76
		IVA 12%	\$ 10.849,77
		Total + IVA	\$101.264,53

Tabla 3.2 Tiempo de retorno del proyecto

	Ahorro del costo de energía	Gastos de limpieza y mantenimiento	Total
1er año	\$ 14.281,00	\$ 1.170,00	\$ 13.111,00
2do año	\$ 14.281,00	\$ 1.170,00	\$ 26.222,00
3er año	\$ 14.281,00	\$ 1.170,00	\$ 39.333,00
4to año	\$ 14.281,00	\$ 1.170,00	\$ 52.444,00
5to año	\$ 14.281,00	\$ 1.170,00	\$ 65.555,00
6to año	\$ 14.281,00	\$ 1.170,00	\$ 78.666,00
7mo año	\$ 14.281,00	\$ 1.170,00	\$ 91.777,00
8vo año	\$ 14.281,00	\$ 1.170,00	\$ 104.888,00

Tabla 3.3 VAN y TIR en los primeros 10 años del proyecto

10 primeros años	
VAN	TIR
\$29.845,47	5%

Para realizar el cálculo del VAN y el TIR se tomó en cuenta los 10 primeros años del proyecto. Según los resultados de la Tabla 3.3, el proyecto es prefactible. Cabe mencionar que el tiempo de vida del proyecto es de 30 años obteniendo una mayor ganancia a futuro.

3.4 Estimación de reducción de huella de carbono

Para calcular la tasa de reducción de emisiones de CO₂ se consideró el factor de generación de emisión eléctrica para sistemas fotovoltaicos cuyo valor es de 191,7 gCO₂/kWh indicado por el informe realizado por el Operador Nacional de Electricidad (CENACE, 2022, p.34).

En la siguiente tabla se detalla la tasa de reducción de emisiones de CO₂ del proyecto.

Tabla 3.4 Reducción de emisiones de CO₂ en el proyecto fotovoltaico.

Energía anual producida	Vida del proyecto	Factor de emisión de generación eléctrica (KgCO ₂ /kWh)	CO ₂ anual reducidas [Ton]	CO ₂ reducidas por vida de proyecto [Ton]	Factor de emisión por ciclo de vida del proyecto FV [Ton]	Total, reducción de emisiones CO ₂ [Ton]
160 MWh	30 años	0,1917	30,76	923	217,77	705,23

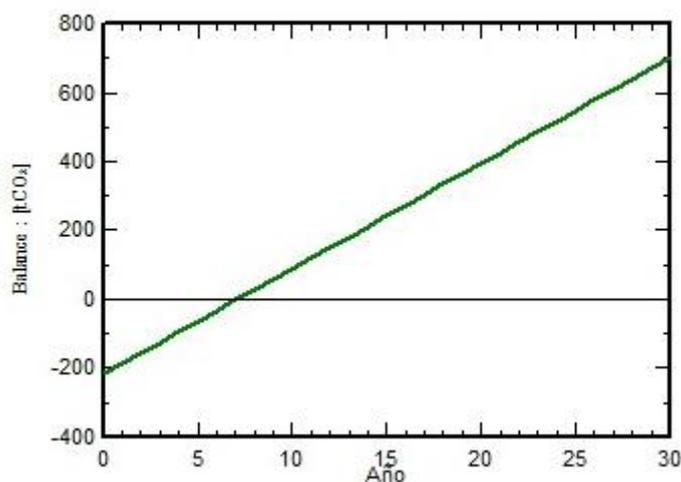


Figura 3.10 Reducción de emisiones de CO₂ del proyecto FV

Se estima que se reducen alrededor de 705,23 toneladas de CO₂ por la vida del proyecto como se puede apreciar en la Figura 3.10. Esta gráfica inicia con valores negativos debido al trabajo producido por la elaboración de componentes en el sistema fotovoltaico que también repercuten a las emisiones GEI al ambiente.

3.5 Esquema del sistema fotovoltaico

En el siguiente apartado se muestra una imagen isométrica del arreglo del sistema fotovoltaico en la planta envasadora de gas.

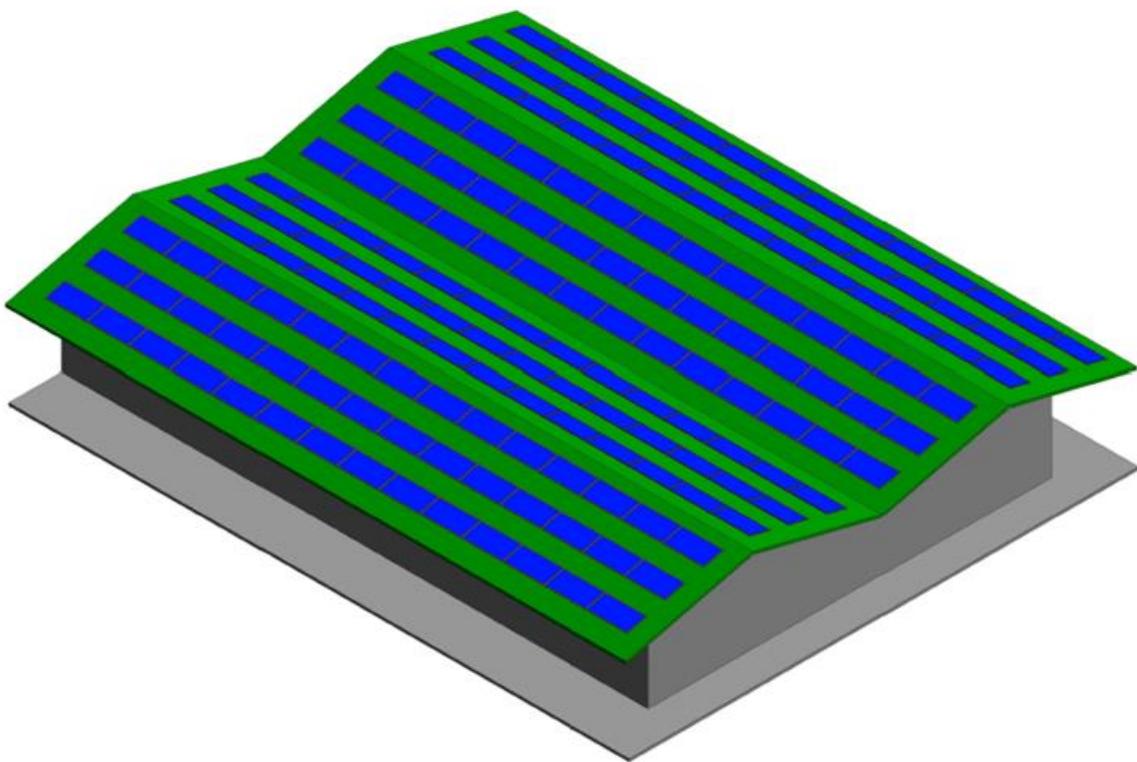


Figura 3.11 Vista isométrica del proyecto fotovoltaico

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

El proyecto del diseño del sistema fotovoltaico es viable para la planta envasadora de gas debido a todos los análisis que se establecieron:

- El proyecto del sistema fotovoltaico planteado cuenta con 168 módulos solares de 545 Wp con un arreglo de 12x14 situados en el tejado de la planta de envasado, con una producción de energía anual aproximadamente de 160 MWh.
- Desde el contexto energético, el proyecto es viable derivado que el porcentaje de abastecimiento del sistema FV es significativo para la planta al ser de 23% aproximadamente.
- La infraestructura seleccionada estará en capacidad de soportar las cargas producidas por el peso del sistema fotovoltaico y el efecto del viento.
- El costo total del proyecto es de aproximadamente \$101.265 USD. Según el análisis económico, se estima que el tiempo de retorno de la inversión es de 8 años. Además, se tiene un VAN de \$29.845,47 USD y un TIR de 5% para los primeros 10 años afirmando su prefactibilidad.
- Se estima una reducción de 705 toneladas de emisiones de CO₂ durante los 30 años de vida del proyecto FV, lo cual cumple con el objetivo de desarrollo sostenible al producir energía asequible y no contaminante.

4.2 Recomendaciones

- Considerar el espacio mínimo entre cadenas de módulos fotovoltaicos de al menos 1 metro para el mantenimiento del sistema.

- Realizar la limpieza de los módulos cada dos semanas en verano para remover el polvo ya que este afecta a la captación solar.
- Ubicar los módulos solares a una altura significativa con respecto al tejado ya que esto permite que los paneles puedan enfriarse con el flujo de aire circundante.
- Considerar la inclinación y orientación de los paneles fotovoltaicos al momento de realizar la implementación del proyecto, como se detalla en los parámetros de estudio de radiación, ya que esto puede disminuir la eficiencia de captación solar.

BIBLIOGRAFÍA

American Society of Heating, R. a.-C. (2021). Fundamentals. *CLIMATIC DESIGN INFORMATION*.

Debernardi-De La Vequia, H. (2016). Energía disponible a partir de biomasa de residuos de caña de azúcar (*Saccharum spp.*). *Agro Productividad*, 9(7).

Díez, P. F. (2009). Centrales Térmicas. *Biblioteca Sobre Ingeniería Energética. Universidad de Cantabria*. Available online: <https://pfernandezdiez.es/es/libro>.

Ecoinventos. (2022, Abril 29). *Pérdida de potencia debido a la temperatura en paneles fotovoltaicos*. Retrieved from <https://ecoinventos.com/perdida-potencia-por-temperatura-en-paneles-fotovoltaicos/#:~:text=La%20p%C3%A9rdida%20de%20potencia%20de,generada%20por%20el%20m%C3%B3dulo%20fotovoltaico>.

Energético, E. D. P. E. B. Nacional 2019. Año base. (2010).

Gómez-Azpeitia, G., Moncayo, C. C., Del Pozo, C. E., & Fernández, E. E. V. GEOMETRÍA SOLAR Y SUS APLICACIONES. *Prontuario solar*, 69.

González, R., Jiménez, H. R., & Lagunas, J. (2003). Sistemas fotovoltaicos conectados a la red. *Boletín IIE, México*.

Jäger, K., Olindo Isabella, Arno H.M. Smets, René A.C.M.M. van Swaaij, & Miro Zeman. (2014, Septiembre). *Solar Energy: Fundamentals, Technology, and Systems*. Netherlands.

Kalogirou, S. A. (2014). *Solar Energy Engineering. Processes and Systems, Second*. USA.

Keller, T. E., Cusick, G. R., & Courtney, M. E. (2007). Approaching the transition to adulthood: Distinctive profiles of adolescents aging out of the child welfare system. *Social Services Review*, 81, 453-484.

L., B. B. (2008). Especificación De Un Sistema De Generación De Energía Eléctrica Usando Paneles Fotovoltaicos Y Convertidores Dc/Ac. Caracas, Venezuela.

LAMIGUEIRO, O. P. (2020, Noviembre). ENERGÍA SOLAR Fotovoltaica.

Ministerio del Ambiente. (2019). *Ministerio del Ambiente*. Retrieved from <http://suiadoc.ambiente.gob.ec/web/suia/mdl#:~:text=El%20Mecanismo%20para%20un%20Desarrollo%20Limpio%20es%20un%20mecanismo%20internacional,suscrito%20y%20ratificado%20por%20Ecuador.>

Oscar Iván Ortega Hidalgo, & Andrés Guillermo Boada Carabalí. (2013). Procedimiento Técnico Para La Implementación De Microcentrales Eléctricas Utilizando Paneles Fotovoltaicos. Quito, Ecuador.

Panesso, A. F. V., Cadena, J., Flórez, J. J. M., & del Carmen Ordoñez, M. (2011). Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléc. *Scientia et technica*, 1(47), 23-28.

Profesionales, G. d. (2002). *Energía solar Fotovoltaica*. Madrid: Ibergraphi.

Solar, E. (2020). Energía solar. *Acesso em*, 15(03), 202013-2014.

UNAM. (2004). El potencial de la radiación solar.

Velasco, J. G. (2009). *Energías renovables*. Reverte.

APÉNDICES

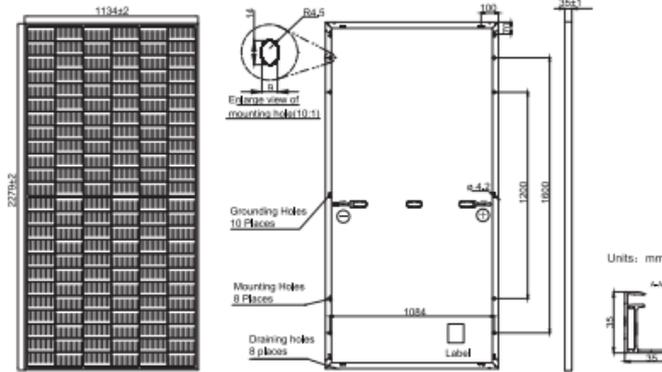
APÉNDICE A

Datasheet de los equipos seleccionados.

JA SOLAR

JAM72S30 525-550/MR Series

MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	28.6kg±3%
Dimensions	2279±2mm×1134±2mm×35±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC) / 12 AWG(UL)
No. of cells	144(6×24)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	QC 4.10(1000V) QC 4.10-35(1500V)
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 300mm(+)/400mm(-); Landscape: 1300mm(+)/1300mm(-)
Packaging Configuration	31pcs/Pallet, 620pcs/40ft Container

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM72S30 -525/MR	JAM72S30 -530/MR	JAM72S30 -535/MR	JAM72S30 -540/MR	JAM72S30 -545/MR	JAM72S30 -550/MR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	525	530	535	540	545	550
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	49.15	49.30	49.45	49.60	49.75	49.90
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	41.15	41.31	41.47	41.64	41.80	41.96
Short Circuit Current(Isc) [A]	13.65	13.72	13.79	13.86	13.93	14.00
Maximum Power Current(Imp) [A]	12.76	12.83	12.90	12.97	13.04	13.11
Module Efficiency [%]	20.3	20.5	20.7	20.9	21.1	21.3
Power Tolerance	0~+5W					
Temperature Coefficient of Isc(α _{Isc})	+0.045%/°C					
Temperature Coefficient of Voc(β _{Voc})	-0.275%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax(γ _{Pmp})	-0.350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G					

Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

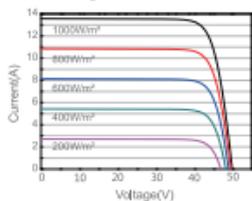
TYPE	JAM72S30 -525/MR	JAM72S30 -530/MR	JAM72S30 -535/MR	JAM72S30 -540/MR	JAM72S30 -545/MR	JAM72S30 -550/MR
Rated Max Power(Pmax) [W]	397	401	405	408	412	416
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	46.05	46.18	46.31	46.43	46.55	46.68
Max Power Voltage(Vmp) [V]	38.36	38.57	38.78	38.99	39.20	39.43
Short Circuit Current(Isc) [A]	10.97	11.01	11.05	11.09	11.13	11.17
Max Power Current(Imp) [A]	10.35	10.39	10.43	10.47	10.51	10.55
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1.5G					

OPERATING CONDITIONS

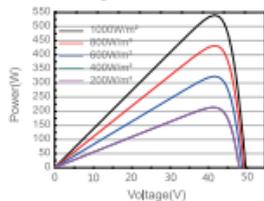
Maximum System Voltage	1000V/1500V DC
Operating Temperature	-40 C ~+85 C
Maximum Series Fuse Rating	25A
Maximum Static Load Front*	5400Pa(112lb/ft ²)
Maximum Static Load Back*	2400Pa(50lb/ft ²)
NOCT	45±2 C
Safety Class	Class II
Fire Performance	UL Type 1

CHARACTERISTICS

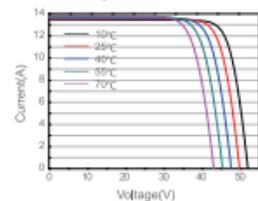
Current-Voltage Curve JAM72S30-540/MR



Power-Voltage Curve JAM72S30-540/MR



Current-Voltage Curve JAM72S30-540/MR



Premium Cells, Premium Modules

Version No. : Global_EN_20200928A

SERIES

AS-IC01H2000-2 AS-IC01H5000-2 AS-IC01H7000-2 AS-IC01H20000-2 AS-IC01H25000-2 AS-IC01H30000-2 AS-IC01H33000-2 AS-IC01H35000-2

INPUT (DC)

Nominal DC input power (W)	12000	15000	17000	20000	25000	30000	33000	35000
Max. DC Input power (W)	12500	15600	17500	20800	26000	31200	36000	38000
Max. DC Input Voltage (V)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Starting Voltage	200	200	200	300	300	300	300	300
MPPT Operating Voltage Range (V)*	180-800	180-800	180-800	280-800	280-800	280-800	280-800	280-800
Operation Voltage	350 - 800	400 - 800	400-800	450-800	480-800	480-800	520-800	550-800
Number of MPPT / String per MPPT	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/4	2/4
Max. DC Current (A) per MPPT x Nr. of MPPT	19 x 2	21 x 2	23 x 2	25 x 2	30 x 2	33 x 2	33 x 2	33 x 2
Isc PV (A)	21 x 2	23.5 x 2	25.5 x 2	27 x 2	33 x 2	36 x 2	36 x 2	36 x 2
Maximum backflow current (inv. backflow to array) (A)	0	0	0	0	0	0	0	0
DC switch	Integrated							

*Planning recommendation: if your AEG inverter has 2 MPPT or more, make sure to connect a balanced amount of solar PV panels to each MPPT to avoid inverter damage and electric risks. If in doubt, read the installation manual or contact the AEG inverter support service.

OUTPUT (AC)

Rated Output Power (W)	12000	15000	17000	20000	25000	30000	33000	35000
Max. Apparent Power SE_{max} (VA)	12085	15350	17083	20023	25000	30010	33011	34994
Max. AC Output Current (A)	19.3	24.1	27.3	32.0	400	480	480	480
Maximum Output Overcurrent Protection (A)	38.2	47.7	54.0	63.3	79.1	95	95	95
Maximum Output Fault Current (A)	250A@41.6ms			472A@11.04ms				
AC inrush current	Less than 10A			Less than 20 A				
Voltage (V) / Frequency (Hz)	230-400 Vac, 50/60 Hz							
Power Factor	-0.8 ~ +0.8 (adjustable)							
THDi	<3% (at rated power)							
AC Output	Three-phase (L1, L2, L3, N, PE) / (L1, L2, L3, PE)							

SYSTEM

Cooling	Air cooling							
Max. Efficiency (%)	98.20	98.30	98.30	98.40	98.40	98.50	98.50	98.50
Euro-Efficiency (%)	97.60	97.80	97.80	98.00	98.00	98.00	98.10	98.10
MPPT Efficiency (%)	99.90							
Protection Rating	IP65							
Power Consumption at Night (W)	<1							
Topology and Isolation Mode	Non-isolated, transformerless							
Operating Temperature	-25°C ~ +60°C (derate after 45°C)							
Relative Humidity	4 ~100%, condensation							
Max. Altitude (m)	≤2000 (derate if the altitude >2000)							
Overvoltage Protection Class and Safety Class	AC, III, PVII, Safety Class I							
Protection	Input overvoltage protection, input overcurrent protection, DC isolation monitoring, DC monitoring, grounding fault current monitoring, grid monitoring, island protection, short circuit protection, overheating protection							

MECHANICAL PARAMETERS

Dimensions (H x W x D, mm)	610 x 480 x 230	660 x 520 x 250
Weight (kg)	36	53
DC Terminal	BC03A, BC03B	
Installation	Wall-mounting	
Safety certificates / EMC category / Grid Standards	IEC 62109-1 (ed1), IEC 62109-2 (ed1), EN 62109-1:2010, EN 62109-2:2011, EN 61000-6-3:2007+A1:2011, EN 61000-6-2:2005, (12-17 kW) VDE-AR-N 4105:2018, DIN VDE V 0124-100:20, (20-35 kW) EN 50549-1:2019	
Noise (dB)	≤55	

DISPLAY AND COMMUNICATION

Display	LCD
System Language	English, German, Dutch
Communication	RS485 + WiFi (Standard), Ethernet (Optional)

WARRANTY

Product warranty 5 years (optional: 10/15/20 years)
 For the full Warranty Terms please visit www.aeg-industrialsolar.de
 © Solar Solutions GmbH. Specifications in this datasheet are subject to change without notice. Code: AS-IC01H-20000-35000-2 version 202208.V1EN-EU
 AEG is a registered trademark used under license from AB Electrolux (publ)



AS-IC01H-20000-17000-2



AS-IC01H-20000-35000-2

CONTACT US

Solar Solutions GmbH | Brückenstrasse 94 | 60594 Frankfurt am Main | Germany
 Tel: +49 69 400 500 810 | Mail: info@aeg-industrialsolar.de | www.aeg-industrialsolar.de

Precio de los paneles.

Placa Solar JA Solar JAM72S30-545/MR 545Wp

JA SOLAR

265,00€ IVA Incluido

Divide en 3 pagos de **88,33 €**/mes. [segura](#) +info

O solo **27,08 €**/mes en cuotas con [segura](#) +info

Placa Solar JA Solar JAM72S30-540/MR 540Wp deep blue 3.0 silver frame half-cut.

PEDIDO MÍNIMO DE 6 UDS.

✓ **Entrega en 5-7 días**

Oferta de dtos. por volumen

6 - 15	16 - 30	31 - 200
265,00€	263,00€	261,00€



Inverter / String / AEG Solar Solution - AS-IC01-5000-2

AEG Solar Solution - AS-IC01-5000-2

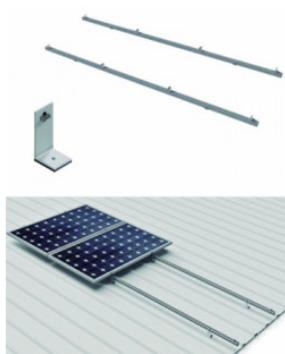
★★★★★ (0 Customer Review)

937,50 EUR/pcs. ~~1187,500 EUR/kWp~~
excl. VAT. (19 %)

PRICE LIST

Item number	18173 (2187 views)
Availability	12 pcs / from immediately
Minimum Order Quantity	1 pcs
Shipping Type	Free shipping
Seller Information	Business provider
Category	Inverter / String

Estructura Cubierta Metálica 3 paneles 03V



141,99€ SIN IVA 117,35 €

★★★★★
24 Opiniones

Envío: **Gratuito** en compras superiores a 150€, inferiores 7,5€

Entrega: **Recíbelo el miércoles 24 de agosto en pedidos antes de las 15h** >

Fabricante: Sunfer | Cod. Artículo: 1501012

Cantidad:

Financiación: [Calcular cuota](#)

AÑADIR AL CARRITO

COMPRAR

Estructura Cubierta Metálica 3 paneles 03V opiniones

[Ver más opiniones](#)

Propiedades mecánicas del material estructural

Propiedades Mecánicas			
Resistencia a la tracción	Límite Elástico, min	Alargamiento %, min	
		200 mm	50 mm
41 - 56 Kg /mm ²	23 - 25 Kg / mm ²	20	23
400 - 550 Mpa	250 Mpa.		
58 – 80 ksi.	36 ksi		

Perfil de la estructura

Designación	Dimensiones (mm)			Masa Kg/m	A cm ²	d1 cm	Momento de inercia		Módulo resistente		Radio de giro	
	h	b	e				Ix	Iy	Wx	Wy	ix	iy
	mm	mm	mm				cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm
C 125x50x4	125	50	4	6,60	8,47	1,29	192	19,4	30,7	5,24	4,76	1,51

