

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

**DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA EL
STEM - ESPOL**

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

INGENIEROS EN MECÁNICA

PRESENTADO POR:

Kerly Melissa Chávez Burgos

Jean Pierre Flores Alejandro

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

Es para mí un honor poder dedicar el cierre de este capítulo de mi vida a mis dos pilares fundamentales. A mi madre, Yessenia Burgos Espinoza, le dedicó el comienzo de mis logros profesionales, por estar siempre presente en las decisiones importantes de mi vida y priorizar mi bienestar al lograr entenderme. A mi padre, Grimaldi Chávez Pazmiño, por ser mi modelo profesional y compartir su sabiduría sobre el mundo laboral, y a mi hermana por siempre ser mi confidente y contagiarme con su alegría. De modo que esta hermosa travesía académica la dedicó a ellos, por su amor, sacrificio y confianza puestos en mí a lo largo de estos años, donde me enseñaron a ser determinada, creer en mí y ser perseverante con lo que quiero.

Kerly Melissa Chávez Burgos

Agradecimientos

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a la institución que logró moldearme de forma académica y ética, "ESPOL", a la cual buscaré honrar su prestigioso nombre. Añado el agradecimiento a mis tutores de grado por encaminar mis objetivos profesionales. Agradezco también a mi compañero Jean por aceptar este reto intelectual que desafió nuestras capacidades. Finalmente, estoy muy agradecida con mis hermanos de carrera (J,J,R,M,S,A), quienes me acompañaron en la lucha incesante, enseñándome y apoyándonos mutuamente, para obtener este mérito académico, consiguiendo que todos estemos al mismo paso del título profesional.

Kerly Melissa Chávez Burgos

Dedicatoria

Este logro se lo dedico en primer lugar a mi amada madre Jessica, quien con su forma de amarnos a mí y a mis hermanos nos hace seguir adelante todos los días desde que somos niños; a mi padre Roberto por demostrarme apoyo incondicional y no soltarme la mano nunca. A mi querida Katherine, quien ha sido mi compañera de viajes y risas en este trayecto tan difícil. No quiero pasar por alto a todos mis amigos, pero de manera especial a Johan, Daniela y Gabriela quienes han estado conmigo desde que entre a la universidad y es para mí una alegría poder cerrar el ciclo junto a ellos. Finalmente, me dedico este trabajo a mí mismo por ser fiel a mis metas y no dejarme caer, aunque los tiempos sean difíciles.

Jean Pierre Flores Alejandro

Agradecimientos

Quiero agradecer a la ESPOL, por ser el alma máter que me guio hacía el camino del éxito académico. A todos los docentes que sin duda dejaron su huella en mí; ya sea con sus conocimientos o su forma de enseñar. A mis tutores por la paciencia y el esfuerzo imprimido en este trabajo. A mi compañera de tesis Kerly por atreverse a realizar este proyecto junto a mí. Por último, a mis hermanos que siempre estuvieron conmigo y cada día me alentaban a seguir adelante con mi proyecto.

Jean Pierre Flores Alejandro

Declaración Expresa

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; **Kerly Melissa Chávez Burgos y Jean Pierre Flores Alejandro** 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”

Guayaquil, _05_de_febrero_ del 2024.



Kerly Melissa Chávez Burgos



Jean Pierre Flores Alejandro

Evaluadores

Macias Zambrano José Alberto, M.Sc

PROFESOR DE LA MATERIA

Avilés Cedeño Daniel Eduardo, M.Sc

PROFESOR TUTOR

Resumen

En el último año, Ecuador ha enfrentado un déficit energético, obligando al gobierno a implementar racionamientos eléctricos. Mientras tanto, el Edificio STEM de la ESPOL destaca como un símbolo universitario comprometido con la transición hacia la energía sostenible y sustentable. Con todo esto se plantearon los objetivos de instalar un sistema de paneles solares en el techo del edificio para apoyar la reducción del consumo eléctrico, dicho sistema debe ser diseñado en base a criterios de viabilidad y rentabilidad económica. El diseño incluyó 64 unidades fotovoltaicas en una estructura metálica resistente. Estos paneles generaron una potencia de 35,2KWh, cubriendo entre el 75-80% de la demanda, y la estructura demostró resistencia ante las cargas y esfuerzos en una distribución inteligente acoplada a las limitaciones físicas del tejado. A pesar de no obtener ganancias significativas, el retorno de la inversión se estimó en 23 años, dentro de la vida útil de 25 años del sistema. Concluyendo, la implementación se revela viable para un cambio en las fuentes de energía, priorizando la sostenibilidad y estableciendo un diseño reutilizable para futuros proyectos, aunque la rentabilidad se proyecta a largo plazo.

Palabras Clave: Incidencia solar, panel, autoabastecimiento, consumo energético y producción de energía

Abstract

In the past year, Ecuador has faced an energy deficit, forcing the government to implement electricity rationing. Meanwhile, the ESPOL STEM Building stands out as a university symbol committed to the transition to sustainable energy. With all this, the aims of installing a solar panel system on the roof of the building to support the reduction of electricity consumption were raised, such a system must be designed based on criteria of viability and economic profitability. The design included sixty-four photovoltaic units in a rugged metal structure. These panels generated a power of 35.2KWh, covering between 75-80% of the demand, and the structure proved resistance to loads and stresses in an intelligent distribution coupled to the physical limitations of the roof. Despite not making significant profits, the return on investment was estimated at 23 years, within the 25-year lifespan of the system. In conclusion, the implementation is practical for a change in energy sources, prioritizing sustainability and setting up a reusable design for future projects, although profitability is projected in the long term.

Keywords: Solar incidence, panel, self-supply, energy consumption, and energy production.

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Abreviaturas.....	IX
Simbología.....	IX
CAPÍTULO 1.....	X
1. Introducción.....	2
1.2. Definición del problema.....	2
1.3. Justificación del problema.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
1.5. Marco Teórico.....	5
1.5.1. Incidencia solar en la ciudad de Guayaquil (Zona perimetral Campus-ESPOL).....	5
1.5.2. Energía solar fotovoltaica.....	6
1.5.3. Componentes de un sistema de abastecimiento por paneles.....	6
1.5.4. Tipos de Paneles Fotovoltaicos.....	9
1.5.5. Tipos de sistemas fotovoltaicos de interés.....	10
1.5.6. Generalidades de estructuras y soportes para paneles fotovoltaicos.....	12
1.5.7. Normas y estándares para instalaciones eléctricas.....	12
CAPÍTULO 2.....	1
2. Metodología para el Diseño de un sistema fotovoltaico.....	16
2.1.1. Consideraciones de diseño, especificaciones y restricciones.....	17
2.1.2. Planteamiento de casos de estudio.....	18
2.1.3. Estimación de la potencia fotovoltaica generada sobre el edificio STEM.....	19
2.1.4. Pre-dimensionamiento del Sistema fotovoltaico por cada caso.....	19
2.1.5. Selección del sistema fotovoltaico.....	23
2.1.6. Dimensionamiento de la estructura del sistema fotovoltaico seleccionado.....	24
CAPÍTULO 3.....	14
3. Resultados y análisis.....	32

3.1. Resultados del dimensionamiento del sistema Fotovoltaicos usando PV-SYSTEM	32
3.2. Resultados del dimensionamiento y Simulación	35
3.3. Resultado del Análisis Económico	41
CAPÍTULO 4.....	30
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	47
4.1. Conclusiones	47
4.2. Recomendaciones.....	52
REFERENCIAS	54
APÉNDICES.....	56
APÉNDICE A.....	56
Análisis y tablas de los casos del Pre-dimensionamiento.	56
Caso II: Diseño de un sistema fotovoltaico donde se utiliza toda el área superficial disponible .	60
Caso III: Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo	62
Comparación de los resultados calculados para cada caso.	65
Análisis de Pre-dimensionamiento con la Incidencia que usa el PV-SYSTEM.	66
APÉNDICE B.....	72
Resultados, Simulación y Análisis - Estructura.	72
Análisis del cálculo de selección de uniones roscadas - Pernos	79
Factor de seguridad para el Esfuerzo cortante	85
Factor de seguridad del esfuerzo aplastamiento	86
Análisis del cálculo de soldadura.....	88
APÉNDICE C.....	92
Planteamiento de resultados y análisis de costo del sistema fotovoltaico.	92
Tabla del análisis económico	96
APÉNDICE D.....	98
Informe General de la Simulación en PV-System	98

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 Temperatura media y radiación incidente sobre la ciudad de Guayaquil por horas	6
Figura 2 Sistema PN para la generación eléctrica en módulos fotovoltaicos.	7
Figura 3 Baterías conectadas en serie (A) y paralelo (B).	9
Figura 4 Panel fotovoltaico monocristalino (Derecha), partes de la célula monocristalina (izq.)	10
Figura 5 Diagrama Esquemático general de un sistema fotovoltaico Autónomo.....	11
Figura 6 Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico con conexión a la red.	11
Figura 7 Estructura instalada en cubierta plana.	12
Figura 8 Diagrama de flujo de las fases del proceso de diseño.	16
Figura 9 Curva de consumo real de abril-Julio 2023 del edificio STEM.	17
Figura 10 Irradiación solar sobre el edificio STEM por hora de enero-diciembre 2023.	19
Figura 11 Curvas de consumo del edificio STEM comparadas con las curvas de producción fotovoltaica – CASO I.....	22
Figura 12 Vista panorámica del área seleccionada para la colocación del sistema fotovoltaico..	25
Figura 13 Dimensiones entre tubos del edificio.	25
Figura 14 Diagrama de la ubicación de los ángulos de inclinación, incidencia y distancia mínima entre filas.....	26
Figura 15 Pines Panel Tubo (Izq.) y Panel Soporte (Drcha.).....	28
Figura 16 Estructura soporte triangular y su acoplamiento a los paneles	29
Figura 17 Módulos de 16 paneles para formar los grupos que completen la cantidad deseada. ..	29
Figura 18 Módulos de 16 paneles para formar los grupos que completen la cantidad deseada ...	30
Figura 19 Resultados principales de la simulación del dimensionamiento de los paneles.	32
Figura 20 Curvas de consumo mensual del Edificio STEM-ESPOL vs producción fotovoltaica de un conjunto de 64 paneles según el programa PV-SYSTEM.	33
Figura 21 Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico.	34
Figura 22 Características principales del sistema fotovoltaico.....	34
Figura 23 Modelo del inversor On Grid Growatt MAC 36KTL3-XL.....	35
Figura 24 Mallado de los pines de la estructura para simulación de esfuerzos y deformación	36
Figura 25 Mallado de los paneles y la estructura que los soporta	36
Figura 26 Sistema de mallado y de fuerzas principales sobre la estructura de los 16 módulos de paneles.....	37

Figura 27 Resultados de simulación para el pin soporte del panel solar.	38
Figura 28 Resultados de simulación para la estructura final con módulos fotovoltaicos.	39
Figura 29 Curva comparativa entre el precio de la energía consumida y la producida por el nuevo SFV del edificio STEM.	42
Figura 30 Diferencia de ventas entre el consumo y la producción fotovoltaica a lo largo de 25 años de vida útil.	44
Figura 31 Gráfica de costos anuales de venta y producción de energía, así como los valores de flujo neto del SFV.....	45

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1 Comparativa entre los diferentes paneles fotovoltaicos y sus principales características .	9
Tabla 2 Normas y Estándares Nacionales e Internacionales.	13
Tabla 3 Detalle de los picos de las curvas de consumo del Edificio STEM - ESPOL.	18
Tabla 4 Especificaciones del panel solar seleccionado.....	20
Tabla 5 Descripción de los criterios de selección evaluados.	23
Tabla 6 Matriz de selección de alternativas.	24
Tabla 7 Principales resultados de simulación para los Pines Paneles-Tubo	38
Tabla 8 Principales resultados de simulación para la estructura final.	40
Tabla 9 Comparativa entre resultados obtenidos y propiedades del material de fabricación.	40
Tabla 10 Resumen de la estimación de presupuesto de costos de la implementación del sistema fotovoltaico diseñado.....	41

ÍNDICE APENDICES

Figuras Apéndice A

Figura A 1 Curvas de consumo del edificio STEM comparadas con las curvas de producción fotovoltaica – CASO I.....	60
Figura A 2 Curvas de consumo del edificio STEM comparadas con las curvas de producción fotovoltaica – CASO III.....	62
Figura A 3 Valores de Irradiación que usa el PV-SYSTEM.	66
Figura A 4 Resultados principales de la simulación de 42 paneles de PV-SYSTEM - Comprobación.	69
Figura A 5 Curva de Consumo Mensual STEM vs Producción Fotovoltaica de 42 paneles - PV-SYSTEM -Comprobación.....	70

Figuras Apéndice B

Figura B 1 Resultados de simulación de esfuerzos y cargas sobre la estructura soporte.	78
Figura B 2 Resultados de simulación de esfuerzos y cargas sobre los pines soporte.	79
Figura B 2 Resultados de simulación de esfuerzos y cargas sobre los pines soporte.	79
Figura B 3 Puntos de análisis de pernos que se va a seleccionar para el soporte de paneles.	80
Figura B 4 Dimensiones de la unión roscada - Perno.	81
Figura B 5 Fuerza ejercida en el empotramiento.	88
Figura B 6 Datos de entrada de la simulación del empotramiento.	90
Figura B 7 Data Sheet del perno de expansión para el empotramiento del sistema al techo del STEM.	91

Planos Apéndice B

Plano B 1 Elaboración del Pin Panel-Tubo.	73
Plano B 2 Elaboración del Soporte-Panel.	74
Plano B 3 Ensamble y piezas soporte-panel.	75
Plano B 4 Elaboración del Pin Tubo-Soportes.	76
Plano B 5 Elaboración ensamble paneles.	77

Figuras Apéndice C

Figura C 1 Precio unitario del Panel seleccionado según el distribuidor Helios Strategy Ecuador.	94
Figura C 2 Precio en peso colombiano del distribuidor de AutoSolar.	94
Figura C 3 Proforma proporcionada por DIPAC para los perfiles.	95
Figura C 4 Cotización del Medidor Bidireccional trifásico para el SFV.	95

Figuras Apéndice D

Figura D 1 Resumen del proyecto, sistema, resultados y tabla de contenido.	98
Figura D 2 Parámetros generales, características del SFV, perdidas conjunto.	99
Figura D 3 Resultados principales.	100
Figura D 4 Diagrama de Perdidas.	101
Figura D 5 Diagramas predefinidos de Energía Útil.	102
Figura D 6 Detalle del Balance de emisiones de CO ₂	103

Tablas Apéndice A

Tabla A 1 Consumo de Potencia de Abril-Julio 2023 del edificio STEM.....	56
Tabla A 2 Potencia de salida por hora del panel seleccionado.	57
Tabla A 3 Cantidad de paneles necesarios para cubrir la demanda del edificio STEM	57
Tabla A 4 Potencia producida por 75 paneles [KWh] - CASO I.....	58
Tabla A 5 Valores porcentuales de demanda cubierta por el sistema fotovoltaico – CASO I.....	59
Tabla A 6 Potencia producida por 388 paneles [KWh] - CASO II.	61
Tabla A 7 Valores porcentuales de demanda cubierta por el sistema fotovoltaico - CASO II.....	61
Tabla A 8 Potencia producida por 150 paneles [KWh] - CASO III.....	63
Tabla A 9 Valores porcentuales de demanda cubierta por el sistema fotovoltaico - CASO III ...	64
Tabla A 10 Resumen de los resultados de los casos de estudios planteados.....	65
Tabla A 11 Potencia Producida por el panel - Comprobación.....	67
Tabla A 12 Número de paneles promedio - Comprobación.	67
Tabla A 13 Potencia producida por 43 paneles - Comprobación.	68
Tabla A 14 Porcentaje de Demanda-Producción - Comprobación.	68
Tabla A 15 Porcentajes de discrepancia entre la simulación y el Pre-dimensionamiento.....	71

Tablas Apéndice B

Tabla B 1 Partes y Propiedades del material de la estructura soporte.	72
Tabla B 2 Propiedades de mallado para la simulación de elementos finitos	72
Tabla B 3 Resultados principales para la simulación de los soportes Panel-Estructura.....	78
Tabla B 4 Resultados para la simulación de los pines del Panel-Soporte.	79
Tabla B 5 Datos de entrada de la simulación del empotramiento.....	90
Tabla B 6 Principales resultados de empotramiento.	91

Tablas Apéndice C

Tabla C 1 Estimación de presupuesto de costos de la implementación del Sistema Fovoltaiico	
Diseñado.....	92
Tabla C 2 Balance económico del SFV para el año 2023.....	96
Tabla C 3 Estimación del balance económico para el SFV a lo largo de 25 años de vida útil.	96

Abreviaturas

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral
STEM
FV Fotovoltaico
SFV Sistema fotovoltaico
SPMP Seguidor del punto de máxima potencia
PME Plan Maestro de Electricidad
INAMHI Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
DC Corriente Continua
AC Corriente alterna
ZCE Zona de carga espacial
SGDA Sistema de generación distribuida para Autoabastecimiento
ENET_i Energía neta del periodo mensual de consumo i (kWh)
CEM_i crédito a favor del consumidor obtenido en el mes i (kWh)
VAN Valor Actual Neto
TIR Tasa Interna de Retorno

Simbología

KWp Unidad de medida de la producción de un sistema fotovoltaico.
MWh Mega Watt Hora, unidades de producción energética de centrales hidráulica

CAPÍTULO 1

1. Introducción

Durante las últimas décadas la cuestión del medio ambiente y su impacto ha adquirido una considerable relevancia. En este contexto, la aplicación de medidas de eficiencia energética se presenta como un tema crucial para atenuar la huella ecológica, contribuyendo así a la mitigación de la emisión de gases contaminantes vinculados al cambio climático y al agotamiento de recursos, con especial énfasis en los recursos fósiles.

En el Ecuador el PME (Plan maestro de electricidad) junto con el plan nacional de desarrollo promueven políticas energéticas que buscan planes para abastecer la creciente demanda eléctrica del país junto con el cumplimiento de criterios de confiabilidad, economía y menor afectación ambiental, de modo que, desde el año 2007 en el país se han realizado proyectos de generación mayormente enfocados en energía hidráulica, sin embargo existe un recurso que no se ha explotado en el país siendo esta la generación eléctrica fotovoltaica.

Por lo tanto, se decide promover el uso de fuentes de generación de energía usando recursos renovables en el Edificio STEM de la Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL mediante la aplicación de paneles Solares que aprovechen la energía solar. El edificio cuenta con las más recientes implementaciones tecnológicas para transformarlo en un edificio eficiente energéticamente.

1.2. Definición del problema

Se pretende implementar el diseño de un sistema fotovoltaico para el edificio STEM, mediante el desarrollo de un análisis económico que exponga la factibilidad del proyecto, las reducciones de costo con base en la disminución de consumo eléctrico consiguiendo cumplir la expectativa de convertir el edificio en un lugar que usa la energía de forma eficiente.

Se requiere evaluar la alimentación eléctrica de toda la edificación, el uso del área de cubierta disponible del edificio para como conocer si se necesita adaptar un área adicional para suplir la demanda de consumo del edificio, y disminuir los costos eléctricos, para esto se dispone de la curva de consumo por hora del uso de energía eléctrica diario del año 2023.

1.3. Justificación del problema

La transición hacia fuentes de energía sostenibles se presenta como una necesidad imperativa en el contexto energético actual del país, según la revista CNN “ Ecuador pasa por la peor sequía reportada en los últimos 50 años” (Cañizares, 2023), esto ha ocasionado un déficit de producción hidroeléctrica de 465 MWh; debido a que la generación con este recurso es de aproximadamente el 89% del total del país, de acuerdo a datos del Ministerio de Energía y Minas (MEM,2021); con todo esto en los últimos meses del año 2023 el Ecuador se ha visto en la necesidad de racionar la energía eléctrica por medio de apagones en diferentes sectores del territorio.

Por lo tanto, se decide promover el uso de fuentes de generación alterna de energía usando recursos renovables en el Edificio STEM de la Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL mediante la aplicación de paneles Solares que aprovechen la energía solar, además el edificio cuenta con las más recientes implementaciones tecnológicas para transformarlo en un edificio eficiente energéticamente.

Es por esto por lo que se precisa la identificación de los costos asociados a la implementación de un sistema de generación de energía mediante fuentes renovables, específicamente utilizando energía fotovoltaica, esto reviste una importancia crucial en la evaluación de la viabilidad de su aplicación. Este análisis nos proporcionará información crucial sobre la potencia que puede generarse utilizando el área útil del techo de la edificación, así como

la evaluación del área total requerida para satisfacer por completo la demanda energética del edificio.

El estudio detallado de este caso nos permitirá comprender las diferentes variables que influyen en la implementación del sistema. Así pues, Será necesario determinar el enfoque más adecuado, considerando opciones como la inclusión de baterías para el almacenamiento de energía o el diseño del sistema para suministrar energía exclusivamente durante las horas solares. Estas decisiones estratégicas estarán basadas en la optimización del rendimiento del sistema y en la adaptación a las necesidades específicas del STEM, teniendo en cuenta las horas de mayor demanda energética que coinciden con las horas solares.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar un sistema fotovoltaico complementario para el edificio STEM de la ESPOL con el fin de disminuir gastos por el consumo energético, transformando el sistema de alimentación eléctrica mediante un análisis de Consumo/Producción, el uso de paneles fotovoltaicos y el diseño de la estructura soporte.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Analizar la energía generada por el sistema usando únicamente el área del techo de la edificación y los datos de energía solar disponible a lo largo de los meses con más consumo del edificio proponiendo un sistema más eficiente en la generación energética.
- Encontrar el área requerida para suplir el consumo del edificio mediante el análisis de las dimensiones disponibles, estableciendo una distribución más eficiente de los paneles.

- Diseñar los soportes para el sistema fotovoltaico mediante las dimensiones disponibles, simulaciones y diseños inteligentes para la elaboración de distintas propuestas a implementar.
- Realizar un análisis económico de los costos generales involucrados en el proyecto usando como herramienta los datos previos de consumo del edificio elaborando fichas de costos y mantenimiento del sistema fotovoltaico para la obtención de proyecciones reales.

1.5. Marco Teórico

1.5.1. Incidencia solar en la ciudad de Guayaquil (Zona perimetral Campus-ESPOL)

Según el instituto nacional de meteorología e Hidrología INAMHI en el mes de octubre del año 2023 el promedio de radiación solar recibida en la ciudad de Guayaquil fue de aproximadamente 3500Wh/m^2 al día con una temperatura entre los 27°C y 30°C en la zona del campus perimetral ESPOL, además las horas en la que mayor incidencia hay sobre la superficie solar es entre las 11:00 y 14:00 siendo el pico a la 13:00 llegando a pronosticar valores como 777W/m^2 según se observa en la figura 1.

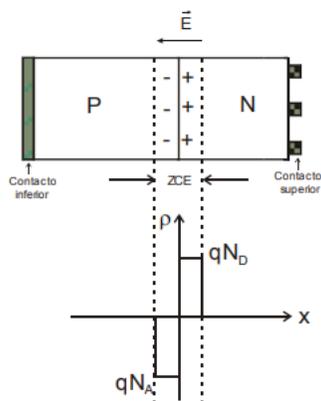
Según el “Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica”, el valor de insolación directa promedio del Ecuador continental es de $2.543\text{Wh/m}^2\text{día}$; la insolación difusa promedio es de $2.032\text{Wh/m}^2\text{día}$; y la insolación global promedio es de $4.575\text{Wh/m}^2\text{día}$.

cargas eléctricas que pasa por las juntas, donde a cada lado de la unión existe un tipo de portador por el alto gradiente de concentración.

En la figura 2 Se puede apreciar la generación de un campo eléctrico en la zona de unión por la existencia de cargas estacionarias que producen una corriente de arrastre, así mismo, se encuentra un corriente de difusión en la región N a la P por el gradiente de concentración. De modo que, al colocar una carga eléctrica en la zona del campo eléctrico, esta generará un trabajo en el campo al que se denominará voltaje.

Figura 2

Sistema PN para la generación eléctrica en módulos fotovoltaicos.



Nota. Generación del campo eléctrico en la ZCE de la juntura P/N (Calderón & Aguirre, 2017).

Inversor: El uso de un inversor en el diseño de un sistema fotovoltaico es el medio o componente que se encarga de convertir la corriente continua (DC) que produce el generador fotovoltaico en corriente alterna (AC). Se considera al inversor uno de los componentes de mayor importancia cuando se tiene un sistema conectado a la red, puesto que permite no solo hacer la conversión de DC a AC, sino que maximiza la producción de corriente del dispositivo y optimiza el paso de energía entre el módulo y la alimentación del sistema o al introducirla a la red.

Así mismo, se debe tener en cuenta que en caso de conectar el inversor directamente al módulo FV este debe disponer de un buscador del punto de máxima potencia (SPMP), para el ajuste continuo de la impedancia de carga, caso contrario el inversor no podrá extraer la máxima potencia del sistema (Horikoshi, 2009).

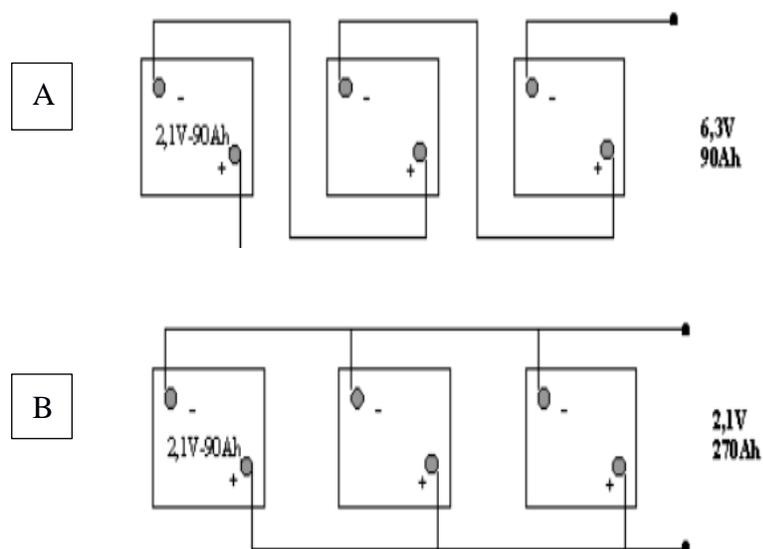
Regulador de carga (en caso de ser un sistema FV autónomo): Un regulador de carga tiene como función dentro del sistema controlar para estabilizar los niveles de carga y descarga de las baterías, puesto que la energía que es emitida a las baterías suele tener fluctuaciones fuertes de carga y descarga. Así mismo permite monitorear las baterías, de esta forma a su vez da paso a un correcto mantenimiento de estas alargando su vida útil.

Sistema de baterías de acumulación (en caso de ser un sistema FV autónomo): Son un sistema de almacenamiento energético, el cual, de acuerdo con la necesidad, puede tener periodos de descarga y carga, las baterías son utilizadas especialmente para los sistemas fotovoltaicos autónomos.

En el mercado, para un sistema fotovoltaico se utilizan comúnmente baterías de plomo-ácido, adicional hay que tener en cuenta el tipo de conexión de las baterías de acuerdo con la capacidad requerida puesto que si se conectan en paralelo se suma la capacidad de sus elementos y si se realiza una conexión en serie la capacidad del grupo de baterías conectadas será igual para cada una de ellas, como se ejemplifica cada caso en la figura 3.

Figura 3

Baterías conectadas en serie (A) y paralelo (B).



Nota. Acumuladores asociados en serie y paralelo (Abella, 2001).

1.5.4. Tipos de Paneles Fotovoltaicos

Para fines de este proyecto solo se tomarán en cuenta los tipos de paneles que aprovechen la incidencia solar directa para la conversión a energía eléctrica, por lo cual se descarta los paneles solares térmicos, además, en la tabla 1 se puede revisar una comparativa entre las principales características de estos paneles.

Tabla 1

Comparativa entre los diferentes paneles fotovoltaicos y sus principales características

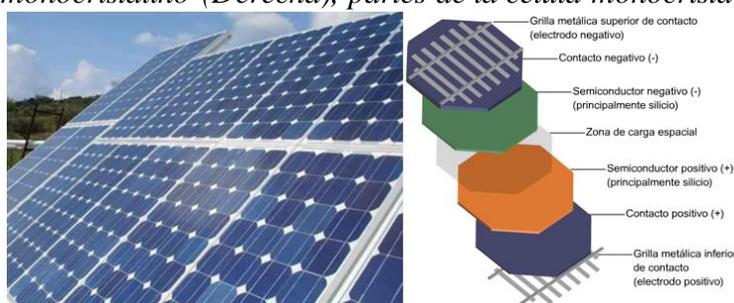
Característica	Película Fina	Monocristalino	Policristalino
Material Semiconductor	Variedad de materiales orgánicos	Silicio monocristalino	Silicio policristalino
Eficiencia de Conversión	Generalmente menor	Alta	Moderada
Costos	Menos costoso	Más caro	Menos costoso
Rendimiento en condiciones de poca luz	Mejor rendimiento	Buen rendimiento	Buen rendimiento
Eficiencia en el tiempo	Puede degradarse más rápido	Menor degradación con el tiempo	Menor degradación con el tiempo
Tolerancia a la Sombra	Mejor	Menor impacto en la eficiencia	Menor impacto en la eficiencia

Aplicaciones	Integración en edificios, superficies flexibles	Residencial, Comercial, Industrial	Residencial, Comercial
Área de Trabajo	Mayor	Menor	Mayor
Vida Útil	Variante	Larga	Larga

De modo que los paneles de silicio monocristalino se consideran los más apropiados, dichos paneles están compuestos por células de silicio con juntas de contacto eléctrico en cada célula para la recopilación de corriente eléctrica, además posee una capa antirreflejo que permite una mejor captación de luz solar, asimismo cuenta con un marco de aluminio y una parte frontal de vidrio, una representación de lo antes mencionado se puede observar en la figura 4.

Figura 4

Panel fotovoltaico monocristalino (Derecha), partes de la célula monocristalina (izq.)



Nota. Obtenido de Ecosolar y adaptado por el autor.

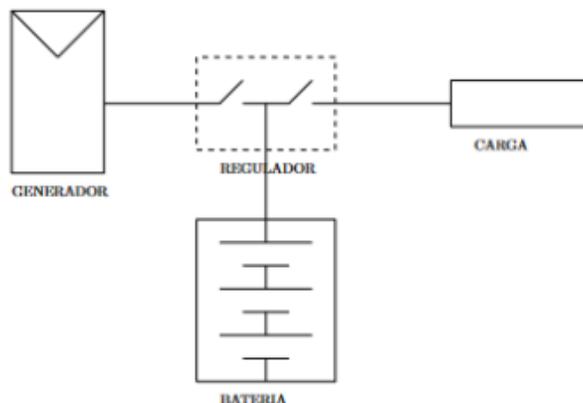
1.5.5. Tipos de sistemas fotovoltaicos de interés

Sistemas fotovoltaicos autónomos: Como este sistema no se encuentra conectado a la red eléctrica se vuelve un sistema completamente independiente mediante el uso de baterías, por lo general son utilizados en lugares aislados de la red eléctrica.

Existen 4 diferentes tipos de configuraciones de sistemas fotovoltaicos autónomos y se pueden alternar ampliamente desde arreglos simples como el que se muestra en la figura 5, hasta sistemas más completos, así como la incorporación de inversores.

Figura 5

Diagrama Esquemático general de un sistema fotovoltaico Autónomo.



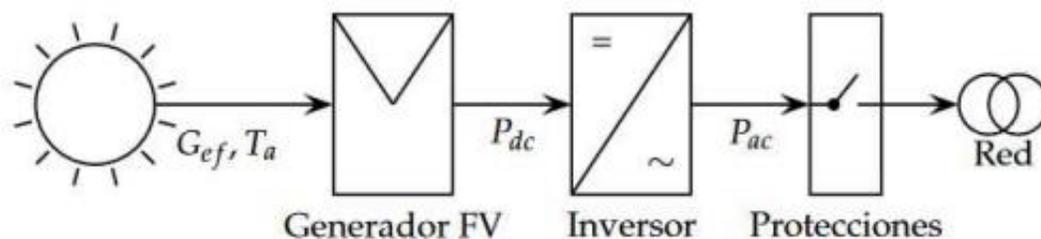
Nota. Sistema fotovoltaico con regulador (Muñoz Cano, 2021).

Sistemas fotovoltaicos de conexión a la red: Este sistema tiene su funcionamiento en conjunto con la red pública, dicha conexión está entrelazada entre la cantidad de potencia que se requiere introducir y la cantidad de paneles solares disponibles, así como el tipo de conexión de estos, ya sea en serie o paralelo.

La configuración básica de un sistema fotovoltaico conectado a la red consta de un generador fotovoltaico, el inversor, que se encargue de convertir la corriente DC a AC, y protección eléctrica como un factor de seguridad, como se observa en la figura 6.

Figura 6

Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico con conexión a la red.



Nota. Sistema fotovoltaico con conexión a la red (Muñoz Cano, 2021).

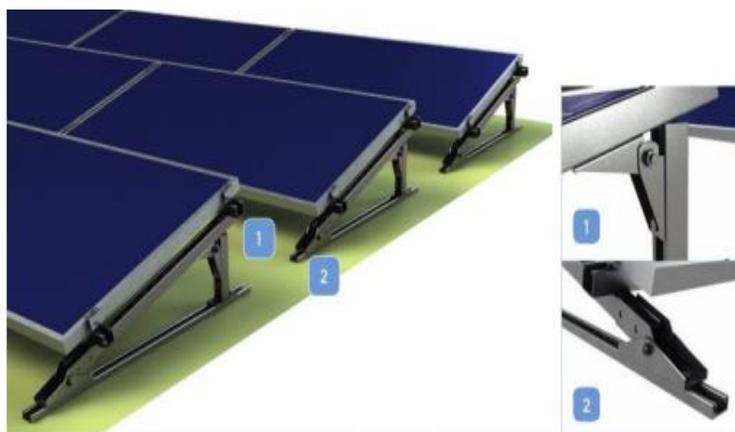
1.5.6. Generalidades de estructuras y soportes para paneles fotovoltaicos

Las instalaciones fotovoltaicas se clasifican según el entorno donde se las quiere implementar, por ejemplo, existen las propuestas de instalación en función del tipo de suelo, donde se evalúa la existencia de materia orgánica o inorgánica presente en el área de colocación de los soportes.

Debido a que la instalación de los generadores fotovoltaicos será en una cubierta, es decir en el techo del edificio STEM, la instalación es sin materia orgánica en cubierta, uno de los diseños más comunes de instalaciones de paneles es con una estructura triangular con ángulo fijo, obsérvese la figura 7.

Figura 7

Estructura instalada en cubierta plana.



Nota. Estructura con una sola placa instalada en cubierta plana (Quinteros Calzadia & Zelada Ramírez, 2018).

1.5.7. Normas y estándares para instalaciones eléctricas

Las presentes normas y estándares en la tabla 2, constituyen las condiciones y regulaciones que se deben efectuar al momento de realizar una instalación eléctrica para salvaguardar la seguridad de las personas y bienes materiales, se establecen normativas para

asegurar la calidad de la instalación, siendo aplicables para cualquier tipo de instalación de circuito eléctrico (Punina & Danilo, 2020).

Tabla 2

Normas y Estándares Nacionales e Internacionales.

CPE INEN 019 Código Eléctrico Ecuatoriano
IEE 60617 Graphical Symbols for Diagram
NTE INEN 2345 Alambres y cables con aislamiento termoplástico
NTE INEN 3098 Voltajes Normalizados

Nota. Norma ecuatoriana de la construcción NEC – Normas internacionales para Instalaciones Eléctricas (Punina & Danilo, 2020).

REGULACION Nro. ARCERNNR-001/2021

Directorio De La Agencia De Regulación Y Control De Energía Y Recursos Naturales

No Renovables.

Vida Útil: Bajo la Resolución Nro. ARCERNNR-013/2021, en la tabla No 2, para vidas útiles de tecnología de generación eléctrica, se establece que la vida útil para Fotovoltaica es de 25 años. El diseño del sistema fotovoltaico se establece con base a las condiciones de implementación y el cumplimiento de requisitos de la regulación Nro. ARCERNNE-001/2021, para la instalación de un sistema de micro generación Fotovoltaica μ SFV con una capacidad nominal instalada de 100 kW, puesto que el sistema que se está diseña tiene una capacidad nominal de 35.2kW, el cual se encuentra sincronizado con la red eléctrica, donde la producción del sistema es para autoconsumo y el excedente es enviado a la red de distribución .

El diseño se rigüe considerando el artículo 13 de Instalación, construcción de una SGDA, donde que toda la construcción de la obra civil y la instalación de equipos del SGDA son responsabilidad del consumidor, así mismo se considera de gran relevancia el Capítulo VI de Balance de energía, medición y facturación, donde el artículo 18.1, explica que:

Si la $ENET_i$, es menor o igual a cero, el valor de consumo que la distribuidora factura al consumidor es de 0, siendo el crédito a favor del consumidor obtenido en el mes i (kWh) igual al $ENET_i$, por otro lado, si el $ENET_i$ es mayor a o el CEM_i es 0. Por lo tanto, la distribuidora verifica si existe un saldo a favor acumulado que ayude a cubrir el $ENET_i$ del mes i (Agencia de Regulación y control de energía y recursos naturales no renovables, 2021).

Normas y estándares para la construcción de la estructura

El diseño de la estructura se realiza con referencia a la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-AC: Estructuras de Acero. Se toma en consideración el análisis de resistencia de fluencia y tracción de los tipos de aceros que se utilizan comúnmente en la construcción ecuatoriana, para los análisis de deflexión y pandeo de la estructura de soporte de los paneles fotovoltaico, considerándolo en los cálculos de flexión, cortante, deformación, pandeo y esfuerzos. Sin embargo, no se considera cálculo de determinación de cargas sísmicas, puesto que no es una construcción donde la estructura de acero diseñada, pesan más las columnas que el piso donde se va a instalar compuesto de tubos o losas (Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, 2023).

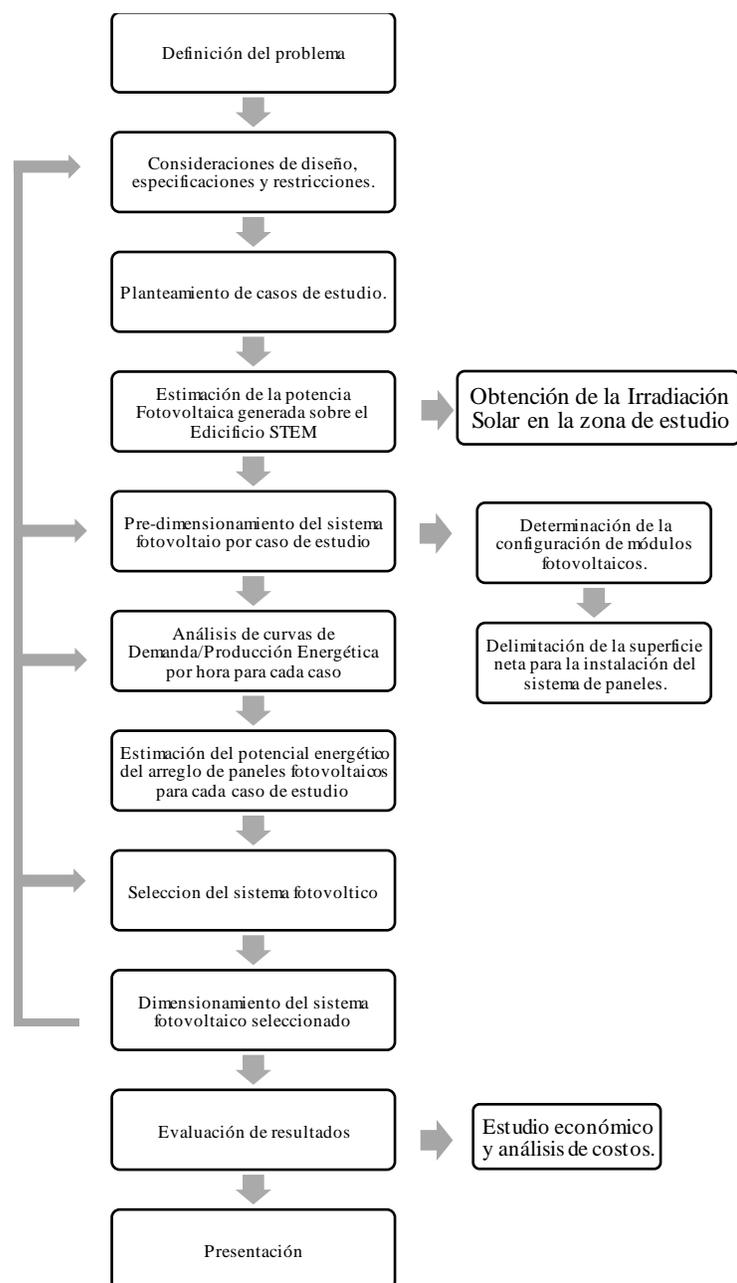
CAPÍTULO 2

2. Metodología para el Diseño de un sistema fotovoltaico

Para alcanzar una comprensión integral del sistema que se va a implementar fue necesario establecer un proceso adecuado de diseño, para ello el primer paso fue establecer un diagrama de flujo que resuma cada una de las partes del proceso y la metodología a emplear, véase en la figura 8.

Figura 8

Diagrama de flujo de las fases del proceso de diseño.



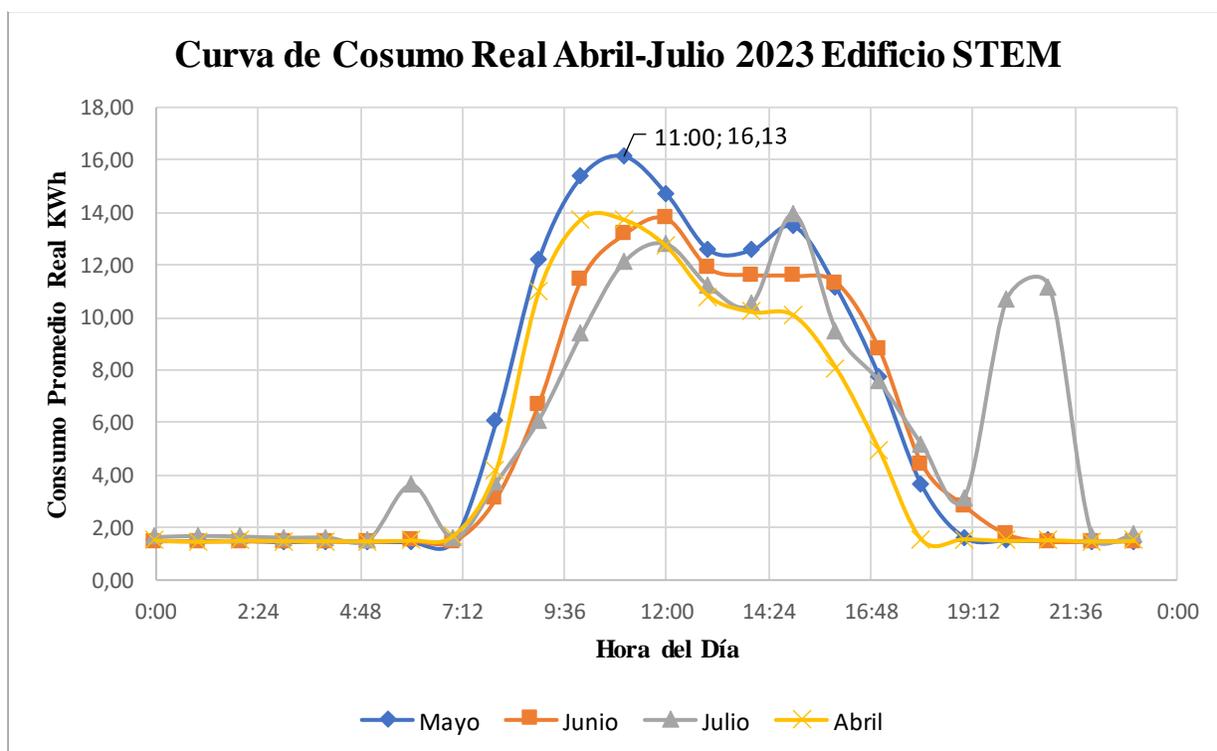
2.1.1. Consideraciones de diseño, especificaciones y restricciones

Una vez definido el problema, se procedió a establecer las condiciones de diseño, las especificaciones y los requisitos pertinentes. En este sentido, se seleccionaron los meses de estudio con el objetivo de identificar un período de máxima demanda energética para el edificio; dada su naturaleza como institución educativa, se determinó que el semestre académico representaba la temporada de mayor consumo energético. En consecuencia, se optó por analizar los meses de abril, mayo, junio y julio del año 2023.

Posteriormente, en la sección del apéndice A (véase la tabla A1), se presenta el consumo de potencia del edificio STEM durante las horas laborales mientras que en la figura 9 se muestran las curvas de consumo para los meses entre abril y julio.

Figura 9

Curva de consumo real de abril-Julio 2023 del edificio STEM.



Nota. Datos proporcionados por el Departamento del Programa de Sostenibilidad de la ESPOL.

En la tabla 3 se muestra que el mes con máxima demanda fue el de mayo, mientras que el menor pico dentro del máximo local es de julio, aquí se pudo observar que a las 3 de la tarde hay un pico que superó al de las 12 del día, puesto que en los demás meses no hubo valores elevados en ese horario se infirió que fue un caso fortuito denominándolo un dato aberrante; otra consideración fue conocer toda el área de superficie del edificio con la que se puede trabajar tentativamente, la cual es de 1218,79 m².

Tabla 3

Detalle de los picos de las curvas de consumo del Edificio STEM - ESPOL.

MES	HORA	KWh
ABRIL	10:00	13.74
MAYO	11:00	16.13
JUNIO	12:00	13.76
JULIO	15:00	13.93
	12:00	12.70

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se utilizó Pv-system, para el análisis de demanda/producción de energía eléctrica, pre-dimensionamiento y análisis económico se usó Excel, para el dimensionamiento de los soportes y para la estructura, Inventor.

2.1.2. Planteamiento de casos de estudio

Se analizaron tres casos:

1. Diseño de un sistema fotovoltaico que reduzca los gastos por consumo eléctrico del edificio STEM conectado a la Red eléctrica.
2. Diseño de un sistema fotovoltaico donde se utiliza toda el área superficial disponible.
3. Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo.

2.1.3. Estimación de la potencia fotovoltaica generada sobre el edificio STEM

Primero se obtuvieron los datos de radiación solar que se generan sobre el sector donde está ubicado el edificio; se obtuvo un reporte de GLOBAL SOLAR ATLAS generado el 28 de octubre del 2023, colocado en la sección de anexos, a continuación, en la figura 10, se detalla la estimación de la irradiación solar por hora desde las 06:00 del día hasta las 19:00 de la noche, que son las horas del día donde se expone el sol y existen niveles de radiación solar detectados entre el mes de enero y diciembre del 2023, sin embargo, solo se trabajó con los meses marcados en la figura.

Figura 10

Irradiación solar sobre el edificio STEM por hora de enero-diciembre 2023.

Average hourly profiles

Direct normal irradiation [Wh/m²]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6												
6 - 7	12	5	12	22	26	27	23	28	35	40	42	23
7 - 8	81	71	93	128	129	138	139	151	123	103	111	96
8 - 9	139	111	163	213	206	190	166	171	165	131	146	166
9 - 10	195	162	228	288	265	221	182	193	223	185	201	223
10 - 11	230	205	287	352	303	246	213	257	289	254	254	267
11 - 12	220	226	300	353	288	241	237	312	341	290	283	264
12 - 13	195	221	298	304	255	230	263	351	381	328	298	235
13 - 14	168	241	291	252	206	215	265	358	378	333	308	195
14 - 15	151	198	237	220	193	222	270	351	342	293	296	181
15 - 16	136	177	229	225	194	213	260	331	305	252	261	156
16 - 17	118	158	188	187	162	174	216	269	234	187	189	127
17 - 18	71	116	125	111	93	109	136	161	119	73	56	44
18 - 19		16	12	5		5		8				
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	1714	1907	2463	2660	2320	2231	2379	2941	2934	2469	2446	1976

Nota. Información obtenida de GLOBAL SOLAR ATLAS REPORT 2023.

2.1.4. Pre-dimensionamiento del Sistema fotovoltaico por cada caso

Selección del Panel Solar

En primer lugar, se realizó un proceso de selección con proveedores nacionales los cuales fueron HeliosEcuador, ProViento y Enercity; dentro de sus catálogos se seleccionó al panel: FV Yingli Solar YLM-J 3.0 PRO 550WP el cual corresponde a un panel con células

monocristalinas y cuyas características físicas y de operación se acoplan a las necesidades requeridas, obsérvese la tabla 4 a continuación y la tabla A1 en el apéndice A.

Tabla 4

Especificaciones del panel solar seleccionado

Panel: FV Yingli Solar YLM-J 3.0 PRO 550WP, helios-ecuador		
Eficiencia	21.09%	0,211
Área	2,58	m ²
Peso	28,2	Kg
Precio	215,00\$	c/u

Producción Energética de Paneles

Una vez conocidas las características físicas y de operación de los paneles, se requirió conocer la forma en que se iba a ejecutar el análisis de producción energética, para ello se utilizó la relación entre la radiación solar incidente G (W/m²), la eficiencia η y el área del panel solar (m²), tal como se indica en la ecuación 2.1

$$P_{salida} = G * \eta * A \quad (2.1)$$

Así pues, con esta ecuación se obtuvo la tabla A2 ubicada en apéndice A, la cual mostró la cantidad de potencia de salida que es capaz de producir uno solo de los paneles dependiendo el día y la hora que se desee. Con esto se determinó que las horas donde se produce mayor potencia energética es de 9:00 a 13:00 y en las mañanas entre las 11:00 y 12:00 está la hora de mayor producción energética para cada mes a excepción de julio, por lo tanto, el horario de aprovechamiento energético es de 9:00 a 16:00.

Numero de paneles fotovoltaico

Una vez obtenida la potencia que produce un solo panel, se realizó el cálculo correspondiente a la cantidad de paneles que harían falta para cubrir cierta demanda establecida, esto se consiguió con la razón entre la energía suplida con la energía de un solo panel, obsérvese la ecuación 2.2

$$N_p = \frac{\text{Energía Suplida}}{\text{Energía de un panel}} \quad (2.2)$$

Debido a la ecuación 1.1, se necesitó conocer la cantidad de energía que suplirán los paneles al edificio, en otras palabras, la demanda necesaria a cubrir, esto se encuentra en la curva de consumo en la gráfica 1; con estos valores se obtuvo el estimado de paneles, mostrado en el apéndice A tabla A3.

Con los resultados anteriores se calculó cuantos paneles se necesitan por hora para cubrir la demanda energía del edificio en su pico de consumo, estimando el número de paneles promedio por mes para abastecer energéticamente el STEM se identificó mayo con 100 paneles, y el mes con menor cantidad de paneles abril con 73 unidades.

Caso I: Diseño de un sistema fotovoltaico que reduzca los gastos por consumo eléctrico del edificio STEM conectado a la Red eléctrica

En este caso se propuso un sistema fotovoltaico que disminuyera los costos por consumo; considerando la estimación promedio de paneles necesarios calculados en la tabla A3 del apéndice A, se optó por trabajar con 75 paneles, debido a que, es un caso crítico que permitió cubrir la mínima cantidad de paneles que se demanda en todos los meses y así determinar cuál es el porcentaje de demanda/producción cubierta. Para lograr lo antes mencionado se tuvieron que graficar las curvas de producción fotovoltaica individuales junto con las curvas de consumo del STEM, de esta forma se pudo visualizar la cantidad de energía suplida en los diferentes meses y horas pico.

En virtud de ello, se determina la potencia producida por 75 paneles por hora en cada mes, utilizando la ecuación 2.3, siendo el producto de la potencia de salida del panel por la cantidad de paneles a colocar.

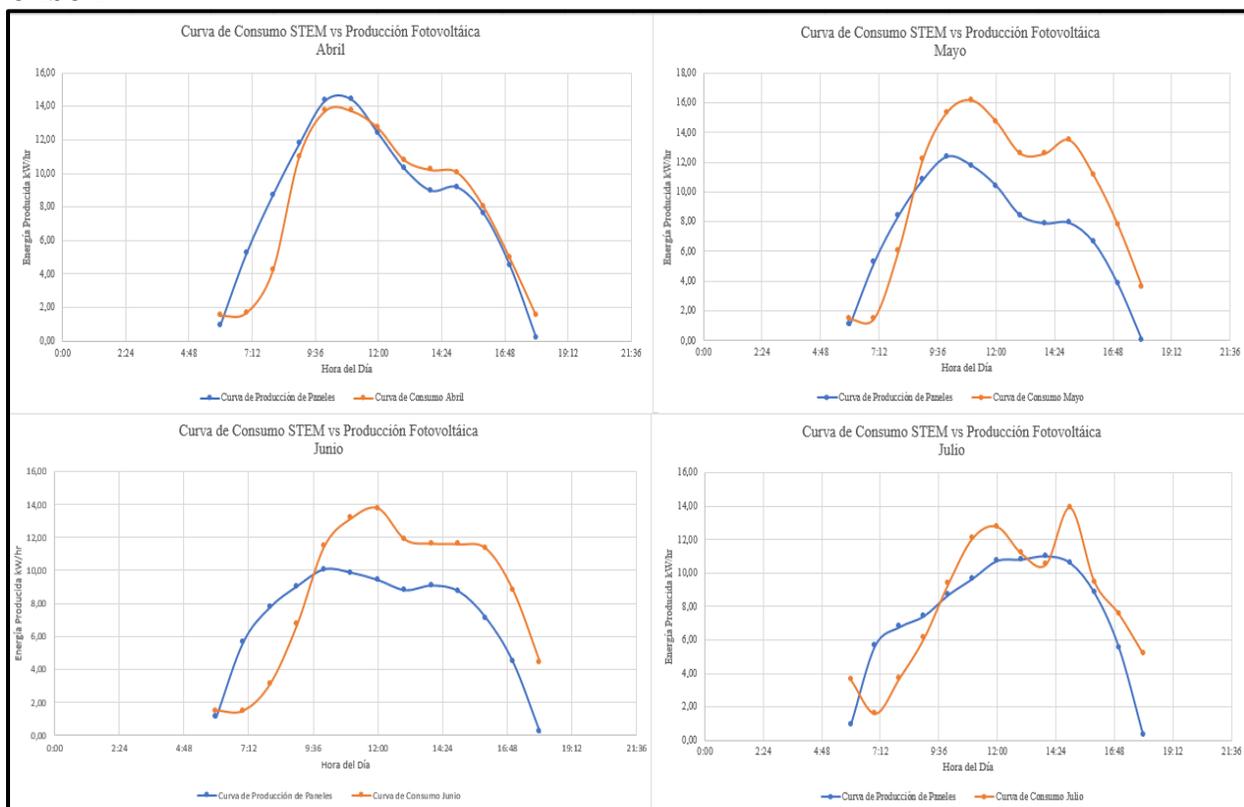
$$P_p = P_{Salida} \cdot N_p \quad (2.3)$$

Referente a lo planteado como caso crítico, se analizó la tabla A4 del apéndice A y se mostró que 75 paneles suple cierto porcentaje de la demanda incluso para el mes de mayo el cual es el de mayor consumo, siendo este porcentaje de 70,12%. Además, se realizaron curvas de consumo vs producción para observar de mejor manera lo que está sucediendo figura 11.

Se destacó el mes de abril con curvas superpuestas mientras que para el resto de los meses el promedio era de un 70% a 94% de alcance entre el consumo del edificio y la potencia generada. Lo anterior se explica debido a que, en el mes de abril aun no comienza del todo el periodo educativo, y por ende el mayor consumo.

Figura 11

Curvas de consumo del edificio STEM comparadas con las curvas de producción fotovoltaica – CASO I



Nota. La curva naranja muestra el consumo del STEM mientras que la azul la producción de los paneles.

Bajo este panorama, se obtiene cual es el porcentaje demanda/producción del primer caso, para esto se utiliza la ecuación 2.4.

$$\%D/P = \frac{P_p \cdot 100}{P_{consumo}} \quad (2.4)$$

Con la información anterior se elaboró la tabla A5 del apéndice A, la cual demostró las interpretaciones de los resultados obtenidos en las curvas de la figura 11 en base a los porcentajes de producción ahí mostrados; en cuanto al área a utilizar, la superficie ocupada por los paneles es de 193.5 m², además se considera un área entre el conjunto de los paneles para poder realizar futuros mantenimientos, la cual es de aproximadamente de 1.3 m.

De la misma forma se analizó el caso II y el caso III propuestos en el planteamiento de los casos de estudios, los cuales se encuentran desarrollados en el Apéndice A, con un respectiva comparativa de los resultados de cada caso en la tabla A10.

2.1.5. Selección del sistema fotovoltaico

En la tabla 5 se detalló los criterios de selección con su respectiva calificación del 1 al 3, siendo el 1 el nivel de menor favorecimiento y el 3 el de máximo favorecimiento, de modo que se puede entender la descripción de cada criterio y su escala de provecho.

Tabla 5
Descripción de los criterios de selección evaluados.

CRITERIOS DE SELECCIÓN	CALIFICACIÓN		
	1	2	3
EFICIENCIA/OPTIMIZACION	MAS DE 200 PANELES	ALREDEDOR DE 200 PANELES	MENOR 100 PANELES
CAPACIDAD DE PRODUCCION	MENOR A 100%	100% A 200%	MAYOR A 200%
COSTOS POR MANTENIMIENTO	\$ 1.000 A \$1.500	DE \$ 800 A \$ 500	\$500 A \$200
COSTOS DE DIMENSIONAMIENTO	\$ 25.000 A \$18.000	DE \$ 18.000 A \$ 11.000	\$11.000 A \$14.000
VIDA UTIL	10 AÑOS	15 AÑOS	20 AÑOS

En la tabla 5 se hizo una comparativa de cada caso, donde mediante ponderaciones, según su calificación se logró evaluar cual es el caso óptimo para la necesidad expuesta y se concluyó que el caso I es el que tiene mayor puntuación con 2,4 siendo el caso más favorable para la situación generada en este proyecto, lo cual se presenta en la tabla 6.

Tabla 6

Matriz de selección de alternativas.

MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS							
		CASO I		CASO II		CASO III	
CRITERIOS DE SELECCIÓN	PONDERACION	CALIF.	POND.	CALIF.	POND.	CALIF.	POND.
EFICIENCIA/OPTIMIZACION	0,2	3	0,6	1	0,2	3	0,4
CAPACIDAD DE PRODUCCION	0,2	1	0,2	3	0,6	2	0,4
COSTOS POR MANTENIMIENTO	0,2	3	0,6	1	0,2	2	0,4
COSTOS DE DIMENSIONAMIENTO	0,2	3	0,6	1	0,2	2	0,4
VIDA UTIL	0,2	2	0,6	3	0,6	2	0,6
		1	2,6			1,8	2,2

2.1.6. Dimensionamiento de la estructura del sistema fotovoltaico seleccionado

Como primer paso se procedió a tomar medidas del área donde se colocarán el conjunto de paneles; así pues, el techo resultó un área hueca y otra de losa como se indica en la figura 12, aquí se resalta dicha área de rojo siendo aproximadamente de 13.5 m de ancho mientras que el área de losa marcado en verde posee en su parte más angosta aproximadamente 1.3 m de longitud y 22 m en la zona más ancha.

Figura 12

Vista panorámica del área seleccionada para la colocación del sistema fotovoltaico.



Nota. Imágenes tomadas por el autor en el edificio STEM

Con la información anterior se estableció que, para poder colocar los soportes de los paneles solares, se debe instalar tubos que pasen por encima del área hueca en el techo, las cuales se van a sujetar a la losa y a los tubos que están por debajo del techo, estas tienen una separación 1.30 m cada una y en la parte curvada del diseño del techo 1.91 m, el grosor de cada tubo es de 10 cm, todo esto se observa en la figura 13.

Figura 13

Dimensiones entre tubos del edificio.



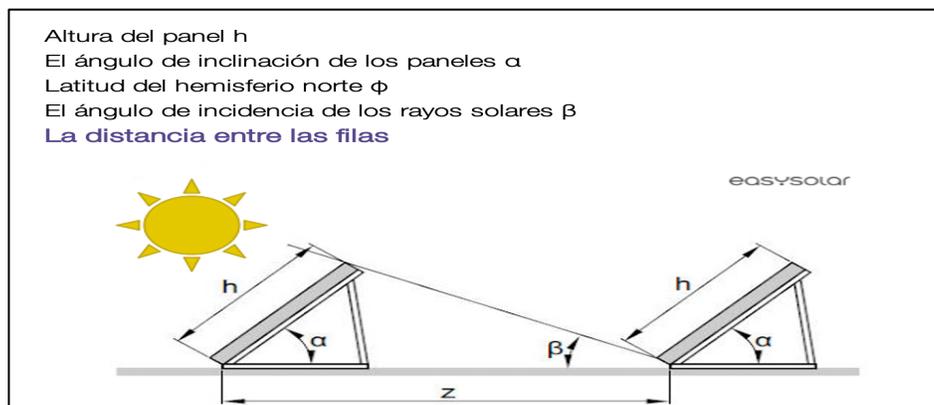
Diseño del soporte de los paneles fotovoltaicos

En primer lugar, se estableció de forma fija el ángulo de inclinación de los paneles y por ende la estructura también, por encima de los tubos se estableció que va a ir empernado los soportes de los paneles, cada soporte va a sostener un juego de cuatro paneles en columnas de cuatro, de esta forma para poder plasmar la idea de diseño se utilizó el programa Inventor, en el cual se detalla el soporte, y se obtuvieron los planos de la estructura. Véase en anexos, sección B.

Selección de Ángulo de inclinación, ángulo de incidencia y distancia mínima entre filas.

Figura 14

Diagrama de la ubicación de los ángulos de inclinación, incidencia y distancia mínima entre filas.



Nota. Imágenes producidas por la plataforma virtual EasySolar.

Angulo de inclinación

$$\alpha = 3.7 + 0.69(LATITUD) \quad (2.5)$$

$$\alpha = 3.7 + 0.69(-2.1435)$$

$$\alpha = 2.22^\circ$$

Sin embargo, se escogió un ángulo del 10° por factibilidad de mantenimiento, refrigeración y disminución de sombra entre paneles. De acuerdo con la ubicación geográfica del Ecuador, el

ángulo de inclinación no genera gran afectación en el rendimiento o pérdidas de producción incluso se puede llegar a un máximo de 12° de inclinación.

Angulo de incidencia

$$Z = h \cdot \left(\frac{\text{sen} \alpha}{\tan \beta} + \text{cos} \alpha \right) \quad (2.6)$$

Considerando la altura de los paneles 2.27 m y la distancia de diseño entre soportes 3.5 m.

Despejando y remplazando

$$3.5 = 2.27 \cdot \left(\frac{\text{sen} 10^\circ}{\tan \beta} + \text{cos} 10^\circ \right)$$

$$\tan \beta = 16.04^\circ$$

Por ende, la distancia mínima entre los soportes es de:

$$d_{\min} = Z - L \cos 10^\circ \quad (2.7)$$

$$d_{\min} = 1.26 \text{ m}$$

Análisis estructural del soporte

Como punto de partida se utilizó un análisis con simulación en condiciones estáticas de funcionamiento, además se empleó el método de elementos finitos para la simulación de los resultados, los parámetros de operación del mallado y material se muestran en la tabla B1 y B2 sección B de apéndices, de esta forma el análisis se dividió en:

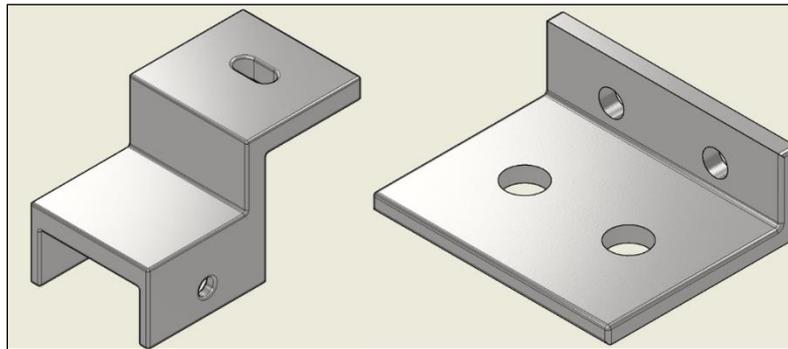
- Pines de Soporte
- Tubos
- Ensamble de los Soportes-Paneles
- Ensamble de la Estructura
- Pernos y Empotramientos

Pines Soporte. –

Los Pines son aquellos que sujetan los paneles solares al tubo y a la estructura soporte con forma triangular, estos se diseñaron en base a las medidas del panel solar seleccionado y se utilizó como materia prima el acero negro galvanizado debido a su resistencia a la corrosión.

Figura 15

Pines Panel Tubo (Izq.) y Panel Soporte (Drcha.)



Nota. Los planos de fabricación se encuentran en la sección B de apéndices.

Tubos.

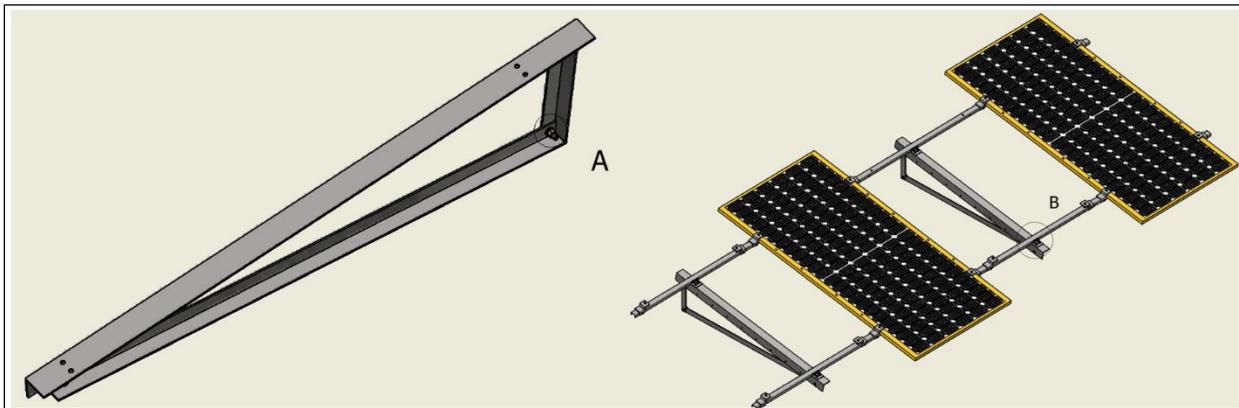
Para este caso la simulación se realizó con todos los elementos ya ensamblados puesto que el punto de selección y análisis viene de considerar una comparación entre el esfuerzo de Von Mises que soportan los tubos y el esfuerzo de fluencia para así evaluar si el material se fractura o se deforma con toda la carga encima.

Ensamble Soporte-Paneles.

Esta parte del diseño constó de dos ensambles con diseño simétrico puesto que esto se ajusta a las necesidades y limitaciones físicas del edificio, el primero de los ensambles fue la estructura triangular soporte de los paneles figura 16 y posteriormente su acople al techo del edificio por medio del pilar y las sujeciones pernadas. Luego se implementó el número de paneles previamente calculado por cada uno de los módulos véase figura 17.

Figura 16

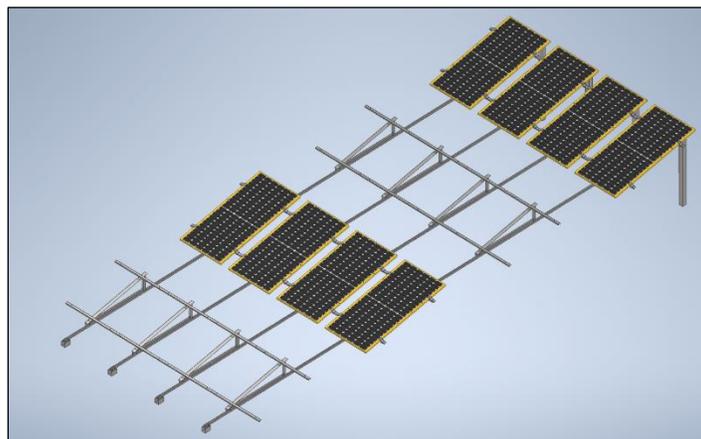
Estructura soporte triangular y su acoplamiento a los paneles



Nota. Los espacios vacíos también serán ocupados con grupos de paneles.

Figura 17

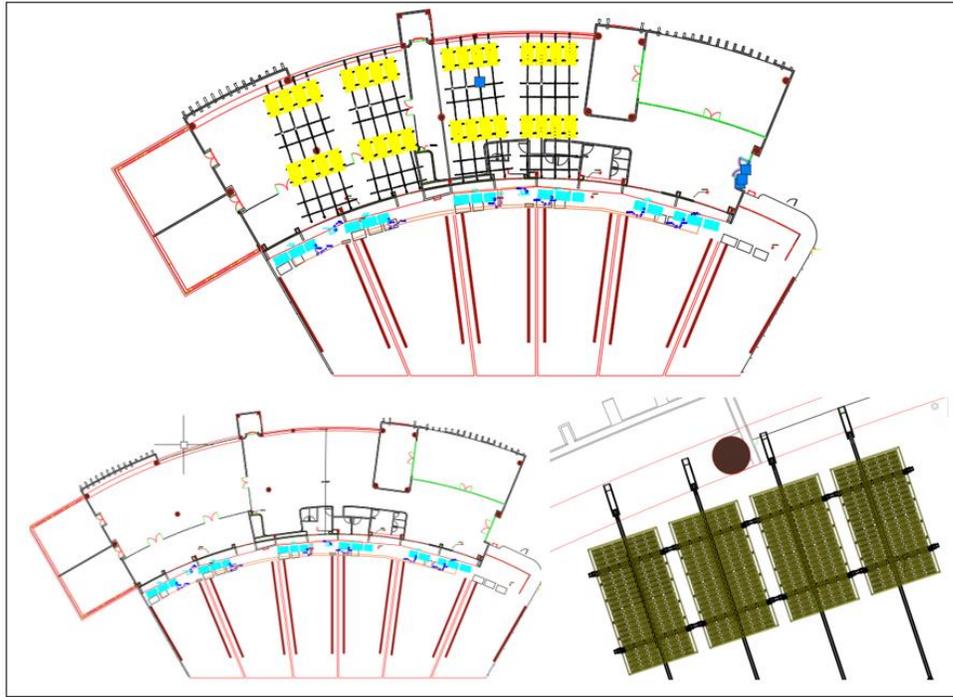
Módulos de 16 paneles para formar los grupos que completen la cantidad deseada.



Finalmente se realizó la modificación al plano original proporcionado por el cliente, agregando las nuevas unidades solares y la estructura observamos el nuevo aspecto en el software AutoCAD de la planta alta del STEM, obsérvese la figura18.

Figura 18

Módulos de 16 paneles para formar los grupos que completen la cantidad deseada



Nota. Los espacios en blanco dentro de la estructura soporte serán cubiertos con más paneles solares para completar grupos de 16.

Cálculos Representativos Pernos.

En el análisis de selección de pernos basado en el libro de Shigley's Mechanical Engineering Design, permitió seleccionar cual es el tipo de perno más apropiado para las uniones de la estructura, considerando como puntos de análisis las uniones donde mayor es la concentración de esfuerzos. De modo que, en el apéndice B en la sección de “Análisis del cálculo de selección de uniones roscadas – Pernos”, se establece el número de uniones, la fuerza resultante, los factores de carga y de seguridad, para el que es sometido el mínimo diámetro que se calculó del perno que se puede utilizar en la estructura. Por lo tanto, con base a lo considerado se procede a seleccionar un perno de un diámetro mayor al mínimo, siendo este de M10

CAPÍTULO 3

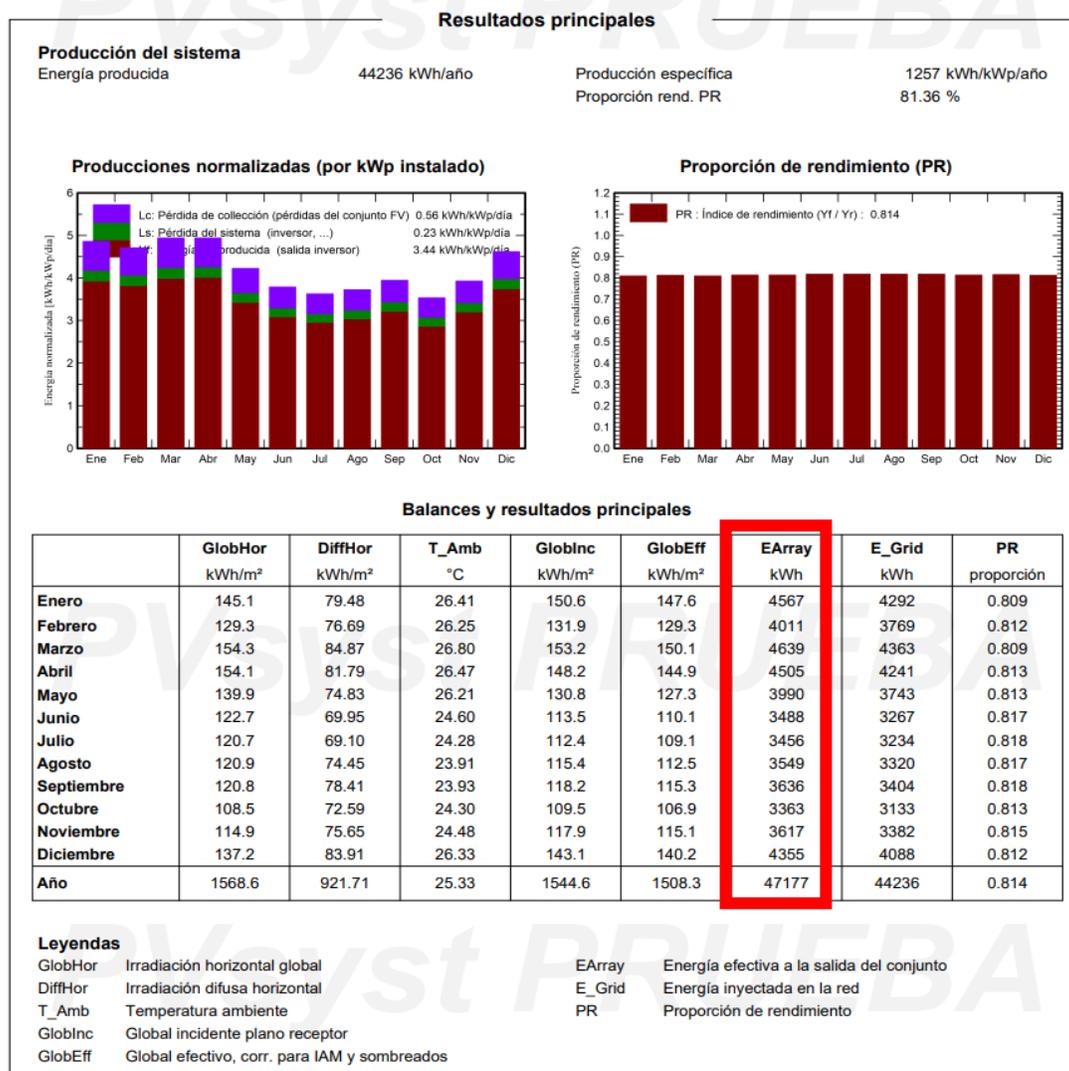
3. Resultados y análisis

3.1. Resultados del dimensionamiento del sistema Fotovoltaicos usando PV-SYSTEM

En la obtención de los resultados de la simulación en Pv- System del dimensionamiento del sistema, se utilizó un numero de 64 paneles, puesto que para el numero optimo escogido en el Pre-dimensionamiento de 75 paneles, según la simulación sobrepasa el 125% de producción, es decir se consideran ciertos niveles de pérdidas que van a ir directo a la red eléctrica véase la representación en la figura19.

Figura19

Resultados principales de la simulación del dimensionamiento de los paneles.

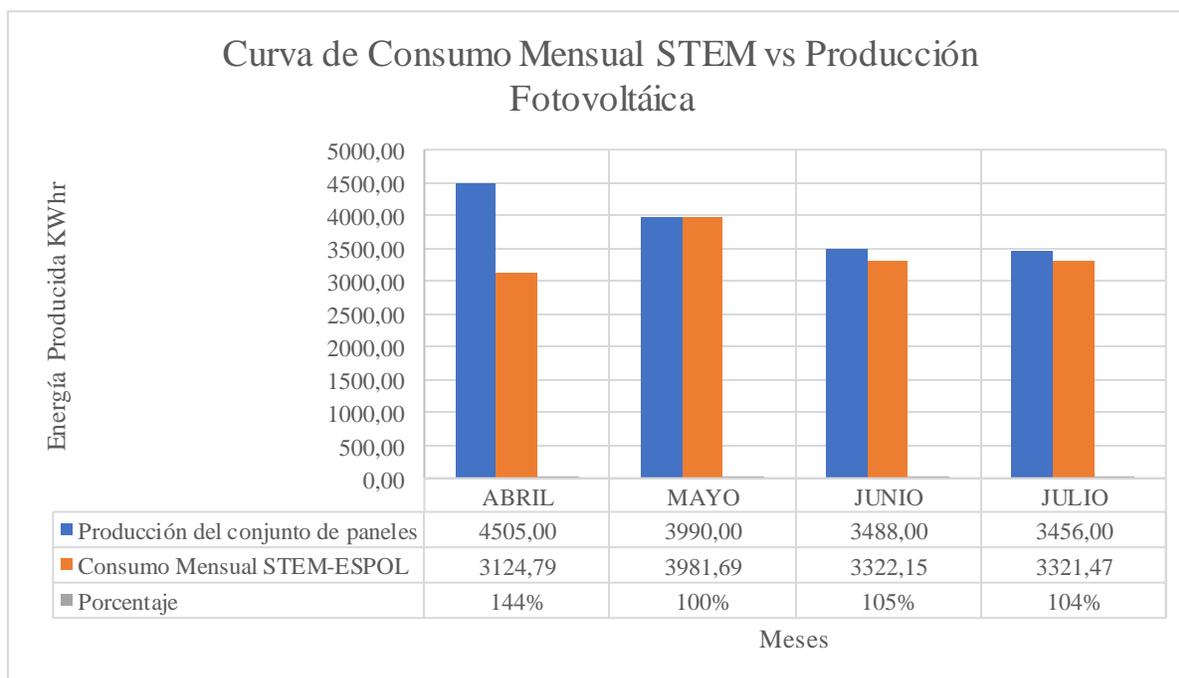


Esta diferencia con la simulación y el Pre-dimensionamiento se debió a los niveles de incidencia, puesto que, en el programa se tiene mediciones del 2016 hasta el 2021 y los valores de incidencia son el doble que en el reporte obtenido de Global Atlas que se utilizó para hacer el cálculo del Pre-dimensionamiento, así que es normal esperar que al momento de realizar la simulación del PV-SYSTEM, el número de paneles a utilizar para cubrir la demanda baje a la mitad.

Para corroborar esta hipótesis, en el análisis de la incidencia con respecto a la producción de energía eléctrica según el número de paneles, se probó en el Pre-dimensionamiento trabajar con la misma incidencia que utiliza el PV-SYSTEM, obteniendo los niveles de incidencia que causan esta variación, este análisis se encuentra de forma detallada en el Apéndice A. Por ende, se decidió trabajar con un número de paneles apropiado escogiendo 64 paneles, que tiene una proporción de rendimiento de 81.36%, y aproximadamente cubre un 100% en el caso más crítico como se muestra en la figura 20.

Figura 20

Curvas de consumo mensual del Edificio STEM-ESPOL vs producción fotovoltaica de un conjunto de 64 paneles según el programa PV-SYSTEM.



Ahora bien, se espera que, al instalar el sistema, baje su producción por pérdidas un 20% por variación de la irradiación y otros factores, por este motivo se opta por no disminuir la cantidad de paneles bajando a un 70% que es lo que se esperaba suplir como mínimo de la demanda, sin embargo, con la reducción del 20% por pérdidas incontrolables, se espera suplir con el número conjunto de 64 paneles alrededor de un 80%.

En la sección del apéndice C se encuentra el informe a detalle generado por el programa de simulación seleccionado PV-System, se muestran los parámetros generales, las características del generador y el inversor seleccionados, las pérdidas del conjunto, diagramas de pérdidas, unifilar y gráficos predefinidos de la potencia de salida del sistema.

Figura 21

Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico.

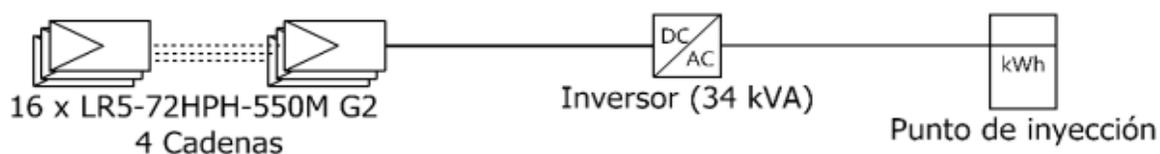


Figura 22

Características principales del sistema fotovoltaico.

Características del generador FV			
Módulo FV		Inversor	
Fabricante	Generic	Fabricante	Generic
Modelo	LR5-72HPH-550M G2	Modelo	Sinvert 40
(Base de datos PVsyst original)		(Base de datos PVsyst original)	
Unidad Nom. Potencia	550 Wp	Unidad Nom. Potencia	34.0 kWca
Número de módulos FV	64 unidades	Número de inversores	1 unidad
Nominal (STC)	35.2 kWp	Potencia total	34.0 kWca
Módulos	4 cadena x 16 En series	Voltaje de funcionamiento	450-750 V
En cond. de funcionam. (50°C)		Proporción Pnom (CC:CA)	1.04
Pmpp	32.2 kWp		
U mpp	605 V		
I mpp	53 A		
Potencia FV total		Potencia total del inversor	
Nominal (STC)	35 kWp	Potencia total	34 kWca
Total	64 módulos	Número de inversores	1 unidad
Área del módulo	165 m ²	Proporción Pnom	1.04
Área celular	153 m ²		

Resumen de resultados					
Energía producida	44236 kWh/año	Producción específica	1257 kWh/kWp/año	Proporción rend. PR	81.36 %

En base a las características establecidas presentadas en la figura 22, se selecciona un inversor que sea compatible a lo establecido en el dimensionamiento, para que cumpla con los resultados. De modo que se seleccionó el inversor On Grid Growatt MAC 36KTL3-XL con especificaciones técnicas similares que se muestra en el apéndice C.

Figura 23

Modelo del inversor On Grid Growatt MAC 36KTL3-XL.

Datasheet	MAC 15KTL3-XL	MAC 20KTL3-XL	MAC 22KTL3-XL	MAC 25KTL3-XL	MAC 30KTL3-XL	MAC 36KTL3-XL
Input Data(DC)						
Max. recommended PV power (for module STC)	19500W	26000W	28600W	32500W	39000W	46800W
Max.DC voltage	1100V					
Start voltage	250V					
Nominal voltage	360V					
MPP1 voltage range	200V-1000V					
No. of MPP trackers	3					
No. of PV strings per MPP tracker	4/4/4					
Max. input current per MPP tracker	46A/46A/46A					
Max. short-circuit current per MPP tracker	50A/50A/50A					
Output Data(AC)						
Rated AC output power	15000W	20000W	22000W	25000W	30000W	36000W
Max. AC apparent power	16600VA@220VAC	22200VA@220VAC	24400VA@220VAC	27800VA@220VAC	33300VA@220VAC	36000VA@220VAC 39200VA@240VAC
Nominal AC voltage (range*)	127V/220V(101.6-139.7V)					
AC grid frequency (range*)	50/60 Hz(46-54/56-64Hz)					
Nominal AC output current	39.4A	52.5A	57.7A	65.5A	78.8A	94.5A
Max. output current	43.6A	58.3A	64.0A	73.3A	87.4A	94.5A
Power factor(@nominal power)	>0.99					
Adjustable power factor	0.8leading ...0.8lagging					
THDi	<3%					
AC grid connection type	3W+N+PE					
Efficiency						
Max. efficiency	98.6%					
European efficiency	98.2%					

Nota. Especificaciones técnicas obtenidas del distribuidor (Auto Solar,2023).

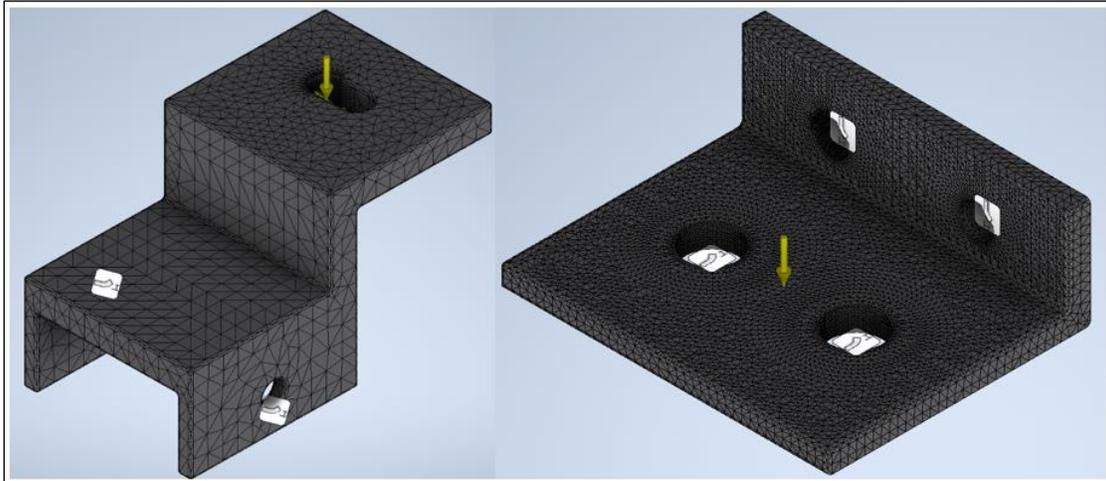
3.2.Resultados del dimensionamiento y Simulación

En primer lugar, se realizaron los planos generales de cada parte de la estructura, empezando por los pines del panel-tubo y panel-soporte, estos planos como el del resto de componentes se encuentran en apéndices sección B.

Continuando con el estudio de estos elementos se procedió a simular su comportamiento bajo las cargas de operación, para ello se realizó el cómputo bajo el método de elementos finitos como se observa en la figura 24.

Figura 24

Mallado de los pines de la estructura para simulación de esfuerzos y deformación

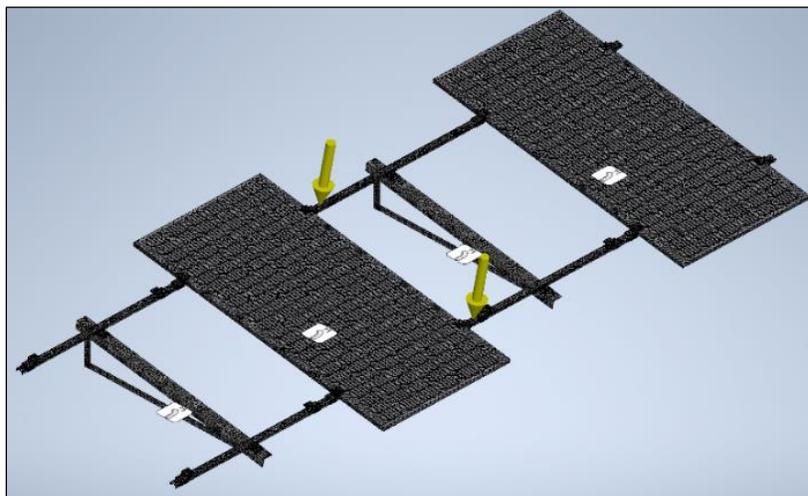


Nota. El tamaño del mallado se ajustó y redujo en las restricciones y zonas de carga para obtener una mayor precisión del cómputo.

El mismo proceso de simulación de los pines se realizó tanto para la estructura soporte considerando solo la carga del peso de los paneles y también a la estructura general que irá sobre el techo del edificio STEM, este análisis se realizó por partes con el objetivo de analizar de manera individual cada componente crítico del sistema soporte, esto se visualiza en la figura 25.

Figura 25

Mallado de los paneles y la estructura que los soporta

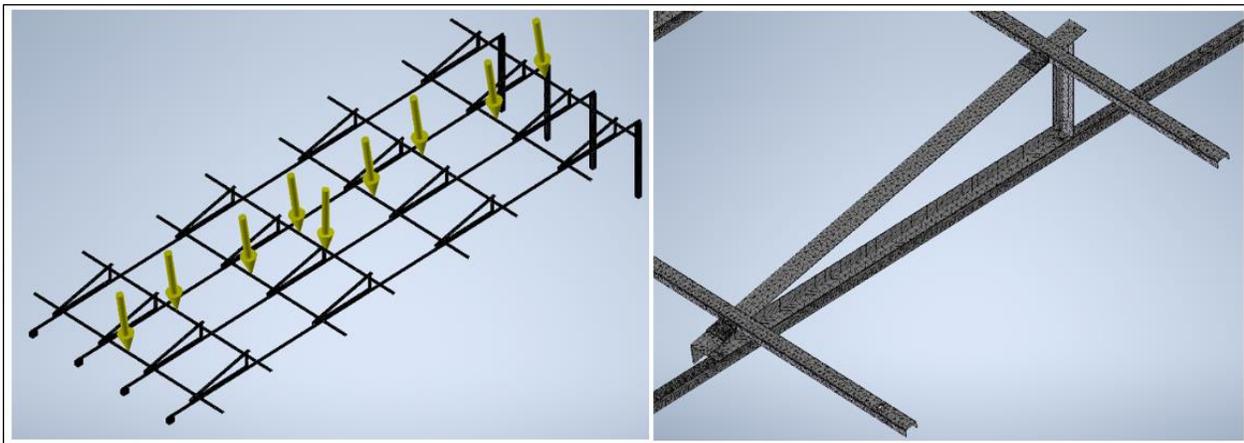


Nota. El computo se realizó sobre los tubos y la estructura que soportan los paneles por ende el mallado es más pequeño y difícil de visualizar.

Así pues, el último elemento a realizar simulación bajo el método de los elementos finitos fue la estructura soporte final que iba a ir sobre el techo del edificio STEM, esto para determinar si finalmente la propuesta realizada podría resistir la carga deseada y no se fractura o deforma más allá del rango deseado. Obsérvese la figura26.

Figura 26

Sistema de mallado y de fuerzas principales sobre la estructura de los 16 módulos de paneles.



Nota. Las cargas sobre los tubos es el resultante de considerar los paneles, aunque no se visualice en la imagen.

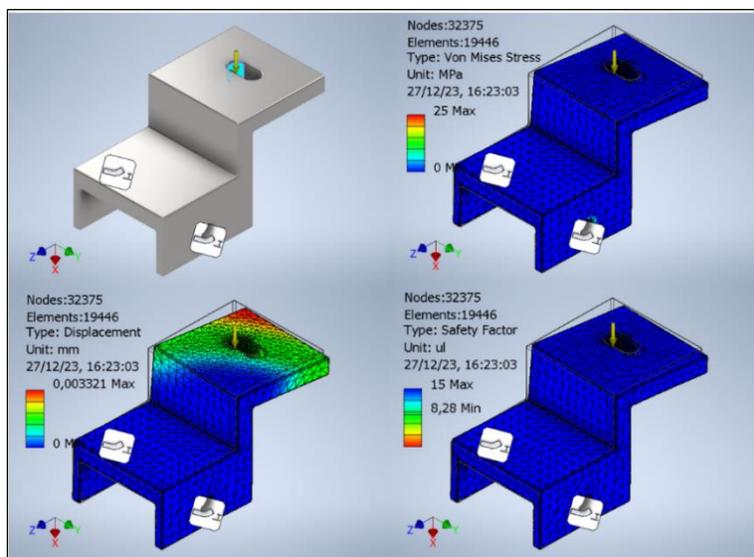
Una vez completado el mallado se simuló y analizó tres resultados característicos:

- Valores de Esfuerzo Von Mises.
- Deformación.
- Factor de Seguridad.

Con lo anterior mencionado se tabularon los resultados para cada uno de los componentes, el primero de ellos el pin que conecta los paneles con los tubos de la estructura soporte, gráficamente los tres valores evaluados se muestran en la figura 27.

Figura 27

Resultados de simulación para el pin soporte del panel solar.



Nota. Los resultados de la deformación (Lado inferior izq.) no son a escala y se magnifica para visualizar mejor la dirección del desplazamiento.

Observamos que tanto el esfuerzo, la deformación y el factor de seguridad no se mantuvo uniforme en todo el elemento, se obtuvo además que los principales esfuerzos se concentran en las restricciones de movimiento producto de las uniones pernadas; para poder comprender y analizar mejor estos efectos, se tabularon los principales resultados en la tabla 7 mostrada a continuación

Tabla 7

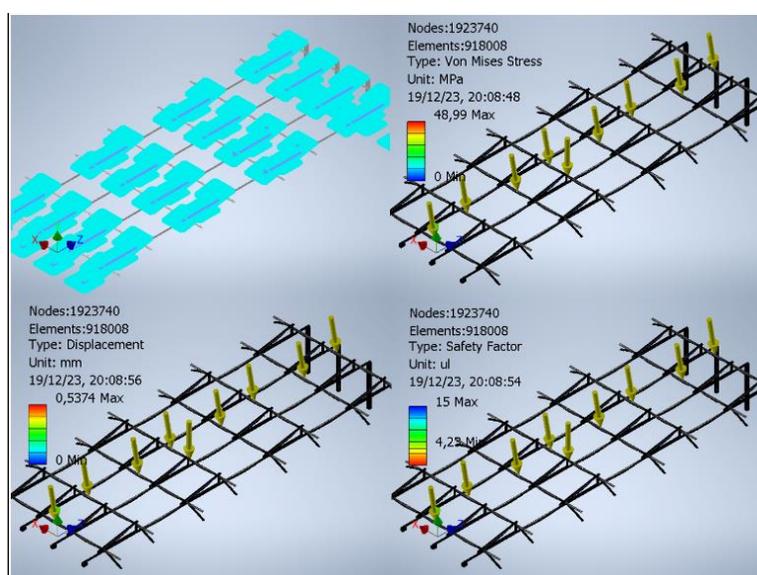
Principales resultados de simulación para los Pines Paneles-Tubo

	Mínimo	Máximo
Volumen		96097,6 mm ³
Masa		0,75 kg
Esfuerzo de Von Mises	0,00031 MPa	25,00 MPa
Deformación	0 mm	0,00332072 mm
Factor de Seguridad	8 ul	12 ul

Por otro lado, estos resultados también fueron obtenidos para el resto de los componentes de la estructura fotovoltaica, donde finalmente se pretendió analizar si cada módulo de 16 paneles se deformaba al punto de fractura o si la base que sostiene los paneles falla, para poder determinar estas conclusiones se muestra a continuación la figura 28 con los resultados de simulación.

Figura 28

Resultados de simulación para la estructura final con módulos fotovoltaicos.



Nota. La carga correspondiente al peso total de los módulos más la acción de la gravedad están representador por las flechas.

Así pues, al igual que en el elemento antes mostrado, los tres resultados característicos que se obtuvieron de esta simulación se muestran en la tabla 8 la cual corresponde a toda la estructura modular que irá montada sobre el techo del STEM, esta simulación contó para uno de solo de los 4 módulos totales, pero debido a la simetría de los modelos basta con un solo análisis.

Tabla 8

Principales resultados de simulación para la estructura final.

	Mínimo	Máximo
Volumen	50975800 mm ³	
Masa	400,16 kg	
Esfuerzo Von Mises	0,00000110727 MPa	48,9873 MPa
Deformación	0 mm	0,537412 mm
Factor de Seguridad	4,2u	15 u

Finalmente, se debió analizar estos resultados comparándolos con las materias primas de fabricación y así determinar si los elementos fallan o no, para ello se realizó la tabla 9

Tabla 9

Comparativa entre resultados obtenidos y propiedades del material de fabricación.

Propiedades Mecánicas	Acero Negro Galvanizado SAE J 403 1008		
Densidad	7,85 g/cm ³		
Esfuerzo de Fluencia	207 MPa		
Resistencia a la Tracción	345 MPa		
Módulo de Young	200 GPa		
Elemento	Esfuerzo Von Mises	Deformación	Factor de Seguridad
Pin Tubo Soporte	17,19 MPa	2,20mm	12
Pin Tubo Panel	25,00 MPa	0,003mm	8
Sistema Modular Soporte Panel	41,39 MPa	0,001mm	3
Módulos fotovoltaicos Completo	48,99 MPa	0.54 mm	4

Nota. Estos valores fueron ensayados en diferentes aceros, pero se optó por usar el mismo acero en toda la estructura.

Ahora bien, se analizaron los valores de esfuerzo de Von Mises de cada componente simulado y se comprobó que no superan el valor del esfuerzo de fluencia del acero negro, por ende, en ninguno de los casos la estructura cederá, es más, el valor del factor de seguridad es mayor a dos en el caso más crítico, por ende la estructura es capaz de aguantar más de tres veces su peso antes del fallo y por último, la deformación máxima se presenta en los soportes con un

valor de 2,2mm lo cual no supera la deformación plástica del material bajo esas tensiones y por ende también cumple con nuestros requerimiento de operación.

3.3.Resultado del Análisis Económico

En primer lugar, se calculó el precio de compra de cada elemento del sistema, tanto la parte fotovoltaica como el relacionado a la estructura y mano de obra, este valor fue de \$52.126,46 como gasto neto para la implementación del proyecto, después se calculó el gasto por mantenimiento y reparaciones anuales en \$519,20. Cabe destacar que todos los productos fueron cotizados en el mercado ecuatoriano a excepción del inversor On Grid que se encontró en el mercado colombiano con un arancel de importación de aproximadamente el 17% (jmurphy, 2015) a la fecha de elaboración de este documento, en la tabla C1 sección C de anexos se encuentra detallada la planilla de gastos para el proyecto, a continuación se muestra la tabla 10 de resumen de la tabla C1.

Tabla 10

Resumen de la estimación de presupuesto de costos de la implementación del sistema fotovoltaico diseñado

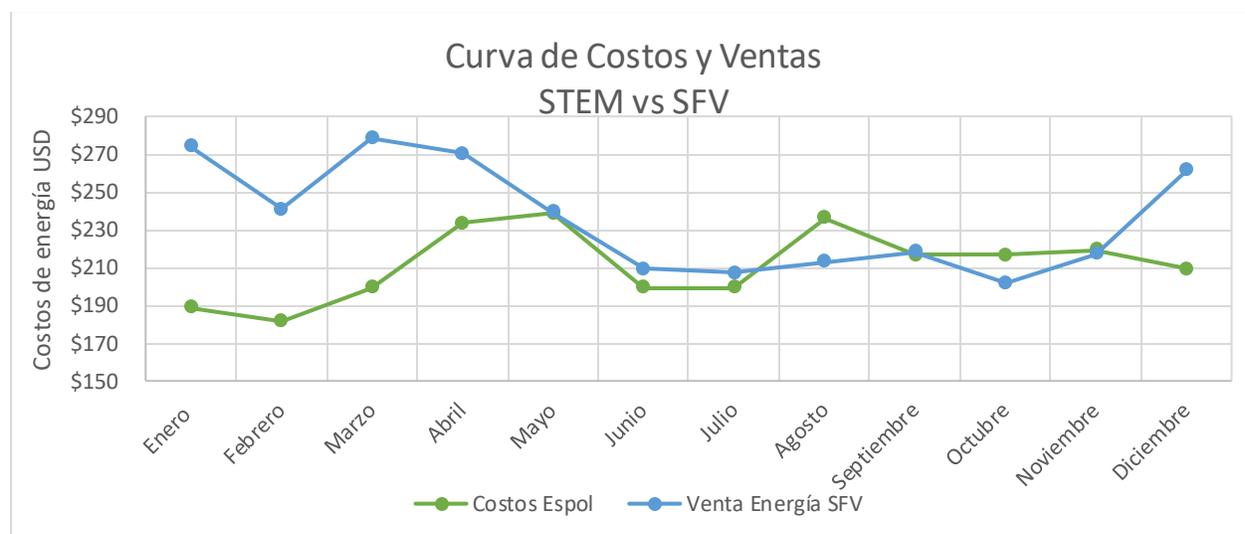
ESTIMACIÓN DE PRESUPUESTO DE COSTOS DE LA IMPLEMENTACION DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DISEÑADO	
Sistema Fotovoltaico	
Panel, Inversor, Conexiones y componentes eléctrico de la instalación, EPC transporte y almacenamiento.	\$ 23.153,92
Estructura de Tubos y Soportes	
Tubo de la estructura, Perfiles de los soportes de los paneles, Uniones roscadas, Soldadura, Mano de Obra, Contingencias y Costos adicionales	\$ 29.083,13

TOTAL, DE LA IMPLEMENTACION DEL SFV	\$	52.517,05
Costos por mantenimiento y reparaciones anuales	\$	469,20

Como segundo punto, se establecieron los parámetros de consumo sobre los cuales se regulará la producción energética del edificio, según la norma ecuatoriana el precio por consumo en KWh es de 10ctvs de dólar, sin embargo, al ser un edificio público se aplica subsidios que reducen el costo hasta los 6ctvs de dólar, con base a esto se relacionó la energía que produce el SFV y la consumida por el STEM con dicha tarifa para generar así la curva de costos y ventas que se muestran en la figura 29.

Figura 29

Curva comparativa entre el precio de la energía consumida y la producida por el nuevo SFV del edificio STEM.



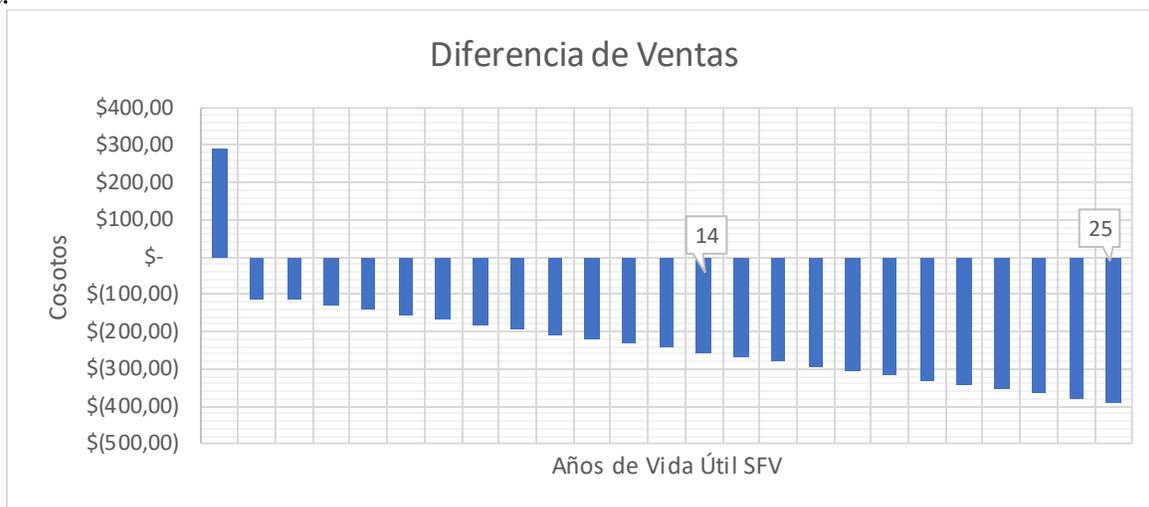
Del mismo modo, se analizaron las condiciones en que operaría el sistema al momento de cobrar los balances energéticos, debido al acuerdo de auto regulación mencionado en la resolución Nro. ARCERNR -001/2021 de la empresa pública ARCONEL que vuelve al sistema diseñado un proveedor de energía a la red pública, se determinó que la cantidad de energía producida por el SFV sería restada del consumo general del edificio dejando un saldo que sería multiplicado por la tarifa de consumo y así generar un balance anual.

Con lo anterior mencionado se generó la tabla C2 en la sección de anexos, en dicha tabla se determina que para el año 2023 el valor del consumo entre la energía producida y la consumida deja un saldo a favor de la ESPOL de \$292,85 lo cual representa dinero que la empresa no gastó ese año en electricidad, por otro lado el dinero que la empresa recuperó de la inversión para la implementación del SFV se determinó en base a la venta neta de la energía producida por la tarifa subsidiada, lo cual se muestra en la misma tabla C2 con un valor de \$2.830,56 que fueron recuperados del gasto general.

Con base a lo anterior mencionado se realizó el análisis económico para los 25 años de vida útil del SFV, para ello se tomó como referencia el mes de menor irradiación solar para determinar la producción anual de energía a la vez que se consideraron dos factores de pérdidas de 0,9953 para los primeros 12 años de funcionamiento y 0,9945 para los siguiente 13 años, esto en base datos proporcionados por el distribuidor del panel. Así pues, se generó la figura 30 que nos muestra la diferencia de ventas entre el consumo y la generación energética a lo largo de los 25 años de vida útil del sistema, destacando que al año 25 la diferencia entre el consumo y la producción es de casi 400\$ mientras que al segundo año es de poco más de 100\$.

Figura 30

Diferencia de ventas entre el consumo y la producción fotovoltaica a lo largo de 25 años de vida útil.



Ahora bien, una vez determinado el valor por diferencia de ventas en la energía se determinó el ahorro general del SFV, para ello fue necesario estimar valor de ingresos que se estaba generando en cada uno de los 25 años de producción, para ello se realizó el producto entre la tarifa subsidiada y la producción anual, luego con la diferencia entre el consumo se generó el flujo neto o ahorros anuales, esto se muestra en la tabla C3 en la sección de anexos donde además podemos estimar que el tiempo para que la inversión de los paneles se recupere es de 23 años aproximadamente, se debe enfatizar que este valor es una estimación basada en la producción del SFV en su caso más crítico con menos irradiancia a lo largo de una proyección de 25 años lo cual quiere decir que el tiempo real de recuperación de inversión sea inferior a los años antes planteados.

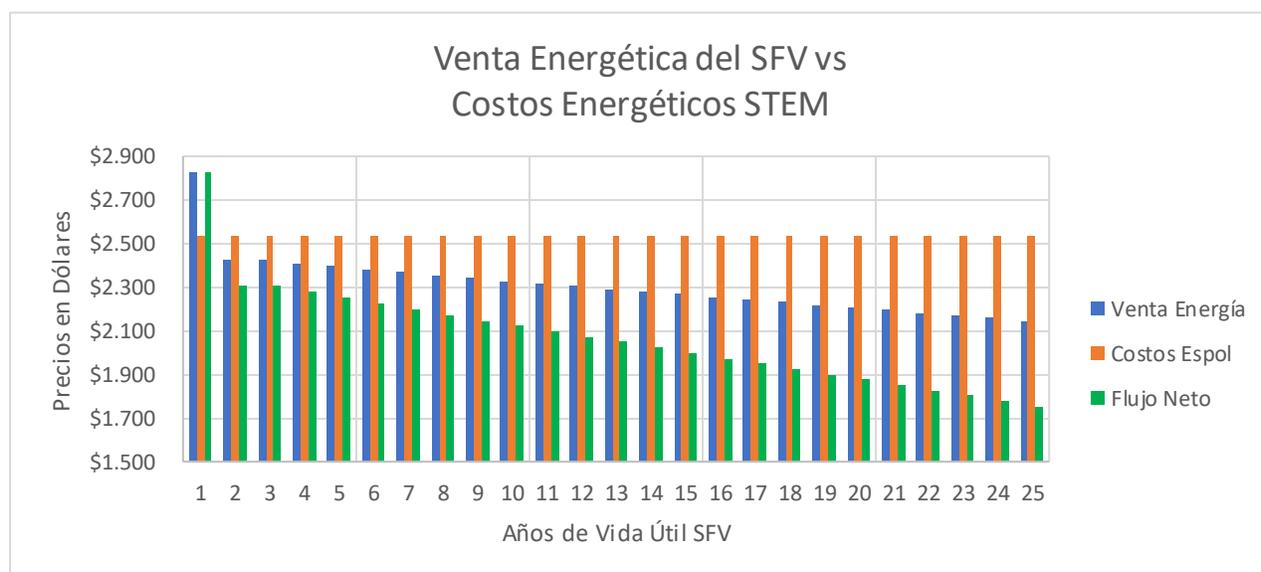
Como resultado de lo anterior, fue necesario hacer uso de herramientas que nos permitan evaluar la viabilidad del proyecto, para ello se utilizó el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa de Interna de Retorno (TIR) como medidas evaluadoras de la inversión y se tomó un factor de descuento del 12% adecuado a la región latinoamericana y a la generación eléctrica fotovoltaica según (Cedeño, 2020). Ambos valores también fueron generados en la tabla C3, para el caso del

TIR el resultado fue de 0% lo cual en términos analíticos nos muestra que el proyecto según las estimaciones realizadas no produce ni genera ganancias significativas, de modo que tanto la decisión de aceptar o rechazar la propuesta sería válida dentro del marco de la rentabilidad económica, por otra parte el VAN arrojó un valor actual neto de \$17.518,19 lo cual no es una cifra significativa para un periodo de 25 años, sin embargo tampoco resulta en una inversión que muestre pérdidas de capital.

Finalmente, con todos los análisis anteriores se graficó la figura 31 la cual muestra una comparativa entre la venta total de energía, los costos de consumo del STEM y el flujo neto o ingresos totales anuales estimados por el SFV. En perspectiva, el flujo neto para el 12avo año de funcionamiento alcanza aproximadamente el 84% de los costos de la ESPOL, mientras que no llega a ser mayor del 68% para el año 25, lo cual dentro de los parámetros planteados para el diseño del SFV satisface el objetivo de generar un sistema de apoyo energético para el edificio.

Figura 31

Gráfica de costos anuales de venta y producción de energía, así como los valores de flujo neto del SFV



CAPÍTULO 4

4. Conclusiones y Recomendaciones.

4.1. Conclusiones

- Se dimensionó el arreglo de módulos fotovoltaicos y la implicación del sistema fotovoltaico, tomando en consideración la incidencia solar, un análisis de Pre-dimensionamiento, el cual permitió direccionar el proyecto por el caso más adecuado de estudio de acuerdo con el objetivo general planteado de disminución de gastos por consumo eléctrico, de esta forma, se dimensionó simulando en PV-System el caso de diseño de una sistema de fotovoltaico conectado a la red eléctrica, basándose en las consideración de diseño, donde se concluyó diseñar el sistema fotovoltaico para un arreglo de 64 paneles de 550 Wp, agrupando 4 columnas por 4 filas de un juego de 4 paneles en serie por soporte, generando una potencia nominal de 35.2 KWp, con el cual se puede de forma ideal cubrir hasta el 100% de la demanda como mínimo, usando un caso crítico de cuando se hay mayor demanda pero la incidencia solar no es la más optima, es decir la energía fotovoltaica generado no es la máxima. Por ende, como existen perdidas al momento de implementarlo en la vida real se estima que el porcentaje de producción baje a un 80% como mínimo, cumpliendo con lo esperado en el Caso I del diseño del sistema fotovoltaico.
- Del análisis del total de módulos fotovoltaicos a implementarse junto con el área disponible en el techo se determinó que usar 4 módulos de 16 paneles distribuidos en dos pares a cada lado del tejado cumplirían con los objetivos de abastecimiento y dimensionamiento del área disponible donde cada módulo

ocupa un total de $75,6\text{m}^2$ con un valor general de $302,4\text{m}^2$ para ello, la elaboración del sistema constó de 64 tubos cuadradas que resistían el peso de la estructura al techo del edificio y 96 perfiles en L con los cuales se construyó el sistema de sujeción de los paneles a un ángulo de 10° según los criterios de diseño y una cotización de \$2.376,91. Con todo esto se generó una distribución de cargas simétricas de forma que las fuerzas que soporta el techo se encuentren de manera equilibrada a lo largo de la estructura cumpliendo así con la distribución eficiente de los paneles.

- Como parte de los resultados de las simulaciones se concluyó de manera general que el diseño no presentó esfuerzos ni cargas significativas para considerar un fallo estructural, como resumen se obtuvieron esfuerzos de Von Mises que variaban entre los 25, 42 y 49 MPa los cuales no sobrepasan el valor máximo del material de construcción en esfuerzo de fluencia, de manera que el sistema no se deforma elástica ni plásticamente y se generaron factores de seguridad de hasta 12 unidades, esto aplicó tanto para los elementos de sujeción de los paneles como de soporte de toda la estructura, con lo anterior mencionado se concluyó que la capacidad instalada y el arreglo modular cumplen con los criterios de diseño propuestos y deja una holgura en las limitaciones físicas para poder seguir mejorando el sistema.
- Las consideraciones de diseño al momento de utilizar una energía renovable como fuente de energía eléctrica en el Ecuador para autoconsumo, se fundamentó en las regulaciones de la agencia de regulación y control de energía y recursos naturales no renovables, de la regulación Nro.

ARCERNNE-001/2021 que resuelve el “Marco normativo de la generación distribuida para autoabastecimiento de consumidores reguladora de energía eléctrica”, teniendo como alcance de Micro generación fotovoltaica para una capacidad nominal instalada de 100kW, el cual se tiene como objetivo principal el autoabastecimiento y los excedentes inyectarlos a la red eléctrica, pero por motivos de estabilidad se implementa un balance de energía neto mensual por la distribuidora, inyectando todo a la red eléctrica.

- En cuanto a las consideraciones de la estructura, se apoyó en la Norma Ecuatoriana de construcción NEC-15, NEC-SE-AC: Estructuras de Acero, donde no se toman como consideración el análisis por cargas sísmicas, viento y lluvia, puesto que este tipo de consideración se utiliza cuando la estructura a diseñar de las columnas pesa más que la base de las tubos o losas donde se debe construir, además de que los normas y estándares del panel y el material seleccionado de la estructura están diseñados para estar a la intemperie y soportar lluvias haciendo la estructura resistente a agentes meteorológicos que podrían deteriorarla, en cuanto a las cargas por viento la altura a la que se encuentra ubicada la estructura y el alto de la misma, no requiere de ese estudio.
- La inversión se subdivide en las categorías de producción energética y diseño del sistema soporte, para el caso de la producción energética el costo fue de \$23.433,92 lo cual incluye el precio de los paneles, inversor, medidor bidireccional y componentes eléctricos, por otra parte, el costo estructural ascendió hasta los \$28.532,73 donde se incluye soldadura, mano de obra,

elementos como tubos, perfiles y elementos de fijación. El precio total de la inversión considera un valor de contingencia y costos adicionales según un porcentaje del precio de los módulos fotovoltaicos siendo un 20 % total, con esto el precio para la implementación neto del sistema fue de \$52.517,05.

Ahora bien, la estructura genera costos por mantenimiento a lo largo de toda su vida útil, este valor se estableció en \$469,20 anuales a lo largo de 25 años que durará la vida útil de los paneles. Así pues, a partir del 25avo año se podrá cambiar los paneles, pero mantener la estructura ahorrando costos en futuras inversiones cumpliendo así el criterio de diseño inteligente.

- Se alcanzó como energía de salida anual del Sistema fotovoltaico diseñado de 47.177,00 (KWh) el cual sobrepasa el consumo anual del edificio que se estimó de 42.295,25 KWh es decir suple la energía anual de consumo. De modo que, la comparativa mensual de consumo/producción, para el año 2023 de estudio, los consumos y la producción eléctrica generada, permiten que se reduzcan los costos de consumo, puesto que, al realizar una proyección por el tiempo de vida útil del Sistema de generación aplicado, sabiendo que la reducción de eficiencia del sistema en los primeros 12 años es del 0.47% y después de los 12 años se reduce a un 0,55%, es decir disminuyendo la producción por cada año y manteniendo los consumos, se espera que el proyecto recupere el valor de la inversión a los 23 años con un valor \$ 53.418,49.
- Se estudió la viabilidad del proyecto y que tan rentable es la inversión con respecto a los resultados económicos obtenidos, mediante el análisis y el

cálculo de la tasa interna de retorno TIR y el valor neto actual VAN, para la vida útil de un sistema de generación fotovoltaica, que es un periodo de 25 años, obteniendo el 0% en la TIR, es decir no genera pérdidas ni ganancias, es decir existe un riesgo de inversión, pero dado que se realizó el análisis considerando el caso más desfavorable y aun así este porcentaje no es menor a la tasa fija de descuento de Ecuador que es 12%, que significaría que el proyecto debe ser rechazado debido a su rendimiento en función del tiempo, en cuanto al VAN se obtuvo \$ 17.518,19, pero a pesar de no ser un valor de gran ganancia, la finalidad del proyecto es reducir los gastos de consumo energético, por lo tanto si se recupera la inversión y se tiene un valor de ganancia, a pesar de tener el caso más desfavorable.

- Con la estimación del capital de ahorro anual en toda la vida útil de los paneles se estimó que para el 23avo año se habrá producido suficiente energía para compensar la inversión inicial, de este resultado se concluyó que para el caso real, esta proyección de recuperación podría disminuirse debido a que se consideraron valores de irradiación solar críticos para el mes de menor producción anual del año 2023 y con esto se proyectó la generación energética a lo largo de 25 años, así pues, es de esperar que los valores reales incrementen la producción. Por otra parte, el hecho que la inversión se pueda recuperar representa que el diseño cumplió y sobrepasó los objetivos planteados de ser un sistema de soporte energético para el edificio STEM, de forma que se satisface la demanda energética del edificio, a la vez que se mejora la imagen pública de la universidad como pionera en la transición

hacia fuentes más sustentables de consumo energético logrando también reducir el impacto de la problemática de producción de energía del país en los momentos de crisis que está atravesando el Ecuador, dejando una guía que puede ser referencia y aplicada a cada uno de los edificios que conforman la universidad.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda revisar el sistema de distribución de los paneles, debido a que se puede reducir o aumentar el número de unidades y así cumplir en mayor o menor medida los objetivos planteados para este edificio, esta revisión se puede hacer con el fin de aplicarse a estructuras con un rango de consumo similar al STEM y así poder aplicar este proyecto a futuros trabajos.
- Al momento de generar los costos de la inversión se estableció que la ESPOL asumiría completamente los gastos dentro de su presupuesto, sin embargo, se recomienda profundizar más en esta parte del análisis económico puesto que la opción de realizar préstamos parciales a instituciones financieras podría mejorar los índices de desempeño económico del proyecto.
- Se recomienda establecer la planificación de mantenimiento preventivo 2 veces al año al iniciar el proyecto y hasta el 3er año de producción, en los años siguientes establecer periodos de 3 a 4 meses hasta completar los 25 años de vida útil de los paneles.
- Se debe considerar realizar una limpieza de los paneles cada semana para evitar la acumulación de polvo o residuos orgánicos producto de la presencia de animales en el sector universitario.

- Para determinar la distribución más óptima de los paneles de acuerdo con los límites físicos del techo del STEM se realizaron análisis y cálculos basados en estas restricciones, sin embargo, se recomienda solicitar el apoyo de otras áreas de la ingeniería como lo son la civil para así buscar una mejor propuesta que incluya modificaciones estructurales que formen las bases no solo para este sino para futuros proyectos de generación energética.

REFERENCIAS

- Abella, M. A. (2001). *Sistemas Fotovoltaicos. Introduccion al diseño y Dimensionamiento*. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y tecnológicas., Energías Renovables. Madrid: SAPT de Publicaciones Técnicas. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38373658/SISTEMAS_FOTOVOLTAICOS-libre.pdf?1438653204=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSistemas_fotovoltaicos_Sistemas_Fotovolt.pdf&Expires=1697531692&Signature=cxMW2MBzHPVc2h0Pv3GCp7pRfGzeTwTfxv73ksyn
- Agencia de Regulacion y control de energía y recursos naturales no renovables. (2021). *Resolución Nro. ARCERNNR-013/2021*. Obtenido de https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/06/res_nro__arcernnr-013-2021.pdf
- Aguirre, J. (2013). *Las celdas solares como alternativa pedagógica en la enseñanza de la electricidad*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Bogotá. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/75094/01186700.2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cedeño, D. A. (2020). *Techno-economic analysis and optimization of a hybrid solar geothermal power plant integrated with a desalination system*. . QUEENSLAND: THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND.
- Horikoshi, I. (Septiembre de 2009). *Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a red*. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid. Obtenido de Universidad Carlos III de Madrid: file:///C:/Users/kchav/Documents/10S%20-%20FINAL%20AL%20FIN/Inv%20tesis/PFC_Iyo_Horikoshi.pdf
- Muñoz, F. (2021). *Propuesta de iluminación tipo LED y diseño de sistema*. Universidad de PIURA, Piura. Obtenido de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4861/IME_2101.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC. (2023). *GUÍAS PRÁCTICAS DE DISEÑO DE CONFORMIDAD CON LA NEC – 15*. Obtenido de

<https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>

Punina, D. D. (2020). *Implementación de un sistema fotovoltaico, para abastecer el circuito de iluminación de un vivienda en la ciudad de Puyo de la provincia de Pastaza*. Universidad de las Fuerza Armadas (ESPE), Eléctrica y Electrónica. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/25814/M-ESPEL-ENT-0194.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Ramirez, J. R. (2018). *NORMA TÉCNICA DE DISEÑO, SEGURIDAD Y OPERACIÓN DE INSTALACIONES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA CON TECNOLOGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA DE HASTA 100 kW*. Universidad de el Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Obtenido de <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/19172/1/Norma%20T%C3%A9cnica%20de%20Dise%C3%B1o,%20Seguridad%20y%20Operaci%C3%B3n%20de%20Instalaciones%20de%20Generaci%C3%B3n%20de%20Energ%C3%ADa%20con%20Tecnolog%C3%ADa%20Solar%20Fotovoltaica%20de%20hasta%20100%20kW.pdf>

APÉNDICES

APÉNDICE A

Análisis y tablas de los casos del Pre-dimensionamiento.

Tablas del Caso I

A continuación, se muestra la tabla de consumo promedio por hora del edificio STEM de la ESPOL entre los meses de abril y julio.

Tabla A1

Consumo de Potencia de Abril-Julio 2023 del edificio STEM

	Consumo STEM KWh			
	Apr	May	Jun	Jul
6-7	1,51	1,44	1,49	3,62
7-8	1,69	1,49	1,48	1,60
8-9	4,21	6,04	3,11	3,73
9-10	10,98	12,20	6,71	6,10
10-11	13,74	15,36	11,43	9,36
11-12	13,72	16,13	13,15	12,10
12-13	12,70	14,71	13,76	12,79
13-14	10,80	12,56	11,86	11,18
14-15	10,21	12,56	11,62	10,52
15-16	10,07	13,47	11,58	13,93
16-17	8,04	11,11	11,32	9,47
17-18	4,96	7,77	8,80	7,57
18-19	1,53	3,61	4,43	5,17
Sum	104,16	128,4	110,7	107,1

Notas. Datos proporcionados por el Departamento del Programa de Sostenibilidad de la ESPOL.

De la misma forma, en la **tabla 6** se observa la cantidad de energía producida por un a panel a determinadas horas del día.

Tabla A 2*Potencia de salida por hora del panel seleccionado.*

	Potencia Producida por el Panel [W/h]			
	Apr	May	Jun	Jul
6-7	11,98	14,15	14,70	12,52
7-8	69,68	70,23	75,12	75,67
8-9	115,95	112,14	103,43	90,37
9-10	156,78	144,26	120,31	99,08
10-11	191,62	164,95	133,92	115,95
11-12	192,17	156,78	131,20	129,02
12-13	165,49	138,82	125,21	143,17
13-14	137,18	112,14	117,04	144,26
14-15	119,76	105,07	120,85	146,98
15-16	122,49	105,61	115,95	141,54
16-17	101,80	88,19	94,72	117,59
17-18	60,43	50,63	59,34	74,04
18-19	2,72		2,72	3,81
Sum	1448,05	1262,96	1214,51	1293,99

Nota. Valores obtenidos con la radiación promedio de la figura 9

La tabla a continuación es el resultado de estimar la potencia producida por 75 paneles solares bajo las condiciones de irradiancia descritos en capítulos anteriores.

Tabla A 3*Cantidad de paneles necesarios para cubrir la demanda del edificio STEM*

	Número de Paneles Promedio			
	Apr	May	Jun	Jul
6-7	125,84	101,86	101,37	288,84
7-8	24,31	21,25	19,65	21,15
8-9	36,29	53,90	30,11	41,23
9-10	70,06	84,58	55,76	61,55
10-11	71,71	93,10	85,38	80,73
11-12	71,41	102,91	100,22	93,82
12-13	76,76	105,93	109,91	89,34
13-14	78,70	111,98	101,33	77,52
14-15	85,24	119,52	96,11	71,60
15-16	82,19	127,53	99,86	98,44
16-17	78,95	125,98	119,51	80,52
17-18	82,07	153,40	148,30	102,20
Sum	73,63	100,2	88,96	92,25
General	75	100	89	93

Nota: Es imprescindible que el número de paneles solares se haya redondeado al extremo superior para suplir la mayor demanda.

Para el análisis del primer caso fue necesario realizar la tabla 8 la cual muestra la potencia que produce el estimado de 75 paneles.

Tabla A 4

Potencia producida por 75 paneles [KWh] - CASO I.

Potencia Producida por 75 Paneles [KWh]				
	Apr	May	Jun	Jul
6-7	0,90	1,06	1,10	0,94
7-8	5,23	5,27	5,63	5,68
8-9	8,70	8,41	7,76	6,78
9-10	11,76	10,82	9,02	7,43
10-11	14,37	12,37	10,04	8,70
11-12	14,41	11,76	9,84	9,68
12-13	12,41	10,41	9,39	10,74
13-14	10,29	8,41	8,78	10,82
14-15	8,98	7,88	9,06	11,02
15-16	9,19	7,92	8,70	10,62
16-17	7,63	6,61	7,10	8,82
17-18	4,53	3,80	4,45	5,55
18-19	0,20	0,00	0,20	0,29
Sum	108,60	94,72	91,09	97,05

Finalmente, para culminar con el análisis del primer caso se estableció el porcentaje de energía cubierta por el sistema fotovoltaico con énfasis en las horas pico y de mayor demanda previamente establecidas, obsérvese la tabla 9.

Tabla A 5*Valores porcentuales de demanda cubierta por el sistema fotovoltaico – CASO I*

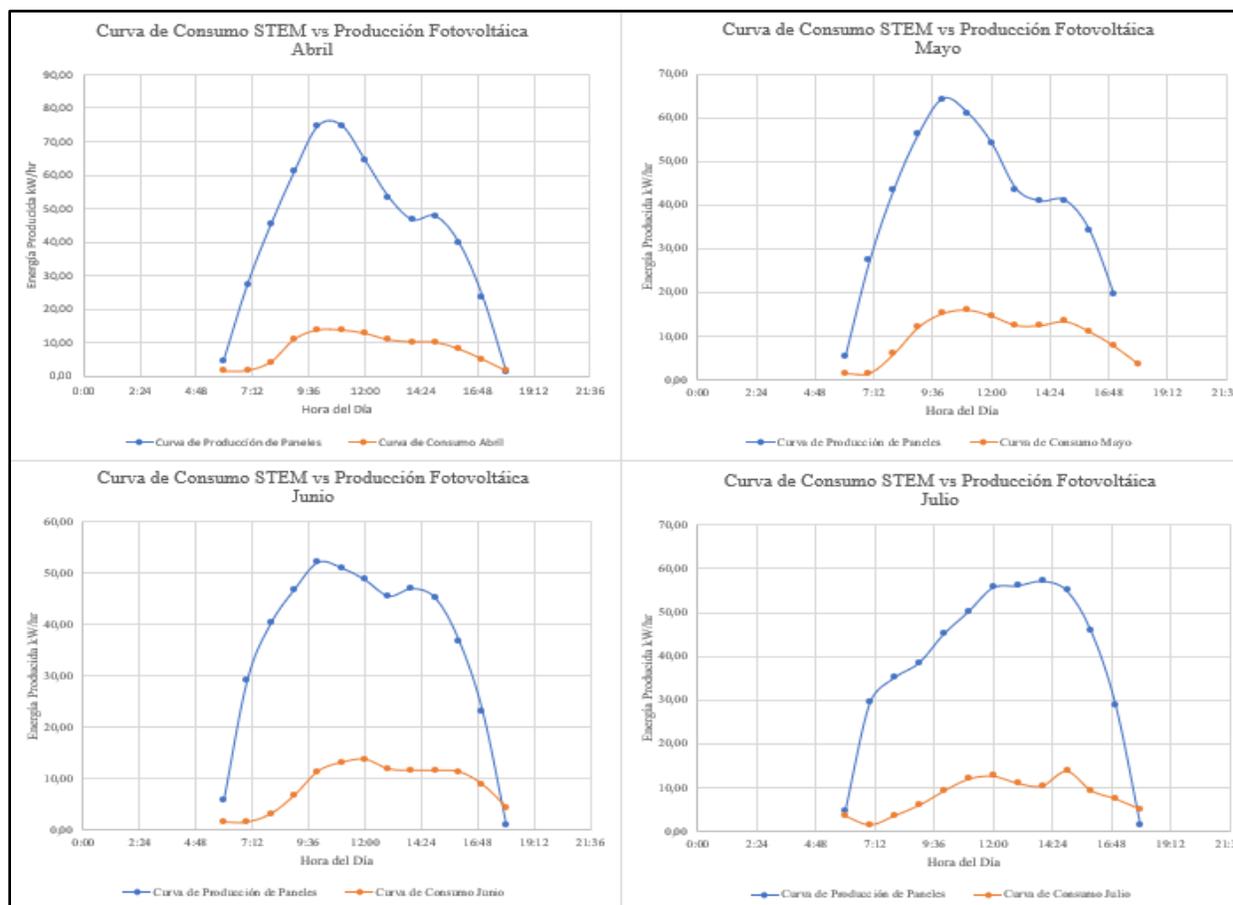
Porcentaje de Demanda-Producción				
	Apr	May	Jun	Jul
6-7	59,60%	73,63%	73,99%	25,97%
7-8	308,56%	353,01%	381,59%	354,56%
8-9	206,69%	139,16%	249,05%	181,92%
9-10	107,05%	88,68%	134,51%	121,84%
10-11	104,58%	80,56%	87,84%	92,90%
11-12	105,03%	72,88%	74,83%	79,94%
12-13	97,70%	70,80%	68,24%	83,95%
13-14	95,30%	66,98%	74,01%	96,75%
14-15	87,99%	62,75%	78,03%	104,75%
15-16	91,25%	58,81%	75,10%	76,19%
16-17	95,00%	59,53%	62,76%	93,15%
17-18	91,38%	48,89%	50,57%	73,38%
18-19	13,32%	0,00%	4,61%	5,53%
Porcentaje de demanda cubierta en horas pico	97,99%	70,12%	81,92%	93,68%

Nota. Los valores fueron promediados en base a la tabla de consumo del edificio STEM tomando las horas pico de mayor consumo que fueron mencionadas previamente en este informe.

Caso II: Diseño de un sistema fotovoltaico donde se utiliza toda el área superficial disponible

Figura A 1

Curvas de consumo del edificio STEM comparadas con las curvas de producción fotovoltaica – CASO I



Para este caso, con referencia al área disponible y el área de cada panel se estima que aproximadamente, se logra colocar 388 paneles sin perder área para realizar mantenimiento y movilidad entre los paneles. De modo que, se realiza el análisis de Producción/Demanda de lo que generarían los 388 paneles y la demanda a cubrir del edificio, y se puede observar en la figura 11 como el nivel de producción de energía eléctrica, sobrepasa en todos los meses, llegando a un rango de 50 KWh hasta los 75 KWh, puesto que el máximo nivel de demanda es aproximadamente de 16 KWh, es decir los porcentajes de abastecimiento sobrepasan el 300%, llegando los 500% como se puede observar en la tabla A6.

Tabla A 6*Potencia producida por 388 paneles [KWh] - CASO II.*

Potencia Producida por 388 Paneles [KWh]				
	Apr	May	Jun	Jul
7-8	27,14	27,35	29,26	29,47
8-9	45,16	43,67	40,28	35,19
9-10	61,06	56,18	46,85	38,58
10-11	74,62	64,24	52,15	45,16
11-12	74,84	61,06	51,09	50,24
12-13	64,45	54,06	48,76	55,76
13-14	53,42	43,67	45,58	56,18
14-15	46,64	40,92	47,06	57,24
15-16	47,70	41,13	45,16	55,12
16-17	39,64	34,34	36,89	45,79
17-18	23,53	19,72	23,11	28,83
Sum	563,92	491,84	472,97	503,92

Se presenta el mismo análisis del caso I para el caso II en el cual se utiliza toda el área disponible teniendo una instalación de 388 paneles, para observar en la tabla A7 la tendencia de la producción de potencia.

Tabla A 7*Valores porcentuales de demanda cubierta por el sistema fotovoltaico - CASO II*

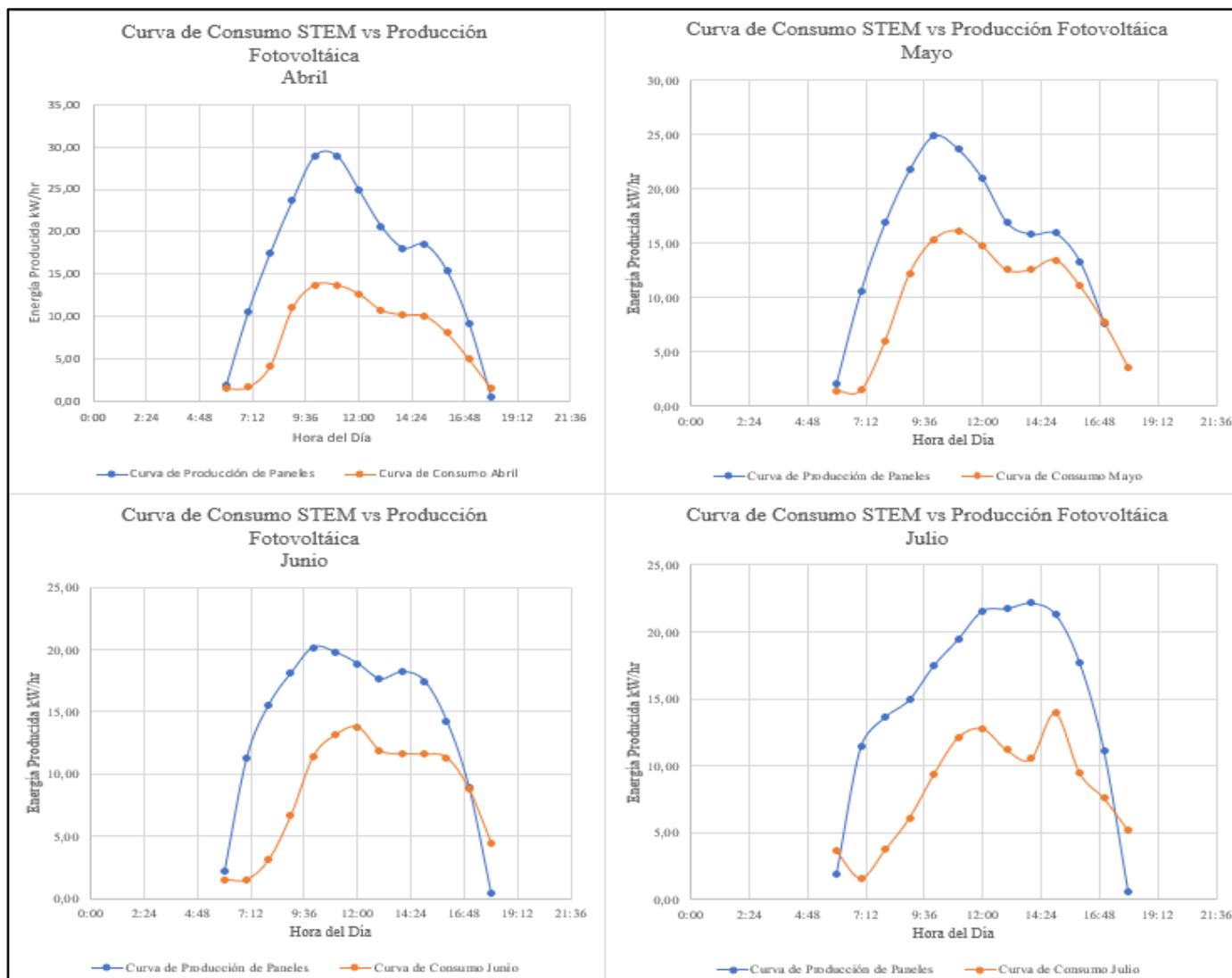
Porcentaje de Demanda-Producción				
	Apr	May	Jun	Jul
7-8	1602,17%	1832,98%	1981,40%	1841,04%
8-9	1073,23%	722,56%	1293,19%	944,63%
9-10	555,87%	460,45%	698,41%	632,67%
10-11	543,05%	418,28%	456,10%	482,37%
11-12	545,37%	378,42%	388,57%	415,08%
12-13	507,32%	367,62%	354,33%	435,91%
13-14	494,85%	347,77%	384,31%	502,36%
14-15	456,89%	325,84%	405,18%	543,93%
15-16	473,83%	305,37%	389,96%	395,59%
16-17	493,29%	309,12%	325,87%	483,67%
17-18	474,49%	253,87%	262,60%	381,04%
Porcentaje de demanda cubierta en horas pico	504,99%	351,86%	407,26%	474,73%

Se realizó una comparativa entre la producción y demanda para el caso II y se concluye que hay un exceso de producción por parte del sistema fotovoltaico, generando porcentajes por encima de los 360% y hasta los 509%, es decir se pueden generar pérdidas de energía.

Caso III: Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo

Figura A 2

Curvas de consumo del edificio STEM comparadas con las curvas de producción fotovoltaica – CASO III



Se redimensionó este caso, para poder analizar el diseño de un sistema fotovoltaico autónomo, donde se buscó abastecer el edificio de una forma óptima, sin que exista un sobre abastecimiento como en el caso II, pero a su vez que no necesite estar conectada a la red eléctrica para funcionar en todas las horas de trabajo, por lo que se estima que se necesitan aproximadamente 150 paneles para que suceda lo requerido. Se apreció en las gráficas que las curvas si abastecen por completo aparentemente la demanda, teniendo su máximo rango de 20 hasta 30 KWh lo que quiere decir que los porcentajes de abastecimiento están por encima de los 100% sin llegar a porcentajes tan elevados donde ya existirá un exceso de energía producida convirtiéndose en perdidas, estos porcentajes se pueden visualizar en la tabla A8.

Tabla A 8

Potencia producida por 150 paneles [KWh] - CASO III.

Potencia Producida por 150 Paneles [KWh]				
	Apr	May	Jun	Jul
6-7	1,80	2,13	2,22	1,89
7-8	10,50	10,58	11,32	11,40
8-9	17,48	16,90	15,59	13,62
9-10	23,63	21,74	18,13	14,93
10-11	28,88	24,86	20,18	17,48
11-12	28,96	23,63	19,77	19,44
12-13	24,94	20,92	18,87	21,58
13-14	20,68	16,90	17,64	21,74
14-15	18,05	15,83	18,21	22,15
15-16	18,46	15,92	17,48	21,33
16-17	15,34	13,29	14,28	17,72
17-18	9,11	7,63	8,94	11,16
18-19	0,41	0,00	0,41	0,57
Sum	218,24	190,34	183,04	195,02

En la tabla A8 se estimó cuanto es el nivel de producción de energía por hora para una instalación de 150 paneles solares.

Tabla A 9*Valores porcentuales de demanda cubierta por el sistema fotovoltaico - CASO III*

Porcentaje de Demanda-Producción				
	Apr	May	Jun	Jul
6-7	120%	148%	149%	52%
7-8	620%	709%	767%	712%
8-9	415%	280%	500%	366%
9-10	215%	178%	270%	245%
10-11	210%	162%	177%	187%
11-12	211%	146%	150%	161%
12-13	196%	142%	137%	169%
13-14	192%	135%	149%	194%
14-15	177%	126%	157%	211%
15-16	183%	118%	151%	153%
16-17	191%	120%	126%	187%
17-18	184%	98%	102%	147%
Porcentaje de Demanda cubierto por los paneles en hora pico	197%	141%	165%	188%

Utilizando 150 paneles, se concluyó que existe una cobertura completa de la demanda en todos los meses, desde 141% al 197%, lo que permite perfectamente hacer el edificio autónomo como se plantea en el caso III.

Comparación de los resultados calculados para cada caso.

En la tabla A10 se observa que el caso de estudio óptimo es el caso I.

Tabla A 10

Resumen de los resultados de los casos de estudios planteados.

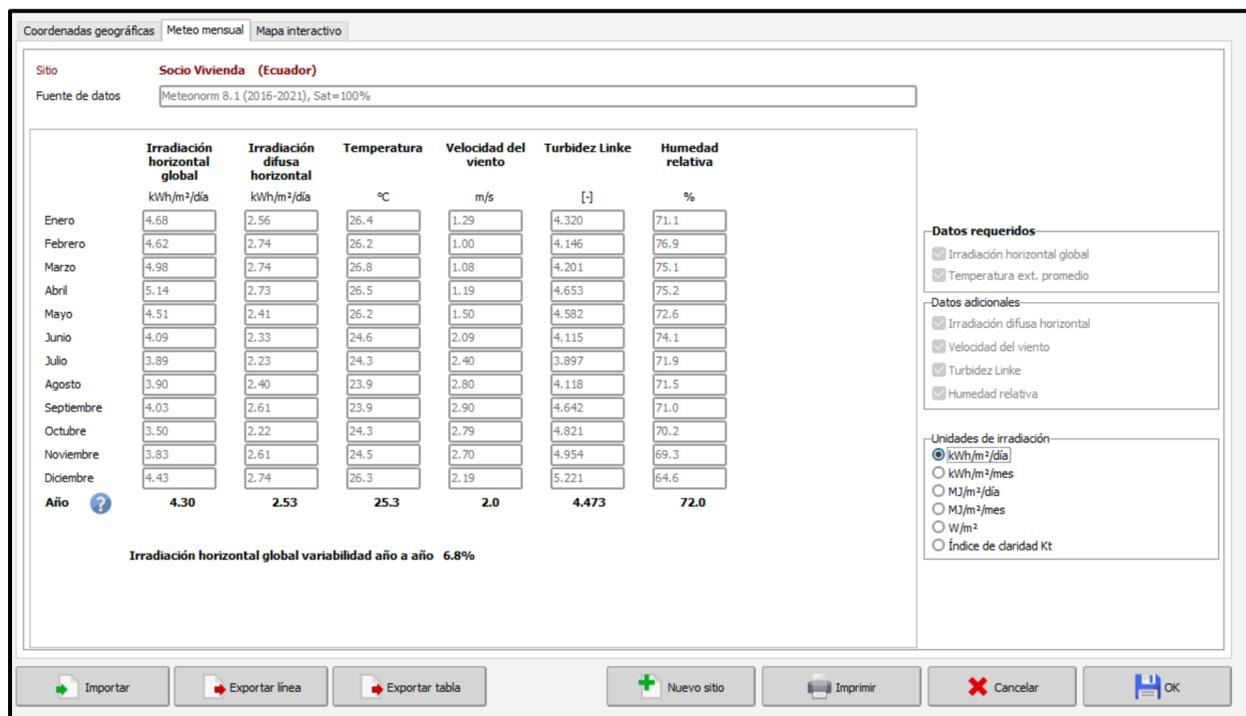
CASO I			
Apr	May	Jun	Jul
Potencia de producción para 75 paneles			
108,60	94,72	91,09	97,05
Porcentaje de Demanda-Producción			
98,0%	70,1%	81,9%	93,7%
CASO II			
Apr	May	Jun	Jul
Potencia de producción para 388 paneles			
563,92	491,84	472,97	503,92
Porcentaje de Demanda-Producción			
505,0%	351,9%	407,3%	474,7%
CASO III			
Apr	May	Jun	Jul
Potencia de producción para 150 paneles			
218,24	190,34	183,04	195,02
Porcentaje de Demanda-Producción			
196,9%	140,9%	164,6%	188,3%

Análisis de Pre-dimensionamiento con la Incidencia que usa el PV-SYSTEM.

Se utiliza, los valores de la incidencia de Meteonorm 8.1 que es del 2016 al 2021. Para comprobar si los valores de incidencia que los que se trabajó, afecto el número de paneles establecido para la producción de demanda, y si al cambiar esos valores dan un numero cercano a lo que se simuló en el PV-SYSTEM.

Figura A 3

Valores de Irradiación que usa el PV-SYSTEM.



Dado que esta incidencia del programa de simulación es un promedio por día de cada mes se hace un análisis mensual.

Tabla A 11*Potencia Producida por el panel - Comprobación.*

Potencia Producida por el Panel [W/h]				
	Apr	May	Jun	Jul
	2798,11	2455,15	2226,51	2117,64

Nota. Valores por día para los meses más críticos de consumo

Se utiliza los valores promedios de consumo por día de cada mes para poder estimar cuantos es el número de paneles promedio que se de utilizar para abastecer ese mes la demanda energética.

Tabla A 12*Número de paneles promedio - Comprobación.*

Número de Paneles Promedio				
	Apr	May	Jun	Jul
GENERAL	43,09	59,00	57,72	68,65

En la **tabla A11** se puede apreciar que en el mes de abril solo se requieren 43 paneles para abastecer a la demanda, y el mes de mayo que es mes donde se encuentra el mayor pico de consumo, se requiere 59 paneles. Siendo abril el mínimo número de paneles, se debería trabajar con 43 paneles para probar un caso crítico, es decir para ver el porcentaje de demanda que cubre en los demás meses, al cual se denomina caso crítico, como se ha analizado anteriormente en la etapa de Pre-dimensionamiento, entonces al comparar con el PV-SYSTEM, cuando se simuló para cubrir la demanda, la simulación diseñó un conjunto de 42 módulos, para suplir la demanda establecida; se calcula la potencia producida para 43 paneles.

Tabla A 13*Potencia producida por 43 paneles - Comprobación.*

Potencia Producida por 43 Paneles [KWh]				
	Apr	May	Jun	Jul
6-7	0,82	0,97	1,01	0,86
7-8	4,78	4,82	5,16	5,19
8-9	7,96	7,70	7,10	6,20
9-10	10,76	9,90	8,26	6,80
10-11	13,15	11,32	9,19	7,96
11-12	13,19	10,76	9,01	8,86
12-13	11,36	9,53	8,60	9,83
13-14	9,42	7,70	8,03	9,90
14-15	8,22	7,21	8,30	10,09
15-16	8,41	7,25	7,96	9,72
16-17	6,99	6,05	6,50	8,07
17-18	4,15	3,48	4,07	5,08
18-19	0,19	0,00	0,19	0,26
Sum	99,40	86,70	83,37	88,83

Se procede a calcular el porcentaje de demanda que cubren los 43 paneles.

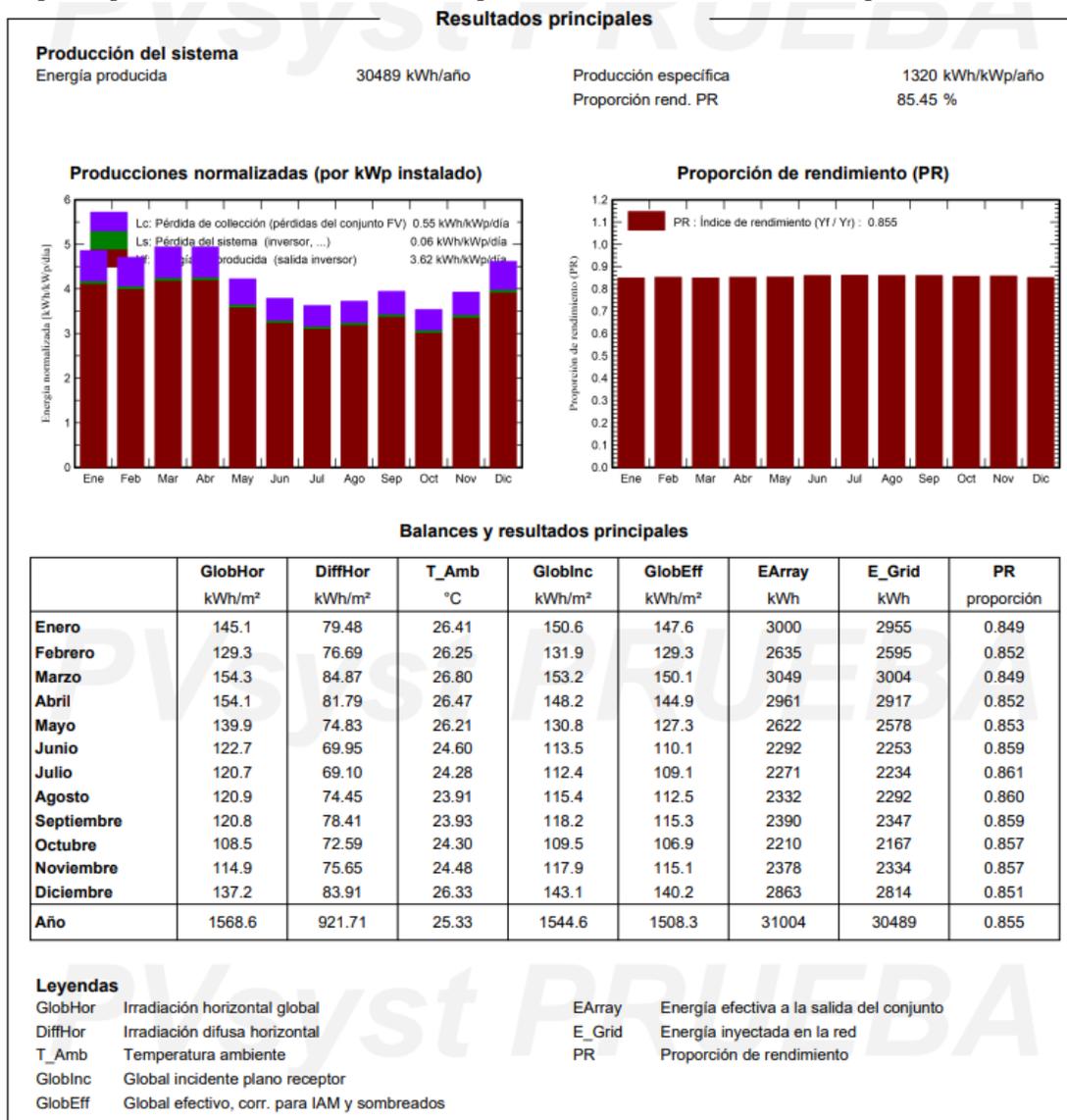
Tabla A 14*Porcentaje de Demanda-Producción - Comprobación.*

Porcentaje de Demanda-Producción				
	Apr	May	Jun	Jul
6-7	54,55%	67,40%	67,72%	23,77%
7-8	282,42%	323,10%	349,26%	324,52%
8-9	189,18%	127,37%	227,95%	166,51%
9-10	97,98%	81,16%	123,11%	111,52%
10-11	95,72%	73,73%	80,40%	85,03%
11-12	96,13%	66,71%	68,49%	73,17%
12-13	89,43%	64,80%	62,46%	76,84%
13-14	87,23%	61,30%	67,74%	88,55%
14-15	80,54%	57,44%	71,42%	95,88%
15-16	83,52%	53,83%	68,74%	69,73%
16-17	86,95%	54,49%	57,44%	85,26%
17-18	83,64%	44,75%	46,29%	67,17%
18-19	12,19%	0,00%	4,22%	5,06%
Porcentaje de Demanda cubierto por los paneles en hora pico	89,7%	64,2%	75,0%	85,7%

Entonces, se procede a mostrar los valores obtenidos de la simulación para 42 paneles.

Figura A 4

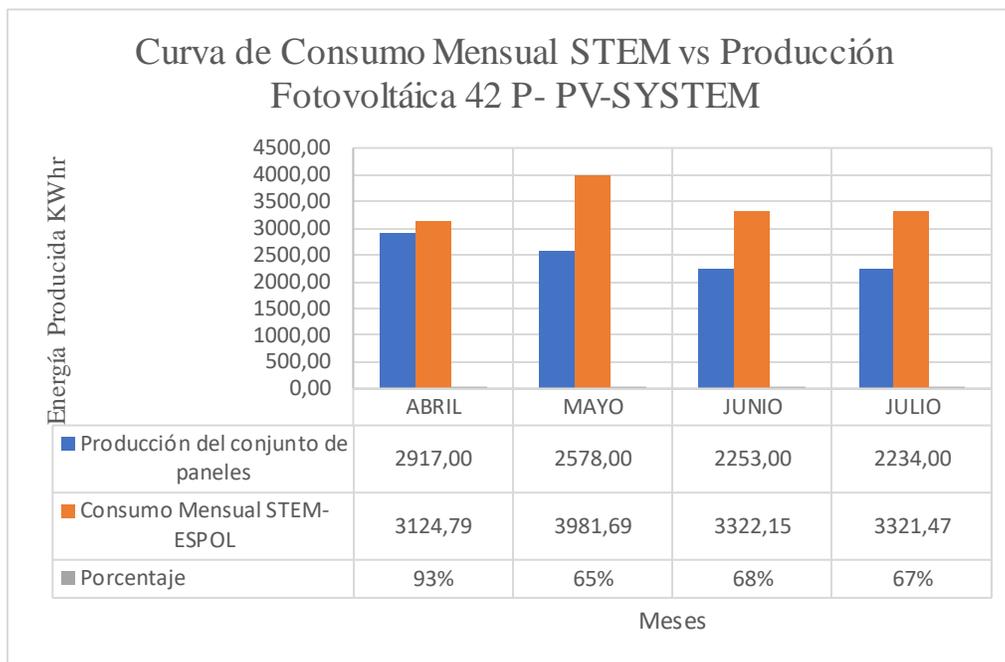
Resultados principales de la simulación de 42 paneles de PV-SYSTEM - Comprobación.



Para poder comparar ambos resultados, primero se realiza la figura A5 donde se puede reflejar como se cubre la demanda del edificio con los valores de producción obtenidos del PV-SYSTEM.

Figura A 5

Curva de Consumo Mensual STEM vs Producción Fotovoltaica de 42 paneles - PV-SYSTEM - Comprobación



Se puede observar que los porcentajes son muy similares al del Pre-dimensionamiento.

De modo que, como se quiere conocer cuánto es ese rango de discrepancia para compararlos de forma más exacta se utilizó la fórmula de porcentaje de error, tomando como valor aproximado el de Pre-dimensionamiento y la de la simulación como el valor real.

$$\%E = \frac{|V_{\text{Simulación}} - V_{\text{Pre-dimensionamiento}}|}{V_{\text{Simulación}}}$$

Tabla A 15

Porcentajes de discrepancia entre la simulación y el Pre-dimensionamiento.

	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO
Pre-dimensionamiento	89,7%	64,2%	75,0%	85,7%
Simulación	93%	65%	68%	67%
%E	3,9%	0,9%	10,6%	27,5%

Se puede observar en la Tabla A5 que los porcentajes de discrepancia no sobrepasan el 30%, teniendo como mínimo porcentaje de 0.9%, lo que significa que el análisis de Pre-dimensionamiento planteado esta correcto y esta variación si es causada por los valores de incidencia, de modo que el haber seleccionado trabajar con 64 paneles para subir los Porcentajes de Demanda-Consumo como se muestra en la sección de resultados del capítulo 3.

APÉNDICE B

Resultados, Simulación y Análisis - Estructura.

Tabla B 1

Partes y Propiedades del material de la estructura soporte.

Nombre	Acero Galvanizado, SAE J 403 1008	
General	Densidad	7,85 g/cm ³
	Esfuerzo de Fluencia	207 MPa
	Máxima resistencia a la tracción	345 MPa
Estrés	Módulo de Young	200 GPa
	Número de Poisson	0,3 ul
	Módulo de Cizallamiento	76,9231 GPa
Nombre de las piezas	Conector Panel-Tubos	
	Conector Panel-Soportes	
	Soporte Paneles	
	Estructura Soporte-Tubos	

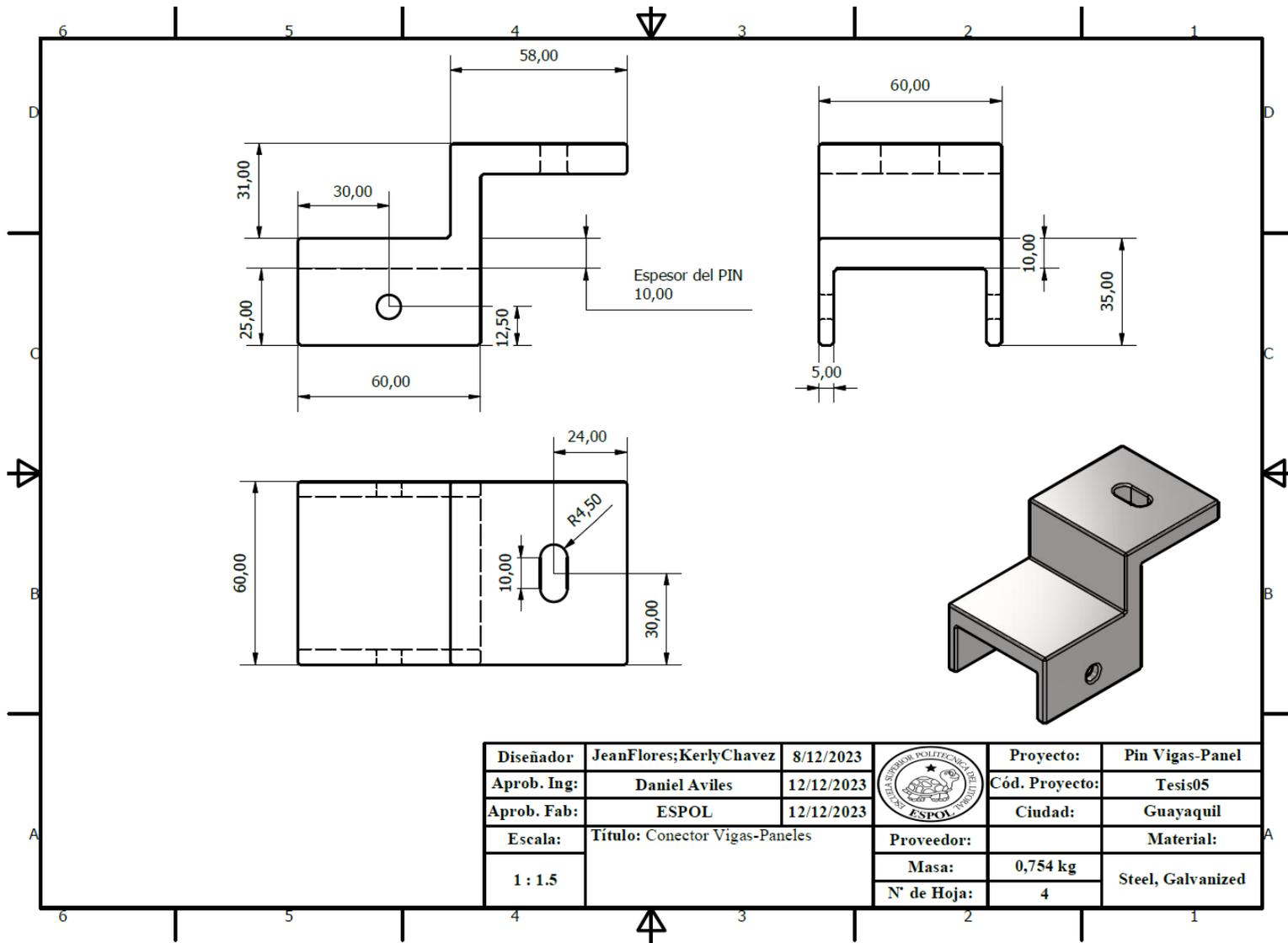
Tabla B 2

Propiedades de mallado para la simulación de elementos finitos

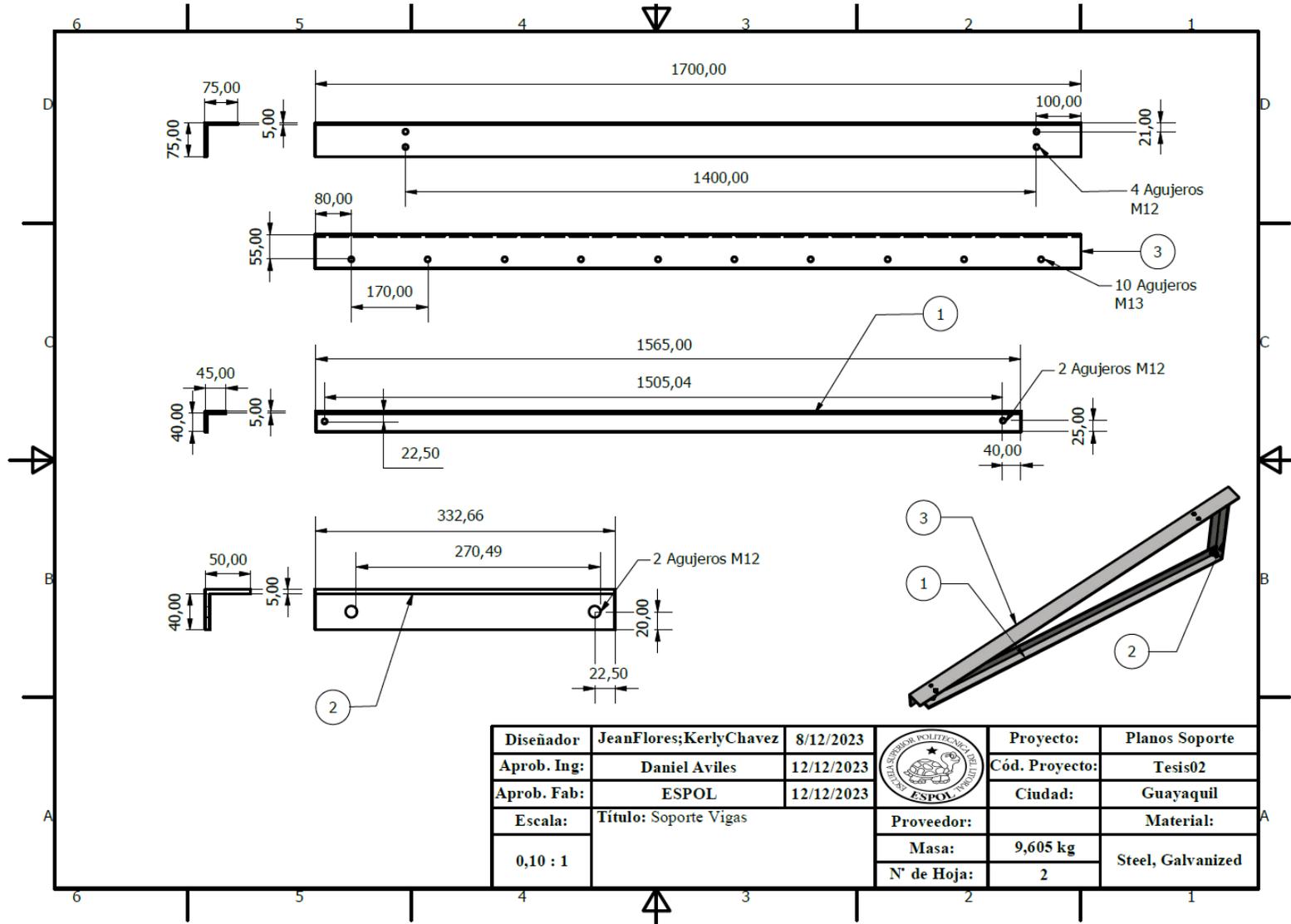
Tamaño medio del elemento (fracción del diámetro del modelo)	0,05
Tamaño mínimo del elemento (fracción del tamaño promedio)	0,1
Factor de Gradeo	1,5
Ángulo de giro máx.	60 deg
Crear elementos de malla curvados	Yes

Nota. Los valores mostrados fueron tomados como estándares para todas las simulaciones.

Plano B 1
Elaboración del Pin Panel-Tubo.

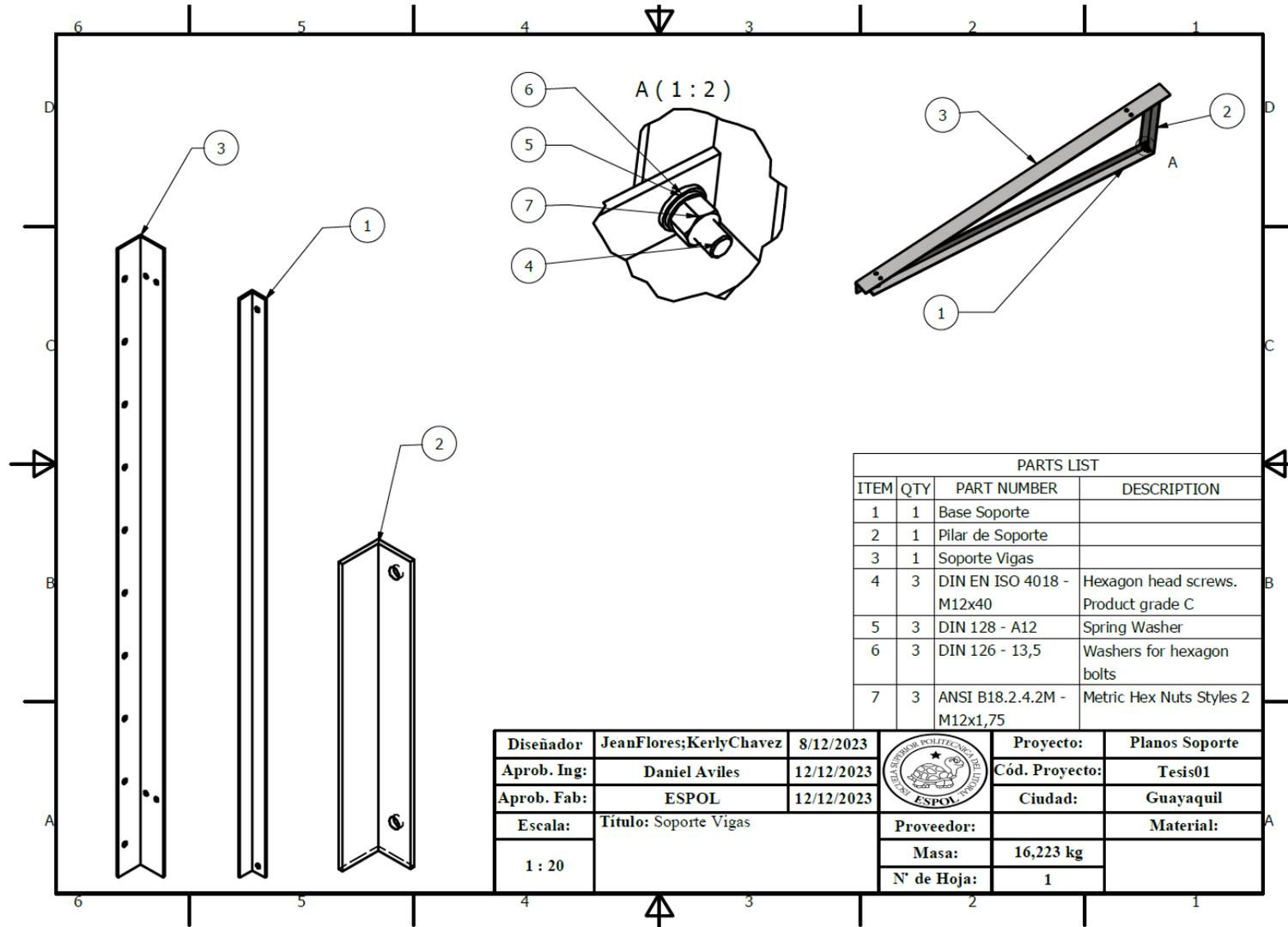


Plano B 3
Elaboración del Soporte-Panel.



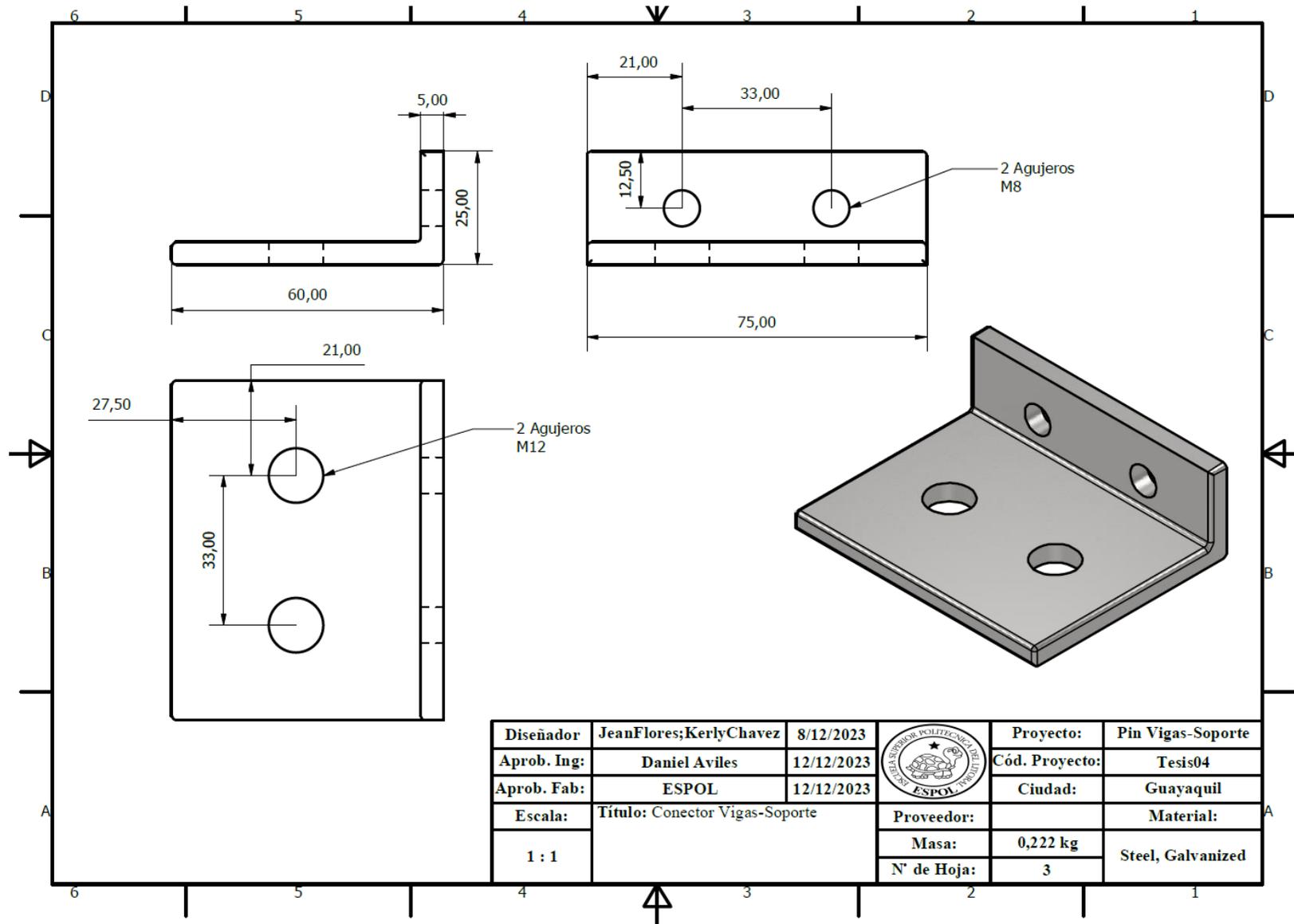
Plano B 5

Ensamble y piezas soporte-panel



Plano B 7

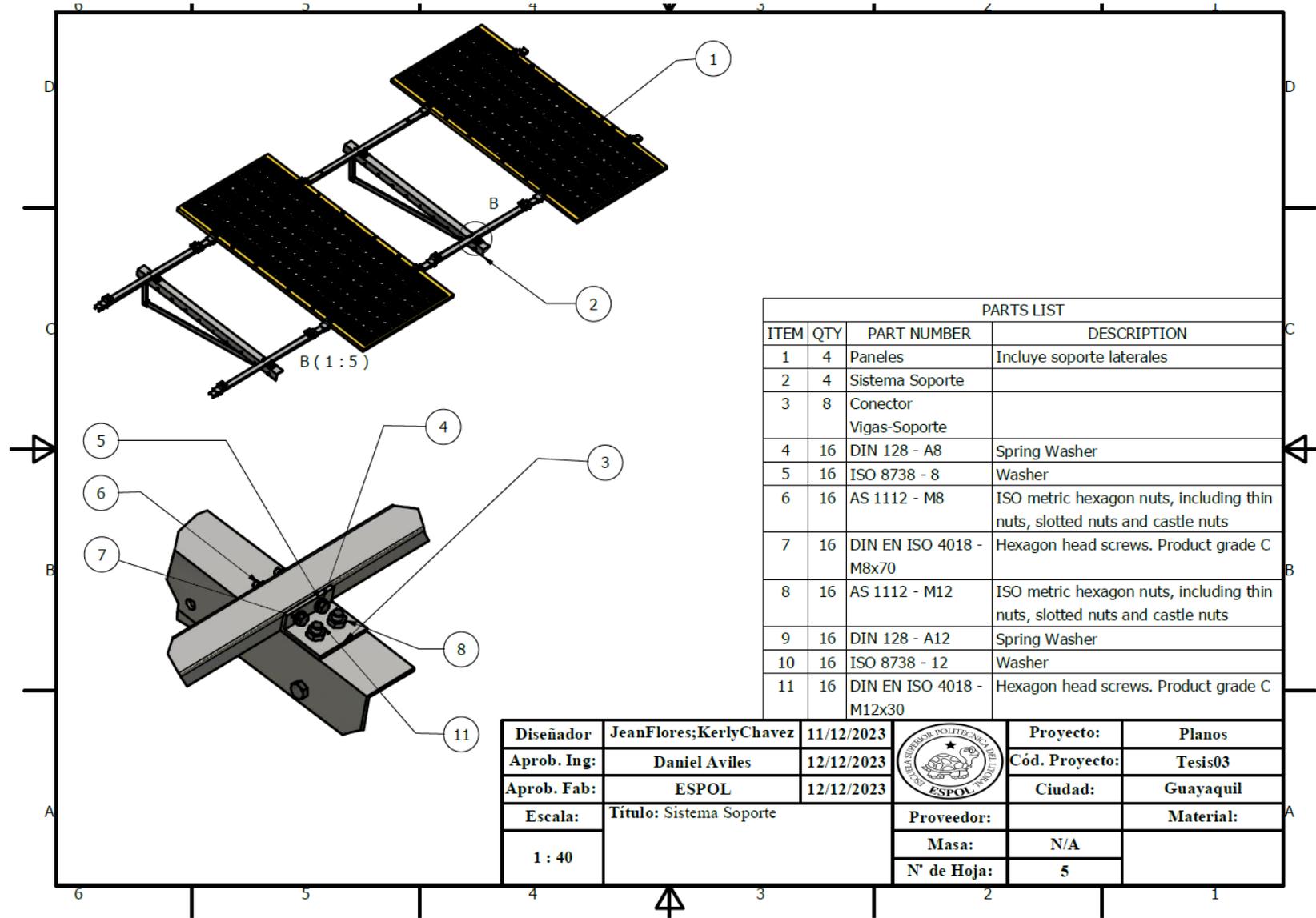
Elaboración del Pin Tubo-Soportes



Diseñador	JeanFlores;KerlyChavez	8/12/2023		Proyecto:	Pin Vigas-Soporte
Aprob. Ing:	Daniel Aviles	12/12/2023		Cód. Proyecto:	Tesis04
Aprob. Fab:	ESPOL	12/12/2023		Ciudad:	Guayaquil
Escala:	Título: Conector Vigas-Soporte			Proveedor:	Material:
1 : 1			Masa:	0,222 kg	Steel, Galvanized
			N° de Hoja:	3	

Plano B 9

Elaboración ensamble paneles.



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	4	Paneles	Incluye soporte laterales
2	4	Sistema Soporte	
3	8	Conector Vigas-Soporte	
4	16	DIN 128 - A8	Spring Washer
5	16	ISO 8738 - 8	Washer
6	16	AS 1112 - M8	ISO metric hexagon nuts, including thin nuts, slotted nuts and castle nuts
7	16	DIN EN ISO 4018 - M8x70	Hexagon head screws. Product grade C
8	16	AS 1112 - M12	ISO metric hexagon nuts, including thin nuts, slotted nuts and castle nuts
9	16	DIN 128 - A12	Spring Washer
10	16	ISO 8738 - 12	Washer
11	16	DIN EN ISO 4018 - M12x30	Hexagon head screws. Product grade C

Diseñador	JeanFlores;KerlyChavez	11/12/2023		Proyecto:	Planos
Aprob. Ing:	Daniel Aviles	12/12/2023		Cód. Proyecto:	Tesis03
Aprob. Fab:	ESPOL	12/12/2023		Ciudad:	Guayaquil
Escala:	Titulo: Sistema Soporte			Proveedor:	Material:
1 : 40				Masa:	N/A
			N° de Hoja:	5	

A continuación, se detallan los resultados para el resto de los componentes de la simulación estructural, siendo la figura B1 una representación del sistema de soportes que sostiene los paneles solares a los módulos de tubos que se ubican por encima del techo del edificio, así también están sus resultados tabulados en la tabla B3.

Figura B 1

Resultados de simulación de esfuerzos y cargas sobre la estructura soporte.

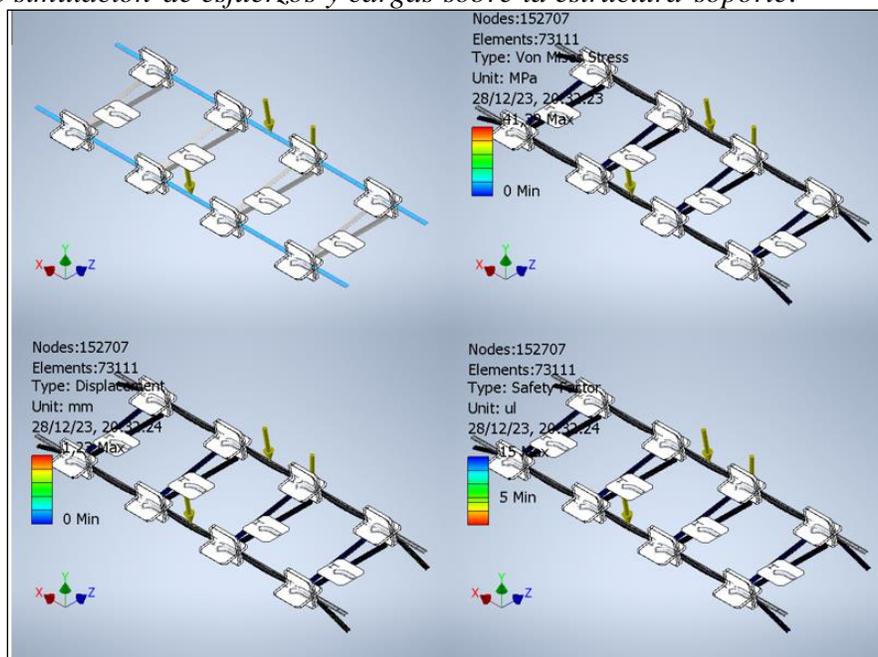


Tabla B 3

Resultados principales para la simulación de los soportes Panel-Estructura

	Mínimo	Máximo
Volumen		7167000 mm ³
Masa		56,2609 kg
Esfuerzo Von Mises	0,000000569298 MPa	41,3879 MPa
Deformación	0 mm	1,23 mm
Factor de Seguridad	5,00 u	15 u

A continuación, se muestran los pines que fijan los paneles solares al módulo de soporte, véase la figura B2 y la tabla B4 para la tabulación de los resultados.

Figura B 2

Resultados de simulación de esfuerzos y cargas sobre los pines soporte.

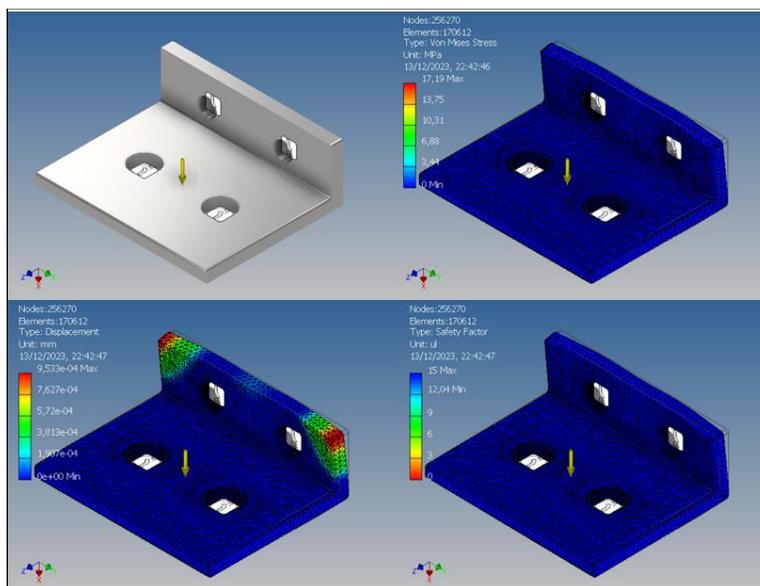


Tabla B 4

Resultados para la simulación de los pines del Panel-Soporte.

	Mínimo	Máximo
Volumen		28298,5 mm ³
Masa		0,222143 kg
Esfuerzo Von Mises	0,000230771 MPa	17,1901 MPa
Deformación	0 mm	0,000953349 mm
Factor de Seguridad	12,0418 ul	15 ul

Análisis del cálculo de selección de uniones roscadas - Pernos

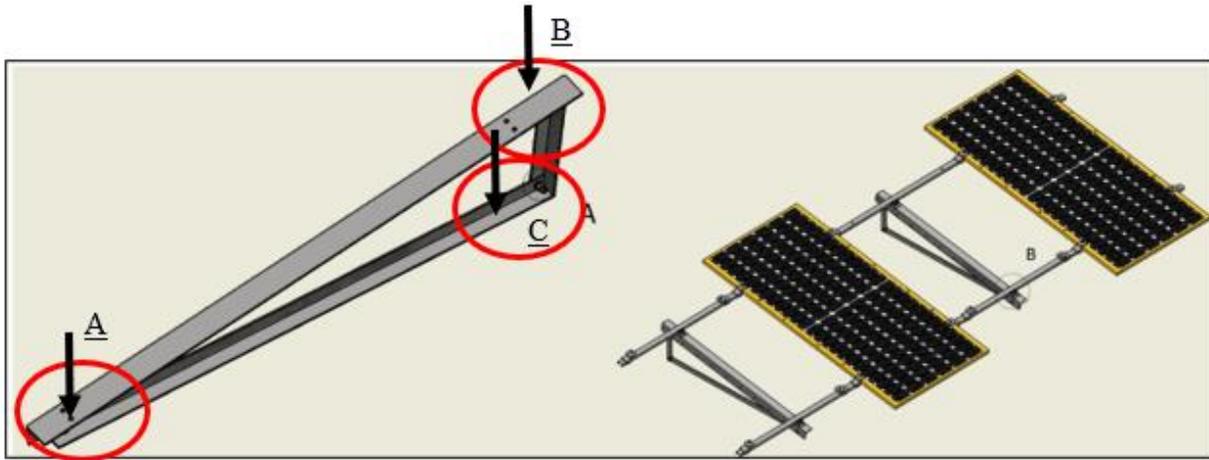
Para las uniones de la estructura del soporte de los paneles se dispuso, trabajar con pernos, puesto que es un tipo de unión no permanente y se busca que la estructura sea desmontable para practicidad en los mantenimientos o reparación, así como al momento de instalarla, dado que esta se planteó en sitio.

En la Figura B3. Se muestra los puntos que se consideraron como críticos al momento de empernar el soporte, tanto a los paneles como a los tubos que sostienen los arreglos de soportes.

El Punto A y B son las uniones del perfil donde se encuentra montado al panel y en conecta al soporte y el punto C es el perno que conecta el soporte al tubo que sostiene el arreglo de paneles.

Figura B 4

Puntos de análisis de pernos que se va a seleccionar para el soporte de paneles.



A continuación, se ejemplifica un análisis del perno en uno de los puntos críticos de las uniones, con el fin de demostrar cual es el mínimo perno que se puede seleccionar, para poder a partir de ese criterio, mediante un criterio ingenieril escoger el más óptimo con el análisis realizado.

Área del perno para el Punto A

Se halla el área transversal del perno, mediante la fuerza de flexión a la que es sometido este punto en el soporte, el cual es el peso de los cuatro paneles

$$A_{tA} = \frac{F_{flexión\ A}}{\sigma_{máximo\ A}} = \frac{559.17[N]}{35 [MPa]} = 15.98 [mm^2]$$

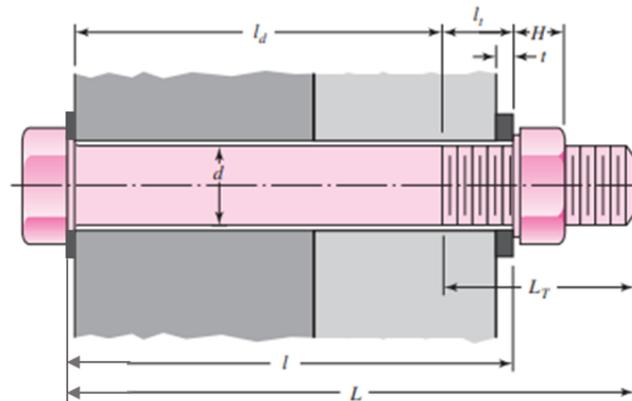
De acuerdo a la tabla 11-2 de Norton, obteniendo el area minima a utilizar.

$$\begin{aligned} A_{tA} &= 20.12 [mm^2] \\ d &= 6 [mm] \\ d_r &= 4.77 [mm] \\ p &= 1 [mm] \end{aligned}$$

Se utiliza el procedimiento de Shigley's para obtener las longitudes del perno.

Figura B 5

Dimensiones de la unión roscada - Perno.



Nota. Obtenida del libro de Shigley's Mechanical Engineering Design (Budynas & Nisbett, 2011)

Se encontró la longitud total del roscado, con el diámetro establecido.

$$L_T = 2d + 6, d \leq 48 [mm]$$

$$L_T = 18 [mm]$$

Se obtuvo el valor de l , siendo el valor l de todo el material apretado, con el valor del espesor por contener las dos piezas que van a ser apretadas y el valor de la arandela.

$$l = e_{\text{pieza viga-soporte}} + e_{\text{pieza conector de viga-soporte}} + e_{\text{arandela}},$$

$$e_{\text{pieza viga-soporte}} = 3 [mm]$$

$$e_{\text{pieza conector de viga-soporte}} = 3 [mm]$$

El valor del espesor de la arandela se selecciona de la tabla A-33 de Shigley's.

$$e_{\text{arandela}} = 0.9$$

Por ende, se determina la longitud sin roca del perno

$$l_d = l - l_t$$

Siendo l_t , la longitud de la sección roscada en la empuñadura.

$$l_t = \frac{L_T - H}{2}$$

Donde H se obtiene de la tabla A-29 Shigley's y es el grosor de la tuerca.

$$H = 3.58 [mm]$$

Por lo cual,

$$l_t = \frac{L_T - H}{2} = 7.21 [mm]$$

Obteniendo como valor de l_d :

$$l_d = 0.31 [mm]$$

Se procede a determinar la longitud total del perno es:

$$L = L_T + l_d = 17.69 [mm]$$

Análisis de la Carga del perno para el Punto A

Se halla el área de la posición no roscada

$$A_d = \pi * \frac{d^2}{4}, d = d_r$$

$$A_d = 17.87 [mm^2]$$

se procede a determinar la rigidez del sujetador:

$$k_b = \frac{A_d * A_{tA} * E}{A_d * l_t + A_{tA} * l_d}, E_{acero galvanizado} = 200 [GPa]$$

$$k_b = 532.34 * 10^6 \left[\frac{N}{m} \right]$$

Luego se determina la rigidez del material

$$k_m = \frac{0.5774 * \pi * E * d_r}{2 * \ln \left(5 * \frac{0.5774 * l_d + 0.5 * d_r}{0.5774 * l_d + 2.5 * d_r} \right)}, E_{PLA} = 200 [GPa]$$

$$k_m = 15056.16 * 10^6 \left[\frac{N}{m} \right]$$

Por lo tanto, se puede obtener la constante de rigidez C que utiliza k_m y k_b

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} = 0.16$$

Una vez obtenida la constante de rigidez se puede hallar la carga resultante del perno, en función de F_i y P , que para este caso P es de 559.17 N

$$F_b = CP + F_i$$

Para calcular F_i , que es la precarga, se debe hallar F_p que es la carga de prueba.

$$F_p = A_{tA} * Sp$$

Donde Sp se obtiene de la tabla 8-11 de Shigley's:

$$Sp = 225 [MPa]$$

Carga de prueba:

$$F_p = 4527 [N]$$

De modo que, la precarga es de:

$$F_i = 0.75 * F_p$$

$$F_i = 3395.25 [N]$$

Obteniendo como carga resultante del perno:

$$F_b = 3484.71 [N]$$

Entonces el **Esfuerzo de tensión** en el perno es de:

$$\sigma = \frac{F_b}{A_t} = 173.19 \text{ [MPa]}$$

Numero de uniones para el Punto A

Se procede a determinar el número de uniones que van a ir en el punto de análisis, utilizando la siguiente ecuación:

$$N = \frac{C * n * P}{S_p * A_t - F_i}$$

Por lo cual, se halla el **factor de carga**:

$$n_c = \frac{F_i}{(1 - C) * P} = 7.22$$

De modo que el número de uniones

$$N \cong 1 \text{ [Unión]}$$

Por factor de seguridad se colocarán 2 uniones con respecto al tubo transversal y 2 con respecto al tubo inclinado.

Factor de seguridad de tensión

$$n_t = \frac{S_p * A_t - F_i}{(C) * \left(\frac{P}{n}\right)} = 12$$

Factor de seguridad contra fatiga según el criterio de GOODMAN

$$n_f = \frac{2 * S_e(S_{ut}A_t)}{(P) * (S_{ut} + S_e)}$$

$S_{ut} = 129 \text{ MPa}$; Según la Tabla 8 – 17 de Shigley's, se seleccionó el Grado ISO 8.8

Se calcula la máxima tensión o el límite de real de la fatiga S_e

$$S_e = K_f * K_m * S'_e = 70.95 \text{ MPa}$$

$K_f = 0.36$; Concentrador de esfuerzo. Tabla 16 de Shigley's.

$K_m = 0.2$; Condicion de perno. Tabla 8 – 15 de Shigley's.

$S'_e = 0.55 * (129) = 70.95 \text{ MPa}$.

$$n_f = \frac{2 * S_e(S_{ut}A_t)}{(P) * (S_{ut} + S_e)} = 2.63 \approx 3$$

Factor de seguridad para el Esfuerzo cortante

$$n_c = \frac{(0.577S_y)}{(\tau_c)}$$

$$n_c = \frac{(0.577S_y)}{(F_b/A)}$$

Se calcula el área del perno, para este caso se selecciona un perno M10.

$$A = \pi * \frac{d^2}{4} = 0.1217 \text{ in}^2$$

Sabiendo que el $S_y = 41 \text{ kPsi}$ de AISI 1040 y la fuerza cortante es de 3484.71 N es decir 783.40

lbf, se calcula el esfuerzo cortante:

$$\tau_c = \frac{F}{2A}$$

$$\tau_c = 3218.57 \text{ Ksi}$$

Entonces el factor de seguridad es de:

$$n_c = \frac{0.577(41)}{(3218.57)}$$

$$n_c = 7.35$$

Factor de seguridad del esfuerzo aplastamiento

$$n_A = \frac{(S_y)}{(\sigma_A)}$$

$$n_A = \frac{(S_y)}{(F/A)}$$

Se calcula el área del perno, para este caso se selecciona un perno M10.

$$A = \pi * \frac{d^2}{4} = 0.1217 \text{ in}^2$$

Sabiendo que el $S_y = 71 \text{ kPsi}$ Grado 8, para el área se considera el diámetro del perno por la longitud de la placa y la que se encuentra en la dirección del aplastamiento del perno y la placa es de 280.57 lbf obtenida de la simulación, se calcula el esfuerzo de aplastamiento:

$$\sigma_A = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_A = \frac{280.57}{(0.3937)(0.1181)}$$

$$\sigma_A = 6034.29 \text{ Psi}$$

Entonces el factor de seguridad es de:

$$n_A = \frac{(71)}{(6034.29)}$$

$$n_A = 11.77$$

Factor de seguridad de esfuerzo de desgarramiento

$$n_d = \frac{(S_y)}{(\sigma_d)}$$

$$n_d = \frac{(S_y)}{(F/A)}$$

Se calcula el área, considerando el diámetro de un perno M10 y el w siendo el ancho de placa.

$$A = (w - d) * e_{placa} = 0.2924 \text{ in}^2$$

Sabiendo que el acero Grado 8 $S_y = 71$ kPsi, y la fuerza es de 783.4 lbf, se calcula el esfuerzo de desgarre:

$$\sigma_d = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_d = \frac{783.4}{(0.2924)}$$

$$\sigma_d = 2678.74 \text{ Psi}$$

Entonces el factor de seguridad es de:

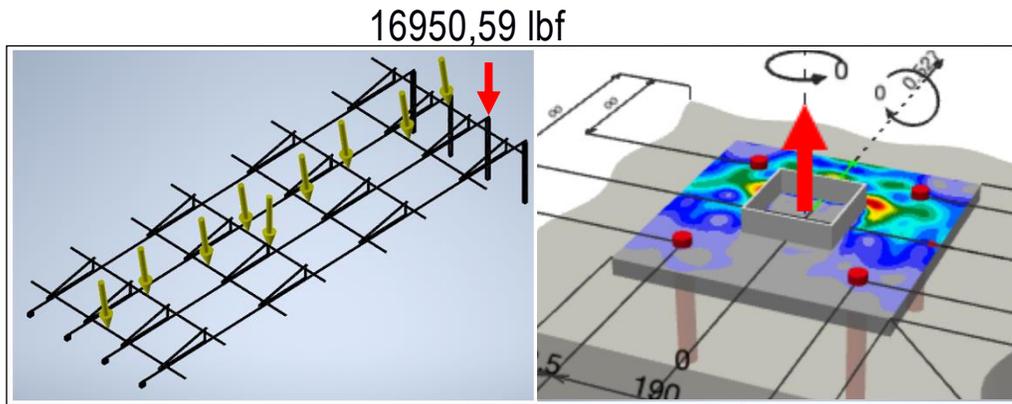
$$n_d = \frac{(71)}{(2678.74)}$$

$$n_d = 26.5$$

Análisis del cálculo de soldadura

Figura B 6

Fuerza ejercida en el empotramiento.



En base del esfuerzo cortante para soldadura, se procede a calcular el espesor de la garganta y la garganta necesaria para soldar, las vigas de la estructura a la base de la placa que se va a usar para el empotramiento, esta mismo calculo se va a considerar como el óptimo para todas las uniones soldadas a realizar en la estructura.

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{tL}$$

$$t = h \cos(45^\circ)$$

Para esto se establece un factor de seguridad de 4, y dado que se selecciona un palillo de soldadura E6013, por ende, el $S_{ut} = 60000 \text{ Psi}$

$$\tau = \frac{0.3(60)}{4} = 4.5 \text{ kPsi}$$

Reemplazando el esfuerzo cortante:

$$4500 = \frac{16950.59}{A}$$

$$A = 3.77 \text{ in}^2$$

Sabiendo que el área es 0.94 in^2 se procede a calcular el espesor de la garganta t de la soldadura:

$$A = 2Lt$$

Donde el L es el largo de la soldadura y t el espesor de la garganta de soldadura la cual deberá dividirse para los cuatro lados del tubo cuadrado.

$$t = \frac{3.77}{2(3.94)}$$

$$t = 0.48/4 \text{ in} = 0.12 \text{ in}$$

Entonces se procede a calcular la garganta w de la soldadura:

$$t = w \cos(45^\circ)$$

$$w = \frac{t}{\cos(45^\circ)}$$

$$w = 0.17 \text{ in} = 0.43 \text{ cm} = 4.3 \text{ mm}$$

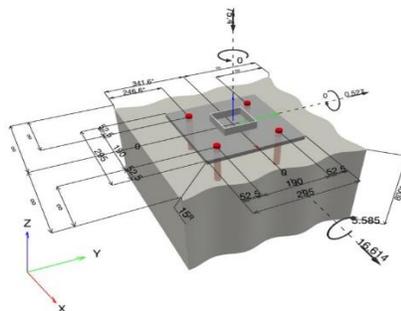
Simulación de Empotramiento de los Módulos al concreto del tejado STEM

A continuación, como resultado de la simulación en el software Hilti PROFIS Engineering 3.0.90 se obtuvieron los datos de entrada mostrados en la tabla B5 y una ilustración de empotramiento en la figura B6.

Tabla B 5*Datos de entrada de la simulación del empotramiento.*

Material:	A4, Perno de Anclaje HSL-3-R M20
Informe de Evaluación:	ESR-1545
Prueba:	Método de diseño ACI 318-19 / Mech
Instalación mediante fijación a distancia:	$e_b = 0.0$ mm (enrasado); $t = 15.0$ mm
Placa base^R :	$l_x \times l_y \times t = 295.0$ mm \times 295.0 mm \times 15.0 mm; (Espesor de placa recomendado: 15.0 mm)
Profundidad del Anclaje	$h_{efect} = 125.0$ mm
Perfil:	Perfil cuadrado hueco, $100 \times 100 \times 3$; ($L \times W \times T$) = 100.0 mm \times 100.0 mm \times 3.0 mm
Material base:	fisurado concreto, 2500 , $f_c' = 2,500$ psi; $h = 800.0$ mm
Instalación:	taladro a percusión, condición de instalación: Seco

Nota. El cálculo del anclaje se basa en un supuesto de placa base rígida.

Figura B 7*Datos de entrada de la simulación del empotramiento.*

Luego, los resultados obtenidos de pues de aplicar las cargas correspondientes a las reacciones del peso de la estructura de paneles y los módulos soporte determinaron la viabilidad de las condiciones de empotramiento, de aquí se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla B6 junto con la hoja de datos del perno de empotramiento en la figura B7.

Tabla B 6*Principales resultados de empotramiento.*

Resultados Carga a Tracción	Carga N_{ua} [kN]	Capacidad $f N_n$ [kN]	Utilización b_N $= N_{ua}/f N_n$	Resultado
Resistencia del acero	0.304	128.626	1	OK
Falla por extracción	0.304	34.314	1	OK
Falla al arrancamiento del concreto	0.607	57.076	2	OK

Resultados Cortante	Carga N_{ua} [kN]	Capacidad $f N_n$ [kN]	Utilización b_N $= N_{ua}/f N_n$	Resultado
Resistencia del acero	4.156	128.626	5	OK
Falla por desprendimiento**	16.622	185.233	9	OK
Fallo por borde de concreto en dirección y-**	16.614	99.861	17	OK

Figura B 8*Data Sheet del perno de expansión para el empotramiento del sistema al techo del STEM.*

HSL-3 / HSL-3-R expansion anchor												
Ultimate-performance heavy-duty expansion anchor												
Anchor versions					Benefits							
 					HSL-3 HSL-3-R Bolt version (M8-M24)						- Suitable for cracked concrete C20/25 to C50/60 - Suitable for all dynamic loads	
Mechanical properties												
Anchor size		M8	M10	M12	M16	M20	M24					
HSL-3, HSL-3-G, HSL-3-B, HSL-3-SH, HSL-3-SK												
Nominal tensile strength f_{uk}		[N/mm ²]	800	800	800	800	830	830				
Yield strength f_{yk}		[N/mm ²]	640	640	640	640	640	640				
Stressed cross-section A_s		[mm ²]	36,6	58,0	84,3	157	245	353				
Moment of resistance W		[mm ³]	31,3	62,5	109,4	277,1	540,6	935,4				
Design bending resistance without sleeve $M_{Rd,s}$		[Nm]	24,0	48,0	84,0	212,8	415,2	718,4				
HSL-3-R, HSL-3-GR, HSL-3-SKR												
Nominal tensile strength f_{uk}		[N/mm ²]	700	700	700	700	700	-				
Yield strength f_{yk}		[N/mm ²]										
HSL-3-R			560	450	450	450	450	-				
HSL-3-SKR			560	560	560	560	560	-				
HSL-3-GR			560	560	560	560	560	-				
Stressed cross-section A_s		[mm ²]	36,6	58,0	84,3	157	245	-				
Moment of resistance W		[mm ³]	31,3	62,5	109,4	277,1	540,6	-				
Design bending resistance without sleeve $M_{Rd,s}$		[Nm]	16,8	33,5	58,8	149,4	291,3	-				
Anchor size		M16	M20		M24							
Cracked concrete												
Tension N_{Rk}	HSL-3 / HSL-3-B		36,0	36,0	36,0	50,3	50,0	50,0	66,1	65,0	65,0	
	HSL-3-G											
Shear V_{Rk}	HSL-3-R		36,0	36,0	36,0	50,3	50,0	50,0	-	-	-	
	HSL-3-GR											
Shear V_{Rk}	HSL-3 / HSL-3-B		72,0	100,6	132,3	100,6	138,9	181,2	132,3	173,9	204,5	
	HSL-3-G		72,0	100,6	120,6	100,6	138,9	155,3	132,3	173,9	204,5	
	HSL-3-R		72,0	100,6	128,2	100,6	138,9	145,2	-	-	-	
	HSL-3-GR		72,0	100,6	129,5	100,6	138,9	151,9	-	-	-	

APÉNDICE C

Planteamiento de resultados y análisis de costo del sistema fotovoltaico.

Se realizó una de estimación de costos, con base a cotizaciones de los elementos y materiales a utilizar tanto para la estructura como para el sistema fotovoltaico, adicional también se tomó como referencia las publicaciones realizadas por The National Renewable Energy Laboratory (NREL), donde la Academia Ejecutiva de Liderazgo Energético de NREL, al estudiar tecnologías avanzadas de energía y eficiencia energética, ha logrado crear análisis, métodos y tablas que permiten estimar el costo que conlleva diseñar un sistema fotovoltaico, para diferentes categorías, como Residencial FV, Comercial FV y Escala de servicio públicos FV, de acuerdo a el nivel de producción energético del sistema fotovoltaico, por lo cual nuestro diseño pertenece a la categoría comercial.

Tabla C 1

Estimación de presupuesto de costos de la implementación del Sistema Fotovoltaico Diseñado.

ESTIMACIÓN DE PRESUPUESTO DE COSTOS DE LA IMPLEMENTACION DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DISEÑADO

Sistema fotovoltaico				
Componente	Descripción	cantidad	Precio unitario	Precio total
Panel	Yingli Solar YLM-J 3.0 PRO 550WP	64	\$ 215,00	\$ 13.760,00
Inversor	Inversor On Grid Growatt MAC 36KTL3-XL importado desde Colombia, con un arancel aduanero de 17.2%.	1	\$ 5.005,12	\$ 5.005,12
Conexiones y componentes eléctricos de la instalación	Según la Tabla 2 de U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks: Q1 2021, el valor de los componentes eléctricos es el de \$0.13-\$0.45/WDC necesario del conjunto de módulos del sistema FV, se selecciona el 0,13 valor para la estimación.		\$ 2.600,00	\$ 2.600,00

EPC Transporte y Almacenamiento	Según la Tabla 2 de U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks: Q1 2021, el valor del EPC es el 13% del costo del total del Módulo fotovoltaico			\$	1.788,80
Medidor Bidireccional Trifásico	Eastron ADM630-Modbus V2, ProViento S.A. Energía renovables, distribuidor ecuatoriano	1	\$	280,00	\$ 280,00
Estructura de Tubos y Soportes					
Tubos de la estructura	T.EST.NEG.CU.40mmx2mm(1 1/2)"	64	\$	158,80	\$ 10.163,20
Perfiles de los soportes de los paneles	ANG.IMP. 40mmx3mm(1 1/2x1/8)"	96	\$	115,20	\$ 11.059,20
Uniones Roscadas de la estructura	Valor establecido en el cómo el 1% del total de todos los Perfiles Soporte para el panel			\$	110,59
Soldadura	E 6013 - De la misma forma se estima un 2% de soldadura del precio final de los tubos de estructura	48 uniones soldadas		\$	203,26
Mano de obra	Se considera un 20% de mano de obra del precio de la estructura			\$	4.244,48
Costos adicionales	Según la Tabla 2 de NREL 2021, se dispone 20% del costo de los módulos fotovoltaicos para costos adicionales			\$	2.752,00
Contingencia	Según la Tabla 2 de NREL 2021, se dispone 4% del costo de los módulos fotovoltaicos para costos adicionales			\$	550,40
COSTO DE LA IMPLEMENTACION DEL SFV					\$ 52.517,05
Costos por mantenimiento					
Mantenimiento	Según el capítulo 8. Operation and Maintenance dl U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks: Q1 2021, el valor del mantenimiento presunto es \$13.36/KWdc			\$	269,20
Reparaciones	Se dispone unos \$200 como presupuesto para reparaciones en caso de presentarse alguna.			\$	200,00
Costo de costos de mantenimientos anuales					\$ 469,20

Nota. La estimación realizada fue referenciada con base a la publicación U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks: Q1 2021 – NREL, 2021 (Ramasamy et al., 2021).

A continuación, se muestran las cotizaciones realizadas con su respectiva evidencia.

Panel solar YINGLI SOLAR YLM-J3.0 PRO 550WP

Figura C 1

Precio unitario del Panel seleccionado según el distribuidor Helios Strategy Ecuador.

**PANEL FV YINGLI SOLAR
YLM-J 3.0 PRO
550WP**

- PANEL SOLAR FV MONOCRISTALINO
- POTENCIA : 550Wp
- CELDAS : 144u Halfcut
- EFICIENCIA : 21,09%
- DIM : 2279×1134×30mm
- PESO : 28,6kg
- GARANTIA PRODUCTO DE 12 ANOS
- GARANTIA PRODUCCION DE 25 ANOS
- PALLET DE 36 U

215\$USD/u* PVP

*producto exento de IVA.

Nota. Obtenido de Helios Strategy Ecuador (Helios,2023). En la página se encuentra la ficha Técnica del panel.

Inversor On Grid Growatt MAC 36KTL3-XL

Figura C 2

Precio en peso colombiano del distribuidor de AutoSolar.

The screenshot shows the AutoSolar website interface. At the top, there's a navigation bar with 'ENERGÍA SOLAR' and various product categories like 'Kits Solares', 'Paneles Solares', 'Baterías Solares', 'Inversores Solares', and 'Controladores de Carga Solar'. The main content area features a product card for 'Inversor On Grid Growatt MAC 36KTL3-XL' with a price of '\$16.717.220 EXENTO DE IVA'. Below the price, there's a 'COMPRAR' button and a 'SECCION ENERGÍA SOLAR' sidebar with a list of product categories.

Nota. Obtenido de AutoSolar Colombia (AutoSolar, 2023), en la misma página se puede encontrar la ficha técnica del inversor.

Puesto que es un precio de un país exterior, importar hasta acuerdo tiene un corto adicional, el cual es el perteneciente al costo de aranceles de aduana, donde las autoridades

encargadas de los aranceles de importación disponen que el arancel para importar desde Colombia es de 17.40% (Murphy, 2015). De modo que el costo final del inversor On Grid Growatt MAC 36KTL3-XL en dólares es de \$ 5.005,12.

Perfiles de la Estructura de Tubos y soportes

Figura C 3

Proforma proporcionada por DIPAC para los perfiles

Pos	Artículo	Descripción	Cantidad	Und	Precio	Total USD
1	ECU402	T.EST.NEG.CU.40mmx2mm(1 1/2)"	64.00	u	15.8800	1,016.32
2	AL04003	ANG.IMP. 40mmx3mm(1 1/2x1/8)"	96.00	u	11.5200	1,105.92
ESTE DOCUMENTO NO CONSTITUYE VENTA Y LOS PRECIOS PUEDEN CAMBIAR SIN PREVIO AVISO						
SUBTOTAL:						2122.24
IVA: 12.00 %						254.67
TOTAL USD:						2376.91
FORMA DE PAGO: EFECTIVO						
VENDEDOR		CLIENTE		JEFE DE SUCURSAL		

Nota. Estos valores no representan una preforma de compra, cotización realizada con el sector de ventas de la distribuidora ecuatoriana DIPAC

Figura C 4

Cotización del Medidor Bidireccional trifásico para el SFV.



ProViento S.A. USD 02 2231844 store@proviento.com My cart Iniciar sesión

Inicio / Energía Renovable / Accesorios y material menor / Medidor bi-direccional trifásico

Medidor bi-direccional trifásico

★★★★★ 0 review(s)

NO NAME

280.00 USD
incl. IVA 1

CANTIDAD 1 + - Añadir al carrito ♥ f

Últimas unidades en stock

Nota. Cotización obtenida de ProViento S.A. Energía Renovables Ecuador (Medidor bidireccional trifásico, s. f.)

Tabla del análisis económico

Tabla C 2

Balance económico del SFV para el año 2023

Mes	Consumo STEM KWh	Producción SFV KWh	Costos Espol	Venta Energía	Saldo de Consumo KWh	Costos de Consumo
Enero	3150,3	4567	\$ 189,02	\$ 274,02	1416,7	\$ 85,00
Febrero	3024,7	4011	\$ 181,48	\$ 240,66	986,3	\$ 59,18
Marzo	3320,5	4639	\$ 199,23	\$ 278,34	1318,5	\$ 79,11
Abril	3893,3	4505	\$ 233,60	\$ 270,30	611,7	\$ 36,70
Mayo	3980,4	3990	\$ 238,82	\$ 239,40	9,6	\$ 0,58
Junio	3321	3488	\$ 199,26	\$ 209,28	167	\$ 10,02
Julio	3320,1	3456	\$ 199,21	\$ 207,36	135,9	\$ 8,15
Agosto	3936,85	3549	\$ 236,21	\$ 212,94	-387,85	\$ -23,27
Septiembre	3607,15	3636	\$ 216,43	\$ 218,16	28,85	\$ 1,73
Octubre	3606,7	3363	\$ 216,40	\$ 201,78	-243,7	\$ -14,62
Noviembre	3650,25	3617	\$ 219,02	\$ 217,02	-33,25	\$ -2,00
Diciembre	3484	4355	\$ 209,04	\$ 261,30	871	\$ 52,26
Anual	42295,25	47176	\$ 2.537,72	\$ 2.830,56	4880,75	...
Ganancia	\$					292,85

Tabla C 3

Estimación del balance económico para el SFV a lo largo de 25 años de vida útil.

Años	Producción SFV	Consumo Anual	Venta Energía	Costos ESPOL	Diferencia de Venta	Flujo Neto (Ahorro)
0	\$ -52.517,05
1	47176	42295,25	\$ 2.830,56	\$ 2.537,72	\$ 292,85	\$ 2.830,56
2	40356	42295,25	\$ 2.421,36	\$ 2.537,72	\$ -116,36	\$ 2.305,01
3	40356	42295,25	\$ 2.421,36	\$ 2.537,72	\$ -116,36	\$ 2.305,01
4	40134,042	42295,25	\$ 2.408,04	\$ 2.537,72	\$ -129,67	\$ 2.278,37
5	39913,3048	42295,25	\$ 2.394,80	\$ 2.537,72	\$ -142,92	\$ 2.251,88
6	39693,7816	42295,25	\$ 2.381,63	\$ 2.537,72	\$ -156,09	\$ 2.225,54
7	39475,4658	42295,25	\$ 2.368,53	\$ 2.537,72	\$ -169,19	\$ 2.199,34
8	39258,3507	42295,25	\$ 2.355,50	\$ 2.537,72	\$ -182,21	\$ 2.173,29
9	39042,4298	42295,25	\$ 2.342,55	\$ 2.537,72	\$ -195,17	\$ 2.147,38
10	38827,6964	42295,25	\$ 2.329,66	\$ 2.537,72	\$ -208,05	\$ 2.121,61
11	38614,1441	42295,25	\$ 2.316,85	\$ 2.537,72	\$ -220,87	\$ 2.095,98
12	38401,7663	42295,25	\$ 2.304,11	\$ 2.537,72	\$ -233,61	\$ 2.070,50
13	38221,278	42295,25	\$ 2.293,28	\$ 2.537,72	\$ -244,44	\$ 2.048,84
14	38011,061	42295,25	\$ 2.280,66	\$ 2.537,72	\$ -257,05	\$ 2.023,61
15	37802,000	42295,25	\$ 2.268,12	\$ 2.537,72	\$ -269,59	\$ 1.998,53
16	37594,0891	42295,25	\$ 2.255,65	\$ 2.537,72	\$ -282,07	\$ 1.973,58

17	37387,3217	42295,25	\$ 2.243,24	\$ 2.537,72	\$ -294,48	\$ 1.948,76
18	37181,6914	42295,25	\$ 2.230,90	\$ 2.537,72	\$ -306,81	\$ 1.924,09
19	36977,1921	42295,25	\$ 2.218,63	\$ 2.537,72	\$ -319,08	\$ 1.899,55
20	36773,8175	42295,25	\$ 2.206,43	\$ 2.537,72	\$ -331,29	\$ 1.875,14
21	36571,5615	42295,25	\$ 2.194,29	\$ 2.537,72	\$ -343,42	\$ 1.850,87
22	36370,4179	42295,25	\$ 2.182,23	\$ 2.537,72	\$ -355,49	\$ 1.826,74
23	36170,3806	42295,25	\$ 2.170,22	\$ 2.537,72	\$ -367,49	\$ 1.802,73
24	35971,4436	42295,25	\$ 2.158,29	\$ 2.537,72	\$ -379,43	\$ 1.778,86
25	35773,6006	42295,25	\$ 2.146,42	\$ 2.537,72	\$ -391,30	\$ 1.755,12
Tarifa Subsidio Energético STEM \$/KWh			Factor de Pérdidas SFV hasta año 12		TIR	
\$	0,06		0,9953		0%	
Factor de Pérdidas SFV hasta año 25					VAN	
0,9945					\$17.518,19	

APÉNDICE D

Informe General de la Simulación en PV-System

Figura D 1

Resumen del proyecto, sistema, resultados y tabla de contenido.



Versión 7.4.5

PVsynt - Informe de simulación

Sistema conectado a la red

Proyecto: SFV_STEM_ESPOL

Variante: CASO3_MODP

Sin escena 3D definida, sin sombras

Potencia del sistema: 35.2 kWp

Socio Vivienda - Ecuador

Resumen del proyecto

Sitio geográfico	Situación	Configuración del proyecto
Socio Vivienda	Latitud	Albedo
Ecuador	-2.14 °S	0.20
	Longitud	
	-79.97 °W	
	Altitud	
	72 m	
	Zona horaria	
	UTC-5	
Datos meteo		
Socio Vivienda		
Meteonorm 8.1 (2016-2021), Sat=100% - Sintético		

Resumen del sistema

Sistema conectado a la red	Sin escena 3D definida, sin sombras	Necesidades del usuario
Orientación campo FV	Sombreados cercanos	Carga ilimitada (red)
Plano fijo	Sin sombreados	
Inclinación/Azimut		
10 / 169.2 °		
Información del sistema		
Generador FV	Inversores	
Núm. de módulos	Núm. de unidades	1 unidad
35.2 kWp	34.0 kWca	
	Proporción Pnom	1.035

Resumen de resultados

Energía producida	44236 kWh/año	Producción específica	1257 kWh/kWp/año	Proporción rend. PR	81.36 %
-------------------	---------------	-----------------------	------------------	---------------------	---------

Tabla de contenido

Resumen de proyectos y resultados	2
Parámetros generales, Características del generador FV, Pérdidas del sistema.	3
Resultados principales	4
Diagrama de pérdida	5
Gráficos predefinidos	6
Diagrama unifilar	7

Figura D 2

Parámetros generales, características del SFV, pérdidas conjunto.



Proyecto: SFV_STEM_ESPOL

Variante: CASO3_MODP

PVsyst V7.4.5

VC2, Fecha de simulación:
19/12/23 20:29
con v7.4.5

Parámetros generales

Sistema conectado a la red

Orientación campo FV

Orientación

Plano fijo

Inclinación/Azimut 10 / 169.2 °

Horizonte

Horizonte libre

Sin escena 3D definida, sin sombras

Configuración de cobertizos

Sin escena 3D definida

Sombreados cercanos

Sin sombreados

Modelos usados

Transposición Perez

Difuso Perez, Meteonorm

Circunsolar separado

Necesidades del usuario

Carga ilimitada (red)

Características del generador FV

Módulo FV

Fabricante

Generic

Modelo

LR5-72HPH-550M G2

(Base de datos PVsyst original)

Unidad Nom. Potencia

550 Wp

Número de módulos FV

64 unidades

Nominal (STC)

35.2 kWp

Módulos

4 cadena x 16 En series

En cond. de funcionam. (50°C)

Pmpp

32.2 kWp

U mpp

605 V

I mpp

53 A

Potencia FV total

Nominal (STC)

35 kWp

Total

64 módulos

Área del módulo

165 m²

Área celular

153 m²

Inversor

Fabricante

Generic

Modelo

Sinvert 40

(Base de datos PVsyst original)

Unidad Nom. Potencia

34.0 kWca

Número de inversores

1 unidad

Potencia total

34.0 kWca

Voltaje de funcionamiento

450-750 V

Proporción Pnom (CC:CA)

1.04

Potencia total del inversor

Potencia total

34 kWca

Número de inversores

1 unidad

Proporción Pnom

1.04

Pérdidas del conjunto

Factor de pérdida térmica

Temperatura módulo según irradiancia

Uc (const)

20.0 W/m²K

Uv (viento)

0.0 W/m²K/m/s

Pérdidas de cableado CC

Res. conjunto global

188 mΩ

Frac. de pérdida

1.5 % en STC

Pérdida de calidad módulo

Frac. de pérdida

-0.8 %

Pérdidas de desajuste de módulo

Frac. de pérdida

2.0 % en MPP

Pérdidas de desajuste de cadenas

Frac. de pérdida

0.2 %

Factor de pérdida IAM

Efecto de incidencia (IAM): Perfil definido por el usuario

0°	25°	45°	60°	65°	70°	75°	80°	90°
1.000	1.000	0.995	0.962	0.936	0.903	0.851	0.754	0.000

Figura D 3
Resultados principales.



Proyecto: SFV_STFM_ESPOL

Variante: CASO3_MODP

PVsyst V7.4.5

VC2, Fecha de simulación:

19/12/23 20:29

con v7.4.5

Resultados principales

Producción del sistema

Energía producida

44236 kWh/año

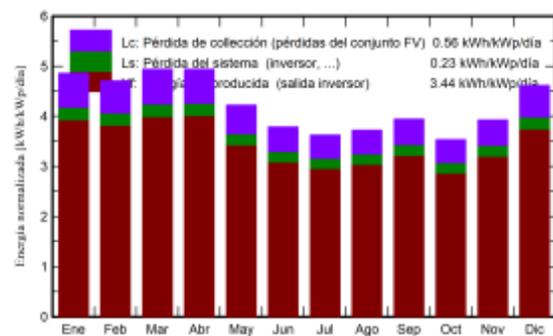
Producción específica

1257 kWh/kWp/año

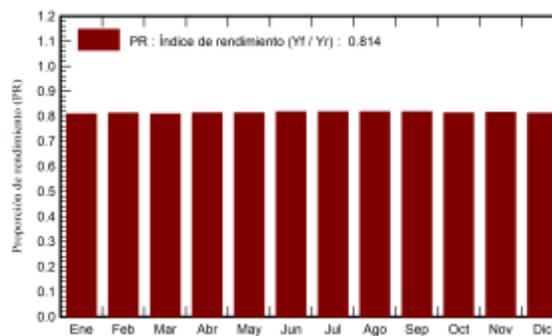
Proporción rend. PR

81.36 %

Producciones normalizadas (por kWp instalado)



Proporción de rendimiento (PR)



Balances y resultados principales

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	proporción
Enero	145.1	79.48	26.41	150.6	147.6	4567	4292	0.809
Febrero	129.3	76.69	26.25	131.9	129.3	4011	3769	0.812
Marzo	154.3	84.87	26.80	153.2	150.1	4639	4363	0.809
Abril	154.1	81.79	26.47	148.2	144.9	4505	4241	0.813
Mayo	139.9	74.83	26.21	130.8	127.3	3990	3743	0.813
Junio	122.7	69.95	24.60	113.5	110.1	3488	3267	0.817
Julio	120.7	69.10	24.28	112.4	109.1	3456	3234	0.818
Agosto	120.9	74.45	23.91	115.4	112.5	3549	3320	0.817
Septiembre	120.8	78.41	23.93	118.2	115.3	3636	3404	0.818
Octubre	108.5	72.59	24.30	109.5	106.9	3363	3133	0.813
Noviembre	114.9	75.65	24.48	117.9	115.1	3617	3382	0.815
Diciembre	137.2	83.91	26.33	143.1	140.2	4355	4088	0.812
Año	1568.6	921.71	25.33	1544.6	1508.3	47177	44236	0.814

Leyendas

GlobHor Irradiación horizontal global

DiffHor Irradiación difusa horizontal

T_Amb Temperatura ambiente

GlobInc Global incidente plano receptor

GlobEff Global efectivo, corr. para IAM y sombreados

EArray Energía efectiva a la salida del conjunto

E_Grid Energía inyectada en la red

PR Proporción de rendimiento

Figura D 4
 Diagrama de Perdidas.



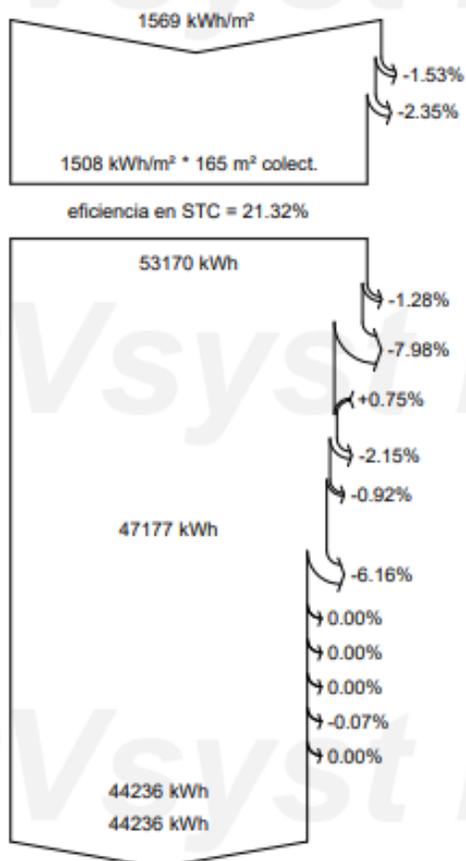
Proyecto: SFV_STEM_ESPOL

Variante: CASO3_MODP

PVsyst V7.4.5

VC2, Fecha de simulación:
 19/12/23 20:29
 con v7.4.5

Diagrama de pérdida



Irradiación horizontal global

Global incidente plano receptor

Factor IAM en global

Irradiancia efectiva en colectores

Conversión FV

Conjunto de energía nominal (con effic. STC)

Pérdida FV debido al nivel de irradiancia

Pérdida FV debido a la temperatura.

Pérdida calidad de módulo

Pérdidas de desajuste, módulos y cadenas

Pérdida óhmica del cableado

Energía virtual del conjunto en MPP

Pérdida del inversor durante la operación (eficiencia)

Pérdida del inversor sobre potencia inv. nominal

Pérdida del inversor debido a la corriente de entrada máxima

Pérdida de inversor sobre voltaje inv. nominal

Pérdida del inversor debido al umbral de potencia

Pérdida del inversor debido al umbral de voltaje

Energía disponible en la salida del inversor

Energía inyectada en la red

Figura D 5*Diagramas predefinidos de Energía Útil***PVsyst V7.4.5**VC2, Fecha de simulación:
27/12/23 17:25
con v7.4.5

Proyecto: SFV_STEM_ESPOL

Variante: CASO3_MODP

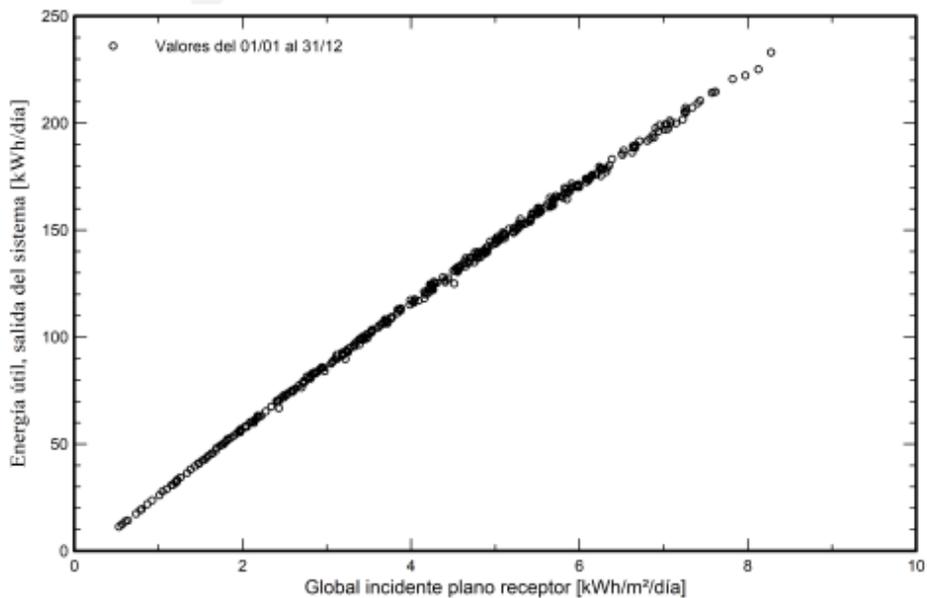
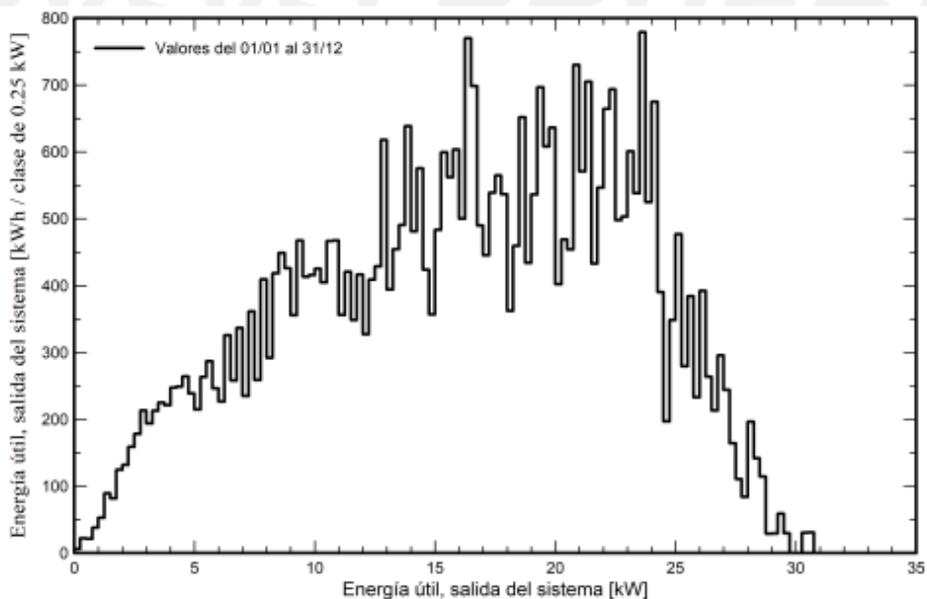
Gráficos predefinidos**Diagrama entrada/salida diaria****Distribución de potencia de salida del sistema**

Figura D 6Detalle del Balance de emisiones de CO₂.

Proyecto: SFV_STEM_ESPOL

Variante: CASO3_MODP

PVsyst V7.4.5VC2, Fecha de simulación:
27/12/23 17:25
con v7.4.5**Balance de emisiones de CO₂**Total: 305.5 tCO₂**Emisiones generadas**Total: 61.86 tCO₂

Fuente: Cálculo detallado de la siguiente tabla

Emisiones reemplazadasTotal: 423.3 tCO₂

Sistema de producción: 44.24 MWh/año

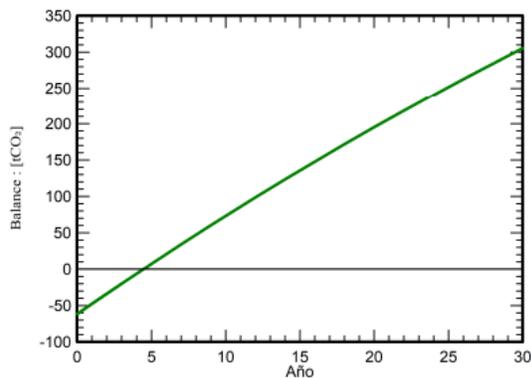
Emisiones del ciclo de vida de la red: 319 gCO₂/kWh

Fuente: Lista IEA

País: Ecuador

Toda la vida: 30 años

Degradación anual: 1.0 %

Emisión de CO₂ ahorrada vs tiempo**Detalles de emisiones del ciclo de vida del sistema**

Artículo	LCE	Cantidad	Subtotal
			[kgCO ₂]
Módulos	1713 kgCO ₂ /kWp	35.2 kWp	60288
Soportes	2.13 kgCO ₂ /kg	640 kg	1362
Inversores	211 kgCO ₂ /	1.00	211