

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Diseño de un sistema híbrido interconectado de tipo eólico y solar para alimentar la potencia eléctrica del consumo público de un complejo residencial en Mixco, Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Dylan Alexander Pérez Castillo para optar el grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Industrial

Guatemala

2024



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



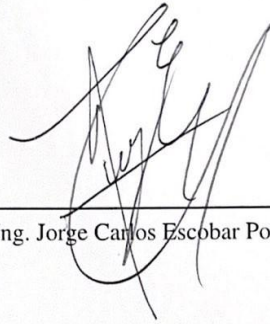
Diseño de un sistema híbrido interconectado de tipo eólico y solar para alimentar la potencia eléctrica del consumo público de un complejo residencial en Mixco, Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Dylan Alexander Pérez Castillo para optar el grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Industrial

Guatemala

2024

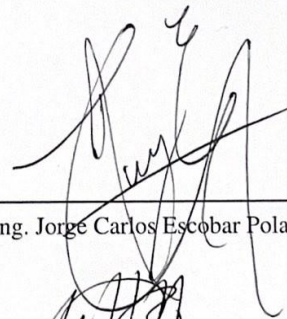
Vo.Bo.:



(f)

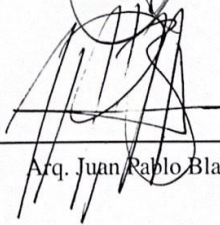
Ing. Jorge Carlos Escobar Polanco

Tribunal Examinador:



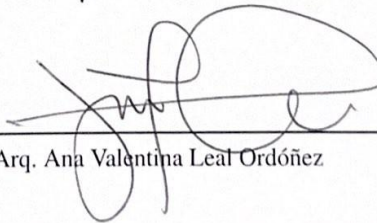
(f)

Ing. Jorge Carlos Escobar Polanco



(f)

Arq. Juan Pablo Blas Arias



(f)

Arq. Ana Valentina Leal Ordóñez

Fecha de aprobación: Guatemala, 9 de enero de 2025.

## PREFACIO

En los últimos años, la preocupación por el uso eficiente de la energía y la necesidad de fuentes renovables ha crecido considerablemente a nivel mundial. El impacto ambiental y económico causado por la dependencia de fuentes energéticas no renovables es evidente, y esto ha impulsado a muchas industrias y sectores a buscar soluciones que permitan reducir su huella ecológica, así como una reducción en costos por consumo energético. Esta situación ha sido un motor importante para quienes, como yo, buscamos contribuir al desarrollo sostenible a través de proyectos que integren tecnologías renovables.

De este contexto surge mi interés en realizar un proyecto que combine energía solar y eólica para satisfacer las necesidades energéticas de un complejo residencial, con el objetivo de reducir la dependencia de fuentes no renovables y generar ahorros significativos en el largo plazo. La implementación de este tipo de sistemas no solo representa un avance en términos de sostenibilidad, sino también una oportunidad para demostrar que la energía limpia es viable y accesible en el entorno residencial. Este trabajo no habría sido posible sin la colaboración y el apoyo de varias personas que, con su orientación y experiencia, me ayudaron a materializar la idea.

En primer lugar, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento al ingeniero Jorge Carlos Escobar Polanco. Su apoyo ha sido un pilar fundamental para el desarrollo de esta investigación. Desde las primeras etapas del proyecto, sus consejos acertados me permitieron definir claramente el objetivo que quería alcanzar. Su experiencia en el campo de las energías renovables ha enriquecido profundamente el enfoque y la dirección de esta investigación. Me siento honrado de haber realizado una investigación de este tipo con el respaldo y la orientación de un profesional tan dedicado y comprometido, que siempre responde desde la generosidad.

Por último, quiero expresar agradecimiento a mis padres, Roberto Pérez y Sharon Castillo, así como a mi hermano Diego Pérez. Su apoyo incondicional y su confianza en mí han sido mi mayor fuente de motivación a lo largo de este proceso. Agradezco cada sacrificio que hicieron por mí y por haberme inspirado a seguir adelante con dedicación y perseverancia. Sin su amor y respaldo, este logro no habría sido posible.

# CONTENIDO

Prefacio .....	v
Lista de cuadros .....	ix
Lista de figuras .....	x
Resumen.....	xii
Abstract .....	xiii
I.    Introducción .....	1
II.   Justificación .....	3
III.  Objetivos.....	5
A.  Objetivo general.....	5
B.  Objetivos específicos .....	5
IV.   Marco teórico.....	6
A.  Electricidad .....	6
B.  Circuito eléctrico.....	7
C.  Eficiencia energética.....	8
D.  Ciclo de vida de la energía eléctrica .....	8
E.  Energías renovables .....	9
1.  Energía hidráulica.....	10
2.  Energía de biomasa.....	11
3.  Energía geotérmica .....	11
4.  Energía solar .....	12
5.  Energía eólica .....	14
F.  Paneles solares .....	16
1.  Tipo de módulos solares .....	17
2.  Tipos de conexiones entre placas solares .....	18
3.  Instalaciones fotovoltaicas.....	20
4.  Elementos principales de la instalación fotovoltaica.....	21
5.  Elementos principales de la instalación fotovoltaica.....	23
6.  Diagrama de trayectoria solar.....	26
7.  Cálculo de paneles solares.....	27
8.  Modelo de paneles solares de interés.....	32
G.  Aerogeneradores .....	36
1.  Aerogeneradores de eje horizontal .....	37

2.	Aerogeneradores de eje vertical.....	38
3.	Mini aerogeneradores .....	38
4.	Estudio del potencial eólico.....	39
5.	Modelos de mini aerogeneradores de interés.....	40
6.	Cálculo de mini aerogeneradores .....	43
H.	Consumo energético domiciliario .....	45
1.	Factores de influencia en el consumo energético .....	46
2.	Consumo energético en Guatemala .....	46
I.	Sistemas de generación eléctrica interconectados a la red pública .....	47
J.	Aspectos técnicos de integración.....	47
K.	El sector inmobiliario en Guatemala.....	48
1.	Déficit y demanda de vivienda .....	49
2.	Proyectos residenciales con tendencia renovable .....	49
L.	Evaluación de costos.....	50
1.	Periodo de retorno .....	51
2.	Valor presente neto (VPN) .....	51
V.	Metodología.....	53
A.	Recopilación de datos .....	53
B.	Selección de modelos de paneles solares y aerogeneradores.....	64
C.	Cálculos .....	70
D.	Comparación con Solarius PV .....	75
E.	Generación de resultados .....	76
VI.	Análisis y discusión de resultados .....	78
A.	Consumo energético mensual del residencial .....	78
B.	Potencial solar.....	79
C.	Potencial eólico.....	90
D.	Diseño del proyecto .....	91
E.	Capacidad energética de los equipos considerando la variación climática anual .....	96
F.	Rango de ahorros económicos mensuales.....	100
G.	Costos del proyecto.....	101
H.	Periodos de retorno probables.....	103
I.	Valor presente neto (VPN).....	104
J.	Huella de carbono .....	106
K.	Comparación de diseño solar con Solarius PV .....	109
VII.	Conclusiones .....	112

VIII.	Recomendaciones .....	114
IX.	Referencias.....	115
X.	Apéndices.....	120
A.	Planos generales del diseño solar y eólico.....	120
B.	Presupuesto del proyecto .....	126
C.	Fichas técnicas de los equipos .....	128
D.	Hojas de cálculo.....	133
E.	Uso de Solarius PV .....	135
F.	Información de interés sobre EEGSA .....	137

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Cuadro de coeficientes de longitud de rugosidad.....	44
Cuadro 2 Consumos energéticos mensuales del residencial por contador (en kWh).....	53
Cuadro 3 Factores de importancia para selección de modelo de panel solar. ....	65
Cuadro 4 Comparación en la generación energética diaria de los modelos de panel.....	65
Cuadro 5 Calificación obtenida para cada modelo de panel solar en cada factor .....	67
Cuadro 6 Resultados de ponderación de factores para los modelos de paneles.....	67
Cuadro 7 Comparación en la generación energética diaria de los aerogeneradores .....	68
Cuadro 8 Calificación obtenida para cada modelo de aerogenerador en cada factor.....	69
Cuadro 9 Resultados de ponderación de factores para los aerogeneradores .....	70
Cuadro 10 Determinación del consumo energético de diseño .....	70
Cuadro 11 Densidades del viento en relación con la temperatura .....	71
Cuadro 12 Análisis de la distribución acumulativa de la energía fotovoltaica específica	81
Cuadro 13 Estadísticas anuales de la irradiancia normal directa .....	82
Cuadro 14 Estadísticas anuales de la irradiancia global horizontal (GHI).....	84
Cuadro 15 Estadísticas anuales de la irradiancia global inclinada (GTI).....	86
Cuadro 16 Cálculo de la cantidad de aerogeneradores para cubrir consumo de diseño....	92
Cuadro 17 Cantidad de turbinas a instalar y consumo energético mensual generado.....	92
Cuadro 18 Separación entre turbinas eólicas .....	93
Cuadro 19 Plan de instalación de paneles solares .....	94
Cuadro 20 Potencia generada por módulo fotovoltaico con efectos de la temperatura ...	94
Cuadro 21 Energía a satisfacer con paneles solares y cantidad de módulos necesarios ...	95
Cuadro 22 Análisis de la capacidad de los inversores con los circuitos establecidos.....	96
Cuadro 23 Análisis de la capacidad energética de los paneles solares .....	96
Cuadro 24 Análisis de la capacidad energética de aerogeneradores .....	99
Cuadro 25 Rango de ahorros económicos mensuales .....	101
Cuadro 26 Análisis de costos del proyecto .....	102
Cuadro 27 Periodo de retorno probable con cuotas mensuales.....	103
Cuadro 28 Periodo de retorno probable considerando ahorros mensuales .....	104
Cuadro 29 Valor presente neto del proyecto con ingresos de cuota de mantenimiento..	105
Cuadro 30 Valor presente neto del proyecto con ingresos de los ahorros mensuales.....	105
Cuadro 31 Cálculo de gramos de CO2 producidos mensualmente .....	106
Cuadro 32 Gramos de CO2 generados considerando combustión fósil.....	107
Cuadro 33 Energía generada mensualmente con diseño de Solarius PV .....	110
Cuadro 34 Comparación de la energía generada con los dos métodos .....	111

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Rango de costos de la energía eléctrica en América Latina.....	1
Figura 2 Precio de la energía eléctrica en Guatemala. ....	2
Figura 3 Comportamiento gráfico de la corriente continua y alterna.....	7
Figura 4 Ciclo de vida de la energía eléctrica. ....	9
Figura 5 Funcionamiento de sistema hidráulico con regulación de caudal.....	10
Figura 6 Azucarera utilizando bagazo como biomasa .....	11
Figura 7 Potencial solar en Guatemala.....	13
Figura 8 Ejemplo de módulo monocristalino.....	17
Figura 9 Ejemplo de módulo policristalino.....	18
Figura 10 Diagrama de conexión de paneles solares en serie.....	19
Figura 11 Diagrama de conexión de paneles solares en paralelo.....	20
Figura 12 Representación de la irradiancia normal directa.....	24
Figura 13 Representación de la irradiancia horizontal difusa .....	25
Figura 14 Ejemplo de diagrama de recorrido solar .....	27
Figura 15 Cálculo de horas solar pico.....	27
Figura 16 Cálculo de la temperatura real sobre la célula fotovoltaica .....	28
Figura 17 Cálculo de la potencia real generada por la célula fotovoltaica.....	28
Figura 18 Cálculo de la cantidad de paneles solares necesarios .....	29
Figura 19 Cálculo del ángulo de inclinación de paneles solares para instalaciones. ....	29
Figura 20 Distancia entre filas en cubiertas planas. ....	30
Figura 21 Espacio de ocupación de paneles solares sobre cubiertas planas.....	30
Figura 22 Cálculo del voltaje máximo en inversores por circuito.....	31
Figura 23 Cálculo de la inclinación del panel solar por época del año .....	31
Figura 24 Diseño de aerogenerador de eje horizontal.....	37
Figura 25 Modelo Darrieus como aerogenerador de eje vertical .....	38
Figura 26 Modelo de turbina eólica Oloneto 48V de eje vertical .....	41
Figura 27 Turbina de eje vertical marca Hengjingtr .....	42
Figura 28 Modelo Atlas 7 de la marca Tesup .....	43
Figura 29 Cálculo de la velocidad del viento a la altura del aerogenerador.....	44
Figura 30 Potencia generada por un aerogenerador de eje vertical.....	45
Figura 31 Gráfica representativa del consumo energético por departamento en el 2022 .	47
Figura 32 Cálculo del valor presente neto (VPN) .....	52
Figura 33 Vista del área social del residencial .....	54
Figura 34 Visualización del salón social del residencial con vista lateral .....	54
Figura 35 Vista aérea con medidas del salón social.....	56
Figura 36 Vista aérea del área de vestidores con medidas .....	56
Figura 37 Vista aérea del terreno natural para instalación fotovoltaica .....	57
Figura 38 Vista aérea de la corona del talud para instalaciones eólicas.....	57
Figura 39 Selección del área de Mixco a través del Global Solar Atlas .....	58
Figura 40 Visualización de datos arrojados en estudio solar realizado.....	59
Figura 41 Información de rangos promedios al día en el sector de Mixco .....	60

Figura 42 Análisis del comportamiento eólico a través de Global Wind Atlas .....	61
Figura 43 Rosa de frecuencia y velocidad del viento.....	62
Figura 44 Rosa de potencia del viento .....	62
Figura 45 Longitud de rugosidad para Mixco .....	63
Figura 46 Comparación de precio y energía generada por los modelos de paneles.....	66
Figura 47 Comparación de precio y energía generada por los modelos de turbinas.....	69
Figura 48 Configuración del área de Mixco para análisis en Solarius PV .....	75
Figura 49 Determinación de las áreas de estudio en Solarius PV .....	76
Figura 50 Comportamiento del consumo energético mensual en el residencial .....	78
Figura 51 Comparación del historial del consumo energético con consumo de diseño....	79
Figura 52 Distribución acumulativa de la energía fotovoltaica específica.....	80
Figura 53 Comportamiento de la irradiancia normal directa anual.....	82
Figura 54 Comportamiento de la irradiancia global horizontal (GHI) anual .....	84
Figura 55 Comportamiento de la irradiancia global inclinada (GTI).....	85
Figura 56 Promedios mensuales de la producción total de energía fotovoltaica .....	87
Figura 57 Diagrama de trayectoria solar en Mixco, Guatemala.....	88
Figura 58 Horarios promedio de la producción fotovoltaica .....	89
Figura 59 Producción horaria promedio.....	90
Figura 60 Comportamiento del viento a lo largo del año en el sitio de estudio .....	91
Figura 61 Separación mínima entre filas de paneles solares.....	93
Figura 62 Comportamiento de la generación energética anual de los paneles solares.....	97
Figura 63 Comportamiento de la generación energética anual de aerogeneradores .....	99
Figura 64 Comparación de costos relacionados al diseño energético .....	102
Figura 65 Gráfico de la variación de gramos de CO2 producidos mensualmente .....	106
Figura 66 Comparación de gramos de CO2 por consumo fósil .....	106
Figura 67 Comparación de emisiones de CO2 con energías renovables vs fósiles.....	108
Figura 68 Diseño solar realizado en Solarius PV.....	109
Figura 69 Diseño solar realizado en Solarius PV sobre la losa del salón social .....	109
Figura 70 Comparación visual de la energía generada en Solarius PV y manuales.....	111
Figura 71 Plano de instalación de paneles solares .....	121
Figura 72 Plano de ubicación de circuitos de paneles solares.....	122
Figura 73 Plano de ubicación de turbinas eólicas .....	123
Figura 74 Plano de instalaciones generales.....	124
Figura 75 Diagramas unifilares del proyecto .....	125
Figura 76 Presupuesto general del proyecto .....	127
Figura 77 Ficha técnica de panel solar ZXM8-TPLDD132 .....	129
Figura 78 Ficha técnica de turbina eólica Atlas 7 .....	130
Figura 79 Ficha técnica de panel solar Maxeon 3 .....	131
Figura 80 Ficha técnica de panel solar Maxeon 6 AC .....	132
Figura 81 Cálculo del consumo energético .....	133
Figura 82 Cálculo de sistemas eólicos .....	134
Figura 83 Introducción de datos a Solarius PV.....	135
Figura 84 Resultados gráficos obtenidos en Solarius PV.....	136
Figura 85 Requisitos para auto productores de energía con EEGSA.....	137
Figura 86 Formulario de inscripción de auto productores con EEGSA.....	138

## RESUMEN

Los recursos renovables desempeñan un papel esencial en el panorama energético a nivel global. La importancia radica en la capacidad que tienen para proporcionar energía para el consumo humano a partir de un recurso disponible directamente del medio ambiente, sin recurrir a la combustión, el cual genera tasas bajas (casi nulas) de contaminación. Dichas fuentes contribuyen a la mitigación del cambio climático, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Su implementación también ha generado sistemas de producción y distribución de energía eléctrica que son pilares energéticos en diferentes países. De este modo, se genera un mercado diverso de fuentes de abastecimiento, reduciendo la dependencia de fuentes importadas. (Merino, 2007)

Gracias a su geografía diversa y condiciones climáticas favorables, Guatemala es un entorno ideal para el desarrollo de recursos renovables. Una de sus principales ventajas es la alta radiación solar global, con un promedio de 5.3 kWh/m<sup>2</sup> por día, un nivel superior al de muchos países que ya tienen planes de aprovechamiento de energía solar (Ministerio de Energías y Minas, 2017). Aparte de la radiación solar, Guatemala cuenta regulaciones locales que permiten el acceso a la red eléctrica, desarrollando sistemas que aportan a la matriz energética del país. Además, Guatemala cuenta con un significativo potencial eólico, especialmente en sus regiones montañosas, donde se registran vientos constantes y adecuados para la generación de energía (SICA, 2017). Estas condiciones hacen de Guatemala un país óptimo para la producción de energía renovable tanto solar como eólica (Aroche, 2016).

Esta investigación se centró en la implementación de soluciones sostenibles para poder suministrar energía eléctrica en áreas comunes dentro de proyectos residenciales en Guatemala. En específico, se evaluó la factibilidad de implementar equipos fotovoltaicos y mini aerogeneradores dentro de un residencial para poder suministrar el consumo energético de áreas de convivencia (canchas, salones, gimnasio y piscina), el alumbrado público, así como el consumo energético de las bombas del sistema de agua potable y planta de tratamiento de aguas residuales. De esta manera, se determinó el impacto energético y económico que tuvo la instalación de fuentes renovables. Esto permite, que, a futuro, desarrolladoras puedan analizar la factibilidad de implementar esta tecnología en futuros proyectos, y contribuir de manera sustancial a la generación de energías limpias.

**Palabras clave:** Energías renovables, energía solar, energía eólica, fotovoltaico, aerogeneradores, sostenibilidad, factibilidad, áreas residenciales, eficiencia energética.

## ABSTRACT

Renewable resources play an essential role in the global energy landscape. Their importance lies in their ability to provide energy for human consumption from resources directly available in the environment, without resorting to combustion, which results in very low (almost zero) pollution rates. These sources contribute to mitigating climate change by reducing greenhouse gas emissions. Their implementation has also led to the development of electricity production and distribution systems that serve as energy pillars in various countries. In this way, a diverse market of supply sources is created, reducing dependence on imported energy. (Merino, 2007)

Thanks to its diverse geography and favorable climatic conditions, Guatemala is an ideal environment for the development of renewable resources. One of its main advantages is its high global solar radiation, averaging 5.3 kWh/m<sup>2</sup> per day—higher than many countries that already have solar energy utilization plans (Ministry of Energy and Mines, 2017). In addition to solar radiation, Guatemala has local regulations that allow access to the electrical grid, enabling the development of systems that contribute to the national energy matrix. Furthermore, Guatemala has significant wind power potential, especially in its mountainous regions, where consistent and suitable winds for energy generation are recorded (SICA, 2017). These conditions make Guatemala an optimal country to produce both solar and wind renewable energy (Aroche, 2016).

This research focused on the implementation of sustainable solutions to supply electricity to common areas within residential projects in Guatemala. Specifically, it assessed the feasibility of implementing photovoltaic systems and small wind turbines within a residential complex to supply the energy consumption of communal areas (sports courts, halls, gym, and pool), public lighting, as well as the energy demand of potable water system pumps and the wastewater treatment plant. In this way, the study determined the energy and economic impact of installing renewable energy sources. This allows future developers to assess the feasibility of implementing this technology in upcoming projects, making a substantial contribution to the generation of clean energy.

**Keywords:** Renewable energy, solar energy, wind energy, photovoltaic, wind turbines, sustainability, feasibility, residential areas, energy efficiency.

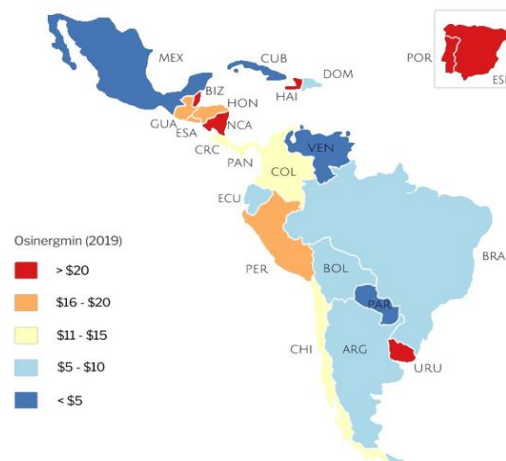
# I. INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el cambio climático ha llevado a la necesidad de encontrar alternativas sostenibles a los métodos tradicionales de obtener energía. Fuentes como la energía solar y la eólica no solo contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también representan una reducción a la dependencia de energías contaminantes. Conforme los avances en la tecnología, la diversificación de modelos solares y eólicos han permitido un mayor nivel de alimentación energética con precios competitivos. Una de las tecnologías que ha tomado relevancia en los últimos años es la interconexión a la red eléctrica, donde las personas que desean instalar un equipo de generación energética a base de fuentes renovables pueden conectarlos a la red eléctrica para contribuir a la matriz energética y de esta manera reducir el impacto económico del consumo mensual.

En países como Guatemala, donde el precio de la electricidad por Kilovatio hora es grande, la solución de interconexión de equipos a la red toma relevancia con el objetivo de tener un beneficio económico a largo plazo. Como se puede observar en la Figura 1, para el año 2019 Guatemala contaba un rango de precio de Kilovatio hora en un rango de 16 a 20 centavos de dólar. Comparándolo con otros países como Argentina, México y Bolivia, donde el precio del Kilovatio hora no sube de los 10 centavos de dólar, se establece una situación alarmante para el consumo de los guatemaltecos.

**Figura 1.**

*Rango de costos de la energía eléctrica en América Latina.*

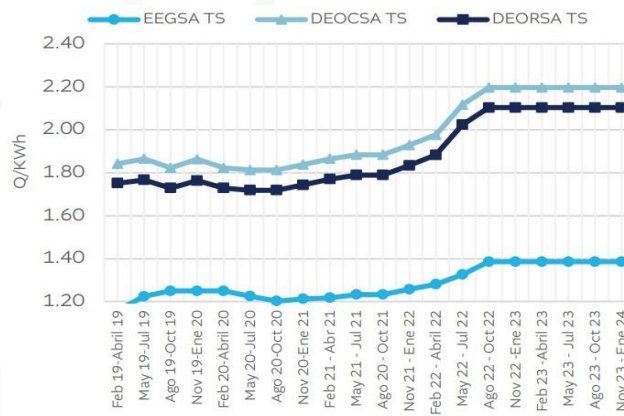


*Nota. Adaptado de Salgado (2019).*

A nivel país, el precio de la energía eléctrica se ha mantenido estable en los últimos años. Como se puede observar en la Figura 2, obtenida del Informe de monitoreo de indicadores del sector energético del 2024, por parte del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala, Se puede observar que desde el 2015 el precio de la energía eléctrica se ha mantenido dentro del mismo rango. De esta manera, el precio de la energía eléctrica se ha vuelto un punto importante para las familias guatemaltecas, donde el consumo se puede ver limitado por altos precios.

**Figura 2.**

*Precio de la energía eléctrica en Guatemala.*



*Nota. Adaptado del Ministerio de Energía y Minas. (2017)*

Ante este panorama, la implementación de fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, se presenta como una solución viable para reducir los costos energéticos y mejorar la sostenibilidad del país. Guatemala, gracias a su ubicación geográfica y condiciones climáticas favorables, tiene un gran potencial para aprovechar tanto la energía solar como la eólica. Con una irradiación solar promedio de 5.3 kWh/m<sup>2</sup> por día y zonas con vientos constantes en sus regiones montañosas, el país está bien posicionado para desarrollar proyectos energéticos que puedan reducir la dependencia de la red eléctrica convencional y disminuir el impacto económico sobre sus usuarios.

Este proyecto no solo busca contribuir al uso eficiente de las fuentes renovables en el sector residencial, sino también promover una mayor conciencia sobre los beneficios económicos que pueden ofrecer estas tecnologías. Al demostrar la viabilidad de un sistema híbrido en un entorno residencial, se espera que este estudio sirva como un referente para futuras implementaciones en Guatemala, incentivando la transición hacia un modelo energético más limpio y sostenible.

## II. JUSTIFICACIÓN

La matriz energética de Guatemala se encuentra conformada, en su mayoría, por fuentes de energía renovables. Según un monitoreo realizado por la Asociación de Generadores con Energía Renovable (AGER) a finales del año 2023, las principales fuentes de generación son la hidroeléctrica con una participación del 46.10%, seguido del carbón con 13.91%, la energía eólica con un 6.57% y energía solar con un 1.88%. A pesar de la fuerte presencia de fuentes renovables en el país, existe una dependencia significativa en el uso del carbón para la generación de energía eléctrica.

La Ley Política Energética 2013-2027 presentada por el Ministerio de Energía y Minas (MEM), establece que la generación energética para el año 2027 debe ser proveniente en un 80 por ciento de fuentes renovables. A finales del 2022, la generación de fuentes renovables se encuentra en un 71.1 por ciento de la generación total (AMM, 2023). Guatemala se enfrenta al desafío de cubrir la demanda eléctrica a nivel nacional, generar sistemas y redes de energía eléctrica de calidad y atraer inversionistas para el sector renovable. Debido a la coyuntura global, como la inflación y problemas políticos entre países como Ucrania y Rusia, la búsqueda de inversionistas en este tipo de proyectos ha sido una problemática en los últimos años (The New York Times, 2023). El desafío se presenta en el análisis de impacto económico, donde los proyectos requieren de altas tasas de inversión en períodos de retorno que pueden llegar a más de 15 años (CEPAL, 2016).

Uno de los limitantes al desarrollo del país es el precio de la energía eléctrica, el cual es ubicado como el precio más alto a nivel Centroamericano y el tercero más elevado en toda Latinoamérica según el informe de Global Petrol Prices. En dicho estudio, realizado en septiembre del 2022, Guatemala lideraba el costo de energía eléctrica con un precio de \$0.28 por kWh. Este es un precio elevado comparándolo con países como Costa Rica, donde el precio ronda los \$0.16 por kWh. A pesar de que ambos países cuentan con una matriz energética liderada por fuentes renovables, Guatemala limita la capacidad de consumo energético que tienen los guatemaltecos debido a los altos precios.

Por los grandes retos que representa la inversión y desarrollo de estos proyectos, se desea analizar la factibilidad de implementar micro proyectos de generación eléctrica renovable. En específico, se desea analizar la implementación de paneles solares y aerogeneradores, dado que

son dos de las fuentes más utilizadas actualmente a nivel mundial. De esta manera, los proyectos inmobiliarios a futuro podrán considerar en su diseño la instalación de diversos sistemas renovables, para abastecer la mayoría de las necesidades energéticas de las personas viviendo en el proyecto. Dicho análisis permitiría el aumento considerable de fuentes energéticas renovables en Guatemala, y garantizaría un impacto positivo en el medio ambiente (Forbes, 2022).

El proyecto será estudiado en el residencial Vistas del Naranjo 2, zona 4 de Mixco. Se decidió realizar el estudio en este sector debido al potencial de energías renovables que se identifica en este residencial. Primero, el residencial se encuentra ubicado en la parte alta del sector del Naranjo, por lo que los vientos serán más pronunciados y sin obstaculización por infraestructura (edificios, flora, otro tipo de vivienda, etc.). Además, el cielo despejado con el que cuenta permitiría captar el mayor potencial solar en el día. Por último, es importante mencionar que el residencial cuenta con terrenos amplios no utilizados que permitirían la instalación de paneles solares o aerogeneradores en dado caso sean necesarios.

### **III. OBJETIVOS**

#### **A. Objetivo general**

Analizar los beneficios energéticos y económicos de implementar un sistema de generación de energía eléctrica basado en el uso de paneles solares y mini aerogeneradores para un proyecto residencial en zona 4 de Mixco, el Naranjo.

#### **B. Objetivos específicos**

1. Diseñar un sistema de generación energético a partir de paneles solares y mini aerogeneradores para satisfacer el consumo energético de áreas comunes en el residencial, así como los servicios de alumbrado público, bombeo de agua y la planta de tratamiento de aguas residuales.
2. Realizar un análisis de costos de la implementación de los paneles solares y aerogeneradores en el proyecto residencial para determinar los beneficios y el periodo de retorno probable de la inversión.
3. Analizar las condiciones climáticas promedio anuales del sector residencial, así como la obtención del potencial solar y eólico del sitio.
4. Determinar la factibilidad de implementación de equipos solares y eólicos en proyectos residenciales para satisfacer la demanda energética de servicios públicos.

## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Electricidad

La electricidad es un fenómeno físico relacionado con la presencia y el movimiento de cargas eléctricas. Estas cargas pueden ser positivas o negativas y, al moverse, generan corrientes que pueden ser utilizadas para realizar trabajo. La energía producida por las cargas eléctricas puede manifestarse dentro de ámbitos físicos, lumínicos, mecánicos o térmicos. El uso de la electricidad es frecuente en aparatos eléctricos, automóviles, suministro de edificaciones, entre muchas otras aplicaciones. Según Morales (2022), para poder medir el flujo de electrones y la carga que se genera se tienen en consideración los siguientes conceptos:

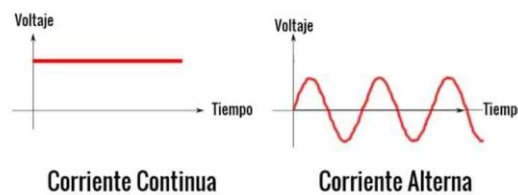
- **Voltaje:** La cantidad de energía potencial entre dos puntos en un mismo circuito. Un punto tendrá más carga que otro, por lo que la diferencia de carga entre dichos puntos se define como voltaje. La unidad de medida son los volts (V), el cual es la energía potencial entre dos puntos que imparten un Joule de energía por Coulomb de carga que pasa a través de él. La unidad Volt fue nombrada gracias al físico italiano Alessandro Volta, quien inventó lo que se considera ser la primera batería química.
- **Corriente:** Medición de la cantidad de carga que fluye a través de un circuito sobre un periodo de tiempo. La corriente es medida en amperes, el cual es definido como  $6.241 \cdot 10^{18}$  electrones (que equivale a 1 coulomb) por segundo que pasan a través de un punto en el circuito.
- **Resistencia:** Propiedad de los materiales que se opone al flujo de corriente eléctrica. Se mide en ohmios y se representa en las fórmulas con la letra R. La resistencia eléctrica depende de varios factores, como la longitud y la sección transversal del conductor, así como de las propiedades eléctricas del material del que está hecho el conductor. En un circuito eléctrico, la resistencia limita la cantidad de corriente que puede pasar a través de un conductor dado a una cierta tensión.

Existen dos tipos de corriente eléctrica: la corriente alterna (CA) y la corriente continua (CC). La corriente alterna varía su magnitud de voltaje y polaridad en un tiempo determinado, oscilando el flujo hacia adelante y atrás. Su comportamiento puede ser representado por una onda sinusoidal y la frecuencia de oscilación se mide en hertzios (Hz). La corriente alterna es utilizada comúnmente para el suministro de energía eléctrica en los hogares y negocios para su propia alimentación eléctrica (M. García, 2018).

Por otro lado, la corriente continua, circula de manera constante en una dirección sin la necesidad de invertir su polaridad. De manera visual, se puede observar como una línea recta, mostrando la constancia en su flujo. Este tipo de corriente es utilizada por equipos electrónicos como los teléfonos y computadoras, y también en sistemas de carga de baterías. Como se observa en la Figura 3, las variaciones en el comportamiento entre la corriente continua y alterna varían con el tiempo.

### Figura 3.

*Comportamiento gráfico de la corriente continua y alterna.*



*Nota. Adaptado de Morales (2022).*

## B. Circuito eléctrico

Se denomina circuito eléctrico a la serie de elementos o componentes eléctricos, como resistencias, inductancias y condensadores, que se encuentran conectados eléctricamente entre sí con el propósito de generar, transportar o modificar señales electrónicas o eléctricas. De acuerdo con Gómez (2012), los elementos básicos de un circuito eléctrico son los siguientes:

- Fuente de energía o generación: Es la que proporciona o entrega el voltaje y la corriente para lograr electrificar un dispositivo conectado, generando un ras de tensión persistente al circuito. Las principales fuentes de energía eléctrica incluyen combustibles fósiles como el carbón, el gas natural y el petróleo, así como la energía nuclear. A estas se suman las energías renovables, que son sostenibles, tienen un bajo impacto ambiental y se regeneran de forma continua. Estas últimas juegan un papel crucial en la lucha contra el cambio climático.
- Conductor: Material que permite el flujo de electricidad, es decir, el paso de electrones a través de él con relativa facilidad.
- Dispositivos de control: Controla el flujo de energía eléctrica que fluye en un circuito. De esta manera, puede dar paso o detener el flujo eléctrico cuando sea necesario. Entre los elementos más comunes utilizados como interruptores están los breakers, botones, interruptores de pared, etc.

- Carga eléctrica: Es la cantidad de energía eléctrica que emplea un elemento para poder realizar sus funciones y de esta manera culminar su objetivo.

### **C. Eficiencia energética**

La eficiencia energética hace referencia al compromiso de adaptarse a las necesidades de recursos existentes para mantener el nivel de desarrollo y transformación en las diferentes actividades del día a día. De esta manera, se busca la innovación en diferentes apartados de la ingeniería con el objetivo de reducir el gasto energético que realiza un grupo de individuos y asegurar que el suministro para las actividades tenga un grado menor de contaminación al ambiente. En la actualidad, la eficiencia energética se ha convertido en un tema prioritario dentro de los diferentes sectores políticos del mundo. Dado al carácter limitado de las fuentes energéticas tradicionales, se han desarrollado una serie de tecnologías para garantizar la independencia de recursos contaminables y que en algún momento pueden sufrir de escasas a nivel global (Gatica, 2019).

### **D. Ciclo de vida de la energía eléctrica**

El trabajo eléctrico se basa en el movimiento de protones y electrones, cuyo flujo es el que permite la obtención de energía. Los protones poseen una carga positiva, mientras que los electrones poseen carga negativa. Las cargas generadas por estos elementos se complementan, y como resultado se obtiene la electricidad estática (generada por la fricción) y la electricidad dinámica (concebida por la corriente). En algunos casos, la energía puede almacenarse en diversas formas, como energía química, energía cinética, energía potencial, etc. Sin embargo, en ciertos sistemas o procesos, como en algunas formas de energía renovable, puede ser beneficioso utilizar la energía generada en el momento en que se produce, debido a limitaciones técnicas o económicas en el almacenamiento (Expansión, 2016).

El ciclo de vida de la energía eléctrica abarca cuatro etapas fundamentales. Primero, la generación de electricidad a partir de fuentes convencionales o renovables. Durante esta etapa, el voltaje se incrementa para facilitar su transporte a larga distancia. Luego, en la etapa de transmisión, la energía se envía a través de redes de cables de alta tensión y pasa por subestaciones que ajustan el voltaje según las necesidades del sistema. La tercera etapa es la distribución, que lleva la electricidad a los consumidores finales, adaptando el voltaje para uso doméstico, comercial o industrial. Finalmente, la comercialización es el proceso por el cual se compra y vende electricidad en el mercado mayorista, donde se fijan tarifas y precios con base en las regulaciones del mercado y el uso previsto. Este ciclo garantiza un suministro de energía eléctrica eficiente, confiable y regulado para los consumidores. Como se puede observar en

la Figura 4, el proceso es un sistema lineal que abarca desde la generación energética hasta el consumo de esta. Independientemente del tipo de generación energética que se utilice, el ciclo de vida de la energía mantiene los mismos eventos.

**Figura 4.**

*Ciclo de vida de la energía eléctrica*



*Nota. Adaptado de Expansión (2016).*

**E. Energías renovables**

Los recursos energéticos renovables tienen la característica principal que provienen de fuentes parcialmente inagotables o que se renuevan por la naturaleza. Estos recursos son de suma importancia para la transición hacia un sistema energético independiente de los combustibles fósiles, principales responsables del calentamiento global. Además del impacto positivo con el medio ambiente, estos recursos son considerados energías limpias que protegen la salud de los seres humanos (Ministerio de Energías y Minas, 2018).

Guatemala es un país que cuenta con considerable cantidad de recursos renovables a su disposición, sin embargo, estos no han sido aprovechados a su máxima capacidad. Se cuenta con un potencial hídrico de 6000 MW y 1000 MW geotérmico, donde solo se aprovecha el 23.1 y 3.5 por ciento respectivamente de estos recursos (Ministerio de Energías y Minas, 2018).

Existe una serie de recursos renovables que tienen un alto potencial en Guatemala, y su uso depende de la zona y el potencial eólico con el que cuentan. Dentro de las energías renovables mejor aprovechadas en el país se pueden mencionar las siguientes.

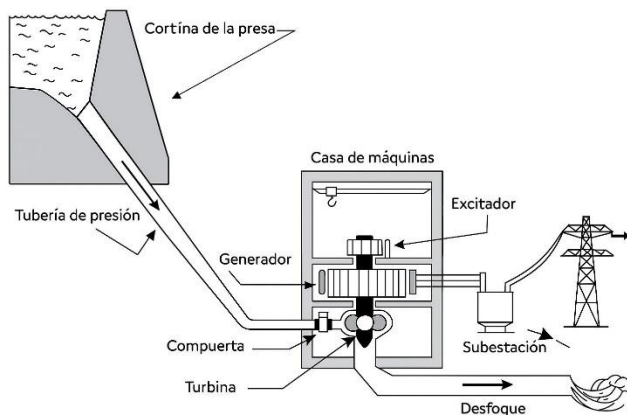
## 1. Energía hidráulica

Energía Hidráulica. Energía obtenida del aprovechamiento del potencial energético de la corriente de agua, la cual se genera por los diferenciales de altura a nivel superficial del agua y la base de la presa donde se encuentra ubicada la central. El agua que se encuentra acumulada pasa por unos conductos que transforman la energía potencial en energía cinética, dándole velocidad crítica al flujo para mover las turbinas situadas en la presa. Con el movimiento de la turbina se transforma la energía cinética a energía mecánica la cuál por medio de generadores se convierte a energía eléctrica (García, 2014).

En Guatemala, la generación hidroeléctrica inició en 1884, cuando se instaló la primera hidroeléctrica en la finca El Zapote, ubicada al norte de la ciudad capital. Para esa fecha, la planta tenía la capacidad de encender 135 lámparas ubicadas en la ciudad. En la actualidad, se tiene una potencia efectiva de 1,385.14 MW en todas las centrales hidroeléctricas del país (Ministerio de Energías y Minas, 2018). En la Figura 5 se puede observar un sistema hidráulico para la generación energética, donde se atestigua el proceso para el consumo de energía introducida a la red.

**Figura 5.**

*Funcionamiento de sistema hidráulico con regulación de caudal*



*Nota. Elaboración propia.*

## 2. Energía de biomasa

La energía de biomasa es aquella que se obtiene de compuestos orgánicos que realizan ciertos procesos naturales. Algunos ejemplos de los procesos biológicos para la obtención de la biomasa son el excremento de animales en ganaderías, restos de aceite industrial, ciertos cereales en descomposición, entre otros (Toscano, 2009). En Guatemala cobra relevancia en la industria azucarera a través de la cogeneración, que es la producción de dos o más formas de energía a partir de una sola fuente. Una de las fuentes de energías del proceso es el calor que se obtiene y la otra puede ser energía mecánica o eléctrica. Es por esto que las azucareras cuentan con un sistema óptimo energético, en el cual producen calor para la producción de azúcar y energía eléctrica a partir del bagazo de caña, permitiéndoles ser autónomas en el consumo eléctrico (Ministerio de Energías y Minas, 2018). En la Figura 6 se puede observar un claro ejemplo del uso de energía de biomasa en Guatemala, utilizado en azucareras donde el desperdicio de su producción, en este caso el bagazo, es utilizado para generar energías limpias.

### Figura 6.

*Azucarera utilizando bagazo como biomasa*



*Nota. Obtenido del Ministerio de Energías y Minas (2018).*

## 3. Energía geotérmica

La energía geotérmica es aquella que se obtiene por el aprovechamiento del calor interno de la tierra, cuya energía en forma de calor puede ser utilizada para generar energía eléctrica u otras fuentes de energía. Las fuentes principales se obtienen de reservorios con suelos porosos y permeables, el cual permite la transmitancia del calor hacia la corteza terrestre. Dicho calor resulta de la desintegración de elementos radiactivos y el calor permanente en el interior de la tierra que se originó en su formación (Gatica, 2019).

Por medio de agua infiltrada en la superficie (de medios pluviales o fluviales), el agua desciende varios kilómetros donde llega a ser calentada por la presencia de fuentes caloríficas. Esto da como resultado a la formación de vapor, la cual asciende a la superficie como géiseres o fuentes termales. Estas

fuentes energéticas toman lugar en zonas con actividad volcánica o movimiento de placas tectónicas. En Guatemala se tienen dos centrales de generación geotérmica que están conectadas al Sistema Nacional Interconectado. Una de ellas se encuentra en el municipio de Zunil, departamento de Quetzaltenango y la otra, en el municipio de San Vicente Pacaya, departamento de Escuintla. Juntas llegan a generar una potencia efectiva instalada de 35.23 MW (Ministerio de Energías y Minas, 2018).

#### **4. Energía solar**

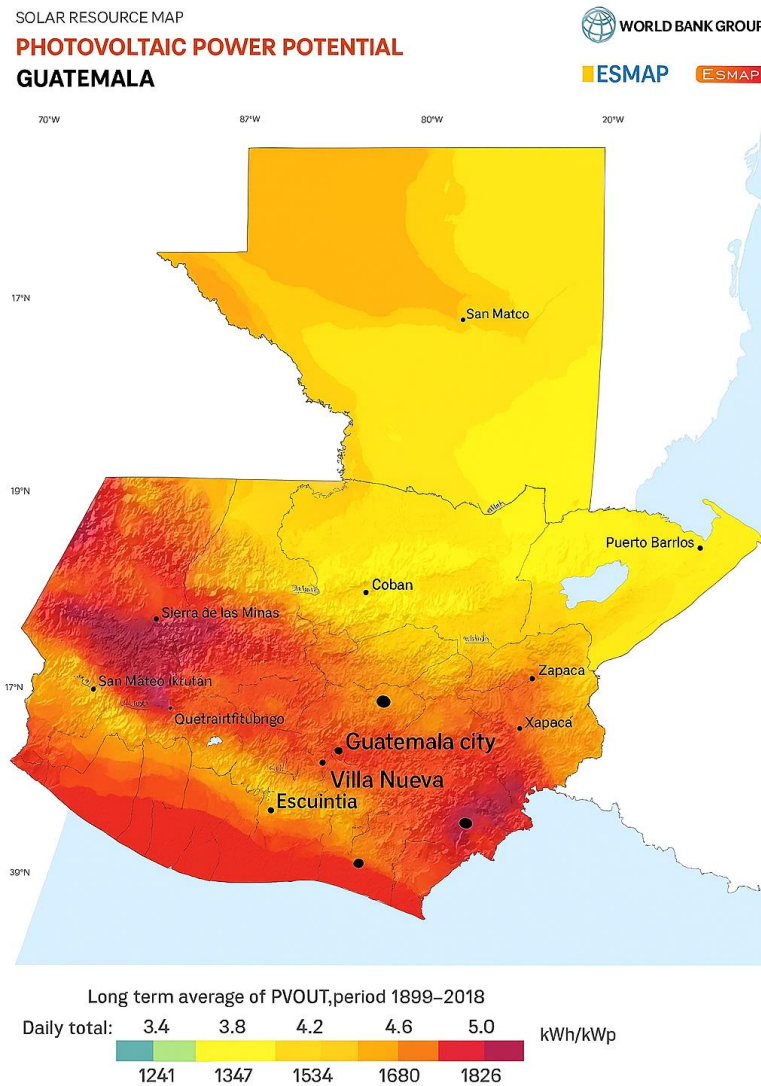
La energía solar es definida como la energía producida por el sol, la cual es recibida en la tierra. Por medio de diferentes procesos termonucleares, el sol es capaz de convertir millones de toneladas de hidrógeno en helio cada segundo. Como resultado se obtiene la radiación, que es el efecto lumínico e infrarrojo, y efectos electromagnéticos que brinda la energía calorífica. La energía que proviene del sol es capaz de cubrir la mayor parte de la demanda energética a nivel mundial. Es por esto que en la actualidad se han estudiado y desarrollado diferentes técnicas de implementación de este recurso para una producción más verde y eficiente. Según Pérez (2014), dentro de estas técnicas implementadas se pueden mencionar las siguientes:

- Paneles solares fotovoltaicos: Estos paneles convierten la energía solar directamente en electricidad. Actualmente es la forma más común de capturar energía del sol y pueden ser instalados en edificaciones verticales, comerciales, viviendas, entre otros.
- Colectores solares térmicos: Son sistemas que se utilizan para calentar agua o líquidos de transferencia de calor, que luego pueden ser utilizados para calefacción o generación de vapores.
- Integración en edificios (BIPV): Con la tecnología fotovoltaica, se permite integrar a edificaciones la tecnología de generación eléctrica por medio materiales de construcción como las tejas o fachadas de un edificio para que funcionen como paneles solares.

Guatemala cuenta con una posición geográfica idónea, localizada a 14.5° sobre la línea del Ecuador, lo que le permite el aprovechamiento del recurso solar durante todo el año. Según estudios realizados, la irradiación solar de Guatemala ronda entre los 4.5 a 6.5 kW por hora por metro cuadrado (Aroche, 2016). Según el Ministerio de Energía y Minas, en el año 2018 existían ocho centrales fotovoltaicas de generación eléctrica que se encontraban conectadas al Sistema Nacional Interconectado. Estas centrales se encuentran ubicadas en su mayoría en los departamentos de Zacapa, Santa Rosa y Jutiapa; y son capaces de generar una potencia instalada efectiva de 91.5 MW. En la Figura 7 se muestra la ubicación de las plantas en el mapa solar de Guatemala representados con centro de color negro.

**Figura 7.**

*Potencial solar en Guatemala.*



*Nota. Obtenido de Global Solar Atlas (2024).*

La energía solar se ha convertido en una de las fuentes renovables más relevantes en los últimos años a nivel mundial. Respecto al tema económico, la energía solar representa una buena inversión debido a los altos periodos de vida que tienen los captadores. Considerando un buen mantenimiento, los equipos solares pueden tener una vida útil de varios años (sin considerar elementos ajenos a los captadores solares). Añadido a esto, es importante mencionar que en la actualidad los diferentes captadores solares tienen una alta disponibilidad a nivel mundial, por lo que los costos de compra pueden ser menores que si se decide utilizar equipo de otras fuentes renovables (EnelGreenPower, 2020).

Una de las principales desventajas de la energía solar es su almacenamiento. Al no tener disponibilidad solar constante, la energía debe ser almacenada si no se usa en el momento. El problema se presenta en las baterías, las cuales llegan a contener sustancias químicas que suelen ser peligrosas. En proyectos a gran escala, la instalación de captadores solares puede afectar ecosistemas al requerir una gran extensión de captadores para poder satisfacer las demandas solicitadas (Twenergy, 2019).

La energía solar tiene diversas aplicaciones en la actualidad. Uno de sus usos principales es la generación de electricidad mediante paneles fotovoltaicos, que abastece las necesidades energéticas en ámbitos domésticos, comerciales e industriales. Además, se emplea para la calefacción, convirtiendo la energía solar en energía térmica, lo que permite un ahorro significativo. Asimismo, se ha implementado en sistemas de bombeo de agua, especialmente para riego en la agricultura, lo que contribuye a un ahorro energético diario y permite el bombeo autónomo de agua gracias a la energía solar captada. Estos usos demuestran la versatilidad y la eficiencia de la energía solar en satisfacer diversas necesidades (Eco Innovar, 2023).

El perfil energético de Guatemala cuenta con un potencial promedio de un día de 5.3 kWh/m<sup>2</sup>/día. El potencial de generación con energía solar total es un dato que no se conoce a exactitud, sin embargo, se considera que sobrepasa la cifra de 10GWh al año. Desde el sitio Global Solar Atlas, se puede verificar que el potencial solar diario del país es igual o mayor a 3.8 kWh. (Global Solar Atlas, 2023). En el caso de la ciudad de Guatemala se puede verificar que el potencial arroja valores entre 4.5 y 5 kWh. (Sánchez, 2022)

## **5. Energía eólica**

La energía eólica es una forma de energía que se obtiene a partir de la fuerza cinética del viento. Se aprovecha la energía cinética del movimiento del aire para generar electricidad u otras formas de energía útil. La utilización de la energía eólica se remonta a varios siglos atrás, siendo uno de los métodos más antiguos para aprovechar la fuerza del viento. Desde los molinos de viento tradicionales que se utilizaban para moler granos o bombear agua, hasta las modernas turbinas eólicas de hoy en día que generan electricidad a gran escala, la energía eólica ha desempeñado un papel crucial en la historia de la humanidad (Orozco, 2014).

La energía proveniente del aire es dependiente de la actividad solar que exista en ciertas regiones del mundo. La radiación solar genera un calentamiento desigual en masas de aire debido a las diferencias térmicas, lo que da lugar a desequilibrios de temperatura y, en consecuencia, a variaciones de densidad en dichas masas de aire que se traducen en cambios de presión. Durante el transcurso del día, el sol

calienta el aire sobre las superficies terrestres de manera más intensa que el que se encuentra sobre las áreas marítimas. Como resultado, el aire que cubre las zonas continentales se expande y asciende, lo que conlleva a una disminución de la presión atmosférica sobre la tierra, y esto, a su vez, origina la circulación del viento desde el mar en dirección a las costas (Pirique, 2013).

Los aires de la atmósfera son calentados por toda la energía solar, y estos producen corrientes de convección vertical. De esta manera se crea una depresión del viento, la cual es desplazada hacia zonas abruptas generando el viento. Esta es una de las energías que más tiempo llevan utilizándose para el desarrollo de las actividades humanas. Claro ejemplo de esto son los barcos utilizados en tiempos medievales, o con el uso del molino (Pirique. 2013); (Orozco, 2014).

Al ser una fuente renovable, su principal ventaja es la nula contaminación que realiza para la obtención de la energía. Esto permite activamente que las industrias generen un impacto positivo en el ambiente. Aparte de la emisión de gases que se obtienen en la combustión, la utilización de energía eólica presenta una nula incidencia sobre las características fisicoquímicas del suelo y su erosionabilidad (Moreno, 2013).

A diferencia de las fuentes de energía convencionales, la energía eólica no tiene impactos negativos sobre los acuíferos. La generación de electricidad a partir del viento no consume ni contamina los recursos hídricos y, además, no produce residuos ni vertidos que puedan afectar a los acuíferos. Además, es una fuente de energía limpia que no emite gases tóxicos ni contribuye al efecto invernadero o a la lluvia ácida. La energía eólica se destaca por su respeto al medio ambiente y su contribución a la reducción de la huella ecológica (Orozco, 2014).

Por último, se puede decir que, gracias a los avances tecnológicos, el poder adquisitivo de estos equipos se vuelve más grande. De esta manera, más empresas pueden adquirir estos equipos para obtener altas generaciones de energía eléctrica. (Moreno, 2013)

La principal limitación de la energía eólica es la falta de control sobre el viento. Dado que el viento es menos predecible y constante, no puede ser considerado como la única fuente confiable de generación eléctrica. Para superar los períodos en los que no se cuenta con vientos adecuados para la producción de energía eólica, es necesario contar con respaldos de fuentes de energía convencionales y otras fuentes renovables. Según Moreno (2013), las desventajas de esta fuente pueden determinarse en los siguientes aspectos:

- Dificultad de planificación: La energía eólica presenta un desafío intrínseco en cuanto a la planificación anticipada de su disponibilidad. Dado que los sistemas eléctricos se operan teniendo en cuenta la generación prevista con un día de anticipación en función del

consumo proyectado, la variabilidad impredecible del viento plantea considerables problemas en este proceso.

- Incapacidad de almacenamiento: La energía eléctrica que se produce no se puede almacenar, por lo que si no se consume sería un desperdicio su producción.
- Requerimiento de infraestructura: Habitualmente, los parques eólicos se emplazan en áreas remotas, incluyendo ubicaciones marítimas distantes de los centros de consumo. Para transmitir la energía eléctrica generada, se hacen necesarias torres de alta tensión y cables de gran capacidad capaces de cubrir distancias significativas, lo cual puede generar un impacto visual en el entorno paisajístico.

Guatemala se ve influenciada por el patrón de vientos alisios, los cuales predominan con una dirección desde el norte, pudiendo variar entre el noreste (NNE), noreste (NE) o noroeste (NNO). Durante los meses de marzo a junio, el viento cambia su dirección y proviene mayormente del sur debido a la influencia de sistemas de baja presión que se ubican a lo largo del Océano Pacífico. Estos sistemas de baja presión juegan un papel importante en la dirección del viento. Cuando estos sistemas de baja presión son lo suficientemente extensos, pueden provocar que el viento supere las barreras naturales de las montañas en las zonas del Pie de Monte y de la Sierra de los Cuchumatanes, llegando así a los departamentos de Alta Verapaz, Huehuetenango y El Quiché.

Durante los meses de julio a septiembre, la dirección predominante del viento sigue siendo del norte debido a la influencia del anticiclón semipermanente del Atlántico, que mantiene un flujo de viento a través del departamento de Izabal. Sin embargo, esta dirección puede cambiar temporalmente en situaciones en las que se presenten huracanes o tormentas tropicales, lo que altera por completo el flujo del viento, aunque de manera transitoria (Ministerio de Energías y Minas, 2018).

Por medio de la tecnología de Global Wind Atlas se logró determinar de manera visual el potencial eólico en Guatemala. Como se puede observar, los vientos en la mayor parte de Guatemala parecen estar por debajo de los 5m/s. En sectores cercanos a la ciudad de Guatemala existe un corredor donde los vientos pueden llegar a velocidades entre 7 y 8 m/s, por lo que beneficia a la capital para la implementación de esta tecnología.

## **F. Paneles solares**

Los paneles solares son estructuras a base de aluminio que están conformadas por una serie de celular solares interconectadas, que por lo general están compuestas de silicio. Por medio del efecto fotovoltaico,

se llega a convertir toda la energía solar captada en energía eléctrica. Por medio de la reacción de electrones ubicados en las células, el efecto fotovoltaico abre paso a la conversión de energía cuando incide radiación solar sobre él (Sánchez, 2022).

Dentro de esta estructura, que por lo general es rectangular, se ubican las células solares que tienen un tamaño aproximado de 10 centímetros cuadrados. Para garantizar el recubrimiento de dichas células ante las temperaturas extremas y diferentes condiciones climáticas se utiliza un plástico llamado EVA. Además de esto, el plástico permite que se traspase la luz pero no los rayos ultravioletas, que pueden llegar a dañar el equipo. Para poder convertir esa energía solar utiliza los inversores, los cuales transforman la corriente para poder ser utilizada de diferentes maneras (Sánchez, 2022).

## 1. Tipo de módulos solares

En la actualidad existen tres tipos de módulos solares que destacan a nivel mundial, las cuales alcanzan un nivel de 90 por ciento de participación en el mercado. Según Sánchez (2022) los tipos de paneles solares más utilizados son los siguientes:

- Módulos monocristalinos: Dichos módulos están compuestos por células monocristalinas, con tonalidad negra y de forma rectangular con esquinas recortadas. Como se puede observar en la Figura 8, estos módulos cuentan con un único cristal de silicio lo cual les permite tener una mayor eficiencia y rendimiento que otros tipos de módulos solares. También se le atribuye una alta resistencia en comparación con los demás paneles solares, lo que se traduce a una mayor resistencia a la sombra y el viento.

### Figura 8.

*Ejemplo de módulo monocristalino*



*Nota. Obtenido de Sánchez (2022).*

- Módulos policristalinos: Se encuentran conformadas por células policristalinas, las cuales les brindan una tonalidad azulada, como se puede observar en la Figura 9, y no poseen chaflán en sus esquinas a comparación de los paneles monocristalinos. A pesar de que las células policristalinas también utilizan obleas de silicio para su conformación, estas hacen un corte de silicio que se solidifica lentamente en un crisol conformados por gran cantidad de cristales de silicio. Por su proceso de producción más lenta, los módulos policristalinos tienen un precio más económico en el mercado. Sin embargo, la eficiencia suele disminuir notoriamente frente a los paneles monocristalinos.

**Figura 9.**

*Ejemplo de módulo policristalino*



*Nota. Obtenido de Sánchez (2022).*

- Módulo de silicio amorfo: Los módulos de silicio amorfo son los menos utilizados frente a los dos tipos presentados anteriormente. La principal diferencia de los módulos de silicio amorfo es su fabricación sencilla. Estos módulos utilizan poca materia prima, se reducen los gastos de energía y costo en su fabricación. Su eficiencia no suele ser muy elevada debido a la mala calidad del silicio utilizada. Sin embargo, son recomendadas para utilizar en interiores, atmósferas con polvo, entre otros.

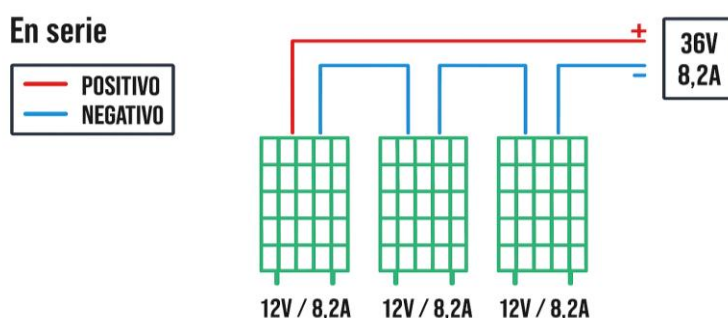
**2. Tipos de conexiones entre placas solares**

Una vez que se ha elegido el tipo de paneles solares adecuados para satisfacer las necesidades de energía de una vivienda o instalación industrial, el siguiente paso es determinar la conexión más apropiada. El escoger el tipo de conexión de placas solares es de suma importancia ya que si no se realiza correctamente se podría llegar a estropear alguno de los componentes del sistema. Según AutoSolar (2021), los tipos de conexión entre placas solares se pueden dividir en:

- **Conexión en serie:** La conexión en serie es una estrategia empleada en sistemas fotovoltaicos para incrementar el voltaje de salida del conjunto de paneles solares. En esta configuración fotovoltaica, los paneles solares se conectan de forma secuencial, lo que significa que la corriente eléctrica fluye a través de cada panel uno tras otro, sumando así los voltajes individuales de cada panel para generar un voltaje total mayor. Este tipo de conexión de paneles solares resulta particularmente beneficioso en aplicaciones que demandan voltajes más elevados, como sistemas de energía solar para hogares o instalaciones comerciales. Al incrementar el voltaje de salida del conjunto de paneles solares, es posible minimizar las pérdidas de energía que suelen producirse durante la transferencia de energía solar desde los paneles hacia los dispositivos que consumen la electricidad. En la Figura 10 se puede observar como la conexión de positivo se realiza solo a un modelo de panel, mientras que el negativo conecta a todos los elementos.

**Figura 10.**

*Diagrama de conexión de paneles solares en serie*



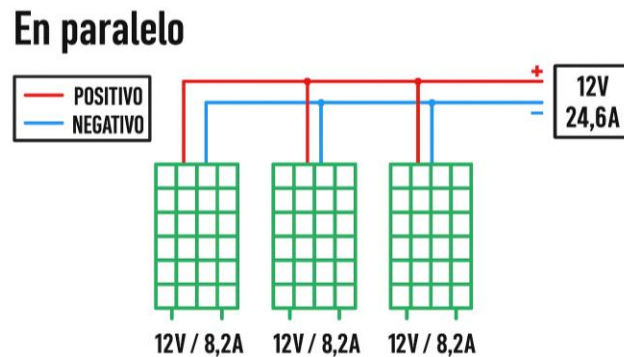
*Nota. Adaptado de AutoSolar (2021).*

- **Conexión en paralelo:** Este tipo de conexión de paneles solares es otra estrategia utilizada en sistemas fotovoltaicos para incrementar la corriente de salida del conjunto de paneles solares. En este tipo de conexión, los paneles solares se conectan de manera que la corriente eléctrica fluye a través de cada panel al mismo tiempo, sumando así las corrientes individuales de cada panel para generar una corriente total mayor. Este método de conexión en paralelo resulta especialmente útil en aplicaciones que requieren corrientes más elevadas, como sistemas de energía solar para cargar baterías o alimentar dispositivos eléctricos de alta potencia. Aumentando la corriente de salida del conjunto de paneles solares, se puede reducir el tiempo necesario para cargar una batería o para alimentar dispositivos de alta potencia. En la Figura 11 se puede observar como es que

tanto el positivo como el negativo van conectados a todos los paneles solares, haciendo un circuito en paralelo.

**Figura 11.**

*Diagrama de conexión de paneles solares en paralelo*



*Nota. Adaptado de AutoSolar (2021).*

### 3. Instalaciones fotovoltaicas

Las instalaciones fotovoltaicas van a depender del tipo de consumo que se requiera en el proyecto. Desde el consumo domiciliario autónomo, hasta la generación eléctrica para la red pública, los paneles solares tienen distintas configuraciones que benefician su implementación en la actualidad. Según Viera (2021), los principales tipos de instalación son los siguientes:

- Instalación solar fotovoltaica conectada a la red: Los paneles solares pueden configurarse para una generación a gran escala de energía eléctrica, la cual va a depender del terreno disponible que se tenga para la instalación. De esta manera, los paneles pueden interconectarse unos con otros para que la generación pasiva de todas las células fotovoltaicas pueda suministrar a la red pública.
- Instalación solar fotovoltaica aislada: Este tipo de instalaciones, como su nombre lo dice, sirven para sistemas que se encuentran aislados a los diferentes sistemas de red eléctrica pública o privado. Surgieron principalmente de la necesidad de poder apoyar a todas aquellas construcciones que se encuentran en ubicaciones de difícil acceso, con el objetivo que pueda brindarse sus propios servicios de manera autónoma.
- Instalación solar fotovoltaica aislada con sistema de apoyo: La creciente demanda de energía en los hogares de hoy en día se debe al aumento en la cantidad de dispositivos domésticos necesarios para mayor comodidad. Este aumento en el consumo energético hace que las instalaciones solares por sí solas no sean suficientes para abastecer una vivienda,

por lo que se requiere complementarlas con fuentes de energía autónomas.

Para abordar este escenario, una solución efectiva podría ser la incorporación de pequeños aerogeneradores que generan electricidad mediante la fuerza del viento que hace girar sus hélices. Otra alternativa sería utilizar generadores de energía eléctrica que funcionan con combustibles fósiles derivados del petróleo, como la gasolina o el diésel.

#### **4. Elementos principales de la instalación fotovoltaica**

Los módulos fotovoltaicos cuentan con una cubierta superior de vidrio templado especial, la cual es resistente a golpes que se pueden encontrar en el ambiente externo. A esto se le añade una superficie lisa que evita la adherencia de partículas como el polvo, evitando obstrucciones a los rayos solares. Por otro lado, la cubierta inferior es opaca y tiene como objetivo proteger de agentes externos. Entre estas dos cubiertas se encuentra el material encapsulante, el cual es transparente a la radiación solar y no es alterable contra la radiación ultravioleta y presencia de humedad (Viera, 2021).

Estos materiales se montan sobre un soporte metálico, el cual es fabricado a base de aluminio anodizado o acero inoxidable, brindando rigidez y protección mecánica al panel. Por último, están los elementos eléctricos externos, que hace referencia a todo cable, bornes o cajas de conexión que permiten el funcionamiento del panel (Martínez, 2018).

Es importante también en este tipo de instalaciones el inversor el cual, en un sistema de paneles solares, convierte la electricidad generada por los paneles, que es corriente continua (CC), en corriente alterna (CA). Esta es la forma de electricidad utilizada en la mayoría de los aparatos eléctricos y en la red eléctrica. Los inversores son de suma importancia ya que la energía solar generada no puede ser utilizada directamente por los equipos eléctricos o ser inyectada a la red sin este proceso de conversión (Martínez, 2018).

Con el fin de obtener la máxima eficiencia del conjunto generador fotovoltaico inversor, se debe tener una relación entre la potencia nominal del inversor y la potencia pico del generador fotovoltaico promedio de 0.7 a 0.8. La potencia del inversor no debe ser superior a la potencia del pico generador de los módulos solares, ya que el inversor no logrará funcionar en potencia nominal porque no trabaja bajo condiciones normalizadas STC (Una radiación solar de 1000 W/m<sup>2</sup> con temperatura de célula fotovoltaica de 25°C y un valor espectral de 1.5 AM) (Martínez, 2018).

Aparte de estos elementos se pueden considerar los seguidores solares, que son dispositivos mecánicos diseñados para orientar los paneles solares de manera que permanezcan aproximadamente

perpendiculares a los rayos solares, siguiendo la trayectoria del sol desde el este al amanecer hasta el oeste al atardecer. Estos dispositivos son empleados en diversas tecnologías de seguimiento solar, incluyendo la energía solar fotovoltaica convencional, la energía solar fotovoltaica de concentración y la energía termo solar de concentración (Viera, 2021).

La función principal de los seguidores solares es aumentar la radiación recibida por los paneles, lo que se traduce en un incremento significativo en la cantidad de energía generada. En instalaciones conectadas a la red, se puede lograr un aumento del 30 al 48% en la energía generada anualmente, mientras que, en aplicaciones como bombas de agua, la potencia entregada puede aumentar hasta un 70% (Viera, 2021). Existen varios tipos de seguidores solares, entre ellos los de dos ejes (monoposte y carrousel), los de un eje polar, los de un eje azimutal, y los de un eje horizontal. Cada tipo tiene sus propias características de movimiento y orientación para maximizar la captación de energía solar (Viera, 2021).

La implementación de seguidores solares también conlleva beneficios adicionales, como la reducción de pérdidas en la instalación. Los inversores trabajan más horas en zonas de rendimiento, superando el rendimiento europeo definido para sistemas fijos. Además, las pérdidas por reflectancia angular son mínimas, ya que los rayos solares inciden perpendicularmente a las células fotovoltaicas. La operación a temperaturas más bajas debido a una mejor ventilación de los módulos, la reducción de pérdidas por polvo y suciedad, y la mejora en la calidad de la onda de corriente de salida son otros beneficios asociados con el uso de seguidores solares (Martínez, 2018).

Para cablear todos los sistemas eléctricos de nuestra instalación es crucial cumplir con el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT 2002). Esto se aplica tanto al tramo de corriente continua desde el campo hasta el inversor como al tramo de corriente alterna desde el inversor a la red. La elección adecuada de la sección del cable es fundamental, ya que una selección incorrecta puede resultar en una mayor caída de tensión en el conductor, lo que conlleva un aumento de la corriente y, por ende, una elevación de la temperatura (Viera, 2021).

Un incremento en la temperatura puede tener consecuencias como el riesgo de incendio y el deterioro del material aislante, aumentando la posibilidad de cortocircuitos. La determinación reglamentaria de la sección del cable implica calcular la sección mínima normalizada que cumpla con dos condiciones: el criterio térmico, que garantiza que la temperatura del conductor no exceda la máxima permitida para el material aislante, y el criterio de la caída de tensión, que limita la pérdida de potencia debido a la resistencia del cable (Viera, 2021). Se recomienda el uso de cable de cobre con calibre #10 como mínimo para garantizar que los circuitos funcionen de manera óptima y sin problemas de diferenciales de energía que dañen la conexión general (Martínez, 2018).

Por último, es importante considerar la obra civil adicional que se puede dar en la instalación de los equipos renovables, con el objetivo de mantener el funcionamiento estable de los equipos. Uno de los puntos claves es considerar la canalización a realizar entre los paneles solares y el tablero de conexión. Para esto se pueden utilizar tuberías de acero galvanizadas o de PVC, dependiendo de las condiciones del terreno y si son expuestas o enterradas en tierra. Otros elementos pueden ser bases para la instalación de paneles solares o cajas de registro para conexión de los equipos (Viera, 2021).

## **5. Elementos principales de la instalación fotovoltaica**

El estudio del potencial solar evalúa la cantidad de energía solar disponible en una ubicación específica. Este análisis considera factores como la irradiancia solar, el clima, la latitud y las condiciones atmosféricas, determinando la viabilidad de proyectos solares. Es clave en la planificación de sistemas fotovoltaicos, ya que permite optimizar el diseño y estimar la eficiencia energética.

El rendimiento específico, evaluado por el factor obtenido de la división entre kWh y kWp, es una de las métricas que se utilizan para evaluar el rendimiento dentro de sistemas solares. Según Zhang (2017), la principal funcionalidad es evaluar el estado real del potencial solar en el sitio dependiendo de los factores que se presentan a continuación:

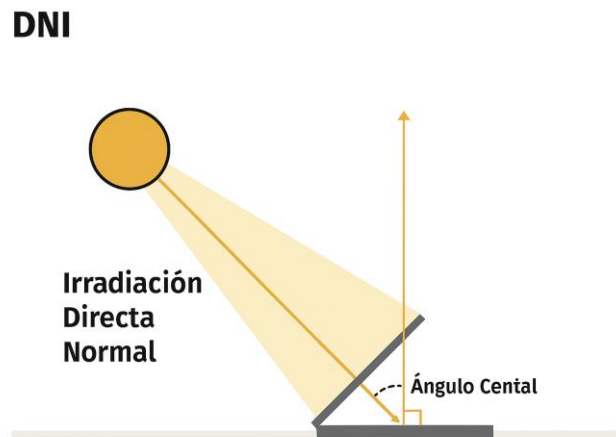
- **Ubicación:** La ubicación del proyecto es clave para poder determinar la cantidad de luz solar o irradiancia que se recibirá en el diseño solar. Cuando el valor de la irradiancia solar en el sitio suele ser más elevado se obtiene un rendimiento específico mucho más significativo para la generación energética.
- **Archivo meteorológico:** Hace referencia al historial obtenido con mediciones terrestres, modelos satelitales y sistemas híbridos. Entre mayor sea la información obtenida, el rango de diferencia puede reducirse a un dato más preciso, generando información más confiable para el proyecto renovable.
- **Orientación del módulo:** Es importante dar la inclinación necesaria y el acimut a los paneles solares, con el objetivo de obtener la mayor irradiancia a captar por cada uno de los módulos fotovoltaicos.

La irradiancia directa normal (DNI) es la cantidad de radiación solar que llega a incidir directamente sobre una superficie perpendicular a los rayos solares. El dato es medido en watts por metro cuadrado, siendo esta la radiación que llega sin considerar la dispersión que existe en la atmósfera, considerando las nubes o las partículas que se encuentran en el aire. La irradiación normal directa toma relevancia en

aplicaciones tecnológicas como los sistemas solares de concentración o paneles solares de seguimiento, ya que se toma la mejor orientación a los paneles solares para que capturen la mayor irradiancia directa sin las obstrucciones climáticas. Su uso es priorizado en países con cielos despejados y con bajas tasas de nubosidad, donde la mayor parte del año tienen una irradiancia global directa (Zhang, 2017). En la Figura 12 se puede observar el ángulo de reflejo que debe tener la irradiancia para ser directa normal, y cómo es que esta actúa dependiendo de la posición del sol.

**Figura 12.**

*Representación de la irradiancia normal directa*

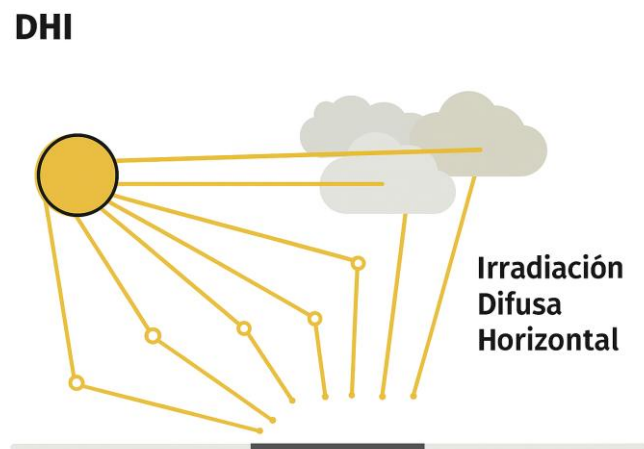


*Nota. Adaptado de Zhang (2017).*

La irradiancia horizontal difusa es la fracción de la radiación solar que llega a la superficie terrestre de manera indirecta, la cual hacer referencia a toda la radiación que llega a la tierra luego de ser dispersada por los componentes de la atmósfera, como el vapor. Este fenómeno se da cuando los rayos solares interactúan con partículas que se encuentran en la atmósfera, lo que provoca que se reflejen, absorban y se dispersen. A diferencia de la irradiancia directa, la cual proviene en línea recta desde el sol, la irradiancia horizontal difusa se distribuye desde todas las direcciones del cielo, lo que significa que no existe una trayectoria definida. Este tipo de irradiancia es crucial en la generación de energía solar donde los sistemas solares no se encuentran orientados directamente al sol, como los paneles solares que se encuentra fijos. Toma bastante relevancia en zonas donde se cuenta bastante presencia de nubosidad o contaminación atmosférica (Zhang, 2017). En la Figura 13 se puede observar que el panel solar se encuentra en una posición horizontal, y de esta manera, la captación de los rayos proviene de otros campos a diferencia de la irradiancia directa.

**Figura 13.**

*Representación de la irradiancia horizontal difusa*



*Nota. Adaptado de Zhang (2017).*

La irradiancia global horizontal (GHI) es la cantidad de radiación solar total que incide en una superficie horizontal en la tierra. Este dato se mide en watts por metro cuadrado y representa la suma entre la irradiancia directa normal (DNI) y la irradiancia horizontal difusa (DHI). Es importante saber que la irradiancia directa normal es solo la radiación solar que llega de manera directa desde el sol, la irradiancia global horizontal considera también la radiación que ha sido dispersada por la atmósfera, como las nubes (solaranywhere, 2019).

La irradiancia global inclinada hace referencia a la cantidad de radiación solar que incide sobre una superficie inclinada respecto al suelo sobre una horizontal. Este tipo de irradiancia incluye tanto la componente directa que proviene del sol, así como la radiación difusa obtenida en la atmósfera. Este tipo de irradiancia es clave para evaluar sistemas de energía solar donde los paneles solares no se colocan en una orientación del todo horizontal, y cuentan con una inclinación específica que maximiza la captación de radiación solar según la latitud y la estación del año. Este es un parámetro clave en la evaluación de sistemas de energía solar, ya que los paneles solares generalmente no se colocan en una orientación completamente horizontal, sino inclinados en un ángulo específico para maximizar la captación de radiación solar según la latitud y la estación del año (solaranywhere, 2019).

## 6. Diagrama de trayectoria solar

El diagrama de trayectoria solar es un gráfico que representa las trayectorias solares que se tienen diariamente en un año completo. Dentro de estos diagramas se obtienen proyecciones del recorrido del sol, así como las horas que se obtienen irradiación solar. En el eje horizontal se representa el acimut solar, la cual indica la dirección cardinal en la que se encuentra el sol (norte, sur, este, oeste). El ángulo del acimut se mide la dirección horizontal desde el norte hacia el sol, con valores de  $0^\circ$  (norte),  $90^\circ$  (este),  $180^\circ$  (sur),  $270^\circ$  (oeste). Por otro lado, el eje vertical representa el ángulo de elevación del sol sobre el horizonte, el cual va variando desde los  $0^\circ$  (cuando el sol está en el horizonte), hasta los  $90^\circ$  (cuando el sol está directamente por encima de la superficie terrestre) (solaranywhere, 2021).

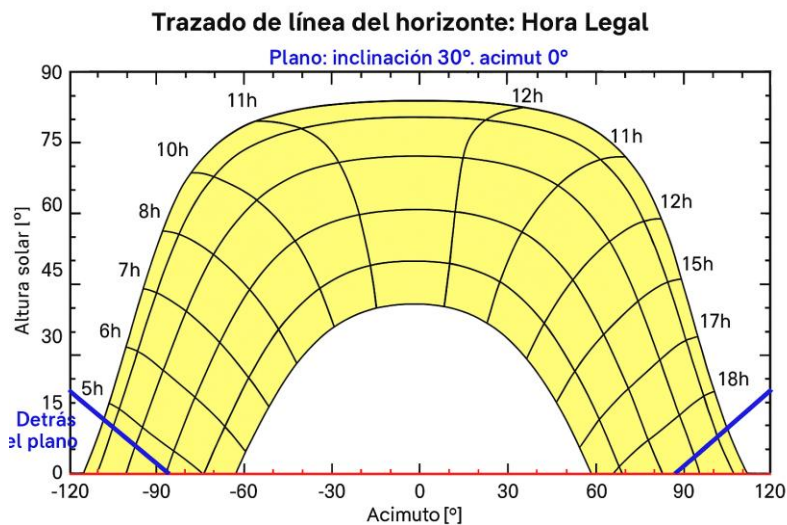
Otro punto importante de este tipo de gráficas son las curvas de trayectoria solar, las cuales son las líneas dentro del diagrama que representan la trayectoria del sol durante un año específico. Cada curva va a variar respecto a la fecha del año, y la posición del sol cambiará durante el día con respecto al acimut y la elevación.

Las curvas de trayectoria solar pueden ser definidas por los solsticios y equinoccios. Los solsticios son dos, el solsticio de junio y el solsticio de diciembre. El solsticio de junio representa la trayectoria del sol en verano en el hemisferio norte, cuando el sol alcanza su altura máxima en el cielo, siendo considerado el día más largo del año. Por otro lado, está el solsticio de diciembre el cual se da en invierno en el hemisferio norte. Este solsticio representa la altura más baja alcanzada por el sol en un día, lo cual provoca que el día sea más corto. Por último, están los equinoccios, los cuales se dan en las estaciones de primavera y otoño, y representan la trayectoria del sol cuando el día y la noche tienen aproximadamente la misma duración (solaranywhere, 2021).

La trayectoria del sol en este tipo de gráficas está acompañada de un análisis de sombras, las cuales indican la presencia de objetos que obstaculizan el paso de la irradiación solar en ciertas horas del día. Este tipo de obstrucciones pueden estar representadas por zonas montañosas o edificaciones de gran altura, la cual obstruyen el paso de la irradiación solar en tempranas horas del día y en las últimas horas del tiempo solar diario. Por lo general, en este tipo de gráficas se puede observar la posición del sol en el cielo a cada hora del día. De esta forma se puede conocer las horas activas del sol, considerando la presencia de sombras que se obtienen en la trayectoria solar (solaranywhere, 2021). Como se observa en la Figura 14, el diagrama incluye el comportamiento solar dependiendo de las horas del día, y marca la trayectoria de irradiación que se puede obtener.

**Figura 14.**

*Ejemplo de diagrama de recorrido solar*



*Nota. Adaptado de Researchgate (2022).*

## 7. Cálculo de paneles solares

Existe una serie de cálculos que son de suma importancia para realizar el diseño de sistemas fotovoltaicos. De esta manera se garantiza que el diseño pueda cubrir las demandas energéticas solicitadas y que además se pueda establecer un sistema que no esté sobrecargado. A continuación, se presentan los cálculos importantes para el desarrollo de un sistema solar.

- Horas solar pico: Las horas solares pico indican la energía por unidad de superficie que se recibe considerando una irradiancia solar constante de 1000 W/m<sup>2</sup> (Cengel, 2015). Para calcular este factor se utiliza la fórmula de la Figura 15.

**Figura 15.**

*Cálculo de horas solar pico*

$$HSP = \frac{\text{irradiancia solar}}{1000 \text{ W/m}^2} \text{ (h/día)}$$

*Nota. Adaptado de Cengel (2015).*

- Temperatura real sobre la célula fotovoltaica: La temperatura tiene un impacto significativo en el rendimiento de los paneles solares, y este depende de la temperatura nominal de operación de la célula y las condiciones del sitio (Orts, 2018). En la Figura 16 está la forma de calcular dicha temperatura.

**Figura 16.**

*Cálculo de la temperatura real sobre la célula fotovoltaica*

$$T_{célula} = T_{ambiente} + (T_{NOCT} - 20) \left( \frac{G}{800} \right) \quad (C)$$

Donde:

T<sub>célula</sub>: Temperatura real de la célula fotovoltaica (°C)

T<sub>ambiente</sub>: Temperatura en el sitio de estudio (°C)

T<sub>NOCT</sub>: Temperatura nominal de operación de la célula (°C)

G: Irradiancia Global del sitio de estudio (Wh/m<sup>2</sup>)

- Potencia real generada por la célula fotovoltaica: Considerando los efectos del clima, el potencial fotovoltaico que ofrece un panel solar se ve afectado bajando su rendimiento. El considerar el potencial con los efectos del clima permite tener un valor más preciso sobre la generación energética por panel solar (Cengel, 2015). Para conocer dicho potencial se puede utilizar la fórmula de la Figura 17.

**Figura 17.**

*Cálculo de la potencia real generada por la célula fotovoltaica*

$$P_{PMT\ T_{célula}} = P_{PMT\ STC} \left( 1 + \frac{g}{100} (T_{célula} - 25) \right)$$

Donde:

P<sub>PMT célula</sub>: Potencia real generada por la célula fotovoltaica (W)

P<sub>PMT STC</sub>: Potencial que genera la célula fotovoltaica en condiciones de diseño (W)

T<sub>NOCT</sub>: Temperatura nominal de operación de la célula (°C) g: Porcentaje de variación en rendimiento respecto a la temperatura (%/°C)

T<sub>célula</sub>: Temperatura real de la célula fotovoltaica (°C)

- Cantidad de módulos fotovoltaicos necesarios para la instalación: Con la potencia que generan los paneles solares y la demanda que se desea cubrir se encamina a calcular la cantidad de paneles solares que son necesarios en el sistema. (Cengel, 2015) La ecuación para calcular este dato es la que se presenta en la Figura 18.

**Figura 18.**

*Cálculo de la cantidad de paneles solares necesarios*

$$\# \text{ Módulos FV} = \frac{E * FS}{P_{PM} * HSP}$$

Donde:

# Módulos FV: Cantidad de módulos fotovoltaicos necesarios para satisfacer la demanda energética.

E: Demanda energética a satisfacer (Wh)

FS: Factor de seguridad (considerado en un rango de 1.2 y 1.3)

P PM: Potencia real generada por la célula fotovoltaica (W)

HSP: Horas Solares Pico (Hrs)

- Ángulo de inclinación para paneles solares con instalaciones sin uso prioritario: El ángulo de inclinación de los paneles solares es un factor crucial para optimizar la captación de energía solar, maximizando la eficiencia del sistema. En instalaciones donde no se da un uso prioritario de los paneles (cuando no se cambia la inclinación), es esencial calcular este ángulo para adaptarse a las condiciones climáticas (Cengel, 2015). La manera de calcular dicho ángulo es utilizando la fórmula de la Figura 19, donde la latitud es del sitio de estudio en grados.

**Figura 19.**

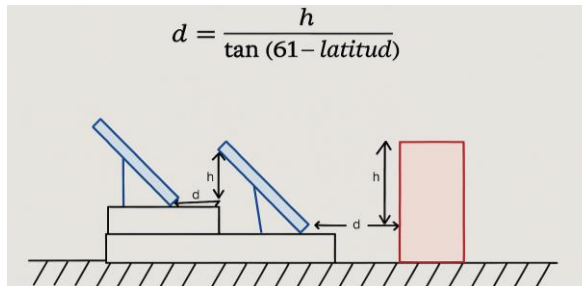
*Cálculo del ángulo de inclinación de paneles solares para instalaciones*

$$\theta_{inclinación} = 3.7^\circ + 0.69(\text{latitud})$$

- Separación entre filas de paneles solares (cubiertas planas): La separación entre filas de paneles solares es la distancia que se debe mantener entre una fila y otra para evitar que se proyecten sombras entre ellas, lo cual podría reducir la eficiencia del sistema fotovoltaico (Orts, 2018). La forma de calcular la distancia entre filas de paneles solares en cubiertas planas es utilizando la geometría de la Figura 20, donde la letra h representa la distancia vertical entre la parte baja de la fila anterior con la parte alta de la fila siguiente.

**Figura 20.**

*Distancia entre filas en cubiertas planas*

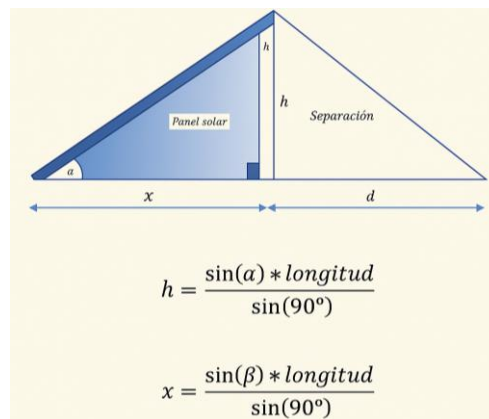


*Nota. Adaptado de Orts (2018).*

- Espacio de ocupación de paneles solares sobre cubiertas planas: Es importante determinar el espacio que ocuparán los paneles solares sobre las cubiertas para poder entender el área de ocupación que tendrán sobre una losa plana. Esto ayuda para determinar cuántos paneles solares se podrían instalar en una losa, considerando la ocupación horizontal. Por medio de trigonometría se puede calcular los espacios de ocupación de los equipos (Orts, 2018). En la Figura 21 se presenta las formulas para conocer el espacio de ocupación de los paneles, donde longitud hace referencia a la longitud vertical que tiene el modelo de panel solar.

**Figura 21.**

*Espacio de ocupación de paneles solares sobre cubiertas planas*



*Nota. Adaptado de Orts (2018).*

- Voltaje máximo en inversores por circuito. El voltaje máximo en los inversores es un parámetro fundamental para considerar en los sistemas solares fotovoltaicos, ya que asegura el correcto funcionamiento del sistema sin sobrepasar los límites de seguridad eléctrica. Este valor debe estar en el rango de voltaje AC según lo estimado (Cengel, 2015). Este se calcula con la ecuación de la Figura 22, donde  $V_{mp}$  hace referencia al voltaje

máximo alcanzado por paneles solares en condiciones de diseño.

**Figura 22.**

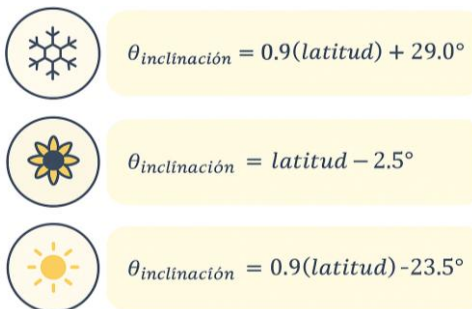
*Cálculo del voltaje máximo en inversores por circuito*

$$\text{Voltaje} = (\text{Paneles}) * (V_{mp})$$

- Potencia alcanzada con los paneles solares para los inversores: La potencia alcanzada por los paneles solares es un indicador clave para evaluar el desempeño de un sistema fotovoltaico y su capacidad para alimentar los inversores. El circuito de paneles solares conectado a un inversor debe tener una potencia menor a la potencia máxima de diseño soportada por el inversor (Cengel, 2015). Es importante considerar la potencia que genera el panel solar en condiciones de diseño para obtener un margen completo de la capacidad máxima que tendrá el módulo fotovoltaico. Para conocer la potencia máxima alcanzada por el circuito se debe multiplicar la cantidad de paneles solares en el circuito con la potencia máxima que puede generar el panel solar en condiciones de diseño.
- Inclinación del módulo fotovoltaico (con el método de la eficiencia). La inclinación del módulo fotovoltaico influye directamente en la eficiencia de captación de energía solar, y su cálculo es fundamental para maximizar el rendimiento del sistema. Utilizando el método de la eficiencia, se puede determinar el ángulo óptimo de inclinación dependiendo de la estación climática que se esté viviendo en el hemisferio norte. (Cengel, 2015) Las condiciones para determinar el ángulo de inclinación se observan en la Figura 23.

**Figura 23.**

*Cálculo de la inclinación del panel solar por época del año*



*Nota. Adaptado de Cengel (2015).*

## 8. Modelo de paneles solares de interés

En la actualidad el mercado de paneles solares ha crecido de manera significativa, permitiendo que los usuarios tengan su disposición la elección de panel solar según sus preferencias. Dentro de los factores que se pueden evaluar para la selección de paneles solares está la potencia que generan, la eficiencia que tienen para transformar la energía solar en energía eléctrica, los precios establecidos en el mercado, las dimensiones con las que cuenta cada módulo fotovoltaico, entre muchas otras. De esta manera, se consideran los siguientes modelos para la investigación:

- **MAXEON 3 Panel solar SPR-MAX3-430:** MAXEON 3 es un modelo de panel solar de alta eficiencia fabricado por la empresa SunPower. El producto destaca por ofrecer una potencia nominal de 430W, dando una eficiencia líder en el sector de hasta 22.2%. Dentro de las ventajas que señala el fabricante es su capacidad de maximizar la generación de energía en diversas condiciones, incluyendo las fluctuaciones por temperaturas y luminosidad. Otra de las ventajas destacables es la durabilidad excepcional, resistiendo condiciones meteorológicas adversas y evita la formación de puntos calientes. Un punto destacable de este modelo es la garantía de 40 años que ofrece el fabricante, reflejando la confiabilidad y la sostenibilidad a largo plazo (SunPower, 2024).

Dentro de las certificaciones que tiene el panel solar destacan la ISO 9001:2015, ISO 14001:2015. Estas certificaciones aseguran que los procesos de fabricación del panel solar cumplen con estándares de calidad validados a nivel internacional, y que además cuentan con una gestión adecuada de recursos para general el mínimo impacto ambiental. Este modelo de panel solar cuenta con diferentes pruebas validadas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), las cuales certifican al modelo de pruebas estándares, pruebas de amoníaco, de soplado de arena, de niebla salina, entre otros (SunPower, 2024). El panel solar cuenta con dimensiones de 1046mm de ancho por 1812mm de largo con un espesor de 40mm. Además, el perfil del bastidor cuenta con una altura de 40mm para su correcta instalación. Las células solares que utiliza son del modelo 112 Maxeon Gen 3 monocristalino, con cristal templado antirreflectante de alta transmisión. Este modelo tiene un peso neto de 21.2 kg, y puede ser utilizado a temperaturas entre -40°C hasta los 85°C (SunPower, 2024).

El precio de un panel solar MAXEON 3 ronda entre los Q4,068.85 con un costo añadido de envío de Q3,200 por pedido realizado. Es importante destacar que los productos de esta marca son europeos por lo que no tienen una disponibilidad inmediata en Guatemala. Sin embargo, es importante considerar la alta calidad de construcción de estos paneles solares, garantizando ser una compra con beneficios a largo plazo (SunPower, 2024).

- MAXEON 6 AC Panel solar- SPR-MAX6-425- BLK-E4-AC: El modelo de panel solar MAXEON 6 AC es panel de alta eficiencia producido por SunPower. Este panel se distingue por ofrecer una potencia nominal de 425 W, con una eficiencia líder en el sector de hasta 22,0%. Entre las ventajas que el fabricante resalta está su capacidad para maximizar la generación de energía bajo diversas condiciones, incluyendo variaciones de temperatura y luminosidad. Al igual que el modelo MAXEON 3, este modelo cuenta con altos estándares de calidad que le permiten soportar grandes impactos y protección ante desgaste y corrosión. La garantía de este modelo también es de 40 años, por lo que se certifica sus altos estándares de construcción y deja un estigma de confianza para su utilización en proyectos renovables (SunPower, 2024).

En cuanto a certificaciones, el panel solar MAXEON 6 AC mantiene los estándares de calidad internacional como la ISO 9001:2015 y ISO 14001:2015, asegurando que los procesos de fabricación del panel solar son de alta calidad y que se gestiona adecuadamente el impacto ambiental. Este modelo cuenta con la validación de algunas pruebas como la IEC 61215 y 617306, las cuales son pruebas de rendimiento y seguridad de los módulos fotovoltaicos, garantizando la durabilidad y desempeño a largo plazo. Además, cuenta con certificaciones como la IEC 61000-6-3, la cual certifica su uso para equipos utilizados en entornos residenciales, comerciales y de industria ligera (SunPower, 2024).

El panel solar MAXEON 6 AC cuenta con dimensiones de 1032mm de ancho por 1872mm de largo con un espesor de 35mm. El perfil del bastidor tiene una altura de 35mm para su correcta instalación. Utiliza 66 células solares monocristalinas Maxeon de sexta generación, con cristal templado antirreflectante de alta transmisión. Este modelo tiene un peso neto de 21,8 kg, y puede operar en un rango de temperaturas de -40°C hasta 60°C. El precio de un panel solar MAXEON 6AC ronda entre los Q5,800.00 con un costo añadido de envío de Q3,200 por pedido realizado. Es importante destacar que los productos de esta marca son europeos por lo que no tienen una disponibilidad inmediata en Guatemala (SunPower, 2024).

- Panel solar de 550W monocristalino Half Cell: El modelo de panel solar Half Cell de la marca Langle es un producto que ofrece una potencia pico de 550W, con una eficiencia del 20.80%. Dentro de las ventajas que ofrece este modelo de panel solar es la potencia de salida que llega a ofrecer un solo modulo, el cual puede ascender hasta los 455W. La marca garantiza que el panel solar cuenta con un alto rendimiento con poca luz, además de la fuerte capacidad de puntos anti-calientes que son provocados muchas veces por la presencia de sombras. El fabricante garantiza que los paneles solares cuentan con adaptabilidad a

entornos hostiles debido al alto rendimiento de los materiales de construcción (AISA, 2024).

Es importante destacar que el panel solar cuenta con células de tipo monocristalino, cuenta con dimensiones de 2279mm de largo, 1134mm de ancho y un espesor de 35mm. El peso neto es de 68 lb y cuenta con un voltaje pico de 41.75V y una corriente máxima de 13.17A, y la temperatura de utilización está en el rango de -40°C a los 85°C. Es importante resaltar que el fabricante no menciona la validación de certificaciones dentro de sus especificaciones técnicas, por lo que su calidad no puede ser validada por pruebas internacionales (AISA, 2024).

El fabricante da una garantía de 10 años por desperfectos de fábrica, lo cual es un factor clave para tomar la decisión de adquirir este producto. Es importante recordar que las instalaciones fotovoltaicas en el residencial se estiman como una inversión a largo plazo. Dentro de las ventajas de utilizar estos paneles solares está el precio, ya que el modelo se encuentra comercialmente en el mercado guatemalteco por medio de canales de venta como AISA. El precio de este modelo de panel solar es aproximadamente de Q.1,665.00 más costos de envío que no exceden de Q.300.00 para el departamento de Guatemala (AISA, 2024).

- PERC SP360M-60. Los paneles solares PERC S360M-60 son módulos fotovoltaicos de alta eficiencia fabricados por Hunan Langle New Energy Co. Dentro de las características relevantes de estos paneles solares está la tecnología de barreras múltiples, la cual permite una mejor captura de la luz, la cual mejora efectivamente la potencia de salida y la confiabilidad del módulo. Cuenta con rendimiento a baja luminosidad, la cual permite la generación de energía a partir de poca luz de actuación. Cuenta con resistencia a los puntos calientes gracias a su estructura de media celda y un diseño de circuito especial que produce menos pérdida de sombra. Por último, la marca garantiza la adaptabilidad del panel solar a los entornos hostiles que se pueden presentar en el ambiente, todo esto gracias a sus altos estándares de construcción (SolarMayorista, 2024).

Dentro de los detalles específicos del módulo solar es importante mencionar que cuentan con células tipo monocristalino, las cuales pueden llegar a generar una potencia máxima de 360W. La eficiencia que brinda este módulo solar es de 20.6%, por lo que son paneles diseñados para ofrecer un rendimiento óptimo y son adecuados para una amplia gama de aplicaciones fotovoltaicas, desde residenciales hasta comercios. El producto cuenta con garantía de 10 años por desperfectos de la tecnología y material, y garantía de 25 años para la generación lineal de energía (SolarMayorista, 2024).

El panel solar cuenta con dimensiones de 1540mm de alto por 1134mm de ancho y un espesor de 35mm. Una de las ventajas significativas del producto es el manejo de certificaciones internacionales. Dentro de las certificaciones más relevantes se puede mencionar la ISO9001:2015 la cual garantiza el manejo de estándares de calidad en el proceso de producción. La ISO45001 y la ISO45001:2018 garantizan que este modelo de panel solar cumple con el manejo adecuado de recursos ambientales, así como el cuidado ocupacional y de salud en su producción. Además, cuenta con las pruebas Las certificaciones IEC61215 y IEC61730 son estándares internacionales que evalúan la calidad y seguridad de los módulos fotovoltaicos. El precio de este modelo de panel solar es aproximadamente de Q.1,150.00 más costos de envío que no exceden de Q.300.00 para el departamento de Guatemala. Es importante mencionar que este producto se encuentra a la venta en Guatemala con disponibilidad inmediata (SolarMayorista, 2024).

- SP450M-60. Los paneles solares SP450M-60 son módulos fotovoltaicos de alta eficiencia fabricados por 3S Import Export Shijiazhuang Co., Ltd. Estos paneles incorporan tecnología avanzada que permite una captura de luz superior, mejorando así la potencia de salida y la confiabilidad del módulo. Presentan un rendimiento destacado incluso en condiciones de baja luminosidad, lo que les permite generar energía eficientemente en una amplia gama de situaciones. Además, su diseño de media celda y un circuito especializado reducen la pérdida de sombra y aumentan la resistencia a los puntos calientes. La construcción robusta de estos paneles asegura su adaptabilidad y durabilidad en entornos hostiles (SolarMayorista, 2024).

En cuanto a las especificaciones técnicas, los paneles SP450M-60 utilizan células monocristalinas que pueden generar una potencia máxima de 450W. Con una eficiencia del 20.8%, estos paneles están diseñados para ofrecer un rendimiento óptimo y son adecuados para una amplia gama de aplicaciones fotovoltaicas, tanto residenciales como comerciales. El producto cuenta con garantía de 10 años por desperfectos de la tecnología y material, y garantía de 25 años para la generación lineal de energía (SolarMayorista, 2024).

Las dimensiones de estos paneles son de 1909mm de alto por 1134mm de ancho y un espesor de 35mm. Respecto a las certificaciones, los paneles SP450M-60 cuentan con la ISO 9001:2015, que garantiza altos estándares de calidad en el proceso de producción. Además, cumplen con las normativas de seguridad y calidad ambiental, como se evidencia en las pruebas IEC 61215 y IEC 61730, que son estándares internacionales para la evaluación de la calidad y seguridad de módulos fotovoltaicos. El precio de este modelo de panel solar es aproximadamente de Q.1,462.00 más costos de envío que no exceden de

Q.300.00 para el departamento de Guatemala. Es importante mencionar que este producto se encuentra a la venta en Guatemala con disponibilidad inmediata (SolarMayorista, 2024).

- ZXM8-TPLDD132 Series. Los paneles solares ZNSHINE SOLAR BIFACIAL de 670 W son módulos fotovoltaicos bifaciales de alta eficiencia fabricados por ZNShine Solar, una empresa reconocida globalmente y clasificada como fabricante de módulos fotovoltaicos de nivel 1 por Bloomberg. Estos paneles están diseñados con tecnología avanzada de media celda y doble vidrio monocristalino PERC, lo que permite un mayor rendimiento de generación de energía tanto en la parte frontal como en la trasera del panel, con un aumento adicional de hasta el 25% de potencia gracias a su tecnología bifacial, dependiendo del albedo de la superficie donde se instalen (Solar, 2024).

En cuanto a sus especificaciones técnicas, los paneles ZNSHINE SOLAR BIFACIAL ofrecen una potencia máxima de 670W y una eficiencia del 21.57%. Cuentan con garantía de producto por 12 años y una vida útil aproximada de 30 años. El diseño del equipo está pensado para reducir la distancia entre las barras colectoras y las líneas de la rejilla de los dedos, lo que contribuye a aumentar la eficiencia energética del módulo (Solar, 2024).

Las dimensiones de estos paneles son de 2384 mm de alto, 1303 mm de ancho, con un espesor de 35 mm y un peso aproximado de 38.5 kg. Respecto a las certificaciones, estos módulos cuentan certificación ISO 9001 (Sistema de Gestión de la Calidad), ISO 14001 (Sistema de Gestión Ambiental) e ISO 45001 (Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud Ocupacional), además de estar certificados bajo las normativas IEC 61215, IEC 61730, IEC 61701, y UL61730. El distribuidor de este modelo de paneles solares en el país es Enersys Solar Guatemala, el cual establece un precio por panel solar aproximado de Q.1,045.20, dependiendo de la disponibilidad en el mercado (Solar, 2024).

## **G. Aerogeneradores**

Los aerogeneradores son máquinas conformadas principalmente por una turbina eólica, la cual cuenta con un generador eólico. Este equipo transforma la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional, la cual es posteriormente transformada en energía eléctrica. Por lo general, son equipos que constan de palas que son las que permiten la rotación del eje. Además, cuentan con una caja de engranajes denominada multiplicadora de velocidad, el generador eléctrico, un convertidor electrónico de frecuencia de potencia y el transformador elevador para poder conectar la energía transformada a la red eléctrica (Guzmán, 2014).

En términos generales, la energía cinética del viento es capturada por las palas del aerogenerador y

se convierte en energía mecánica rotativa a baja velocidad. Esta energía mecánica se transfiere a través de una caja multiplicadora para alcanzar las revoluciones necesarias que permiten al generador eléctrico transformarla en energía eléctrica. Esta energía eléctrica generada se encuentra disponible en los devanados del estator y del rotor del generador. La energía generada por el estator tiene la frecuencia de la red eléctrica, que generalmente es de 60 Hz o 50 Hz, mientras que la generada por el rotor tiene una frecuencia variable que depende de la velocidad del viento. Para igualar la frecuencia de la red eléctrica, la energía eléctrica de frecuencia variable se convierte a través de un convertidor electrónico (Guzmán, 2014).

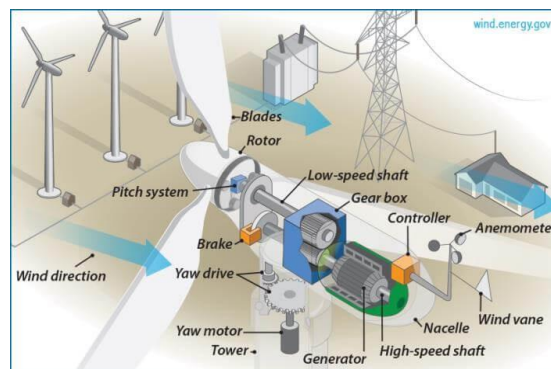
## 1. Aerogeneradores de eje horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal son los más comunes y se clasifican según su ubicación, potencia generada, número de palas y velocidad del rotor. También se considera la dirección del viento en relación con el rotor (barlovento o sotavento), el control del rotor (paso fijo versus paso variable) y el sistema de orientación (pasivo o activo) (Durán, 2019).

Actualmente, se implementan parques eólicos en tierra y en el mar. Para instalarlos, se requiere un estudio de ubicación que evalúa factores como el potencial energético, el comportamiento del viento, las condiciones del suelo y el impacto ambiental, entre otros. La conexión a la red eléctrica es otro factor importante para considerar. En sistemas aislados que suministran electricidad a viviendas, granjas o fábricas, los aerogeneradores son más pequeños y su potencia suele ser inferior a 100 kW. La potencia de un aerogenerador depende en gran medida de su diseño, especialmente del diámetro del rotor y la altura a la que se encuentra instalado (Durán, 2019). Como se observa en la Figura 24, el aire entra de una manera perpendicular a la turbina, siendo el aire quien impulsa el rotor.

**Figura 24.**

*Diseño de aerogenerador de eje horizontal*



*Nota. Adaptado de Durán (2019).*

## 2. Aerogeneradores de eje vertical

En este tipo de aerogenerador, los componentes clave se ubican en la base, es decir, el generador y la caja de engranajes se encuentran a nivel del suelo, lo que simplifica las tareas de mantenimiento y reparación. A diferencia de los aerogeneradores de eje horizontal, la principal ventaja de estos es que pueden capturar el viento desde cualquier dirección sin necesidad de contar con un sistema de orientación. Existen diversos diseños de rotores en estos aerogeneradores, entre los más conocidos se encuentran el Savonius, el Darrieus y el Giromill (Durán, 2019). En la Figura 25 se puede observar que, a diferencia de las turbinas de eje horizontal, las turbinas de eje vertical van paralelas a la corriente del viento y tienen la capacidad de recibir el viento de cualquier dirección.

### Figura 25.

*Modelo Darrieus como aerogenerador de eje vertical*



*Nota. Adaptado de Durán (2019).*

## 3. Mini aerogeneradores

Los mini aerogeneradores de eje vertical son dispositivos diseñados para capturar y convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. Se caracterizan por tener un diseño de rotor vertical, a diferencia de los aerogeneradores de eje horizontal convencionales, que tienen el rotor en posición horizontal. Los mini aerogeneradores de eje vertical son más compactos y suelen ser de menor tamaño que sus contrapartes de eje horizontal (Espitia, 2014).

Estos aerogeneradores son utilizados principalmente en aplicaciones de pequeña escala, como para abastecer de energía a viviendas, granjas, equipos de comunicación, sistemas de bombeo de agua y otros dispositivos que requieren una fuente de energía autónoma. Debido a su diseño de eje vertical, son capaces de capturar el viento desde cualquier dirección, lo que los hace adecuados para entornos donde la dirección del viento es variable (Espitia, 2014).

Los mini aerogeneradores de eje vertical son una opción interesante para la generación de energía en lugares con acceso limitado a la red eléctrica o como parte de sistemas de energía renovable descentralizada. Sin embargo, su capacidad de generación de energía es limitada en comparación con las turbinas eólicas de gran escala, por lo que su uso suele estar restringido a aplicaciones específicas de menor consumo energético (Espitia, 2014).

Según Bernal (2019), los mini aerogeneradores, también conocidos como aerogeneradores de pequeña escala o aerogeneradores domésticos, tienen una variedad de aplicaciones en diferentes entornos. Algunas de las aplicaciones comunes de los mini aerogeneradores incluyen:

- Generación de electricidad residencial: Los mini aerogeneradores se utilizan para generar electricidad en hogares y propiedades rurales donde el acceso a la red eléctrica es limitado o costoso.
- Sistemas de bombeo de agua: Se emplean para bombear agua en aplicaciones agrícolas, riego, abastecimiento de agua para ganado y suministro de agua en áreas remotas.
- Telecomunicaciones y torres de señales: Los mini aerogeneradores proporcionan energía a estaciones de comunicación remotas, torres de telefonía celular y sistemas de radio en lugares donde no se dispone de energía eléctrica confiable.
- Iluminación exterior: Se utilizan para alimentar sistemas de iluminación exterior en parques, jardines, faros, señales de tráfico y otras áreas remotas.
- Aplicaciones marinas: Los mini aerogeneradores son adecuados para embarcaciones, boyas y faros en el mar, donde el viento es una fuente de energía disponible.
- Sistemas de carga de batería: Se emplean para cargar baterías en aplicaciones como vehículos eléctricos, casas rodantes y sistemas de energía solar híbridos.
- Proyectos de investigación y desarrollo: Los investigadores a menudo utilizan mini aerogeneradores para experimentar con nuevas tecnologías y mejorar la eficiencia de la generación de energía eólica.

#### **4. Estudio del potencial eólico**

El análisis de potencial eólico evalúa la capacidad de una zona para generar energía a partir del viento. Este estudio examina factores como la velocidad del viento, la frecuencia y dirección, la topografía del terreno y las condiciones climáticas. Es importante conocer el comportamiento del viento en el sitio para poder determinar valores de diseño útiles para el cálculo de turbinas eólicas.

Las rosas de viento son una representación de las condiciones del recurso eólico en una zona en específico. Con este tipo de gráficos se obtiene una idea de la frecuencia, valores promedio del viento y la energía que se puede llegar a obtener en cada una de las direcciones. El objetivo principal de este tipo de gráficos es representar la frecuencia y características del viento en relación con las direcciones cardinales (norte, sur, este y oeste), de manera que pueda ser estudiado de manera visual y comprensible. Según Mírez (2011), las rosas de viento se dividen en tres, las cuales son la rosa de frecuencia, la rosa de velocidad y la rosa de potencia.

- Rosa de frecuencia. La rosa de frecuencia de viento indica con qué frecuencia el viento sopla en cierta dirección. Cuanto más largo es el segmento, mayor frecuencia es el viento que se obtiene en esa dirección.
- Rosa de velocidad. La rosa de velocidad del viento representa los diferentes rangos de velocidad del viento que se obtienen en una dirección. Este tipo de bandas indican que tan fuerte es el viento en cada dirección cardinal.
- Rosa de potencia. La rosa de potencia se refiere a la dirección desde la que el viento proviene la mayor parte del día. Los segmentos más largos en el gráfico indican las direcciones desde las cuales el viento sopla con mayor frecuencia.

## **5. Modelos de mini aerogeneradores de interés**

A diferencia de los paneles solares, el mercado de mini aerogeneradores ha sido un segmento emergente en los últimos años. De esta manera, el mercado no cuenta con una amplitud y se encuentra más limitado en las opciones que el cliente puede adquirir. Es importante tomar en cuenta que los precios suelen ser mucho más elevados y las especificaciones suelen no ser tan detalladas como los paneles solares. Los modelos que se toman en cuenta para esta investigación son los siguientes:

- Turbina eólica OLONETO 48V eje vertical: Este generador de turbina eólica cuenta es fabricado por la empresa OLONETO y sus productos suelen ser comercializados a nivel mundial. Dentro de las características que se pueden mencionar de esta turbina es que cuentan con una velocidad baja de arranque, cuentan con 3 palas que le permiten una alta utilización de energía eólica. La velocidad de viento iniciada es de 4.3 pies/s, la velocidad de viento de corte es de 9.8pies/s y la velocidad nominal de viento es de 36.1 pies/s. De esta manera, esta turbina eólica cuenta con potencia nominal de 1200 W, y un voltaje de salida de 48V. La altura de cada una de las hojas es de 37.402 pulgadas (PowerStar, 2024). El precio del producto es de aproximadamente Q.9,240. (sin considerar el inversor). Si se considera el inversor el costo asciende a Q.15,335.00 más el costo de envío, que ronda los Q.1,300.00 por las dimensiones con las que cuenta. La garantía es de 10 años por

desperfectos del producto y se ofrece equipo de instalación dentro del paquete a comprar (PowerStar, 2024). En la Figura 26 se puede observar la forma de la turbina eólica y cómo es el área de barrida que ofrecen sus aspas.

**Figura 26.**

*Modelo de turbina eólica Oloneto 48V de eje vertical*



*Nota. Adaptado de PowerStar (2024).*

- Turbina de eje vertical marca HENGJINGTR: Este generador es proveniente de la marca HENGJINGTR y cuenta con una generación de potencia de 10kW. El voltaje nominal puede ser seleccionado por el cliente desde los 12V hasta los 220V. El diámetro del rotor de las cuchillas es de 1.7 pies, y cuenta con un peso de montaje de 26.5lb. Cuenta con una altura de cuchillas de 2.5 pies, y las velocidades consideradas para su estudio son las siguientes: Velocidad del viento iniciada de 6.6 pies/s, velocidad del viento de corte de 9.8 pies/s, la velocidad nominal del viento de 32.8 pies/s, velocidad segura del viento menor a 40 pies/s (Hengjingtr, 2024).

El material de las hojas es de aleación de aluminio galvanizada, con una moto de suspensión de imán permanente trifásico. La altura del montaje está entre 6.6 y 39.4 pies. El generador tiene un grado de protección de IP54, además la temperatura de trabajo ambiente está entre los 25 y 459°C (Hengjingtr, 2024).

El precio del producto es de aproximadamente Q.15,830.00, sin considerar el inversor más el costo de envío, que ronda los Q.1,300.00 por las dimensiones con las que cuenta. La garantía es de 10 años por desperfectos del producto y se ofrece equipo de instalación dentro del paquete a comprar. El fabricante no ofrece la opción de agregar un inversor para el producto, por lo que se debería de cotizar por separado (Hengjingtr, 2024). En la Figura 27

se puede observar el modelo presentado, donde destaca con aspas mucho más robustas.

**Figura 27.**

*Turbina de eje vertical marca Hengjingtr*



*Nota. Adaptado de Hengjingtr (2024).*

- Turbina de eje vertical Atlas 7 marca Tesup: El generador proveniente de la marca Tesup cuenta con una generación de potencia nominal de 7kW. El voltaje nominal es seleccionable por el cliente, pudiendo oscilar entre 0 y 220V, lo que permite una mayor flexibilidad según las necesidades del usuario. El rotor de las cuchillas tiene un diámetro aproximado de 1 metro, mientras que el peso total del montaje es de 54 libras, lo que facilita su instalación en diversas ubicaciones. Las cuchillas tienen una altura de 12.6 cms, lo que influye directamente en la eficiencia del aerogenerador frente a distintas velocidades del viento. Para este modelo, las velocidades de viento contempladas en su análisis incluyen una velocidad inicial de 3 metros por segundo, una velocidad máxima de 20 metros por segundo, y una velocidad nominal de operación de 4 metros por segundo, asegurando su rendimiento óptimo (Tesup, 2024).

El material de las cuchillas está fabricado con aleación de aluminio galvanizada, lo que le confiere durabilidad y resistencia en condiciones adversas. El generador utiliza un motor trifásico de imán permanente con suspensión, lo que mejora su eficiencia energética. El equipo cuenta con un grado de protección IP54, que le otorga un buen nivel de resistencia frente al polvo y al de agua. En cuanto a las condiciones ambientales, el aerogenerador puede trabajar en un rango de temperatura entre 25°C y 459°C, haciéndolo viable en climas extremos (Tesup, 2024).

El precio estimado del Atlas 7 de Tesup es de aproximadamente Q.16,580.00, sin incluir el inversor para la conexión al sistema. Si se considera la compra del inversor el costo sube a Q.19,500.00. La garantía que ofrece el fabricante es de 10 años, cubriendo desperfectos del producto. El paquete de compra incluye el equipo de instalación, con el inversor propio del modelo (Tesup, 2024). En la Figura 28 se puede obtener una referencia del diseño y dimensiones de la turbina eólica marca Tesup.

**Figura 28.**

*Modelo Atlas 7 de la marca Tesup*



*Nota. Adaptado de Tesup (2024).*

## **6. Cálculo de mini aerogeneradores**

El diseño de un sistema de aerogeneradores de eje vertical implica una serie de cálculos fundamentales para garantizar su eficiencia y funcionamiento óptimo. Entre estos cálculos se incluyen la determinación de la altura adecuada de la turbina para aprovechar las corrientes de viento disponibles a diferentes altitudes, el análisis de la velocidad y dirección del viento en el emplazamiento específico del proyecto, así como la evaluación de la potencia esperada a partir de la energía cinética del viento. Entre los cálculos relevantes para determinar el potencial eólico están los siguientes cálculos:

- **Velocidad del viento a la altura del aerogenerador:** Es importante mencionar que la velocidad del viento siempre va a depender de las condiciones a la cual se presente la turbina eólica. Dentro de los factores que pueden afectar el desempeño puede mencionarse la longitud de rugosidad del terreno, la cual es un factor que mide las circunstancias del entorno para determinar repercusiones en el trayecto del viento, las cuales pueden provocar disminuciones en la velocidad del viento que impacta en el aerogenerador (Cengel, 2015). Para conocer dicha velocidad se puede utilizar la fórmula de la Figura 29.

### Figura 29.

*Cálculo de la velocidad del viento a la altura del aerogenerador*

$$V_{ag} = \frac{V_o * \ln\left(\frac{h_{ag}}{L_o}\right)}{\ln\left(\frac{h_o}{L_o}\right)}$$

Donde:

V<sub>ag</sub>: Velocidad del viento a la altura del aerogenerador (m/s)

h<sub>ag</sub>: Altura del aerogenerador (m)

h<sub>o</sub>: Altura a la que se midió la velocidad conocida del viento (m)

V<sub>o</sub>: Velocidad conocida del viento (m/s)

L<sub>o</sub>: Coeficiente de rugosidad (m)

En el Cuadro 1 se presentan los coeficientes de rugosidad más utilizados en la actualidad según las condiciones de sitio que se tengan en el lugar de estudio.

### Cuadro 1.

*Cuadro de coeficientes de longitud de rugosidad*

Clases	Rugosidad Z <sub>o</sub> , m	Rasgos del paisaje
Sup. acuaticas	0.0002	Aguas abiertas (mar, lago, embalse, nieve sobre terreno plano, desiertos, concreto. Varios km sin obstaculos desde el sitio de medición del viento
Suave	0.005	Superficie sin obstáculo notable y sin vegetación; playas, hielo, pantano
Abierto	0.03	Terreno llano con graminéas o muy poca vegetación, Obstáculos aislados con separación de al menos 50 veces la altura, h
Aprox, abierto	0.10	Área cultivada o natural con cobertura vegetal baja, Obstáculos ocasionales (edificaciones o arboles) con distancia de al menos 201 obstáculo
Rugoso	0.25	Área natural o cultivada con cultivos altos, obstáculos porosos escasos por por 12 o 15 h, o con objetos sólidos, (edificaciones) distancia.de 8 h a 12 h
Muy rugoso	1.0	Zona de cultivos intensos con obstáculos en grupos (granjas, bosqu etc., separados por 8 h: Plantaciones, frutales, bosques jóvenes y sin arboles de baja altura con separación de 3 a 4 edificaciones y sin árboles
Skimming	1.0	Zonas con obstáculos altos de altura similar y separación de igual distancia que la altura, como bosques
Caótico	= 2.0	Centros de las ciudades con mezela dedificaciones de alturas diver-

*Nota. Adaptado de Guevera (2013).*

- Potencia generada por un aerogenerador de eje vertical: Existen ciertos factores que

influyen en la potencia máxima capaz de generar por un aerogenerador. Dentro de estos factores se puede mencionar la velocidad del viento que llega al aerogenerador y la densidad del aire en dicha zona. Para modelos de aerogeneradores con aspas semicilíndricas se considera un factor de rendimiento en la conversión energética de 0.074 (Cengel, 2015). Para poder calcular la potencia se utiliza la fórmula de la Figura 30.

**Figura 30.**

*Potencia generada por un aerogenerador de eje vertical*

$$\# \text{ turbinas} = \frac{E_{\text{demanda}} * FS}{E_{\text{generada}}}$$

Edemanda: Energía demandada en el sitio de diseño en cierto periodo de tiempo(kWh).

Egenerada: Energía que la turbina es capaz de generar en el mismo periodo de tiempo (kWh).

FS: Factor de seguridad considerado en el diseño

- Distanciamiento mínimo entre aerogeneradores. El distanciamiento mínimo entre aerogeneradores se define como 2 veces el diámetro de giro que tiene la turbina eólica. De esta manera, el distanciamiento mínimo se calcula multiplicando el diámetro de las aspas por 2 (Cengel, 2015).

## **H. Consumo energético domiciliario**

El sector domiciliario es uno de los principales consumidores a nivel mundial de la energía eléctrica. Uno de los motivos a tomar en consideración es el consumo energético sin restricciones, siempre que estén conectados a la red de distribución. Las conductas que los seres humanos tienen y los hábitos provocan que aspectos como el precio, impacto ambiental o la confianza entre los servicios públicos puedan variar respecto al tiempo (Bernal, 2019).

Es importante saber que el acceso al recurso energético es un derecho de los ciudadanos, y que permite a todas las personas su desarrollo diario de actividades, desde calentar el agua en la ducha, hasta para disfrutar de una película en familia. Según el Ministerio de Energías y Minas, para el año 2019, el acceso a la electricidad en el país ascendió a un porcentaje de 91.23%, lo cual es casi toda la población

guatemalteca. Sin embargo, se debe considerar la precariedad de las buenas instalaciones eléctricas en el país, lo que lleva a fallos en la red pública y un flujo inestable de energía en algunos sectores del país (Bernal, 2019).

## **1. Factores de influencia en el consumo energético**

Según Berrezueta y Encalada (2014), las variables que se ajustan a estudios empíricos de referencia sobre la demanda de energía eléctrica en el sector residencial y que son teóricamente adecuadas en función de su argumentación y relación económica incluyen:

- **Tarifa:** La tarifa, en el contexto del caso de estudio en particular, es el costo que los consumidores abonan por el consumo de energía eléctrica. Este precio, conforme a la legislación nacional, es fijado por las autoridades competentes. Cabe señalar que el sector eléctrico se considera una parte integral de los sectores estratégicos a nivel nacional, por lo que su regulación se encuentra bajo la supervisión directa de instituciones públicas que otorgan concesiones y desarrollan una estructura comercial para asegurar la prestación del servicio.
- **Cantidad de clientes:** El número de clientes que demandan el servicio también es una variable económicamente significativa. Esto se debe a que la demanda eléctrica, como uno de sus principales factores determinantes, incluye la cantidad de clientes que necesitan el servicio para atender sus necesidades. Además, si se tiene en cuenta el crecimiento gradual de la población y la expansión de la vivienda en la zona de cobertura, esto puede tener un impacto importante en la demanda eléctrica.

## **2. Consumo energético en Guatemala**

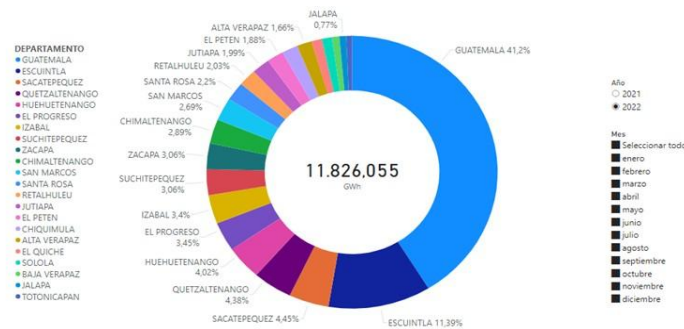
El consumo energético en Guatemala crece al ritmo desacelerado que tiene el crecimiento poblacional en el país. La demanda total de energía eléctrica del Sistema Nacional Interconectado (SNI) en 2022 fue de 11,826.1 GWh, que representa un crecimiento del 3.2% respecto al año anterior. El mes que presentó mayor consumo fue noviembre. Se determinó que el departamento con mayor consumo fue Guatemala, con un 41.25% del consumo total. Por el lado contrario, Totonicapán fue el departamento que representó el consumo más bajo con una cantidad de 0.6% del total (digital AMM, 2023).

Los departamentos de Guatemala, Escuintla, Sacatepéquez, Quetzaltenango y Huehuetenango representaron el 65.4% de la demanda total en 2022. Estos territorios coinciden con cuatro de las nueve ciudades intermedias que tienen un gran potencial de crecimiento según la Política Nacional de

Competitividad y otras mediciones de desarrollo. Estas ciudades son la Ciudad Portuaria de San José en Escuintla, la Ciudad Turística de Panchoy en Sacatepéquez, la Ciudad de Los Altos en Quetzaltenango y el Nodo Regional de Noroccidente en Huehuetenango. Esto nuevamente resalta la relación positiva entre el crecimiento económico y la necesidad de energía eléctrica, debido al aumento en el consumo de energía en los sectores industrial, residencial y comercial (digital AMM, 2023). En la Figura 31 se puede observar el porcentaje de participación de cada departamento en el consumo energético.

**Figura 31.**

*Gráfica representativa del consumo energético por departamento en el 2022*



*Nota. Adaptado de AMM (2023).*

## I. Sistemas de generación eléctrica interconectados a la red pública

Un sistema de paneles solares interconectados a la red es un sistema que está conectado a la red eléctrica de la empresa que satisface el consumo (en este caso EEGSA) y, por lo tanto, utiliza tanto la electricidad generada por los paneles solares como la electricidad proveniente de la red. Esto significa que el sistema solar interconectado no está obligado a cubrir todas las necesidades de electricidad del hogar (Berrezueta, 2014).

Cuando es necesario, la vivienda puede obtener energía de la red en momentos en que los paneles solares no estén produciendo suficiente energía, como en días nublados o durante la noche. Del mismo modo, si los paneles solares generan más energía de la que se consume en la casa, el exceso de energía se inyecta a la red y se acredita en la cuenta del propietario (Berrezueta, 2014).

## J. Aspectos técnicos de integración

La integración de un sistema híbrido de energía eólica y solar con la red eléctrica existente presenta varios desafíos técnicos. Uno de los principales problemas es la intermitencia inherente de las fuentes de energía renovable. La energía solar y eólica no generan electricidad de manera constante, lo que puede

causar fluctuaciones en el suministro de energía. La red eléctrica debe ser capaz de manejar estos cambios sin comprometer la estabilidad del sistema (Guevara, 2013).

Para enfrentar estos desafíos, se implementan tecnologías de sincronización y control que permiten la integración eficiente con la red eléctrica. Los sistemas de control avanzados, como los controladores de red inteligente (smart grid controllers), ayudan a equilibrar la oferta y la demanda de energía. Estos sistemas pueden predecir la producción de energía a partir de fuentes renovables y ajustar el flujo de energía en consecuencia. (Guevara, 2013)

Es crucial seguir las normativas y estándares locales para la interconexión a la red. Estas regulaciones aseguran que el sistema híbrido opere de manera segura y eficiente, minimizando el riesgo de sobrecarga y fallos en la red. La colaboración con las compañías eléctricas locales también es esencial para asegurar una integración sin problemas. (Guevara, 2013)

## **K. El sector inmobiliario en Guatemala**

En términos generales, en Guatemala, el sector de bienes raíces ha experimentado un significativo crecimiento durante la última década. A pesar de los desafíos que la pandemia de COVID-19 ha planteado para diversas industrias y la economía nacional, los proyectos de desarrollo inmobiliario han demostrado ser resilientes y han logrado adaptarse a la situación, registrando resultados sólidos y avances significativos. La inversión en bienes raíces goza de una favorable percepción en Guatemala, como se destaca en un informe del Gremio de Profesionales Inmobiliarios. Colocar dinero en propiedades inmuebles se considera una inversión concreta y segura para los guatemaltecos, dada la ausencia de una cultura activa de mercado de capitales o bolsa de valores en el país (IMPULSA, 2023).

Según el Informe Nacional de Monitoreo de la Eficiencia Energética en Guatemala 2022, publicado por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) En 2021, el sector industrial lideró el consumo de energía eléctrica, representando el 32.3% del total. Le siguieron el sector residencial con un 29.5%, el sector de comercio y servicios con un 20%. De esta manera, se puede observar cómo es que el sector inmobiliario representa un porcentaje importante en el consumo energético en el país. Del mismo modo, al haber determinado que las viviendas formales representan una alta tasa en el país, se puede afirmar la importancia de la vivienda horizontal en el consumo energético (CNEE, 2022).

La recesión económica mundial tuvo un impacto en diversas industrias del país, lo que se reflejó en la disminución del Producto Interno Bruto (PIB) en 2020. Sin embargo, se observó una recuperación significativa, con el sector de la construcción ocupando la quinta posición en importancia, contribuyendo aproximadamente con un 5% al PIB y espera aumento aún mayor en los próximos años (CNEE, 2022).

## **1. Déficit y demanda de vivienda.**

Según información proporcionada por la Asociación Centroamericana para la Vivienda (ACENVI) con el respaldo de ProDatos en agosto de 2020, Guatemala destaca como el país con la población más grande en la región y al mismo tiempo el que enfrenta el déficit habitacional más significativo. Este déficit se traduce en aproximadamente 1.2 millones de viviendas (equivalente a 1,267,574 unidades según el CENSO de 2018) y se caracteriza por ser una combinación de necesidades tanto cuantitativas como cualitativas. La raíz de este problema se encuentra en el hecho de que, aunque la población y el número de hogares continúan creciendo, la construcción de nuevas viviendas no supera las 18 mil unidades al año, lo que provoca que el déficit aumente a una tasa del 5% anual y se acumule progresivamente (INE, 2019).

A lo largo del tiempo, se han mantenido diversas barreras sociales, económicas y políticas que dificultan el respaldo eficiente a la capacidad y la iniciativa de ciertos promotores inmobiliarios para ofrecer viviendas seguras y asequibles. No obstante, en naciones en vías de desarrollo como Guatemala, donde el 59.3% de la población vive en condiciones de pobreza, se vuelve imperativo buscar soluciones que permitan proporcionar viviendas dignas, según los datos más recientes de la Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI) del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2023).

## **2. Proyectos residenciales con tendencia renovable**

- Ferré: El proyecto de vivienda Ferré, de Grupo Onyx, ubicado en la zona 10 de la ciudad de Guatemala, cuenta con un sistema de paneles solares que genera electricidad para las áreas comunes del edificio. Este sistema está compuesto por 100 paneles solares de 330 vatios cada uno, lo que representa una capacidad total de generación de 33.000 vatios. Los paneles conectados a un sistema de almacenamiento de energía que permite que la electricidad generada se utilice incluso en ausencia de luz solar (ONYX, 2023).
- Condado Naranjo: El uso de paneles solares en Condado Naranjo es una iniciativa que se ha venido implementando desde hace más de diez años. En la actualidad, el complejo cuenta con más de 1.700 paneles solares y 750 calentadores solares, lo que ha permitido reducir significativamente su huella de carbono. El complejo ha recibido varios reconocimientos por sus esfuerzos en materia de sostenibilidad, entre ellos la certificación LEED Platinum (Naranjo, 2023).
- Ciudad Cayalá: Este es otro complejo residencial de la ciudad de Guatemala que ha implementado el uso de paneles solares. En la actualidad, el complejo cuenta con más de 1.000 paneles solares que generan electricidad. El uso de paneles solares en Ciudad Cayalá

es una iniciativa que se ha venido implementando desde hace unos años. El complejo ha recibido varios reconocimientos por sus esfuerzos en materia de sostenibilidad, entre ellos la certificación LEED Gold (GGBC, 2023).

## **L. Evaluación de costos**

La evaluación de costos hace referencia al proceso de estimar el costo que tiene un proyecto, programa o una actividad. El objetivo principal es identificar los costos y los beneficios que tiene la inversión en el proyecto. Con la información de los costos de un proyecto se pueden llegar a tomar decisiones sobre diferentes alternativas. Según Fastercapital (2024), existen diferentes tipos de evaluación de costos, dependiendo del contexto que se tenga del proyecto. Entre los tipos de evaluación de costos se pueden mencionar los siguientes:

- Análisis costo-beneficio (BCA). Este tipo de análisis es un método sistemático utilizado para estimar, comparar y evaluar los beneficios y los costos asociados a un curso de acción propuesto, a menudo denominado análisis costo-beneficio (ACB). El objetivo principal de este análisis es proporcionar una base objetiva para la toma de decisiones, ya que permite visualizar de manera cuantitativa si las ventajas económicas o sociales de una determinada acción, proyecto o política superan los costos que implica su implementación.
- El análisis costo-beneficio (ACB) es un método utilizado para estimar y comparar de manera cuantitativa los costos y beneficios asociados a una acción o propuesta. Este análisis se basa en modelos económicos que permiten evaluar si una determinada decisión o proyecto es viable o rentable, considerando tanto los recursos que se deben invertir como los beneficios esperados a lo largo del tiempo. El proceso implica identificar todos los costos relacionados con la implementación de una propuesta, tales como inversión inicial, gastos operativos, mantenimiento y posibles externalidades negativas. Al mismo tiempo, se deben calcular los beneficios, que pueden incluir ingresos, ahorros, mejoras en la eficiencia o cualquier otro impacto positivo que genere el proyecto.
- Las evaluaciones de un programa se realizan también como un proceso de verificación de eficiencia de un proyecto. La evaluación se puede realizar a nivel de programa (como el impacto que genera cierta fase del proyecto), así como de manera individual (la participación de un nuevo agente al proyecto). El proceso implica identificar todos los costos relacionados con la implementación de una propuesta, tales como inversión inicial, gastos operativos, mantenimiento y posibles externalidades negativas. Al mismo tiempo, se deben calcular los beneficios, que pueden incluir ingresos, ahorros, mejoras en la eficiencia o cualquier otro impacto positivo que genere el proyecto.

## **1. Periodo de retorno**

El período de retorno de la inversión (PRI) se refiere al tiempo necesario para recuperar el capital invertido en un proyecto o activo. En otras palabras, es el lapso que tarda una inversión en generar suficientes ingresos o ahorros para cubrir los costos iniciales asociados a su ejecución. Este indicador es fundamental para los inversionistas y tomadores de decisiones, ya que ofrece una visión clara de cuán rápidamente una inversión comenzará a generar beneficios netos (SensoFact, 2024).

Durante el período de retorno, la inversión inicialmente representa una salida de capital, pero si el proyecto es exitoso, eventualmente empezará a generar ingresos o ahorros. El punto en el que estos ingresos acumulados igualan el total de los costos invertidos marca el momento en que la inversión se ha amortizado, lo que significa que cualquier ingreso adicional a partir de ese punto representará una ganancia neta. El PRI es especialmente útil para comparar la viabilidad de diferentes proyectos, ya que permite identificar cuáles ofrecen una recuperación más rápida del capital. Sin embargo, este indicador no toma en cuenta los beneficios o costos después del período de retorno, por lo que debe complementarse con otras métricas financieras como el valor presente neto (VPN) (SensoFact, 2024).

## **2. Valor presente neto (VPN)**

El valor presente neto (VPN) es una herramienta financiera que permite determinar el valor actual de una serie de flujos de efectivo proyectados, ajustados al presente mediante una tasa de descuento. Este método es crucial para evaluar la viabilidad y rentabilidad de inversiones y proyectos a lo largo del tiempo, ya que considera tanto los ingresos futuros como los costos, llevándolos a un valor equivalente en el momento actual. La tasa de descuento utilizada refleja el costo del capital o el rendimiento esperado por el inversionista, lo que ajusta el análisis para tener en cuenta el valor del dinero en el tiempo, es decir, el hecho de que un dólar hoy vale más que un dólar en el futuro debido a su potencial de generar rendimiento (Gasbarrino, 2023).

El VPN es utilizado en el presupuesto de capital por contadores, analistas financieros e inversionistas para tomar decisiones informadas sobre la asignación de recursos en proyectos potenciales. Si el VPN es positivo, significa que el proyecto generará más valor del que cuesta, lo que indica que es rentable y que debe ser considerado. Por el contrario, un VPN negativo señala que los costos superarán los ingresos, haciendo el proyecto inviable desde una perspectiva financiera. Además de ser una métrica clave para comparar varias inversiones o alternativas, el VPN tiene la ventaja de considerar tanto la magnitud como el momento de los flujos de efectivo, proporcionando un enfoque más completo que otras métricas

simples como el período de retorno. Este método también es útil para incorporar riesgos y fluctuaciones en los ingresos futuros, lo que lo convierte en una herramienta poderosa para la toma de decisiones estratégicas en la planificación financiera. Para calcular el valor presente neto de una inversión se utiliza la ecuación de la Figura 32.

**Figura 32.**

*Cálculo del valor presente neto (VPN)*

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{Ft}{(1+i)^t}$$

Donde:

Ft: Flujo de caja neto en un período «t»

i: Tasa de retorno del proyecto estudiado

t: Cantidad de periodos

## V. METODOLOGÍA

### A. Recopilación de datos

Para llevar a cabo la investigación se recopiló información de distintas entidades para poder profundizar en el diseño. Primero se obtuvo información del residencial, la cual va encaminada a la disponibilidad de recursos en el sector e información que es útil para hacer el diseño energético. Específicamente la información obtenida del residencial es la siguiente:

#### 1. Consumos energéticos

Se recopiló información sobre los consumos energéticos mensuales que se tienen en el residencial. El residencial Vistas del Naranjo 2 utiliza 5 contadores para poder medir los consumos energéticos que se tienen en las áreas comunes o equipos como la planta de tratamiento. A continuación, se detalla el consumo energético que mide cada uno de los contadores:

- Contador A: Energía consumida en casa club, administración y vestidores.
- Contador B: Energía consumida en la garita del residencial.
- Contador C: Energía consumida por la bomba de agua de la cisterna.
- Contador D: Energía consumida por el equipo de la planta de tratamiento.
- Contador E: Energía consumida en el alumbrado público de todo el residencial.

Accediendo a las facturas emitidas por la empresa eléctrica, se obtuvo un histórico de consumos energéticos de un año, empezando desde agosto del 2023 hasta julio del 2024. En el Cuadro 2 se presentan los consumos mensuales por contador y el consumo total que tiene el residencial por la alimentación energética de lo anteriormente descrito.

#### Cuadro 2.

*Consumos energéticos mensuales del residencial por contador (en kWh)*

Consumo energético por contador (kWh)							
Año	Mes	Contador A	Contador B	Contador C	Contador D	Contador E	TOTAL (kWh)
2023	Agosto	682	786	1394	3785	220	6867
2023	Septiembre	693	787	1393	3986	219	7078
2023	Octubre	725	774	1355	4054	225	7133
2023	Noviembre	797	847	1301	4105	230	7280
2023	Diciembre	822	984	1348	4165	241	7560
2024	Enero	745	861	1351	4209	225	7391
2024	Febrero	826	1022	1348	4288	210	7694
2024	Marzo	798	1003	1393	4103	225	7522
2024	Abril	745	844	1347	4127	218	7281
2024	Mayo	749	765	1394	3725	225	6858
2024	Junio	677	766	1338	3695	221	6697
2024	Julio	679	801	957	4138	223	6798

*Nota. Obtenido del registro de facturas de Vistas del Naranjo 2*

## 2. Disponibilidad de área

El residencial Vistas del Naranja 2 cuenta con un área elevada, desde los 1,630 metros sobre el nivel del mar, en la cual se encuentran todas las amenidades para los residentes. En esta zona se encuentran elementos importantes como el cuarto de tableros de servicios generales, así como conexión a diferentes sistemas. En las Figura 33 y Figura 34 se presentan imágenes tomadas con dron sobre el área social.

**Figura 33.**

*Vista del área social del residencial*



*Nota. Fotografías tomadas en sitio*

**Figura 34.**

*Visualización del salón social del residencial con vista lateral*



*Nota. Fotografías tomadas en sitio*

Se eligió la zona del área social para realizar la investigación por la cercanía a las conexiones eléctricas necesarias y por las condiciones del sitio, donde no hay obstáculos que impidan el paso de la irradiación solar o de los vientos de la zona. Se realizó un estudio en campo de los lugares más factibles para la instalación de paneles solares y aerogeneradores. Los factores que se analizaron para la selección del lugar fueron las siguientes:

- Disponibilidad de espacio adecuado: Se verificó que el espacio considerado fuera suficiente para realizar la instalación, y que los equipos no quedaran limitados corriendo riesgo de un mal funcionamiento.
- Exposición directa al sol: Se consideraron áreas con exposición directa al sol para el aprovechamiento de los paneles solares. Dichos lugares no deben tener presencia de obstáculos que generen sombra a lo largo del día.
- Vientos locales: En el caso de los aerogeneradores se debe considerar las ubicaciones dentro del residencial donde los vientos sean más rápidos y con mayor frecuencia.
- Orientación y ángulo de instalación: Para la instalación de equipos se consideraron los espacios con superficie plana, con el objetivo de facilitar su instalación y que estos puedan funcionar de la manera óptima.
- Ubicación de los tableros de servicios generales: Como se explicó anteriormente, un sistema interconectado a la red mantiene los equipos conectados a los tableros de servicios generales (TSG), por lo que la instalación de los paneles solares y aerogeneradores deben ser lo más cercano posible para facilitar su conexión.

Al no tener planos de la infraestructura del sitio, se realizó el estudio con las fotografías aéreas con dron y mediciones hechas en campo. Los lugares óptimos para la instalación fotovoltaica son los siguientes, considerando una limitación de espacios óptimos con lo anteriormente evaluado:

- Techo del salón social: Se consideró el techo del salón social como una opción para instalación de paneles solares, esto debido a las medidas de la losa, donde puede abarcar una serie de modelos fotovoltaicos. En la Figura 35 se puede observar la losa con las mediciones tomadas en campo.

**Figura 35.**

*Vista aérea con medidas del salón social*



*Nota. Fotografías tomadas en sitio*

- Área de vestidores: A pesar de no ser un espacio amplio, es lo suficientemente grande para instalar una serie de paneles solares. En la Figura 36 se puede observar la losa de dicha área con las mediciones tomadas en campo.

**Figura 36.**

*Vista aérea del área de vestidores con medidas*



*Nota. Fotografías tomadas en sitio*

- Terreno natural cercano a muro con verja: Debido a la escasez de área para instalar paneles solares, se considera el terreno natural aledaño al muro con verja en el salón social. La única diferencia en la instalación de los equipos es que en esta zona se deben considerar bases de concreto para poder fijar la estructura y que esta tenga estabilidad todo el tiempo. En la Figura 37 se presenta la zona de interés con las medidas hechas en campo.

**Figura 37.**

*Vista aérea del terreno natural para instalación fotovoltaica*

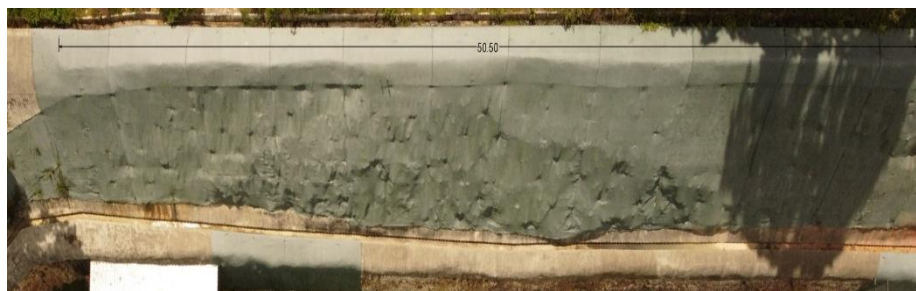


*Nota. Fotografías tomadas en sitio*

Para la instalación de aerogeneradores se consideró la importancia que tiene la velocidad del viento, por lo que se eligió la parte alta del muro de contención (cercana a la corona del muro) para la instalación eólica. La ventaja de realizar la instalación en esta zona es que la altura sobre el nivel del mar es de 1690m, por lo que se tiene una altura aprovechable para la captación de vientos, donde el flujo no se ve interrumpido por edificaciones u objetos cercanos. En la Figura 38 se muestra el área para instalación de aerogeneradores, con las medidas disponibles que se utilizarán para el cálculo.

**Figura 38.**

*Vista aérea de la corona del muro de contención para instalaciones eólicas*



*Nota. Fotografías tomadas en sitio*

### 3. Opciones de financiamiento

Para poder realizar un análisis del periodo de retorno que va a tener la inversión del proyecto, se debe conocer el método de pago que utilizarán. Según los requerimientos del residencial, los métodos de pago que desean evaluar son los siguientes:

- Pago al contado, con ingreso mensual de cuota de mantenimiento de residentes: Contempla el hecho que el residencial va a realizar el pago en su totalidad de los equipos, considerando tener el capital necesario para realizar la inversión. Para la recuperación de la inversión, el residencial considera destinar el 20% de los ingresos de la cuota de mantenimiento de cada vivienda para obtener la recuperación del capital invertido.
- Pago al contado, con recuperación de la inversión en base a los ahorros mensuales generados con el equipo renovable: Al igual que la solución pasada, esta alternativa considera el pago al contado del equipo con la diferencia que la recuperación de la inversión se realizará con los ahorros generados en la factura de energía eléctrica gracias a la implementación de los equipos renovables. Para esto se debe hacer un estudio de la capacidad de generación energética con las condiciones renovables del sitio mes a mes.

### 4. Global Solar Atlas

Por medio del software de Global Solar Atlas se recopiló información sobre el potencial solar que se tiene en el sector de Mixco. En este caso se selecciona el área del municipio para el estudio y se corre un análisis anual del comportamiento solar. En la Figura 39 se realizó una selección del área de Mixco para el análisis solar.

#### Figura 39.

*Selección del área de Mixco a través de Global Solar Atlas*



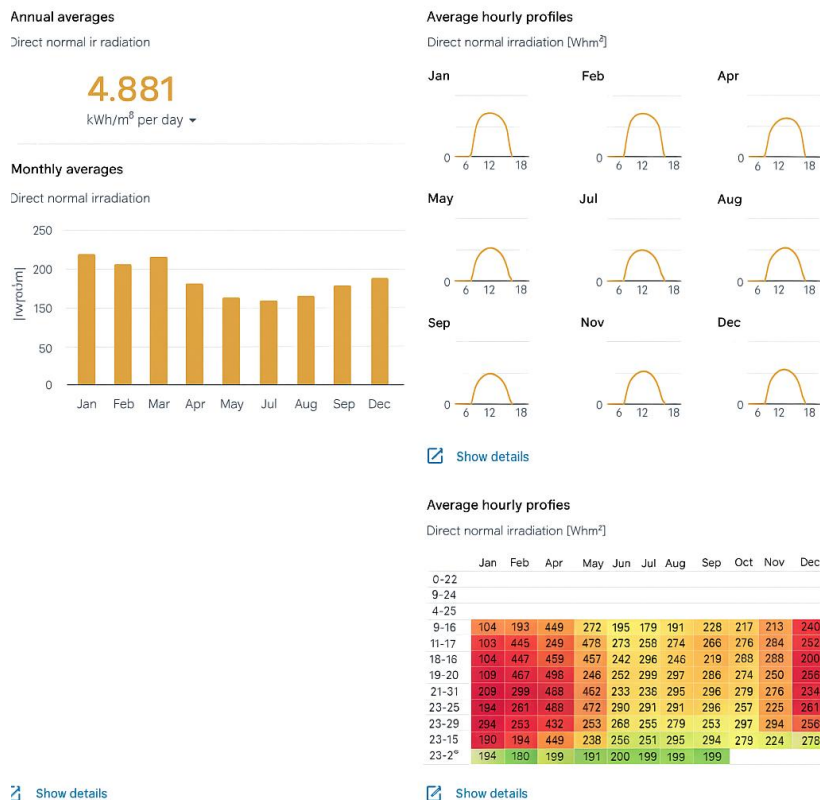
*Nota. Obtenido de Global Solar Atlas, (2024).*

El software brinda toda la información necesaria para comprender el comportamiento solar del sector y los niveles de irradiancia necesarios para un estudio fotovoltaico. En este caso los datos más relevantes para el estudio fueron los siguientes (estos se encuentran dentro de la Figura 40):

- Rangos fotovoltaicos del área de Mixco
- Irradiancia Normal Directa (DNI)
- Irradiancia Global Horizontal (GHI)
- Irradiancia Global Inclinada (GTI)
- Promedios mensuales de la producción total de energía fotovoltaica
- Diagrama de trayectoria solar
- Horarios promedio de la producción fotovoltaica mensual
- Producción horaria promedio

**Figura 40.**

*Visualización de datos arrojados en estudio solar realizado*



*Nota. Obtenido de Global Solar Atlas, (2024).*

Estos valores obtenidos en el estudio del potencial solar serán estudiados detenidamente en el apartado de análisis y discusión de resultados, con el objetivo de comprender el potencial solar que se puede aprovechar en el proyecto y cómo será el comportamiento de la energía solar a través de los meses.

Para llevar a cabo el diseño solar del proyecto se utilizarán los datos obtenidos de la Irradiancia promedio por día. Al conocer la irradiancia promedio diaria, es posible dimensionar correctamente el sistema solar, es decir, determinar cuántos paneles solares serán necesarios y qué capacidad deberán tener para satisfacer la demanda energética del proyecto. Otro aspecto importante para el diseño es la temperatura que se genera en el ambiente, detalle que afecta el rendimiento de los paneles solares. Para esto, se considera la temperatura promedio diario que arroja el software, el cual analiza la temperatura diaria que se tiene a lo largo del año. En la Figura 41 se pueden observar el rendimiento solar diario promedio para el sector de Mixco.

**Figura 41.**

*Información de rangos promedios al día en el sector de Mixco*

AREA INFO				
Map data (min-max range)				Per day
Specific photovoltaic power output	PVOUT	4.48	– 4.75	kWh/kWp
Direct normal irradiation	DNI	4.67	– 5.36	kWh/m <sup>2</sup> ▾
Global horizontal irradiation	GHI	5.38	– 5.75	kWh/m <sup>2</sup> ▾
Diffuse horizontal irradiation	DIF	2.05	– 2.18	kWh/m <sup>2</sup> ▾
Global tilted irradiation	GTI	5.54	– 5.98	kWh/m <sup>2</sup> ▾
Optimum tilt of PV modules	OPTA	17	– 18	°
Air temperature	TEMP	15.8	– 19.8	°C ▾
Terrain elevation	ELE	1341	– 2247	m ▾

*Nota. Obtenido de Global Solar Atlas, (2024).*

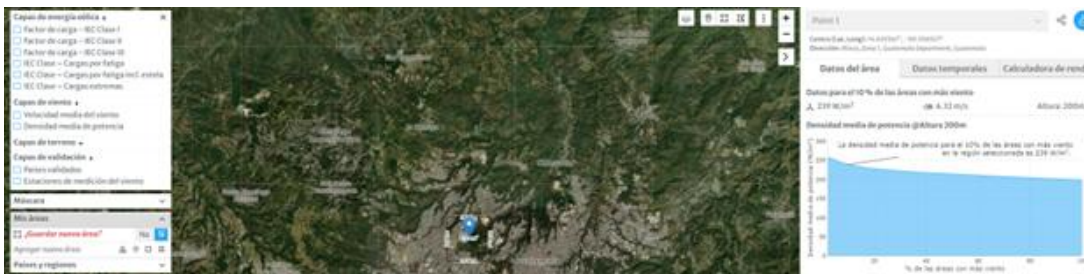
## 5. Global Wind Atlas

Con relación al programa Global Wind Atlas, se recopiló información sobre el potencial eólico promedio en Mixco, donde se investigó el comportamiento del viento tanto en la velocidad como en la frecuencia en esta zona. Como bien se mencionó con anterioridad se manejan diferentes alturas en el residencial. El área social tiene una altura aproximada de 1,630m, mientras que la corona del muro de contención tiene una altura de 1,690m (que es la zona donde se planea instalar los aerogeneradores). Esto quiere decir que se tienen aproximadamente 200 metros de altura por encima de la altura general de Guatemala. Sabiendo esta información, el estudio realizado a través de Global Wind Atlas se realizó a una altura de 200 metros.

En el software se tomó el área de los alrededores del proyecto, y se consideró el estudio como se puede observar en la Figura 42.

**Figura 42.**

*Análisis del comportamiento eólico a través de Global Wind Atlas*



*Nota. Obtenido de Global Wind Atlas, (2024).*

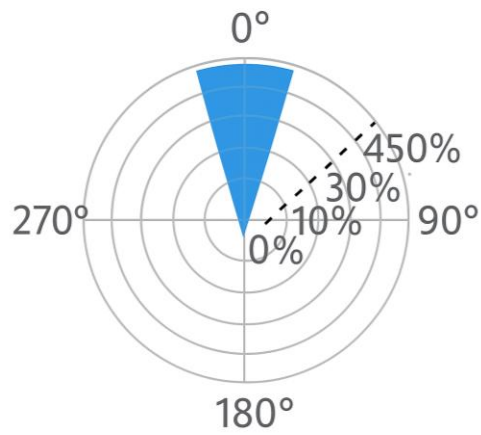
Se hizo un análisis anual del comportamiento del viento en el sector de Mixco, de esta manera se puede obtener información de datos promedio para el diseño de la capacidad energética que pueden tener las turbinas eólicas. Como se puede observar en la Figura 43, Figura 44 y Figura 45; la información que se obtuvo de Global Wind Atlas para el diseño energético fue la siguiente:

- Rosa de frecuencia de viento
- Rosa de velocidad del viento
- Rosa de potencia del viento
- Comportamiento del viento

- Longitud de rugosidad

**Figura 43.**

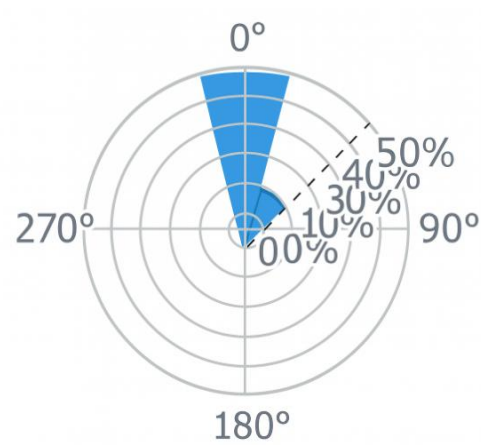
*Rosa de frecuencia y velocidad del viento*



*Nota. Obtenido de Global Wind Atlas, (2024).*

**Figura 44.**

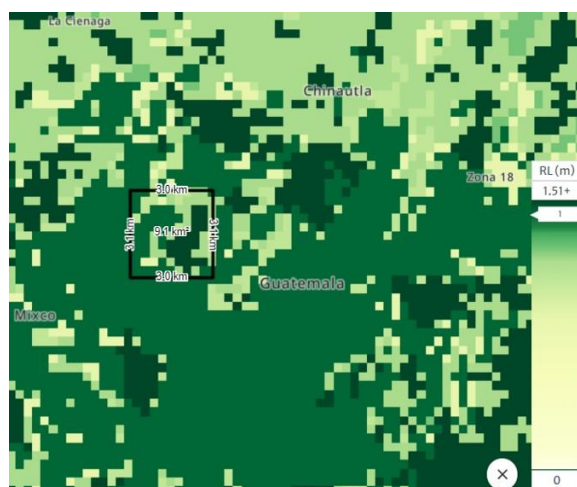
*Rosa de potencia del viento*



*Nota. Obtenido de Global Wind Atlas, (2024).*

**Figura 45.**

*Longitud de rugosidad para Mixco*



*Nota. Obtenido de Global Wind Atlas, (2024).*

Al igual que la información solar, el potencial eólico es analizado en el apartado de análisis y discusión de resultados para comprender de mejor manera los recursos obtenidos.

## **6. EEGSA**

El diseño energético que se plantea hacer incluye una interconexión a la red de la empresa eléctrica EEGSA. De esto modo, se investigó los requerimientos y procesos necesarios para poder desarrollar este proyecto. Con la investigación realizada en la empresa eléctrica se determinó que existe un proceso para integrar el sistema renovable a la red pública. La solicitud se hace por medio de un formulario, adjuntando información acerca del cliente y del sistema a conectar a la red de la empresa eléctrica. Una vez se tenga el diseño con los paneles solares y aerogeneradores se puede proceder a hacer la solicitud con EEGSA.

Es importante mencionar que el alcance de la empresa eléctrica es desde el contador hacia su red de suministro. Esto quiere decir que la empresa eléctrica solo cambiará el contador a un contador bidireccional. De esta manera la empresa eléctrica podrá medir la cantidad de energía que se inyectó a la red (en caso de que el residencial haya tenido un excedente de producción), o determinar cuánto es que se consumió en el residencial del suministro de la red eléctrica. Los requerimientos para poder llevar a cabo la interconexión a la red de los equipos son los siguientes:

- Fotocopia de DPI y el nombramiento del representante legal del residencial.
- Constancia de propiedad.
- Escritura con dirección catastral, si dicha escritura no tiene la dirección, se deberá agregar la carta del Departamento de Catastro de la Municipalidad correspondiente relacionando los datos de la escritura con la dirección catastral.
- Fotocopia de DPI de la persona que se constituirá como Cliente de EEGSA.
- Pagar el valor del depósito correspondiente.

El proceso de conectar los paneles solares y aerogeneradores al circuito eléctrico del residencial queda fuera del alcance de la empresa eléctrica. Por lo que en este estudio se contemplan inversores y obra civil para conectar los equipos a la red del residencial.

Una vez se tengan los documentos requeridos por la empresa eléctrica se debe llenar el formulario que se encuentra en Anexos, la solicitud se lleva a la empresa eléctrica y procede el trámite para poder llevar a cambio la interconexión a la red eléctrica. La determinación de pagos en los trámites con la empresa eléctrica queda fuera del alcance de esta investigación.

## **B. Selección de modelos de paneles solares y aerogeneradores**

Se debe realizar un estudio para la selección del modelo de panel solar y aerogenerador que se utilizará. Para esto se utilizará la información de los modelos de interés, investigados en el marco teórico de esta investigación. Para poder llevar a cabo este proceso de selección se realizarán los siguientes puntos para poder determinar los mejores equipos, comparando ciertos factores de interés:

- Se debe realizar un análisis de la capacidad de generación energética que tienen los diferentes modelos con las condiciones climáticas del sector (investigadas en el apartado anterior). Con esta información se puede determinar la cantidad de energía que son capaces de generar en un día y se seleccionan los modelos con mayor capacidad energética.
- Se debe realizar un gráfico donde se la capacidad energética capaz de generar en un día con el precio que tienen los equipos. De esta manera se puede determinar que equipos tienen la mayor capacidad energética con el precio óptimo.
- Existen factores cualitativos que se deben analizar como la garantía del equipo, certificados internacionales y la disponibilidad del modelo. Para esto se debe realizar una tabla de ponderación de factores para determinar cual tiene mejores especificaciones. Esta tabla

consiste en darle un porcentaje a cada factor (según la importancia que tenga para uno), el total debe dar un 100%. Posteriormente se evalúa cada uno de estos factores por cada modelo. Para esto se les da una calificación del 1 al 10, donde 1 es que no cumple con el factor y 10 es que cumple a la perfección. Por último, se multiplican las calificaciones por el porcentaje que se le dio a cada factor y se suman los factores de cada modelo. El modelo que tenga la calificación más alta es la que más cumple con los factores a estudiar.

En el Cuadro 3 se analizan los factores que se analizarán para la selección de paneles solares y aerogeneradores y el grado de importancia que se les asignó:

### Cuadro 3.

*Factores de importancia para selección de modelo de panel solar*

	Garantía	Certificados internacionales	Dimensiones	Disponibilidad del modelo
Importancia del factor	50%	10%	10%	30%

## 1. Selección del modelo de panel solar

Se procedió a comparar cada uno de los modelos investigados en cuanto a la capacidad energética que pueden generar en las condiciones estudiadas con Global Solar Atlas. En este caso se hizo un estudio sobre la potencia real que generan los modelos fotovoltaicos con los efectos de la temperatura del clima. Se utilizaron las mismas condiciones climáticas y la misma irradiancia solar para comparar los paneles solares. En el Cuadro 4 se pueden observar los resultados de esta comparación.

### Cuadro 4.

*Comparación en la generación energética diaria de los modelos de panel*

	Maxeon 3	Maxeon 6	Half cell 550W	SP 360M-60	SP 450M-60	ZXM8-TPLDD132
Irradiación global promedio (kwh/m2)	5.565	5.565	5.565	5.565	5.565	5.565
Temperatura del aire (°C)	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8	17.8
Temperatura nominal de operación (°C)	40	50	52	55	52	43
Irradiancia solar del sitio (Wh/m2)	5565	5565	5565	5565	5565	5565
Hora solar pico (hr)	5.565	5.565	5.565	5.565	5.565	5.565
Temperatura de rendimiento (°C)	42.8	55.3	57.8	61.55	57.8	46.55
Potencia nominal (W)	430	425	550	360	360	670
Temperatura Pmax (%/°C)	-0.27	-0.29	-0.31	-0.3	-0.28	-0.37
Potencia real por célula (W)	452.564035	448.9536375	583.136675	380.9898	450	718.179365
<b>Energía generada al día por panel (Wh)</b>	<b>2518.52</b>	<b>2498.43</b>	<b>3245.16</b>	<b>2120.21</b>	<b>2504.25</b>	<b>3996.67</b>

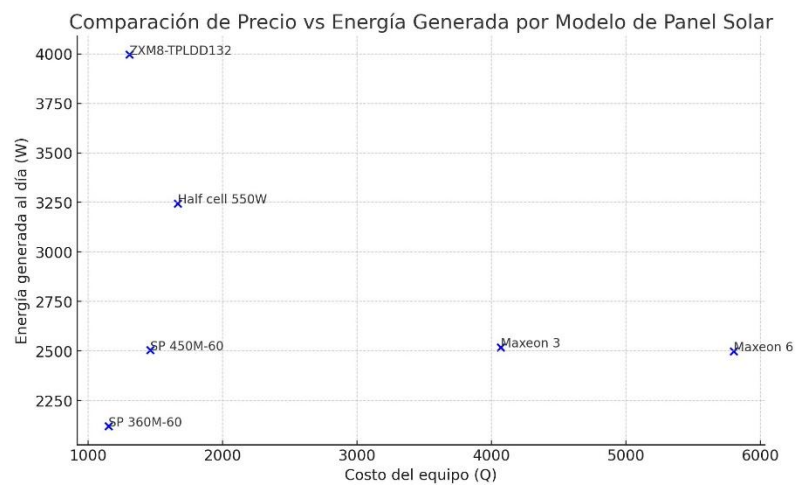
En este caso el panel solar con mayor capacidad de generación energética es el modelo ZXM8TPLDD132, teniendo una generación diaria de 3,996.67 W. Dicho modelo es el que mayor

potencial nominal tiene, y su capacidad energética aventaja al resto de modelos por una diferencia significativa.

Una vez comparada la capacidad energética de los paneles solares, se relaciona con el costo que tienen los equipos. En la Figura 46 se puede observar la comparación de generación energética y el costo que tienen los equipos.

**Figura 46.**

*Comparación de precio y energía generada por los modelos de paneles*



En esta figura se puede observar que nuevamente el modelo ZXM8-TPLDD132 destaca al ser el modelo fotovoltaico que mayor energía puede generar al día, con uno de los costos más bajos, con un valor de Q.1306.50. A pesar de que el modelo SP 360M-60 tiene el costo más bajo de todos los modelos, su capacidad de generación energética es la más baja, por lo que la relación precio y generación energética no estima un valor significativo para ser considerado en el diseño energético de esta investigación.

Por último, como se puede observar en el Cuadro 5, se evaluaron factores cualitativos de los diferentes modelos de paneles solares, considerando los factores mencionados al inicio de esta sección. En el siguiente cuadro se puede observar la puntuación en una escala del 1 al 10 que se le dio a cada modelo de panel solar para cada factor estudiado (la información de estos factores se encuentra en la sección de paneles solares de interés dentro del marco teórico).

### **Cuadro 5.**

*Calificación obtenida para cada modelo de panel solar en cada factor*

Modelos de panel solar de interés	Factores analizados			
	Garantía	Certificados internacionales	Dimensiones	Disponibilidad del modelo
Maxeon 3	6	8	9	6
Maxeon 6	6	8	8	6
Half cell 550W	9	8	8	10
SP 360M-60	9	7	8	6
SP 450M-60	9	7	8	6
ZXM8-TPLDD132	9	8	9	10

Con las calificaciones obtenidas para cada modelo de panel solar, se realizó una multiplicación por el porcentaje dado a cada factor. Posterior a esto se sumaron los resultados de cada modelo. En el Cuadro 6 se puede observar los resultados del análisis realizado.

### **Cuadro 6.**

*Resultados de ponderación de factores para los modelos de paneles*

Modelos de panel solar de interés	Factores analizados				Total
	Garantía	Certificados internacionales	Dimensiones	Disponibilidad del modelo	
Maxeon 3	3	0.8	0.9	1.8	6.5
Maxeon 6	3	0.8	0.8	1.8	6.4
Half cell 550W	4.5	0.8	0.8	3	9.1
SP 360M-60	4.5	0.7	0.8	1.8	7.8
SP 450M-60	4.5	0.7	0.8	1.8	7.8
ZXM8-TPLDD132	4.5	0.8	0.9	3	9.2

Con esta tabla se puede observar que el modelo ZXM8-TPLDD132 fue el que obtuvo la calificación más elevada, con un puntaje de 9.2. Esto se debe a que el producto cuenta con buena cobertura de garantía, así como certificaciones ISO que lo respaldan en la producción de energía. Las dimensiones del modelo fotovoltaico son óptimas y la disponibilidad del modelo es inmediata en Guatemala gracias al proveedor directo que es Enersys Solar.

De esta manera se seleccionó el modelo de panel solar ZXM8-TPLDD132, siendo el que obtuvo mejores resultados tanto en la evaluación de producción energética, evaluación de costos y la evaluación de factores cualitativos.

## 2. Selección del modelo de aerogenerador

Para seleccionar el modelo de aerogenerador que se utilizará en el diseño del proyecto se compararon los mismos factores evaluados para los paneles solares. En este caso, el primer paso fue comparar la capacidad de generación energética que tiene cada modelo de turbina. En base a la información obtenida en el segmento de modelos de mini aerogeneradores de interés, se obtuvieron los datos de rendimiento y dimensiones del aparato. Con la información obtenida en el análisis del potencial eólico a la altura de estudio se obtuvo la información sobre vientos en la zona. Como se puede observar en el Cuadro 7, se muestran los resultados para la generación energética en un día de los tres modelos:

### Cuadro 7.

*Comparación en la generación energética diaria de los aerogeneradores*

	Modelos de turbinas eólicas		
	OLONETO	HENGJINGTR	ATLAS 7
Horas de viento	13.2	13.2	13.2
Temperatura (°C)	20	20	20
Densidad del aire (kg/m3)	1.2041	1.2041	1.2041
Área de choque del viento (m2)	0.405	0.5	1
Longitud de rugosidad (m)	1	1	1
Velocidad conocida del viento (m/s)	3.4815	3.4815	3.4815
Altura del aerogenerador (m)	200.35	200.126	200.126
Velocidad del aire a la altura del aerogenerador (m/s)	3.4826	3.4819	3.4819
Potencia generada kW	7.622	9.403	18.807
<b>Energía generada kWh al día</b>	<b>100.61</b>	<b>124.13</b>	<b>248.25</b>

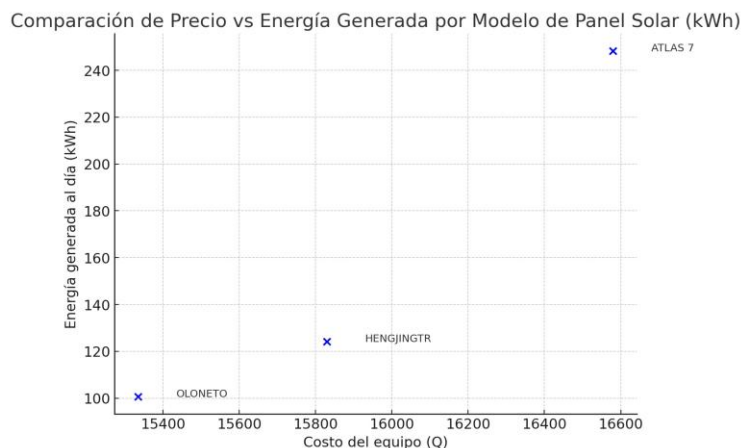
De esta manera, se determina que el modelo con mayor capacidad de generación energética es la turbina eólica ATLAS 7, debido a que es la que cuenta con mayor área de barrida del viento. Esto permite mayor captación del viento y se genera mucha mayor potencia.

Comparando la potencia nominal que tiene cada generador, la turbina eólica ATLAS 7 tiene una potencia de 7kW, mientras que la turbina HENGJINGTR llega a una potencia nominal de 10 kW. Sin embargo, la generación energética que tienen las turbinas eólicas depende de la captación de viento que tengan y el área de barrida con la que cuentan. Es por esto que el estudio en base al área de la turbina resulta un valor más preciso.

Posteriormente se analizó la capacidad de generación energética que tienen los modelos respecto al precio que tienen en el mercado. En la Figura 47 se muestra esta relación para cada uno de los modelos.

**Figura 47.**

*Comparación de precio y energía generada por los modelos de turbinas*



Se puede observar de manera gráfica que el modelo Atlas 7 es el que mayor capacidad de generación energética tiene, teniendo un gran margen de diferencia con los otros modelos. A pesar que el modelo Atlas 7 cuenta con el precio más alto, la capacidad energética con la que posee lo hace destacar de los demás modelos. Además, es importante recordar que el precio del aerogenerador ya incluye inversor, mientras que el modelo de Hengjingtr no lo incluye.

Por último, se evaluaron los factores cualitativos que se presentaron al inicio de esta sección. En este caso, los modelos de aerogeneradores no se encuentran disponibles en Guatemala, por lo que los productos deben ser importados. Por lo tanto, la garantía y la disponibilidad del modelo obtienen calificaciones bajas en la mayoría de los modelos. En cuanto a certificados internacionales como las dimensiones de los equipos depende únicamente de las características de cada modelo. Las calificaciones que obtuvieron los tres modelos de aerogeneradores se presentan en el Cuadro 8.

**Cuadro 8.**

*Calificación obtenida para cada modelo de aerogenerador en cada factor*

Modelos de aerogeneradores de interés	Factores analizados			
	Garantía	Certificados internacionales	Dimensiones	Disponibilidad del modelo
OLONETO	6	5	9	4
HENGJINGTR	5	4	9	4
ATLAS 7	9	8	7	4

Con esta información se obtuvieron las calificaciones reales que tuvieron cada uno de los modelos de aerogeneradores. En el Cuadro 9 se presentan los resultados obtenidos para cada modelo estudiado.

### Cuadro 9.

*Resultados de ponderación de factores para los aerogeneradores*

Modelos de aerogeneradores de interés	Factores analizados				Total
	Garantía	Certificados internacionales	Dimensiones	Disponibilidad del modelo	
OLONETO	3	0.5	0.9	1.2	5.6
HENGJINGTR	2.5	0.4	0.9	1.2	5
ATLAS 7	4.5	0.8	0.7	1.2	7.2

Como se puede observar en el Cuadro 9, el modelo de aerogenerador que mejor cumple con las condiciones estudiadas es el modelo Atlas 7, dado al buen manejo que tiene en cuanto a la garantía de sus productos y los certificados internacionales que llega a tener. De esta manera, se selecciona el modelo de aerogenerador Atlas 7 de la marca Tesup para llevar a cabo el diseño energético del residencial, ya que cumple tanto en aspectos como la generación energética, relación energía generada con precio y factores cualitativos evaluados.

### C. Cálculos

Con la información recopilada en la fase anterior, se procede a realizar una serie de cálculos que permiten dimensionar el proyecto.

Con la información recopilada respecto a los consumos energéticos mensuales se debe determinar el consumo energético de diseño que se utilizará en el proyecto. Para esto se seleccionó el consumo más alto y el consumo más bajo obtenidos en el histórico. Con estos datos se realizó un promedio para tener un valor céntrico en el rango de consumos que se tienen al año. Se aplicó un factor de seguridad de 1.2 para garantizar que las condiciones climáticas anuales e imprevistos no afecten la generación energética. En el Cuadro 10 se muestran los resultados para el cálculo del consumo energético de diseño.

### Cuadro 10.

*Determinación del consumo energético de diseño*

Mes con mayor consumo (marzo)	7694 kWh
Mes con menor consumo (julio)	6697 kWh
Promedio de consumos	7195.5 kWh
Consumo energético a satisfacer (con un factor de seguridad de 1.2)	8,634.60 kWh

De esta manera, se determina que el consumo energético que se utilizará para el diseño del proyecto será de 8,634.60 kWh, el cual es una demanda energética mensual.

Se decidió empezar el diseño energético con el cálculo de aerogeneradores dado que la demanda energética es grande, y el potencial que tiene este modelo de turbinas eólicas es significativamente más grande que el de los paneles solares, por lo que se puede cubrir una mayor demanda energética. Para poder realizar el diseño de demanda energética con aerogeneradores se realizó el siguiente procedimiento:

- Cálculo del área de barrida: El área de barrida del aerogenerador es el área donde el viento choca para generar movimiento. Con el diseño de la turbina eólica Atlas 7, el área de impacto del viento es rectangular, por lo que el área de barrida se define como:

$$A = (Largo) * (Ancho)$$

$$A = (1m) * (1m) = 1 m^2$$

- Cálculo de la temperatura del viento promedio: Con los datos obtenidos a través del comportamiento solar, se puede obtener el rango de temperaturas promedio al día en Mixco. De esta manera, la temperatura promedio sería:

$$T = \frac{15.8^{\circ}C + 19.8^{\circ}C}{2} = 17.8^{\circ}C$$

- Cálculo de la densidad del viento: Para calcular la densidad del viento se utilizó la relación de temperatura que hay en el ambiente. Según Shelquist. 2019, la densidad del aire en relación con la temperatura del viento a una altura de 1700 metros sobre el nivel del mar se puede relacionar como se observa en el Cuadro 11.

**Cuadro 11**

*Densidades del viento en relación con la temperatura*

Temperatura (°C)	Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )
35	1.1455
30	1.1644
25	1.1839
20	1.2041
15	1.225
10	1.2466
5	1.269
0	1.2922
-5	1.3163
-10	1.3413
-15	1.3673
-20	1.3943
-25	1.4224

Por lo tanto, al interpolar el dato utilizando la temperatura promedio obtenida de 17.8°C se obtiene el siguiente valor:

$$\rho = 1.225 \frac{kg}{m^3} + \frac{1.2041 \frac{kg}{m^3} - 1.225 \frac{kg}{m^3}}{20^\circ C - 15^\circ C} * (17.8^\circ C - 15^\circ C) = 1.213 \frac{kg}{m^3}$$

- Velocidad conocida del viento: Utilizando la rosa de velocidad del viento, y la velocidad del viento para el 10% de áreas con mayores vientos se puede determinar la velocidad promedio que se tiene en el sector de Mixco. De esta manera la velocidad conocida del viento se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Velocidad del viento} = (\% \text{ velocidad}) * (\text{velocidad áreas con mayor viento})$$

$$\text{Velocidad del viento} = (55\%) * \left(6.33 \frac{m}{s}\right) = 3.48 \frac{m}{s}$$

- Altura del aerogenerador: La altura de referencia que tiene el aerogenerador contempla los 200 metros por encima del nivel del mar que se tienen a la altura de la corona del muro de contención, añadido a esto se le suma la diferencia del tamaño de las palas y su base, que resulta ser de 12.6 centímetros.
- Cálculo de la velocidad del viento a la altura del aerogenerador. Utilizando la ecuación No. 13 presentada en el marco teórico, y con los datos obtenidos recopilados se puede calcular la velocidad del viento a la altura del aerogenerador.
- Potencia generada. Utilizando la ecuación No. 14 del marco teórico se puede conocer la potencia generada por la turbina eólica. Al tener ya calculados el área de barrida, la densidad del aire y la velocidad del viento a la altura del aerogenerador se puede obtener el potencial del equipo.
- Energía generada. Utilizando la rosa de frecuencia se puede conocer la cantidad de horas promedio al día que se tienen vientos significantes para la producción energética. Al multiplicar las horas de viento al día por la potencia generada se obtiene la energía diaria en kWh que puede generar una turbina.

$$\text{Horas de viento al día} = (\% \text{ frecuencia}) * (24 \text{ hrs})$$

$$\text{Horas de viento al día} = (55\%) * (24 \text{ hrs}) = 13.2 \text{ hrs}$$

- Cantidad de aerogeneradores. Utilizando la ecuación no. 15 se determinó la cantidad de aerogeneradores para cumplir toda la demanda energética. Como la instalación también incluye paneles solares se realizó una iteración para saber qué cantidad de turbinas eólicas necesitaría utilizando también la generación de paneles solares.

Una vez definido la cantidad de turbinas eólicas que se utilizarán y la demanda energética que pueden satisfacer se procede al diseño de paneles solares. Para esto se debe tomar la demanda energética mensual que no se cubrió con los equipos eólicos. Con esta demanda energética se realizaron los siguientes pasos:

- Irradiancia solar: Con los valores obtenidos en la figura 32, se calcularon los valores promedios para la Irradiancia Global Horizontal y la temperatura del aire, de tal manera que se obtienen valores de diseño fotovoltaico aceptables.
- Horas Solares Pico. Utilizando la ecuación No. 1 se calcularon las horas solares pico para la región de Mixco.
- Temperatura real sobre la célula fotovoltaica. Utilizando la ecuación No. 2 del marco teórico se calculó la temperatura real que maneja la célula fotovoltaica. La temperatura nominal de operación de la célula se obtiene de la ficha técnica del modelo fotovoltaico (adjunto en los anexos de este trabajo).
- Potencia real generada por la célula fotovoltaica. Con los datos anteriormente calculados se procede a calcular la potencia real, la cual se calcula utilizando la ecuación No. 3 del marco teórico.
- Diseño fotovoltaico. Utilizando la Ecuación No. 4 se determinó la cantidad de módulos fotovoltaicos necesarios para cubrir la demanda energética de diseño.
- Ocupación del equipo. Utilizando las ecuaciones No. 6 y 7 del marco teórico se definió el área que cada módulo fotovoltaico ocuparía en una losa o cubierta plana. Con esta información se procedió a armar los circuitos considerando cierta cantidad de paneles por circuito.
- Cálculo de inversores. Utilizando las ecuaciones No. 8 y 9 del marco teórico se determinó el voltaje y potencia máxima que pueden aguantar los circuitos para un inversor. En este caso se utilizó el modelo de inversor solar Inversor PV3000 LVHM Series Marca MUST ENERGY,
- Ángulos de inclinación. Se calculó los ángulos de inclinación recomendados para los módulos fotovoltaicos con el objetivo de darle una recomendación al cliente del ángulo a instalar para una mejor captación solar. Para esto se utilizaron las ecuaciones 10, 11 y 12 del marco teórico.

Al tener la información de la cantidad de paneles solares y turbinas eólicas que serán instaladas, se debe realizar un estudio sobre la capacidad energética que tendrán los equipos mensualmente, considerando las variaciones climáticas que se presentan. Con el estudio del potencial eólico y solar en la zona, se pueden evaluar las fluctuaciones en la velocidad del viento (así como la frecuencia) y la

irradiancia solar mensual. Al obtener la capacidad energética a generar por cada mes, se puede evaluar si se presenta una aportación a la red eléctrica (se produjo más energía de la consumida), o si quedó una holgura en la producción energética mensual (la producción fue menor a lo realmente consumido). De esta manera podemos determinar una tasa promedio de ahorro por mes en cuanto al pago de energía eléctrica.

En el caso de las turbinas eólicas, se utiliza un diagrama proporcionado por Global Wind Atlas que brinda índices de variación de velocidad del viento respecto a los meses del año. De esta manera, se calculó la potencia capaz de generar respecto al índice de la velocidad del viento que se le aplica a cada mes. Se relacionó los efectos de la temperatura en la densidad del aire. Para la temperatura se obtuvieron los rangos de temperatura por mes y se calculó un promedio.

Para los paneles solares se utilizó la gráfica de producción horaria promedio, obtenida con Global Solar Atlas. De esta manera, se sumó la irradiancia total que se tiene al día en promedio por cada mes del año. Con estas variaciones de irradiancia se pudo calcular el potencial que son capaces de generar los módulos fotovoltaicos, relacionándolos a los efectos de la temperatura en los paneles. Para la temperatura se obtuvieron los rangos de temperatura por mes y se calculó un promedio.

Para realizar el costo total del diseño se consideran todos los elementos que son necesarios para el correcto funcionamiento del diseño. En este sentido, se consideraron los equipos, la obra civil necesaria, así como la mano de obra y materiales necesarios para llevar a cabo la instalación. El costeo se hizo con investigación de los precios unitarios de los diferentes elementos, y con cuantificación realizada en campo o los resultados de los cálculos de diseño se determinaron las unidades necesarias para obtener el costo total. Existen costos de materiales y mano de obra que se tomaron de precios de referencia de cotizaciones ya realizadas. Estas cotizaciones con sus precios de referencia se encuentran en el apartado de anexos.

Es importante conocer el impacto que tendrían los paneles solares y los aerogeneradores en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> que se generan mensualmente con el consumo energético. Es realmente difícil conocer el dato preciso de las emisiones de CO<sub>2</sub> que generan los equipos renovables, dado que no se tiene información del origen de los materiales de fabricación, así como las cantidades utilizadas. Por lo tanto, solo se analizará los gramos de CO<sub>2</sub> que generan los equipos renovables con la producción energética mensual. Según el Informe Especial del IPCC sobre Fuentes de Energía Renovable y Mitigación del Cambio Climático, los valores medios de emisión de CO<sub>2</sub> para todas las energías renovables varían entre 4 y 46 g CO<sub>2</sub>eq/kWh, mientras que los de los combustibles fósiles oscilan entre 469 y 1,001 g CO<sub>2</sub>eq/kWh (excluyendo las emisiones por cambio en el uso del suelo). (IPCC, 2011) Además de esto, tampoco se sabe con exactitud la cantidad de energía eléctrica consumida de la red

eléctrica que proviene de fuentes renovables y de combustión fósil. Es por esto que se asumirá los consumos energéticos del histórico obtenido por parte del residencial como origen de combustión fósil. El objetivo es demostrar que el impacto ambiental que generan los equipos renovables es mínimo, y que el utilizar genera grandes beneficios para el ambiente.

#### D. Comparación con Solarius PV

La aplicación Solarius PV es un software de diseño fotovoltaico según la disponibilidad de área y la ubicación geográfica de estudio. Con esta aplicación se quiere conocer una comparación de lo obtenido por medio del cálculo manual sobre la generación energética mensual que tienen los módulos fotovoltaicos. Para esto se siguieron los siguientes pasos:

- Se diseñó un modelo en Revit del área social del residencial Vistas del Naranja 2, con el objetivo de tener un modelo en 3D que facilite el análisis de las instalaciones fotovoltaicas. El modelo tiene que ser exportado como IFC para poder abrirlo en el software de Solarius PV.
- Se configura la ubicación geográfica de la instalación, en este caso se selecciona la zona de Mixco como se observa en la Figura 48.

**Figura 48.**

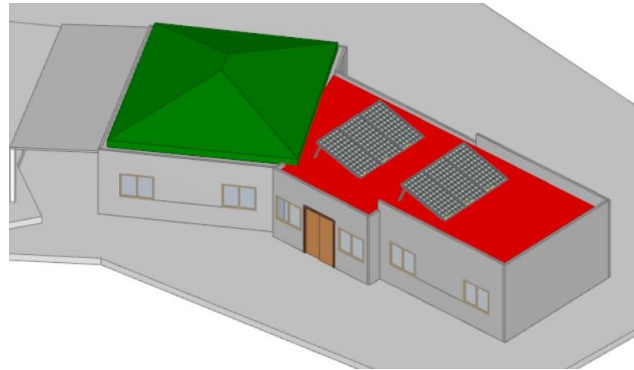
*Configuración del área de Mixco para el análisis en Solarius PV*



- Una vez importado el IFC se determinan las áreas de instalación de los paneles solares y se determinan las condiciones de estudio (como el norte del lugar, el grado de inclinación requerido y la potencia nominal de paneles según el catálogo que se desea seleccionar). Esta selección y diseño se puede observar en la Figura 49.

**Figura 49.**

*Determinación de las áreas de estudio en Solarius PV*



- No se considera el estudio de inversores y cargadores eléctricos porque queda fuera de los objetivos de la comparativa, sin embargo se podrá comparar la generación energética de los módulos con potencia nominal de 670 W, y la configuración por área de interés de estudio.

## **E. Generación de resultados**

Se calcularon los periodos de retorno probables para el proyecto según la planificación de las alternativas de pago del proyecto. Posteriormente, se procedió a calcular el Valor Presente Neto (VPN) para conocer la factibilidad financiera del proyecto. En este caso, los periodos de retorno están especificadas en el cálculo. La tasa de descuento utilizada fue del 8%, utilizando información del Ministerio para la Transacción Ecológica de España, donde explican que para proyectos renovables aplicados en residencias, la tasa de descuento suele tener un rango entre el 5 y el 15 por ciento, dependiendo del potencial aprovechable. (MTE, 2023) Para la validación del proyecto renovable se generarán los siguientes entregables:

- Tablas y gráficos: Se generarán tablas y gráficos para comprender la demanda energética mensual que se tiene con los estudios planificados. Además, se dará el resultado de cantidad de paneles solares y aerogeneradores por medio de tablas, así como la capacidad a generar mensualmente.
- Presupuesto: Se presentará un presupuesto del proyecto general, donde se mostrarán los costos de la adquisición de equipos, la mano de obra necesaria y la obra civil a realizar. Añadido a esto, se establecerá el análisis de retorno del proyecto, según las opciones de pago que se presentaron con anterioridad, esto con el objetivo de mostrar la viabilidad económica que tiene el proyecto renovable.

- Juego de planos: Se realizará un juego de planos para mostrar de forma gráfica la instalación de los paneles solares y aerogeneradores en la cubierta de las edificaciones o espacios a instalar del residencial. Dentro de estos planos se mostrará las distancias de instalación entre cada uno de los elementos y el detalle de los equipos adicionales de instalación que requieren los sistemas renovables.

## VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

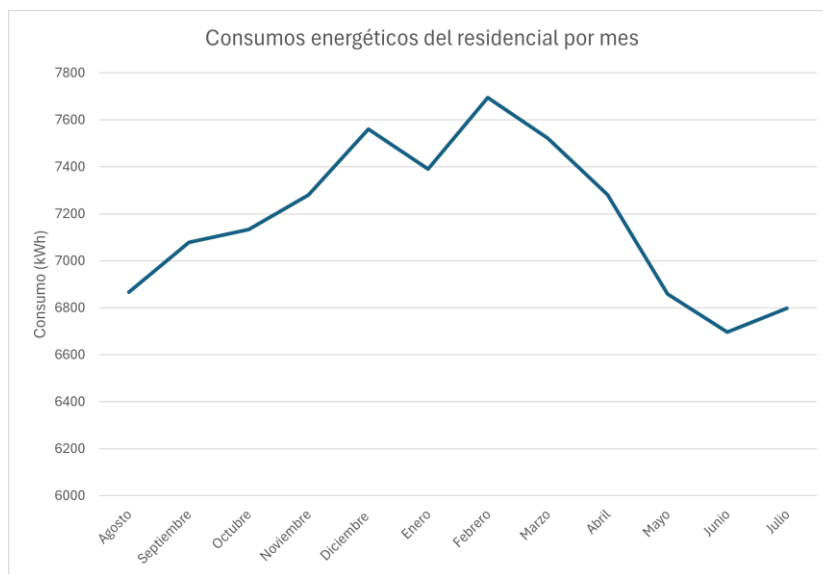
### A. Consumo energético mensual del residencial

Se obtuvo el consumo energético total que se tiene en el residencial por mes donde, por medio de 5 contadores, se totaliza la energía eléctrica del residencial. En la figura 43 se puede observar gráficamente el comportamiento de los consumos mensuales obtenido del histórico proporcionado por el residencial.

Como se puede observar en la Figura 50, los meses con mayor consumo son diciembre, enero, febrero y marzo, alcanzando un pico de hasta 7,694 kWh de consumo. Los meses con el consumo más bajo son mayo, junio y julio, donde la energía total consumida llega a un valor de 6,697 kWh. Con esta información se define que el consumo mensual varía con una tendencia a un mayor consumo energético en temporadas de verano, mientras que en épocas de invierno es donde el consumo energético se reduce. La diferencia entre el mes con mayor consumo con el de menor consumo es de 997 kWh.

#### Figura 50.

*Comportamiento del consumo energético mensual en el residencial*



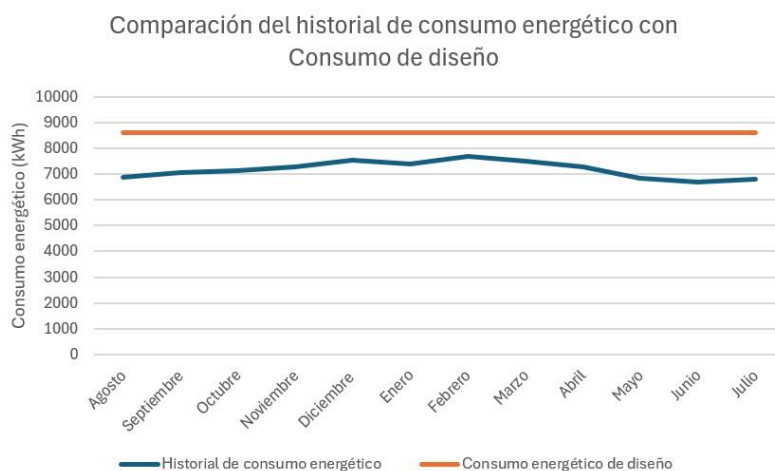
*Nota. Elaboración propia.*

En la figura 51 se evalúa el consumo energético utilizado para el diseño del proyecto, el cual es de 8,634.69 kWh, satisface con la demanda energética real que tiene el residencial a lo largo de los 12 meses del año. Por lo tanto, el diseño energético cumple con las demandas energéticas requeridas gracias al

factor de seguridad considerado de 1.2 para minimizar los impactos que se puedan tener por las variaciones climáticas no contempladas a lo largo del año. Es importante aclarar que el objetivo del diseño no es satisfacer la totalidad de la demanda energética, y que a lo largo del año se pueden presentar variaciones en la generación energética por diversas circunstancias.

**Figura 51.**

*Comparación del historial de consumo energético con consumo de diseño*



*Nota. Elaboración propia.*

## B. Potencial solar

### 1. Rangos fotovoltaicos del área de Mixco

El análisis realizado con el software Global Solar Atlas sobre el sector de Mixco, Guatemala, ha permitido obtener una serie de datos técnicos clave para evaluar el potencial de generación de energía solar en la zona. Estos datos proporcionan una visión detallada del comportamiento de la irradiancia solar y de otros factores ambientales que influyen directamente en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. A continuación, se presentan los parámetros más relevantes obtenidos.

El rango de salida de energía fotovoltaica específica es de 4.48 a 4.75 kWh/kWp, lo cual representa la cantidad de energía eléctrica que un sistema fotovoltaico puede generar por cada kilovatio pico instalado, en promedio por día. De esta manera, cada kWp de capacidad instalada que tenga el panel solar, genera un promedio de electricidad del rango especificado. El rango de salida que se especifica para la zona de Mixco sugiere un rendimiento moderado a alto para la generación de energía eléctrica a

partir de energía solar. La variación, a pesar de ser muy baja, puede darse debido a la presencia de árboles que se tienen en el sector, generando algún tipo de sombra que reduzca la eficiencia de conversión.

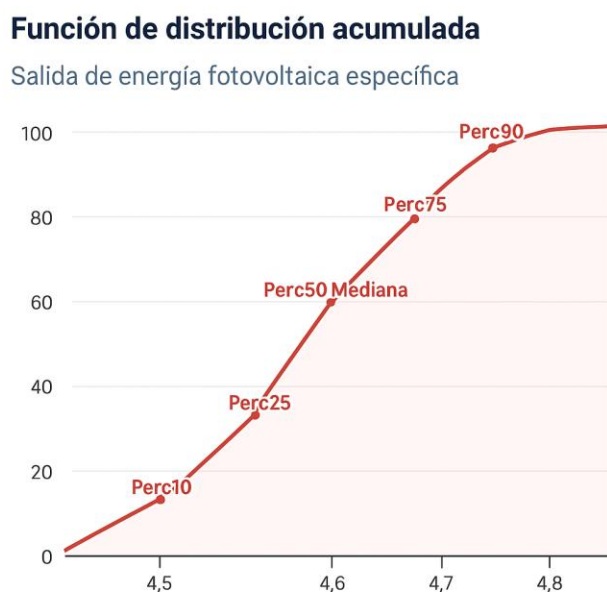
La diferencia de este rango es de 0.27 kWh/kWp dando a entender que, a pesar de los cambios climáticos, como los cambios de nubosidad o de temperaturas, la cantidad de energía generada no fluctúa de manera drástica. Cuando se tienen rangos mayores a 1 kWh/kWp, podría afectar la producción de energía, lo que podría hacer más difícil predecir la producción de energía y planificar el uso.

Con este dato se garantiza el potencial solar que tiene la zona de Mixco para la instalación de paneles solares, además de tener un flujo energético estable a lo largo del año lo cual lo vuelve atractivo para inversión.

De la misma manera, se analiza la distribución del rendimiento específico de energía fotovoltaica (PVOUT) en términos de los Kilovatios hora que se generan por kilovatio pico instalado (kWh/KWp). La distribución del rendimiento se puede observar en la Figura 52, así como el análisis estadístico de dicha gráfica en el Cuadro 12.

### Figura 52.

*Distribución acumulativa de la energía fotovoltaica específica*



*Nota. Obtenido de Global Solar Atlas, (2024).*

## Cuadro 12

*Análisis de la distribución acumulativa de la energía fotovoltaica específica*

Salida fotovoltaica del área		
Promedio	4.63	kWh/kWp
Máximo	4.75	kWh/kWp
Percentil 90	4.74	kWh/kWp
Percentil 75	4.69	kWh/kWp
Percentil 50	4.63	kWh/kWp
Percentil 25	4.58	kWh/kWp
Percentil 10	4.51	kWh/kWp
Mínimo	4.48	kWh/kWp
Más de 4.60 kWh	66.30%	-
Menos de 4.60 kWh	33.70%	-

*Nota. Adaptado de Global Solar Atlas, (2024).*

- **Distribución:** El 66.3% de los valores para PVOUT en la zona de Mixco están por encima de 4.60 kWh/kWp, mientras que el 33.7% se encuentra por debajo de este nivel de generación energética. De esta manera, la mayoría de los días en un año cuentan con un rendimiento superior a los 4.60 kWh/kWp, siendo un indicativo de que el sistema es eficiente en la mayor parte del tiempo.
- **Promedio y mediana:** En este caso, tanto la media como la mediana coinciden en un valor de 4.63 kWh/kWp, indicando que existe una fuerte simetría en el análisis anual de la generación energética, donde no existen sesgos significativos hacia valores demasiado bajos o altos. Por lo tanto, la salida fotovoltaica que se obtiene a lo largo del año tendrá un comportamiento uniforme, sin presentar riesgos en el diseño energético a realizar.
- **Valores Máximos y mínimos:** El análisis anual para el PVOUT en la zona de Mixco indica un valor máximo de 4.75 kWh/kWp, mientras que el valor mínimo obtenido es de 4.48 kWh/kWp. La diferencia que existe entre estos valores es mínima (de 0.27 kWh/kWp), lo cual es indicador que la zona de estudio tiene baja variabilidad en el rendimiento. De esta manera, se asegura que el análisis y diseño de paneles solares es más confiable y no tendrá tendencias a oscilar entre valores de generación que afecten la predicción mensual.

El rango de la Irradiancia Normal Directa es de 4.67 a 5.36 kWh/m<sup>2</sup>, evaluando de esta manera el potencial de generación a partir de la energía solar en el sitio de Mixco, específicamente para puntos de concentración solar y paneles fotovoltaicos de alta eficiencia (los cuales dependen de la luz solar directa). Con este rango obtenido para el sector de Mixco, se puede confirmar que existe la presencia de claridad atmosférica y alta proporción de días soleados a lo largo del año. Las tasas de dispersión de luz solar son bajas alrededor del año, y que la mayoría de los días son aprovechables para la generación fotovoltaica.

Analizando el comportamiento de la irradiancia normal directa de forma gráfica se obtiene la información de la Figura 53 y del Cuadro 13.

**Figura 53.**

*Comportamiento de la irradiancia normal directa anual*



*Nota. Obtenido de Global Solar Atlas, (2024).*

**Cuadro 13.**

*Estadísticas anuales de la irradiancia normal directa*

Irradiancia Normal Directa (DNI)		
Promedio	5.05	kWh/m <sup>2</sup>
Máximo	5.36	kWh/m <sup>2</sup>
Percentil 90	5.32	kWh/m <sup>2</sup>
Percentil 75	5.2	kWh/m <sup>2</sup>
Percentil 50	5.04	kWh/m <sup>2</sup>
Percentil 25	4.91	kWh/m <sup>2</sup>
Percentil 10	4.73	kWh/m <sup>2</sup>
Mínimo	4.67	kWh/m <sup>2</sup>
Más de 5.40 kWh/m <sup>2</sup>	5.00%	-
5.40 - 5.20 kWh/m <sup>2</sup>	20.00%	-
5.20 - 5.00 kWh/m <sup>2</sup>	34.40%	-
5.00 - 4.80 kWh/m <sup>2</sup>	27.50%	-
Menos de 4.60 kWh/m <sup>2</sup>	13.10%	-

*Nota. Adaptado de Global Solar Atlas, (2024).*

- Distribución: con la información de la distribución de los datos anuales se puede observar que solo el 5% de los valores de DNI son superiores a 5.40 kWh/m<sup>2</sup>. La mayor parte de los datos se encuentran en el rango de 5 y 5.20 kWh/m<sup>2</sup>, con una representación total de 34.4%. Es importante resaltar en este punto que solo el 13.1% de los valores se encuentran por debajo de los 4.80 kWh/m<sup>2</sup>- Se observa cierta dispersión en los datos, con un porcentaje de variación significativo. Es importante mencionar que la mayoría de los datos caen en un potencial solar por encima de los 5 kWh/m<sup>2</sup>, lo que indica una producción grande que se puede obtener en la zona de Mixco.
- Estadísticas: El promedio es de 5.05 kWh/m<sup>2</sup> y la mediana es de 5.04 kWh/m<sup>2</sup>. Ambos valores, al estar prácticamente iguales, indican una distribución simétrica en los datos de irradiancia. El valor máximo obtenido es de 5.36 kWh/m<sup>2</sup>, mientras que el valor mínimo es de 4.67 kWh/m<sup>2</sup>. La diferencia entre estos valores es de 0.69 kWh/m<sup>2</sup>, lo que muestra una variabilidad moderada y no significativa en la irradiancia directa, por lo que el resultado sigue siendo estable.
- Análisis del gráfico: El gráfico indica que la mayoría de los días o períodos analizados presentan valores de DNI en torno a los 5.00 kWh/m<sup>2</sup>, lo que es un indicativo de una buena disponibilidad de irradiancia directa, favorable para la generación de energía solar. La gráfica presenta variaciones notables en cuanto aumenta la irradiancia directa, sin embargo, no genera impactos significativos en la producción solar.

Como se mencionó anteriormente, la irradiancia global horizontal es la cantidad total de radiación solar que incide sobre una superficie horizontal. El diseño fotovoltaico propuesto está sobre estructuras fijas con un ángulo de inclinación que no se mueve en el día para seguir al sol. Es por esto que este dato toma relevancia en los cálculos del diseño, ya que considera la irradiancia directa del sol como la difusa. Dicho de otra manera, es toda esa energía solar que se dispersa en la atmosfera y llega a la superficie en todas las direcciones posibles.

El rango obtenido está entre 5.38 y 5.75 kWh/m<sup>2</sup>, lo que indica una excelente disponibilidad de energía solar en la zona de Mixco. En la mayor parte del año, la generación fotovoltaica será alto, teniendo una diferencia muy mínima en la energía esperada. En esta zona se recibe una cantidad sustancial de radiación solar diaria que puede ser aprovechada sin problemas para el uso de paneles fotovoltaicos.

Comparando el valor de la irradiancia global solar (GHI) con el dato de la irradiancia normal directa (DNI) se puede observar que el valor GHI es más alto. Esto se debe a que se está considerando la irradiancia difusa que se genera en el ambiente. El valor es lo suficientemente alto como para considerar un diseño fotovoltaico fijo, sabiendo que un sistema de seguimiento solar representa un costo elevado para cualquier diseño y que realmente el potencial de generación energética no va a ser significativo. Esta irradiancia se puede analizar con la información de la Figura 54 y el Cuadro 14.

**Figura 54.**

*Comportamiento de la irradiancia global horizontal (GHI) anual*



*Nota. Obtenido de Global Solar Atlas, (2024).*

**Cuadro 14.**

*Estadísticas anuales de la irradiancia global horizontal (GHI)*

Irradiancia Normal Directa (DNI)		
Promedio	5.05 kWh/m <sup>2</sup>	
Máximo	5.36 kWh/m <sup>2</sup>	
Percentil 90	5.32 kWh/m <sup>2</sup>	
Percentil 75	5.2 kWh/m <sup>2</sup>	
Percentil 50	5.04 kWh/m <sup>2</sup>	
Percentil 25	4.91 kWh/m <sup>2</sup>	
Percentil 10	4.73 kWh/m <sup>2</sup>	
Mínimo	4.67 kWh/m <sup>2</sup>	
Más de 5.40 kWh/m <sup>2</sup>	5.00%	-
5.40 - 5.20 kWh/m <sup>2</sup>	20.00%	-
5.20 - 5.00 kWh/m <sup>2</sup>	34.40%	-
5.00 - 4.80 kWh/m <sup>2</sup>	27.50%	-
Menos de 4.60 kWh/m <sup>2</sup>	13.10%	-

*Nota. Adaptado de Global Solar Atlas, (2024).*

- **Distribución:** Para el sector de Mixco, la irradiancia global horizontal, cuenta con altos porcentajes de aprovechamiento energético. El 57.5% de los datos analizados para un año de producción solar arrojan una Irradiancia por encima de los 5.60 kWh/m<sup>2</sup>, dándonos un potencial significativo para la producción energética solar. El 33.8% de los datos se encuentra en un rango de producción de 5.40 a 5.60 kWh/m<sup>2</sup>, lo cual es considerado todavía como una irradiancia significativa y aprovechable para la producción solar. Tan solo el 8.7% de los datos arrojan una irradiancia menor a 5.40%, por lo que podemos garantizar que el potencial solar de irradiancia global horizontal no disminuirá de forma drástica a lo

largo del año.

- Estadísticas: La media (5.59 kWh/m<sup>2</sup>) y la mediana (5.61 kWh/m<sup>2</sup>) arrojan valores bastantes cercanos, sugiriendo una distribución de los datos uniforme. La diferencia entre el valor máximo y el mínimo es de 0.37 kWh/m<sup>2</sup>, lo que da a entender una baja variabilidad en la Irradiancia Global Horizontal a lo largo del año, garantizando la estabilidad en la generación. También se puede analizar los percentiles, lo cual sugiere que la Irradiancia Global Horizontal se mantiene alta en la mayoría del tiempo. Tan solo el 10% de los valores queda por debajo de 5.40 kWh/m<sup>2</sup>, garantizando una disponibilidad constante de energía solar.
- Gráfico: De forma visual se puede observar que la mayoría de días o periodos en el año presentarán valores iguales o superiores a 5.60 kWh/m<sup>2</sup>.

El rango obtenido para la irradiancia global inclinada (GTI) oscila entre 5.54 y 5.98 kWh/m<sup>2</sup>, representando la cantidad de radiación solar que puede llegar a una superficie inclinada en la zona de Mixco. El valor de GTI, que es mayor que el GHI (irradiancia global horizontal), sugiere que la inclinación de los paneles está permitiendo una captación de energía más eficiente. Esto es debido a que los paneles inclinados pueden recibir más radiación directa en comparación con una superficie horizontal, especialmente durante las horas centrales del día cuando el sol está más alto en el cielo. Con esta información se confirma la importancia de asegurar la inclinación adecuada de los paneles solares para maximizar la generación de energía. Por lo que el estudio de las variaciones de inclinación de paneles solares a lo largo del año permitiría que se está aprovechando a su máximo exponencial la generación energética de estos dispositivos. También se puede analizar el comportamiento de la Irradiancia Global Inclinada anual a partir de la información de la Figura 55 y el Cuadro 15.

### Figura 55.

*Comportamiento de la irradiancia global inclinada (GTI)*



*Nota. Obtenido de Global Solar Atlas, (2024).*

### Cuadro 15.

#### *Estadísticas anuales de la irradiancia global inclinada (GTI)*

Irradiancia Normal Directa (DNI)		
Promedio	5.05	kWh/m <sup>2</sup>
Máximo	5.36	kWh/m <sup>2</sup>
Percentil 90	5.32	kWh/m <sup>2</sup>
Percentil 75	5.2	kWh/m <sup>2</sup>
Percentil 50	5.04	kWh/m <sup>2</sup>
Percentil 25	4.91	kWh/m <sup>2</sup>
Percentil 10	4.73	kWh/m <sup>2</sup>
Mínimo	4.67	kWh/m <sup>2</sup>
Más de 5.40 kWh/m <sup>2</sup>	5.00%	-
5.40 - 5.20 kWh/m <sup>2</sup>	20.00%	-
5.20 - 5.00 kWh/m <sup>2</sup>	34.40%	-
5.00 - 4.80 kWh/m <sup>2</sup>	27.50%	-
Menos de 4.60 kWh/m <sup>2</sup>	13.10%	-

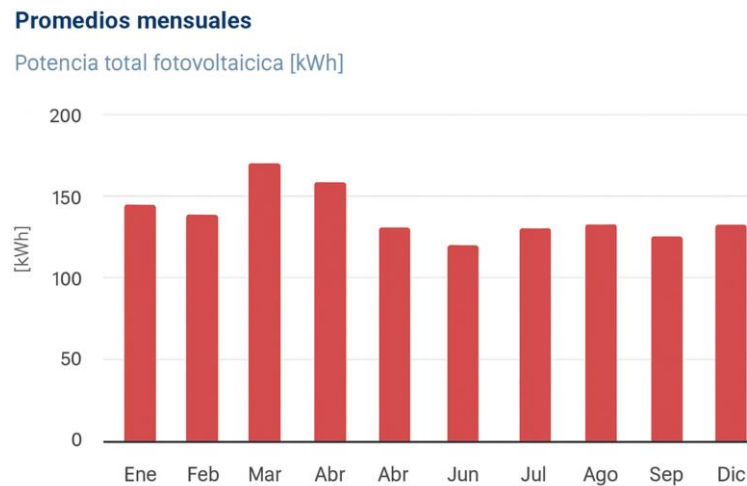
*Nota. Adaptado de Global Solar Atlas, (2024).*

- **Distribución:** Según los datos obtenidos podemos observar que el mayor porcentaje de los valores cae en el rango de irradiancia de 5.80 a 6 kWh/m<sup>2</sup>, con un porcentaje anual del 48.8%. Posteriormente, el segundo rango con mayor participación está entre 5.60 y 5.80 kWh/m<sup>2</sup> con un porcentaje de datos del 35%. Esta información sugiere que la mayoría de días o periodos estacionales presentan una irradiancia global inclinada alta, con un buen rendimiento potencial para los sistemas fotovoltaicos que van a estar inclinados en la zona de Mixco.
- **Estadísticas:** La media tiene un valor de 5.79 kWh/m<sup>2</sup>, y la mediana cuenta con un valor de 5.80 kWh/m<sup>2</sup>. Al igual que las gráficas anteriores, ambos valores se encuentran cercanos, lo que sugiere que la irradiancia global inclinada mantiene un comportamiento uniforme a lo largo del año. Otro parámetro que confirma el potencial de irradiancia es el valor máximo (5.98 kWh/m<sup>2</sup>) y el valor mínimo (5.54 kWh/m<sup>2</sup>), que nos da una diferencia de 0.44 kWh/m<sup>2</sup>, dando una baja variabilidad de la irradiancia que se obtiene a lo largo del año, garantizando la estabilidad y previsibilidad solar en Mixco.
- **Gráfico:** El punto más importante del gráfico es la pendiente pronunciada que se encuentra entre la irradiancia de 5.60 a 5.90 kWh/m<sup>2</sup>, en la cual se concentra la mayoría de los datos de irradiancia anual. Esto quiere decir que la mayoría del tiempo, la irradiancia global inclinada se encuentra en este rango, lo cual es considerada una irradiancia significativa para el aprovechamiento energético.

La Figura 56 indica que existe una variabilidad en la producción de energía solar a lo largo del año, donde los meses de marzo y abril tienen los picos más altos de producción. Esta información coincide con el comportamiento del clima en el país, ya que el verano en Guatemala se desarrolla a lo largo de los meses de marzo y abril. Al no tener presencia de nubes o climas nublados, la generación energética es más eficiente a lo largo de estos meses. Por el otro lado, los meses que tienen la producción energética más baja son los de junio y septiembre. A pesar de esto, la capacidad de producción energética siempre queda por encima de los 100 kWh. Esto es un indicativo de un buen potencial solar en Mixco a lo largo del año, donde la capacidad de generación es constante y apta para poder generar diseños fotovoltaicos.

**Figura 56.**

*Promedios mensuales de la producción total de energía fotovoltaica*



*Nota. Obtenido de Global Solar Atlas, (2024).*

Como se puede observar en la Figura 57, se representa la variación de la posición del sol en el cielo a lo largo del día y durante diferentes épocas del año. En el eje horizontal se encuentra el azimut solar, representado la dirección en la que se encuentra el sol a lo largo del horizonte partiendo desde el norte (con 0 grados), hasta el oeste (con 270°). De esta gráfica se pueden definir los siguientes factores de interés:

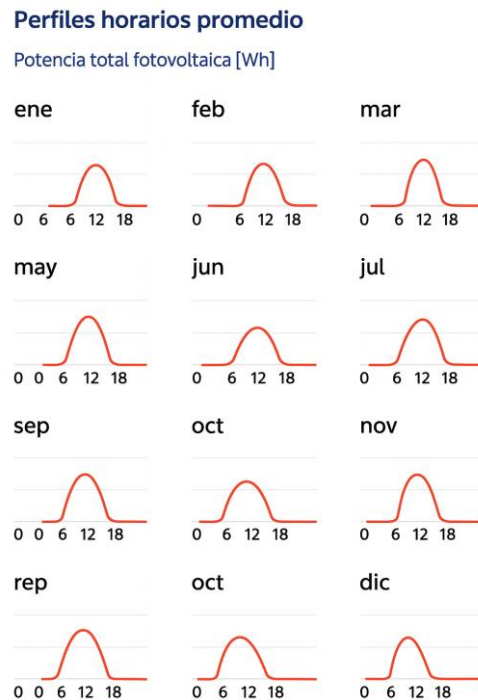
- Solsticio de junio: La línea roja en la gráfica representa el solsticio de junio (el día más largo del año). Se puede observar cómo el sol sale del este a partir de las 6 horas, entrando a una zona activa de visibilidad a partir de las 7 horas. El sol sale a 60 grados aproximados del azimut solar, teniendo un breve desplazamiento noroeste. A mediodía, el sol se encuentra en la parte más alta sobre el horizonte de la tierra, dirigiéndose posteriormente al Oeste para culminar su recorrido del día. En este caso, el área activa solar es la más alta del año, donde se aprovecha fuertemente el potencial solar.



El conjunto de gráficos que se observa en la Figura 58 representa los perfiles horarios promedio de la producción fotovoltaica por mes. Se puede observar que todas las curvas muestran un comportamiento similar, donde existe una forma de campana que representa los momentos de la producción solar desde el amanecer hasta el mediodía. El pico de la producción se genera al mediodía, posteriormente la capacidad de producción disminuye hasta finalizar el día (A las 6 de la tarde durante todos los meses). A pesar de que existe una variación de producción a lo largo de los meses, el comportamiento es el mismo y las gráficas muestran la tendencia a una producción energética similar.

**Figura 58.**

*Horarios promedio de la producción fotovoltaica*



*Nota. Obtenido de Global Solar Atlas, (2024).*

La Figura 59 representa el perfil horario promedio de la producción energética en vatios-hora durante cada mes y hora del día. Se puede observar claramente que el pico de producción energética ocurre entre las 10:00 y 15:00 horas, lo cual es consistente con el diagrama de la trayectoria solar, donde el sol irradia a un punto máximo por su ubicación en el cielo. De enero a abril se consideran los meses con mayor producción de energía solar por hora. Por otro lado, los meses de junio y julio tienen la menos producción por hora de servidumbre. Se puede decir que la producción máxima se genera entre las 12:00 y 13:00 horas durante todos los meses. Estas deberían ser las horas mayormente aprovechadas en el diseño

fotovoltaico. En general, el potencial solar en Mixco es bastante bueno, obteniendo varias horas al día de Irradiancia que pueden ser aprovechables para la generación energética.

**Figura 59.**

*Producción horaria promedio*



### C. Potencial eólico

Los resultados obtenidos del potencial eólico son fundamentales en el desarrollo del proyecto de energía renovable, ya que permite evaluar la viabilidad técnica de la instalación de aerogeneradores en el sitio. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

- **Rosa de frecuencia:** Como se puede observar en la figura 43, la rosa de frecuencia del viento muestra ubicación donde proviene el viento en su mayoría del tiempo. La rosa indica que la mayor parte del tiempo, los vientos provienen del ángulo 0, que es el norte. Aproximadamente la frecuencia del viento máxima es de 55%. Esto quiere decir que el viento va a estar rindiendo a las velocidades de estudio en un margen aproximado de 55% de las 24 horas de un día. Al estar trabajando con turbinas eólicas de eje vertical, la dirección de la frecuencia del viento no es relevante, ya que los equipos pueden captar el viento en cualquier ángulo.
- **Rosa de Velocidad:** La rosa de velocidad del viento muestra la ubicación de donde provienen los vientos con mayor velocidad. Como se puede observar en la figura 43, al igual que la rosa de frecuencia, se puede observar que los vientos provenientes del norte obtienen una velocidad mucho más elevada, con un 55% de participación. Esto quiere decir que se puede obtener un 55% de velocidad constante en un día, tomando como valor de referencia la velocidad del viento a una altura de 200 metros, que es de 6.33 m/s.
- **Rosa de Potencia:** La rosa de potencia representa la distribución de potencia del viento que se puede obtener en el sector del residencial, concentrándose en cuánta energía se puede capturar desde cada dirección. En la figura 44 se puede observar que la potencia máxima

aprovechable viene desde el norte, donde se obtiene un 62% de la potencia eólica. Esto quiere decir que de todo el potencial eólico que marca la zona, que es de 239 Watt por metro cuadrado, solo se puede aprovechar hasta un 62%.

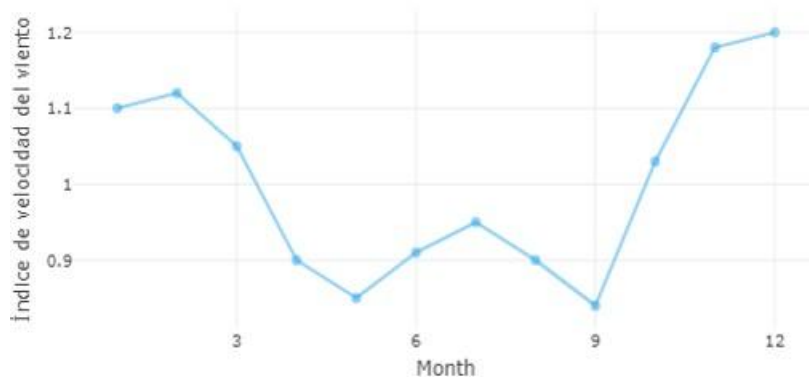
- Variación en el comportamiento del viento al año: Es importante conocer las variaciones del viento para conocer el potencial energético real que se tendrá en el sitio.

Como se puede observar en la Figura 60, la velocidad del viento tiene cambios drásticos en su comportamiento a lo largo del año. Los primeros dos meses del año, al igual que los dos últimos meses del año es donde mayor potencial eólico se puede obtener en el área de Mixco, donde el incremento en la generación del viento llega a ser 1.2 veces la velocidad de diseño. Los meses 5 y 9 del año son las épocas donde los vientos llegan a ser inferiores al comportamiento promedio del sitio, con índices que rondan los 0.8 veces la velocidad de diseño.

En general se puede observar que a lo largo del año se tiene un comportamiento superior a la velocidad de diseño, por lo que se esperan producciones significativas por parte de la generación energética obtenida por las turbinas eólicas Atlas 7.

**Figura 60.**

*Comportamiento del viento a lo largo del año en el sitio de estudio*



#### **D. Diseño del proyecto**

Los cálculos para los aerogeneradores y paneles solares en el diseño de este proyecto permiten evaluar la capacidad del proyecto de abastecer la demanda eléctrica del complejo residencial. Se inició con el diseño eólico del residencial, conociendo el consumo energético de diseño anteriormente mencionado. A continuación, se presentan los cálculos realizados para satisfacer la demanda energética.

Como se puede observar en el Cuadro 16, se necesitarían 12 turbinas eólicas para satisfacer toda la demanda energética del diseño planteado.

**Cuadro 16.**

*Cálculo de la cantidad de aerogeneradores para cubrir consumo de diseño*

Área de barrida	1	m <sup>2</sup>
Temperatura del aire	17.8	C
Densidad del aire	1.213296	kg/m <sup>3</sup>
Longitud de rugosidad	1	m
Altura del aerogenerador	200.126	m
Velocidad del aire a la altura del aerogenerador	3.4819	m/s
Potencia generada	1.895058	kW
Energía generada al día	25.015	kWh
Cantidad de aerogeneradores	12	u

*Nota. Elaboración propia.*

Con el objetivo de distribuir de manera óptima la generación energética entre el sistema eólico y el solar, se decidió realizar un proceso iterativo que permitió ajustar la proporción de energía producida por cada método. Este enfoque permitió encontrar una solución que no solo maximizara la producción de energía, sino que también se adaptara a las limitaciones del área disponible para la instalación de paneles solares y aerogeneradores, al tiempo que cumpliera con la demanda energética mensual del complejo residencial. A través de estas iteraciones, se logró equilibrar ambos sistemas, asegurando que la capacidad de generación combinada fuera suficiente para cubrir los picos de demanda sin exceder el espacio asignado para la infraestructura. A continuación, en el Cuadro 17, se presentan los resultados detallados de la energía promedio generada por las turbinas eólicas cada mes, los cuales forman parte integral de la solución híbrida diseñada para satisfacer las necesidades energéticas del proyecto.

**Cuadro 17.**

*Cantidad de turbinas a instalar y consumo energético mensual generado*

Cantidad de aerogeneradores a instalar	9	unidades
Consumo energético generado (al mes)	6753.987	kWh
Consumo faltantes	1,880.61	kWh

*Nota. Elaboración propia.*

Las turbinas eólicas serán capaces de cubrir un consumo promedio mensual de 6,753.99 kWh, dejando un consumo mensual pendiente de 1,880.61 kWh, la cual será cubierta por la generación solar.

Al saber la cantidad de turbinas eólicas que se deben instalar en el sitio, se calculó la ocupación (en metros lineales) en la corona del muro donde se instalarán. Como se puede observar en el Cuadro 18, las turbinas eólicas cuentan con el espacio suficiente para su instalación, respetando una separación mínima de 2 metros. La instalación eólica, considerando las 9 turbinas eólicas, se puede realizar con éxito en la corona del muro de contención.

**Cuadro 18.**

*Separación entre turbinas eólicas*

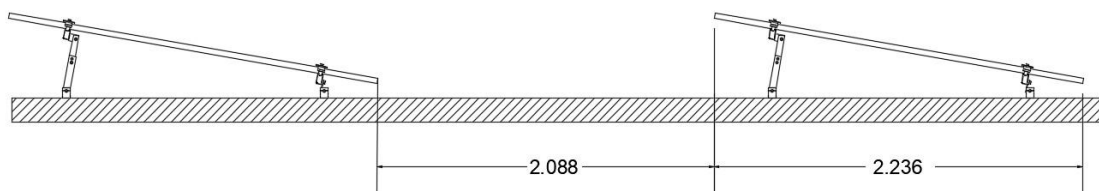
Distanciamiento mínimo entre turbinas	2 m
Espacio disponible en corona del muro (en metros lineales)	53.98 m
Ocupación de la instalación eólica (en metros lineales)	18 m

*Nota. Elaboración propia.*

Para el diseño fotovoltaico se calculó la capacidad de instalación que se tiene en el sitio conociendo las dimensiones de los equipos. A continuación, se presentan los cálculos correspondientes:

**Figura 61.**

*Separación mínima entre filas de paneles solares*



*Nota. Elaboración propia.*

La distancia en eje horizontal que ocupan los paneles solares, con la inclinación promedio recomendada, es de 2.236 metros, y la distancia de separación entre filas de paneles solares es de 2.088 metros. Contemplando el área disponible de instalación se calculó la cantidad de paneles que se puede instalar. Para utilizar un de inclinación óptimo (cuando el panel solar estará fijado en un mismo ángulo a lo largo del año) se calculó un valor de 20.01°, el generaría la mayor captación energética a lo largo del año.

Como se puede observar en el Cuadro 19, en total se tiene capacidad para instalar 20 paneles solares. Esto debido a las limitantes que existen por las dimensiones de las losas de los sitios. A pesar de que el área de ocupación no excede de 40.66% de ocupación, debido a las dimensiones de los paneles solares y la separación recomendada entre filas no se tiene la capacidad de instalar más equipos fotovoltaicos.

### Cuadro 19.

#### *Plan de instalación de paneles solares*

Lugar de instalación	Área (m2)	Paneles a instalar	Área ocupada (m2)	Porcentaje de ocupación de área (%)
Losa del salón social	62.51	6	17.4408	27.90%
Losa de vestidores	25.14	3	8.7204	34.69%
Terreno natural	78.63	11	31.9748	40.66%
<b>Total</b>	<b>166.28</b>	<b>20.00</b>	<b>58.14</b>	<b>34.96%</b>

*Nota. Elaboración propia.*

Por otro lado, se calculó la potencia real generada por módulo fotovoltaico, con el objetivo de conocer la potencia real a generar en el sitio. En el Cuadro 20 se presentan los resultados de la potencia real generada.

### Cuadro 20.

#### *Potencia generada por módulo fotovoltaico con efectos de la temperatura*

Potencia nominal del panel	670	W
Porcentaje de cambio de temperatura de célula	-0.37	%/°C
P PMTcélula	616.58	W
Potencia pérdida por efectos de temperatura	53.42245	W
Porcentaje de pérdida de potencia	7.97%	-

*Nota. Elaboración propia.*

De esta manera, se determina que la potencia real generada por el módulo fotovoltaico (P<sub>PMTcélula</sub>) es de 616.58 W, lo que implica una pérdida de 53.42 W respecto a su potencia nominal, representando una caída del 7.97%. Esta disminución en la generación se debe en gran medida a los efectos de la temperatura en el sitio, los cuales influyen negativamente en el rendimiento de los paneles solares. A medida que la temperatura ambiente aumenta, la eficiencia de las celdas fotovoltaicas disminuye, lo que provoca una menor conversión de la radiación solar en energía eléctrica. Estas pérdidas térmicas deben ser cuidadosamente consideradas en el diseño del sistema, ya que afectan directamente la cantidad de energía aprovechable. Con esta información, fue posible calcular la potencia efectiva generada por los paneles solares bajo las condiciones reales del sitio, ajustando las expectativas de producción energética a escenarios más precisos y realistas.

En el Cuadro 21 se presentan la cantidad de módulos fotovoltaicos necesarios para satisfacer la demanda energética destinada al consumo solar. Se había determinado con anterioridad que la capacidad máxima de instalación de paneles solares era de 20 módulos, por lo que para el diseño del proyecto se considerarán 20 módulos fotovoltaicos.

**Cuadro 21.**

*Energía a satisfacer con paneles solares y cantidad de módulos necesarios*

Potencia real generada por panel	0.617 kW
Consumo energético por día (E)	62.69 kWh/día
Cantidad de modulos FV	19 u

*Nota. Elaboración propia.*

Los circuitos fotovoltaicos se diseñaron para cumplir con las condiciones y rangos permisibles del inversor PV3000 LVHM Series. El circuito 1 está conformado por 6 paneles solares ubicados en la losa del salón social. El circuito 2 está contempla 7 paneles solares, de los cuales 3 están ubicados en la losa del área de vestidores y 4 en el área de terreno natural. Por último, el circuito 3 cuenta con 7 paneles solares ubicados en terreno natural.

En el Cuadro 22 se puede observar que los 3 circuitos cumplen con los rangos aceptables por el inversor. En el caso del voltaje, el circuito 2 y 3 son los más elevados con 269.5 V, sin embargo, el valor queda por debajo del Voltaje máximo de 280V. La potencia generada por cada circuito queda por debajo de los 10 kW máximos permisibles. Por lo tanto, se debe considerar 1 inversor PV3000 LVHM Series para cada circuito, y de esta manera lograr la conversión de la corriente alterna de los paneles solares en corriente continua para la conexión a la red.

## Cuadro 22.

*Análisis de la capacidad de los inversores con los circuitos establecidos*

	Inversor PV3000 (datos de diseño)	Circuito 1	Circuito 2	Circuito 3
Cantidad de paneles solares	-	6	7	7
Rango de voltaje (V)	90 - 280	231	269.5	269.5
Potencia máxima (kW) sin considerar efectos de la temperatura	10	4.02	4.69	4.69
Potencia máxima (kW) considerando efectos de la temperatura	10	3.699465	4.316043	4.316043

*Nota. Elaboración propia.*

## E. Capacidad energética de los equipos

Completado el diseño de aerogeneradores y paneles solares se evalúa la capacidad energética que tienen los equipos considerando las variaciones climáticas a lo largo del año. Como se presentó en el análisis del potencial solar y eólico, existen variaciones en la irradiancia solar y la velocidad del viento presente en el año. Esta información fue útil para calcular la variación energética obtenida por cada mes del año.

En el Cuadro 23 y la Figura 62 se puede observar el análisis de la capacidad energética generada por los paneles solares, la cual revela una clara variación estacional en la producción de energía. Estas fluctuaciones se deben principalmente a las condiciones climáticas que influyen directamente en la cantidad de radiación solar disponible para los paneles mes a mes. Este comportamiento es común en sistemas solares, donde los factores meteorológicos y la inclinación solar varían a lo largo del año, afectando el rendimiento del sistema.

## Cuadro 23.

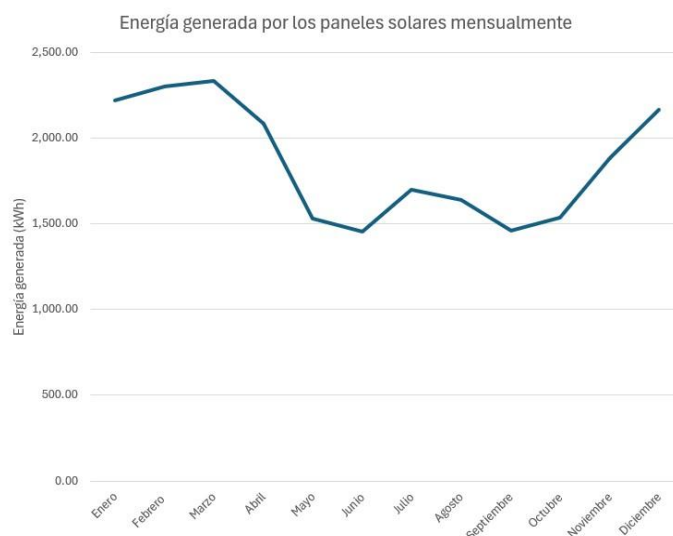
*Análisis de la capacidad energética de los paneles solares*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Irradiación global promedio (kwh/m2)	6.00	6.24	6.36	5.70	4.20	3.98	4.65	4.47	4.00	4.19	5.11	5.86
Temperatura del aire (°C)	18.00	19.00	20.00	21.00	21.50	20.50	20.50	20.50	20.50	20.00	19.00	18.50
Temperatura Nominal de la Célula (°C)	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00
Irradiancia solar del sitio (Wh/m2)	5,999.00	6,241.00	6,361.00	5,703.00	4,202.00	3,977.00	4,648.00	4,471.00	3,995.00	4,194.00	5,113.00	5,863.00
Hora solar pico (hr)	6.00	6.24	6.36	5.70	4.20	3.98	4.65	4.47	4.00	4.19	5.11	5.86
Temperatura real de la célula por clima (°C)	46.75	47.75	48.75	49.75	50.25	49.25	49.25	49.25	49.25	48.75	47.75	47.25
Potencia nominal del panel solar (W)	670.00	670.00	670.00	670.00	670.00	670.00	670.00	670.00	670.00	670.00	670.00	670.00
Porcentaje de cambio de temperatura de célula (%/°C)	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37
P PMT por celula	616.08	613.60	611.12	608.64	607.41	609.88	609.88	609.88	609.88	611.12	613.60	614.84
Energía generada al día por pane(Wh)	3,695.87	3,829.49	3,887.36	3,471.10	2,552.32	2,425.51	2,834.74	2,726.79	2,436.49	2,563.05	3,137.35	3,604.82
Energía total por 20 paneles al día (Wh)	73,917.49	76,589.90	77,747.16	69,422.02	51,046.34	48,510.19	56,694.84	54,535.85	48,729.75	51,261.06	62,747.02	72,096.40
<b>Energía generada al mes (kWh)</b>	<b>2,217.52</b>	<b>2,297.70</b>	<b>2,332.41</b>	<b>2,082.66</b>	<b>1,531.39</b>	<b>1,455.31</b>	<b>1,700.85</b>	<b>1,636.08</b>	<b>1,461.89</b>	<b>1,537.83</b>	<b>1,882.41</b>	<b>2,162.89</b>

*Nota. Elaboración propia.*

**Figura 62.**

*Comportamiento de la generación energética anual de los paneles solares*



*Nota. Elaboración propia.*

En los primeros meses del año, la producción de energía es alta, superando los 2,200 kWh. Esta tendencia continúa hasta marzo, alcanzando un máximo de 2,332.41 kWh. Estos resultados pueden estar asociados con la temporada seca del verano, así como la presencia de días más largos y cielos despejados, donde la radiación solar es óptima. Durante estos meses, los paneles solares operan cerca de su capacidad máxima, lo que sugiere un alto aprovechamiento de la energía solar disponible.

Sin embargo, a partir de abril, la producción comienza a disminuir, alcanzando su punto más bajo en junio con apenas 1,455.31 kWh. Este descenso es muy probable que se deba al inicio de la temporada lluviosa, caracterizada por cielos nublados y una menor cantidad de horas de sol directo. La presencia de lluvia y nubosidad limita considerablemente la cantidad de radiación que los paneles solares pueden absorber, lo que reduce su eficiencia. Además, en estas condiciones, otros factores como la suciedad acumulada o sombras adicionales podrían influir negativamente en la capacidad de generación.

Durante los meses de julio a septiembre, la generación de energía se mantiene en niveles moderadamente bajos, alrededor de 1,600 a 1,700 kWh, lo que coincide con el pico de la temporada de lluvias en muchas regiones. Esta estabilidad en la baja producción podría reflejar un clima persistentemente nublado, donde la radiación solar directa es menos frecuente. Sin embargo, a partir de octubre, se observa una recuperación gradual en la capacidad de generación, alcanzando nuevamente niveles más altos hacia diciembre, con 2,162.89 kWh. Este incremento probablemente está relacionado con el final de la temporada lluviosa y un aumento en la disponibilidad de días soleados y menos

nubosidad, lo que mejora las condiciones para la generación de energía solar.

Como se puede observar en el Cuadro 24 y en la Figura 63, los primeros meses del año (enero a marzo), la energía generada es considerablemente alta, con valores que oscilan entre 9,881 kWh en enero y 8,147 kWh en marzo. Estos meses se caracterizan por una combinación de buena velocidad del viento (cerca a los 4 m/s) y una temperatura estable entre los 18°C y 19°C, lo que favorece una densidad de aire razonablemente alta (superior a 1.2 kg/m<sup>3</sup>). Este conjunto de condiciones genera un entorno propicio para maximizar la capacidad de los aerogeneradores, impulsando una mayor potencia generada en kW.

Sin embargo, a partir de abril, se observa una caída significativa en la energía producida. En abril, la generación desciende a 4,382 kWh, y continúa bajando hasta alcanzar su punto más bajo en mayo con 3,481 kWh. Esta disminución coincide con una reducción en la velocidad del viento, que cae por debajo de los 3 m/s, así como un ligero aumento en la temperatura, lo que afecta la densidad del aire, haciéndolo menos denso (aproximadamente 1.198 kg/m<sup>3</sup> en mayo). Esto sugiere que durante estos meses, los aerogeneradores operan a una menor eficiencia debido a la falta de viento suficiente para mantener una generación estable.

En los meses de junio a septiembre, la producción de energía comienza a estabilizarse en niveles intermedios, con valores que oscilan entre 4,580 kWh en junio y 5,450 kWh en julio, pero vuelve a disminuir en agosto y septiembre. La velocidad del viento se mantiene alrededor de los 3 m/s en promedio, lo que es adecuado para una generación moderada, aunque lejos de los niveles de los primeros meses del año.

A partir de octubre, la generación energética experimenta una notable recuperación, alcanzando los 7,544 kWh. Esta tendencia positiva continúa en noviembre y diciembre, con cifras que superan los 13,000 kWh. En estos meses, la velocidad del viento aumenta significativamente, llegando a casi 4.18 m/s en diciembre, lo que coincide con una mayor densidad del aire y una menor temperatura, condiciones que maximizan el rendimiento de los aerogeneradores. En diciembre, la potencia generada alcanza su punto más alto del año con 35.28 kW, lo que da como resultado la mayor cantidad de energía producida en todo el período de análisis.

El patrón observado en el cuadro 22 indica una dependencia directa de la generación energética de los aerogeneradores respecto a la velocidad del viento y la densidad del aire, ambos factores clave para el funcionamiento eficiente de estos sistemas. Durante los meses de primavera y verano, la disminución en la velocidad del viento afecta considerablemente la producción de energía, lo que sugiere que en este período es fundamental contar con estrategias complementarias para garantizar un suministro constante de energía.

En contraste, los meses de mayor producción (octubre a diciembre) destacan por las condiciones climáticas favorables, con velocidades de viento más fuertes y una densidad de aire elevada, lo que permite a los aerogeneradores operar a plena capacidad. Esto sugiere que, en estas épocas del año, la producción de energía eólica es más fiable y puede alcanzar niveles óptimos.

**Cuadro 24.**

*Análisis de la capacidad energética de aerogeneradores*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Índice de variabilidad del viento	1.1	1.12	1.05	0.9	0.85	0.91	0.95	0.9	0.84	1.03	1.18	1.2
Temperatura (°C)	18	19	20	21	21.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20	19	18.5
Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )	1.21246	1.20828	1.2041	1.20006	1.19804	1.20208	1.20208	1.20208	1.20208	1.2041	1.20828	1.21037
Velocidad conocida del viento (m/s)	3.82965	3.89928	3.655575	3.13335	2.959275	3.168165	3.307425	3.13335	2.92446	3.585945	4.10817	4.1778
Velocidad del aire a la altura del aerogenerador (m/s)	3.8301	3.8997	3.6560	3.1337	2.9596	3.1685	3.3078	3.1337	2.9248	3.5864	4.1087	4.1783
Potencia generada kW	24.954	26.726	20.574	11.068	8.791	11.588	13.763	11.087	8.413	19.051	32.930	35.281
Energía generada al día (kWh)	329.39	352.7865	271.5764	146.0983	116.0431	152.9576	181.677	146.3442	111.05107	251.4686	434.67818	465.70978
<b>Energía generada al mes (kWh)</b>	<b>9881.699</b>	<b>10583.59</b>	<b>8147.291</b>	<b>4382.95</b>	<b>3481.292</b>	<b>4588.729</b>	<b>5450.311</b>	<b>4390.327</b>	<b>3331.5321</b>	<b>7544.057</b>	<b>13040.345</b>	<b>13971.293</b>

*Nota. Elaboración propia.*

**Figura 63.**

*Comportamiento de la generación energética anual de aerogeneradores*



*Nota. Elaboración propia.*

## **F. Rango de ahorros económicos mensuales**

Dado que la energía generada en el sistema proviene tanto de paneles solares como de aerogeneradores interconectados a la red, y considerando que la energía de diseño es de 8,634.60 kW, se puede observar en el Cuadro 25 una interesante dinámica de ahorro económico y retribución en los diferentes meses del año.

En los meses donde la energía generada excede la cifra de diseño (enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre), no solo se reduce el costo del consumo eléctrico, sino que, además, existe un excedente de energía que la empresa eléctrica debe retribuir. Por ejemplo, en enero, con una energía generada de 9,881.699 kWh, hay un excedente de aproximadamente 1,247.1 kWh sobre lo que se necesita. Este excedente puede ser inyectado a la red y compensado financieramente, lo que maximiza los ahorros del residencial o incluso puede generar ingresos adicionales.

De igual manera, en meses como noviembre y diciembre, los excedentes son mucho mayores, con energías generadas de 13,971.293 kWh en diciembre y 13,040.345 kWh en noviembre, lo que implica que la cantidad de energía que la empresa eléctrica debe retribuir es significativa, incrementando notablemente los beneficios económicos para la empresa, además de reducir a cero el pago por el consumo eléctrico durante esos meses.

En los meses de abril a septiembre, la energía generada cae por debajo de la energía de diseño, lo que significa que la producción de energía no es suficiente para cubrir completamente la demanda del sistema. Por ejemplo, en abril, la energía generada es de 4,382.95 kWh, lo que indica un déficit de más de 4,251.65 kWh. En este caso, la empresa no podrá inyectar energía a la red, pero se beneficiará de una reducción parcial del pago mensual correspondiente a la energía consumida, dado que la producción local aún cubre una parte significativa de la demanda.

Este patrón también se observa en otros meses, como en mayo, donde la energía generada es de 3,481.292 kWh, y en junio con 4,588.729 kWh, reflejando una clara reducción en la capacidad de generación debido a condiciones climáticas menos favorables, tales como una menor irradiancia solar o menor velocidad del viento. A pesar de esto, la generación sigue siendo un alivio financiero importante para el residencial, aunque menor comparado con los meses de mayor producción. En los meses donde la energía generada supera la energía de diseño, la empresa eléctrica tiene la obligación de retribuir a la empresa productora por el excedente inyectado a la red, lo que convierte el sistema en una fuente de ingresos adicional. En meses como noviembre y diciembre, estos ingresos podrían ser sustanciales, considerando los altos excedentes generados. Este modelo de negocio permite maximizar los beneficios del sistema de generación distribuida, aprovechando tanto las capacidades solares como eólicas en los

momentos más productivos del año. En general, el sistema cumple con las condiciones de diseño para satisfacer la demanda energética, y generar beneficios económicos al residencial.

### Cuadro 25.

#### *Rango de ahorros económicos mensuales*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Energía generada al mes (kWh) con paneles solares	2217.52	2297.70	2332.41	2082.66	1531.39	1455.31	1700.85	1636.08	1461.89	1537.83	1882.41	2162.89
Energía generada al mes (kWh) con Turbinas	9881.70	10583.59	8147.29	4382.95	3481.29	4588.73	5450.31	4390.33	3331.53	7544.06	13040.35	13971.29
Energía total generada (kWh)	12,099.22	12,881.29	10,479.71	6,465.61	5,012.68	6,044.03	7,151.16	6,026.40	4,793.42	9,081.89	14,922.76	16,134.19
Energía total generada (kWh) sin considerar factor de seguridad 1.2	10,082.69	10,734.41	8,733.09	5,388.01	4,177.24	5,036.70	5,959.30	5,022.00	3,994.52	7,568.24	12,435.63	13,445.15
Precio energía (EEGSA)	Q 1.46	Q 1.46	Q 1.46	Q 1.46	Q 1.46	Q 1.46	Q 1.46	Q 1.46	Q 1.46	Q 1.46	Q 1.46	Q 1.46
Ahorro mensual máximo	Q 19,839.18	Q 21,121.54	Q 17,183.65	Q 10,601.71	Q 8,219.33	Q 9,910.45	Q 11,725.80	Q 9,881.53	Q 7,859.81	Q 14,891.63	Q 24,468.95	Q 26,455.34
Ahorro mensual mínimo	Q 14,761.30	Q 15,715.43	Q 12,785.45	Q 7,888.17	Q 6,115.57	Q 7,373.84	Q 8,724.55	Q 7,352.33	Q 5,848.07	Q 11,080.09	Q 18,206.06	Q 19,684.03

*Nota. Elaboración propia.*

## G. Costos del proyecto

Para conocer el costo total de realizar el proyecto se realizó un presupuesto, el cual se puede ver detalladamente dentro de la sección de Anexos. Como se puede observar en el desglose de costos del proyecto, el costo total asciende a Q271,238.11, dividido en tres componentes principales: la instalación de equipos solares, equipos eólicos, y los costos relacionados con la obra civil necesaria. La instalación de los equipos eólicos representa el mayor porcentaje del costo total, con Q182,179.48, lo cual es esperable debido al mayor costo elevado de los aerogeneradores, así como los requerimientos técnicos que implican. Este valor sugiere que los equipos eólicos son el pilar principal de generación dentro del proyecto, indicando una apuesta por la energía eólica como la fuente predominante. Es importante mencionar que los precios de los materiales fueron obtenidos de las tiendas en línea de Novex Guatemala, Celasa y AISA Guatemala. Los precios de paneles solares y aerogeneradores fueron obtenidos en la página de Enersys Solar Guatemala y Tesup. Por otro lado, la mano de obra considerada en el diseño se realizó con precios de referencia que se tienen con dos constructoras: R&C Ingenieros y Soluciones en construcción, las cuales se encuentran en anexos en el apartado del presupuesto.

En contraste, el costo de instalación de los equipos solares es considerablemente menor, ascendiendo a Q46,099.71, lo que podría deberse a una menor capacidad instalada en comparación con los aerogeneradores. Este costo más bajo también refleja que, aunque los paneles solares son una parte importante del sistema, su participación en la generación de energía probablemente sea complementaria a la de los aerogeneradores.

Finalmente, como se puede observar en el Cuadro 26 y la Figura 64, el costo de la obra civil

necesaria, que asciende a Q42,958.92, cubre los trabajos necesarios para adecuar el sitio e instalar ambos sistemas de generación. Este costo no es despreciable, ya que representa aproximadamente el 16% del costo total, lo que pone en evidencia la importancia de tener una infraestructura adecuada para la instalación y funcionamiento de ambos sistemas.

**Cuadro 26.**

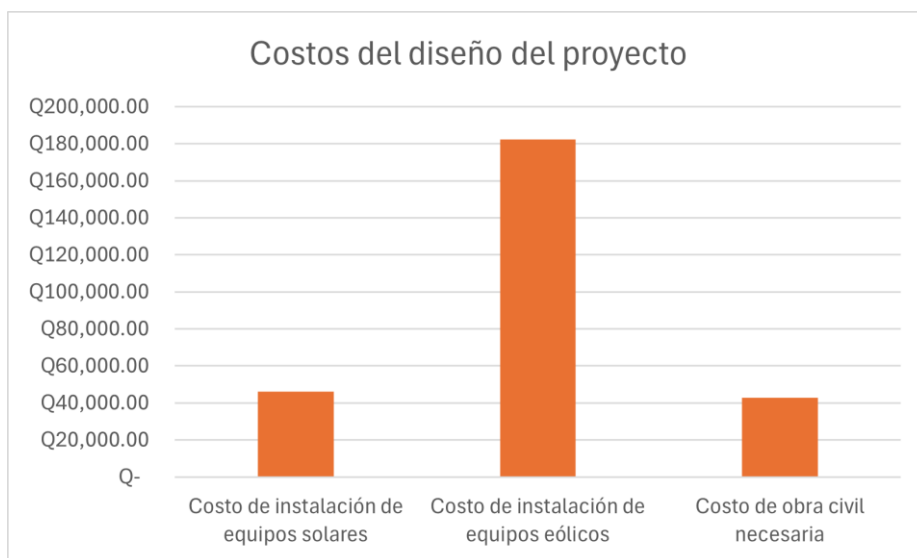
*Análisis de costos del proyecto*

Costo de instalación de equipos solares	Q 46,099.71
Costo de instalación de equipos eólicos	Q 182,179.48
Costo de obra civil necesaria	Q 42,958.92
<b>Costo total</b>	<b>Q 271,238.11</b>

*Nota. Elaboración propia.*

**Figura 64.**

*Comparación de costos relacionados al diseño energético*



*Nota. Elaboración propia.*

## H. Periodos de retorno probables

### 1. Pago al contado con ingreso mensual de cuota de mantenimiento de los residentes

Como se observa en el Cuadro 27, en la primera alternativa, donde el pago del proyecto es al contado destinando un 20% de la cuota de mantenimiento de los residentes, el período de retorno aproximado es de 12 meses. Esto quiere decir que la recuperación obtenida del monto invertido en el proyecto se logrará en el plazo de un año. Dado que el total acumulado de la cuota mensual destinada al pago del proyecto asciende a Q23,200.00, el cálculo del periodo de retorno es razonable, pues las 116 viviendas aportan una cantidad significativa que permite amortizar la inversión rápidamente.

Este corto periodo de retorno indica que el proyecto es altamente rentable, ya que el residencial no solo cubrirá los costos de la instalación en un tiempo reducido, sino que a partir del mes 13 en adelante, todo lo recaudado a través de la cuota de mantenimiento podrá ser dirigido a otros fines o representar un ahorro neto. Es importante mencionar que este modelo de pago de inversión no considera las reducciones y cuotas que se pueden recibir por el aporte a la red cuando se produce más energía de la consumida. Por lo que esta opción presenta beneficios económicos significativos.

#### Cuadro 27.

*Periodo de retorno probable con cuotas mensuales*

Viviendas	116
Cuota de mantenimiento	Q 1,000.00
Porcentaje de cuota destinada al pago del proyecto	20%
Total acumulado de cuota mensual	Q 23,200.00
Periodo de retorno (meses)	12

*Nota. Elaboración propia.*

### 2. Pago al contado con ingreso mensual de cuota de mantenimiento de los residentes

El período de retorno de 8.29 años es relativamente típico para proyectos de este tipo, donde la inversión inicial en tecnología renovable puede ser significativa, pero los ahorros acumulados a lo largo

del tiempo permiten recuperar la inversión de manera sostenida. A partir de ese momento, los costos operativos del sistema serán mínimos en comparación con el ahorro continuo en las facturas de energía, lo que convierte al proyecto en una inversión financieramente sólida a largo plazo, como se puede observar en el Cuadro 28.

Además, dado que el ahorro anual es constante, cualquier aumento en los precios de la energía eléctrica en el futuro aceleraría el retorno de la inversión, haciendo que el proyecto sea aún más rentable. Después del período de recuperación, la instalación renovable comenzará a generar beneficios económicos netos y reducirá la dependencia de fuentes de energía tradicionales.

En general, la alternativa donde se toma el 20 por ciento de la cuota de mantenimiento de los residentes es mucho más atractiva, generando un periodo de retorno a corto plazo. Esto significaría que la administración del residencial podría cubrir la deuda en un plazo corto, y comenzar a generar ingresos con los ahorros generados por la instalación renovable, la cual permitiría dar paso a nuevos proyectos en el residencial.

### **Cuadro 28.**

*Periodo de retorno probable considerando ahorros mensuales*

Energía generada anualmente con equipo renovable (en términos de dinero)	Q	158,846.91
Pago de energía promedio anual (sin energías renovables)	Q	126,138.84
Ahorro anual con la instalación renovable	Q	32,708.06
Costo del proyecto estimado	Q	271,238.11
Tiempo de retorno probable de la inversión (años)		8.29

*Nota. Elaboración propia.*

## **I. Valor presente neto (VPN)**

### **1. Considerando ingresos mensuales de la cuota de mantenimiento**

Como se observa en el Cuadro 29, el valor presente neto (VPN) de Q1,424,417.10, calculado con un flujo constante de Q158,846.91 durante los 25 años, refleja una rentabilidad excepcionalmente alta del proyecto. Este resultado sugiere que la inversión inicial de Q271,238.11 se recuperará rápidamente y generará un valor adicional sustancial a lo largo del tiempo. Al mantener un flujo de caja elevado desde el inicio, el proyecto tiene un retorno significativo sobre la inversión, lo que lo convierte en una opción financiera muy atractiva.

Este VPN indica que el proyecto no solo cubre sus costos iniciales, sino que también proporciona una rentabilidad sostenida y a largo plazo, lo que refuerza la viabilidad económica del sistema de energías

renovables.

**Cuadro 29.**

*Valor presente neto del proyecto con ingresos de cuota de mantenimiento*

Ahorro anual con la instalación renovable	Q 158,846.91	(del año 1 al 25)
Periodo de vida útil de los equipos	25	Años
Tasa de retorno del proyecto	8%	
<b>Valor Presente Neto</b>	<b>Q 1,424,417.10</b>	

*Nota. Elaboración propia.*

**2. Considerando ingresos de los ahorros mensuales generados**

Como se observa en el Cuadro 30, el valor presente neto (VPN) de Q636,691.39 refleja la alta rentabilidad del proyecto de energías renovables, considerando que el flujo de caja cambia significativamente a partir del año 10 debido a que el proyecto se termina de pagar en ese momento. Durante los primeros 9 años, el flujo de caja es de Q32,708.06 anuales, ya que parte del ahorro energético se destina a cubrir el costo de la inversión inicial. Sin embargo, al completarse el pago en el año 10, el flujo de caja se incrementa a Q158,846.91 anuales, lo que impulsa el VPN hacia un valor considerablemente alto.

Este resultado de Q636,691.39 significa que, una vez descontados todos los flujos de caja futuros con la tasa del 8%, el proyecto no solo recuperará la inversión inicial de Q270,988.57, sino que además generará un excedente importante de más de Q636,000 en valor actual. El aumento del flujo de caja a partir del año 10 tiene un impacto decisivo en este cálculo, ya que permite que los ahorros netos crezcan de manera acelerada una vez que los pagos del proyecto han sido cubiertos.

El VPN positivo indica que el proyecto es extremadamente rentable a largo plazo, con beneficios netos acumulados que superan con creces la inversión inicial. Este valor adicional refleja la ventaja de contar con un sistema de energía renovable que, una vez amortizado, genera ahorros significativos sin mayores compromisos financieros.

**Cuadro 30.**

*Valor presente neto del proyecto con ingresos de los ahorros mensuales*

Ahorro anual con la instalación renovable	Q 32,708.06	(del año 1 al 9)
	Q 158,846.91	(del año 10 al 25)
Periodo de vida útil de los equipos	25	Años
Tasa de retorno del proyecto	8%	
<b>Valor Presente Neto</b>	<b>Q 636,691.39</b>	

Nota. Elaboración propia.

## J. Huella de carbono

Con la información de la generación energética que tienen los equipos renovables mensualmente y el promedio de generación obtenido del IPCC, se calcularon los gramos de CO<sub>2</sub> producidos mes a mes. En el Cuadro 31 se presenta la información del impacto ambiental.

### Cuadro 31.

#### Cálculo de gramos de CO<sub>2</sub> producidos mensualmente

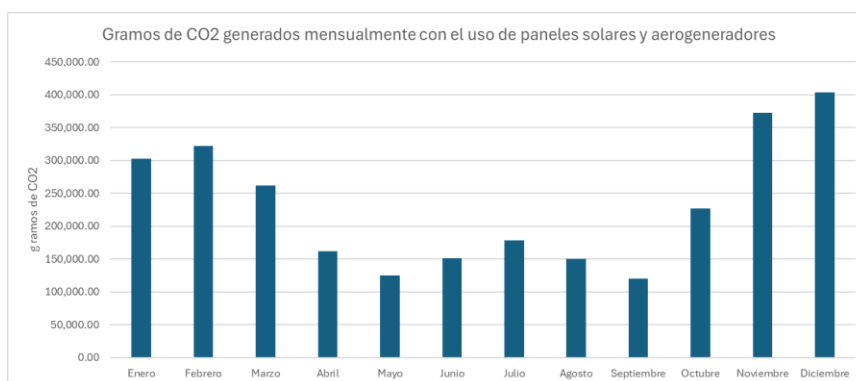
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Energía generada al mes (kWh) con paneles solares	2,217.52	2,297.70	2,332.41	2,082.66	1,531.39	1,455.31	1,700.85	1,636.08	1,461.89	1,537.83	1,882.41	2,162.89
Energía generada al mes (kWh) con Turbinas	9,881.70	10,583.59	8,147.29	4,382.95	3,481.29	4,588.73	5,450.31	4,390.33	3,331.53	7,544.06	13,040.35	13,971.29
<b>Total de energía generada con equipo renovable</b>	<b>12,099.22</b>	<b>12,881.29</b>	<b>10,479.71</b>	<b>6,465.61</b>	<b>5,012.68</b>	<b>6,044.03</b>	<b>7,151.16</b>	<b>6,026.40</b>	<b>4,793.42</b>	<b>9,081.89</b>	<b>14,922.76</b>	<b>16,134.19</b>
Promedio de emisión de CO <sub>2</sub> por kWh consumido con energías renovables según IPCC. (gCO <sub>2</sub> /kWh)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
CO <sub>2</sub> generado mensualmente con los paneles solares y aerogeneradores (g)	302,480.60	322,032.26	261,992.65	161,640.26	125,317.06	151,100.87	178,778.90	150,660.07	119,835.61	227,047.21	373,068.90	403,354.64

Nota. Elaboración propia.

La Figura 65 muestra la cantidad de gramos de CO<sub>2</sub> generados mensualmente con el uso de paneles solares y aerogeneradores. En general, la emisión de CO<sub>2</sub> varía significativamente a lo largo del año, con picos en los meses de febrero, noviembre y diciembre, donde las emisiones superan los 300,000 gramos de CO<sub>2</sub>. En contraste, los meses de mayo y septiembre presentan las menores emisiones, con valores por debajo de los 200,000 gramos. En general, los gramos de CO<sub>2</sub> van relacionados con la capacidad de generación energética anteriormente discutidas.

### Figura 65.

#### Gráfico de la variación de gramos de CO<sub>2</sub> producidos mensualmente



Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, calculando los gramos de CO<sub>2</sub> obtenidos del consumo energético que ya se conocía del residencial, se obtienen los valores del Cuadro 32.

**Cuadro 32.**

*Gramos de CO2 generados considerando combustión fósil*

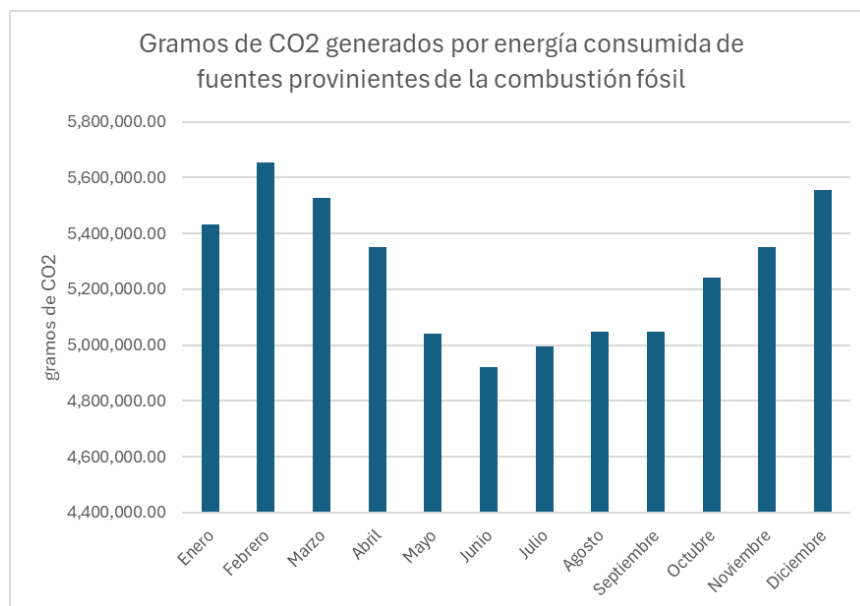
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Energía consumida mensualmente según el histórico del residencial (kWh)	7,391.00	7,694.00	7,522.00	7,281.00	6,858.00	6,697.00	6,798.00	6,867.00	6,867.00	7,133.00	7,280.00	7,560.00
Promedio de emisión de CO2 por kWh consumido por energía proveniente de la combustión fósil según IPCC. (gCO2/kWh)	735.00	735.00	735.00	735.00	735.00	735.00	735.00	735.00	735.00	735.00	735.00	735.00
CO2 generado mensualmente por combustión fósil (g)	5,432,385.00	5,655,090.00	5,528,670.00	5,351,535.00	5,040,630.00	4,922,295.00	4,996,530.00	5,047,245.00	5,047,245.00	5,242,755.00	5,350,800.00	5,556,600.00

*Nota. Elaboración propia.*

La Figura 66 muestra la cantidad de gramos de CO2 generados mensualmente por energía consumida proveniente de la combustión de fuentes fósiles. A diferencia de la primera gráfica, que refleja la generación de CO2 asociada con tecnologías renovables, aquí observamos una tendencia general de mayores emisiones durante la mayor parte del año, con un rango que va desde los 4,800,000 hasta los 5,800,000 gramos de CO2. Los meses de febrero, marzo y diciembre presentan las mayores emisiones, superando los 5,600,000 gramos de CO2, mientras que junio muestra el menor valor, ligeramente por encima de los 4,800,000 gramos.

**Figura 66.**

*Comparación de gramos de CO2 por consumo fósil*



*Nota. Elaboración propia.*

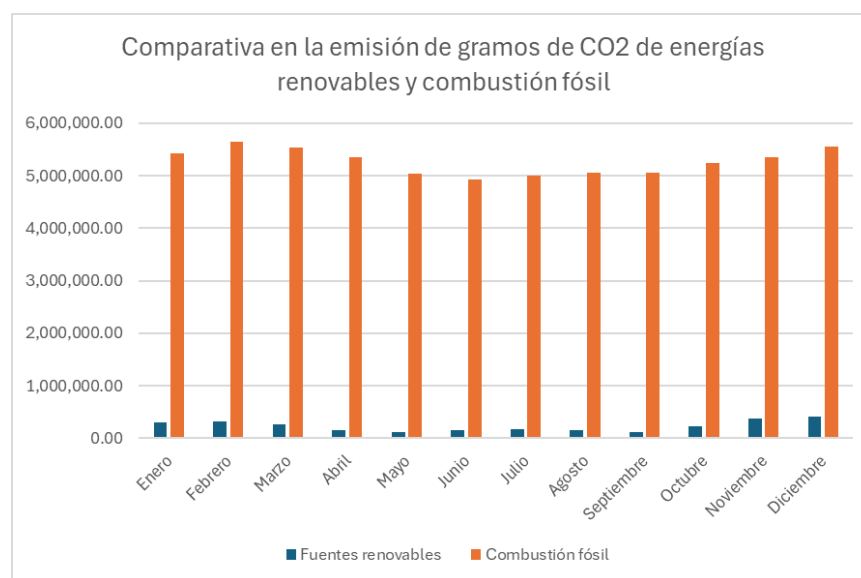
La Figura 67 muestra una comparación en la emisión de gramos de CO<sub>2</sub> entre energías renovables y combustibles fósiles a lo largo de los meses del año. Lo primero que destaca es la enorme diferencia en emisiones entre ambos tipos de fuentes de energía. Las fuentes de energía renovable (en azul) generan una cantidad significativamente menor de CO<sub>2</sub> en comparación con la combustión fósil (en naranja), cuya escala de emisiones es mucho más alta, manteniéndose constante cerca de los 5,500,000 gramos de CO<sub>2</sub> en la mayoría de los meses.

Por otro lado, las emisiones asociadas con energías renovables son mucho más reducidas, manteniéndose siempre por debajo de los 500,000 gramos de CO<sub>2</sub>, incluso en los meses de mayor generación. Esto refleja claramente el menor impacto ambiental que las fuentes renovables tienen en términos de emisiones de carbono.

El contraste es particularmente visible en los meses de febrero, marzo y diciembre, donde la combustión fósil muestra sus picos más altos, mientras que las energías renovables se mantienen en niveles bajos durante todo el año. La gráfica deja en evidencia que la transición a energías renovables es crucial para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que incluso en su peor rendimiento, las fuentes renovables emiten una fracción de las emisiones de las fuentes fósiles. Esta comparación subraya la importancia de priorizar la inversión y uso de energías renovables para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir de manera efectiva a la lucha contra el cambio climático.

**Figura 67.**

*Comparación de emisiones de CO<sub>2</sub> generadas con energía renovable y la combustión fósil*



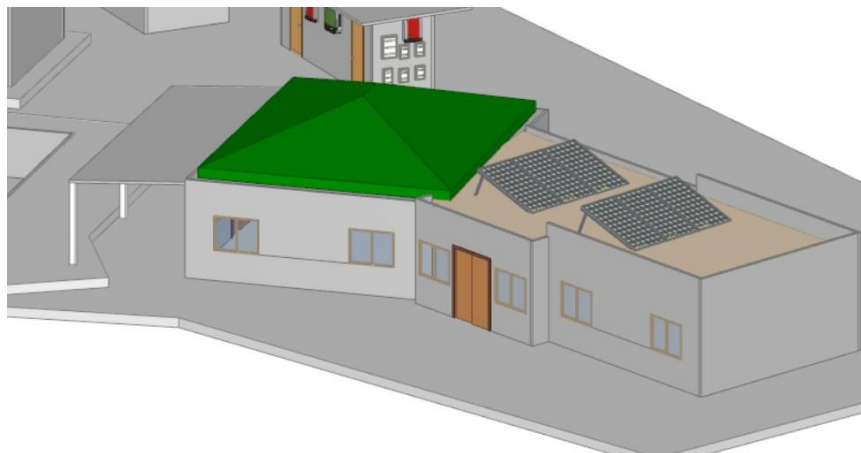
*Nota. Elaboración propia.*

## K. Comparación de diseño solar con Solarius PV

Se realizó un diseño solar por medio del software Solarius PV, para comparar el diseño realizado en los cálculos previos y entender si las condiciones consideradas compatan para un diseño eficiente. El diseño se puede observar en la Figura 68 y Figura 69.

### Figura 68.

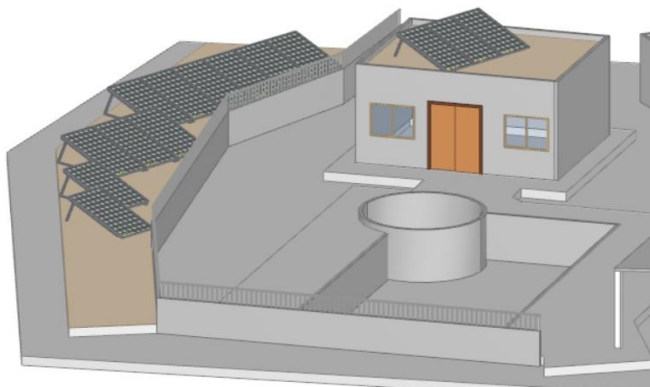
*Diseño solar realizado en Solarius PV*



*Nota. Obtenido de Solarius PV.*

### Figura 69.

*Diseño solar realizado en Solarius PV sobre la losa del salón social*



*Nota. Obtenido de Solarius PV.*

En este caso, se puede observar que las áreas de instalación de los paneles solares coinciden

plenamente con el diseño realizado de manera manual, en el cual se estableció la distribución de los paneles de acuerdo con el espacio disponible en las distintas zonas del residencial. En concreto, se dispusieron 6 paneles en la losa del salón social, 3 paneles en la losa del vestidor y 11 paneles en áreas de terreno natural. Esta distribución no solo optimiza el uso del espacio disponible, sino que también respeta las distancias recomendadas entre los paneles, asegurando un rendimiento óptimo del sistema. El cumplimiento de estos criterios de separación es fundamental para evitar sombras y maximizar la captación de radiación solar, lo que confirma que el diseño se realizó de manera adecuada y siguiendo las mejores prácticas de instalación de paneles solares. Además, al respetar las especificaciones de espacio y ubicación, se garantiza que los paneles operen de manera eficiente y segura, contribuyendo a la sostenibilidad y al correcto funcionamiento del sistema energético. Esta información se puede encontrar en el Cuadro 33.

### Cuadro 33.

#### *Energía generada mensualmente con diseño generado por Solarius PV*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Vestidores	223.82	208.32	234.67	219.3	205.22	186.3	201.5	209.25	194.7	206.77	206.7	217.31
Terreno natural	892.8	830.2	935.89	874.8	819.33	743.1	805.38	833.28	777.9	823.36	824.1	865.21
Salón social	868.31	808.64	910.47	851.7	796.08	722.7	783.06	810.96	756.3	801.04	802.2	841.96
<b>Total (kWh)</b>	<b>1984.93</b>	<b>1847.16</b>	<b>2081.03</b>	<b>1945.8</b>	<b>1820.63</b>	<b>1652.1</b>	<b>1789.94</b>	<b>1853.49</b>	<b>1728.9</b>	<b>1831.17</b>	<b>1833</b>	<b>1924.48</b>

*Nota. Elaboración propia.*

En el cuadro 34 y la Figura 70 compara la generación energética mensual de los paneles solares, calculada de dos formas: cálculos manuales (kWh) y cálculos realizados con el software Solarius PV (kWh). Se observa que ambos métodos producen resultados bastante cercanos en cuanto a la energía generada, lo que valida la precisión de los cálculos manuales. Sin embargo, hay ligeras diferencias mes a mes. Por ejemplo, en enero, el cálculo manual arroja una generación de 2,217.52 kWh, mientras que Solarius PV estima 1,984.93 kWh, mostrando una variación significativa en este mes. Lo mismo ocurre en febrero, con una diferencia notable de alrededor de 450 kWh entre ambos métodos.

En meses como julio y agosto, las diferencias son menos pronunciadas, con variaciones de solo unos 100 kWh. Noviembre y diciembre también presentan resultados similares, lo que indica que el software tiende a ajustarse mejor a las proyecciones manuales en ciertos meses. A nivel anual, la diferencia total entre los dos métodos es mínima: el cálculo manual da un total de 22,298.94 kWh, mientras que el software estima 22,292.63 kWh, una diferencia de apenas 6.31 kWh en el total.

Esto sugiere que, aunque el software puede ofrecer un mayor grado de precisión en algunos meses

específicos, el enfoque manual sigue siendo altamente confiable para estimar la generación total anual. Con este tipo de comparaciones también se resalta la utilidad de softwares como Solarius PV para optimizar el diseño y obtener proyecciones más precisas.

**Cuadro 34.**

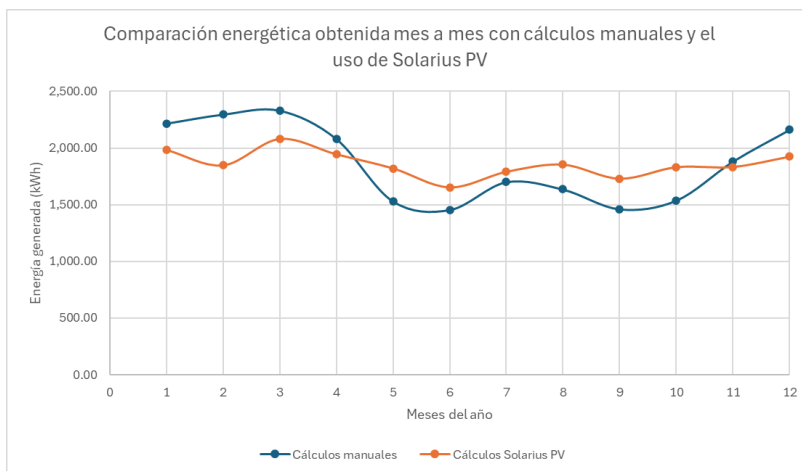
*Comparación de la energía generada con los dos métodos*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	TOTAL
Cálculo manual (kWh)	2,217.52	2,297.70	2,332.41	2,082.66	1,531.39	1,455.31	1,700.85	1,636.08	1,461.89	1,537.83	1,882.41	2,162.89	22,298.94
Cálculo realizado en Solarius PV (kWh)	1,984.93	1,847.16	2,081.03	1,945.80	1,820.63	1,652.10	1,789.94	1,853.49	1,728.90	1,831.17	1,833.00	1,924.48	22,292.63

*Nota. Elaboración propia.*

**Figura 70.**

*Comparación visual de la energía generada en Solarius PV y manuales*



*Nota. Elaboración propia.*

## VII. CONCLUSIONES

- El diseño del sistema de generación energética, basado en un consumo energético de diseño de 8,634.60 kWh, permitió definir un sistema compuesto por 20 paneles solares modelo ZXM8TPLDD132 Series de la marca ZNSHINE SOLAR, con una potencia individual de 0.617 kW y 9 aerogeneradores modelo Atlas 7 de la marca TESUP con una potencia individual de 1.895 kW. La potencia total instalada para el diseño híbrido interconectado es de 17.055 kW. El sistema diseñado garantiza la autosuficiencia energética de las áreas comunes, así como el suministro para servicios como el alumbrado público, el bombeo de agua y la planta de tratamiento de aguas residuales. El equipo logra una ocupación de área para la instalación de los paneles solares de 34.96%, la cual abarca la losa del salón social, losa de los vestidores y área de terreno natural. Mientras que la instalación de aerogeneradores ocupa un área de 33.35% del área considerada del muro de contención.
- El análisis de costos reveló que el proyecto tiene un costo total de Q271,238.11 para la implementación de los paneles solares y los aerogeneradores, considerando la adquisición de los equipos, la instalación de estos y la obra civil necesaria. Tras evaluar las opciones para la recuperación de la inversión, la opción en la cual el proyecto se paga al contado y el flujo de ingreso proviene de un 20% de la cuota de mantenimiento de los residentes se convierte en la más viable ya que permite un periodo de retorno de 12 meses. Este corto plazo de recuperación hace que sea la más atractiva financieramente, asegurando una rápida recuperación de la inversión inicial.
- El análisis de las condiciones climáticas promedio y del potencial solar y eólico del sector residencial permitió confirmar que la zona de Mixco, Guatemala, tiene un excelente potencial para la generación de energía renovable. Se determinó que el rendimiento fotovoltaico en el área es consistente, con una salida de energía específica (PVOUT) que oscila entre 4.48 y 4.75 kWh/kWp, lo que garantiza una producción estable y eficiente. Además, se obtuvo que la irradiancia global horizontal varía entre 5.38 y 5.75 kWh/m<sup>2</sup>, lo que confirma la alta disponibilidad de radiación solar a lo largo del año. Las horas solares promedio que se tienen a lo largo del año oscilan entre las 3.98 hasta las 6.36 horas, generando las variaciones mensuales en el aprovechamiento del recurso solar. En cuanto al potencial eólico, a una altura de 200 metros se observó una velocidad promedio del viento de 6.33 m/s y una densidad media de potencia de 239 W/m<sup>2</sup>, lo que sugiere que la zona es apta para la instalación de aerogeneradores. Además, las rosas de viento indicaron que el 55% del tiempo, los vientos provienen del norte con una constancia en un rango de velocidad entre 5.31 a 7.59 m/s, lo que garantiza una captación adecuada de energía eólica.

- La factibilidad de implementar equipos solares y eólicos en proyectos residenciales para satisfacer la demanda energética de los servicios públicos es altamente rentable, como lo refleja el Valor Presente Neto (VPN). El valor obtenido fue de Q1,424,417.10, con una cantidad de periodos evaluados de 25 años, un flujo de caja neto por año de Q.158,846.91 y una tasa de retorno del proyecto del 8%. Este valor confirma que la implementación de energías renovables es viable y proporciona beneficios económicos sustanciales a lo largo de los años.

## VIII. RECOMENDACIONES

Al residencial Vistas del Naranjo 2:

- Establecer un plan de implementación gradual, en la cual consideren implementar los equipos renovables por fases. De esta manera, la inversión del proyecto no se debe realizar a su totalidad desde un principio, y mientras se logra tener ahorros en las facturas energéticas mensuales, se obtiene capital para proceder con las siguientes fases del proyecto.
- Realizar estudios adicionales de la factibilidad técnica de instalar los equipos solares y eólicos. Para este estudio no se contaba con los planos estructurales de las losas donde se planificó instalar los paneles solares y los aerogeneradores. De este modo no se pudo evaluar la capacidad de soporte que tienen los elementos para conocer si la carga adicional que generan los equipos renovables son aceptables para la estructura. El realizar un estudio estructural de los elementos permitiría conocer la carga real que permite cada elemento y no afectaría ninguna infraestructura.
- Considerar la obtención de certificaciones verdes si se realiza la instalación de los equipos renovables. Certificaciones como LEED o EDGE avalan el uso de prácticas sostenibles en la gestión energética y la infraestructura. Obtener una certificación verde no solo aumentaría el valor de las propiedades del residencial, atrayendo a compradores o inquilinos, sino que también contribuiría a mejorar la imagen del residencial como un proyecto comprometido con la sostenibilidad y el bienestar ambiental.

A estudiantes que deseen realizar este tipo de investigaciones:

- Realizar un análisis de los consumos energéticos del lugar de estudio con un registro de por lo menos 2 años. Con mayor información del comportamiento del consumo energético se puede determinar de mejor manera las tendencias que se tienen en el sitio de estudio, y el diseño energético consideraría todas las fluctuaciones que se pueden generar a lo largo del año.
- Analizar la factibilidad de almacenamiento de energía para el diseño de sistemas híbridos energéticos. Incluir baterías o tecnologías similares permitiría evaluar cómo aprovechar el exceso de energía generada durante los picos de producción y garantizar un suministro estable en momentos de baja generación, asegurando así la viabilidad y sostenibilidad del sistema a largo plazo, y reduciría en mayor cantidad la dependencia del consumo de la red eléctrica.

## IX. REFERENCIAS

- AISA. (2024). *Panel solar de 550W monocristalino - Half cell*. AISA.
- AMM. (2023). *Energías renovables en Guatemala*. [https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2022/INFEST20220101\\_01\(FINAL\\_PDF\).pdf](https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2022/INFEST20220101_01(FINAL_PDF).pdf)
- Aroche, C. (2016). *Propuesta de proyecto de árboles solares en el Campus Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06\\_3966.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_3966.pdf)
- AutoSolar. (2021). *Conexión en serie y en paralelo de paneles solares*. <https://autosolar.pe/aspectostecnicos/conexion-en-serie-y-en-paralelo-de-paneles-solares>
- Bernal, A. (2019). *Diseño de un mini aerogenerador de 9 kW* [Tesis de licenciatura, Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7699/1/4141767-2019-2-IM.pdf>
- Berrezueta, A., & Encalada, J. (2014). *Análisis de los factores que afectan la demanda de energía eléctrica y su estimación: Sector residencial del área de concesión de la empresa eléctrica regional centro sur C.A, periodo 2002-2012* [Tesis de licenciatura, Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7699/1/4141767-2019-2-IM.pdf>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Termodinámica* (8.ª ed.). McGraw-Hill.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2016). *Curso sobre análisis costo-beneficio para proyectos de energías renovables*. [https://www.cepal.org/sites/default/files/courses/files/kr\\_1\\_acb\\_energias\\_renovables.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/courses/files/kr_1_acb_energias_renovables.pdf)
- Comisión Nacional de Energía Eléctrica [CNEE]. (2022). *Informe estadístico: Gerencia de fiscalización y normas*. <https://www.cnee.gob.gt/xhtml/informacion/Docs/INFORME%20ESTADI%CC%81STICO%20GFN%202021-2022.pdf>
- Administrador del Mercado Mayorista [AMM]. (2023). *Guatemala 2022: Demanda de energía a nivel departamental*. <https://rd.amm.org.gt/2023/03/29/guatemala-2022-demanda-de-energia-a-nivel-departamental>
- Durán, D. M. (2019). *Diseño y construcción de la góndola, tren de potencia y torre de un aerogenerador de 30 kW* [Tesis de licenciatura, Tecnológico Nacional de México]. <https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/1646/1/%2809%29TMCIE-2019-Diana%20Monserrat%20Dur%C3%A1n%20Mart%C3%ADnez.pdf>
- Eco Innovar. (2023). *Energía solar: ¿Cuáles son los usos más comunes?* <https://ecoinnovar.es/blog/usos-comunes-de-la-energia-solar>
- Enel Green Power. (2020). *Todas las ventajas de la energía solar*. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-solar/ventajas-energia-solar>

- Espitia, J., & Puerto, C. (2014). *Diseño y construcción de un mini aerogenerador de eje vertical* [Tesis de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13797/Libro.pdf>
- Expansión. (2016). *¿Cómo llega la electricidad a nuestras vidas?* <https://www.expansion.com/promociones/native/2016/11/09>
- FasterCapital. (2024). *¿Qué es la evaluación de costos?* <https://fastercapital.com/es/contenido/Que-es-la-evaluacion-de-costos.html>
- Forbes. (2022, enero 21). *El desarrollo de construcción inmobiliaria del país crece a pasos agigantados y su monto de facturación no disminuyó durante la crisis*. <https://forbescentroamerica.com/2022/01/21/el-desarrollo-de-construccion-inmobiliaria-del-pais-crece-a-pasos-agigantados-y-su-monto-de-facturacion-no-disminuyo-durante-la-crisis>
- García, D. (2014). *Cálculo y selección de una micro central hidroeléctrica empleando como fluido de trabajo un sistema de riego* [Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional]. [https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/13721/1/Tesis\\_1.pdf](https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/13721/1/Tesis_1.pdf)
- García, M. (2018). *Energía eléctrica: Conceptos y principios básicos*. <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/631150>
- Gasbarrino, S. (2023). *¿Qué es el valor presente neto?* HubSpot. <https://blog.hubspot.es/sales/que-es-valor-presente-neto>
- Gatica, K. (2019). *Uso de energía geotérmica de baja entalpía como alternativa para sistemas de calefacción de aguas en piscinas* [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0660\\_MT.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0660_MT.pdf)
- Guatemala Green Building Council [GGBC]. (2023). *Ciudad Cayalá LEED*. <https://www.guatemalagbc.org/proyectos-certificados-leed>
- Global Solar Atlas. (2023). *Photovoltaic power potential*. <https://globalsolaratlas.info/map>
- Global Wind Atlas. (2023). *Wind power potential*. <https://globalwindatlas.info/es/area/Guatemala>
- Gómez, G. (2012). *Influencia del módulo experimental de circuitos eléctricos en el rendimiento académico del curso de Física III en estudiantes del IV ciclo de la especialidad de Física de la Universidad Nacional de Educación* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. [https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/2368/G%C3%B3mez\\_fg.pdf](https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/2368/G%C3%B3mez_fg.pdf)
- Guevara, J. (2013). *Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica*. Terra.
- Guzmán, H. (2014). *Selección de aerogeneradores* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2014/enero/0707704/0707704.pdf>

- HENGJINGTR. (2024). *Turbina de viento de eje vertical 48V, 10000 W, generador de energía libre de turbina eólica pequeña con controlador adecuado para hogares (110V/220V)*. Amazon. <https://www.amazon.com/-/es/HENGJINGTR-vertical-generador-controlador-adequado/dp/B0D4Q448G5>
- Impulsa. (2023). *Crecimiento inmobiliario en Guatemala*. <https://impulsa.com.gt/crecimientoinmobiliario-en-guatemala>
- Instituto Nacional de Estadística [INE]. (2019). *Resultados Censo 2018*. <https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2021/11/19/202111192139096rGNQ5SfAlepmPGfYTovW9MF6X2turyT.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística [INE]. (2023). *La Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI)*. <https://www.ine.gob.gt/2023/10/04>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2011). *IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation*. Cambridge University Press.
- Martínez, L. (2018). *Estudio de eficiencia energética y propuestas de mejora de las instalaciones de taller y oficinas de la empresa Transvía S.L. en Quart de Poblet* [Trabajo de fin de máster, Universitat Politècnica de València]. <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/112105/Mart%C3%ADnez%20-%20ESTUDIO%20DE%20EFICIENCIA%20ENERG%C3%89TICA%20Y%20PROPUESTAS%20DE%20MEJORA%20DE%20LAS%20INSTALACIONES%20DE%20TALLER>.
- Merino, L. (2007). *Las energías renovables*. Editorial Síntesis.
- Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Energía solar en Guatemala*. <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2017/11/Energ%C3%ADa-Solar-en-Guatemala.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Las energías renovables en la generación eléctrica en Guatemala*. <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/07/Energ%C3%ADas-Renovables-en-Guatemala.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas. (2021). *Índice de cobertura eléctrica*. <https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2022/02/Indice-de-Cobertura-Electrica-2021-01.pdf>
- Mírez, J. (2011). *La rosa de vientos: Frecuencia, velocidad y energía*. <https://jmirez.wordpress.com/2011/07/15/j281-la-rosa-de-vientos-frecuencia-velocidad-y-energia>
- Morales, A. (2022). *Dimensionamiento e implementación de paneles fotovoltaicos aplicados al área residencial en un sector costero de la provincia del Guayas, Ecuador* [Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22499/1/UPS-GT003707.pdf>
- Moreno, P. (2013). *Energía eólica: Ventajas y desventajas de su utilización en Colombia* [Monografía de grado, Universidad Libre]. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10602/Monograf%C3%ADa.pdf>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO]. (2023). *El Consejo de ministros aprueba un Real Decreto-ley para dar certidumbre al marco retributivo de las energías renovables e impulsar una transición energética justa*. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/prensa/>

- Condado Naranja. (2023). *Condado Naranja, una comunidad LEED*.  
<https://www.condadonaranja.com/leed>
- Grupo Onyx. (2023). *Grupo Onyx presenta Ferré, su primer proyecto de vivienda vertical en la ciudad*.  
<https://grupoonyx.com.gt/grupo-onyx-presenta-ferre-su-primer-proyecto-de-vivienda-vertical-en-la-ciudad-2>
- Orozco, A. (2014). *Diseño de investigación de sistema de generación por medio de aerogenerador de turbina eólica, para suministro de electricidad a un sistema de bombeo de agua del municipio de Mixco* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala].  
[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0869\\_EA.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0869_EA.pdf)
- Orts, S., & Seguí Chilet, G. (2018). *Introducción a las instalaciones solares fotovoltaicas de conexión a la red de suministro*. Universitat Politècnica de València.
- Pérez, J. (2014). *Análisis de viabilidad financiera de inversión en energía de fuente solar fotovoltaica en el departamento de Jutiapa de la República de Guatemala* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/03/03\\_4917.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/03/03_4917.pdf)
- Pirique, H. (2013). *Estudio de factibilidad de realización de un proyecto de energía eólica, a realizarse en el Instituto Tecnológico Universitario Guatemala-Sur (ITUGS) de Palín, Escuintla* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala].  
[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_2681\\_IN.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2681_IN.pdf)
- Plataforma Solar. (2020). *Estimación de la producción de energía eléctrica en base a la velocidad de viento registrado en la estación meteorológica ubicada en el campus sur de la sede Quito de la Universidad Politécnica Salesiana* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana].  
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18563/1/UPS%20-%20ST004492.pdf>
- Plataforma Solar. (2022). *Cómo calcular tu consumo diario de electricidad para determinar cuántos paneles solares necesitas instalar*. <https://blog.plataformasolar.cl/como-calcular-tu-consumo-diario-de-electricidad-para-determinar-cuantos-paneles-solares-necesitas-instalar>
- PowerStar. (2024). *Generador de turbina eólica 3000W MPPT DC 12V/24V/48V controlador híbrido kit de molino de viento*. eBay. <https://www.ebay.com/itm/145996033487>
- ResearchGate. (2022). *Horizon line draw – legal time*. [https://www.researchgate.net/figure/Horizonline-drawing-with-the-sun-path-inMaan-Development-Area-during-the-day-time\\_fig3\\_334282552](https://www.researchgate.net/figure/Horizonline-drawing-with-the-sun-path-inMaan-Development-Area-during-the-day-time_fig3_334282552)
- Salgado, L. (2019). *Precio de la electricidad en América Latina*. CEMERI. <https://cemer.org/mapas/mcuanto-cuesta-electricidad-latinoamerica-kt>
- Sánchez, J. (2022). *Evaluación de la implementación de un sistema fotovoltaico para la iluminación de servicios generales de aulas y áreas comunes, en el centro universitario del sur, departamento de Escuintla* [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala].  
[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0858\\_MT.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0858_MT.pdf)
- SensorFact. (2024). *Periodo de recuperación de las inversiones: ¿Cómo y por qué calcularlo?*  
<https://www.sensorfact.es/blog/periodo-de-recuperacion-de-las-inversiones-como-y-por-quecalcularlo>

- Shelquist, R. (2019). *An introduction to air density and density altitude calculations [Una introducción al cálculo de la densidad del aire y la densidad de altura]*. [https://wahiduddin.net/calc/density\\_altitude.htm](https://wahiduddin.net/calc/density_altitude.htm)
- Sistema de la Integración Centroamericana [SICA]. (2017). *Guatemala le apuesta a la energía renovable con un parque eólico muy cerca de la ciudad*. <https://www.sica.int/busqueda/Noticias.aspx?IDItem=107822&IDCat=3&IdEnt=1225&Idm=1&IdmStyle=1>
- SolarAnywhere. (2019). *Definiciones de datos solares*. <https://www.solaranywhere.com/es/support/data-fields/definitions/#ghi>
- SolarAnywhere. (2021). *Gráficas de recorridos solares*. <https://www.seiscubos.com/conocimiento/graficas-de-recorridos-solares>
- Solar Mayorista. (2024). *Paneles solares PERC*. Solar Mayorista.
- SunPower. (2024). *Paneles solares SunPower Maxeon*. SunPower.
- TESUP. (2024). *¡Conozca los nuevos TESUP Atlas 7 y X7, los aerogeneradores más preferidos del mundo!* <https://tesup.com/es/blogs/post/conozca-los-nuevos-tesup-atlas-7-y-x7-las-turbinas-eolicas-mas-preferidas-del-mundo>
- The New York Times. (2023). *La inflación sigue alta. Sus causas han cambiado*. [https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2022/INFEST20220101\\_01\(FINAL\\_PDF\).pdf](https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2022/INFEST20220101_01(FINAL_PDF).pdf)
- Twenergy. (2019). *Desventajas de la energía solar*. <https://twenergy.com/energia/energia-solar/desventajas-de-la-energia-solar>
- Viera, J. (2021). *Diseño e implementación de un sistema de generación de energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas ubicada en las riveras del río Payamino de la ciudad del Coca para la empresa Orellana Turismo EP* [Tesis de maestría, Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/33707/1/Tesis%20I.%20M.%20655%20-%20Viera%20%20Andi%20Jonathan%20%20Andr%C3%A9s.pdf>
- Zhang, T. (2017). *What's a good value for kWh/kWp? An overview of specific yield [¿Cuál es un buen valor de kWh/kWp? Una visión general del rendimiento específico]*. *Solar Power World*. <https://www.solarpowerworldonline.com/2017/08/specific-yield-overview>

## **X. APÉNDICES**

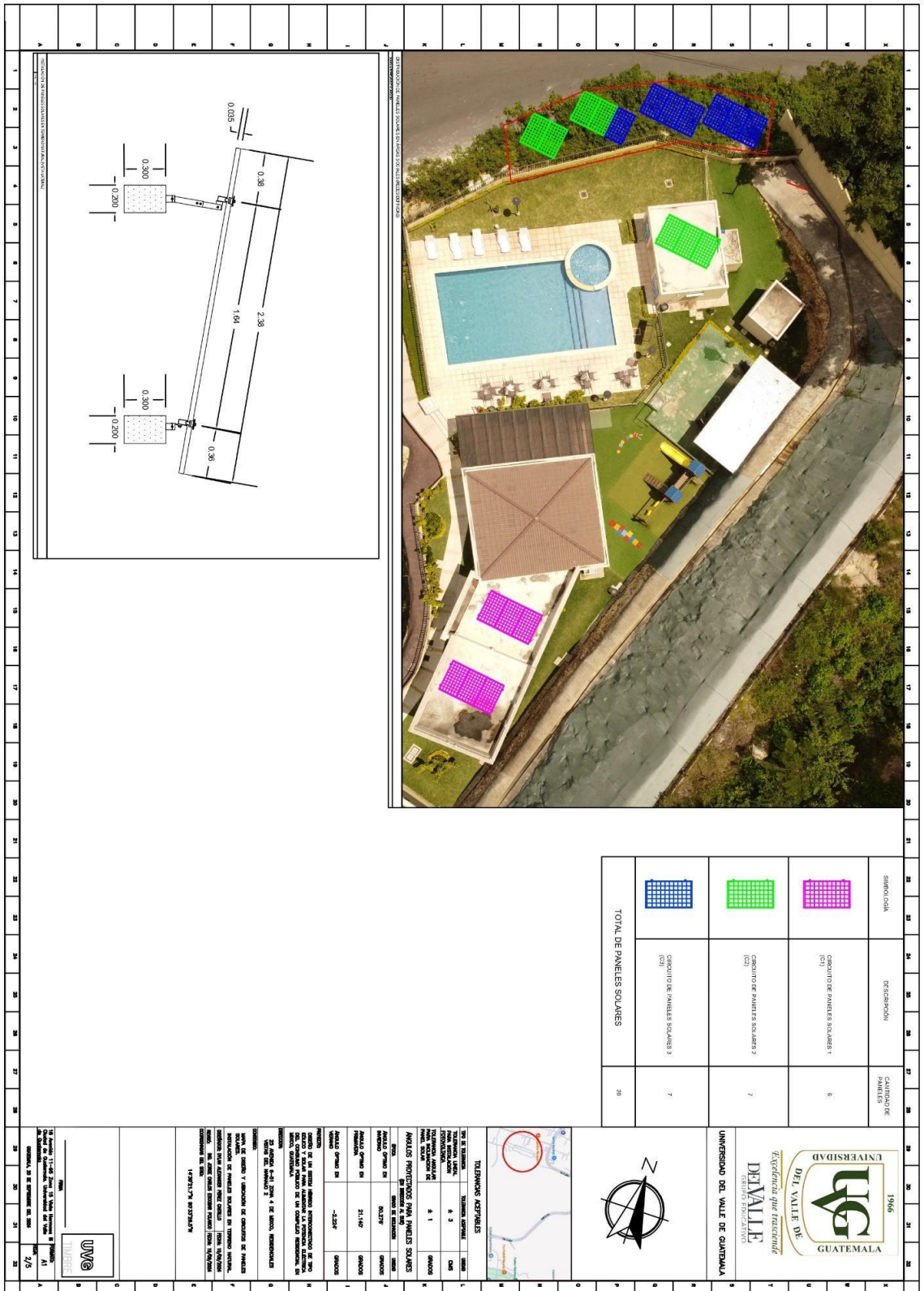
### **A. Planos generales del diseño solar y eólico**

En el presente apéndice se incluyen los planos generales correspondientes al diseño del sistema híbrido solar y eólico. Estos documentos técnicos presentan la distribución de los paneles solares en las áreas designadas del complejo residencial, así como la ubicación estratégica de las turbinas eólicas para un aprovechamiento óptimo del recurso viento. Asimismo, se incorporan los diagramas unifilares de conexión que muestran la interrelación entre los equipos de generación, los sistemas de protección, los inversores y la red eléctrica, garantizando la claridad en la instalación y el mantenimiento futuro. Los planos sirven como referencia integral para la ejecución del proyecto, asegurando que la disposición física y eléctrica de los componentes cumpla con las normas técnicas, criterios de seguridad y estándares de eficiencia energética establecidos. Todos los planos fueron realizados por elaboración propia.



**Figura 72.**

*Plano de ubicación de circuitos de paneles solares*



**Figura 73.**

*Plano de ubicación de turbinas eólicas*

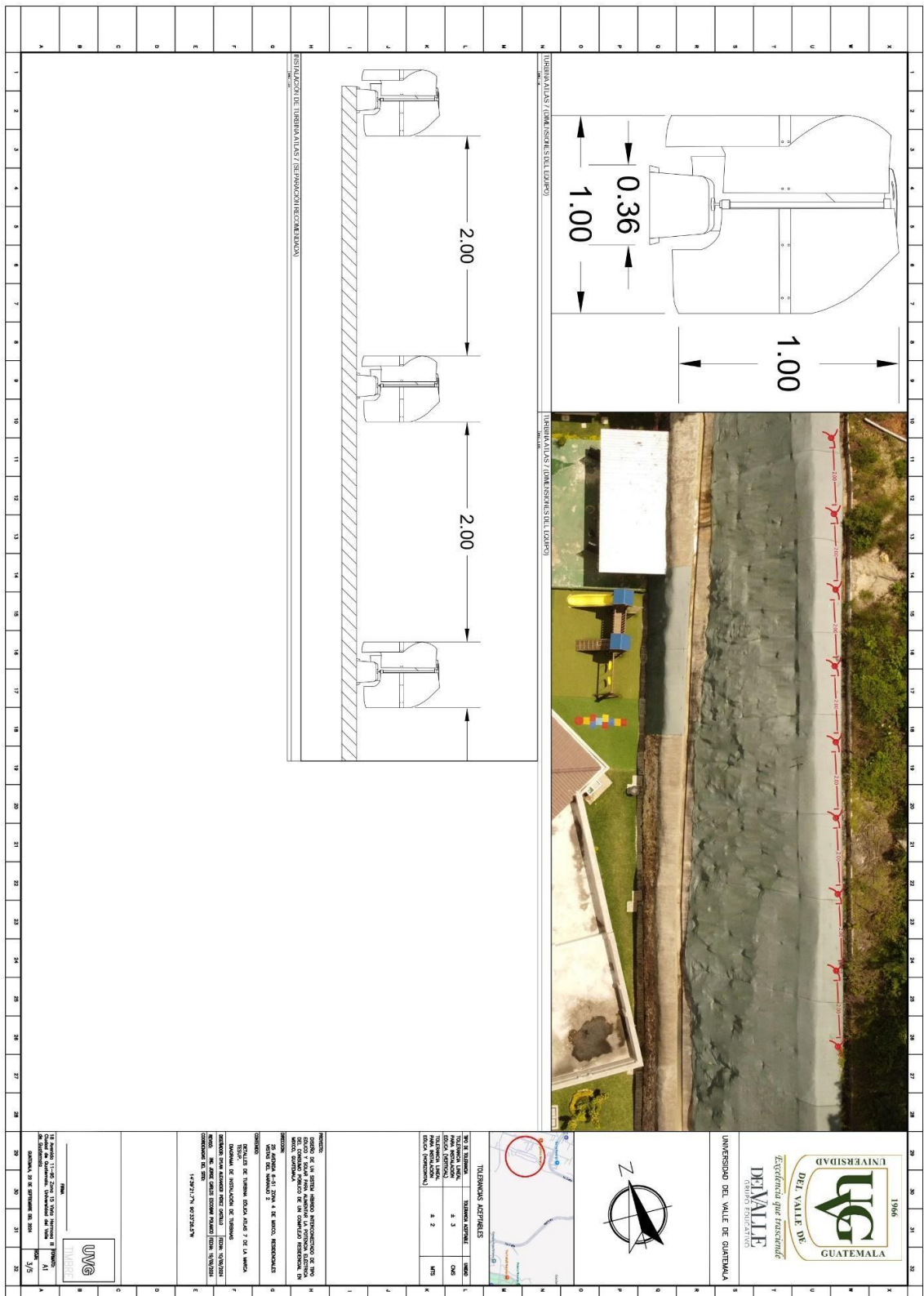
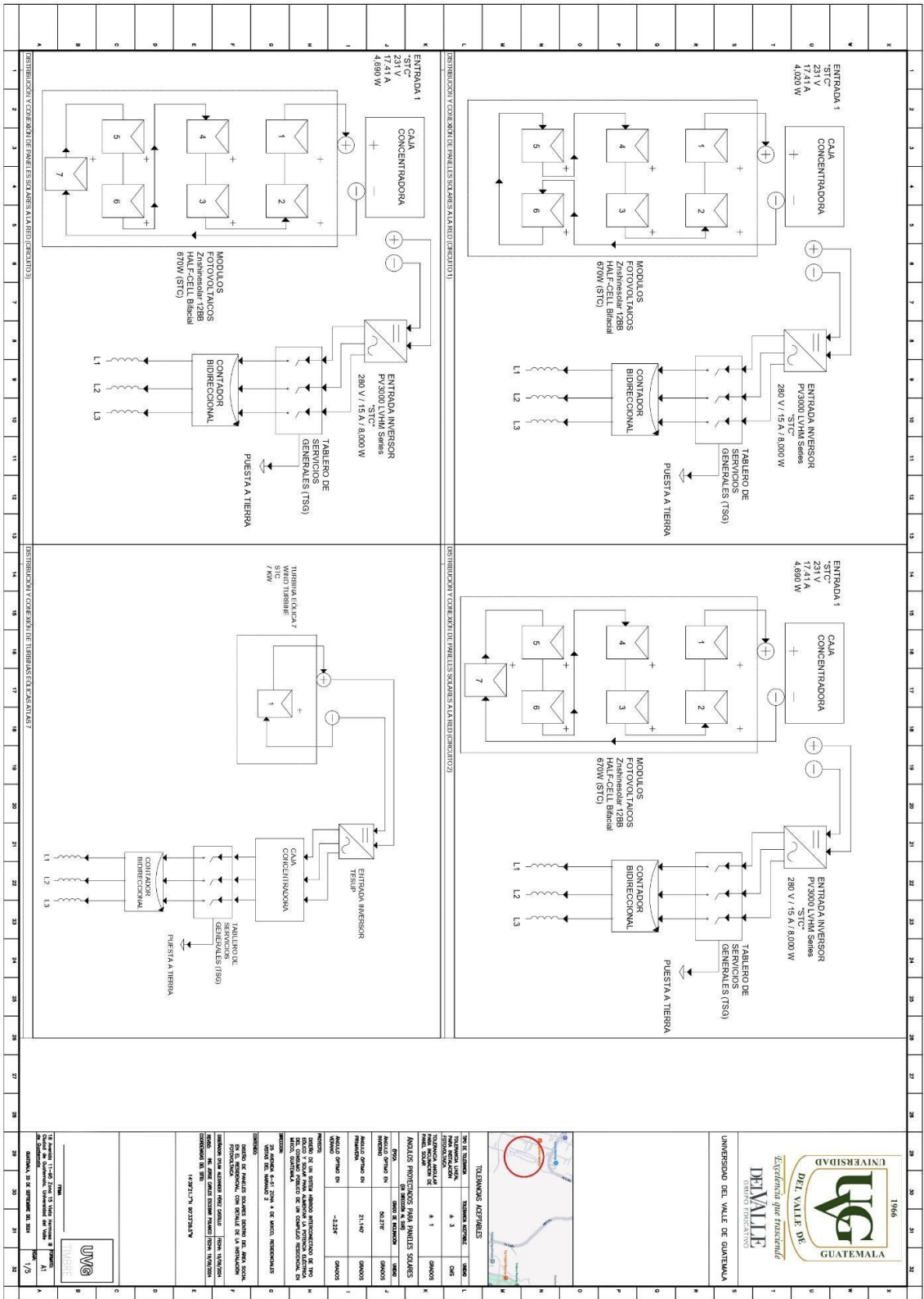




Figura 75.

Diagramas unifilares del proyecto



## **B. Presupuesto del proyecto**

El presupuesto del proyecto contempla los costos asociados a la adquisición, instalación y puesta en marcha del sistema híbrido solar–eólico diseñado para el complejo residencial. Se incluyen los precios de los paneles solares, turbinas eólicas, inversores, estructuras de soporte, cableado y sistemas de protección, así como la mano de obra necesaria para su instalación. Adicionalmente, se consideran los costos indirectos relacionados con estudios técnicos, transporte, permisos y supervisión de obra. El análisis económico incorpora tanto los costos iniciales de inversión como los gastos de operación y mantenimiento, permitiendo estimar la rentabilidad del sistema mediante indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión. Este presupuesto constituye una herramienta fundamental para evaluar la viabilidad técnica y económica del proyecto, garantizando que su ejecución sea sostenible en el tiempo.

**Figura 76.**

*Presupuesto general del proyecto*

**Universidad del Valle de Guatemala**

18 Avenida 11-95 Guatemala, Universidad del Valle de Guatemala, Cdad. de Guatemala



**Diseño de un sistema híbrido interconectado de tipo eólico y solar para alimentar la potencia eléctrica del consumo público de un complejo residencial en Mixco, Guatemala**

**Datos**  
Dylan Alexander Pérez Castillo  
19521

Ubicación del proyecto:  
25 avenida 6-51, Mixco. Residenciales Vistas del Naranjo 2

Presupuesto	Fecha
<b>A-001</b>	<b>20/09/2024</b>
Revisado por	Fecha
<b>Ing. Jorge Carlos Escobar</b>	<b>20/09/2024</b>

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (Q)	Total (Q)
<b>PANELES SOLARES E INSTALACIÓN</b>				
Panel solar Zshinesolar 12BB HALF-CELL Bifacial	20	U	1,045.20	20,904.00
Perfil NextRail 4.2m, mill finish, Aluminio 6105-T6	14	U	297.25	4,161.56
Kit 2 Abrazaderas universal panel con marco de 30-46mm	24	U	120.00	2,880.00
Terminal de conexión a tierra para Next-Rail	7	U	45.00	315.00
Clips de Plástico para 2 cables, Next-Rail (Kit de 5 unidades)	4	U	10.92	43.68
Soporte frontal ajustable para Next-Rail	16	U	62.25	996.03
Soporte trasero ajustable 10-20° para Next-Rail	16	U	135.95	2,175.26
Mano de obra por instalación por panel solar	20	U	275.00	5,500.00
Inversor PV3000 LVHM Series Marca MUST ENERGY	3	U	2,708.75	8,126.25
Tubería EMT de 2" empotrada en muro para electricidad (por 3 metro lineales)	5	U	92.67	463.35
Excavación a mano en suelo natural para zanja de 0.40m de ancho x 0.50m de profundidad	56.4	ML	68.50	3,863.40
Tubería ø2" 80 PSI-6m con cinta de proteccion roja o amarilla, y proteccion de lodocreto sobre la misma, con guia calibre 12	56.4	ML	35.00	1,974.00
Llenado de zanja con material orgánico	56.4	ML	34.50	1,945.80
Cajas prefabricadas de 0.40x 0.60 de concreto para electricidad	7	U	1,125.00	7,875.00
Cable de cobre calibre #10 para líneas	148.8	ML	6.16	916.61
Cable de cobre calibre #14 para tierra	48	ML	2.59	124.32
Bases de concreto para estructura de paneles solares en terreno natural (altura 0.4m x ancho 0,35m)	32	U	225.00	7,200.00
Mano de obra + equipo de instalación de inversores	3	U	425.00	1,275.00
Caja concentradora ECO-WORTHY 6 String PV Combiner Box & 63A Circuit Breakers	3	U	1,819.00	5,457.00
Abrazadera galvanizada para tubo de 2 pulgadas	45	U	4.80	216.00
<b>TURBINAS EÓLICAS E INSTALACIÓN</b>				
Turbina eólica Atlas 7 (de 7kW de potencia STC) con inversor	9	U	19,500.00	175,500.00
Tubería EMT de 2" empotrada en losa para electricidad (por 3 metro lineales)	49	U	92.67	4,540.83
Excavación a mano en suelo natural para zanja de 0.40m de ancho x 0.50m de profundidad	2.83	ML	68.50	193.86
Tubería ø2" 80 PSI-6m con cinta de proteccion roja o amarilla, y proteccion de lodocreto sobre la misma, con guia calibre 12	2.83	ML	35.00	99.05
Llenado de zanja con material orgánico	2.83	ML	34.50	97.63
Cajas prefabricadas de 0.40x 0.60 de concreto para electricidad	1	U	1,125.00	1,125.00
Cable de cobre calibre #10 para líneas	148	ML	6.16	911.68
Cable de cobre calibre #14 para tierra	120	ML	2.59	310.80
Bases de concreto para base de turbinas (altura 0.4m x ancho 0,4m)	9	U	260.00	2,340.00
Mano de obra + equipo de instalación de inversores	10	U	425.00	4,250.00
Caja concentradora ECO-WORTHY 6 String PV Combiner Box & 63A Circuit Breakers	3	U	1,819.00	5,457.00
<b>SUBTOTAL</b>				<b>271,238.11</b>
<b>TOTAL</b>				<b>Q 271,238.11</b>

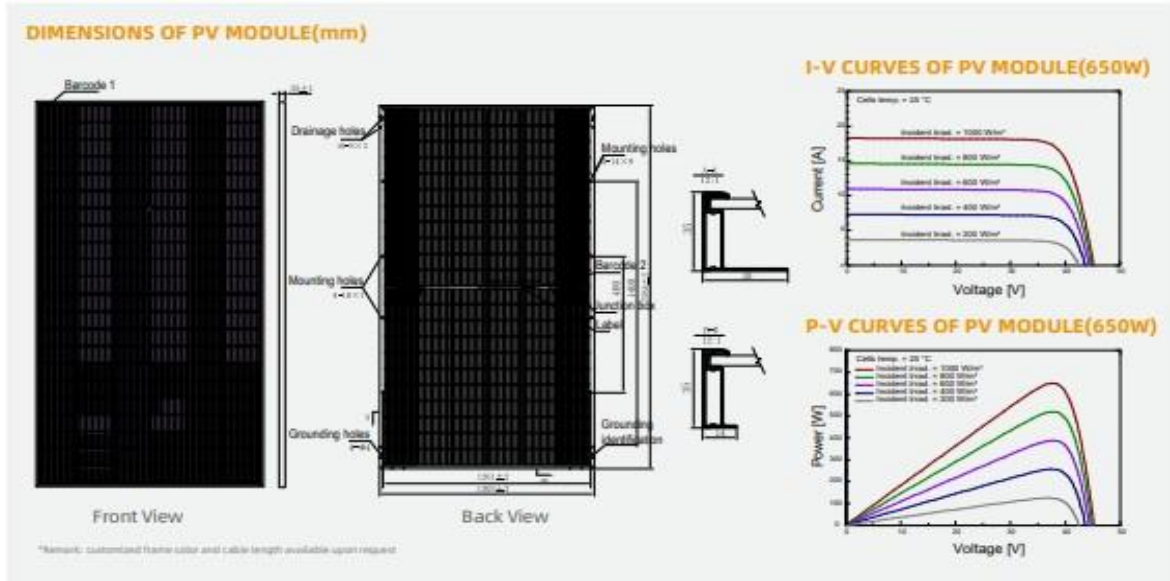
### **C. Fichas técnicas de los equipos**

En este apartado se presentan las fichas técnicas correspondientes a los equipos principales del sistema híbrido: paneles solares fotovoltaicos y aerogeneradores. Dichos documentos proporcionan información detallada sobre las características eléctricas, mecánicas y de desempeño de cada componente, tales como potencia nominal, eficiencia, voltaje de operación, corriente máxima, rango de temperaturas, dimensiones físicas, peso y materiales de fabricación. Además, incluyen las curvas de rendimiento y parámetros de garantía establecidos por los fabricantes, los cuales son fundamentales para evaluar la calidad y confiabilidad de los equipos seleccionados. La inclusión de estas fichas técnicas asegura la transparencia en el proceso de diseño, facilita la correcta instalación y mantenimiento de los sistemas, y constituye un respaldo técnico para la validación de la viabilidad del proyecto.

Figura 77.

Ficha técnica panel solar ZXM8-TPLDD132

ZXM8-TPLDD132 Series | Zshinesolar 12BB HALF-CELL Bifacial  
Double Glass Monocrystalline PERC PV Module



**ELECTRICAL CHARACTERISTICS | STC\***

Nominal Power Watt Pmax(W)*	645	650	655	660	665	670
Power Output Tolerance Pmax(%)	0→+3	0→+3	0→+3	0→+3	0→+3	0→+3
Maximum Power Voltage Vmp(V)	37.50	37.70	37.90	38.10	38.30	38.50
Maximum Power Current Imp(A)	17.21	17.25	17.29	17.33	17.37	17.41
Open Circuit Voltage Voc(V)	45.00	45.20	45.40	45.60	45.80	46.00
Short Circuit Current Isc(A)	18.22	18.27	18.32	18.37	18.42	18.47
Module Efficiency (%)	20.76	20.92	21.09	21.25	21.41	21.57

\*The data above is for reference only and the actual data is in accordance with the practical testing.  
\*STC (Standard Test Condition: Irradiance 1000W/m², Module Temperature 25°C, AM 1.5)  
\*Measuring tolerance: ±3%

**MECHANICAL DATA**

Solar cells	Mono PERC
Cells orientation	132 (6x22)
Module dimension	2384x1303x35 mm (with Frame)
Weight	38.5±1.0 kg
Glass	2.0 mm+2.0mm, High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Junction box	IP 68, 3 diodes
Cables	4 mm², 350 mm (with Connectors)
Connectors*	MC4-compatible

\*Please refer to regional datasheet for specific connector

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS | NMO†**

Maximum Power Pmax(Wp)	484.90	488.60	492.30	496.10	499.80	503.60
Maximum Power Voltage Vmpp(V)	35.00	35.20	35.40	35.60	35.70	35.90
Maximum Power Current Imp(A)	13.84	13.88	13.92	13.95	13.99	14.03
Open Circuit Voltage Voc(V)	42.30	42.40	42.60	42.80	43.00	43.20
Short Circuit Current Isc(A)	14.71	14.75	14.79	14.83	14.87	14.91

†NMO† irradiance 900W/m², Ambient Temperature 25°C, AM 1.5, Wind Speed 1m/s

**TEMPERATURE RATINGS**

NMO†	43°C ±2°C
Temperature coefficient of Pmax	-0.34%/°C
Temperature coefficient of Voc	-0.20%/°C
Temperature coefficient of Isc	0.05%/°C
Refer. Bifacial Factor	70±5%

**WORKING CONDITIONS**

Maximum system voltage	1500 V DC
Operating temperature	-40°C→+85°C
Maximum series fuse	35 A
Front Side Maximum Static Loading	Up to 5400Pa
Rear Side Maximum Static Loading	Up to 2400Pa

\*Do not connect fuses in container box with bus or those strings in parallel connection

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS WITH 25% REAR SIDE POWER GAIN\***

Front power Pmax/W	645	650	655	660	665	670
Total power Pmax/W	806	813	819	825	831	838
Vmp/V[Total]	37.60	37.80	38.00	38.20	38.40	38.60
Imp/A[Total]	21.44	21.49	21.55	21.60	21.65	21.70
Voc/V[Total]	45.10	45.30	45.50	45.70	45.90	46.10
Isc/A[Total]	22.70	22.77	22.83	22.89	22.96	23.02

\*Measuring tolerance: The additional gain from the backside is reported in the given of the third side under standard condition.  
\*Reference irradiance 1000W/m², Temp. 25°C, AM 1.5, wind speed 1m/s

**PACKAGING CONFIGURATION \*\***

Piece/Box	31
Piece/Container(40HQ)	558

\*Remark: Electrical data in this catalog sheet refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.  
\*\*Customized packaging is available upon request.  
Caution: Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

Add : 16, Zhixi Industrial Zone, Jintan/Jiangsu 213251, P.R. China Tel: +86 519 6822 0253 E-mail: info@zshinesolar.com

Note: Specifications included in this datasheet are subject to change without notice. ZNSHINE reserves the right of final interpretation © ZNSHINE SOLAR 2021 | Version: ZXM8-TPLDD132 2112.E  
No special undertaking or warranty for the suitability of special purpose or being installed in extraordinary surroundings is granted unless as otherwise specifically committed by manufacturer in contract document

Nota. Obtenido de ZNSHINE Solar

**Figura 78.**

*Ficha técnica turbina eólica Atlas 7*



TESUP Electronics Ltd. All rights reserved. ©2024 | tesup.com

The Book | 118

**PARAMETER & DIMENSIONAL DETAILS**

SPECIFICATIONS	
Designation	24V to 48V (Regulated by the Charge Controller)
<b>GENERATOR</b>	
Type	7kW vertical axis wind permanent magnet generator
Weight	24.5 kg (54 lbs)
Max. Power	7kW
Operating Circuit Voltage	0-220V
Current	3-Phase
Start Of Charging	3 m/s
Base Plate Material	Metal
Direction Of Rotation	Clockwise
Test Standards	EN 61000-6-1 (electromagnetic compatibility - immunity) EN 61000-6-3 (electromagnetic compatibility - emissions)
<b>ROTOR BLADES</b>	
Material	Aluminium
Diameter	1200 mm (3.93 Feet)
Weight Per Rotor Blades	750 g (1.65 lbs)
Direction Of Rotation	Clockwise
Starting Wind Speed	4 m/s (3 m/s afterwards)
No. Of Blades	3
Max Rpm	950
Max Wind Speed	20 m/s
Noise	30 dB

*Nota. Obtenido de Tesup*

Figura 79.

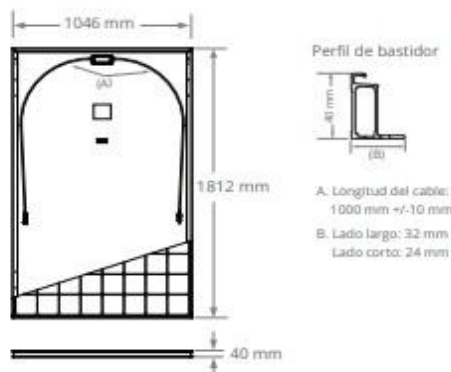
Ficha técnica panel solar Maxeon 3

**MAXEON 3 POTENCIA: 415-430 W | EFICIENCIA: Hasta un 22,7%**

Datos eléctricos			
	SPR-MAX3-430	SPR-MAX3-425	SPR-MAX3-415
Potencia nominal (P <sub>nom</sub> ) <sup>2</sup>	430 W	425 W	415 W
Tolerancia de potencia	+5/0%	+5/0%	+5/0%
Eficiencia de los paneles	22,7%	22,4%	21,9%
Tensión nominal (V <sub>mpp</sub> )	70,4 V	70,0 V	69,2 V
Intensidad nominal (I <sub>mpp</sub> )	6,11 A	6,07 A	6,00 A
Tensión de circuito abierto (V <sub>oc</sub> ) (+/-3)	81,4 V	81,3 V	81,2 V
Intensidad de cortocircuito (I <sub>sc</sub> ) (+/-3)	6,57 A	6,57 A	6,55 A
Máx. tensión del sistema	1000 V IEC		
Fusible de serie máxima	20 A		
Coef. potencia-temperatura	-0,27% / °C		
Coef. tensión-temperatura	-0,236% / °C		
Coef. intensidad-temperatura	0,058% / °C		

Condiciones de funcionamiento y datos mecánicos	
Temperatura	-40°C a +85°C
Resistencia a impactos	Granizo de 25 mm de diámetro a 23 m/s
Células solares	112 Maxeon Gen 3 monocristalino
Cristal templado	Templado antirreflectante de alta transmisión
Caja de conexión	IP-68, Staubli (MC4), 3 diodos de derivación
Peso	21,2 kg
Máx. carga <sup>6</sup>	Viento: 2400 Pa, 244 kg/m <sup>2</sup> en cara frontal y posterior Nieve: 5400 Pa, 550 kg/m <sup>2</sup> en cara frontal
Bastidor	Anodizado negro de clase 1 (máxima calificación AAMA)

Garantías, certificaciones y conformidad	
Pruebas estándar <sup>3</sup>	IEC 61215, IEC 61730
Certificados de gestión de calidad	ISO 9001:2015, ISO 14001:2015
Prueba de amoníaco	IEC 62716
Prueba de soplado de arena	IEC 60068-2-68, MIL-STD-810G
Prueba de niebla salina	IEC 61701 (máxima severidad)
Prueba PID	1000 V: IEC 62804
Normas disponibles	TUV
Etiqueta Declare IFLI	Primer panel solar con etiquetado para la transparencia de ingredientes y el cumplimiento de LBC. <sup>4</sup>
Cradle to Cradle Certified™ Bronze.	Primera línea de paneles solares con certificado por la salud de los materiales, administración del agua, reutilización de materiales, uso de energía renovable y manejo de carbono y justicia social. <sup>5</sup>
Contribución a la certificación del Green Building Council	Los paneles pueden aportar puntos adicionales para la obtención de las certificaciones LEED y BREEAM.
Conformidad con EHS	RoHS (pendiente), OHSAS 18001:2007, sin plomo, REACH SVHC:163 (pendiente)



Declare.



Lea las instrucciones de seguridad e instalación. Visite [www.sunpower.maxeon.com/Int/PV/InstallGuide/EC](http://www.sunpower.maxeon.com/Int/PV/InstallGuide/EC). La versión en papel se puede solicitar a través de [soportetecnico@maxeon.com](mailto:soportetecnico@maxeon.com).

1 La garantía de 40 años no está disponible en todos los países ni para todas las instalaciones y requiere registro; de lo contrario, se aplica nuestra garantía de 25 años.  
2 Condiciones de prueba estándar (irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>, AM 1,5, 25 °C). Estándar de calibración de NREL: intensidad según SOMS, tensión según LACCS FF.  
3. Calificación antiincendios de clase C según IEC 61730.  
4 Los paneles Maxeon DC fueron los primeros en recibir la etiqueta Declare del International Living Future Institute en 2016.  
5 Los paneles SunPower Maxeon DC cuentan con la certificación Cradle to Cradle Certified™ Bronze - [www.c2ccertified.org/products/scorecard/e-series\\_x-series\\_solar\\_panels\\_-\\_sunpower\\_corporation](http://www.c2ccertified.org/products/scorecard/e-series_x-series_solar_panels_-_sunpower_corporation).  
Cradle to Cradle Certified™ es una marca de certificación con licencia del Cradle to Cradle Products Innovation Institute.  
6 Factor de seguridad 1.5 incluido.

Fabricado en Filipinas (células)  
Montado en Malasia (módulos)  
Las especificaciones incluidas en esta ficha técnica están sujetas a cambios sin previo aviso.  
©2022 Maxeon Solar Technologies. Todos los derechos reservados. Consulte la información sobre la garantía, patentes y marcas comerciales en [maxeon.com/legal](http://maxeon.com/legal).

**SUNPOWER**  
FROM MAXEON SOLAR TECHNOLOGIES

544455 REV A / A4\_ES  
Fecha de publicación: Marzo 2022

Nota. Obtenido de SunPower

Figura 80.

Ficha técnica panel solar Maxeon 6 AC.

**MAXEON 6 AC POTENCIA: 410-425 W | EFICIENCIA: Hasta un 22,0%**

Datos eléctricos de CA	
Modelo de inversor: IQ 7A	A 230 V CA
Potencia máxima de salida	366 VA
Máx. potencia de salida continua	349 VA
Rango/Tensión nom. (L-N)	219 - 264 V
Máx. corriente de salida continua	1,52 A
Máx. unidades por circuito derivado de 20 A (L-N)	10
Eficiencia ponderada <sup>2</sup>	96,5%
Frecuencia nominal	50 Hz
Rango de frecuencia ampliado	45-55 Hz
Corriente de fallo de cortocircuito de CA durante 3 ciclos	5,8 A rms
Puerto de CA de clase de sobretensión	III
Corriente de retroalimentación del puerto de CA	18 mA
Ajuste del factor de potencia	1,0
Factor de potencia (ajustable)	0,8 adelante/0,8 retardo

Datos de alimentación de CC			
	SPR-MAX6-425- BLK-E4-AC	SPR-MAX6-415- BLK-E4-AC	SPR-MAX6-410- BLK-E4-AC
Potencia nominal <sup>3</sup> (P <sub>nom</sub> )	425 W	415 W	410 W
Tol. de potencia	+5/0%	+5/0%	+5/0%
Eficiencia del módulo	22,0%	21,5%	21,2%
Coef. temp. (Potencia)	- 0,29%/°C		
Tol. de sombra	Seguimiento del punto de máxima potencia del nivel del módulo integrado		

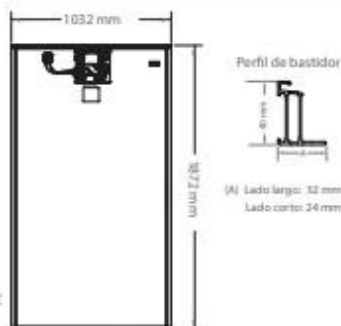
Datos mecánicos	
Células solares	66 células monocristalinas Maxeon Generación 6
Cristal frontal	Cristal templado antirreflejos de gran transmisividad
Clasificación ambiental	Microinversor con clasificación para exteriores - IP67 (UL: NEMA tipo 6)
Marco	Anodizado negro de clase 1
Peso	21,8 kg

Condiciones de funcionamiento probadas	
Temperatura de funcionamiento	De - 40 °C a +60 °C
Máx. temperatura ambiente	50 °C
Humedad relativa	Del 4 % al 100 % (con condensación)
Máx. altitud	2000 m
Carga de diseño <sup>4</sup>	Viento: 3600 Pa, 367 kg/m <sup>2</sup> en cara posterior
	Nieve: 5400 Pa, 551 kg/m <sup>2</sup> en cara frontal
Resistencia a impactos	Granizo de 25 mm de diámetro a 23 m/s
Carcasa del microinversor	Carcasa polimérica clase II, doble aislamiento, resistente a la corrosión

Garantías, certificaciones y conformidad	
Garantías <sup>1</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Garantía de potencia limitada durante 40 años</li> <li>Garantía de producto limitada durante 40 años</li> </ul>
Garantía de microinversores	<ul style="list-style-type: none"> <li>Garantía de producto limitada durante 25 años cubierta por la garantía Enphase<sup>5</sup></li> </ul>
Certificaciones y conformidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>IEC 61215, 61730<sup>6</sup></li> <li>IEC 62109-1, 62109-2</li> <li>IEC 61000-6-3</li> <li>AS4777.2, RCM</li> <li>IEC/EN 50549-1:2019, G98/G99</li> <li>VDE-AR-N-4105</li> </ul>
Certificados de gestión de calidad	ISO 9001:2015, ISO 14001:2015
Prueba PID (degradación inducida por potencia)	1000 V: IEC 62804
Prueba LeTID	Versión preliminar IEC 61215 <sup>7</sup>
Normas disponibles	TUV <sup>8</sup> , EnTest
Contribución a la certificación del Green Building Council	Los paneles pueden aportar puntos adicionales para la obtención de las certificaciones LEED y BREEAM
Conformidad con EHS	RoHS, DHSAS 18001:2007, REACH SVHC:201



Veillez lire les instructions de sécurité et d'installation.  
 Veuillez consulter  
[www.sunpower.maxeon.com/int/InstallGuideACModules](http://www.sunpower.maxeon.com/int/InstallGuideACModules).  
 La version papier peut être demandée à l'adresse suivante :  
[supportetecnico@maxeon.com](mailto:supportetecnico@maxeon.com).

**SUNPOWER**  
 FROM MAXEON SOLAR TECHNOLOGIES

546817 REV A / A4\_ES  
 Fecha de publicación: Agosto 2022

- 1 La garantía de 40 años no está disponible en todos los países ni para todas las instalaciones y requiere registro; de lo contrario, se aplica nuestra garantía de 25 años.
- 2 Probado según EN 50530 (UE).
- 3 Condiciones de prueba estándar (irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>, AM 1,5, 25 °C). Estándar de calibración de NREL: intensidad según 50MS, tensión según LACCS FF. Toda la tensión de CC está totalmente contenida dentro del módulo.
- 4 Factor de seguridad 1,5 incluido.
- 5 Los módulos de CA deben conectarse al hardware de control Enphase (ENVOY) para habilitar la garantía de producto Enphase.
- 6 Consulte el módulo DC, calificación antiincendios de clase C según IEC 61730.
- 7 Paneles degradados un 0 % en pruebas LeTID extendidas realizadas por PVEL. Informe de prueba R10124977G-1,2020.

Fabricado en Malasia (células)  
 Montado en Malasia (módulos)  
 Las especificaciones incluidas en esta ficha técnica están sujetas a cambios sin previo aviso.  
 © 2022 Maxeon Solar Technologies, Ltd. Todos los derechos reservados.  
 Consulte la información sobre la garantía, patentes y marcas comerciales en  
[maxeon.com/legal](http://maxeon.com/legal).

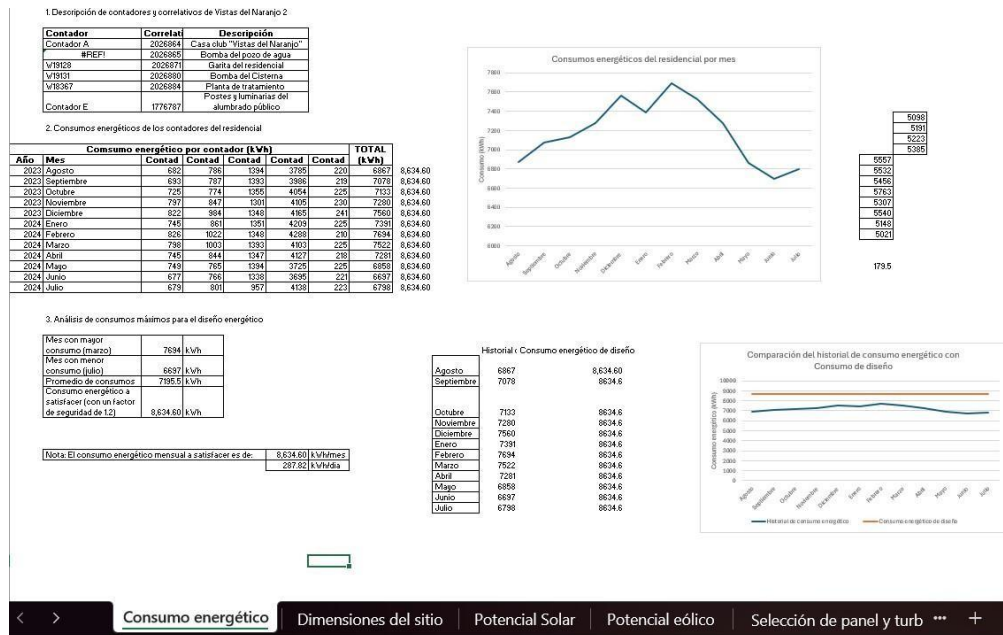
Nota. Obtenido de SunPower

## D. Hojas de cálculo

En este apartado se integran las hojas de cálculo elaboradas durante el desarrollo del proyecto, las cuales constituyen una herramienta fundamental para el análisis técnico y financiero del sistema híbrido solar-eólico. Dichos archivos contienen el registro de datos de radiación solar, velocidad del viento, estimaciones de generación energética y cálculos de dimensionamiento de los equipos. Asimismo, incluyen el análisis de costos, proyecciones de ahorro energético, evaluación de indicadores económicos y simulaciones de escenarios que respaldan la toma de decisiones en el diseño. La incorporación de estas hojas de cálculo garantiza la trazabilidad de los resultados obtenidos y permite replicar o ajustar los análisis en futuras fases del proyecto, aportando transparencia, rigor metodológico y solidez a las conclusiones de la investigación.

**Figura 81.**

*Cálculo del consumo energético*



Nota. Elaboración propia

**Figura 82.**

*Cálculo de sistemas eólicos*

Consumo energético a satisfacer (mes)	8.634,60	KWh/mes
Consumo energético a satisfacer (día)	287,65	KWh/día
Porcentaje de rosa de velocidad	55%	
Porcentaje de rosa de frecuencia	55%	
Porcentaje de rosa de potencia	62%	
Horas de viento (T)	13,2	hrs
Velocidad del viento (V)	3,48	m/s

Área	1	m <sup>2</sup>	Notas	Temperatura (°C)	Densidad del aire
Temperatura del aire	17,8	C		35	1,1455
Densidad del aire	1,2133	kg/m <sup>3</sup>	Por interpolación	30	1,1644
Longitud de rugosidad	1	m	Tomé el dato de la imagen que adjuntaste	25	1,1639
Velocidad conocida del	3,4815	m/s	A 200 m.	20	1,2041
Altura del aerogenerador	200,13	m	Se asumen los 200 m de altura más la diferencia del tamaño de las palas y su	15	1,225
Velocidad del aire a la altura del aerogenerador	3,4819	m/s	A 200 m.	10	1,2466
Potencia generada	1,895	kW	Sin apartamiento	5	1,269
	8,7326	kW	Con apartamiento	0	1,2922
Energía generada	25,015	kWh	Sin apartamiento	-5	1,3163
			Tomé las horas según lo que sacaste de la rosa de frecuencia	-10	1,3413
Cantidad de aerogeneradores	12		(este numero es para cubrir toda la demanda mensual)	-15	1,3673
				-20	1,3943
				-25	1,4224

Distancia entre aerogeneradores:	
Distanciamiento min entre turbinas	2 m
Distanciamiento a dejar	3 m
Cantidad de aerogeneradores a instalar	9
(Esta es la cantidad real de aerogeneradores que voy a instalar)	
Considerando las dimensiones del sitio, se podrían colocar los aerogeneradores de esta manera:	




Longitud total	53 m
----------------	------

El consumo energético que satisfago diariamente sería de:	
Cantidad de aerogeneradores a instalar	9 unidades
Consumo energético generado (al mes)	235,1329 kWh
Consumo faltantes	62,86 kWh

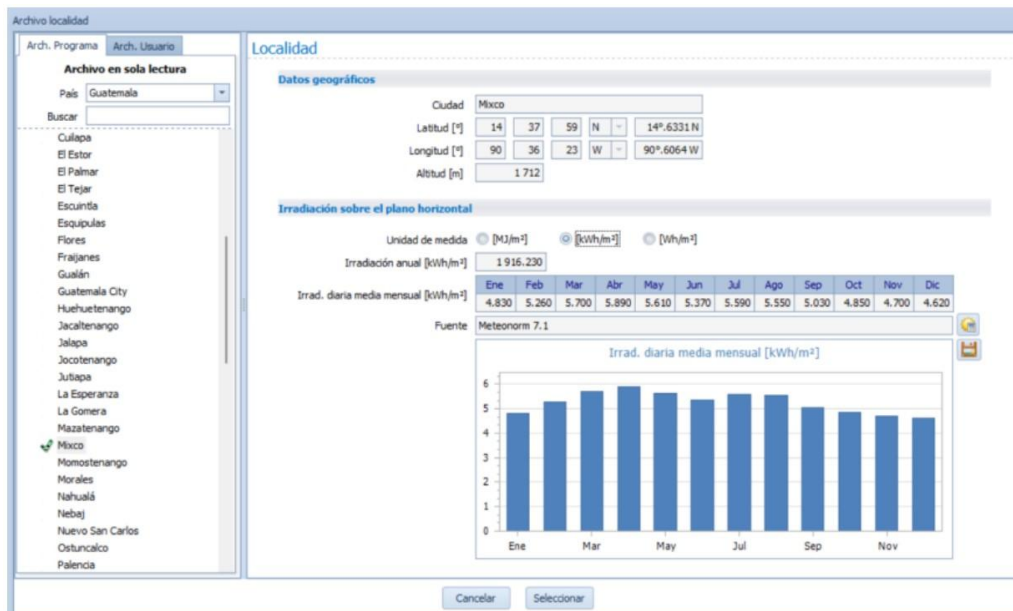
*Nota. Elaboración propia*

## E. Uso de Solarius PV

Para el dimensionamiento y validación del sistema fotovoltaico propuesto se utilizó el software especializado Solarius PV, el cual permitió simular el comportamiento de los paneles solares considerando la radiación disponible, la orientación, la inclinación y los posibles efectos de sombreadamiento en el sitio de instalación. A través de esta herramienta se generaron diagramas unifilares, se optimizó la distribución de los módulos y se calcularon los valores de producción anual de energía, identificando pérdidas y verificando el cumplimiento de estándares internacionales de diseño. Los resultados obtenidos con Solarius PV complementan los cálculos realizados en las hojas de cálculo y ofrecen un respaldo técnico adicional al diseño planteado. En los anexos se presenta el detalle del procedimiento seguido dentro del software, incluyendo capturas de pantalla y ejemplos de simulaciones, con el fin de evidenciar de manera práctica su aplicación en el presente proyecto.

**Figura 83.**

*Introducción de datos a Solarius PV*



**Figura 84.**

*Resultados gráficos obtenidos en Solarius PV*

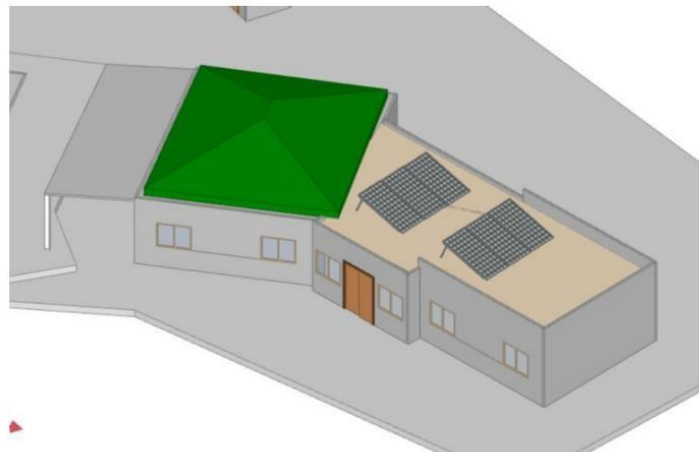


Tabla Gráficos mensuales Gráfico anual

**Energía horaria media mensual [kWh]**

	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
Ene					0.39	0.93	1.50	2.00	2.34	2.46	2.34	2.00	1.50	0.93	0.39			
Feb					0.42	0.98	1.55	2.05	2.40	2.52	2.40	2.05	1.55	0.98	0.42			
Mar					0.45	1.01	1.58	2.08	2.42	2.54	2.42	2.08	1.58	1.01	0.45			
Abr					0.03	0.47	0.99	1.53	1.99	2.31	2.42	2.31	1.99	1.53	0.99	0.47		
May					0.07	0.45	0.91	1.38	1.79	2.06	2.16	2.06	1.79	1.38	0.91	0.45		
Jun					0.08	0.43	0.86	1.30	1.67	1.92	2.01	1.92	1.67	1.30	0.86	0.43		
Jul					0.08	0.45	0.90	1.36	1.76	2.02	2.12	2.02	1.76	1.36	0.90	0.45		
Ago					0.05	0.44	0.92	1.41	1.83	2.11	2.22	2.11	1.83	1.41	0.92	0.44		
Sep					0.01	0.40	0.87	1.36	1.78	2.06	2.17	2.06	1.78	1.36	0.87	0.40		
Oct					0.38	0.88	1.39	1.84	2.14	2.25	2.14	1.84	1.39	0.88	0.38			
Nov					0.37	0.89	1.43	1.91	2.24	2.35	2.24	1.91	1.43	0.89	0.37			
Dic					0.37	0.90	1.45	1.95	2.28	2.40	2.28	1.95	1.45	0.90	0.37			

**Irradiación sobre el plano de los módulos**

Irradiación anual [kWh/m<sup>2</sup>] 1 942.54

Irradiación mensual [kWh/m<sup>2</sup>]

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	172.87	160.94	181.44	169.51	158.65	143.93	155.98	161.58	150.55	159.74	159.55	167.81

Tabla Gráficos mensuales Gráfico anual

**Irradiación horaria media mensual [kWh/m<sup>2</sup>]**

	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
Ene					0.13	0.31	0.50	0.66	0.78	0.82	0.78	0.66	0.50	0.31	0.13			
Feb					0.14	0.32	0.52	0.68	0.80	0.84	0.80	0.68	0.52	0.32	0.14			
Mar					0.15	0.34	0.53	0.69	0.80	0.84	0.80	0.69	0.53	0.34	0.15			
Abr					0.01	0.16	0.33	0.51	0.66	0.77	0.80	0.77	0.66	0.51	0.33	0.16		
May					0.02	0.15	0.30	0.46	0.59	0.69	0.72	0.69	0.59	0.46	0.30	0.15		
Jun					0.03	0.14	0.29	0.43	0.55	0.64	0.67	0.64	0.55	0.43	0.29	0.14		
Jul					0.03	0.15	0.30	0.45	0.58	0.67	0.70	0.67	0.58	0.45	0.30	0.15		
Ago					0.02	0.15	0.31	0.47	0.61	0.70	0.74	0.70	0.61	0.47	0.31	0.15		
Sep					0.00	0.13	0.29	0.45	0.59	0.69	0.72	0.69	0.59	0.45	0.29	0.13		
Oct					0.13	0.29	0.46	0.61	0.71	0.75	0.71	0.61	0.46	0.29	0.13			
Nov					0.12	0.30	0.48	0.63	0.74	0.78	0.74	0.63	0.48	0.30	0.12			
Dic					0.12	0.30	0.48	0.65	0.76	0.80	0.76	0.65	0.48	0.30	0.12			

## F. Información de interés sobre EEGSA

En este apartado se presenta la información proporcionada por la Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A. (EEGSA) referente al proceso de inscripción de autoprodutores de energía. Se incluyen los formularios oficiales, así como los requisitos técnicos, administrativos y legales necesarios para la conexión de sistemas de generación distribuida a la red de distribución. Entre los aspectos más relevantes destacan las condiciones de seguridad eléctrica, las especificaciones mínimas de los equipos, los esquemas de medición y facturación, y la documentación exigida para formalizar la solicitud. Esta información constituye un respaldo normativo fundamental para garantizar que el sistema híbrido propuesto cumpla con la reglamentación vigente y pueda integrarse de manera adecuada y segura al sistema eléctrico nacional.

### Figura 85.

#### *Requisitos para auto productores de energía con EEGSA*



 Grupo-eprog	Departamento de Atención al Cliente Requisitos para autoprodutor
<b>Servicio activo, cambio a autoprodutor:</b>	
1. Fotocopia de DPI de la persona que se constituirá como usuario autoprodutor.	
2. Si el servicio se encuentra a nombre de una empresa o razón social, fotocopia de DPI y del nombramiento del representante legal.	
<b>Servicio Nuevo autoprodutor:</b>	
<b>Servicio a nombre del propietario del inmueble:</b>	
1. Constancia de propiedad	
a. Escritura con dirección catastral, si dicha escritura no tuviera la dirección, deberá agregar la carta del Departamento de Catastro de la Municipalidad que le corresponde relacionando los datos de la escritura con la dirección catastral.	
b. Si aún no tiene escritura porque el terreno está en proceso de compra a una urbanizadora o lotificadora, deberá entregar la carta de la lotificadora dirigida a Empresa Eléctrica informando quien es el propietario y la dirección.	
2. Fotocopia de DPI de la persona que se constituirá como Cliente de EEGSA	
<b>Si el servicio se genera a nombre de una persona diferente al propietario, como por ejemplo un inquilino, deberá cumplir además de los requisitos anteriores, con:</b>	
3. Carta de la persona que se constituirá como Cliente, autorizando a otra persona mayor de edad para que firme el contrato en su nombre.	
4. Fotocopia de DPI de la persona que firmará el contrato.	

Figura 86.

Formulario de inscripción de auto productores con EEGSA



**Departamento de Atención al Cliente**  
**Formulario para usuario autoprodutor con excedente de energía**

FIRMA DEL SOLICITANTE: \_\_\_\_\_

**FORMULARIO para que los usuarios AUTOPRODUCTORES CON EXCEDENTES DE ENERGÍA, Proporcionen datos sobre las unidades de GENERACIÓN DISTRIBUIDA RENOVABLE ubicadas dentro en su instalación.**

**1. Datos generales del usuario:**

Nombre del usuario o representante legal: \_\_\_\_\_

Razón social de la empresa o entidad: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

Teléfono fijo: \_\_\_\_\_ Celular: \_\_\_\_\_ E-mail: \_\_\_\_\_

**2. Localización de la instalación:**

Dirección: \_\_\_\_\_

Número de contador: \_\_\_\_\_ Correlativo: \_\_\_\_\_

**3. Datos generales del proyecto:**

3.1 Fuente de energía renovable: marque la(s) que corresponda(n):

Hidráulica	<input type="checkbox"/>	Eólica	<input type="checkbox"/>	Biomasa	<input type="checkbox"/>
Vapor	<input type="checkbox"/>	Micro turbina	<input type="checkbox"/>	Solar	<input type="checkbox"/>
Geotérmica	<input type="checkbox"/>	Otra:	_____		

3.2 Especificaciones técnicas:

Número de Unidades Generadoras: \_\_\_\_\_ Potencia total instalada: \_\_\_\_\_ KW

Favor describir las características: \_\_\_\_\_

3.3 Estatus del Sistema generador:

Instalado  En Proceso

3.4 Tipo de Acometida:

100 Amperios	<input type="checkbox"/>	200 Amperios	<input type="checkbox"/>	Medición Primaria	<input type="checkbox"/>
Medición secundaria	<input type="checkbox"/>	Tablero Múltiple	<input type="checkbox"/>	Otros	<input type="checkbox"/>

**Hoja No. 2**

**Formulario para usuario autoprodutor**

3.5 Voltaje y carga contratada del servicio:

Monofásico (hasta 48 KW) Voltaje \_\_\_\_\_ Carga (KW) \_\_\_\_\_

Trifásico Voltaje \_\_\_\_\_ Carga (KW) \_\_\_\_\_

3.6 Condición actual de la acometida:

Acoplada  Independiente  Dentro de la propiedad privada

**4. Inversor:**

Fabricante: \_\_\_\_\_ Modelo: \_\_\_\_\_

Número de Serie: \_\_\_\_\_

Tipo de Conmutación: \_\_\_\_\_

**5. Datos de la Empresa Constructora:**

Nombre de la Empresa constructora: \_\_\_\_\_

Teléfono Contacto: \_\_\_\_\_ E-mail: \_\_\_\_\_

**6. Documentos que debe adjuntar:**

- 6.1 Fotocopia de DPI de la persona que se constituirá como usuario autoprodutor.
- 6.2 Si el servicio se solicita a nombre de una empresa o razón social, fotocopia de DPI y del nombramiento del representante legal.
- 6.3 Si el formulario lo presenta una persona diferente al propietario, presentar carta firmada por el interesado en donde autoriza a una tercera persona o entidad a realizar los trámites correspondientes.

Manifiesto que NO deseo participar como vendedor de energía eléctrica y solicito la conexión del medidor bidireccional respectivo para ser registrado como Autoprodutor con excedente de energía, una vez mi instalación cumpla con la Normativa Vigente.

(En el caso de usuarios regulados, el suministro e instalación del medidor respectivo lo cubrirá el distribuidor; mientras que los grandes usuarios son responsables de su sistema de medición).

Lugar y fecha: \_\_\_\_\_

Firma del usuario: \_\_\_\_\_

Favor de llenar claramente todos los datos de este formulario, los cuales son de suma importancia para atender su solicitud.

Para mayor información comunicarse a Teleservicio 2277-7000  
Consultas@eegsa.net - [www.eegsa.com](http://www.eegsa.com)

**Distribución Gratuita**