

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN: ENERGÍAS RENOVABLES**

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO  
PARA ENERGIZAR EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO EN LA  
PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CARTÓN CORRUGADO DE LA  
EMPRESA RUA, S.A. DE C.V.**

PRESENTADO POR:

**HEBER DE JESÚS GONZÁLEZ LÓPEZ  
JOSÉ ANGEL OLIVA CANTOR**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2025

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA**

SECRETARIO GENERAL:

**Lic. PEDRO ROSALIO ESCOBAR CASTANEDA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**Ing. LUIS SALVADOR BARRERA MANCIA**

SECRETARIO:

**Arq. RAUL ALEXANDER FABIAN ORELLANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR INTERINO:

**M.Sc. e Ing. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RIOS LAZO**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN: ENERGÍAS RENOVABLES**

Trabajo de Aplicación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Título:

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR  
FOTOVOLTAICO PARA ENERGIZAR EL SISTEMA DE AIRE  
COMPRIMIDO EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE  
CARTÓN CORRUGADO DE LA EMPRESA RUA, S.A. DE C.V.**

Presentado por:

**HEBER DE JESÚS GONZÁLEZ LÓPEZ**

**GL18032**

**JOSÉ ANGEL OLIVA CANTOR**

**OC18003**

Trabajo de Aplicación aprobado por:

Docente asesor:

**ING. MIGUEL TOMÁS AMAYA GÓMEZ**

San Salvador, febrero de 2025

Trabajo de Aplicación Aprobado por:

Docente Asesor:

**Ing. MIGUEL TOMÁS AMAYA GÓMEZ**

Tribunal Calificador:

F. \_\_\_\_\_  
**Ing. Alberto Antonio Rosa Lúe**

F. \_\_\_\_\_  
**Ing. Francisco Alfredo De León Torres**

F. \_\_\_\_\_  
**Ing. Miguel Tomás Amaya Gómez**

# Índice

<b>I. Introducción</b> .....	1
<b>II. Objetivos</b> .....	2
a. Objetivo General.....	2
b. Objetivos Específicos.....	2
<b>III. Antecedentes</b> .....	3
<b>IV. Planteamiento del problema</b> .....	6
<b>V. Justificaciones</b> .....	7
<b>VI. Alcances</b> .....	8
<b>1. Energía solar fotovoltaica</b> .....	9
1.1 El Efecto Fotovoltaico.....	10
1.2 Tipos de Paneles Solares.....	11
1.2.1 Paneles solares monocristalinos.....	11
1.2.2 Paneles solares policristalinos.....	12
1.2.3 Paneles de película delgada.....	12
1.3 Inversores Fotovoltaicos.....	14
1.3.1 Selección de un inversor fotovoltaico.....	15
1.4 Factores que afectan la eficiencia de un sistema solar fotovoltaico.....	15
1.5 Pros y contras de la Energía Solar Fotovoltaica.....	17
1.6 Recurso solar en El Salvador.....	19
1.7 Integración de Sistemas Fotovoltaicos en Industrias.....	20
1.7.1 Evaluación del Potencial Solar.....	20
1.7.2 Dimensionamiento y diseño.....	21
1.8 Empresas con sistemas solares fotovoltaicos en el país.....	22
<b>2. Aire comprimido</b> .....	24
2.1 Historia de los sistemas de aire comprimido.....	24
2.2 Componentes de los sistemas de producción, tratamiento y distribución de aire comprimido.....	25
2.2.1 Compresor.....	25
2.2.2 Secador de aire.....	28
2.2.3 Filtros.....	31
2.2.4 Controles y sensores.....	33
2.2.5 Tanques de almacenamiento.....	34

2.2.6	Red de distribución .....	35
2.3	Factores para tomar en cuenta en el dimensionamiento de un sistema de aire comprimido .....	37
2.4	Consumo Energético de los Sistemas de Aire Comprimido Industriales .....	38
2.4.1	Características del Consumo Energético .....	39
2.4.2	Implicaciones Económicas y Ambientales .....	40
<b>3.</b>	<b>Análisis del sistema de aire comprimido.</b> .....	<b>42</b>
3.1	Información de la empresa y plantas de producción.....	42
3.2	Importancia del sistema de aire comprimido en la planta de cartón corrugado.....	43
3.3	Descripción del sistema de aire comprimido de la planta de cartón corrugado.....	45
<b>4.</b>	<b>Análisis de consumo de energético del sistema de aire comprimido</b> .....	<b>48</b>
4.1.	Equipo para recopilación de datos de energía.....	48
4.2	Análisis de datos obtenidos.....	51
<b>5.</b>	<b>Propuesta de diseño de sistema solar fotovoltaico y mejoras de sistema de aire comprimido</b> .....	<b>53</b>
5.1	Metodología .....	53
5.2.	Propuesta de mejoras en sistema de aire comprimido .....	54
5.2.1	Diagnóstico del sistema de aire comprimido .....	55
5.2.2.	Propuesta de mejoras en sistema de aire comprimido .....	57
5.2.3	Resultados esperados de propuestas .....	61
5.3.	Diseño del sistema solar fotovoltaico .....	62
5.3.1.	Análisis del recurso solar .....	63
5.3.2.	Descripción de componentes .....	71
5.3.3.	Dimensionamiento de sistema solar fotovoltaico con formulas .....	75
5.3.4.	Simulación de con PvSyst.....	78
5.3.5.	Evaluación económica y matriz de decisión .....	83
5.3.6.	Análisis estructural del techo seleccionado para la instalación de paneles solares	84
5.3.7.	Materiales para instalación .....	87
5.4.	Análisis de retorno de inversión .....	88
	<b>Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>93</b>
	<b>Bibliografía</b> .....	<b>95</b>
	<b>Anexos</b> .....	<b>99</b>

# Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Componentes de un sistema de generación y tratamiento de aire comprimido.....	3
Ilustración 2. distribución de costos en sistemas de aire comprimido.....	4
Ilustración 3. panel solar moderno desarrollado por Bell Laboratories.....	9
Ilustración 4. efecto fotovoltaico.....	10
Ilustración 5. panel solar fotovoltaico monocristalino.....	11
Ilustración 6. panel solar fotovoltaico policristalino.....	12
Ilustración 7. panel solar fotovoltaico de película delgada.....	13
Ilustración 8. componentes de un sistema de producción de energía fotovoltaica.....	14
Ilustración 9. Acumulación de suciedad en paneles solares.....	17
Ilustración 10. Irradiancia global horizontal en El Salvador.....	20
Ilustración 11. integración de paneles solares en la industria.....	22
Ilustración 12. componentes de un sistema de aire comprimido.....	25
Ilustración 13. secador frigorífico.....	29
Ilustración 14. secador desecante.....	29
Ilustración 15. secador de aire de membrana.....	30
Ilustración 16. Tanque de aire comprimido.....	34
Ilustración 17. Red de distribución de aire comprimido.....	35
Ilustración 18. logo de la empresa.....	42
Ilustración 19. Proceso de producción de cartón corrugado.....	44
Ilustración 20. esquema de la red de aire comprimido de la planta de cartón corrugado.....	45
Ilustración 21. Esquema de funcionamiento y partes de un compresor Kaeser serie SK.....	46
Ilustración 22. Aircenter SK20.....	46
Ilustración 23. secador de aire Schuz HGE100.....	47
Ilustración 24. medidor de entrada de CC universal PAX.....	49
Ilustración 25. PLC Siemens 6ED1052-1MD08-0BA1.....	49
Ilustración 26. Transformador de corriente.....	50
Ilustración 27. Pantalla táctil HMI PLC.....	50
Ilustración 28. gabinete para componentes eléctricos.....	50
Ilustración 29. equipo para medición de consumo de energía.....	51

Ilustración 30. gráfico de consumo energético de los equipos .....	51
Ilustración 31. Acometidas en máquinas de producción .....	56
Ilustración 32. tanque de aire comprimido húmedo deteriorado .....	56
Ilustración 33. Compresor de aire en malas condiciones.....	57
Ilustración 34. gráfico de ahorro energético debido al almacenamiento .....	58
Ilustración 35. Propuesta de diseño de red de aire comprimido .....	59
Ilustración 36. irradiancia promedio por meses del año .....	64
Ilustración 37. lluvia promedio mensual durante el año 2023.....	66
Ilustración 38. vista área de la empresa .....	66
Ilustración 39. vista 3D de planta de cartón corrugado .....	67
Ilustración 40. Secciones de techo aptas para instalación de paneles solares.....	69
Ilustración 41. simulación de sombras cercanas en PVSyst .....	70
Ilustración 42. Panel solar LONGI LR5-66HPH 500W .....	72
Ilustración 43. Inversor en red GROWATT MAC 60KTL3-X MV.....	72
Ilustración 44. Panel solar JAM72S10-410/MR.....	73
Ilustración 45. Inversor en red Growatt MOD 10000TL3-X.....	73
Ilustración 46. Inversor en red Growatt MAC 20KTL3-XL.....	73
Ilustración 47. Ventana de configuración de orientación de paneles.....	78
Ilustración 48. Ventana de configuración de componentes de sistema solar.....	79
Ilustración 49. Ventana de configuración de cadenas y módulos en serie.....	79
Ilustración 50. ubicación de paneles solares y resultado de simulación .....	80
Ilustración 51. Resultados de la simulación.....	80
Ilustración 52. Gráficos de rendimiento para la configuración 1.....	82
Ilustración 53. Gráficos de rendimiento para la configuración 2.....	82
Ilustración 54. Gráficos de rendimiento para la configuración 3.....	83
Ilustración 55. Distribución de paneles solares.....	85
Ilustración 56. Estructura de sección de techo 1 .....	85
Ilustración 57. Tensión axial y de flexión en estructuras.....	86
Ilustración 58. Desplazamiento máximo en estructuras .....	86
Ilustración 59. Disposición de paneles solares .....	87
Ilustración 60. Flujo de caja acumulativo en dólares a lo largo del tiempo.....	90

# Índice de tablas

Tabla 1. Comparativa entre tipos de paneles solares.....	13
Tabla 2. Tipos de compresores de aire.....	27
Tabla 3. Tipos de secadores de aire comprimido.....	30
Tabla 4. Tipos de filtros para sistemas de aire comprimido .....	32
Tabla 5. Tipos de controladores y sensores .....	33
Tabla 6. Resumen de componentes y resultados. ....	52
Tabla 7. Presupuesto de mejoras en red de aire comprimido .....	60
Tabla 8. Hallazgos y propuestas de mejora .....	61
Tabla 9. Temperaturas promedio en El Salvador.....	65
Tabla 10. Clasificación de techos de nave industrial.....	68
Tabla 11. Resumen de apartado de recurso solar.....	71
Tabla 12. Características de paneles solares .....	74
Tabla 13. Características de inversores.....	74
Tabla 14. Resultados de cálculos realizados.....	77
Tabla 15. Comparativa de rendimiento de configuraciones de sistemas solares.....	81
Tabla 16. Comparativa de precio de configuraciones de paneles solares- inversores .....	83
Tabla 17. Matriz de decisión.....	84
Tabla 18. Presupuesto para elementos de instalación de paneles solares .....	88
Tabla 19. evaluación del retorno de inversión. ....	89
Tabla 20. Cálculo de retorno de inversión .....	90

## Lista de abreviaturas y acrónimos.

°C:	Grados centígrados
CO <sub>2</sub> :	Dióxido de carbono
FV:	Solar Fotovoltaico
CFM:	Pies cúbicos por minuto
psi:	Libra por pulgada cuadrada
CC:	Corriente continua
AC:	Corriente alterna
Hz:	Hercios
kVa:	Kilovolt amperio (unidad de potencia aparente)
kW:	Kilovatio
MW:	Megavatio
kWp:	Kilovatio pico
MPPT:	Punto de máxima potencia
MT:	Media tensión
PRI:	Periodo de recuperación de la inversión
VAN:	Valor actual neto
TIR:	Tasa interna de retorno
USD:	Dólar norteamericano

## I. Introducción

En el contexto actual de búsqueda de soluciones energéticas sostenibles y eficientes, la implementación de sistemas solares fotovoltaicos se ha convertido en una opción cada vez más atractiva para diversas industrias. En este sentido, el presente proyecto se enfoca en la propuesta de diseño de un sistema solar fotovoltaico para energizar el sistema de aire comprimido de la planta de producción de cartón corrugado en la empresa RUA, S.A. de C.V.

El sistema de aire comprimido es esencial en muchas operaciones industriales, incluyendo la producción de cartón corrugado, donde se utiliza para diversas actividades como el corte, plegado y encolado. Sin embargo, el consumo energético asociado a este sistema puede ser significativo, lo que motiva la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles y económicas a largo plazo.

En este proyecto, se llevará a cabo un diagnóstico del sistema de aire comprimido actual, identificando áreas de mejora y proponiendo soluciones para optimizar su funcionamiento. Además, se analizarán las necesidades energéticas del sistema de aire comprimido en la planta, para dimensionar adecuadamente el sistema solar fotovoltaico requerido.

El diseño del sistema solar fotovoltaico será adecuado a los requerimientos y se enfocará en garantizar un suministro energético confiable y sostenible para el sistema de aire comprimido. También se elaborará un presupuesto que considere los aspectos económicos asociados al proyecto, desde la adquisición e instalación del sistema solar hasta los costos de mantenimiento durante su vida útil.

Con este enfoque, se espera que la implementación del sistema solar fotovoltaico disminuya los costos de producción de la planta y represente un paso significativo hacia la adopción de prácticas sostenibles en el sector industrial.

## II. Objetivos

### a. Objetivo General

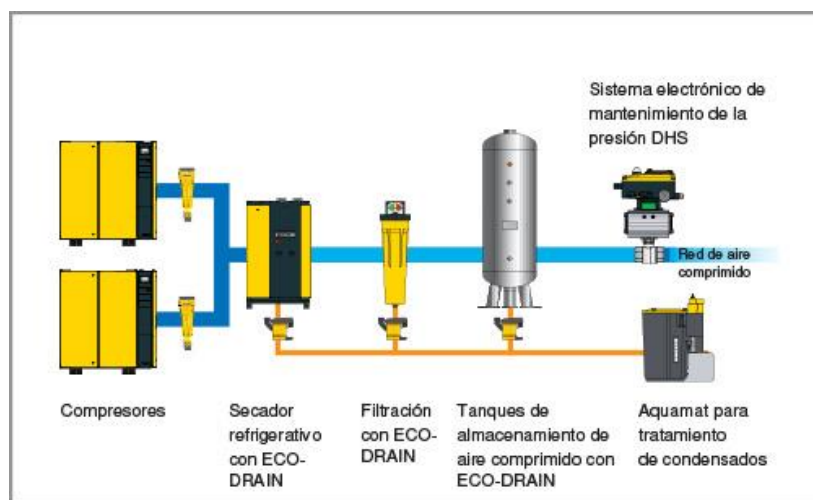
Diseñar un sistema solar fotovoltaico para energizar los equipos que componen el sistema de producción y tratamiento de aire comprimido en la planta de corrugado de la empresa RUA S.A de C.V.

### b. Objetivos Específicos

- a) Realizar un diagnóstico del sistema actual y red de distribución de aire comprimido con el propósito de proponer mejoras.
- b) Realizar un análisis de las necesidades energéticas de los equipos que componen el sistema de aire comprimido.
- c) Diseñar el sistema solar fotovoltaico que satisfaga las necesidades energéticas de los equipos que componen el sistema de aire comprimido.
- d) Elaboración de presupuesto en el que se incluyan las mejoras del sistema de aire comprimido y la implementación del sistema solar fotovoltaico.

### III. Antecedentes

El sistema de aire comprimido en la planta de producción de cartón corrugado de RUA, S.A. DE C.V., desempeña un papel crucial en varias etapas de fabricación. En las operaciones de corrugado y corte, el aire comprimido alimenta los mecanismos necesarios para mover rodillos, garantizando cortes precisos y una fabricación eficiente del cartón. Además, en el control y automatización, se utiliza para operar válvulas y actuadores, controlando aspectos clave del proceso. En el embalaje y sellado, el aire comprimido es esencial para las máquinas que forman, pegan y sellan las cajas. Por último, en tareas de limpieza y mantenimiento, el aire comprimido es vital para eliminar residuos, asegurando un entorno de trabajo limpio y el funcionamiento óptimo de los equipos.



*Ilustración 1. Componentes de un sistema de generación y tratamiento de aire comprimido. Fuente: Normas Internacionales para tanques de aire comprimido – Kaeser Compresores*

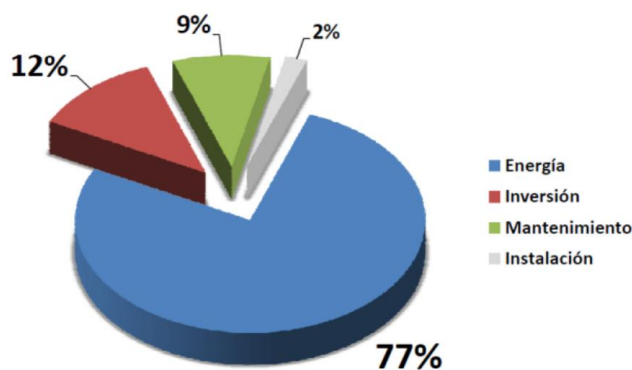
Para el sistema de aire comprimido en la planta de producción de papel corrugado de RUA, S.A. DE C.V., en la etapa de generación hay tres compresores KAESER, dos compresores de tornillo de 20 hp y uno de 15 hp, y para la etapa de tratamiento del aire comprimido hay dos secadores de aire, de 100 y 125 CFM. Estos sistemas son altamente demandantes en consumo energético,

además de ofrecer eficiencias de operación bajas, especialmente los compresores de aire, los cuales según estudios convierten solo el 20% de la energía operativa en energía almacenada como aire comprimido.

A lo largo del ciclo de vida de un sistema de aire comprimido, los costes suelen distribuirse de la siguiente manera:

- Costes de adquisición (aprox. 10-12%): Son los costes de adquisición incluidos compresores, secadores y otros equipos.
- Costos de instalación (aprox. 2%): se incluyen los costos de instalación de los equipos adquiridos.
- Costes energéticos (aprox. 70-77%): Es, con diferencia, el mayor coste. Es el coste del consumo de electricidad durante el funcionamiento del sistema de aire comprimido.
- Costes de mantenimiento (aprox. 9-15%): Incluye piezas de repuesto, reparaciones, mantenimiento rutinario y, posiblemente, contratos de servicio.

Es importante señalar que los porcentajes exactos pueden variar en función del tipo de sistema de aire comprimido, las condiciones de funcionamiento y la región. Sin embargo, los costes energéticos son casi siempre el factor dominante en el ciclo de vida de un sistema de aire comprimido.



*Ilustración 2. distribución de costos en sistemas de aire comprimido. Fuente: elaboración propia*

En este contexto, la adopción de energía generada por un sistema solar fotovoltaico emerge como una alternativa sostenible y viable para energizar los sistemas de aire comprimido de la planta. Esta implementación traería numerosos beneficios. En primer lugar, al reducir los costos energéticos, estas plantas pueden optimizar su producción y mejorar su rentabilidad, especialmente si operan durante el día de manera constante. Además, la sostenibilidad es un aspecto crucial, ya que la energía solar es limpia y renovable, lo que ayuda a mitigar el impacto ambiental de la producción al no emitir gases de efecto invernadero.

Por otro lado, la adopción de energía solar también ofrece protección frente a las alzas en las tarifas eléctricas, lo que estabiliza los costos a largo plazo y fomenta la innovación dentro de la empresa. Esta innovación no solo mejora los procesos de producción, sino que también puede diferenciar la marca en un mercado cada vez más consciente de la sostenibilidad, mejorando así la reputación y atrayendo tanto a consumidores como a inversores interesados en prácticas empresariales responsables.

## **IV. Planteamiento del problema**

El aire comprimido es una fuente de energía fundamental en la planta de producción de cartón corrugado de la empresa RUA, S.A. DE C.V. Se utiliza en varias secciones de la maquinaria para accionar componentes neumáticos y desempeña un papel crucial en el proceso de formación del producto final. No obstante, el sistema de generación de aire comprimido actual enfrenta importantes desafíos, como la falta de una red de distribución adecuada, la gran cantidad de fugas de aire y su uso inadecuado de este. Esto puede ser resultado de diseños subóptimos, mantenimiento deficiente o falta de actualización tecnológica en el sistema. Estos problemas conllevan un costo económico significativo; estudios han demostrado que aproximadamente el 75% del costo total de producir aire comprimido corresponde a los costos de energía eléctrica.

Otro aspecto crítico es la necesidad de avanzar hacia prácticas más sostenibles y responsables desde el punto de vista ambiental en la industria. Uno de los lemas de la empresa es la producción de empaques de calidad, preservando el medio ambiente con procesos ecológicos y materias primas recicladas. La planta de producción de cartón corrugado enfrenta la presión de reducir su huella ambiental y contribuir a la mitigación del cambio climático, lo cual requiere la adopción de soluciones energéticas más limpias y eficientes.

Por lo tanto, el problema principal radica en la necesidad de buscar una fuente de energía alternativa para energizar el sistema de aire comprimido, reducir los costos operativos asociados a la generación de aire comprimido y cumplir con los estándares de sostenibilidad ambiental. La implementación de un sistema solar fotovoltaico se plantea como una solución viable para abordar estos desafíos al aprovechar una fuente de energía renovable y reducir la dependencia de otras fuentes. Sin embargo, es crucial diseñar e implementar este sistema de manera efectiva y optimizada para garantizar su éxito y beneficios a largo plazo para la planta de producción.

## V. Justificaciones

En la planta de producción se han identificado problemas relacionados con la generación de aire comprimido, como la carencia de una red de distribución eficiente, la presencia de fugas de aire y el uso inadecuado de este recurso. Estas deficiencias no solo comprometen la capacidad de producción, sino que también generan costos operativos elevados debido al consumo excesivo de energía eléctrica suministrada por la red. Es imperativo buscar alternativas energéticas sostenibles que permitan abordar estos desafíos. En el presente proyecto de aplicación se presentará una propuesta de diseño de un sistema solar fotovoltaico para energizar las unidades de generación y tratamiento del sistema de aire comprimido.

Con esta implementación se esperaría una reducción significativa de los costos operativos al utilizar energía solar para alimentar el sistema de aire comprimido, se disminuirán los gastos asociados con la energía eléctrica convencional, lo que generará ahorros financieros a largo plazo para la empresa y mejorará su posición competitiva en el mercado. Además, al depender menos de la red eléctrica tradicional y contar con un sistema solar fotovoltaico la autonomía energética también se verá beneficiada, la empresa tendrá una mayor autonomía frente a posibles cortes de energía y fluctuaciones en los precios eléctricos, asegurando un suministro estable y confiable para sus operaciones.

Por último, desde el punto de vista ambiental, la generación de energía a través de paneles solares fotovoltaicos es respetuosa con el medio ambiente, ya que no produce emisiones de gases de efecto invernadero ni otros contaminantes. Esto contribuirá significativamente a la reducción de la huella de carbono de la empresa y al cumplimiento de estándares ambientales más exigentes.

## **VI. Alcances**

El proyecto incluirá una fase inicial de diagnóstico del sistema de aire comprimido con el que cuenta la planta de cartón corrugado de la empresa RUA, S.A. de C.V. Este análisis incluirá una evaluación del rendimiento de los equipos y del estado de la red de distribución, identificando posibles áreas de mejora. A partir de este diagnóstico, se propondrán soluciones y mejoras para optimizar el funcionamiento del sistema de aire comprimido y mejorar su eficiencia.

Después, se analizarán las necesidades energéticas específicas del sistema de aire comprimido, en el que se considerará la demanda energética en diferentes condiciones operativas y se estudiarán los patrones de consumo para determinar los requerimientos energéticos. Con esta información, se dimensionará adecuadamente el sistema solar fotovoltaico necesario para cubrir estas necesidades energéticas de manera eficiente y sostenible.

El diseño del sistema solar fotovoltaico será una parte fundamental del proyecto, desarrollando una solución a medida que integre los paneles solares, inversores, y otros componentes necesarios para garantizar un suministro energético confiable y continuo al sistema de aire comprimido. Se seleccionarán los componentes para asegurar la compatibilidad y eficiencia del sistema solar fotovoltaico.

Finalmente, se elaborará el presupuesto requerido para el proyecto, en el que se incluirán los costos asociados a la adquisición e instalación del sistema solar fotovoltaico, así como los costos de mantenimiento, operación y posibles gastos adicionales durante la vida útil del sistema. El objetivo es garantizar una gestión económica eficiente y transparente del proyecto, asegurando que se cumplan los objetivos adquiridos y las metas de sostenibilidad en la planta de producción de cartón corrugado de la empresa RUA, S.A. de C.V.

## 1. Energía solar fotovoltaica

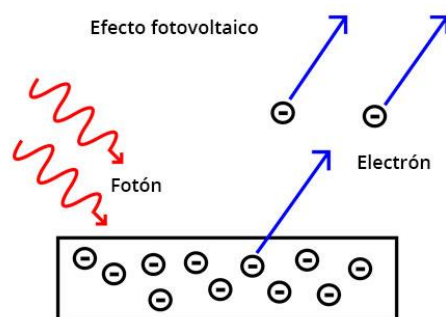
La energía solar fotovoltaica es una tecnología que convierte la luz solar en electricidad mediante el uso de materiales semiconductores que exhiben el efecto fotovoltaico. Este proceso se basa en la capacidad de ciertos materiales, como el silicio, para absorber fotones de la luz solar y liberar electrones, generando así una corriente eléctrica. Los paneles solares fotovoltaicos, compuestos por múltiples celdas fotovoltaicas, son los dispositivos encargados de realizar esta conversión. La historia de la energía solar fotovoltaica se remonta a 1839, cuando el físico francés Edmond Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico, observando que ciertos materiales generaban una corriente eléctrica al ser expuestos a la luz. Sin embargo, no fue hasta 1954 que los científicos de Bell Laboratories desarrollaron la primera celda solar práctica de silicio, marcando el inicio de la era moderna de la energía solar fotovoltaica. Durante las décadas siguientes, esta tecnología se utilizó principalmente en aplicaciones espaciales y de nicho debido a sus altos costos. El estado actual de la tecnología solar fotovoltaica refleja una industria madura y en constante innovación. Con el continuo apoyo gubernamental y las inversiones en investigación y desarrollo, la energía solar fotovoltaica está bien posicionada para desempeñar un papel central en la transición global hacia un futuro energético sostenible.



*Ilustración 3. panel solar moderno desarrollado por Bell Laboratories. Fuente: Diario digital Reforma*

## 1.1 El Efecto Fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es un fenómeno físico mediante el cual ciertos materiales pueden convertir la luz solar en electricidad. Este proceso ocurre cuando los fotones de la luz solar inciden sobre una celda fotovoltaica, excitando los electrones del material semiconductor. Estos electrones, al ganar energía, se liberan y generan una corriente eléctrica al moverse a través del material. El material semiconductor más comúnmente utilizado en las celdas fotovoltaicas es el silicio, debido a su abundancia y propiedades electrónicas favorables.



*Ilustración 4. efecto fotovoltaico. Fuente: Dexen Energy*

El efecto fotovoltaico se fundamenta en el comportamiento de los materiales semiconductores y la formación de una unión p-n. El silicio, uno de los semiconductores más utilizados, tiene una estructura atómica que facilita el movimiento de electrones bajo ciertas condiciones, permitiendo la generación de electricidad. Para optimizar su comportamiento, los semiconductores se dopan. El dopaje tipo n introduce átomos con electrones adicionales, como el fósforo, mientras que el dopaje tipo p incorpora átomos con menos electrones, como el boro, creando un exceso de huecos o cargas positivas móviles. La unión p-n, clave en las celdas solares, genera un campo eléctrico interno en la región de contacto entre los materiales tipo p y n. Este campo separa los pares electrón-hueco creados cuando la luz solar excita a los electrones desde la banda de valencia a la de conducción. Los electrones son dirigidos hacia la región n y los huecos hacia la región p, lo que

evita su recombinación inmediata y facilita la generación de una corriente eléctrica. Los contactos eléctricos recogen los electrones y huecos separados, creando una corriente continua (CC) que puede transformarse en corriente alterna (CA) mediante un inversor para su uso en aplicaciones domésticas e industriales. La eficiencia de este proceso depende de factores como la calidad del material semiconductor, la eficacia del campo eléctrico para separar las cargas, y la minimización de la recombinación de electrones y huecos antes de su recolección.

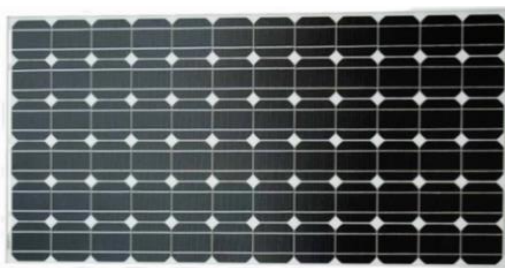
## 1.2 Tipos de Paneles Solares

Existen varios tipos de paneles solares, cada uno con características específicas, distintas formas de construcción y aplicaciones diversas. Los tres tipos principales son los paneles solares monocristalinos, policristalinos y de película delgada.

### 1.2.1 Paneles solares monocristalinos.

Los paneles solares monocristalinos están fabricados con un único cristal de silicio, lo que les otorga una estructura uniforme y alta pureza. Esto facilita el movimiento de electrones y mejora su eficiencia, con tasas de conversión de luz solar en electricidad entre el 15% y el 22%.

Destacan por su larga vida útil y son ideales para aplicaciones residenciales y comerciales donde se busca maximizar la producción en espacios reducidos. Además, su apariencia negra uniforme les da un diseño estéticamente atractivo.



*Ilustración 5. panel solar fotovoltaico monocristalino. Fuente: Dexen Energy*

### 1.2.2 Paneles solares policristalinos.

Los paneles solares policristalinos se fabrican al fusionar fragmentos de silicio, lo que resulta en un material menos puro y eficiente que los monocristalinos, con tasas de conversión de entre el 13% y el 16%. Aunque son duraderos, su vida útil puede ser algo menor. Son más económicos de producir, lo que los hace ideales para instalaciones donde el costo inicial es prioritario y el espacio no es una limitación, como en proyectos solares comerciales e industriales a gran escala.



*Ilustración 6. panel solar fotovoltaico policristalino. Fuente: Dexen Energy*

### 1.2.3 Paneles de película delgada.

Los paneles de película delgada se fabrican al depositar capas de material fotovoltaico, como el cadmio telururo (CdTe), el silicio amorfo (a-Si) y el cobre indio galio seleniuro (CIGS) sobre sustratos como vidrio, plástico o metal. Aunque menos eficientes que los paneles de silicio cristalino, con eficiencias entre el 10 % y el 12 % (y hasta el 14 % en tecnologías avanzadas), funcionan mejor en condiciones de luz difusa o baja.

Algunos tipos, como los basados en CIGS y a-Si, son flexibles, lo que permite su uso en superficies curvas o irregulares. Son ideales para aplicaciones que requieren flexibilidad, peso ligero y estética, como fachadas, dispositivos portátiles y vehículos.



Ilustración 7. panel solar fotovoltaico de película delgada. Fuente: Dexen Energy.

Tabla 1. Comparativa entre tipos de paneles solares.

Tipo de Panel	Eficiencia	Costo	Durabilidad	Características Adicionales	Aplicaciones Principales
Monocrystalino	Alta (15%-22%)	Alto	Larga vida útil, alta durabilidad	Alta eficiencia, apariencia uniforme	Instalaciones residenciales y comerciales con espacio limitado
Policristalino	Moderada (13%-16%)	Moderado	Buena durabilidad, ligeramente menor	Menor costo, apariencia moteada	Grandes instalaciones solares comerciales e industriales
Película Delgada	Baja (10%-14%), mejor uso con luz difusa	Variable	Variable	Flexibles, ideales para superficies curvas	Fachadas de edificios, techos industriales ligeros, dispositivos portátiles

La elección del tipo de panel solar depende de múltiples factores, incluyendo la eficiencia deseada, el presupuesto disponible, la aplicación específica y las condiciones del sitio de instalación. Los paneles monocristalinos son ideales para maximizar la eficiencia en espacios limitados, los policristalinos son una opción costo-efectiva para grandes instalaciones, y los de película delgada ofrecen flexibilidad y peso ligero para aplicaciones especializadas. Cada tipo de panel solar tiene su propio conjunto de ventajas y desventajas, y la mejor opción varía según las necesidades específicas del proyecto.

### 1.3 Inversores Fotovoltaicos

Los inversores fotovoltaicos son esenciales en los sistemas solares, ya que convierten la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA), apta para su uso en electrodomésticos y la red eléctrica. Sin ellos, la energía producida por los paneles no sería directamente utilizable.

El proceso de conversión incluye un oscilador que transforma la CC en una onda pulsante de CA, ajustada por filtros y transformadores para generar una onda sinusoidal pura, sincronizada con la red. Utilizan componentes como transistores IGBT, diodos y algoritmos avanzados como PWM para optimizar la conversión y minimizar pérdidas.

Los inversores también cuentan con sistemas de protección y monitoreo, garantizando un funcionamiento eficiente y seguro. Son utilizados en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales, manejando desde pequeñas cantidades de energía hasta grandes volúmenes, e integrando funcionalidades como almacenamiento con baterías y gestión de la red.

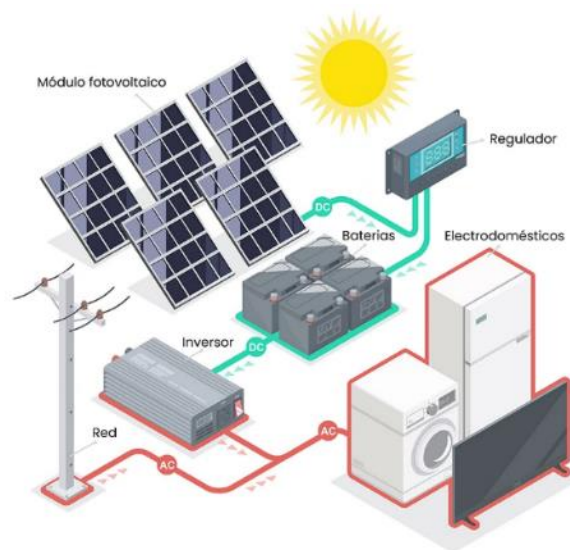


Ilustración 8. componentes de un sistema de producción de energía fotovoltaica. Fuente: Eltex

### **1.3.1 Selección de un inversor fotovoltaico**

La elección del inversor fotovoltaico depende de la conexión eléctrica del lugar de instalación. Si hay acceso a la red eléctrica, se puede optar por inversores de conexión a red o híbridos. Los de conexión a red convierten la corriente para consumo o para verter excedentes a la red, pero no permiten almacenar energía. Los híbridos ofrecen la misma funcionalidad, pero con la opción de usar baterías para almacenar excedentes y utilizarlos posteriormente. Si no hay conexión a la red, se requieren inversores de conexión aislada con baterías, disponibles en diferentes voltajes (12V, 24V y 48V). Los inversores de 12V son ideales para sistemas de baja potencia (100W-3000W) y electrodomésticos básicos. Los de 24V manejan sistemas de potencia media (100W-5000W), recomendándose instalar cerca de las baterías para minimizar pérdidas.

Los avances tecnológicos continúan mejorando los inversores fotovoltaicos, con tendencias hacia una mayor eficiencia, menor costo y capacidades de integración avanzada. Los inversores modernos no solo convierten la energía, sino que también ofrecen funciones de monitoreo en tiempo real, gestión de la energía y conexión a redes inteligentes. Estas características permiten una mayor integración con otras tecnologías renovables y sistemas de almacenamiento de energía, facilitando una transición más fluida hacia una red eléctrica sostenible y descentralizada.

### **1.4 Factores que afectan la eficiencia de un sistema solar fotovoltaico**

La eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos, es decir, su capacidad para convertir la luz solar en electricidad puede verse influenciada por diversos factores tanto ambientales como propios. Uno de los aspectos más determinantes es la radiación solar disponible, ya que una mayor intensidad y duración de la luz solar incrementan la producción de energía. Sin embargo,

condiciones como nubes, sombras parciales o contaminación atmosférica pueden reducir la cantidad de luz que llega a las celdas fotovoltaicas, afectando su rendimiento.

Otro factor importante es la temperatura. Aunque los paneles solares necesitan luz solar para generar energía, un exceso de calor puede disminuir su eficiencia. Esto se debe a que los materiales semiconductores pierden efectividad a temperaturas más altas. Por lo tanto, los paneles instalados en climas cálidos deben diseñarse considerando su coeficiente de temperatura, que indica cuánto se reduce el rendimiento con el calor. Asimismo, la orientación e inclinación de los paneles es esencial; un ángulo y dirección inadecuados pueden limitar la captación óptima de luz solar.

En cuanto a los factores internos, el tipo de tecnología del panel juega un papel clave. Los paneles monocristalinos suelen ser más eficientes que los policristalinos o de película delgada, debido a la mayor pureza de sus materiales. Sin embargo, cualquier tipo de panel puede experimentar pérdidas por sombras, suciedad acumulada o defectos en las celdas, lo que afecta su rendimiento global. Además, las pérdidas por mismatch, derivadas del desempeño desigual entre celdas o paneles conectados en serie, también disminuyen la eficiencia.

El sistema fotovoltaico en su conjunto también influye en el desempeño. La calidad de los inversores, encargados de convertir la corriente continua en corriente alterna, es crucial, ya que los inversores de baja eficiencia generan pérdidas adicionales. Asimismo, un cableado inadecuado o conexiones sueltas pueden causar pérdidas resistivas significativas. En sistemas avanzados, el uso de seguidores solares que optimicen la orientación de los paneles puede mejorar la captación de energía, aunque su implementación depende del presupuesto y las necesidades del proyecto.

El mantenimiento y la degradación natural de los paneles son factores que afectan su eficiencia a lo largo del tiempo. La acumulación de suciedad, polvo o residuos puede reducir considerablemente la capacidad de los paneles para captar luz, por lo que es necesario realizar

limpiezas regulares. Además, los paneles solares pierden eficiencia de manera gradual, con una tasa de degradación típica del 0.5% al 1% anual.



*Ilustración 9. Acumulación de suciedad en paneles solares. Fuente: Delfos Energy*

### **1.5 Pros y contras de la Energía Solar Fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica presenta numerosos beneficios y algunas desventajas que deben considerarse al evaluarla como fuente de energía. En primer lugar, uno de los pros más destacados es que se trata de una energía renovable e inagotable, a diferencia de los combustibles fósiles que eventualmente se agotarán. Además, la energía solar está disponible en casi todas partes del mundo, lo que la convierte en una opción accesible para muchos. Sin embargo, su disponibilidad puede variar significativamente según la ubicación geográfica y las condiciones climáticas, lo que representa una limitación en ciertas áreas.

Un beneficio clave de la energía solar es la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. La generación de electricidad mediante paneles solares no produce gases de efecto invernadero durante su operación, lo que contribuye a la lucha contra el cambio climático y mejora la calidad del aire. No obstante, es importante señalar que la fabricación, el transporte y el reciclaje de los paneles solares generan emisiones, aunque estas son significativamente menores en comparación con las generadas por los combustibles fósiles.

En términos de costos operativos, los sistemas solares fotovoltaicos requieren muy poco mantenimiento una vez instalados y tienen bajos costos de operación. No tienen partes móviles que se desgasten, minimizando el riesgo de fallos mecánicos. Sin embargo, aunque el mantenimiento es bajo, es necesario limpiar los paneles regularmente y reemplazar los inversores periódicamente, lo que implica algunos costos adicionales.

Otro gran beneficio de la energía solar es la independencia energética que ofrece. Permite a individuos y comunidades generar su propia electricidad, reduciendo la dependencia de la red eléctrica y de las compañías de energía. No obstante, la generación de energía solar es intermitente y depende de la luz solar, por lo que, en ausencia de sistemas de almacenamiento de energía o respaldo de la red, la autosuficiencia completa puede ser difícil de lograr.

Además, muchos gobiernos ofrecen incentivos y subsidios para la instalación de sistemas solares, lo que reduce el costo inicial y mejora la rentabilidad de la inversión. Estos incentivos pueden variar en disponibilidad y magnitud con el tiempo y entre diferentes regiones, afectando potencialmente la viabilidad económica de los proyectos solares a largo plazo.

En cuanto a las aplicaciones, los paneles solares pueden instalarse en una variedad de ubicaciones y estructuras, desde techos residenciales hasta grandes plantas solares comerciales e industriales. Sin embargo, no todas las estructuras son adecuadas para la instalación de paneles solares, y las ubicaciones ideales pueden requerir estudios y modificaciones previas.

A pesar de estas desventajas, las ventajas de la energía solar fotovoltaica, como su sostenibilidad, su capacidad de reducir emisiones y su potencial para ofrecer independencia energética, la convierten en una opción atractiva para diversificar las fuentes de energía y avanzar hacia un futuro más sostenible.

## 1.6 Recurso solar en El Salvador

El recurso solar en El Salvador es altamente favorable para el aprovechamiento de tecnologías de generación fotovoltaica y solar térmica debido a su ubicación geográfica y condiciones climáticas.

El país recibe un promedio diario de radiación solar global que oscila entre 4.5 y 6.0 kWh/m<sup>2</sup>, lo que lo convierte en una región con un recurso solar significativo. Las zonas orientales y centrales tienden a presentar mayores niveles de radiación, mientras que las áreas montañosas del occidente pueden experimentar valores ligeramente inferiores debido a su topografía.

La ubicación de El Salvador cerca del ecuador, entre los 13° y 14° de latitud norte, permite que los rayos solares incidan casi perpendicularmente durante todo el año. Su clima tropical, dividido en una estación seca (noviembre a abril) y una lluviosa (mayo a octubre), influye en la disponibilidad de radiación solar. Durante la estación seca, los días son mayormente despejados, lo que favorece la captación solar. En la estación lluviosa, aunque la nubosidad reduce ligeramente la radiación, esta sigue siendo suficiente para sistemas solares bien diseñados.

El recurso solar en el país es relativamente constante durante todo el año, con variaciones mínimas entre estaciones. Los días despejados o parcialmente nublados representan más del 60% del año, y el índice de turbidez atmosférica es bajo, lo que reduce la dispersión de la radiación solar por partículas contaminantes. Esto asegura condiciones óptimas para la generación de energía solar en gran parte del territorio nacional.

El Salvador tiene un enorme potencial para expandir su capacidad de generación de energía solar y consolidar esta fuente como un pilar fundamental en su matriz energética. Esto no solo contribuiría a la diversificación de fuentes energéticas y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino también al desarrollo sostenible del país.

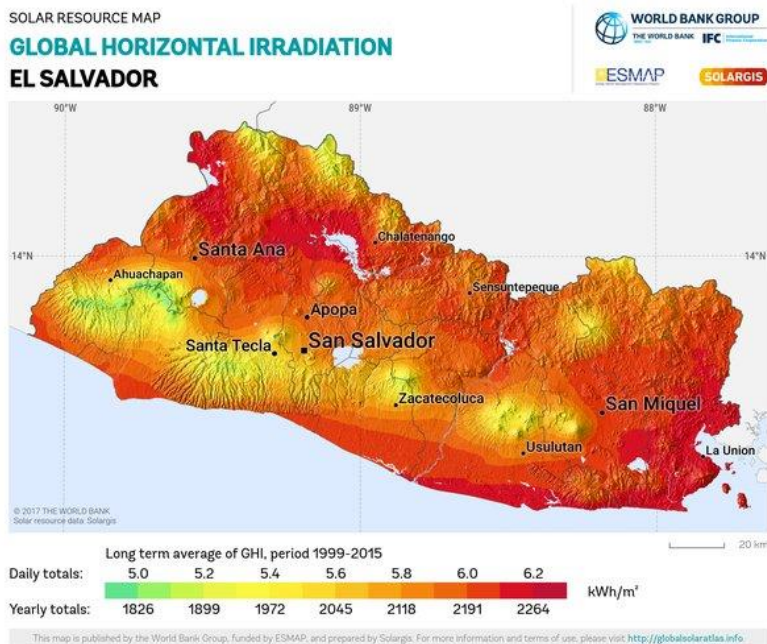


Ilustración 10. Irradiancia global horizontal en El Salvador. Fuente: Solargis

## 1.7 Integración de Sistemas Fotovoltaicos en Industrias

La integración de sistemas solares fotovoltaicos (FV) en procesos industriales presenta una oportunidad significativa para reducir costos operativos y mejorar la sostenibilidad. Sin embargo, la integración requiere un enfoque cuidadoso y técnico debido a las complejidades de los sistemas industriales.

### 1.7.1 Evaluación del Potencial Solar

Para determinar la viabilidad de un proyecto fotovoltaico en una planta industrial, es esencial realizar un análisis del recurso solar disponible. Este análisis implica la evaluación de la radiación solar en la ubicación específica de la planta. Utilizando datos históricos de radiación solar, como los proporcionados por servicios meteorológicos y bases de datos de energía solar, se puede estimar la cantidad de energía solar disponible durante diferentes épocas del año.

Se utilizan herramientas y software especializados como PVsyst, HelioScope y SAM (System Advisor Model) para simular el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Estas herramientas permiten modelar el impacto de sombras, inclinación de los paneles, orientación y otros factores que influyen en la eficiencia de los paneles solares.

También, es importante considerar factores locales como la geografía, el clima y las posibles obstrucciones (árboles, edificios cercanos, etc.) que podrían afectar la cantidad de luz solar recibida por los paneles. Además, se deben tener en cuenta las condiciones meteorológicas extremas (granizo, nieve, tormentas de arena) que podrían afectar la durabilidad y el rendimiento de los paneles.

### **1.7.2 Dimensionamiento y diseño**

El diseño del sistema fotovoltaico debe estar alineado con la demanda energética específica del lugar. Esto implica un análisis del consumo de energía, considerando tanto el consumo diario como los picos de demanda. Con base en el análisis del consumo energético, se calcula el tamaño del sistema fotovoltaico necesario para cubrir dicha demanda. Esto incluye determinar el número de paneles solares, la capacidad del inversor y otros componentes del sistema. El dimensionamiento debe considerar no solo la capacidad nominal del sistema, sino también las pérdidas de eficiencia y los factores de seguridad.

Las condiciones climáticas, como la variabilidad en la radiación solar diaria y estacional, deben ser consideradas en el diseño. En áreas con alta variabilidad climática, se puede necesitar un sistema de almacenamiento de energía (baterías) para asegurar un suministro constante de energía. Además, se debe considerar la resistencia de los equipos a las condiciones ambientales para garantizar una operación segura y duradera.

El diseño también debe optimizar el uso del espacio disponible en la planta industrial. Esto puede incluir la instalación de paneles solares en techos, paredes o terrenos adyacentes. La disposición de los paneles debe maximizar la exposición al sol y minimizar las sombras.



*Ilustración 11. integración de paneles solares en la industria. Fuente: ColdWell Solar*

## **1.8 Empresas con sistemas solares fotovoltaicos en el país**

El desarrollo y adopción de sistemas solares fotovoltaicos en El Salvador ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, impulsado por la necesidad de reducir costos energéticos, promover la sostenibilidad y disminuir la dependencia de fuentes de energía convencionales. Varias empresas en el país han optado por implementar estos sistemas como parte de sus estrategias para mejorar la eficiencia operativa, cumplir con estándares ambientales internacionales y aprovechar los incentivos gubernamentales para energías renovables.

Entre los proyectos más importantes están la planta solar de la empresa francesa Neoen, que instaló 320.000 paneles en el municipio de El Rosario de La Paz. Solo esta planta genera 101 Megavatios (MW) para inyectar a la red nacional.

La empresa de productos de papel Alas Doradas también desarrolla un proyecto para la construcción de un sistema de generación de energía solar a través de paneles solares. El sistema de energía renovable estará conformado por 12,760 paneles solares (ubicados en su planta de producción en el municipio de San Juan Opico) y una potencia total de 5.10 megawatts pico.

Otro ejemplo es el de Grupo Miguel, el cual comenzó a generar su propia energía eléctrica con una planta solar fotovoltaica que construyó con la instalación de 3,000 paneles en el tejado de una de las naves en donde opera una de las áreas de la empresa que se dedica a la producción textil. Con una potencia instalada de 1 megavatio (MW), puede generar hasta 1,600 MW en un año.

## **2. Aire comprimido**

El aire comprimido es aire a una presión superior a la atmosférica. Es exactamente el mismo aire que se respira, pero reducido a un volumen inferior y mantenido a presión. Este se puede almacenar a alta presión y es un medio de transmisión de energía excepcional. El aire comprimido es una fuente de energía muy popular porque es más sencillo y seguro que otras opciones, como el vapor o las baterías. El vapor es peligroso por su alta temperatura y las baterías se pueden descargar.

### **2.1 Historia de los sistemas de aire comprimido**

Los compresores de aire se emplean en muchas industrias para proporcionar aire comprimido presurizado en diversas aplicaciones, siendo fundamentales en la construcción y la industria. Sin embargo, su uso no siempre fue así. El primer "compresor de aire" fue el pulmón humano, utilizado por nuestros antepasados para avivar fogatas exhalando. Esta práctica comenzó a disminuir alrededor del 3000 A.C., con el auge de la metalurgia. Cuando empezaron a fundir metales como el oro y el cobre, se percataron de que se necesitaban temperaturas más elevadas que las que un ser humano podía generar con su aliento, ya que nuestros pulmones solo pueden producir entre 0.02 y 0.08 bar de presión, lo cual era insuficiente y el dióxido de carbono exhalado no ayudaba. En el año 1500 D.C., se inventó un compresor de aire más avanzado que consistía en una bolsa flexible que al comprimirse generaba aire a presión, manteniendo las altas temperaturas necesarias. En 1762, John Smeaton diseñó un cilindro soplador impulsado por energía hidráulica, que poco a poco reemplazó a su predecesor. A pesar de su eficiencia, fue sustituido por una máquina creada por John Wilkinson en 1776, la cual sirvió de base para los compresores mecánicos posteriores. Estos compresores comenzaron a utilizarse en minería y ventilación subterránea y, en 1857, fueron

esenciales en la construcción del túnel de 13 kilómetros del sistema de trenes Italia-Francia. Para 1888, el ingeniero Viktor Popp estableció la primera planta de compresores, incrementando su capacidad rápidamente de 1,500 kW a 18,000 kW en tres años.

## 2.2 Componentes de los sistemas de producción, tratamiento y distribución de aire comprimido

Un sistema de aire comprimido industrial es una red compleja de componentes diseñados para generar, tratar, almacenar y distribuir aire comprimido a diversas aplicaciones dentro de una planta de producción. La eficiencia, fiabilidad y rendimiento del sistema dependen en gran medida de la correcta selección y mantenimiento de cada uno de sus componentes.

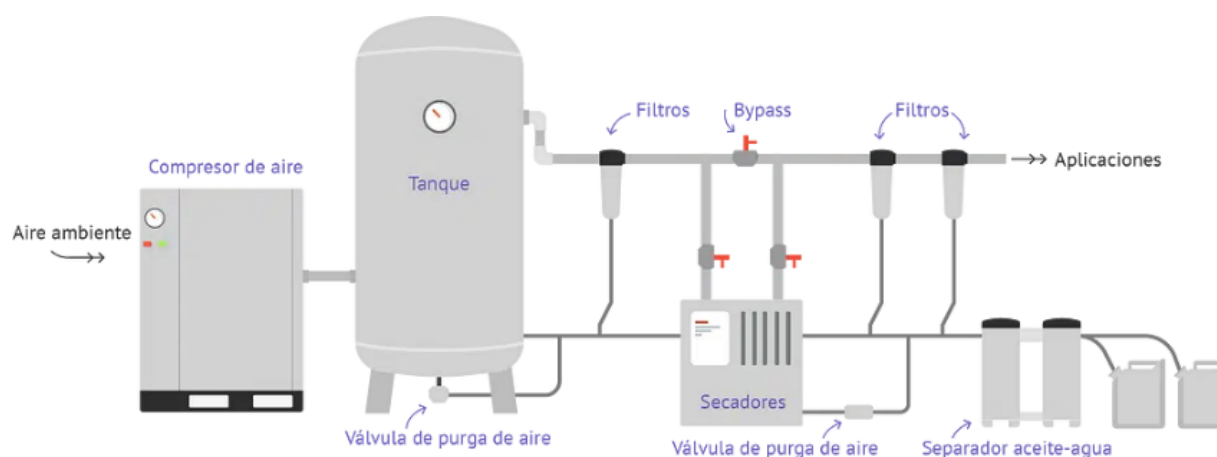


Ilustración 12. componentes de un sistema de aire comprimido. Fuente: Metron Energy

### 2.2.1 Compresor

Los compresores son dispositivos diseñados para aumentar la presión de un volumen de aire a un nivel específico, con el fin de realizar un trabajo. Estas tareas se pueden categorizar de dos formas:

- a) **Desplazamiento Positivo:** El principio de desplazamiento positivo se basa en la reducción del volumen de aire en una cámara cerrada, lo que incrementa su presión. Este proceso se

lleva a cabo mediante pistones, diafragmas, o tornillos giratorios, que comprimen el aire dentro de un espacio cada vez más pequeño. A medida que el aire se comprime, su presión aumenta hasta alcanzar un nivel suficiente para abrir una válvula de descarga. Esta válvula permite que el aire comprimido sea liberado hacia el sistema o hacia un almacenamiento. Los compresores de desplazamiento positivo se caracterizan por su capacidad de generar altas presiones y se usan en aplicaciones industriales, como herramientas neumáticas y el inflado de neumáticos.

- b) **Desplazamiento Dinámico:** El desplazamiento dinámico, también conocido como compresión continua, convierte la energía cinética en energía de presión. En estos compresores, el aire es acelerado a través de impulsores que giran a alta velocidad, lo que incrementa su energía cinética. A continuación, el aire pasa por difusores, que son conductos diseñados para desacelerar el flujo de aire. Al reducir la velocidad del aire, la energía cinética se convierte en energía de presión, elevando así la presión del aire. Los compresores de desplazamiento dinámico son ideales para aplicaciones que requieren un flujo continuo de aire a altas velocidades, como en la ventilación industrial, los motores de aviones y las plantas de generación de energía.

Tabla 2. Tipos de compresores de aire

Tipo de Compresor	Subdivisión	Descripción	Usos
<b>Desplazamiento Positivo</b>	Compresores de Pistón	Utilizan pistones para comprimir aire.	Talleres mecánicos, industria automotriz, equipos médicos.
	De Simple Efecto	Comprimen aire en un solo lado del pistón.	Herramientas neumáticas, inflado de neumáticos.
	De Doble Efecto	Comprimen aire en ambos lados del pistón.	Aplicaciones industriales de alta demanda de aire, sistemas de aire comprimido central.
	Compresores de Diafragma	Usan un diafragma flexible, ideales para aire libre de aceite.	Industria farmacéutica, procesamiento de alimentos.
	Compresores Rotativos	Utilizan mecanismos rotativos para comprimir aire.	Sistemas de aire acondicionado, herramientas neumáticas, manufactura.
	Compresores de Tornillo	Utilizan dos tornillos helicoidales opuestos.	Industria de manufactura, talleres de pintura, aplicaciones de alta demanda
	Compresores de Paletas	Utilizan paletas deslizantes en un rotor.	Equipos médicos, aplicaciones de baja a media presión, sistemas de refrigeración.
	Compresores de Lóbulos (Roots)	Utilizan lóbulos giratorios para atrapar y comprimir aire.	Procesamiento químico, transporte neumático, sistemas de vacío.
	Compresores de Anillo Líquido	Utilizan un anillo de líquido para comprimir el aire.	Industrias químicas, petroquímicas, procesamiento de alimentos, aplicaciones con gases húmedos.
<b>Desplazamiento Dinámico</b>	Compresores Centrífgos	Utilizan impulsores para acelerar y comprimir aire.	Plantas de generación de energía, grandes sistemas de HVAC, industria petroquímica.
	De Una Etapa	Comprimen el aire en una sola etapa.	Sistemas de ventilación, procesos industriales con demanda de aire constante y moderada.
	De Múltiples Etapas	Utilizan varios impulsores en serie para mayores presiones.	Plantas de tratamiento de agua, aplicaciones de alta presión, procesos industriales complejos.
	Compresores Radiales	Subdivisión que dirige el flujo de aire hacia el exterior.	Grandes sistemas de ventilación, aplicaciones industriales de alta capacidad.
	Compresores Axiales	Utilizan álabes estacionarios y giratorios para aumentar la presión del aire.	Motores de aeronaves, plantas de energía, sistemas de ventilación de gran escala.
	De Flujo Axial	Manejan grandes volúmenes de aire, usados en aplicaciones aeroespaciales.	Motores a reacción, compresores de aire para turbinas, aplicaciones aeroespaciales y de defensa.

### 2.2.2 Secador de aire

El secado con aire comprimido es una parte muy importante del proceso de tratamiento. Lo que ocurre en un compresor tras la fase de compresión y el posterior enfriamiento en un refrigerador es crucial para el ciclo de vida de todo el sistema: el vapor de agua del aire comprimido se condensa y precipita. Un compresor de 30 kW con una capacidad de 5 m<sup>3</sup>/min a 7,5 bar que funcione en condiciones estándar producirá aproximadamente 20 litros de condensado por turno. Esta agua debe eliminarse del sistema de distribución para evitar daños en los equipos y los consiguientes problemas de producción.

El único sistema eficaz para eliminar el agua del aire comprimido es mediante la instalación de un secador. Al incorporar un secador a un sistema neumático se reduce la temperatura de punto de rocío del aire comprimido, generando la condensación del vapor de agua existente para su posterior eliminación. Una vez que el aire comprimido ha circulado por el secador reduciendo el valor de su temperatura de punto de rocío, podemos asegurar que no se producirán nuevos condensados si la temperatura del aire comprimido no disminuye por debajo de la temperatura de punto de rocío a la que ha enfriado el secador.

Los tres tipos principales de secadores para aire comprimido son los secadores frigoríficos, los secadores desecantes y los secadores de membrana.

- a) **Secador frigorífico:** realizan un enfriamiento del aire comprimido directamente mediante un intercambiador y un circuito de gas refrigerante, ya que la temperatura de punto de rocío en estos secadores nunca es menor de +2°C. En general, para los requerimientos de calidad del aire comprimido de la mayoría de las aplicaciones neumáticas es suficiente con la instalación de un secador frigorífico que mantenga una temperatura del punto de rocío a presión de +3°C.



*Ilustración 13. secador frigorífico. Fuente: Kaeser Compresores*

- b) **Secadores desecantes:** hacen pasar el aire comprimido por un lecho de material desecante que absorbe las moléculas de vapor de agua. Cuando la capacidad del lecho está casi saturada, el flujo de aire pasa a un segundo lecho de material desecante. El primer lecho se regenera entonces. Se pueden utilizar temporizadores o equipos de control del punto de rocío para controlar la fase de regeneración. Los secadores desecantes pueden suministrar aire a puntos de rocío constantemente bajos, normalmente  $-40^{\circ}\text{F}/^{\circ}\text{C}$  o menos. Esta tecnología es una buena opción cuando el aire comprimido está sujeto a condiciones de congelación.



*Ilustración 14. secador desecante. Fuente: Kaeser Compresores*

- c) **Secadores de membrana:** usan microtubos de membrana formulados selectivamente permeables al vapor de agua. Los microtubos proporcionan un medio excelente para

producir aire seco a partir de aire comprimido estándar. A medida que el aire comprimido viaja a lo largo de la membrana, el vapor de agua se difunde a través de la membrana, produciendo aire comprimido limpio y seco en la salida. Una pequeña fracción del aire seco se dirige entonces a lo largo de la superficie exterior de la membrana para barrer el aire cargado de humedad de la membrana. Estos secadores pueden reducir el punto de rocío del aire comprimido hasta  $-40^{\circ}\text{F}/^{\circ}\text{C}$ .



Ilustración 15. secador de aire de membrana. Fuente: Kaeser Compresores

Tabla 3. Tipos de secadores de aire comprimido

Tipo de Secador	Descripción	Usos Comunes
<b>Secadores Refrigerativos</b>	Enfrían el aire comprimido para condensar y eliminar la humedad en forma de agua. Mantienen un punto de rocío típico entre $2^{\circ}\text{C}$ y $10^{\circ}\text{C}$ .	Aplicaciones generales donde no se requiere un nivel extremadamente bajo de humedad, como en talleres y manufactura.
<b>Secadores de Adsorción</b>	Utilizan materiales desecantes (como alúmina o gel de sílice) para absorber la humedad. Alcanzan puntos de rocío de hasta $-40^{\circ}\text{C}$ o menores.	Industrias farmacéuticas, alimenticias y químicas que requieren aire comprimido extremadamente seco.
<b>Secadores de Membrana</b>	Emplean fibras permeables que permiten la salida de vapor de agua mientras retienen el aire comprimido.	Sistemas pequeños o portátiles, laboratorios y aplicaciones que requieren bajos niveles de humedad sin necesidad de mantenimiento intensivo.

### 2.2.3 Filtros

Los filtros desempeñan un papel importante en el proceso de tratamiento del aire comprimido. Dependiendo de la aplicación, los estrictos estándares de pureza requieren la eliminación de una amplia variedad de contaminantes, incluidos los aerosoles y vapores de hidrocarburos. Existen distintos tipos de filtros en función de la clase de filtración, dependiendo de los materiales y la estructura de los elementos filtrantes. Dentro de las distintas categorías de filtros para aire comprimido se encuentran las siguientes: filtros cerámicos, filtros separadores de agua, filtros coalescentes de distintos grados de filtración, filtros y torres de carbón activo, y filtros estériles y de vapor.

- a) **Filtros Cerámicos:** se utilizan con compresores alternativos de pistón, donde hay una mala calidad del aire comprimido. Los elementos filtrantes son bujías cerámicas y su capacidad de filtrado es superior a 5 micras.
- b) **Filtros Separadores de Agua:** se utilizan para eliminar grandes cantidades de condensado, como por ejemplo la que se genera en los refrigeradores posteriores de los compresores provocada por el enfriamiento del aire comprimido. Estos filtros en la mayoría de los casos no llevan elementos filtrantes, produciéndose mecánicamente la separación del condensado al circular el aire comprimido por un difusor centrífugo que provoca su precipitación en la base del filtro para ser eliminada posteriormente.
- c) **Filtros Coalescentes:** se utilizan principalmente para eliminar partículas e hidrocarburos conforme a su grado de filtración, aunque también eliminan parte de la humedad del aire comprimido. Su capacidad de filtrado de partículas comprende desde 5 micras hasta 0,01 micras, y en hidrocarburos desde 3 mg/m<sup>3</sup> hasta 0,005 mg/m<sup>3</sup>.

- d) **Filtros y Torres de Carbón Activo:** se utilizan para la eliminación de vapores y olores de hidrocarburos. Su capacidad de filtración es para un contenido residual de aceite de hasta 0,003 mg/m<sup>3</sup>. Los filtros y las torres de carbón activo deben ir precedidos por filtros coalescentes para evitar que se saturen rápidamente.
- e) **Filtros Estériles y de Vapor:** se utilizan para la retención de bacterias, virus y otros microorganismos. Para asegurar la esterilidad de los elementos filtrantes es necesario esterilizarlos con regularidad con vapor saturado a alta temperatura, para lo que se utilizan los filtros de vapor con el fin de garantizar la máxima seguridad del proceso. También se puede realizar la esterilización mediante un autoclave.

Tabla 4. Tipos de filtros para sistemas de aire comprimido

Tipo de Filtro	Descripción	Usos Comunes
<b>Filtros Coalescentes</b>	Eliminan partículas de aceite, agua y aerosoles en el aire comprimido mediante la unión de gotas más pequeñas en gotas más grandes para su fácil eliminación.	Industrias alimenticias, farmacéuticas y automotrices donde es crucial reducir aerosoles de aceite y agua.
<b>Filtros Particulados</b>	Retienen partículas sólidas como polvo, óxido o desechos de las tuberías en el aire comprimido.	Aplicaciones generales, mantenimiento de sistemas y protección de equipos aguas abajo.
<b>Filtros de Carbón Activado</b>	Adsorben vapores de aceite, olores y otros contaminantes gaseosos, garantizando aire comprimido limpio y libre de olores.	Industria alimentaria, química y electrónica donde el aire debe estar libre de contaminantes gaseosos.
<b>Filtros de Alta Temperatura</b>	Diseñados para soportar temperaturas elevadas mientras eliminan contaminantes sólidos, líquidos o vapores.	Aplicaciones de aire comprimido en procesos de alta temperatura como fundición y metalurgia.
<b>Filtros Estériles</b>	Proporcionan aire comprimido estéril al eliminar microorganismos y bacterias mediante membranas finas.	Industrias farmacéuticas, médicas y de alimentos donde la esterilidad del aire es crítica.
<b>Filtros de Separación de Agua</b>	Separan agua líquida del aire comprimido mediante procesos centrífugos o de impacto mecánico.	Sistemas generales de aire comprimido donde se busca reducir la humedad en el sistema.
<b>Filtros de Absorción</b>	Utilizan materiales higroscópicos para eliminar humedad residual del aire comprimido.	Usados en procesos que requieren aire extremadamente seco, como laboratorios y líneas de pintura.

### 2.2.4 Controles y sensores

Los sistemas de control de compresores de aire son esenciales para optimizar la eficiencia, el rendimiento y la fiabilidad del equipo. Existen varios tipos de sistemas de control, cada uno diseñado para diferentes necesidades y aplicaciones. A continuación, se presenta un resumen de diferentes sensores y controladores que se pueden encontrar:

Tabla 5. Tipos de controladores y sensores

<b>Tipo de Sensor/Controlador</b>	<b>Descripción</b>	<b>Usos Comunes</b>
<b>Sensores de Presión</b>	Miden la presión del aire comprimido en diferentes puntos del sistema para asegurar niveles óptimos.	Monitoreo y control de presión en compresores, redes de distribución y equipos finales.
<b>Sensores de Caudal</b>	Detectan el flujo de aire comprimido para medir el consumo y detectar fugas o ineficiencias.	Gestión de consumo energético, optimización de procesos y detección de fugas en sistemas complejos.
<b>Sensores de Temperatura</b>	Miden la temperatura del aire comprimido para evitar sobrecalentamiento en compresores o secadores.	Protección de equipos como compresores, secadores y tuberías, y monitoreo en aplicaciones sensibles.
<b>Sensores de Humedad</b>	Detectan la cantidad de vapor de agua presente en el aire comprimido para garantizar aire seco.	Usados en sistemas con secadores para asegurar niveles adecuados de humedad, especialmente en industrias farmacéuticas y electrónicas.
<b>Controladores Electrónicos de Compresores</b>	Automatizan el funcionamiento del compresor ajustando su rendimiento según la demanda de aire comprimido.	Optimización energética, reducción de costos operativos y mantenimiento predictivo en compresores industriales.
<b>Controladores de Red de Aire</b>	Gestionan la operación de varios compresores en una red, priorizando la eficiencia del sistema completo.	Utilizados en sistemas con múltiples compresores para garantizar un balance entre demanda y eficiencia energética.
<b>Sensores de Nivel de Aceite</b>	Monitorean los niveles de aceite en los compresores para prevenir daños por falta de lubricación.	Protección y mantenimiento de compresores lubricados, asegurando su operación continua y eficiente.
<b>Sensores de Vibración</b>	Detectan vibraciones anómalas en compresores y equipos asociados, indicando problemas mecánicos.	Mantenimiento predictivo y prevención de fallos mecánicos en compresores y sistemas auxiliares.
<b>Controladores de Descarga Automática</b>	Automatizan la purga de condensados en secadores y filtros, evitando acumulación de agua y contaminantes.	Mejora de la eficiencia y protección de sistemas de aire comprimido contra acumulación de humedad y residuos.

### 2.2.5 Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento, o depósitos de aire, tienen la capacidad de acumular el volumen de aire comprimido suficiente para abastecerlo cuando es necesario y así mantener una presión estable en la red de aire comprimido, independientemente de la variabilidad de demanda que requiere el compresor.

Deben usarse en todos los sistemas de aire comprimido, pero son más efectivos cuando se trata de equipos que operan con un flujo de aire comprimido variable, o bien cuando ocurren picos de consumo de forma intermitente. En estos escenarios, se puede usar un compresor más pequeño junto con un acumulador grande para una mejor eficiencia y control de la capacidad requerida. Los tanques de aire también se pueden utilizar para controlar los picos de demanda en el sistema de aire comprimido reduciendo la caída de presión, proteger los elementos internos y dispositivos cuando son sometidos a presiones críticas del sistema y disponer de una reserva de aire comprimido para consumos instantáneos.

La red de aire comprimido puede tener una de estas unidades entre el compresor y el secador, después del secador, o ser instalado en ambas ubicaciones. La mejor práctica recomendada es tener un tanque de control antes del secador. Y además, ubicar un receptor seco después del secador y del filtro para favorecer la capacidad del receptor principal.

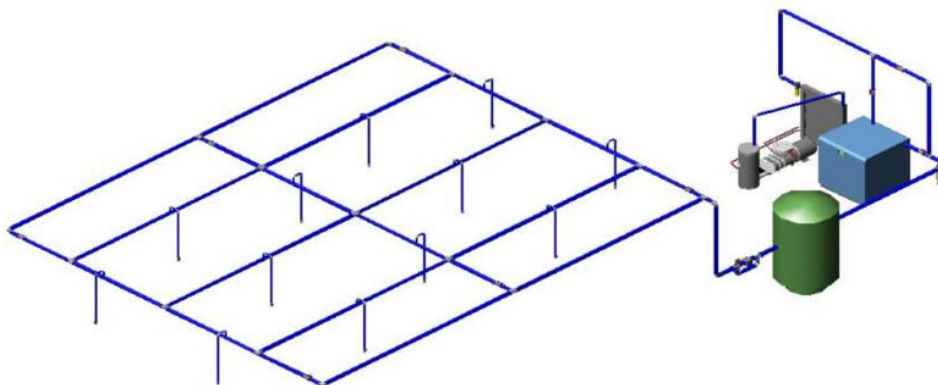


*Ilustración 16. Tanque de aire comprimido. Fuente: Kaeser Compresores.*

### 2.2.6 Red de distribución

La red de distribución es el conjunto de tuberías que conduce el aire comprimido a todos los elementos del circuito neumático. Después de salir del compresor, el aire debe transportarse hasta los puntos de aplicación y esto se hace a través de la red de aire comprimido. En la red de aire existen la red principal, que es la encargada de transportar todo el caudal de aire que se necesita en la planta y la presión máxima que entrega el compresor, y la red secundaria, que es la que entrega el aire comprimido al punto de aplicación o punto de trabajo. La red secundaria es de menor diámetro porque solo transporta el caudal que necesita la aplicación.

Existen tres tipos principales de redes de distribución de aire comprimido. La red abierta es económica debido a su menor longitud de mangueras, ya que cuenta con una línea principal y ramificaciones hacia los puntos de consumo. La red cerrada, con disposición en anillo, permite aislar estaciones para mantenimiento sin afectar al resto, aunque su instalación puede ser más compleja debido a cambios en la dirección del flujo, lo que podría inutilizar ciertos equipos. Por último, la red mixta, una combinación de las anteriores, cuenta con una línea principal cerrada en un extremo y múltiples puntos de conexión, aprovechando las ventajas de ambos sistemas.



*Ilustración 17. Red de distribución de aire comprimido. Fuente: Ingeniería Eléctrica Integral*

Las tuberías que se utilizan para transportar aire comprimido están disponibles en distintos materiales, como plástico, acero y aluminio, entre otros. Si bien el acero ha sido el material de instalación más tradicional y con el que mayor experiencia se ha acumulado, hoy en día los instaladores disponen de cinco tipos de cañerías para la distribución de aire comprimido.

- a) **Acero galvanizado:** Es el material más común debido a la familiaridad de los instaladores y su revestimiento que protege contra el óxido. Sin embargo, tiene un alto factor de fricción que aumenta la caída de presión, es susceptible a corrosión con obstrucciones peligrosas, y su instalación requiere expertos debido a su peso y dificultad para maniobrar.
- b) **Acero inoxidable:** Su principal ventaja es la resistencia total a la corrosión interna y externa, siendo ideal para industrias con estrictos requisitos, como farmacéutica, hospitales y laboratorios. También es aprobado por la NFPA para sistemas de vacío en centros de salud.
- c) **Aluminio:** Es liviano, fácil de instalar, anticorrosivo y eficiente debido a su interior liso, lo que reduce las pérdidas de carga y el costo de propiedad. Además, es versátil para reconfigurar instalaciones.
- d) **Cobre:** Es resistente a la corrosión, fácil de cortar y soldar, y liviano. No obstante, su instalación es costosa y requiere más material en grandes sistemas debido a su alta dilatación. Es preferido en aplicaciones médicas por inhibir microorganismos y en diámetros pequeños por su costo.
- e) **Plástico:** Es económico, resistente a la corrosión y fácil de instalar, pero peligroso en sistemas de aire comprimido, especialmente el PVC, que puede explotar bajo presión. Su uso está prohibido por normas como las de la OSHA debido a riesgos de seguridad.

## 2.3 Factores para tomar en cuenta en el dimensionamiento de un sistema de aire comprimido

El dimensionamiento de un sistema de aire comprimido requiere considerar varios factores clave para asegurar que el sistema funcione de manera eficiente y eficaz. A continuación, se detallan estos factores:

- a) **Demanda de aire comprimido:** es crucial evaluar la demanda de aire comprimido de la planta de producción. Esto incluye identificar todas las herramientas y equipos que utilizan aire comprimido y calcular su consumo total. Es importante considerar tanto la demanda promedio como los picos de demanda para dimensionar el sistema adecuadamente. Además, se debe tener en cuenta la posibilidad de expansión futura de la planta, lo que podría aumentar la demanda de aire comprimido.
- b) **Presión de operación:** cada herramienta y máquina tiene requisitos específicos de presión para funcionar correctamente. Se debe dimensionar el compresor y los componentes del sistema (como las tuberías y los recipientes de aire) para mantener una presión constante y adecuada en todo el sistema, incluso durante los picos de demanda.
- c) **Calidad del aire:** dependiendo de las aplicaciones específicas, puede ser necesario eliminar contaminantes como agua, aceite y partículas sólidas. Esto implica la inclusión de secadores, filtros y otros dispositivos de tratamiento de aire en el sistema. La calidad del aire requerida puede variar significativamente según la industria y las aplicaciones específicas, por lo que es importante diseñar el sistema para cumplir con estos requisitos.
- d) **Eficiencia energética:** Optimizar la eficiencia energética del sistema de aire comprimido puede generar ahorros significativos en costos operativos. Esto incluye seleccionar

compresores eficientes, minimizar las pérdidas por fugas, y utilizar sistemas de control avanzados para ajustar la producción de aire comprimido según la demanda real.

- e) **Diseño del sistema de tuberías:** es fundamental considerar el diseño del sistema de tuberías para minimizar las pérdidas de presión y garantizar una distribución eficiente del aire. Las tuberías deben tener el diámetro adecuado y estar dispuestas de manera que reduzcan las caídas de presión. Es importante evitar las curvas cerradas y las conexiones innecesarias que pueden aumentar la resistencia al flujo del aire.
- f) **Capacidad de almacenamiento:** importante para manejar los picos de demanda y estabilizar la presión en el sistema. Un tanque de almacenamiento adecuado permite que el compresor opere de manera más eficiente al reducir la necesidad de ciclos de encendido y apagado frecuentes. Además, proporciona un suministro constante de aire comprimido durante los períodos de alta demanda.
- g) **Mantenimiento y confiabilidad:** un sistema bien dimensionado debe ser fácil de mantener y debe incluir componentes de alta calidad que reduzcan el riesgo de fallos y paradas no planificadas. Incluir un plan de mantenimiento preventivo y seleccionar equipos con buenas garantías y soporte técnico es esencial para asegurar el funcionamiento continuo y eficiente del sistema.

## **2.4 Consumo Energético de los Sistemas de Aire Comprimido Industriales**

Los sistemas de aire comprimido son fundamentales en diversas aplicaciones industriales debido a su versatilidad y capacidad para proporcionar energía neumática a herramientas y procesos. Sin embargo, estos sistemas son conocidos por ser grandes consumidores de energía, representando una parte significativa del consumo total de energía en muchas plantas de producción. En este

apartado, se analizará el consumo energético de los sistemas de aire comprimido industriales, sus implicaciones económicas y ambientales, y se identificarán oportunidades para mejorar la eficiencia energética.

### 2.4.1 Características del Consumo Energético

El consumo energético de un sistema de aire comprimido industrial se ve afectado por varios factores, incluyendo la eficiencia del compresor, la demanda de aire comprimido, la presión de operación y la calidad del mantenimiento del sistema. A continuación, se detallan las características clave del consumo energético en estos sistemas:

- a) **Eficiencia del Compresor:** La eficiencia del compresor es un factor crítico que determina la cantidad de energía eléctrica necesaria para producir una determinada cantidad de aire comprimido. Los compresores de tornillo rotativo y de pistón son los tipos más comunes, cada uno con diferentes niveles de eficiencia. Los compresores modernos con tecnología de velocidad variable (VSD) pueden ajustar su funcionamiento según la demanda, lo que mejora la eficiencia energética.
- b) **Demanda de Aire Comprimido:** La demanda de aire comprimido puede variar significativamente a lo largo del tiempo, dependiendo de los procesos y operaciones de la planta. Es crucial dimensionar adecuadamente el sistema para satisfacer tanto la demanda base como los picos de demanda sin sobredimensionar el equipo. La implementación de sistemas de control avanzados que modulen la producción de aire según la demanda puede resultar en ahorros energéticos sustanciales.
- c) **Pérdidas de Energía:** Las pérdidas de energía en los sistemas de aire comprimido pueden ocurrir debido a fugas, caídas de presión en las tuberías, y eficiencia subóptima de los

equipos. Las fugas son una de las principales fuentes de desperdicio de energía, pudiendo representar hasta el 30% del aire comprimido producido. Mantener un programa regular de detección y reparación de fugas, así como optimizar el diseño de las tuberías, puede reducir significativamente estas pérdidas.

- d) **Operación y Mantenimiento:** Un mantenimiento adecuado del sistema de aire comprimido es esencial para mantener su eficiencia energética. Esto incluye la limpieza regular de filtros, la revisión y ajuste de las válvulas, y la calibración de los controladores. Los sistemas que no reciben mantenimiento regular tienden a ser menos eficientes y consumen más energía para producir la misma cantidad de aire comprimido.

#### 2.4.2 Implicaciones Económicas y Ambientales

El consumo energético de los sistemas de aire comprimido tiene importantes implicaciones económicas y ambientales. Desde el punto de vista económico, la energía eléctrica utilizada por estos sistemas puede representar una parte significativa de los costos operativos de una planta industrial. La implementación de medidas de eficiencia energética no solo puede reducir estos costos, sino que también puede mejorar la competitividad de la empresa.

Desde una perspectiva ambiental, reducir el consumo de energía en los sistemas de aire comprimido contribuye a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la generación de electricidad. Esto es particularmente relevante en regiones donde la electricidad proviene principalmente de fuentes no renovables. Para mejorar la eficiencia energética de los sistemas de aire comprimido, se pueden considerar varias estrategias y tecnologías:

- a) **Optimización del Diseño del Sistema:** Un diseño adecuado que minimice las caídas de presión y maximice la eficiencia del flujo de aire puede reducir el consumo

- energético. El uso de componentes de alta eficiencia, como compresores con tecnología VSD y secadores de aire eficientes, también contribuye a mejorar la eficiencia del sistema.
- b) **Gestión de la Demanda:** Implementar sistemas de gestión de la demanda de aire comprimido que ajusten la producción de acuerdo con las necesidades reales puede evitar el desperdicio de energía. La realización de auditorías energéticas periódicas puede identificar oportunidades para optimizar el uso del aire comprimido.
  - c) **Mantenimiento Preventivo y Correctivo:** Establecer un programa de mantenimiento regular que incluya la inspección y reparación de fugas, así como la limpieza y reemplazo de filtros, puede mantener el sistema operando a su máxima eficiencia. La capacitación del personal en prácticas de mantenimiento eficientes y en la detección de problemas comunes puede aumentar la vida útil del equipo y reducir el consumo energético.

### 3. Análisis del sistema de aire comprimido.

#### 3.1 Información de la empresa y plantas de producción

Fundada en 1984 como una imprenta, entró en el mercado del cartón corrugado en 1999, cuando se realizaron inversiones significativas para adquirir la tecnología necesaria para entrar en esa industria. Su misión es contribuir al desarrollo de El Salvador, ofreciendo a la industria nacional e internacional materiales de empaque de calidad, a un precio justo y en el tiempo adecuado para satisfacer las necesidades de sus clientes. Su política de calidad se centra en ofrecer soluciones de empaque a la industria en general para la preservación y presentación de sus productos, satisfaciendo sus necesidades y expectativas.



*Ilustración 18. logo de la empresa. Fuente: RUA, S.A. de C.V.*

La empresa está ubicada en el Centro Industrial DAMSA, Soyapango, El Salvador y está compuesta por cuatro plantas, cada una especializada en diferentes aspectos del proceso de producción y reciclaje de cartón. La planta de papel alberga dos máquinas MP, encargadas de generar bobinas de papel cuenta con maquinaria dedicada al reciclaje de cartón, que abarca desde el molino y la limpieza de fibra hasta la elaboración de pasta, culminando con la producción de bobinas de papel el proceso no solo permite la reutilización de materiales, sino que también garantiza la sostenibilidad y eficiencia en la producción.

La planta de corrugado es esencial para la creación de láminas de cartón que alimenta tanto la planta de cartón como la planta de plegadizo. Está equipada con una corrugadora que produce láminas de cartón con diferentes tipos de flautas, adaptándose a las necesidades específicas de

resistencia y flexibilidad de los clientes. Estas láminas alimentan las otras maquinarias de la planta, asegurando un flujo continuo y eficiente en la producción la planta cuenta con dos impresoras que permiten personalizar los productos según las especificaciones del cliente, mejorando así el valor agregado del producto final.

La planta de plegadizo, utilizando el cartón proporcionado por la planta de corrugado, se especializa en la fabricación de diversos tipos de cajas, está equipada con maquinaria para la fabricación de láminas de cartón, incluyendo equipos de impresión, plegadoras y cortadoras, asegurando que cada caja esté perfectamente terminada y lista para su uso. La maquinaria de esta planta permite la personalización y adaptación de los productos a las necesidades específicas de los clientes, asegurando un alto nivel de calidad y satisfacción.

### **3.2 Importancia del sistema de aire comprimido en la planta de cartón corrugado**

Una planta corrugadora de papel se dedica a la producción de cartón corrugado, ampliamente utilizado en embalajes y cajas. El proceso de corrugado del papel involucra varias etapas clave. En primer lugar, se utilizan grandes bobinas de papel kraft, que se desenrollan y se alimentan en la máquina corrugadora. Luego, el papel pasa a través de rodillos corrugadores que le dan la forma ondulada característica del cartón corrugado. Estos rodillos están calentados para facilitar el moldeado del papel. La onda de papel se adhiere entre dos capas de papel liso (liners) mediante un adhesivo a base de almidón, aplicado en las crestas de las ondas de papel. La estructura recién formada pasa por una serie de rodillos calentados que ayudan a secar y curar el adhesivo, asegurando una unión fuerte y duradera. Posteriormente, el cartón corrugado se corta a las dimensiones necesarias utilizando cuchillas y sistemas de corte rotativo. Finalmente, las planchas de cartón corrugado se apilan y empaquetan para su envío o almacenamiento.

El aire comprimido es vital en varios puntos del proceso de producción del cartón corrugado. Los rodillos y prensas de la máquina corrugadora se controlan mediante sistemas neumáticos que utilizan aire comprimido. Estos sistemas aseguran que los rodillos mantengan la presión adecuada para formar y adherir el papel corrugado. El aire comprimido también se utiliza para atomizar y aplicar el adhesivo de manera uniforme en las crestas de las ondas de papel. Además, las cuchillas y sistemas de corte a menudo se operan neumáticamente, y el aire comprimido se utiliza para mover y transportar las planchas de cartón corrugado a través de la línea de producción.

Sistemas neumáticos pueden ser utilizados en equipos de inspección y control de calidad, para asegurar que el producto final cumpla con los estándares establecidos. El aire comprimido es fundamental para mantener las máquinas libres de polvo y residuos de papel, lo cual es esencial para el buen funcionamiento y la longevidad de los equipos. Sin aire comprimido, muchas de las funciones automáticas y precisas de la planta serían difíciles de realizar.

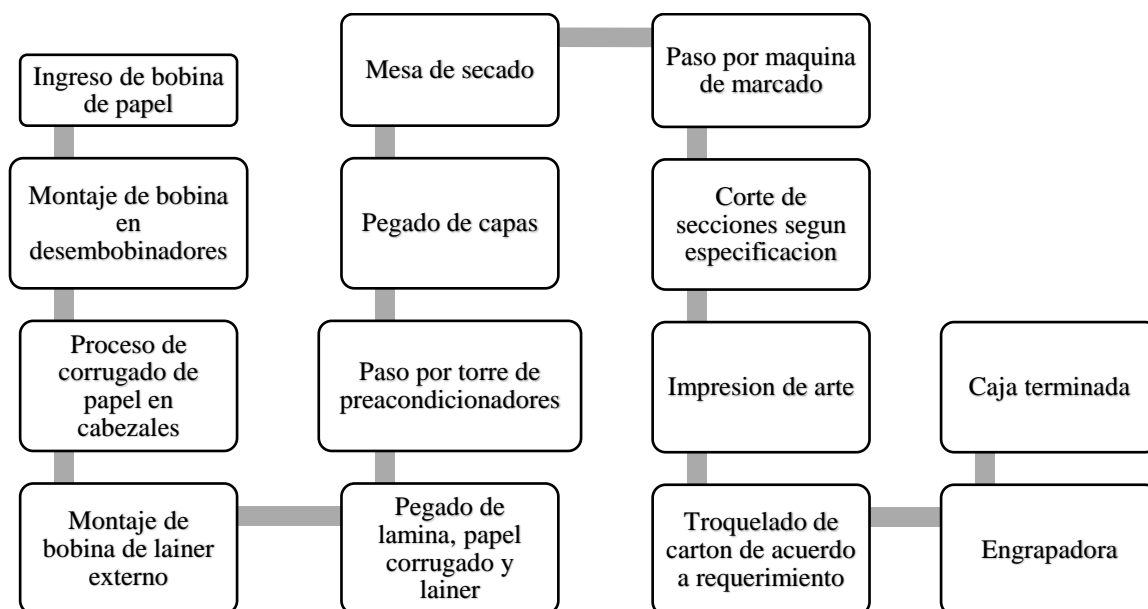


Ilustración 19. Proceso de producción de cartón corrugado. Fuente: elaboración propia.

### 3.3 Descripción del sistema de aire comprimido de la planta de cartón corrugado

La planta de cartón corrugado está compuesta por seis cabezales de corrugadora de cartón, una maquina impresora, una mesa de secado y una bomba de diafragma para reutilización de agua. Esta es alimentada por tres compresores de aire comprimido, cuya capacidad de salida en conjunto es de 240 CFM. El aire pasa a un tanque húmedo con una capacidad de 500 L y posteriormente es tratado por una unidad de secado incorporada en un compresor y por dos secadores externos. No se cuenta con un tanque de almacenamiento de aire seco.

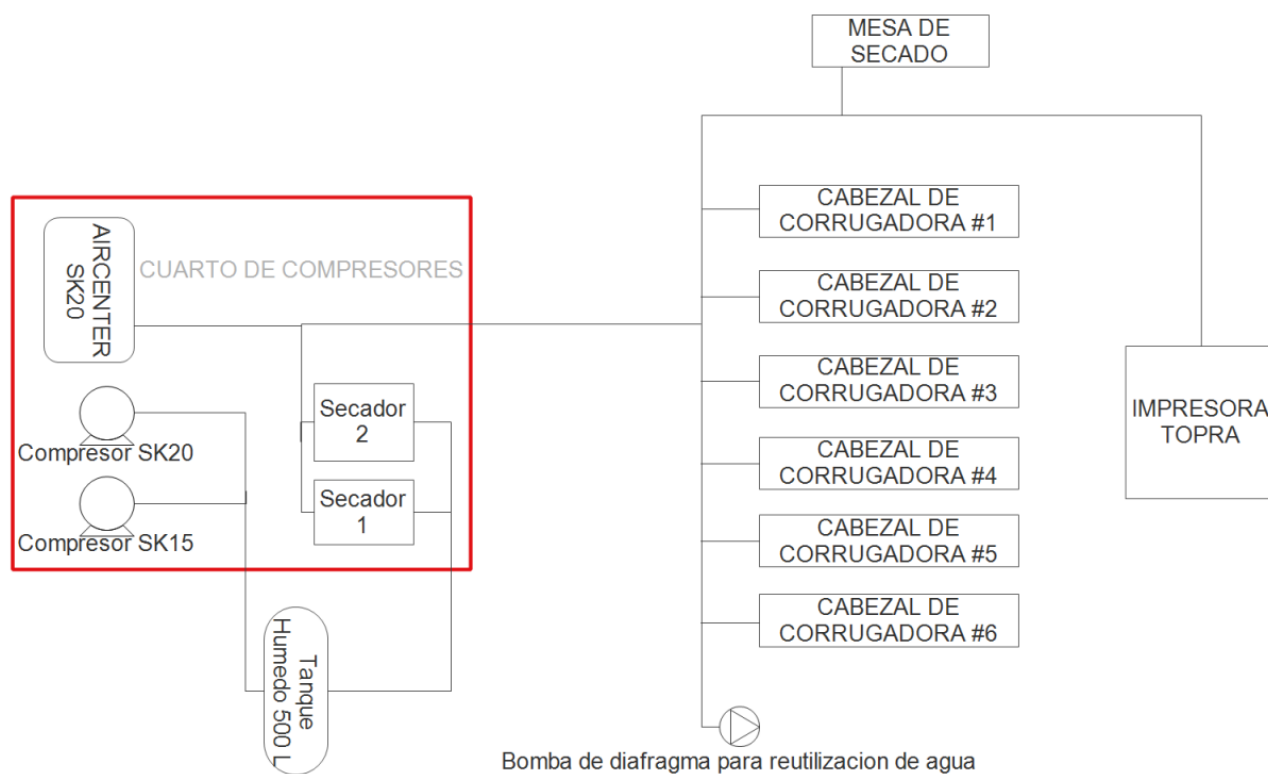


Ilustración 20. esquema de la red de aire comprimido de la planta de cartón corrugado. Fuente: elaboración propia

El sistema incluye los siguientes componentes:

- **Compresor Kaeser SK15:** es un compresor de tornillo con transmisión por correa trapezoidal de 15 HP de potencia, ofrece una presión de trabajo de 125 psig y una capacidad de 64 CFM. Su conexión es a 440V trifásica.

- **Compresor Kaeser SK20:** compresor de tornillo con transmisión por correa trapezoidal de 20 HP de potencia, ofrece una presión de trabajo de 125 psig y una capacidad de 88 CFM. Su conexión es a 440V trifásica.



*Ilustración 21. Esquema de funcionamiento y partes de un compresor Kaeser serie SK. Fuente: Kaeser Compresores*

- **Aircenter SK20:** esta unidad está compuesta por un compresor de tornillos rotativos, un secador refrigerativo y un tanque de aire comprimido. La potencia del compresor es de 20 HP con una presión de trabajo de 125 psig y una capacidad de 88 CFM. Su conexión es a 440V trifásica.



*Ilustración 22. Aircenter SK20. Fuente: Kaeser Compresores.*

- **Secador de aire modelo HGE100:** se cuenta con dos unidades, con una capacidad nominal de 100 CFM y una presión máxima de trabajo de 16 BAR. Su conexión es a 120V monofásica.



*Ilustración 23. secador de aire Schulz HGE100. Fuente: eBay*

- **Tanque de almacenamiento de aire húmedo:** utilizado como etapa previa al secado del aire, este tiene una capacidad de 500 litros.
- **Válvula solenoide de purga temporizada:** sirve para eliminar automáticamente la condensación acumulada en el sistema. Esta condensación puede incluir agua, aceite y otras impurezas que se forman debido a la compresión del aire.
- **Filtro Kaeser F26KE:** tiene la función de limpiar el aire comprimido de impurezas y contaminantes que pueden afectar la eficiencia y el rendimiento del sistema, así como la calidad del aire suministrado.
- **Red de distribución:** la red de distribución está compuesta por tubería y accesorios de acero galvanizado de diámetro de  $\frac{3}{4}$ ", con una longitud total de 145 metros y distribuida de manera lineal.

## **4. Análisis de consumo de energético del sistema de aire comprimido**

El análisis del consumo energético de la red de aire comprimido es un paso fundamental para comprender la eficiencia del sistema y establecer estrategias que optimicen su desempeño. En este capítulo se abordará un estudio detallado del uso de energía en la red, con el objetivo de identificar patrones de consumo. Este análisis permitirá conocer la relación entre la energía consumida y el aire comprimido generado, proporcionando una base sólida para implementar el sistema de generación de energía fotovoltaica.

La importancia de este análisis radica como ya hemos mencionado antes, en que las redes de aire comprimido suelen ser grandes consumidores de energía en las industrias, representando un porcentaje significativo del gasto operativo. Por ello, realizar una evaluación exhaustiva del consumo energético no solo facilita la reducción de costos, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al disminuir las emisiones asociadas al consumo eléctrico.

Para este análisis se utilizará un equipo que realizara mediciones en tiempo real y posteriormente se utilizaran herramientas de análisis para determinar los patrones de utilización del sistema. Este diagnóstico será la base para plantear propuestas de mejora en los capítulos posteriores, alineadas con las necesidades energéticas de la empresa y los objetivos de optimización del proyecto.

### **4.1. Equipo para recopilación de datos de energía**

Para la recopilación de datos de consumo de energía de los equipos de generación y tratamiento del aire comprimido, se ha implementado un sistema conformado por los siguientes componentes:

- Medidor de entrada de CC universal PAX: es un dispositivo de medición y visualización utilizado en diversas aplicaciones industriales y de laboratorio para monitorear y medir

señales de corriente continua (CC). Estos medidores son conocidos por su versatilidad y precisión en la medición de diferentes tipos de señales de entrada de CC.



*Ilustración 24. medidor de entrada de CC universal PAX. Fuente: Red Lion*

- PLC Siemens 6ED1052-1MD08-0BA1: también conocido como LOGO! 8 12/24RCE, es un controlador lógico programable (PLC) diseñado para aplicaciones de automatización y control en pequeñas y medianas instalaciones. Este modelo forma parte de la serie LOGO! de Siemens, que es reconocida por su facilidad de uso y su versatilidad. Cuenta con 8 entradas digitales, de las cuales 4 pueden ser usadas como entradas analógicas con un rango de 0-10V, y 4 salidas de relé, lo que permite una amplia variedad de configuraciones y aplicaciones.



*Ilustración 25. PLC Siemens 6ED1052-1MD08-0BA1. Fuente: Siemens Industry Mall*

- Transformador de corriente montaje DIN tropicalizado 100 5 para cables d. 21: es un dispositivo eléctrico esencial para la medición y monitoreo de corrientes en sistemas de energía eléctrica. Este transformador se utiliza para reducir una corriente alta, como 100 amperios, a una corriente más baja y manejable, típicamente 5 amperios. Esta reducción facilita la medición precisa y segura de la corriente, permitiendo que instrumentos de

medición, contadores de energía y dispositivos de protección como relés funcionen correctamente.



*Ilustración 26. Transformador de corriente. Fuente: Schneider Electric*

- Pantalla táctil HMI PLC: es un dispositivo que combina las funciones de una interfaz hombre-máquina (HMI) con las capacidades de un controlador lógico programable (PLC). Permite a los operadores interactuar con el sistema de manera intuitiva, monitoreando datos en tiempo real, ajustando configuraciones, visualizando alarmas y realizando diagnósticos del sistema.



*Ilustración 27. Pantalla táctil HMI PLC. Fuente: Beetrionics*

- Gabinete: este está diseñado especialmente para el alojamiento de componentes eléctricos en entornos industriales.



*Ilustración 28. gabinete para componentes eléctricos*

Con estos componentes, el equipo de medición quedo habilitado para poder realizar la recopilación de datos de consumo de los equipos que componen la generación y tratamiento de aire comprimido.



Ilustración 29. equipo para medición de consumo de energía. Fuente: elaboración propia.

## 4.2 Análisis de datos obtenidos

Con el equipo de medición instalado, se puede proceder a la obtención de datos de consumo de los equipos que componen la generación y tratamiento del aire comprimido de la planta. Para esto, se ha definido un tiempo de recopilación de datos de un mes.

A continuación, se presenta un gráfico representativo de los datos obtenidos de las mediciones de consumo de energía eléctrica por hora de los equipos:

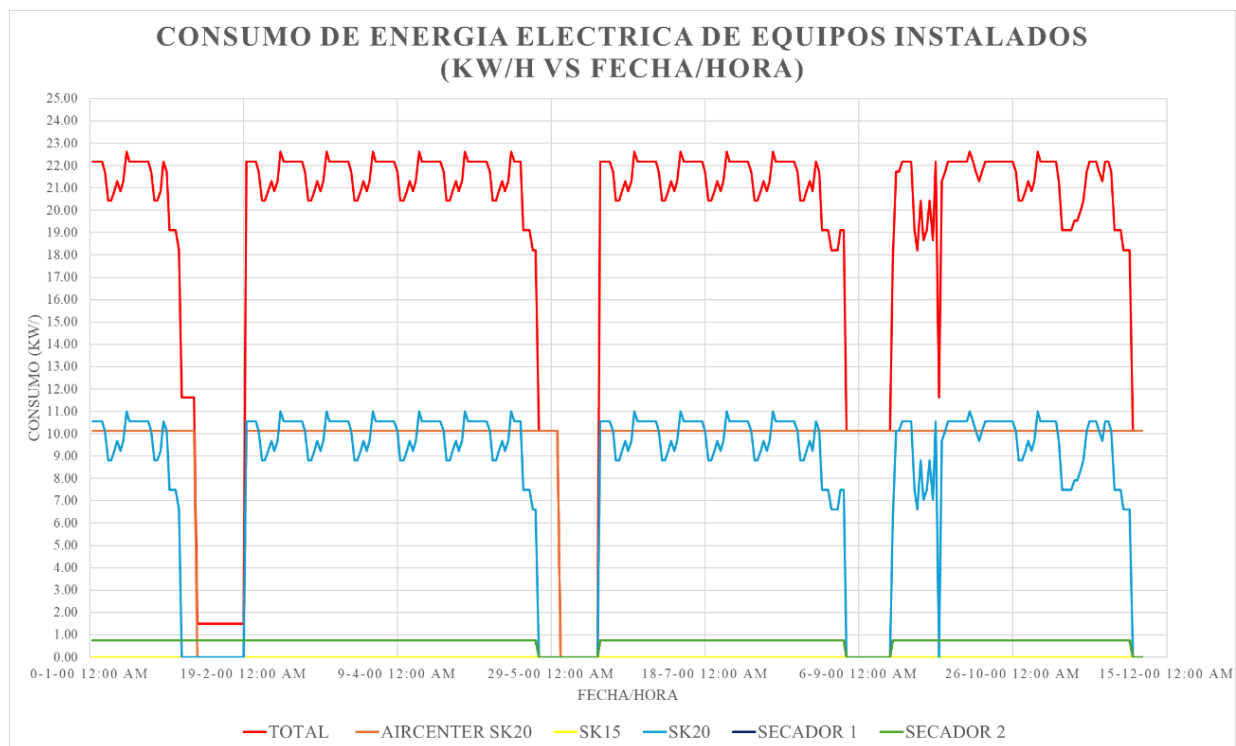


Ilustración 30. gráfico de consumo energético de los equipos. Fuente: elaboración propia.

En el gráfico se pueden observar variaciones considerables en el consumo energético, esto es debido a los paros que realiza la planta durante los fines de semana, donde los equipos utilizados se reducen, por ende, se reduce el requerimiento de aire comprimido durante esos periodos de tiempo. De acuerdo con el gráfico presentado, podemos ver que el pico máximo de energía consumida cuando se tiene los equipos en operación simultánea es de 22.62 kWh. Este valor será el mínimo que el sistema solar fotovoltaico deberá suministrar para que este sea efectivo.

Por posibles variaciones en la utilización, y por ende en el consumo energético, se ha tomado la decisión de considerar un factor de seguridad del 30% de la potencia de operación. En conclusión, el sistema solar fotovoltaico tendrá una potencia planeada de 30 kWh.

*Tabla 6. Resumen de componentes y resultados.*

<b>Sección</b>	<b>Descripción</b>
<b>Equipo para recopilación de datos de energía</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Medidor de entrada de CC universal PAX: monitorea y mide señales de corriente continua con alta precisión.</li> <li>- PLC Siemens 6ED1052-1MD08-0BA1: controlador programable para automatización y monitoreo de datos.</li> <li>- Transformador de corriente DIN tropicalizado 100/5: reduce la corriente para facilitar medición y protección.</li> <li>- Pantalla táctil HMI PLC: interfaz para monitoreo y configuración del sistema.</li> <li>- Gabinete industrial: protege los componentes eléctricos en entornos industriales.</li> </ul>
<b>Análisis de datos obtenidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se recopilaron datos durante un mes.</li> <li>- El consumo varía según los paros de producción; los fines de semana el consumo disminuye.</li> <li>- El pico máximo de consumo en operación simultánea es de 22.62 kWh.</li> </ul>
<b>Potencia del sistema fotovoltaico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se aplica un factor de seguridad del 30% sobre la potencia máxima.</li> <li>- La capacidad planeada del sistema solar fotovoltaico es de 30 kWh para garantizar la autonomía del sistema.</li> </ul>

## **5. Propuesta de diseño de sistema solar fotovoltaico y mejoras de sistema de aire comprimido**

En el diseño de un sistema solar fotovoltaico, la determinación adecuada de la capacidad del sistema y la selección óptima de los componentes son etapas cruciales que influirán directamente en su rendimiento, durabilidad y costo total. Este capítulo tiene como objetivo definir los parámetros necesarios para dimensionar la capacidad del sistema fotovoltaico, realizar la selección de los componentes clave, tales como paneles solares, inversores y estructuras de soporte.

Además, se planteará una propuesta de mejora para la red de aire comprimido, basada en un análisis de las condiciones actuales del sistema. Este análisis permitirá identificar oportunidades de optimización que disminuyan las pérdidas energéticas y mejoren el desempeño general de la red. Junto a esta propuesta, se incluirá un presupuesto estimado para la implementación de las mejoras, considerando tanto los costos iniciales como los beneficios económicos y energéticos a largo plazo.

La combinación de estos aspectos no solo busca satisfacer las necesidades energéticas actuales, sino también establecer un marco para la transición hacia un modelo de operación más eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

### **5.1 Metodología**

La metodología para la implementación del sistema solar fotovoltaico y la optimización de la red de aire comprimido se estructurará en dos etapas principales:

#### **Etapas 1: Optimización de la red de aire comprimido**

- Basado en el análisis de mejoras del capítulo 4, se elaborará una propuesta para mejorar la eficiencia de la red.

- Se incluirán acciones específicas para reducir pérdidas y optimizar el consumo energético.
- Se presentará un presupuesto con costos de materiales.

## **Etapas 2: Diseño del sistema solar fotovoltaico**

- Evaluación del recurso solar: Se analizarán datos de irradiancia, orientación, inclinación y sombras para determinar el potencial energético del sistema.
- Dimensionamiento del sistema: Se diseñarán tres variantes con diferentes capacidades y configuraciones para comparar costos y beneficios.
- Evaluación técnica y económica: Se analizarán costos de inversión, producción energética estimada y retorno de inversión mediante herramientas de simulación.
- Selección de componentes: Se definirán paneles solares, inversores y estructuras de soporte que cumplan con los requerimientos técnicos y sean viables en el mercado.
- Análisis de retorno de inversión para comprobar si es viable la implementación del proyecto.

Finalmente, se presentará la propuesta del diseño, basada en la variante que ofrezca el mejor equilibrio entre costos, eficiencia y viabilidad técnica. Esta propuesta incluirá un diseño conceptual del sistema y una estimación de costos.

## **5.2. Propuesta de mejoras en sistema de aire comprimido**

Llevar a cabo un análisis de problemas y puntos de mejora en la red de aire comprimido antes de dimensionar el sistema de paneles solares es crucial para garantizar eficiencia, confiabilidad y rentabilidad. Este análisis junto con las mejoras a proponer optimizará el consumo energético, reduce costos operativos y de inversión, asegura la continuidad operativa, y maximiza el retorno

de la inversión en energía solar. También permite identificar necesidades de almacenamiento de energía y asegura el cumplimiento de normas y regulaciones.

### **5.2.1 Diagnóstico del sistema de aire comprimido**

A continuación, se detallan algunos aspectos que fueron observados en la etapa de diagnóstico durante las visitas de campo realizadas en la empresa:

- La distribución del aire se realiza a través de una tubería galvanizada y accesorios de diámetro de  $\frac{3}{4}$ " con bifurcaciones que suministran aire a cada máquina. En cada punto de uso se encuentran unidades de mantenimiento.
- La red de distribución de aire comprimido tiene un diseño lineal, sin distribución de tipo anillo, lo cual es un diseño poco eficiente y afecta el flujo de aire y propicia las caídas de presión.
- La red de distribución de aire comprimido cuenta con tuberías de acero galvanizadas, las cuales además de ser de un material que con el tiempo es propenso a la corrosión, propicia la caída de presión en la red por tener un coeficiente de fricción alto.
- Las bifurcaciones se derivan de la tubería principal mediante tees y descienden verticalmente para alimentar las máquinas.



*Ilustración 31. Acometidas en máquinas de producción*

- El tanque de almacenamiento de aire comprimido muestra signos de deterioro, lo que podría comprometer su capacidad para mantener la presión adecuada, afectando el suministro constante de aire a las máquinas.



*Ilustración 32. tanque de aire comprimido húmedo deteriorado. Fuente: elaboración propia*

- Es crucial implementar un programa de mantenimiento regular para inspeccionar el sistema de distribución de aire. Esto incluye verificar la integridad de las conexiones y la

funcionalidad de las trampas de condensado, asegurando un rendimiento óptimo y una mayor durabilidad del sistema.



*Ilustración 33. Compresor de aire en malas condiciones. Fuente: elaboración propia*

- Es necesario cambiar los racores, mangueras y unidades de mantenimiento que presenten desgaste. Las fugas en estos componentes causan una pérdida significativa de aire comprimido, afectando el rendimiento y aumentando el consumo de energía.

### **5.2.2. Propuesta de mejoras en sistema de aire comprimido**

En primer lugar, se recomienda reemplazar las tuberías galvanizadas por materiales como acero inoxidable o aluminio, que ofrecen mayor resistencia a la corrosión y reducen las caídas de presión debido a su bajo coeficiente de fricción. Además, se plantea rediseñar la configuración de la red, pasando de un diseño lineal a uno de tipo anillo, lo que garantizará una distribución uniforme del aire comprimido y minimizará las caídas de presión.

Se recomienda además evaluar la ubicación de las bifurcaciones y equiparlas con trampas de condensado para mejorar la calidad del aire comprimido y proteger las máquinas de posibles daños por humedad. Respecto al almacenamiento, se recomienda reemplazar el tanque actual de 132

galones por uno que cumpla con la relación ideal de 4 a 5 galones por CFM. Además, se recomienda su reemplazo debido al desgaste acumulado con el que este cuenta.

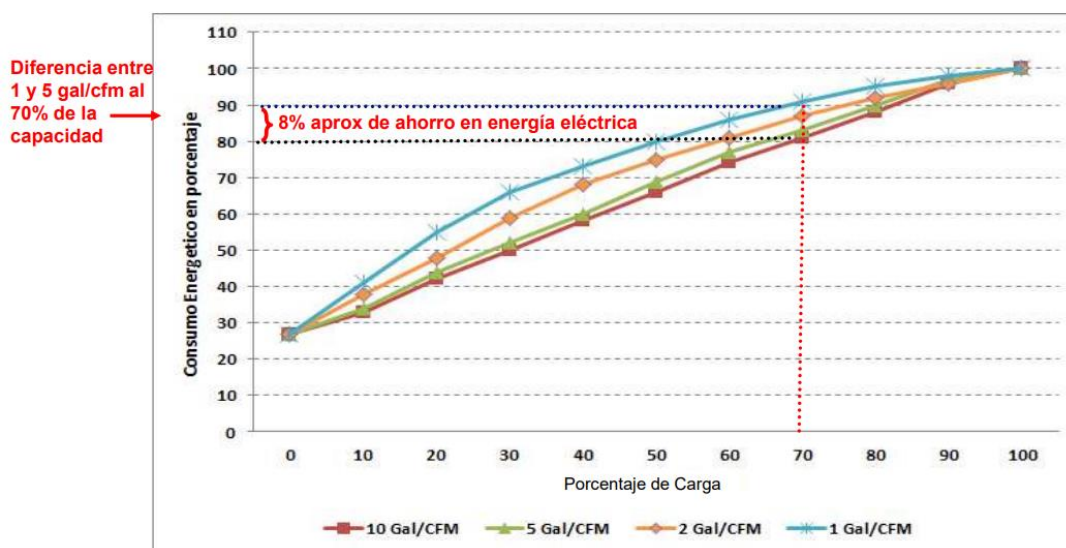


Ilustración 34. gráfico de ahorro energético debido al almacenamiento. Fuente: Kaeser Compresores

También se recomienda la instalación de un sistema de filtrado posterior a la etapa de secado de aire, esto para minimizar los contaminantes y humedad presentes en el aire. Un filtro coalescente sería adecuado, ya que estos filtran el aceite y las partículas de agua del aire y las condensan en una masa que se puede limpiar fácilmente.

Además, la instalación de un tanque extra para almacenamiento de aire sería beneficioso para la red, esto para tener más estabilidad contra caídas de presión o fluctuaciones en la demanda de aire comprimido. Un aspecto clave para la eficiencia del sistema es implementar un programa de mantenimiento preventivo que contemple inspecciones regulares de las conexiones, racores, mangueras, trampas de condensado y unidades de mantenimiento, reemplazando componentes desgastados para evitar fugas y pérdidas de aire. Adicionalmente, se debe capacitar al personal operativo en buenas prácticas de mantenimiento y optimización del uso del aire comprimido, asegurando así la sostenibilidad de las mejoras implementadas. Estas acciones no solo mejorarán

la eficiencia energética del sistema, sino que también reducirán costos operativos y prolongarán la vida útil de los equipos.

Basado en lo anterior, se presenta una propuesta de diseño para la red de aire comprimido, cambiando de un diseño lineal a un diseño de anillos, incluyendo además una etapa de filtrado y un tanque de almacenamiento de aire tratado:

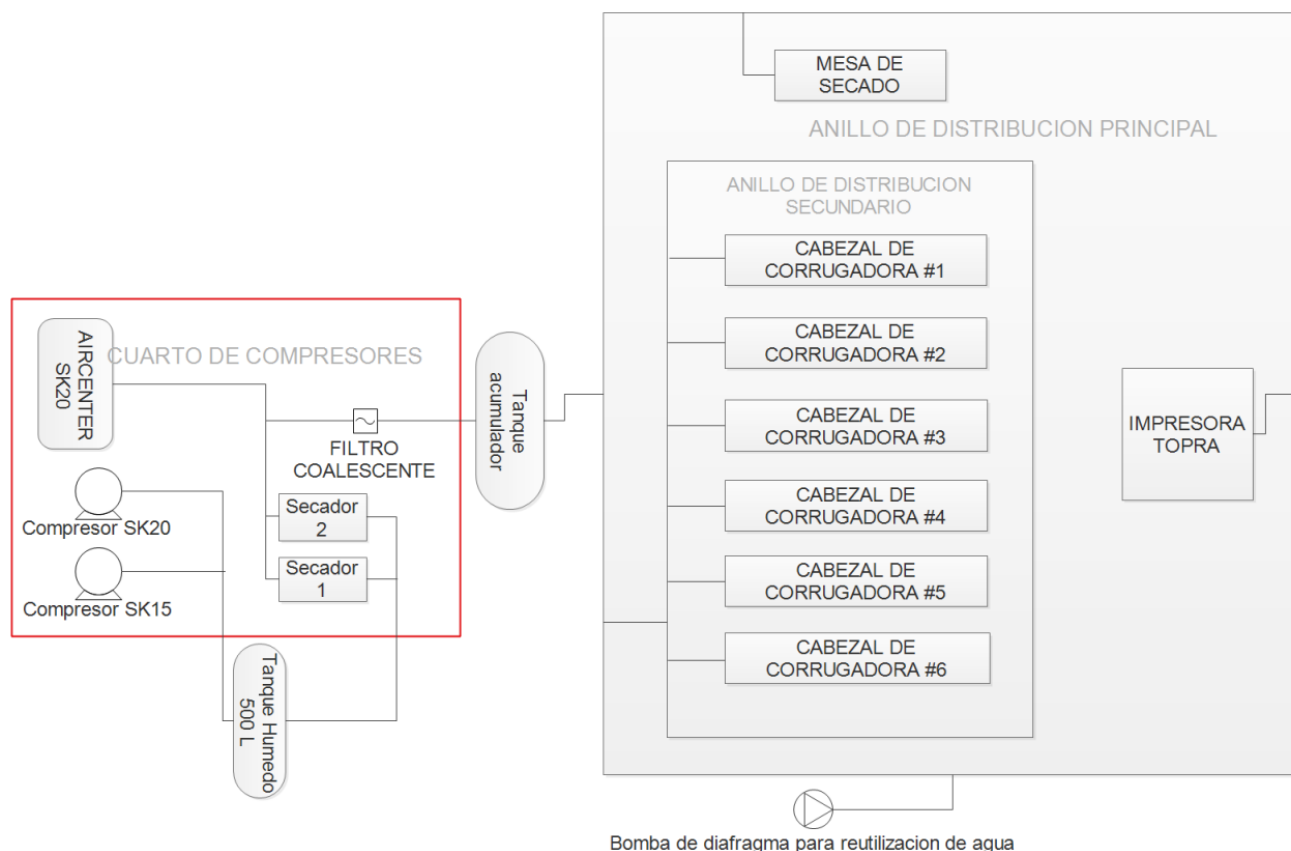


Ilustración 35. Propuesta de diseño de red de aire comprimido. Fuente: elaboración propia

En base a las recomendaciones antes mencionadas, se ha realizado un presupuesto para poder mejorar la red de aire comprimido actual, en la que se ha tomado en consideración el reemplazo de las tuberías de acero galvanizado por tuberías de acero inoxidable, cambio de tanque de

almacenamiento de aire húmedo, instalación de tanque de almacenamiento de aire seco, e instalación de instrumentos de medición de presión en la red.

Tabla 7. Presupuesto de mejoras en red de aire comprimido

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Tubo acero inoxidable 1.1/2" cedula 40	27	USD 195.00	USD 5,265.00
Tubo acero inoxidable 3/4" cedula 40	10	USD 80.00	USD 800.00
Codo 90° acero inoxidable 1.1/2"	11	USD 8.25	USD 90.75
Codo 90° acero inoxidable 3/4"	25	USD 3.60	USD 90.00
Válvula de bola acero inoxidable 1.1/2"	16	USD 54.95	USD 879.20
Válvula de bola acero inoxidable 3/4"	11	USD 18.95	USD 208.45
Unión universal 1.1/2"	40	USD 15.50	USD 620.00
Unión universal 3/4"	20	USD 7.95	USD 159.00
Reductor 1.1/2 x 3/4 "	10	USD 4.80	USD 48.00
Tanque acero inoxidable 500 L	2	USD 1,500.00	USD 3,000.00
Manómetro caratula 2.5" 0-5000 psi acero inoxidable	4	USD 80.00	USD 320.00
<b>TOTAL</b>			<b>USD 11,480.40</b>

Estas propuestas de mejora están pensadas para abordar tanto los desafíos estructurales como operativos, con un enfoque en la optimización de la eficiencia energética, la reducción de costos y la prolongación de la vida útil de los equipos.

Tabla 8. Hallazgos y propuestas de mejora

<b>Aspecto Evaluado</b>	<b>Diagnóstico</b>	<b>Propuesta de Mejora</b>
<b>Material de tuberías</b>	Tuberías de acero galvanizado, propensas a corrosión y caídas de presión.	Reemplazo por tuberías de acero inoxidable o aluminio para reducir fricción y mejorar durabilidad.
<b>Diseño de red</b>	Diseño lineal con caídas de presión y distribución desigual.	Cambio a un diseño en anillo para mejorar el flujo y minimizar pérdidas de presión.
<b>Conexiones y bifurcaciones</b>	Uso de tee sin trampas de condensado, lo que afecta la calidad del aire.	Reubicación de bifurcaciones y adición de trampas de condensado para reducir humedad en la red.
<b>Tanque de almacenamiento</b>	Deterioro del tanque de aire comprimido de 132 galones.	Sustitución por un tanque con capacidad ideal de 4 a 5 galones por CFM.
<b>Filtración del aire</b>	Falta de sistema de filtrado eficiente.	Instalación de un filtro coalescente para eliminar humedad y partículas de aceite.
<b>Mantenimiento del sistema</b>	Conexiones, mangueras y trampas de condensado en mal estado con fugas de aire.	Implementación de mantenimiento preventivo y capacitación del personal.
<b>Medición y control</b>	Falta de instrumentos de medición para monitorear presión en la red.	Instalación de manómetros para un mejor control del sistema.

### 5.2.3 Resultados esperados de propuestas

Implementar las mejoras en el sistema de aire comprimido tendrá varios beneficios significativos para la empresa, los cuales son:

1. **Ahorro Energético:** Con un tanque de almacenamiento adecuado, se logrará una mayor eficiencia energética, reduciendo el consumo eléctrico y, por ende, los costos operativos.

2. **Mayor Eficiencia Operativa:** La correcta distribución del aire comprimido y la eliminación de fugas en racores y mangueras garantizarán un suministro constante y eficiente de aire, mejorando el rendimiento de las maquinarias.
3. **Reducción de Mantenimiento No Planificado:** Al minimizar las fugas y asegurar una buena calidad del aire comprimido, se reducirá la frecuencia de fallos y el mantenimiento no planificado, aumentando el tiempo de actividad de la maquinaria.
4. **Mejora en la Calidad del Producto:** Un sistema de aire comprimido eficiente y bien mantenido contribuirá a un funcionamiento más preciso de las corrugadoras, resultando en productos de mayor calidad y menor desperdicio.
5. **Mayor Vida Útil del Equipo:** La implementación de un sistema de distribución en anillo y el uso de trampas de condensado protegerán el equipo de la corrosión y otros daños, extendiendo su vida útil.
6. **Cumplimiento Ambiental:** Al optimizar el uso de recursos y reducir el consumo energético, la empresa mejorará su sostenibilidad y reducirá su impacto ambiental, alineándose con sus objetivos corporativos.

### **5.3. Diseño del sistema solar fotovoltaico**

La instalación de un sistema solar fotovoltaico requiere una serie de elementos clave para asegurar su correcto funcionamiento y durabilidad. Esta sección tiene como objetivo definir los parámetros necesarios para dimensionar la capacidad del sistema fotovoltaico y realizar la selección de los componentes clave, tales como paneles solares, inversores y estructuras de soporte. Para asegurar un diseño eficiente y económicamente viable, se evaluarán tres variantes de capacidad. Estas variantes permitirán explorar diferentes combinaciones de potencia instalada y

su correspondiente impacto en los costos de los equipos, el espacio requerido y la producción de energía. Este enfoque comparativo brindará una visión más amplia sobre cómo optimizar el sistema para cumplir con los requerimientos energéticos de la empresa, maximizando la generación de energía mientras se minimizan los costos y las pérdidas.

### **5.3.1. Análisis del recurso solar**

El análisis del recurso solar es uno de los pasos más cruciales en el dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico, ya que determina cuánta energía solar está disponible en el sitio de instalación. Un análisis detallado nos ayudara a garantizar que el sistema sea diseñado de manera óptima para aprovechar al máximo la energía solar disponible. Para esto, evaluaremos las siguientes variables.

#### **5.3.1.1. Irradiancia solar global**

Se refiere a la potencia de la radiación solar que incide sobre una superficie por unidad de área, medida en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Dentro de esta, se encuentran la irradiancia directa normal (DNI), que es la radiación solar directa; la irradiancia difusa (DHI), que es la radiación dispersa por la atmósfera; y la irradiancia global (GHI), que es la suma de la irradiancia directa y difusa en una superficie horizontal. Es crucial obtener estos datos a través de estaciones meteorológicas locales, satélites, o bases de datos globales, e incluso instalar un piranómetro en el sitio para proyectos grandes.

Para la evaluación de nuestro proyecto hemos optado por obtener los datos de irradiancia de la base de datos meteorológicos de la NASA. Para la ubicación en la que se encuentra la empresa se tienen los siguientes valores de irradiancia:

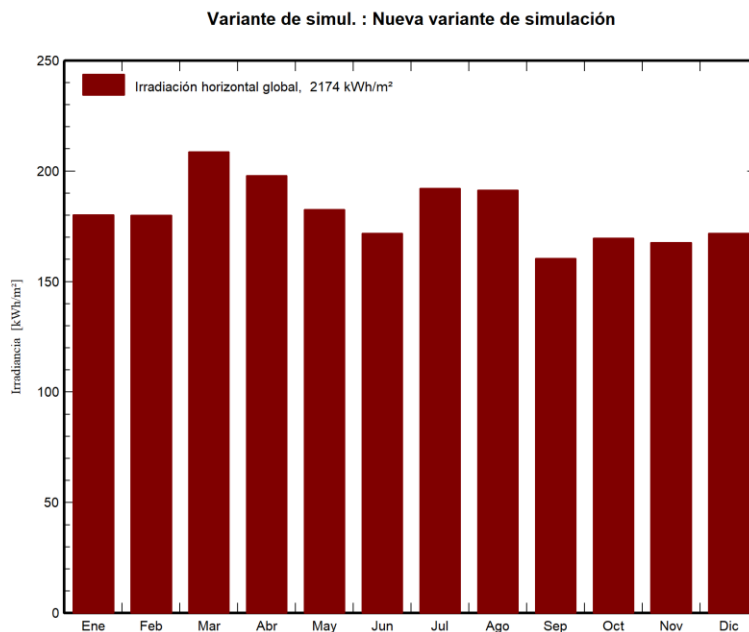


Ilustración 36. irradiancia promedio por meses del año. Fuente: PVSyst.

### 5.3.1.2. Temperatura ambiente

La temperatura puede afectar el rendimiento de los paneles solares de varias maneras, entre las que se encuentran las siguientes:

- A medida que la temperatura aumenta, la eficiencia de los paneles solares suele disminuir. Esto se debe a que los materiales semiconductores utilizados en los paneles solares experimentan una reducción en su capacidad para generar electricidad a medida que se calientan.
- Una alta temperatura puede generar una degradación en acelerada en los componentes de del panel solar, lo que puede reducir su vida útil y afectar su rendimiento a lo largo del tiempo.
- A medida que la temperatura aumenta, la tensión de circuito abierto de los paneles solares tiende a disminuir. Esto significa que la tensión eléctrica generada por el panel será menor a temperaturas más altas, lo que puede afectar la eficiencia de los sistemas conectados.

La temperatura ideal para una producción de energía óptima se sitúa entre los 20 y 25° C. En nuestro país, la temporada de lluvia es caliente, opresiva y nublada y la temporada seca es muy caliente, húmeda y mayormente despejada. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 17 °C a 31 °C y rara vez baja a menos de 15 °C o sube a más de 33 °C. A continuación, se presentan valores promedio de temperatura a lo largo del año:

*Tabla 9. Temperaturas promedio en El Salvador*

	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
Máxima	29 °C	30 °C	31 °C	30 °C	29 °C	29 °C	29 °C	29 °C	28 °C	28 °C	29 °C	29 °C
Mínima	18 °C	18 °C	19 °C	20 °C	21 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C	19 °C	18 °C

Al tratarse de una instalación inmóvil es bastante complicado que podamos reducir el efecto del calor en las placas solares. No obstante, existen algunas acciones que podemos llevar a cabo y que permiten reducir el impacto del calor sobre los paneles, como puede ser instalar los paneles por encima del techo, de forma que se deje un espacio entre ambos con el fin de que corra aire y se consiga un efecto de enfriamiento; usar colores claros en los materiales de construcción, el techo y los componentes de los paneles, así la absorción de calor es menor; la instalación de los inversores y monitores en la sombra para evitar el sobrecalentamiento del sistema.

#### 5.3.1.3. Humedad

Otro factor por considerar es la cantidad de precipitaciones y humedad en la zona. Aunque las lluvias son necesarias para refrescar los paneles y mejorar su rendimiento, las tormentas pueden dañar seriamente la instalación y reducir su eficiencia.

Por su parte la humedad puede afectar a los paneles solares de varias maneras. Causando acumulación de agua en los paneles que puede llevar a daños en los componentes electrónicos,

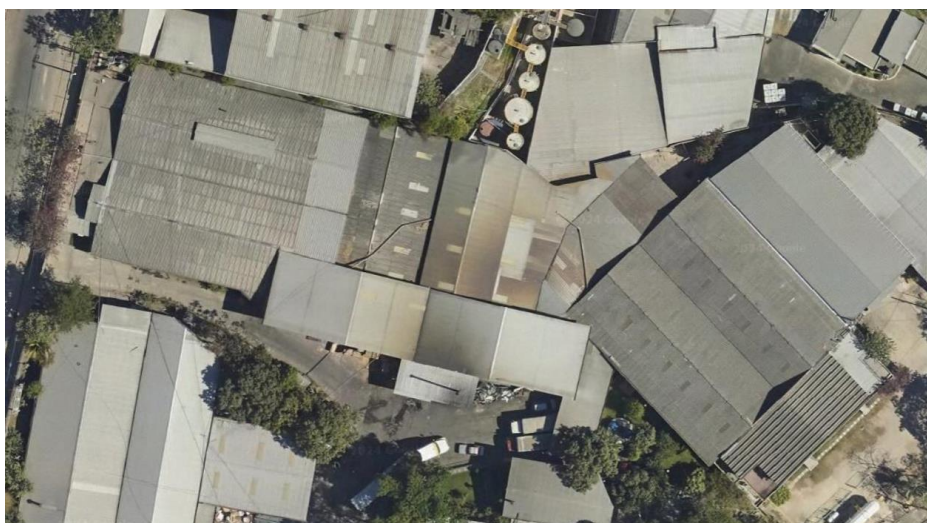
algo que en ambos casos desencadena en fallos graves que reducen la cantidad de energía que se puede producir, su eficiencia y durabilidad.



*Ilustración 37. lluvia promedio mensual durante el año 2023. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.*

#### 5.3.1.4. Ubicación del sistema solar fotovoltaico

La evaluación del espacio disponible es un paso crucial en el diseño de un sistema solar fotovoltaico, ya que la disposición y tamaño de los paneles solares dependen directamente del área en la que se instalarán. El espacio disponible influye no solo en la cantidad de paneles que se pueden instalar, sino también en la configuración del sistema.

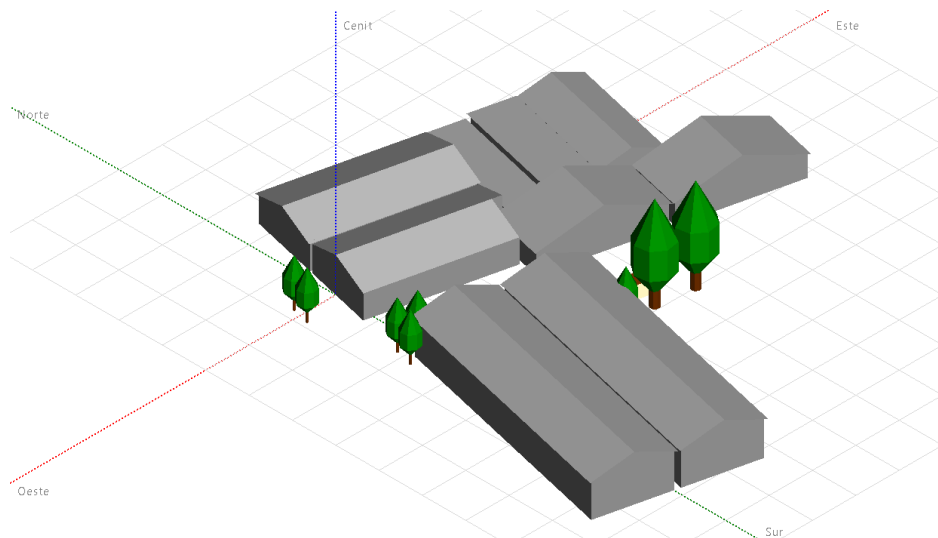


*Ilustración 38. vista aérea de la empresa. Fuente: Google Earth.*

El sistema de paneles solares debe contar con un espacio adecuado para poder ser instalado, donde se tenga la exposición adecuada a la luz solar y de esa forma tener una producción de energía eficiente. Para esto, se ha definido que los paneles solares serán instalados sobre el techo de la nave de producción de la planta de cartón corrugado.

Para seleccionar la mejor ubicación de los paneles solares se debe asegurar que la estructura cumpla con una serie de criterios técnicos, estructurales y de seguridad para garantizar la eficiencia y la durabilidad del sistema. Entre esos aspectos se encuentra:

- Capacidad de carga estructural.
- Inclinación adecuada.
- Orientación.
- Espacio disponible y configuración.
- Estado del material del techo.
- Facilidad de acceso para mantenimiento.



*Ilustración 39. vista 3D de planta de cartón corrugado. Fuente: Elaboración propia.*

De acuerdo con la información recopilada en la visita de campo, la estructura del techo está construida por los siguientes elementos:

- Estructura principal de columnas y vigas de acero con perfil H alas anchas reforzadas HEM 200, separadas 5.00 m una de la otra, apoyadas en sus extremos sobre columnas de concreto reforzado.
- La estructura secundaria está compuesta por polines tipo C de 6" separados a cada 85 cm, soldados en las vigas superiores.
- La cubierta del techo es de lámina troquelada de aluminio calibre 26, fijada a los polines por medio de tornillos, con una vida de no más de 5 años.

Se han realizado mediciones de las dimensiones de cada sección de techo, esto para poder definir que espacio será el más adecuado para la instalación del sistema. A continuación, se muestra una tabla resumen con los valores obtenidos:

*Tabla 10. Clasificación de techos de nave industrial*

<b>N° techo</b>	<b>Largo (m)</b>	<b>Ancho (m)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Orientación</b>	<b>Pendiente</b>
1	30	8.5	255	S-N	17
2	32	7.3	233.6	N-S	17
3	32	8.2	262.4	S-N	17
4	31.5	7.4	233.1	N-S	17
5	12	14	168	O-E	20
6	12.2	11.5	140.3	E-O	20
7	12	12.8	153.6	O-E	25
8	12.1	14.7	177.87	E-O	25
9	24.5	5.85	143.325	O-E	30
10	24.5	6	147	E-O	30
11	24	8.6	206.4	O-E	0

Teniendo en cuenta lo anterior, podemos proceder a la evaluación de las condiciones de cada sección de techo. En las visitas de campo se encontraron secciones de techo en buenas condiciones, sin corrosión ni daño estructural que pudiera impedir la instalación de los paneles solares. Sin embargo, se han descartado las que tienen un tiempo de vida mayor, además de descartar las que se encuentran más alejadas del cuarto de compresores. A continuación, se presenta las secciones que cumplen con las condiciones mencionadas:



*Ilustración 40. Secciones de techo aptas para instalación de paneles solares. Fuente: elaboración propia.*

Posteriormente se evaluará la capacidad de carga estructural de las diferentes secciones seleccionadas, para garantizar que puedan soportar el peso de los paneles solares y diferentes componentes.

### 5.3.1.5. Estudio de sombras

Realizar un estudio de sombras y obstrucciones cercanas es fundamental en el diseño de un sistema solar fotovoltaico, esto porque las sombras proyectadas sobre los paneles solares pueden reducir significativamente la producción de energía del sistema. Las sombras, ya sea de edificios, árboles, antenas, u otras estructuras cercanas, limitan la cantidad de luz solar que llega a los módulos fotovoltaicos. Como resultado, se disminuye la eficiencia del sistema, afectando directamente su capacidad de generación y su rentabilidad.

Además, incluso una pequeña área de sombra en un panel puede reducir la producción de energía de toda la serie de paneles a la que está conectado, debido a que las células solares están interconectadas y, si una célula se encuentra sombreada, puede reducir el flujo de corriente de todo el módulo. Con esta evaluación, es posible diseñar el sistema de manera que maximice la exposición solar y optimice la producción de energía, garantizando así que el sistema cumpla con los objetivos de eficiencia y rentabilidad. A continuación, se presenta una simulación de sombras en la ubicación donde se instalarán los paneles solares, realizada en el programa PVSyst.

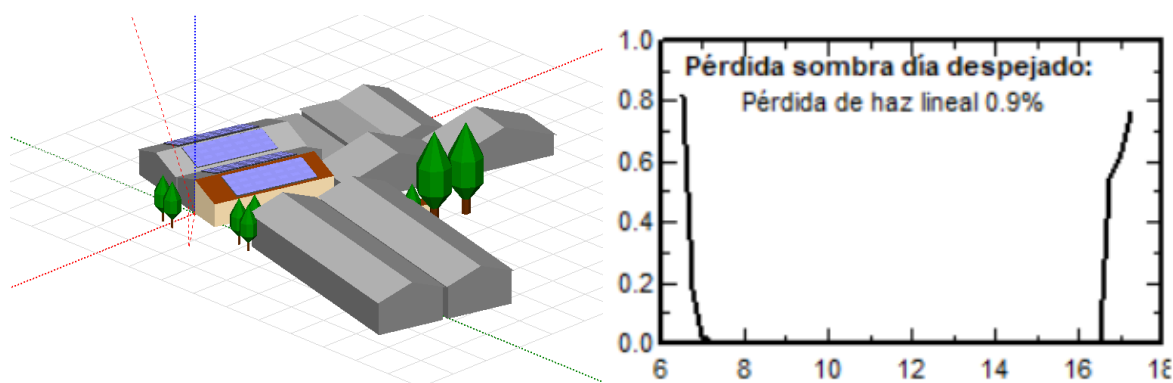


Ilustración 41. simulación de sombras cercanas en PVSyst. Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los resultados de la simulación, en la ubicación seleccionada a lo largo del día solamente se tiene una pérdida de haz lineal de luz de un 0.9 %, lo cual es bastante favorable para nuestro sistema.

Tabla 11. Resumen de apartado de recurso solar

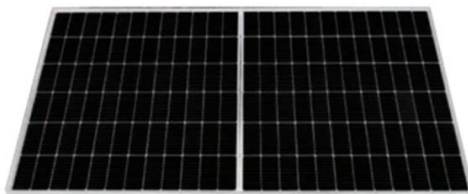
Sección	Descripción
Análisis del recurso solar	Evalúa la disponibilidad de energía solar en la ubicación del proyecto para optimizar el diseño del sistema fotovoltaico.
Irradiancia solar global	Se mide en W/m <sup>2</sup> e incluye la irradiancia directa (DNI), difusa (DHI) y global (GHI). Se obtuvieron datos de la NASA para el sitio de instalación.
Temperatura ambiente	La eficiencia de los paneles solares disminuye con el aumento de temperatura. La temperatura anual varía entre 17°C y 31°C. Se proponen estrategias para mitigar el calor, como separación de los paneles del techo y uso de materiales reflectantes.
Humedad y precipitaciones	La lluvia ayuda a limpiar los paneles, pero las tormentas pueden dañarlos. La alta humedad puede afectar componentes electrónicos y reducir la eficiencia del sistema.
Ubicación del sistema fotovoltaico	Se instalarán los paneles en el techo de la nave de producción de cartón corrugado. Se analizaron aspectos como capacidad estructural, inclinación, orientación y espacio disponible. Se descartaron techos en mal estado o alejados del cuarto de compresores.
Estudio de sombras	Se realizó una simulación en PVSyst para evaluar el impacto de sombras en la eficiencia del sistema. La pérdida de luz solar es de solo 0.9 %, lo que es favorable para la instalación.

### 5.3.2. Descripción de componentes

- Configuración 1: panel solar monocristalino Longi Solar 66HPH de 500 W e inversor en red GROWATT MAC 60KTL3-X MV

El panel solar monocristalino Longi Solar 66HPH de 500 W ofrece un buen nivel de eficiencia, alcanzando un 21.3%, lo que contribuye a una generación de energía óptima en exteriores. Está diseñado para facilitar su instalación, con un sistema de conexión sencillo que permite enchufar y

usar sin complicaciones. Además, cuenta con una garantía de rendimiento de 25 años, y una garantía de producto de 12 años ofrecida directamente por el fabricante.



*Ilustración 42. Panel solar LONGI LR5-66HPH 500W. Fuente: Sol Verde.*

El inversor para interconexión Growatt modelo MAC 60KTL3-X MV cuenta una potencia máxima de entrada de 9000 W y una capacidad de potencia de salida (VA) de 66.6 kVA, este inversor permite la conexión a redes eléctricas convencionales con voltajes nominales de salida entre 277/480 V.



*Ilustración 43. Inversor en red GROWATT MAC 60KTL3-X MV. Fuente: Sol Verde.*

- Configuración 2: panel solar JAM72S10-410/MR e inversor en red GROWATT MOD 10000TL3-X

El panel solar JAM72S10-410/MR es un módulo monocristalino de 410W y 144 células Half-Cell technology. JA Solar ofrece un módulo de alta eficiencia con células PERC que gracias a su configuración de media célula ofrece una alta potencia de salida, mejor coeficiente de temperatura, menor pérdida de eficiencia frente a las sombras y mayor resistencia a las cargas mecánicas.



*Ilustración 44. Panel solar JAM72S10-410/MR. Fuente: Auto Solar.*

El Inversor Red Growatt MOD 10000TL3-X es un producto de gran calidad y con un diseño muy compacto y moderno. Es un inversor trifásico y dispone de 3 seguidores MPPT y un amplísimo rango de funcionamiento.



*Ilustración 45. Inversor en red Growatt MOD 10000TL3-X. Fuente: Sol Verde.*

- Configuración 3: panel solar monocristalino Longi Solar 66HPH de 500 W e inversor en red GROWATT MAC 20KTL3-XL

El Inversor en red Growatt MAC 20KTL3-XL cuenta con 4 seguidores MPPT y un amplio rango de funcionamiento, se interconecta a la red eléctrica trifásica para inyectar la energía producida por los módulos fotovoltaicos.



*Ilustración 46. Inversor en red Growatt MAC 20KTL3-XL. Fuente: Sol Verde.*

A continuación, se presenta una tabla resumen con las características de los componentes antes mencionados:

Tabla 12. Características de paneles solares

	LONGI LR5-66HPH 500 W	JAM 72S10-410/MR
Dimensiones (m)	2.09x1.13x0.35	2.01x0.99x0.4
Peso (Kg)	25.3	22.7
Potencia (W)	500	410
Tolerancia del módulo (W)	3	5
Voc (V)	45.55	50.12
Vmpp (V)	38.38	41.88
Isc (A)	13.9	10.45
Impp (A)	13.03	9.79
$\beta_{oc}$ (%/C)	-0.265	-0.272
$\beta_{mpp}$ (%/C)	-0.34	-0.35
$\alpha_{oc}$ (%/C)	0.05	0.044
Eficiencia (%)	21.1	20.4

Tabla 13. Características de inversores

	MAC 60KTL3-X MV	MOD 10000TL-X	MID 20KTL3-X
VmaxDCentrada (V)	1100	1100	1100
VSTARTDC (V)	250	160	250
Vmppt max (V)	1000	1000	1000
Vmppt min (V)	200	140	200
Rango nominal de corriente AC (V)	277/480	230/400	230/400
Frecuencia de red de AC (Hz)	50/60	50/60	50/60

### 5.3.3. Dimensionamiento de sistema solar fotovoltaico con formulas

Con los datos obtenidos de las fichas técnicas de los componentes, y auxiliándonos de fórmulas, procederemos a realizar los cálculos necesarios para el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico. A continuación, se presenta el procedimiento a seguir:

- Primero, debemos verificar la temperatura de operación de la celda solar fotovoltaica, para eso utilizamos las siguientes formulas:

$$T_{cmin} = T_{ambmin} + G \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right)$$

$$T_{cmin} = T_{ambMAX} + G \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right)$$

- Posteriormente, calcularemos la variación de los parámetros eléctricos como lo son el voltaje de circuito abierto máximo y mínimo, el rango de voltaje en máxima potencia, y el rango de corriente de corto circuito. Se presentan las fórmulas a utilizar:

$$V_{ocmax} = V_{oc} + \beta_{oc} * V_{oc} (T_{c1min} - 25)$$

$$V_{ocmin} = V_{oc} + \beta_{oc} * V_{oc} (T_{c1max} - 25)$$

$$V_{mppt max} = V_{mppt} + \left( \frac{\beta_{mppt}}{100} \right) * V_{mppt} (T_{c1min} - 25)$$

$$V_{mppt min} = V_{mppt} + \left( \frac{\beta_{mppt}}{100} \right) * V_{mppt} (T_{c1max} - 25)$$

$$I_{sc max} = I_{sc} + \left( \frac{\alpha_{sc}}{100} \right) * I_{sc} (T_{c1max} - 25)$$

$$I_{sc min} = I_{sc} + \left( \frac{\alpha_{sc}}{100} \right) * I_{sc} (T_{c1min} - 25)$$

- A continuación, calcularemos el número de módulos fotovoltaicos utilizando los voltajes máximos que soporta el inversor en la entrada y el voltaje de arranque:

$$\#Max_{MFV1} = \frac{V_{maxDCinv}}{V_{ocmaxMFV}}$$

$$\#Max_{MFV1} = \frac{V_{starDCinv}}{V_{ocminMFV}}$$

- Con estos datos podemos calcular la cantidad de módulos fotovoltaicos en el punto de máxima potencia (voltaje de MPPT que es capaz de manejar el inversor).
- Además, debemos calcular la cantidad de módulos fotovoltaicos en el punto de máxima potencia (voltaje de MPPT que es capaz de manejar el inversor).

$$\#Max_{MFV2} = \frac{V_{MPPTmaxinv}}{V_{MPPTmaxMFV}}$$

$$\#Max_{MFV2} = \frac{V_{MPPTmininv}}{V_{MPPTminMFV}}$$

- De los datos obtenidos debemos utilizar valores intermedios entre los datos obtenidos con el punto de máxima potencia y los voltajes máximos de entrada y de arranque. Con esto obtendríamos un rango de módulos fotovoltaicos por string que podríamos utilizar en nuestro sistema.
- A continuación, con los datos obtenidos en el paso anterior deberemos seleccionar un número de módulos por string, y verificar cuantos strings se pueden conectar al inversor seleccionado. Para eso utilizaremos la siguiente formula:

$$\#string = \frac{P_{DC\ inversor} * 1000}{P_{max/MFV} * \#MFV}$$

- Obtenido este valor, procederemos a verificar que el arreglo pueda suplir la potencia requerida:

$$Potencia\ real\ (kW) = \frac{\left(\# \frac{MFV}{string}\right) \left(\frac{string}{inversor}\right) (P_{max/MFV})}{1000\ W}$$

$$V_{\max. inversor} = (V_{ocmax}) * \left(\# \frac{MFV}{string}\right)$$

$$I_{inversor} = I_{sc\ max} * \left(\frac{string}{inversor}\right)$$

$$V_{mppt\ max\ inversor} = (V_{mppt\ max}) * \left(\# \frac{MFV}{string}\right)$$

$$V_{mppt\ min\ inversor} = (V_{mppt\ min}) * \left(\# \frac{MFV}{string}\right)$$

Habiendo realizado los cálculos correspondientes para cada configuración, obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 14. Resultados de cálculos realizados

	<b>CONFIGURACION 1</b>	<b>CONFIGURACION 2</b>	<b>CONFIGURACION 3</b>
	Panel LONGI LR5- 66HPH 500 W Inversor Growatt MAC 60KTL3-X MV	Panel JAM 72S10- 410/MR Inversor Growatt MOD 10000TL3-X	Panel LONGI LR5- 66HPH 500 W Inversor Growatt MID 20KTL3-X
Cantidad de paneles solares	84	112	84
Cantidad de inversores	1	4	2
Nº cadenas	6	16	6
Paneles en serie	14	7	14
Área utilizada (m2)	199	225	199
Potencia real (kW)	42.25	46.48	42.25
Voltaje máximo de entrada al inversor (V)	647.84	356.57	647.84
Corriente de entrada del inversor (A)	85.02	170.05	85.02
Vmppt max (V)	548.28	299.32	548.28
Vmppt min (V)	466.53	253.40	466.53

De los resultados obtenidos, podemos observar que las configuraciones 1 y 3 tienen el mismo rendimiento, mientras que la configuración 2 presenta una mayor potencia real, pero se ve sobrepasada en otras características como el voltaje máximo de entrada al inversor y el rango de voltaje de potencia máxima. Destaca también la cantidad de paneles e inversores requeridos para cumplir con los requerimientos del sistema. Posteriormente se evaluará que configuración será la seleccionada tomando en cuenta simulaciones de rendimiento y el análisis económico de cada configuración.

### 5.3.4. Simulación de con PvSyst

Teniendo la configuración de componentes procedemos a hacer una simulación del desempeño de estos en el programa PVsyst, el cual nos permite adaptar el diseño de las instalaciones en función de la ubicación, además de tener un análisis de datos meteorológicos completo.

Primero, se deben ingresar los datos de orientación de los paneles solares.

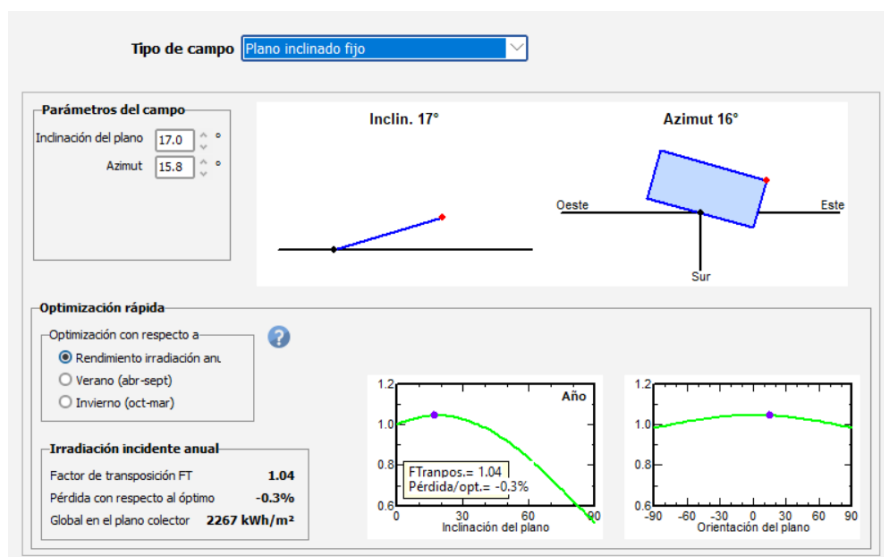


Ilustración 47. Ventana de configuración de orientación de paneles. Fuente: PVsyst.

El programa cuenta en su base de datos con las especificaciones de los modelos que deseamos utilizar, por lo que solo se deben de seleccionar y determinar parámetros que nos permitirán obtener los resultados deseados.

**Nombre y orientación del subconjunto**  
 Nombre:   
 Oriente: **Plano inclinado fijo**  
 Inclinación: **17°**  
 Azimut: **16°**

**Ayuda de pre-dimensionamiento**  
 Sin dimensionamiento  
 Potencia planeada:  kWp  
 Redimens. ... o área disponible(módulos):  m<sup>2</sup>

**Selección del módulo FV**  
 Disponible ahora:   
 Filtro:   
 Núm. máximo de módulos: **107**  
 500 Wp 32V Si-mono LR5-66HPH-500M G2 Desde 2022 Manufacturer 2022   
 Usar optimizador  
 Dimensiona. voltaje : Vmpp (60°C) **33.1 V**  
 Voc (-10°C) **50.0 V**

**Selección del inversor**  
 Disponible ahora:   
 Voltaje de salida 480 V Tri 50Hz  50 Hz  60 Hz  
 60 kW 200 - 1000 V TL 50/60 Hz MAC 60KTL3-X MV Desde 2019   
 Núm. de inversores:   Voltaje de funcionamiento: **200-1000 V** Poder global inversor **60.0 kWca**  
 Utilizar multi-MPPT Voltaje máximo de entrada: **1100 V** **inversor con 3 MPPT**  
**Reparto de potencia en este inversor**

Ilustración 48. Ventana de configuración de componentes de sistema solar. Fuente: PVSystem.

Luego de ingresar los datos de los componentes procedemos a establecer los parámetros del conjunto, en el que se deben de definir el número de inversores en serie y el número de cadenas a instalar.

**Diseño del conjunto**  
**Núm. de módulos y cadenas**  
 Mód. en serie:   entre 7 y 22  
 Núm. cadenas:   única posibilidad 9  
 Pérdida sobrecarga: **0.0 %**  
 Proporción Pnom: **0.70**   
**Núm. de módulos: 84** **Área: 199 m<sup>2</sup>**

**Condiciones de operación**  
 Vmpp (60°C): 464 V  
 Vmpp (20°C): 539 V  
 Voc (-10°C): 700 V  
 Irradia. plano: **1000 W/m<sup>2</sup>**  
 Imp (STC): 78.2 A  
 Isc (STC): 83.4 A  
 Isc (en STC): 83.4 A

**Resumen sistema global**

Núm. de módulos	84
Área del módulo	199 m <sup>2</sup>
Núm. de inversores	1
Potencia FV nominal	42.0 kWp
Potencia de CA nominal	60.0 kWCA
Proporción Pnom	0.700

Ilustración 49. Ventana de configuración de cadenas y módulos en serie. Fuente: PVSystem.

Es importante también definir los patrones de sombra cercanos, para esto se ha realizado un modelo 3D de las instalaciones de la empresa, incluyendo estructuras y objetos cercanos que puedan generar sombra, además de definir la ubicación de nuestros paneles solares. El programa nos muestra un gráfico indicando las pérdidas por sombra a lo largo de un día.

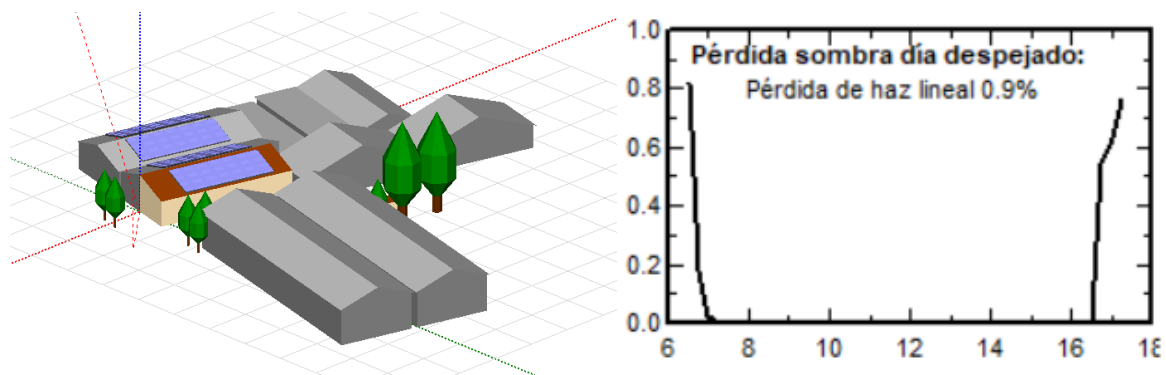


Ilustración 50. ubicación de paneles solares y resultado de simulación. Fuente: PVSyst.

El programa nos muestra los resultados de la simulación, y nos brinda datos como área utilizada, potencia nominal, producción del sistema, proporción de rendimiento, entre otros.

#### Resumen de resultados

Tipo de sistema	Tablas en un edificio
Producción del sistema	<b>78.7</b> MWh/año
Producción específica	<b>1875</b> kWh/kWp/año
Proporción de rendimiento	<b>0.832</b>
Producción normalizada	<b>5.14</b> kWh/kWp/día
Pérdidas del conjunto	<b>0.96</b> kWh/kWp/día
Pérdidas del sistema.	<b>0.08</b> kWh/kWp/día

Ilustración 51. Resultados de la simulación. Fuente: PVSyst.

Teniendo en cuenta esto, procederemos a simular las tres configuraciones antes descritas. A continuación, se muestra una tabla con los resultados obtenidos:

Tabla 15. Comparativa de rendimiento de configuraciones de sistemas solares

	<b>CONFIGURACION 1</b>	<b>CONFIGURACION 2</b>	<b>CONFIGURACION 3</b>
	Panel LONGI LR5- 66HPH 500 W Inversor Growatt MAC 60KTL3-X MV	Panel JAM 72S10- 410/MR Inversor Growatt min 10000TL3-X	Panel LONGI LR5- 66HPH 500 W Inversor Growatt MID 20KTL3-X
Cantidad de paneles solares	84	112	84
Cantidad de inversores	1	4	2
N.º cadenas	6	16	6
Paneles en serie	14	7	14
Área utilizada (m <sup>2</sup> )	199	225	199
Potencia FV nominal (Kwp)	42	45.9	42
Potencia de CA nominal (kwca)	60	40	40
Proporción pnom	0.7	1.148	1.05
Producción del sistema mwh/año	74.4	73.8	74.6
Producción específica (kwh/kwp) /año	1772	1607	1776
Proporción de rendimiento	0.837	0.759	0.839
Producción normalizada (kwh/kwp) /día	4.86	4.4	4.87
Perdidas del conjunto (kwh/kwp) /día	0.87	1.32	0.86
Perdidas del sistema (kwh/kwp) /día	0.08	0.08	0.08

El programa nos ofrece resultados más completos, con datos importantes como la producción específica anual, pérdidas del conjunto, entre otros datos. Podemos observar que los resultados obtenidos de la simulación son muy similares a los obtenidos en los cálculos realizados. Teniendo siempre una mayor potencia nominal con la configuración 2, pero menor rendimiento en otros aspectos.

A continuación, se muestran gráficos que representan el rendimiento de los conjuntos a lo largo del día, comparándolo en situación con exposición óptima y con poca exposición.

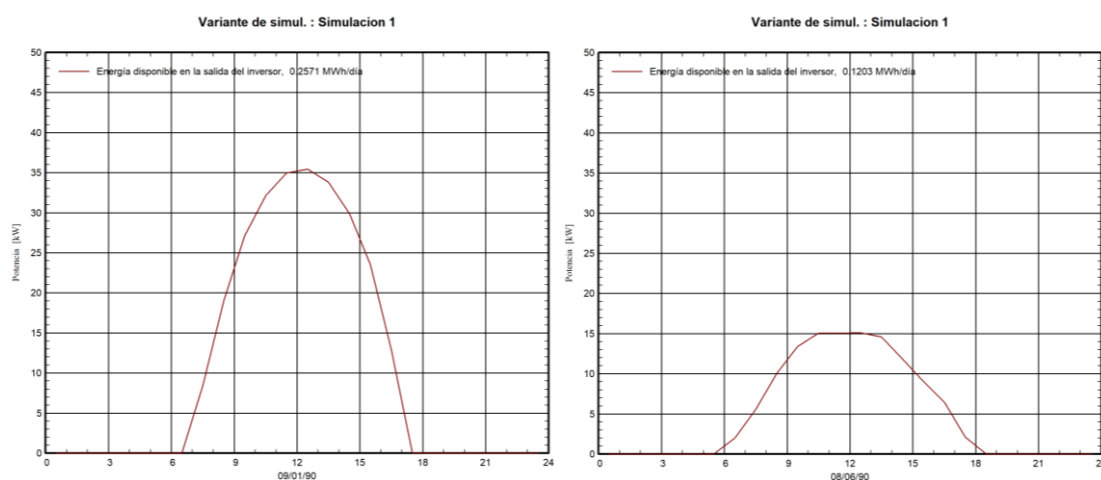


Ilustración 52. Gráficos de rendimiento para la configuración 1. Fuente: PVSyst.

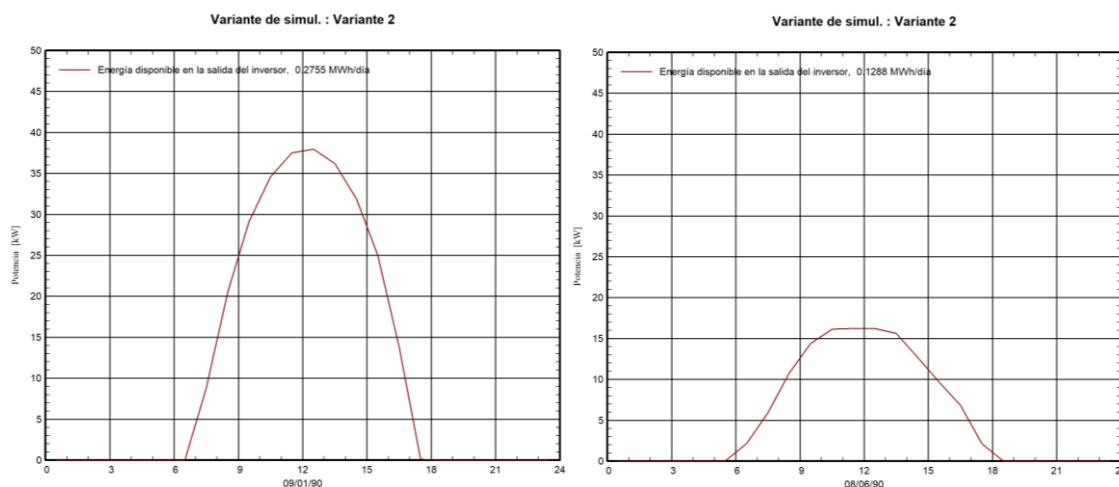


Ilustración 53. Gráficos de rendimiento para la configuración 2. Fuente: PVSyst.

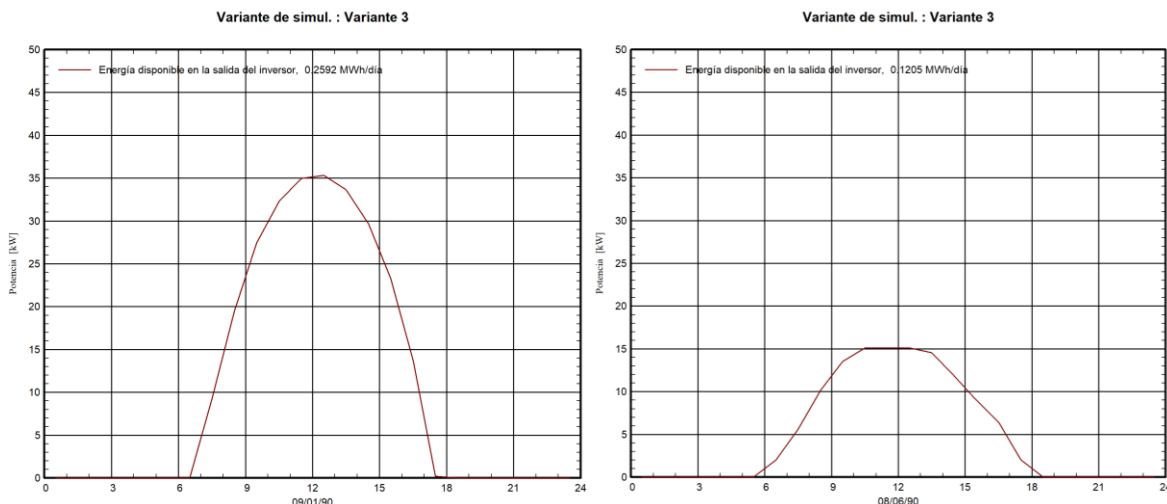


Ilustración 54. Gráficos de rendimiento para la configuración 3. Fuente: PVSyst.

### 5.3.5. Evaluación económica y matriz de decisión

Además de la viabilidad técnica, es necesario evaluar la viabilidad económica. Para esto se han realizado cotizaciones de manera local e internacional de los diferentes componentes descritos anteriormente. A continuación, se presenta un cuadro comparativo de los costos que implicarían la adquisición de las diferentes configuraciones:

Tabla 16. Comparativa de precio de configuraciones de paneles solares- inversores

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL	PRECIO TOTAL CONFIGURACION
Panel LONGI LR5-66HPH 500 W	84	USD 149.22	USD 12,534.48	<b>USD 15,933.48</b>
Inversor Growatt MAC 60KTL3-X MV	1	USD 3,399.00	USD 3,399.00	
Panel JAM 72S10-410/MR	112	USD 169.00	USD 18,928.00	<b>USD 23,846.88</b>
Inversor Growatt min 10000TL3-X	4	USD 1,229.72	USD 4,918.88	
Panel LONGI LR5-66HPH 500 W	84	USD 149.22	USD 12,534.48	<b>USD 17,107.08</b>
Inversor Growatt MAC 20KTL3-XL	2	USD 2,286.30	USD 4,572.60	

Tomando en cuenta todas las variables a evaluar para la selección de los componentes, se presenta una matriz de decisión en base a un sistema de puntos, la cual nos ayudara a seleccionar de mejor

manera la configuración que mejor se adapte a las necesidades de la empresa. Se considerará las siguientes puntuaciones: 0 = no cumple; 1; cumple moderadamente; 2 = cumple con los requisitos:

Tabla 17. Matriz de decisión

	CONFIGURACION 1	CONFIGURACION 2	CONFIGURACION 3
	Panel LONGI LR5-66HPH 500 W Inversor Growatt MAC 60KTL3-X MV	Panel JAM 72S10-410/MR Inversor Growatt min 10000TL3-X	Panel LONGI LR5-66HPH 500 W Inversor Growatt MID 20KTL3-X
RENDIMIENTO	1	2	1
ESPACIO UTILIZADO	2	1	2
INVERSION	2	1	1
DISPONIBILIDAD	2	1	1
GARANTIA	1	2	1
<b>TOTAL</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>6</b>

De la matriz de decisión podemos concluir que la configuración más viable es la configuración 1, por ser la que tiene mejor puntuación en los aspectos evaluados.

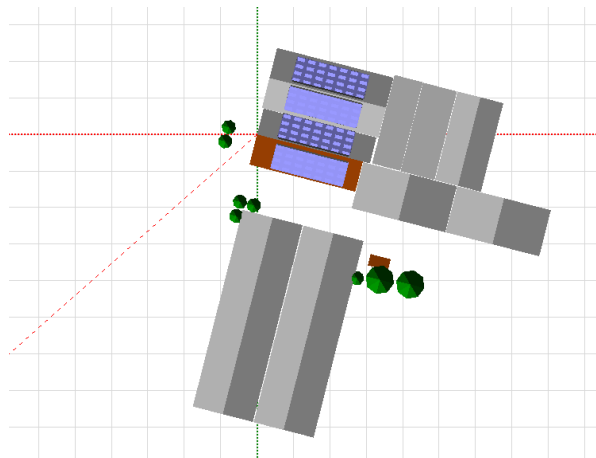
### 5.3.6. Análisis estructural del techo seleccionado para la instalación de paneles solares

Como se mencionó en capítulos anteriores, el análisis estructural es un paso fundamental para el diseño del sistema solar fotovoltaico, esto porque nos garantiza que las condiciones son las adecuadas para el correcto funcionamiento de este, además de descartar posibles riesgos.

Habiendo seleccionado los componentes a utilizar, podemos realizar los cálculos del peso que deberá soportar el techo. Al ser un peso elevado, se ha tomado la decisión de distribuir los paneles

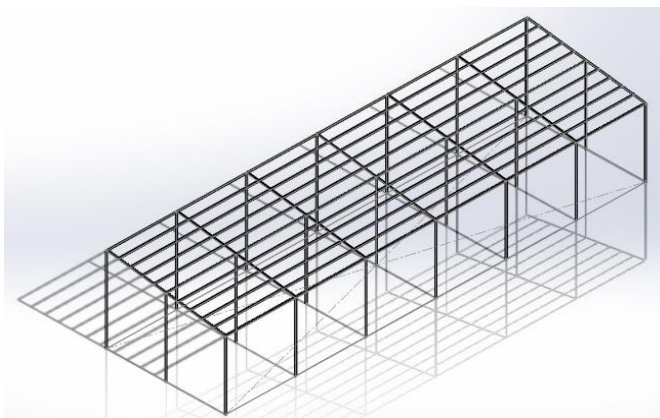
solares en las primeras cuatro secciones de techo, esto por ser las que tienen mejor ubicación, mayor exposición a la luz solar, y estructura construida más reciente y en mejores condiciones.

Por lo cual se distribuirán 21 paneles en cada sección, cada uno con un peso de 20 kg, el peso que tendría que soportar cada sección será de 4,116.0 N. A continuación, se muestra la distribución de los paneles solares:



*Ilustración 55. Distribución de paneles solares. Fuente: elaboración propia*

Para garantizar que cada sección pueda soportar el peso del sistema solar fotovoltaico, se ha realizado una simulación en el programa SolidWorks, recreando la estructura de la nave industrial, y realizando un análisis estático en cada sección de techo.



*Ilustración 56. Estructura de sección de techo 1. Fuente: elaboración propia*

Los parámetros utilizados en la simulación fueron: viga estructural perfil HEM 200, polines tipo C de 6", masa de cada panel de 20 kg, peso de la estructura de soporte de 60 Kg, distribuido uniformemente en el área. El programa calcula la tensión axial y de flexión, además de los desplazamientos resultantes en la estructura. De acuerdo con los resultados, la tensión axial y de flexión máxima que se encuentra en la estructura es de 1443.17 N/m<sup>2</sup>, siendo el límite elástico de la estructura de 18493.87 N/m<sup>2</sup>.

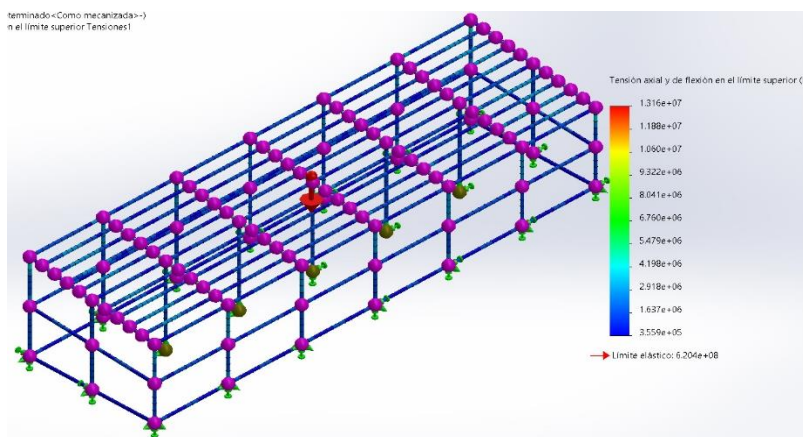


Ilustración 57. Tensión axial y de flexión en estructuras. Fuente: elaboración propia

El desplazamiento máximo al que fue sometido cada estructura es de 2,87 mm.

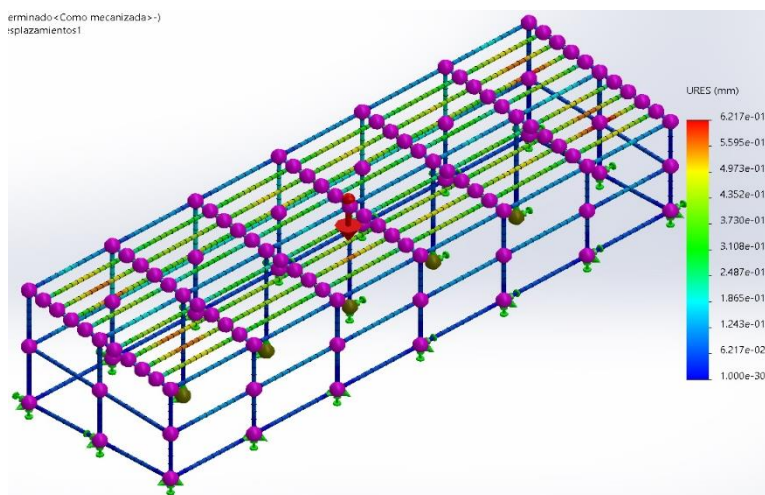
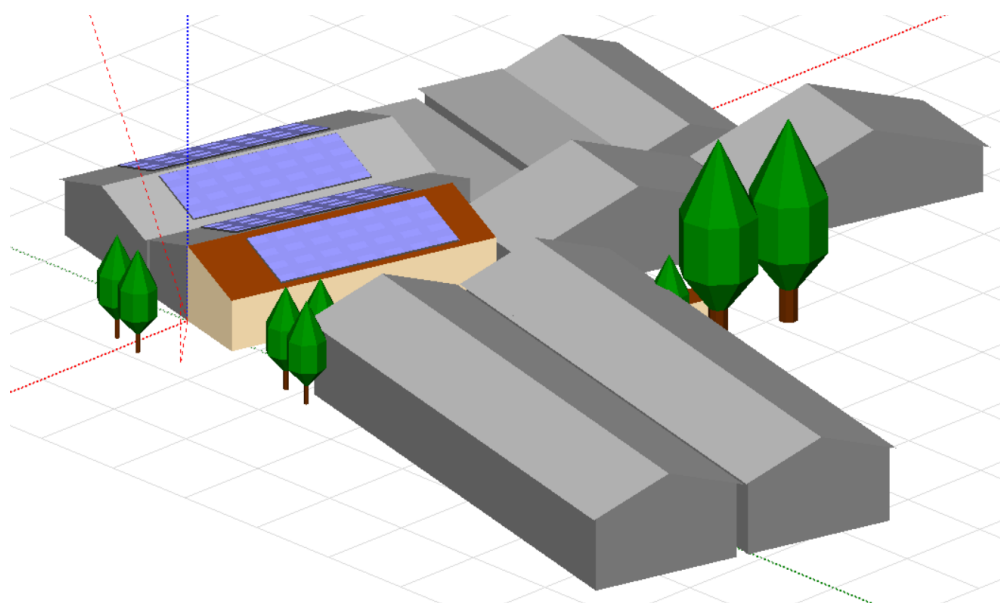


Ilustración 58. Desplazamiento máximo en estructuras. Fuente: elaboración propia

Con los resultados de la simulación, podemos concluir que la instalación de los paneles solares sobre la estructura del techo de la nave industrial es viable, sin representar riesgos, siendo esta una ubicación óptima por su gran exposición a la luz solar.

### 5.3.7. Materiales para instalación

La instalación del sistema solar fotovoltaico requiere una serie de elementos para asegurar su correcto funcionamiento y durabilidad. Entre los componentes principales para la instalación de los paneles solares se encuentran las estructuras de soporte, cuyo propósito es fijar los paneles en una posición óptima y segura. También son esenciales los sistemas de anclaje, los cuales deben adaptarse al material y resistencia del sitio de instalación. Los cables de conexión, diseñados para soportar el ambiente exterior y las altas corrientes generadas, conectan los paneles entre sí y al inversor.



*Ilustración 59. Disposición de paneles solares. Fuente: PVSyst.*

En la siguiente tabla se presenta un presupuesto con los elementos necesarios para la instalación del sistema solar fotovoltaico, tomando en cuenta los componentes seleccionados y la distribución.

*Tabla 18. Presupuesto para elementos de instalación de paneles solares*

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Riel de aluminio anodizado 4800 mm	86	USD 32.96	USD 2,834.56
Abrazadera Medio para Panel Solar 35~40mm	170	USD 1.50	USD 255.00
Empalme para riel	50	USD 1.50	USD 75.00
Abrazadera Final para Panel Solar 35~40mm	25	USD 1.50	USD 37.50
Elementos para fijación de riel al techo	258	USD 5.49	USD 1,416.42
Cable Fotovoltaico Bipolar 4mm <sup>2</sup> – Negro + Rojo (1 Metro)	300	USD 3.50	USD 1,050.00
Conector MC4 Bra (3 Entradas) 1000V	30	USD 27.46	USD 823.80
<b>TOTAL</b>			<b>USD 6,492.28</b>

Con los materiales antes mencionados podemos garantizar que el sistema solar fotovoltaico podrá ser instalado de manera efectiva y será puesto en marcha para la generación de energía.

#### **5.4. Análisis de retorno de inversión**

La implementación de mejoras en la red de aire comprimido y la incorporación de un sistema solar fotovoltaico representan inversiones estratégicas para la empresa, orientadas a optimizar el consumo energético, reducir costos operativos y mejorar la sostenibilidad del proceso productivo. Sin embargo, para justificar la viabilidad económica de estas iniciativas, es fundamental realizar un análisis detallado del retorno de la inversión. Este análisis permitirá cuantificar los beneficios económicos obtenidos a lo largo del tiempo en comparación con la inversión inicial. Además, se

evaluará el período de recuperación de la inversión, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones en cuanto a la implementación de estas mejoras.

Para este análisis se utilizarán la herramienta TIR, que es un indicador de la rentabilidad de un proyecto; VAN, que mide cuánto generará una inversión o un proyecto teniendo en cuenta el valor temporal del dinero; y ROI, que evalúa el rendimiento económico de una inversión en relación con su coste. Los datos que se han considerado para este análisis son:

Tabla 19. evaluación del retorno de inversión.

<b>Costes de instalación</b>	
Implementación de mejoras en sistema de aire comprimido	USD 11,250.40
Implementación de sistema solar fotovoltaico	USD 15,933.48
Elementos para instalación de sistema solar fotovoltaico	USD 6,492.28
Monto depreciable de los activos	USD 21,375.60
Mano de obra	USD 5,956.00
Vida útil	20 años
<b>Costos de operación</b>	
Provisión anual por posibles daños o reparaciones en sistema solar fotovoltaico	USD 5,679.80
Costo anual de limpieza	USD 300.00
<b>Costos energía eléctrica</b>	
Tarifa eléctrica (ver anexo 6)	Horas punta: 0.21030 USD/kWh Horas valle: 0.20810 USD/kWh
Impuestos	10%
<b>Variación de ahorro a lo largo del tiempo</b>	
Variación anual de tarifa eléctrica	9.0%
Inflación	1.90%
Variación de producción (envejecimiento)	1.0 %/año

Con los datos mostrados anteriormente se realizaron los cálculos correspondientes, dando como resultado lo mostrado en la siguiente tabla:

Tabla 20. Cálculo de retorno de inversión

Año	Ahorro por energía eléctrica (USD)	Costo inicial (USD)	Costos de funcionamiento (USD)	Depreciación (USD)	Ingreso bruto (USD)	Impuestos (USD)	Beneficio (USD)	Beneficio acumulado (USD)	% amortización
0	0.00	39,632.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	-39,632.00	0.0%
1	15,638.00	0.00	5,980.00	1,069.00	8,590.00	859.00	8,800.00	-30,832.00	22.2%
2	17,216.00	0.00	6,093.00	1,069.00	10,054.00	1,005.00	10,118.00	-20,715.00	47.7%
3	18,954.00	0.00	6,209.00	1,069.00	11,676.00	1,168.00	11,577.00	-9,138.00	76.9%
4	20,866.00	0.00	6,327.00	1,069.00	13,470.00	1,347.00	13,192.00	4,054.00	110.2%
5	22,971.00	0.00	6,447.00	1,069.00	15,455.00	1,546.00	14,978.00	19,032.00	148.0%
6	25,289.00	0.00	6,570.00	1,069.00	17,650.00	1,765.00	16,954.00	35,986.00	190.8%
7	27,841.00	0.00	6,695.00	1,069.00	20,077.00	2,008.00	19,138.00	55,125.00	239.1%
8	30,650.00	0.00	6,822.00	1,069.00	22,759.00	2,276.00	21,552.00	76,677.00	293.5%
9	33,743.00	0.00	6,952.00	1,069.00	25,722.00	2,572.00	24,219.00	100,896.00	354.6%
10	37,147.00	0.00	7,084.00	1,069.00	28,995.00	2,899.00	27,164.00	128,060.00	423.1%
11	40,895.00	0.00	7,218.00	1,069.00	32,608.00	3,261.00	30,416.00	158,476.00	499.9%
12	45,022.00	0.00	7,355.00	1,069.00	36,597.00	3,660.00	34,007.00	192,482.00	585.7%
13	49,564.00	0.00	7,495.00	1,069.00	41,000.00	4,100.00	37,969.00	230,452.00	681.5%
14	54,565.00	0.00	7,637.00	1,069.00	45,859.00	4,586.00	42,342.00	272,793.00	788.3%
15	60,071.00	0.00	7,783.00	1,069.00	51,220.00	5,122.00	47,166.00	319,960.00	907.3%
16	66,132.00	0.00	7,930.00	1,069.00	57,133.00	5,713.00	52,488.00	372,448.00	1039.8%
17	72,805.00	0.00	8,081.00	1,069.00	63,655.00	6,365.00	58,358.00	430,806.00	1187.0%
18	80,151.00	0.00	8,235.00	1,069.00	70,847.00	7,085.00	64,831.00	495,638.00	1350.6%
19	88,238.00	0.00	8,391.00	1,069.00	78,778.00	7,878.00	71,969.00	567,607.00	1532.2%
20	97,141.00	0.00	8,551.00	1,069.00	87,522.00	8,752.00	79,839.00	647,446.00	1733.6%
<b>Total</b>	<b>904,900.00</b>	<b>39,632.00</b>	<b>143,855.00</b>	<b>21,376.00</b>	<b>739,669.00</b>	<b>73,967.00</b>	<b>687,078.00</b>	<b>647,446.00</b>	<b>1733.6%</b>

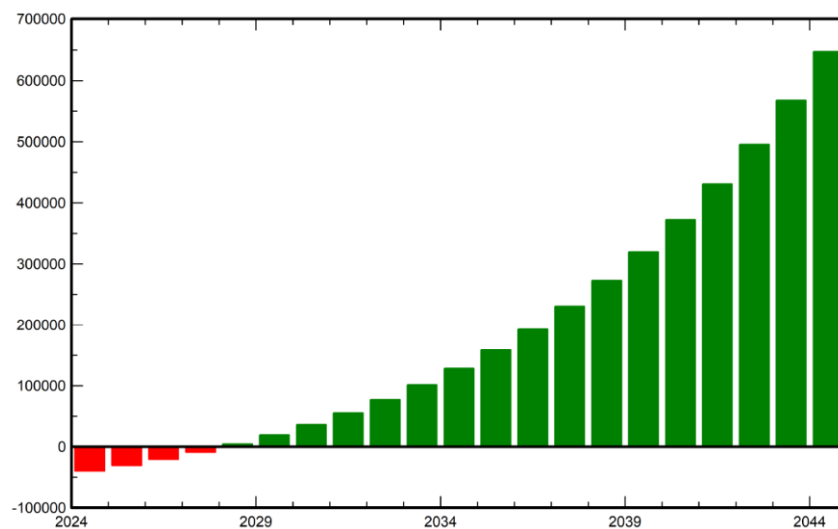


Ilustración 60. Flujo de caja acumulativo en dólares a lo largo del tiempo. Fuente: elaboración propia.

Con los valores obtenidos, procederemos a calcular la TIR, VAN, ROI y PRI. A continuación, se presentan las fórmulas a utilizar:

$$\bullet \quad VAN = -I_0 + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+r)^n} = 0$$

$I_0$  = inversión inicial

$C_n$  = Flujo de caja

$N$  = Numero de periodos

$n$  = Año en el que se van obteniendo los beneficios de cada periodo

$r$  = TIR

$$\bullet \quad ROI = \left( \frac{\text{Ingresos} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} \right) * 100\%$$

$$\bullet \quad PRI = A + \left( \frac{B-C}{D} \right)$$

$A$  = año anterior al que se recupera la inversión.

$B$  = inversión inicial del negocio.

$C$  = Flujo de efectivo anual del año anterior al que se recupera la inversión.

$D$  = flujo de efectivo anual del año en el que se recupera la inversión.

Realizando los cálculos correspondientes, obtenemos un valor de VAN = **USD 647,445.56**, TIR = **35.02%**, ROI = **1,633.6 %**, y PRI = **3.7 años**. Los resultados del análisis financiero demuestran la viabilidad y rentabilidad del proyecto de optimización del sistema de aire comprimido y la implementación del sistema solar fotovoltaico.

El Valor Actual Neto (VAN) de USD 647,445.56 indica que la inversión generará un beneficio económico significativo a lo largo de su vida útil. La Tasa Interna de Retorno (TIR) del 35.02% supera ampliamente los costos de capital, lo que confirma que el proyecto es financieramente atractivo. Asimismo, el Retorno sobre la Inversión (ROI) del 1,633.6% refleja que los beneficios obtenidos superan considerablemente la inversión inicial, consolidando la eficiencia de la propuesta. Además, el Período de Recuperación de la Inversión (PRI) de 3.7 años evidencia un

tiempo relativamente corto para recuperar el capital invertido, lo que refuerza la factibilidad del proyecto.

En conclusión, la implementación de estas mejoras no solo permitirá reducir costos operativos y aumentar la eficiencia energética, sino que también contribuirá a la sostenibilidad de la empresa.

La combinación de ahorro energético y optimización del sistema de aire comprimido garantizará un impacto positivo tanto a nivel económico como ambiental, alineándose con los objetivos estratégicos de la organización.

## Conclusiones y recomendaciones

De los resultados obtenidos tras la realización de este proyecto se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Posterior al diagnóstico realizado en el sistema de aire comprimido, se concluyó que la falta de una adecuada distribución de aire y de un alto nivel de fugas son causantes de limitaciones del desempeño y aumentos en los costos operativos de la planta.
- Se realizaron propuestas para la mejora del sistema de aire comprimido, que incluyen el cambio de elementos dañados, cambio de material de tuberías de distribución, mejoras en el almacenamiento, y mejoras en las acometidas hacia las maquinas. Para esto, se presupuestó un monto para la implementación de USD 11,250.40.
- Con las mejoras se obtendrá un ahorro energético, mayor eficiencia operativa, reducción del mantenimiento no planificado, mayor vida útil de los equipos, y el cumplimiento de los objetivos ambientales de la empresa.
- Para suplir la demanda energética del sistema de aire comprimido, el sistema solar fotovoltaico debe tener una potencia mínima de 30 kWh.
- Posterior al dimensionamiento, concluimos que el equipo a utilizar en el sistema solar fotovoltaico son el panel solar LONGI LR5-66HPH 500 W junto con un inversor Growatt MAC 60KTL3-X MV.
- El presupuesto necesario para la implementación del sistema solar fotovoltaico es de USD 22,425.76. Esto incluye los equipos y los materiales para su instalación.
- Realizando los cálculos correspondientes, obtenemos un valor de VAN = USD 647,445.56, TIR = 35.02%, ROI = 1,633.6 %, y PRI = 3.7 años. Los resultados del análisis financiero

demuestran la viabilidad y rentabilidad del proyecto de optimización del sistema de aire comprimido y la implementación del sistema solar fotovoltaico.

- Esta iniciativa posiciona a RUA, S.A. de C.V. como una empresa innovadora en el uso de energías renovables, destacándose en el sector de empaques por su compromiso con la reducción del impacto ambiental y el uso eficiente de los recursos.

## Bibliografía

- “El aire comprimido: ¿qué optimizaciones energéticas?” METRON. (2021, junio 24 <https://www.metron.energy/es/blog/el-aire-comprimido-en-la-industria/>)
- “Paneles Solares Industriales | Solar SG.” 2023. Solar SG. Noviembre 22, 2023. <https://solarsg.es/todo-sobre-paneles-solares-industriales/>.
- “Las Fugas de Aire Comprimido” Atlas Copco Corporate Website. 2022. <https://www.atlascopco.com/es-es/compressors/air-compressor-blog/las-fugas-de-aire-comprimido>.
- “Beneficios de la energía solar para plantas productoras.” 2024. LinkedIn.com. 2024. <https://www.linkedin.com/pulse/beneficios-de-la-energ%C3%ADa-solar-para-plantas-productoras-alimentos/>.
- “¿Qué Beneficios Tiene La Energía Solar Para Sectores Productivos?” Enercity S.A. Febrero, 2023. <https://enercitysa.com/blog/energia-solar-sectores-productivos/>.
- “¿Qué Es La Energía Solar Y Qué Beneficios Tiene?” REPSOL. Septiembre 11, 2023. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-solar/index.cshtml>.
- “¿Qué Es El Inversor En Una Instalación Fotovoltaica? Diferentes Tipos de Inversores Fotovoltaicos O de Aislada. ¿Qué Inversor Necesito?” Blog Ecofener. Junio 9, 2021. <https://ecofener.com/blog/que-es-un-inversor-de-corriente-conversor-de-corriente-continua-a-corriente-alterna-diferentes-tipos-de-inversores-que-inversor-fotovoltaico-necesito/>.
- “Empresa de la industria textil incursiona en energía solar” La Prensa Gráfica. 2017. <https://www.laprensagrafica.com/economia/Empresa-de-la-industria-textil-incursiona-en-energia-solar-20170817-0073.html>

- “Crece la producción de energía fotovoltaica” Estrategia y Negocios. Enero 15, 2018. <https://www.revistaeyn.com/lasclavesdeldia/el-salvador-crece-la-produccion-de-energia-fotovoltaica-JWEN1143390>.
- “Alas Doradas invierte USD3.1 millones en energía renovable” Energía Alternativa. 2021 <https://enertiva.com/alas-doradas-invierte-3-1-millones-en-energia-renovable/>
- “Historia de Los Compresores de Aire” Aire Comprimido KAESER. Febrero 5, 2016. <https://airecomprimidokaeser.com/index.php/2016/02/05/historia-de-los-compresores-de-aire/>
- “Técnica de Aire Comprimido En La Industria de Embalaje.” Beko-Technologies.com. 2024. <https://www.beko-technologies.com/es-es/referencias/tecnica-de-aire-comprimido-en-la-industria-de-embalaje/>.
- “Normas Internacionales para tanques de aire comprimido” – Kaeser Talk. (2023, diciembre 15). <https://kaesertalk.com.ar/2023/12/15/normas-internacionales-para-tanques-de-aire-comprimido/>
- “Paneles solares, breve repaso de su funcionamiento.” Vázquez, E. L. Reforma.com; REFORMA (2023, noviembre 8). <https://www.reforma.com/paneles-solares-breve-repaso-de-su-funcionamiento/ar2706896>.
- “Paneles Solares” Dexen Energy. (2018, marzo 14). <https://www.dexen.mx/paneles-solares-modulos-solares/>
- “¿Qué es un inversor solar y cuál es su función?” Marketing Eltex. (2022, diciembre 12). <https://eltex.es/que-es-un-inversor-solar-y-su-funcion/>

- “Commercial Solar Power Benefits” | Solar Power Industries. (2023, febrero 14). <https://coldwellsolar.com/commercial-solar-blog/types-of-industries-that-benefit-from-solar-power/>
- “Combatir la suciedad en las plantas solares durante la estación seca: cómo el monitoreo de datos optimiza las limpiezas y aumenta la eficiencia.” Delfos.energy. (2024). <https://www.delfos.energy/es/blog-posts/combating-soiling-in-solar-plants-during-the-dry-season>
- “RUA – Empaques, embalaje y plegadizas.” (2015). RUA, S.A. DE C.V. <https://ruasa.com.sv/>
- “Conoce El Proceso de Fabricación Del Cartón Corrugado” CAPSA2in1®. Noviembre, 2021. <https://capsa2in1.com/conoce-el-proceso-de-fabricacion-del-carton-corrugado/>
- “Compresores pequeños de tornillos rotativos hasta 30 hp”. KAESER (2024). <https://sv.kaeser.com/productos-y-soluciones/compresores-de-tornillo-rotativo/accionamiento-de-bandas/>
- “Medidores PAX”. Red Lion. (2021, June 15). <https://www.redlion.net/es/productos/automatizaci%C3%B3n-industrial/hmis-y-medidores-de-panel/metros-de-panel/medidores-de-panel-pax>
- “PLC Siemens 6ED1052-1MD08-0BA1”. Siemens.com. (2024). <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/WW/Catalog/Product/6ED1052-1MD08-0BA1>
- “METSECT5CC010 - Transformador de corriente montaje DIN tropicalizado 100 5 para cables d. 21” | Schneider Electric Perú. (2024). <https://www.se.com/pe/es/product/METSECT5CC010/transformador-de-corriente-montaje-din-tropicalizado-100-5-para-cables-d-21/>

- “Pantallas táctiles HMI | 7 a 27 pulgadas” | Beetronics. (2024). <https://www.beetronics.es/pantallas-tactiles-hmi#:~:text=Monitores%20t%C3%A1ctiles%20HMI,para%20una%20integraci%C3%B3n%20f%C3%A1cil&text=Las%20pantallas%20HMI%20ofrecen%20una,para%20uso%20intensivo%20y%20continuo.>
- “Resumen Climatológico anual 2023” Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2024).
- “Sol Verde El Salvador - Energía Fotovoltaica al Alcance de Todos.” Sol Verde El Salvador (2023). <https://solverde.sv/>
- “Tasa interna de retorno (TIR): ¿Qué es y cómo se calcula?” Ramón, J. (2023, agosto 25). <https://www.sage.com/es-es/blog/tasa-interna-de-retorno-tir-que-es-y-como-se-calcula/>
- “ROI: qué es el retorno de la inversión y cuál es su fórmula.” BBVA. (2024, abril 12). <https://www.bbva.com/es/salud-financiera/roi-que-es-el-retorno-de-la-inversion-y-cual-es-su-formula/>
- “Cómo calcular el PRI o periodo de recuperación de la inversión.” Pizzería Napolitana Ditaly. (2023, April 25). <https://www.ditaly.es/periodo-recuperacion-inversion/>
- “Tarifas vigentes” AES El Salvador. (2025). <https://www.aes-elsalvador.com/es/tarifas-vigentes>
- “La tarifa de energía eléctrica con cambios a partir del 1 de febrero” - Alfaro, K. La Prensa Gráfica. (2025, enero 2) <https://www.laprensagrafica.com/economia/La-tarifa-de-energia-electrica-con-cambios-a-partir-de-febrero-20250101-0067.html>

## Anexos

Anexo 1. Cuadro de cálculos de dimensionamiento de sistema solar fotovoltaico con fórmulas para la variante 1.

PASO 1. ANALISIS DE TEMPERATURA			PASO 3. calculo de modulos fotovoltaicos por string				PASO 5. DATOS REALES OBTENIDOS CON EL ARREGLO				
DATOS DE ENTRADA DE PANEL SOLAR	MODELO	LONGI LPS-66HPH 500 w	PARAMETROS DEL INVERSOR	Vmaxdc entrada	1100	-	VERIFICACION DE PARAMETROS ELECTRICOS	POTENCIA REAL (KW)	42.252		
	T. Amb. Min Celcius	19		VSTARToc	250	-		VOLTAJE MAX ENTRADA INVERSOR (V)	647.8394		
	T. Amb. max Celcius	30		Vmpppt max	1000	-		Entrada del inductor	85.01588		
	NOCT CELCIUS	47		Vmpppt min	200	-		Vmpppt max (V)	548.2813		
	Voc (V)	45.55	DATOS SALIDA		#Max MFV 1	23.77132	23	VERIFICACION DE VENTANA mppt	Vmpppt min (V)	466.5281	
	Vmpp (V)	38.38	#Min MFV 1	6.116563	7	PASO 6. NUMERO DE INVERSORES Y MFV					
	Isc (A)	13.3	PUNTO DE MAX POTENCIA		#Max MFV 2	25.53434	25	POTENCIA TOTAL A INSTALAR EN POTENCIA AC QUE DA EL INVERSOR KW	42.252		
	Imp (A)	13.03	INTERVALO DE MFV QUE CUMPLE EL DISEÑO POR STRING		#Min MFV 2	6.001782	7	POTENCIA AC QUE DA EL INVERSOR KW	60		
	βoc (%/C)	-0.265	MAXIMA ENTRADA DE CORRIENTE AL INVERSOR		Isc (A)	32	# DE INVERSORES			0.7042	
	βmpp (%/C)	-0.34	PASO 4. CALCULO DE #MFV / STRING		#Max MFV	23	#MFV TOTALES			59.1528	
	αoc (%/C)	0.05	PRUEBA DE NUMERO DE MODULOS		# MFV	14	PASO 7. AHORRO DE ENERGIA				
	potencia del modulo tolerancia del modulo	500 3	DATO DE INVERSOR		POTENCIA DC INVERSOR Kw	60	INDICE DE PRODUCCION ANUAL yr			1500	
DATOS DE SALIDA	T. Celda min	19	CALCULO DE #MFV / STRING		POT MAX / MFV	503	COSTO DE ENERGIA \$/kWh			0.12	
	T. Celda max	63.75			#STRING / INVERSOR	8.520307	6	CONSUMO MENSUAL TOTAL EN kWh			110000
PASO 2 VARIACION DE PARAMETROS ELECTRICOS	Voc max (V)	46.274245					POTENCIA NOMINAL DE CADA MODULO KWP			0.5	
	Voc min (V)	40.87258438					POTENCIA FOTOVOLTAICA INSTALADA (P <sub>inv</sub> ) kWp			29.5764	
	Vmpp max (V)	39.162952					FACTURA ELECTRICA E <sub>ac</sub>			44364.6	
	Vmpp min (V)	33.323435					FACTURA ELECTRICA E <sub>ac</sub>			3697.05	
	Isc min (A)	13.8583					INGRESO MENSUAL \$			443.646	
	Isc max (A)	14.1633125					PORCENTAJE DE AHORRO EN ENERGIA kWh/kWh			0.03361	

Anexo 2. Cuadro de cálculos de dimensionamiento de sistema solar fotovoltaico con fórmulas para la variante 2.

PASO 1. ANALISIS DE TEMPERATURA			PASO 3. calculo de modulos fotovoltaicos por string				PASO 5. DATOS REALES OBTENIDOS CON EL ARREGLO				
DATOS DE ENTRADA DE PANEL SOLAR	MODELO	JAM 72S10-410MPR	PARAMETROS DEL INVERSOR	Vmaxdc entrada	1100	-	VERIFICACION DE PARAMETROS ELECTRICOS	POTENCIA REAL (KW)	46.48		
	T. Amb. Min Celcius	19		VSTARToc	160	-		VOLTAJE MAX ENTRADA INVERSOR (V)	356.56571		
	T. Amb. max Celcius	30		Vmpppt max	1000	-		Entrada del inductor	170.05076		
	NOCT CELCIUS	47		Vmpppt min	140	-		Vmpppt max (V)	299.31636		
	Voc (V)	50.12	DATOS SALIDA		#Max MFV 1	21.594898	21	VERIFICACION DE VENTANA mppt	Vmpppt min (V)	253.40018	
	Vmpp (V)	41.88	#Min MFV 1	3.5684534	4	PASO 6. NUMERO DE INVERSORES Y MFV					
	Isc (A)	10.45	PUNTO DE MAX POTENCIA		#Max MFV 2	23.388627	23	POTENCIA TOTAL A INSTALAR	30		
	Imp (A)	9.79	INTERVALO DE MFV QUE CUMPLE EL DISEÑO POR STRING		#Min MFV 2	3.8674006	4	POTENCIA AC QUE DA EL INVERSOR KW	60		
	βoc (%/C)	-0.272	MAXIMA ENTRADA DE CORRIENTE AL INVERSOR		Isc (A)	27	# DE INVERSORES			0.5	
	βmpp (%/C)	-0.35	PASO 4. CALCULO DE #MFV / STRING		#Max MFV	21	#MFV TOTALES			56	
	αoc (%/C)	0.044	PRUEBA DE NUMERO DE MODULOS		# MFV	7	PASO 7. AHORRO DE ENERGIA				
	potencia del modulo tolerancia del modulo	410 5	DATO DE INVERSOR		POTENCIA DC INVERSOR Kw	60	INDICE DE PRODUCCION ANUAL yr kWh/kwp			1500	
DATOS DE SALIDA	T. Celda min	19	CALCULO DE #MFV / STRING		POT MAX / MFV	415	COSTO DE ENERGIA \$/kWh			0.12	
	T. Celda max	63.75			#STRING / INVERSOR	20.654045	16	CONSUMO MENSUAL TOTAL EN kWh			110000
PASO 2 VARIACION DE PARAMETROS ELECTRICOS	Voc max (V)	50.9379584					POTENCIA NOMINAL DE CADA MODULO KWP			0.41	
	Voc min (V)	44.837352					POTENCIA FOTOVOLTAICA INSTALADA (P <sub>inv</sub> ) kWp			22.96	
	Vmpp max (V)	42.75948					FACTURA ELECTRICA E <sub>ac</sub>			34440	
	Vmpp min (V)	36.200025					FACTURA ELECTRICA E <sub>ac</sub>			2870	
	Isc min (A)	10.422412					INGRESO MENSUAL \$			344.4	
	Isc max (A)	10.6281725					PORCENTAJE DE AHORRO EN ENERGIA kWh/kWh			0.0260909	

Anexo 3. Cuadro de cálculos de dimensionamiento de sistema solar fotovoltaico con fórmulas para la variante 3.

PASO 1. ANALISIS DE TEMPERATURA			PASO 3. calculo de modulos fotovoltaicos por string			PASO 5. DATOS REALES OBTENIDOS CON EL ARREGLO				
DATOS DE ENTRADA DE PANEL SOLAR	MODELO	LONGI LR5-66HPH 500 W	PARAMETROS DEL INVERSOR	VmaxdcEntrada	1100	-	VERIFICACION DE PARAMETROS ELECTRICOS	POTENCIA REAL (kWp)	42.252	
	T. Amb. Min Celcius	19		VSTARTToc	250	-		VOLTAJE MAX ENTRADA INVERSOR (V)	647.83943	
	T. Amb. max Celcius	30		Vmppt max	1000	-		Tensión del inversor	85.015875	
	NOCT CELCIUS	47		Vmppt min	200	-		Vmppt max (V)	548.28133	
	Voc (V)	45.55	DATOS SALIDA	#Max MFV 1	23.771322	23	Vmppt min (V)	466.52809		
	Vmpp (V)	38.38	PUNTO DE MAX POTENCIA	#Min MFV 1	6.1165694	7	PASO 6. NUMERO DE INVERSORES Y MFV			
	Isc (A)	13.9		#Max MFV 2	25.534337	25	POTENCIA TOTAL A INSTALAR	42.252		
	Imp (A)	13.03		#Min MFV 2	6.0017822	7	POTENCIA AC QUE DA EL INVERSOR kW	60		
	goc (%C)	-0.265	INTERVALO DE MFV QUE CUMPLE EL DISEÑO POR STRING	#Max MFV	23		# DE INVERSORES	0.7042		
	βmppt (%C)	-0.34	MAXIMA ENTRADA DE CORRIENTE AL INVERSOR	Isc (A)	32		#MFV TOTALES	59.1528		
	aoc (%C)	0.05	PASO 4. CALCULO DE #MFV / STRING			PASO 7. AHORRO DE ENERGIA				
	potencia del modulo	500	TIPO DE PROYECTO DE MODULOS FOTOVOLTAICOS	# MFV	14	INDICE DE PRODUCCION ANUAL yr kWh/kWp			1500	
tolerancia del modulo	3	DATO DE INVERSOR	POTENCIA DC INVERSOR kW	60	COSTO DE ENERGIA \$/kWh			0.12		
DATOS DE SALIDA	T. Celda min	19	CALCULO DE #MFV / STRING	POT MAX / MFV	503	CONSUMO MENSUAL TOTAL EN kWh			110000	
	T. Celda max	63.75		#STRING / INVERSOR	8.5203067	6	POTENCIA NOMINAL DE CADA MODULO kWp			0.5
PASO 2 VARIACION DE PARAMETROS ELECTRICOS	Voc max (V)	46.274245				POTENCIA FOTOVOLTAICA INSTALADA (Prv) kWp			29.5764	
	Voc min (V)	40.87258438				FACTURA ELECTRICA Eac			44364.6	
	Vmpp max (V)	39.162952				FACTURA ELECTRICA Eac			3697.05	
	Vmpp min (V)	33.323435				INGRESO MENSUAL \$			443.646	
Isc min (A)	13.8583				PORCENTAJE DE AHORRO EN ENERGIA kWh/kWh			0.0336095		
Isc max (A)	14.1693125									

Anexo 4. Cuadro de configuración para simulación de componentes en PVsyst para configuración 1.

## Anexo 5. Cuadro de configuración para simulación de componentes en PVSyst para configuración 2.

### Subconjunto

**Nombre y orientación del subconjunto**  
Nombre:   
Orientación:  Inclinación:  Azimut:

**Ayuda de pre-dimensionamiento**  
 Sin dimensionamiento Potencia planeada:  kWp  
 Redimens. ... o área disponible (módulos):  m<sup>2</sup>

**Selección del módulo FV**  
Disponibles:  Núm. máximo de módulos:   
Módulo:  410 Wp 35V Si-mono JAM72-510-410-PR Desde 2020 Datasheets 2020   
 Usar optimizador  
Dimensiones: V<sub>mpp</sub> (60°C) 36.2 V, Voc (-10°C) 55.2 V

**Selección del inversor**  
Disponibles:   50 Hz  60 Hz  
Módulo:  10 kW 140 - 1000 V TL 50/60 Hz MOD 10KTL3-X Desde 2021   
Núm. de inversores:   Voltaje de funcionamiento: 140-1000 V Poder global inversor: 40.0 kWca   
 Utilizar multi-MPPT Voltaje máximo de entrada: 1100 V **inversor con 2 MPPT** **Reparto de potencia en este inversor**

**Diseño del conjunto**  
Núm. de módulos y cadenas: Mód. en serie:  entre 4 y 19; Núm. cadenas:  entre 14 y 18  
Perdida sobrecarga: 0.1%; Proporción Pnom: 1.15   
Orientación #1:  #2:

**Condiciones de operación**  
V<sub>mpp</sub> (60°C): 254 V, V<sub>mpp</sub> (20°C): 297 V, Voc (-10°C): 386 V  
Irradia. plano: 1000 W/m<sup>2</sup>; Imp (STC): 157 A; Isc (STC): 166 A; Isc (en STC): 166 A  
Potencia de funcionamiento máx. (en 1103 W/m<sup>2</sup> y 50°C): 46.1 kW  
**Potencia nom. conjunto (STC) 45.9 kWp**

*Es posible que el voltaje del conjunto MPP no alcance el voltaje mínimo del inversor para obtener la máxima potencia.*

### Lista de subconjuntos

Nombre	#Mód #Inv.	#Cadena #MPPT
Generador FV		
JA Solar - JAM72-510-410-PR	7	16
Growatt New Energy - MOD 10K...	4	1

### Resumen sistema global

Núm. de módulos	112
Área del módulo	225 m <sup>2</sup>
Núm. de inversores	4
Potencia FV nominal	45.9 kWp
Potencia de CA nominal	40.0 kWCA
Proporción Pnom	1.148

## Anexo 5. Cuadro de configuración para simulación de componentes en PVSyst para configuración 3.

### Subconjunto

**Nombre y orientación del subconjunto**  
Nombre:   
Orientación:  Inclinación:  Azimut:

**Ayuda de pre-dimensionamiento**  
 Sin dimensionamiento Potencia planeada:  kWp  
 Redimens. ... o área disponible (módulos):  m<sup>2</sup>

**Selección del módulo FV**  
Disponibles:  Núm. máximo de módulos:   
Módulo:  500 Wp 32V Si-mono LR5-66HPH-500M G2 Desde 2022 Manufacturer 2022   
 Usar optimizador  
Dimensiones: V<sub>mpp</sub> (60°C) 33.1 V, Voc (-10°C) 50.0 V

**Selección del inversor**  
Disponibles:   50 Hz  60 Hz  
Módulo:  20 kW 200 - 650 V 50/60 Hz MAC 20KTL3-XL Desde 2019   
Núm. de inversores:   Voltaje de funcionamiento: 200-650 V Poder global inversor: 40.0 kWca   
 Utilizar multi-MPPT Voltaje máximo de entrada: 800 V **inversor con 3 MPPT** **Reparto de potencia en este inversor**

**Diseño del conjunto**  
Núm. de módulos y cadenas: Mód. en serie:  entre 7 y 16; Núm. cadenas:  entre 6 y 7  
Perdida sobrecarga: 0.0%; Proporción Pnom: 1.05   
Orientación #1:  #2:

**Condiciones de operación**  
V<sub>mpp</sub> (60°C): 464 V, V<sub>mpp</sub> (20°C): 539 V, Voc (-10°C): 700 V  
Irradia. plano: 1000 W/m<sup>2</sup>; Imp (STC): 78.2 A; Isc (STC): 83.4 A; Isc (en STC): 83.4 A  
Potencia de funcionamiento máx. (en 1103 W/m<sup>2</sup> y 50°C): 42.4 kW  
**Potencia nom. conjunto (STC) 42.0 kWp**

### Lista de subconjuntos

Nombre	#Mód #Inv.	#Cadena #MPPT
Generador FV		
Longi Solar - LR5-66HPH-500M G2	14	6
Growatt New Energy - MAC 20K...	2	1

### Resumen sistema global

Núm. de módulos	84
Área del módulo	199 m <sup>2</sup>
Núm. de inversores	2
Potencia FV nominal	42.0 kWp
Potencia de CA nominal	40.0 kWCA
Proporción Pnom	1.050

