

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE LAS
AMÉRICAS**

VICERRECTORÍA ACADÉMICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

**DISEÑO ELECTROMECÁNICO DE UN SISTEMA
EÓLICO/FOTOVOLTAICO EN EL COLEGIO CIENTÍFICO
COSTARRICENSE EN EL COCAL, PUNTARENAS**

**MODALIDAD DE TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE
BACHILLERATO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

Valerie Guevara Mojica

Lector: Master Billy Retana Peña

Tutor: Ing. Álvaro Rojas Camacho

SEDE ARANJUEZ

Noviembre, 2018

Tabla de contenido

Dedicatoria y agradecimiento	1
Resumen	2
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	3
Planteamiento del problema	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
Proyecciones	4
Alcances.....	4
Limitaciones.	4
Justificación	4
CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL	6
Antecedentes.....	6
Marco teórico.....	12
Energías renovables.....	12
Uso racional de la energía.....	14
Tipos de radiación.....	14
Energía fotovoltaica.....	15
Eficiencia de la energía fotovoltaica.....	16
Panel fotovoltaico.	16
Inclinación adecuada.	18
Energía solar.	18
Energía eólica.	18
Producción de energía eléctrica de origen eólico.	19

Aerogeneradores.	20
Caracterización del viento.	20
Composición de una instalación eólica.	21
Configuración de las turbinas.	23
Modalidad de colocación y elección del lugar.	26
Componentes de un sistema de energía solar.	27
Instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica.	28
Controladores de carga.	29
Conexión de los paneles solares.	32
Reglamento Generación Distribuida para Autoconsumo con Fuentes Renovables.	35
Análisis financiero.	40
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	42
Enfoque de la investigación.....	42
Método de la investigación.....	42
Fuentes de información.....	42
Variables.....	42
Instrumentos.....	43
Proceso para la recolección y análisis de datos.....	43
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
Diagnóstico.....	44
Descripción de la institución.	44
Definición del diseño.....	47
Radiación solar Puntarenas 2015-2017.....	48
Consumo energético del colegio en el 2017.....	49

Velocidad del viento.....	50
Desarrollo	52
Caso #1 Primer diseño fotovoltaico con inversores.	52
Segundo diseño, eólico/fotovoltaico con inversores.	59
Análisis financiero.....	68
Inclinación de los paneles.....	80
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
Conclusiones.....	82
Recomendaciones	85
CAPÍTULO VI: PROPUESTA	86
Diagrama unifilar.....	90
Protecciones.....	90
Referencias	95
Apéndices	97

Tablas

Tabla 1 Radiación Solar Puntarenas 2015-2017.....	48
Tabla 2 Consumo de energía del Colegio Científico Puntarenas, 2017.	49
Tabla 3 Velocidad del viento promedio, Puntarenas 2015-2017	50
Tabla 4 Potencia generada por 32 módulos fotovoltaicos.....	55
Tabla 5 Potencia generada por 26 paneles solares	58
Tabla 6 Ficha técnica, Turbina eólica E70 Pro.....	60
Tabla 7 Potencia generada por un aerogenerador.....	62
Tabla 8 Potencia generada por 5 aerogeneradores	66
Tabla 9 Datos varios.....	70
Tabla 10 Análisis anual del consumo energético, primer año.....	72
Tabla 11 VAN y TIR.....	73

Tabla 12 Resumen primer caso	74
Tabla 13 Análisis anual del consumo energético, primer año	75
Tabla 14 VAN y TIR	76
Tabla 15 Resumen segundo caso.....	77
Tabla 16 VAN y TIR	79
Tabla 17 Resumen tercer caso	80

Figuras

Figura 1 Energías renovables	13
Figura 2 Componentes de la radiación	15
Figura 3 Micro-aerogenerador multipala y tripala	24
Figura 4 Componentes de un sistema solar	27
Figura 5 Diagrama de funcionamiento de una planta fotovoltaica conectada a la red	29
Figura 6 Controlador PWM.....	30
Figura 7 Controlador MPPT	32
Figura 8 Conexión de placas en paralelo.....	33
Figura 9 Conexión de placas en serie	34
Figura 10 Conexión de placas en serie y paralelo	35
Figura 11 Sección izquierda del techo disponible	45
Figura 12 Sección derecha del techo disponible	46
Figura 13 Espacio disponible para canaletas y tubería de conductores.....	47
Figura 14 Cantidad de paneles que se pueden colocar en el techo.....	54
Figura 15 Espacio disponible para los aerogeneradores.....	64
Figura 16 Dimensiones del aerogenerador	64
Figura 17 Posición de los aerogeneradores.	65
Figura 18 Diagrama unifilar	94

Dedicatoria y agradecimiento

Principalmente, a mis padres Marielos Mojica Espinoza y Luis Guevara Aguilar, por su apoyo, esfuerzo, ayuda incondicional y por concederme la oportunidad de aprender; gracias a ellos pude concluir con éxito.

A mi hermana y hermanos por su apoyo y amor.

A mis familiares, amigos y compañeros que, de una u otra manera, me ayudaron y apoyaron en este proceso.

A mi tutor por los conocimientos brindados y ayuda para poder finalizar.

Resumen

Este proyecto representará una guía para la ejecución de un sistema de paneles solares o un sistema fotovoltaico/eólico en el Colegio Científico Costarricense, localizado en la zona de El Cocal, Puntarenas, fundamentado en los consumos energéticos del 2017, según tarifas reguladas por ARESEP, ICE, entre otros.

En este estudio, se realizarán tres diseños, el primero de paneles solares con inversores, el segundo de paneles solares con aerogeneradores con inversores y el tercer diseño, que será el más rentable de los dos anteriores, sustituyendo los inversores por microinversores. Estos diseños se desarrollarán con el 100 % del consumo eléctrico.

Dentro de este escrito, se encuentra la información requerida para obtener los cálculos y datos de la cantidad de módulos fotovoltaicos a través de las horas solar pico, la demanda energética, la velocidad promedio del tiempo, asimismo, contará con el cálculo del ángulo de inclinación recomendable. Igualmente, se realizará un análisis financiero de las propuestas para determinar la rentabilidad de estas y escoger el mejor económicamente.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema

¿Cuál es el diseño electromecánico más adecuado de un sistema eólico/fotovoltaico para el Colegio Científico Costarricense en El Cocal, Puntarenas?

Objetivo general

Diseñar el sistema electromecánico eólico/fotovoltaico más adecuado para el Colegio Científico Costarricense en El Cocal, Puntarenas.

Objetivos específicos

- Analizar el área disponible para definir la zona que se va a utilizar para realizar el proyecto y, a su vez, mediante visitas, valorar la condición de sus instalaciones eléctricas y, si la situación lo amerita, optimizarlo de acuerdo con lo estipulado en el Código Eléctrico Nacional, edición del 2008 (NEC 2008).
- Obtener las mediciones necesarias para plantear el diseño apropiado de paneles solares y aerogeneradores que se deben de instalar para proveer la energía que el colegio requiere.
- Comparar la cantidad de aerogeneradores y paneles solares que se necesitan con el espacio con el que se cuenta para verificar que se pueda cumplir con lo preciso.
- Determinar, por medio de un análisis financiero, el diseño más económico e ideal que se pueda implementar para recuperar la inversión en el menor tiempo posible.

Proyecciones

Alcances.

Se presentará un CD que incluya planos, manual de presupuestos, hoja de cálculos y análisis financieros que se van a desarrollar al elaborar el proyecto.

Limitaciones.

La distancia a la que se encuentra el colegio es una limitante, debido a que la cantidad de visitas que se van a efectuar serán con menor regularidad.

Una de las limitaciones es la falta de cotizaciones oficiales, el costo de las turbinas eólicas fue consultado por internet, por consiguiente, en la segunda propuesta, con respecto a los aerogeneradores, no se incluye el costo de mantenimiento, instalación y la torre.

Justificación

El colegio en el que se realiza este proyecto es un centro educativo con solo dos aulas, una sala de espera, la dirección, un espacio para el asistente de dirección y una sala para profesores; a pesar de ser pequeño, tiene un alto consumo eléctrico, por esta razón, este estudio resulta favorable.

Una investigación en la que se utilice la energía solar y eólica es esencial para la institución, ya que se ahorrará en gastos por consumo de electricidad y podrá ser utilizado en la educación y eficiencia de los estudiantes.

Los problemas ambientales causados por el uso de combustibles fósiles han tenido un efecto desfavorable en el medio ambiente y en la salud de las personas, por este motivo, el empleo de energías renovables en nuestra sociedad contemporánea está tomando mucho interés, pues resulta indispensable medidas sostenibles, amigables con el ambiente y que

reduzcan los efectos nocivos sobre la salud social. Este proyecto aplicado tiene mucha relevancia y pertinencia, ya que promueve la utilización de medios sostenibles que resultan beneficiosos tanto para la economía nacional como para el mejoramiento del medio ambiente y, por consiguiente, para cualquier institución.

CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL

Antecedentes

Título: Implementación y ejecución de un sistema de energía alternativa (fotovoltaica) para incrementar la calidad de vida de sus moradores en la comunidad de Palmeras.

Institución: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Autor: Mario Alexander Vela Ruiz.

Año: 2015.

La finalidad de este proyecto era ayudar mejorar la calidad de vida de la comunidad desarrollando un modelo de energía alternativa, ya que los habitantes solo tenían acceso a electricidad durante 3 horas al día, lo que imposibilitaba realizar ciertas actividades del diario vivir. Es una zona de difícil acceso, solo se ingresa por vía fluvial.

Durante el proceso de ejecución del proyecto, efectúa una encuesta para calificar el servicio. Como es una población pequeña, la encuesta la realiza a todos los moradores, en su tesis muestra gráficas de los resultados obtenidos, en el cual informa que la comunidad se encuentra 100 % conformes con el servicio.

Energía fotovoltaica

El efecto fotoeléctrico permite transformar directamente energía solar (ya sea directa o difusa) en energía eléctrica continua. Pero se suelen utilizar semiconductores y, en especial, el silicio (el segundo o más abundante en la corteza terrestre que se obtiene de la arena). El elemento base es la célula solar. Suelen ser de silicio mono cristalino, poli cristalino o amorfo. Los conjuntos de células se orientan hacia el sur para aprovechar más la radiación

solar y son conectadas a un sistema de almacenamiento (baterías) y de conversión de la corriente. Se trata, pues, de una fuente de energía que puede aprovecharse en cualquier aplicación: red eléctrica, consumo en lugares aislados en zonas rurales.

Energía solar

La cantidad de calor recibido por la tierra anualmente puede calcularse en 1946 calorías pequeñas por centímetro cuadrado de superficie y por minuto. Este calor es capaz de producir una potencia de 1,81 caballos de vapor por metro cuadrado. La transformación directa de la energía radiante del sol en calor parece ser actualmente fácil y con rendimiento elevado, del 30 al 60 %. La técnica es bastante sencilla y eficaz en el tiempo, consiste en concentrar en una superficie reducida las radiaciones solares recogidas en una gran superficie.

Título: Sistema híbrido de generación de energía eléctrica eólico-fotovoltaico aislado para el suministro eléctrico demandado por un edificio habitacional.

Institución: Instituto Politécnico Nacional.

Autor: Magdiel Medina Guevara.

Año: 2013.

El proyecto es realizado en México, se analiza el porcentaje de la contribución de las energías renovables respecto a la capacidad instalada de generación eléctrica del país.

Su objetivo era impulsar el uso de las energías renovables para disminuir la contaminación ocasionada por la cantidad de desperdicios, gases tóxicos y demás que se generan en el desarrollo de la vida humana.

Energía eólica

Las formas de energías limpias y renovables, como la energía eólica, son esenciales si se quiere detener el cambio climático. Las energías renovables son vitales para continuar con la transición energética desde formas de energía contaminante hacia formas de energía limpia que disminuyan las amenazas a la salud y benefician un equilibrio para el desarrollo sustentable del medio ambiente durante los próximos años.

La energía eólica es limpia, pues el poder del viento no produce desechos peligrosos, ni contribuye al calentamiento global. Además, es económica, dados los actuales costos elevados del gas y del petróleo, será más económica la generación de electricidad mediante el poder del viento.

Asimismo, es popular. La energía del viento es una de las tecnologías de energía más populares y ampliamente aceptadas a nivel mundial.

Se considera una forma indirecta de energía solar. Entre 1 % y 2 % de la energía proveniente del sol se convierte en viento, debido al movimiento del aire ocasionado por el desigual calentamiento de la superficie terrestre. La energía cinética del viento puede transformarse en energía útil, tanto mecánica como eléctrica.

La energía eólica, transformada en energía mecánica, ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente.

Título: La energía solar fotovoltaica como factor de desarrollo en zonas rurales de Colombia.

Institución: Pontificia Universidad Javeriana.

Autor: Rafael Eduardo Ladino Peralta.

Año: 2011.

El creador del proyecto reúne los resultados en torno a las características sociales, ambientales, económicas y políticas, en relación con el uso de la energía fotovoltaica y su incidencia en el desarrollo rural.

Al finalizar su diseño, los resultados fueron favorables para la población, pues obtienen servicios a los que no tenían acceso, como aumento en la iluminación nocturna, comunicaciones por radio y televisión, entre otros.

Fuente y transformaciones de energía solar

La radiación solar es inagotable, como lo indica Serway (2005): “cada segundo 1.340 julios de radiación electromagnética del sol, pasan perpendicularmente a través de un (1) m² en la parte superior de la atmósfera terrestre”. Parte de esta energía es reflejada hacia el espacio y la otra llega a la superficie de la tierra, la cual, de ser captada, puede ser utilizada de manera eficiente. La energía del sol es la fuente de mayor cantidad de energía del planeta, es a través del proceso de fotosíntesis que se generan los combustibles fósiles y lo que representa la mayor cantidad de energía disponible.

La EFV en el desarrollo rural

La energía solar como fuente inagotable es un desafío para la técnica y la ingeniería; al captarla para fines de transformación busca elevar la calidad de vida para los habitantes citadinos y rurales, dejando un ambiente más amigable para las futuras generaciones.

La radiación es la emisión de ondas electromagnéticas que se desplazan desde el sol y que llegan a la superficie terrestre en forma de rayos solares, los cuales tienen diferentes longitudes de onda; de acuerdo con Perales (2006), la banda radiante visible es del 47 % de la radiación total, los infrarrojos el 46 % y los ultravioletas el 7 %. De estos, los rayos solares que inciden directamente son los aprovechables mediante el brillo solar - número de horas en el cual el sol brilla en una zona determinada- y es medida a través de la irradiancia. La transformación de la radiación electromagnética en electricidad se logra a través de la célula fotovoltaica. Los materiales más utilizados son los semiconductores, siendo el silicio el más difundido en el efecto fotovoltaico. La célula fotovoltaica usa dos semiconductores generando un campo eléctrico debido a la difusión de los electrones; esta célula transforma la energía de la radiación solar en corriente eléctrica. Las aplicaciones generales de este tipo de energía en zonas rurales tienen que ver con electrificación rural de viviendas, sistemas de abastecimiento de agua, comunicaciones, centros de salud, iluminación, refrigeración de medicinas y neveras.

Marco teórico

Energías renovables.

La información que se presentará a continuación es de acuerdo con Jarabo, Pérez, Fernández, Macias y Elortegui (1988) y el libro de las energías renovables (pp.29-32).

Las fuentes de energía renovables son aquellas que proceden del flujo de energía que recibe continuamente la Tierra y que tiene su origen en el sol, aunque en ciertos casos existe una cierta contribución de los campos gravitatorios terrestre y lunar.

Aunque el 30 % de la energía procedente del sol es reflejada por la atmósfera terrestre, el 70 % restante la atraviesa experimentando o no cambios en sus características, lo que da lugar a las distintas fuentes renovables de energía, cuyas formas de captación y aprovechamiento serán asimismo diferentes.

La energía procedente del sol que atraviesa la atmósfera sin experimentar cambios sensibles se denomina energía solar directa, siendo la que proporciona los seres vivos luz y calor.

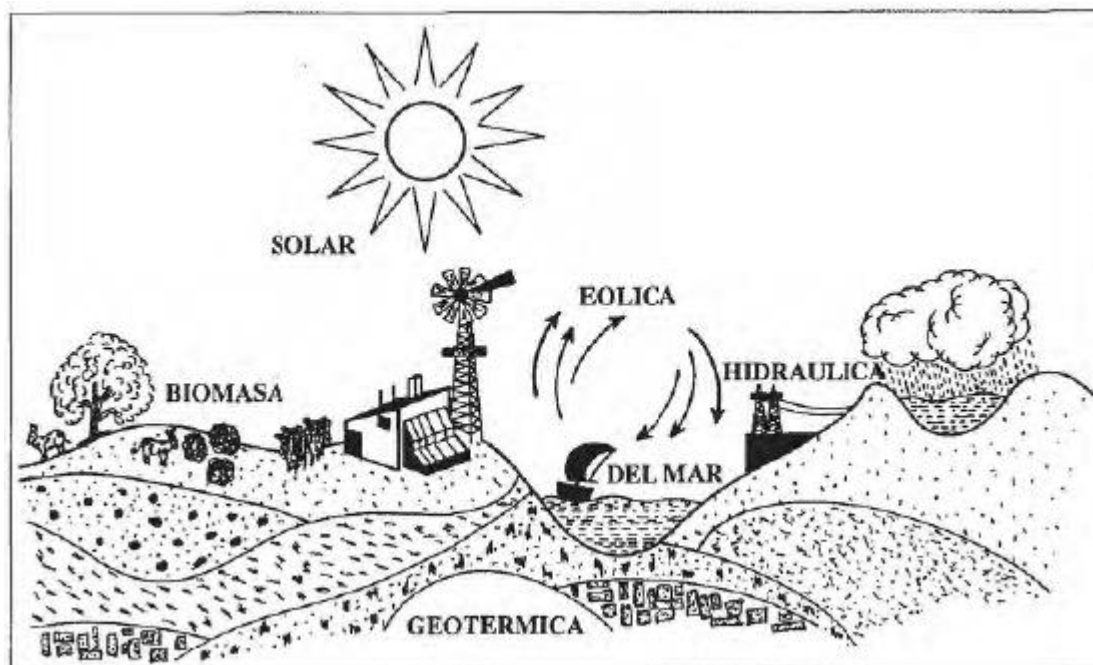
La diferente distribución de la energía solar en la atmósfera influye, asimismo, en el movimiento de las masas de aire. Cuando el aire se calienta, tiende a subir y es rápidamente sustituido por aire más frío, fenómeno que constituye el origen de los vientos. Por consiguiente, la energía eólica o energía contenida en el viento es una forma indirecta de la energía solar y, por tanto, de naturaleza renovable.

Ahora bien, el hecho de que una fuente de energía sea renovable, no quiere decir que sea abundante o que su explotación resulte gratuita.

En los últimos años, se han intentado revisar los conocimientos tecnológicos en relación con los diferentes procedimientos para captar y transformar estas fuentes en energía útil al mínimo coste posible. Debido al gran interés despertado por estas en función de su bajo o nulo deterioro del medio ambiente y en relación con el posible agotamiento de las fuentes energéticas convencionales, se ha incrementado enormemente el estudio de sus posibilidades de utilización con vistas a encontrar en ellas una alternativa frente a los combustibles fósiles y nucleares.

Figura 1 Energías renovables

Fuente: El libro de las energías renovables, Jarabo et al. (1988).



Uso racional de la energía.

A la hora de planificar la utilización de la energía, una forma de conseguir ahorrar, y, por lo tanto, de hacer un uso más racional de esta, es tratar de adaptar el grado de la energía al tipo de uso que se quiera hacer de ella. (González, 2009, pp.25)

La mayor parte de la electricidad consumida en los países europeos procede de centrales térmicas, en las que se transforma calor producido por combustión de combustibles fósiles en energía eléctrica con una eficiencia que apenas llega al 40 %, y a costa de emitir grandes cantidades de gases generadores de efecto invernadero y de lluvia ácida. Es decir, alrededor del 60 % de la energía contenida en los combustibles que se queman en la central térmica se pierde. No tiene, por lo tanto, mucho sentido utilizar la electricidad para producir calor de baja temperatura, en vez de producir el mismo calor por combustión directa de los combustibles. (González, 2009, pp.25)

Tipos de radiación.

Radiación solar.

La radiación solar entrante (insolación) se origina a partir del sol, se modifica a medida que recorre la atmósfera; se modifica más por las entidades de superficie y topografía; y se intercepta en la superficie de la tierra como componentes directos, difusos y reflejados. (Esri, s.f.)

Radiación directa.

Se intercepta sin dificultades en una línea directa desde el sol. (Esri, s.f.)

Radiación difusa.

Se dispersa por componentes atmosféricos, como nubes y polvo. (Esri, s.f.)

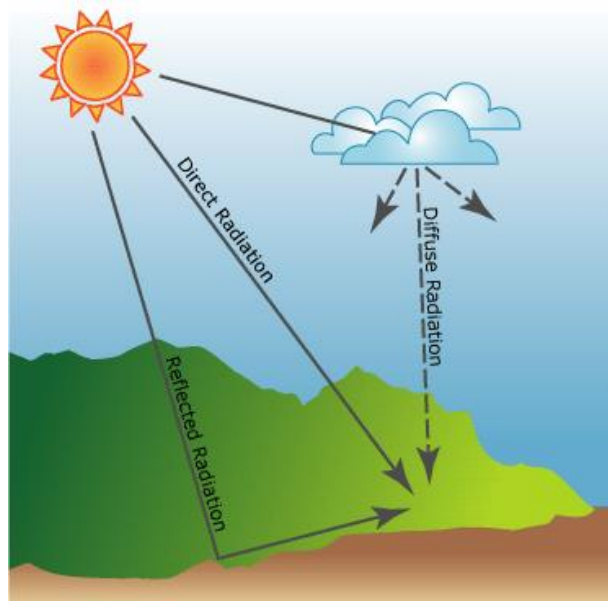
Radiación reflejada.

Se refleja desde entidades de superficie. (Esri, s.f.)

La suma de la radiación directa, difusa y reflejada se denomina radiación solar total o global. (Esri, s.f.)

Figura 2 Componentes de la radiación

Fuente: ArcGIS, s.f.



Energía fotovoltaica.

La energía solar fotovoltaica consiste en la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica. (Energía Solar, 2018)

Esta transformación en energía eléctrica se consigue aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores mediante las células fotovoltaicas. El material base para la fabricación de paneles fotovoltaicos suele ser el silicio. Cuando la luz del sol (fotones)

incide en una de las caras de la célula solar genera una corriente eléctrica. Esta electricidad generada se puede aprovechar como fuente de energía. (Energía Solar, 2018)

Eficiencia de la energía fotovoltaica.

Dependiendo de la construcción, los módulos fotovoltaicos pueden producir electricidad a partir de una gama concreta de frecuencias de la luz, pero, en general, no puede cubrir toda la gama solar (en concreto, la luz ultravioleta, infrarroja y baja o difusa). Por lo tanto, gran parte de la energía de la luz solar incidente no se aprovecha por los paneles solares, que podrían dar eficiencias muy superiores si se ilumina con luz monocromática. (Energía Solar, 2018)

Por tanto, otro concepto de diseño es la de dividir la luz en diferentes longitudes de onda y dirigir los haces en diferentes células sintonizadas en estos rangos. (Energía Solar, 2018)

Actualmente, la tasa mejor de conversión de la luz solar en energía fotovoltaica en los nuevos productos comerciales consigue una eficiencia del módulo solar de alrededor de 21,5 %. (Energía Solar, 2018)

Panel fotovoltaico.

Un panel fotovoltaico es un tipo de panel solar diseñado para el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica. Su función es transformar la energía solar en electricidad. (Energía Solar, 2018)

Los módulos fotovoltaicos están formados por un conjunto de celdas fotovoltaicas interconectadas entre ellas. Las células fotovoltaicas que componen un panel fotovoltaico se encuentran encajadas y protegidas. El panel fotovoltaico es el encargado de transformar de

una manera directa la energía de la radiación solar en electricidad, en forma de corriente continua. (Energía Solar, 2018)

La célula solar solo es capaz de generar una tensión de unas décimas de voltio (+/- 0,5 V) y una potencia máxima de 1 o 2 Watts. Por tanto, es necesario conectar en serie varias células (que se comportan como pequeños generadores de corriente) para conseguir tensiones de 624 V, aceptadas en muchas aplicaciones. (Energía Solar, 2018)

La placa fotovoltaica está diseñada para soportar las condiciones que se dan al aire libre y poder formar parte de la “piel” del edificio. Su vida útil se considera de 25 años. (Energía Solar, 2018)

Las células se encapsulan en una resina y se colocan entre dos láminas para formar los módulos fotovoltaicos. La lámina exterior es de vidrio y la posterior puede ser de plástico opaco o de vidrio, si se quiere hacer un módulo semitransparente. (Energía Solar, 2018)

En el hemisferio norte, hay que orientar las placas, en dirección sur y con una inclinación determinada. La más apropiada en cada emplazamiento depende de la latitud y de la época del año, siendo aconsejable el estudio de radiación solar recibida para cada emplazamiento. Por otro lado, la inclinación de los módulos variará en función de las necesidades energéticas previstas y del período de utilización, con el fin de hacer un balance estacional (invierno, verano) o anual. (Energía Solar, 2018)

Inclinación adecuada.

Las estructuras de placas solares sobre cubierta inclinada llamadas coplanares están diseñadas para instalarse con la misma inclinación que la cubierta. Se tiene que saber la inclinación del tejado para ver si se obtendrá un buen rendimiento de los paneles solares. Mediante esta fórmula, se puede saber aproximadamente la inclinación adecuada de los paneles solares: (REBACAS, s.f.)

$$\beta = 3,7 + 0,69 * (|\phi| + 10)$$

Siendo:

β : Ángulo de inclinación óptima (grados)

$|\phi|$: latitud del lugar, sin signo (grados)

Energía solar.

La energía solar es la energía que aprovecha de forma directa la radiación solar. A pesar que el sol no tiene una vida inagotable se estima que la vida de del sol es de millones de años. De modo que, a escala humana, se considera la energía solar como una fuente inagotable y la energía solar una energía renovable. (Energía Solar, 2018)

Energía eólica.

La energía eólica es la energía obtenida del viento. Esta energía renovable aprovecha la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas. La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus palas. (Energía Solar, 2018)

Actualmente, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores. (Energía Solar, 2018)

La energía eólica es un recurso abundante, renovable, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero reemplazando centrales termoeléctricas que funcionan con combustibles fósiles, lo que la convierte en un tipo de energía verde. Sin embargo, su principal inconveniente es su intermitencia. (Energía Solar, 2018)

La energía eólica depende de forma indirecta de la energía solar. Cuando el sol calienta el aire (es decir, gracias a la energía solar), este cambia de densidad. La diferencia de densidad entre diferentes masas de aire provoca el movimiento y las corrientes de aire. El aire más denso (frío) pesa más y tiende a bajar. (Energía Solar, 2018)

Producción de energía eléctrica de origen eólico.

Para poder aprovechar la energía renovable de la energía eólica, es importante conocer las variaciones diurnas y nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento respecto de la altura sobre el suelo, la entidad de las ráfagas en breves espacios de tiempo y valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años. Es también importante conocer la velocidad máxima del viento. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este tenga una velocidad mínima de 12 km/h, y que no supere los 65 km/h. (Energía Solar, 2018)

Existen dos tipos de instalaciones eólicas (Energía Solar, 2018):

- Instalaciones de energía eólicas aisladas, para generar energía eléctrica en lugares remotos para auto-consumo. Es muy común que estas instalaciones vayan combinadas con paneles fotovoltaicos.

- Parques eólicos, formados por un conjunto de aerogeneradores, para vender la energía eléctrica generada a la red.

Aerogeneradores.

Es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Las palas de un aerogenerador giran entre 13 y 20 revoluciones por minuto, según su tecnología, a una velocidad constante o bien a velocidad variable, donde la velocidad del rotor varía en función de la velocidad del viento para alcanzar una mayor eficiencia. (Acciona, 2014)

Caracterización del viento.

Determinación de los parámetros de interés y ¿de qué dependen?

Para evaluar la potencialidad real de una instalación, es indispensable conocer bien las características del viento en el lugar en el que se piensa instalar los aerogeneradores. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Un atento estudio de la velocidad del viento prevé la individuación de los siguientes elementos (Brusa & Guarnone, s.f.):

- Distribución de frecuencia de la velocidad del viento y de sus parámetros principales: velocidad media, velocidad media cúbica, velocidad máxima, desviación cuadrática media.
- Curva de duración de la velocidad del viento.
- Distribución de la frecuencia de la dirección del viento (rosa de los vientos).

La intensidad del viento depende de las características orográficas del terreno. Un elemento fundamental es la rugosidad del terreno: en llanura o en el mar el viento sopla con intensidad mayor que en el campo o en los alrededores de las ciudades que, a su vez, son

zonas más ventiladas que los centros de estas. La intensidad del viento depende también de la altura del terreno: cuanto más se sube, mayor es la velocidad del viento. (Brusa & Guarnone, s.f.)

La intensidad del viento es fundamental para determinar la potencia captable por un aerogenerador, ya que, a igualdad de diámetro de las palas, la potencia aumenta con el cubo de la velocidad. Al aumentar la velocidad del viento, por lo tanto, aumenta de forma más que proporcional la potencia teóricamente extraíble, pero aumentan de la misma manera también los requerimientos de la máquina. Las máquinas eólicas están proyectadas sobre la base de tres valores de velocidad. Los aerogeneradores (Brusa & Guarnone, s.f.):

- Se activan con viento variable de 2 a 4 m/s (velocidad de “cut-in”);
- Están equipados con un dispositivo de control de la potencia cuando el viento alcanza la velocidad de 10-14 m/s (velocidad de corte o nominal).
- Se paran cuando la velocidad del viento alcanza valores de aproximadamente 20-25 m/s (velocidad de cut-off).

Composición de una instalación eólica.

Una instalación eólica consta de uno o más aerogeneradores colocados a una distancia adecuada los unos de los otros (para que no interfieran desde el punto de vista aerodinámico entre ellos) y según un diseño sobre el territorio en función de la exposición al viento y del impacto visual (en filas, en grupos). Los aerogeneradores están conectados, a través de cables enterrados, con la red de transmisión a la que se entrega la energía. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Las palas de la máquina (normalmente en un número que va de uno a tres) están fijadas a un buje y, en el conjunto, constituyen el rotor. El buje, a su vez, está conectado a un

primer eje (eje de baja velocidad) que gira a la misma velocidad angular que el rotor y, tras la conexión a un multiplicador de giros, hay un eje de alta velocidad que, en cambio, gira con velocidad angular que es el resultado de la del primer eje por el multiplicador de giros. En el eje de alta velocidad, hay un freno detrás del cual está el generador eléctrico, del que salen los cables eléctricos de potencia. Todos estos elementos se encuentran en la llamada góndola que, a su vez, se encuentra sobre un soporte orientable según la dirección del viento. (Brusa & Guarnone, s.f.)

La góndola se completa con un sistema de control de la potencia y uno de control de la orientación. El primero tiene la doble función de regular la potencia en función de la velocidad del viento instantánea que hace funcionar la turbina, cuanto más cerca está de su potencia nominal y de interrumpir el funcionamiento de la máquina en caso de que el viento sea excesivo. El sistema de control de la orientación consta de un control continuo del paralelismo entre el eje de la máquina y la dirección del viento. La góndola se encuentra sobre una torre que puede ser de celosía o tubular cónica, anclada al terreno con adecuados cimientos de hormigón armado. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Los aspectos característicos que diferencian un tipo de máquina de otra, independientemente de la potencia y, por lo tanto, del tamaño, son los siguientes (Brusa & Guarnone, s.f.):

- Sistema de control de la potencia: por cambio del ángulo de paso o por pérdida aerodinámica.
- Velocidad del rotor: constante o variable.
- Presencia o ausencia del multiplicador de giros.

Configuración de las turbinas.

La mayoría de los micro-generadores son de eje horizontal con rotor a barlovento respecto a la torre (el viento encuentra primero las palas y luego el soporte) y conicidad nula (el plano de rotación de las palas forma una línea paralela ideal con la horizontal). (Brusa & Guarnone, s.f.)

Existen diferentes configuraciones de turbinas eólicas: monopala, bipala, tripala, multipala. El aumento del número de palas disminuye la velocidad de rotación, aumenta el rendimiento y encarece el precio de estas turbinas. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Excluyendo la monopala y la multipala que tienen aplicaciones especiales, el mercado se ha concentrado en la bipala y en la tripala, orientándose, sobre todo, hacia esta última configuración, ya que está caracterizada por un motor más uniforme (y, por lo tanto, de mayor duración), la energía producida es ligeramente superior (o sea, en general con un rendimiento mayor) y, además, son visualmente menos agresivos, gracias a que tienen una configuración más simétrica y una velocidad de rotación más baja, más relajante para los ojos de quien la observa. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Figura 3 Micro-aerogenerador multipala y tripala

Fuente: CECU, s.f.



Material de composición de las palas.

La mayor parte de las turbinas mini-eólicas utilizan palas fabricadas con metal plaqueado: poliéster reforzado con fibra de vidrio o, en menor proporción, con fibras de carbono, y raramente madera. Se ha dejado de utilizar el aluminio por su tendencia a deformarse bajo esfuerzo. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Orientación.

El tamaño reducido de las turbinas mini-eólicas no permite colocar motores con orientación del rotor en la dirección del viento u otros componentes metálicos que tienen las turbinas de tamaño mediano: casi todas las miniturbinas tienen brazos direccionales para orientar el rotor en la dirección del viento. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Robustez.

Para obtener un buen rendimiento, las turbinas tienen que situarse en lugares batidos por vientos consistentes: para las máquinas de minieólica, teniendo en cuenta su reducido tamaño, es fundamental la robustez. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Los aerogeneradores más pesados han dado pruebas de ser de mayor robustez y fiabilidad que los más ligeros. El peso de una turbina de minieólica comparada con el área batida por su rotor es, por lo tanto, un buen indicador de elección entre máquinas diferentes. Normalmente, a una masa específica más alta corresponde un precio más alto. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Control de la potencia.

En régimen de viento fuerte, las turbinas tienen que tener un sistema de posicionamiento pasivo del rotor que desvíe el eje respecto al de rotación de la pala. La mayor parte de las micro y miniturbinas se dobla sobre una bisagra, de modo que el rotor gire hacia el brazo direccional: algunas en vertical, otras en horizontal. La velocidad del viento a la que se realiza la desalineación y la forma en la que se verifica dependen de la bisagra colocada entre el brazo direccional y la góndola. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Generadores.

La mayor parte de las turbinas eólicas utiliza alternadores de imán permanente: se trata de la configuración más sencilla y robusta. Para las turbinas de uso doméstico, las configuraciones de alternador pueden ser las siguientes: imán permanente, alternador convencional con devanado del campo y generador de inducción. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Modalidad de colocación y elección del lugar.

El lugar de colocación de la turbina tendrá que ser determinado debidamente a través de un estudio de la zona. Por una parte, la cercanía de los elementos que van a utilizar la energía puede resultar perjudicial para la funcionalidad de la máquina (interferencia del viento debida a la proximidad de los edificios). Además, hay que tener en cuenta el impacto del inevitable ruido producido por la turbina. Por otra parte, la lejanía de los elementos hace que los costes de cableado y enterramiento de las líneas eléctricas sean mayores, además de aumentar la dispersión de energía. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Hace falta encontrar una justa relación entre los dos términos, teniendo también en cuenta la importancia de que la posición de la máquina sea segura, o sea, en un lugar donde, incluso, en caso de hundimiento, los daños sean limitados. (Brusa & Guarnone, s.f.)

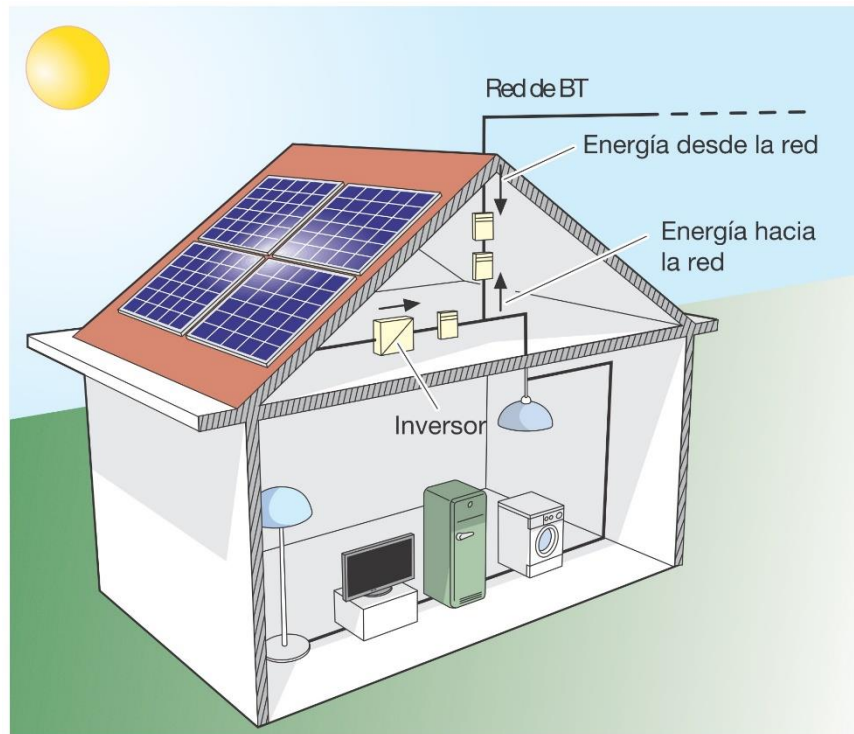
Existen casos de aerogeneradores colocados en los tejados de las casas. Se trata de una modalidad bastante controvertida: por una parte, el montaje podría resultar sencillo, pero, por otra, existen problemas de vibraciones transmitidas por la turbina a las estructuras sobre las que se monta y de turbulencia que se va creando alrededor de los tejados, que es causa de una reducción de la potencia generada. (Brusa & Guarnone, s.f.)

La instalación más común sigue siendo la torre de celosía, tubular o arriostrada. (Brusa & Guarnone, s.f.)

Componentes de un sistema de energía solar.

Figura 4 Componentes de un sistema solar

Fuente: GlobalElectricity, 2013.



Módulo solar (panel solar) fotovoltaico.

Componente encargado de transformar la radiación solar en energía eléctrica a través del efecto fotoeléctrico. Están hechos, principalmente, por semiconductores (silicio) monocristalinos o poli-cristalinos. Los de mejor precio y mayor disponibilidad en el mercado internacional es el policristalino. Estos son caracterizados por su potencia nominal o potencia máxima que puede generar este panel en condiciones ideales (radiación de $1\text{kW}/\text{m}^2$ y temperatura de 25°C). (SunSupply, 2017)

Inversor.

Este componente convierte la corriente continua y bajo voltaje (12v o 24v, típicamente) proveniente de las baterías o controlador en corriente alterna, de forma simplificada se puede decir que transforma la corriente continua en un toma corriente convencional. Por lo general, es comercializado basado en su potencia en Watts, la cual es calculada como el voltaje por corriente ($P=VI$). Corresponde a la demanda máxima de potencia de los equipos que se van a conectar. Se puede prescindir de este componente cuando los equipos a conectar puedan ser alimentados por corriente directa. Como es el caso de algunos tipos de iluminación, motores y equipos diseñados para trabajar con energía solar. (SunSupply, 2017)

Soportes.

Este es un componente pasivo de los sistemas de energía solar. Encargado de mantener en su lugar los módulos fotovoltaicos y debe estar proyectado para soportar la intemperie de forma constante, expansiones térmicas durante mínimo 25 años. (SunSupply, 2017)

Microinversores.

Los microinversores son inversores “distribuidos”. En las instalaciones fotovoltaicas con microinversores cada placa solar tiene un pequeño inversor solar instalado. En lugar de enviar energía, desde todos los paneles hasta un único inversor, los sistemas de microinversores convierten la energía solar de corriente continua en energía de corriente alterna en la propia cubierta. (SotySolar, 2017)

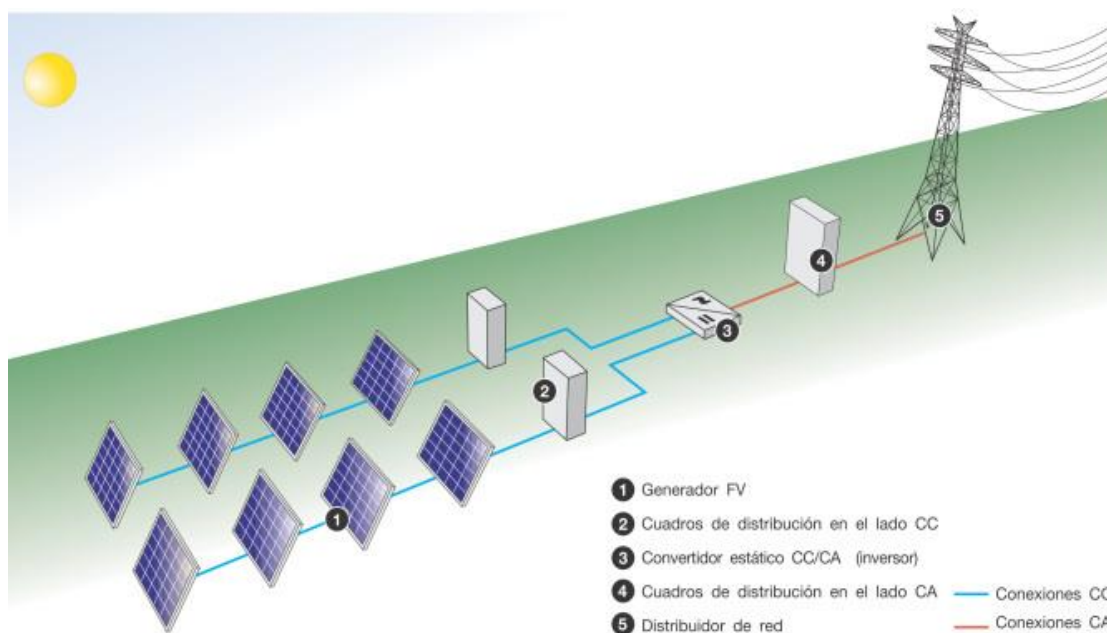
Instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica.

Las plantas con conexión permanente a la red toman energía de esta en las horas en las que el generador fotovoltaico no puede producir suficiente energía para satisfacer las

necesidades del consumidor. Por el contrario, si el sistema fotovoltaico produce un exceso de energía eléctrica, el excedente se inyecta a la red, funcionando así como un acumulador de grandes dimensiones. En consecuencia, los sistemas conectados a la red no requieren bancos de acumuladores. (Global Electricity, 2013)

Figura 5 Diagrama de funcionamiento de una planta fotovoltaica conectada a la red

Fuente: GlobalElectricity, 2013.



Controladores de carga.

La función de un controlador de carga es regular la carga y descarga de las baterías o bancos de baterías. Además de esta función, los controladores de carga a menudo ofrecen otras características como la medición y registro de datos, desconexión por bajo voltaje, encendido y apagado de luces durante la noche. Los controladores de carga se pueden encontrar en tamaños que van desde 4 hasta 80 amperes y voltajes nominales de 12, 24 y 48. Los controladores de carga más sencillos y económicos interrumpen la carga de las baterías cuando estas se encuentran llenas y se reanuda la carga cuando las baterías llegan a un nivel

mínimo de carga a la carga y descarga; mantienen las baterías completamente cargadas y hacer un mejor uso de la energía disponible. También, protegen el sistema contra sobrecargas y sobre-descargas. (WeboSolar, s.f.)

Controladores de carga PWM.

Los reguladores PWM son reguladores sencillos que actúan como interruptores entre las placas fotovoltaicas y la batería. Estos reguladores fuerzan a los módulos fotovoltaicos a trabajar a la tensión de la batería, sin ningún tipo de instalación extra. Por ejemplo, si la batería es de 12 V, los paneles cargarán la batería con una tensión de 12 V. (AutoSolar, 2015)

Cuando se alcanza la etapa de absorción en la carga de la batería, el regulador modifica la intensidad de los pulsos, corta varias veces por segundo el contacto entre los módulos y la batería, evitando que la batería se sobrecargue. (AutoSolar, 2015)

Figura 6 Controlador PWM

Fuente: WeboSolar, s.f.



Controladores de carga MPPT.

La diferencia principal del MPPT con el PWM es que en términos de energía, la que entra y sale del controlador es la misma, pero en el MPPT la tensión y la corriente son diferentes en la entrada y en la salida. Esto permite un aumento de la tensión del panel solar y aumenta la producción solar en hasta un 30 %, respecto a los controladores PWM. Es especialmente útil también en momentos de sombreados parciales debido a la nubosidad temporal (Victron Energy, s.f.)

Como ventaja, al disponer de tensiones elevadas en el campo fotovoltaico, podemos reducir las pérdidas energéticas debido a las bajas tensiones. Esto hace que los controladores de carga MPPT sean muy interesantes y casi obligatorios, cuando se tienen campos fotovoltaicos de mediana y elevada potencia, donde se pretende generar el máximo de energía posible. (Victron Energy, s.f.)

De esta forma, a diferencia de los PWM, se pueden usar paneles de diferentes tensiones (de 36, 60, 72 celdas, etc.), permitiendo un uso más amplio respecto a la potencia de paneles disponibles en el mercado (como por ejemplo los paneles usados comúnmente en instalaciones on-grid), aumentando, a su vez, un 30 % sobre la energía generada por un PWM. (Victron Energy, s.f.)

“Los reguladores MPPT son más caros, a veces incluso doblan con facilidad el precio de los PWM a igualdad de potencia, también son bastante más grandes.” (AutoSolar, 2015)

Figura 7 Controlador MPPT

Fuente: WeboSolar, s.f.



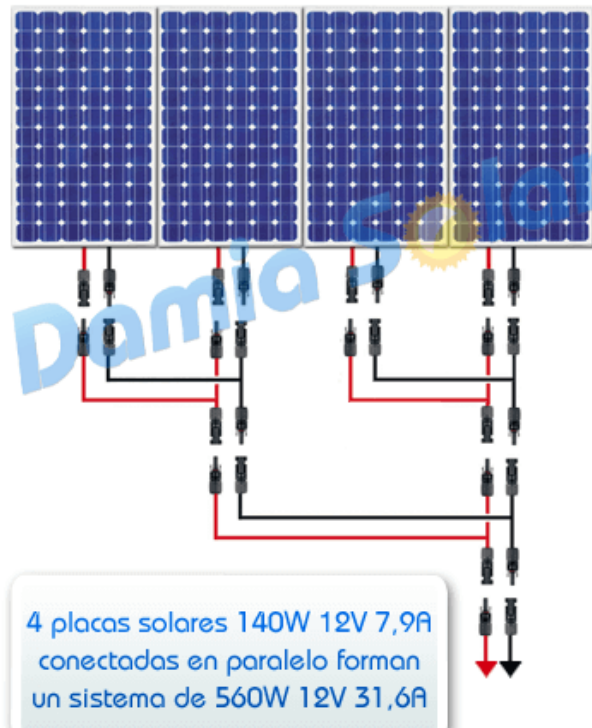
Conexión de los paneles solares.

En paralelo.

La conexión en paralelo se realiza conectando, por un lado, todos los polos positivos de las placas de la instalación solar y, por el otro, conectando todos los polos negativos. De esta forma, se mantiene el voltaje o tensión (voltios) de las placas solares, mientras que se suma la intensidad (amperios). Por ejemplo, si se conectan en paralelo 4 placas solares de 140W 7,9A (amperios) 12V cada una, se obtendrán 560W 31,6A a un voltaje de 12 voltios. En lo que se refiere al regulador, en las placas conectadas en paralelo se deberá utilizar siempre un regulador convencional de tipo PWM. (Damia Solar, 2016)

Figura 8 Conexión de placas en paralelo

Fuente: DamiaSolar, 2016.

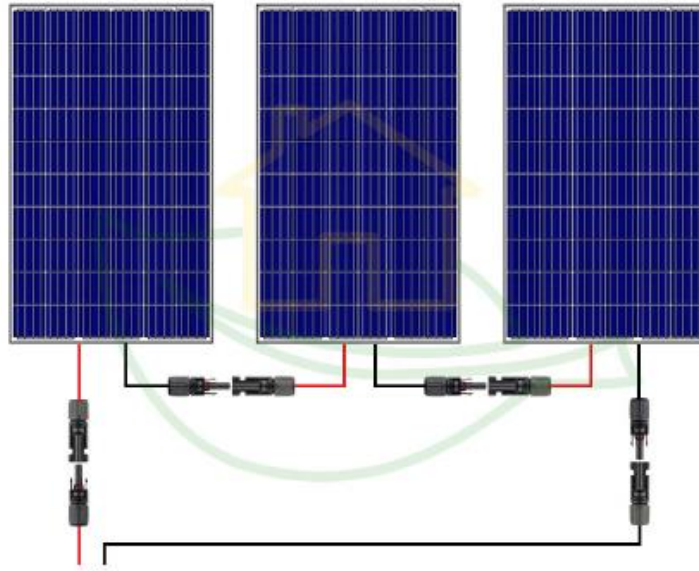


En serie.

La conexión en serie se realiza en paneles solares con potencias entre los 200W y los 260W, compuestos por 60 células y para uso en instalaciones solares de 24V o 48V. Mediante la conexión en serie, se conectan directamente las placas solares entre sí, conectando el polo positivo de un panel con el polo negativo del siguiente panel. A diferencia de la conexión, en paralelo, se mantiene la intensidad y se suma el voltaje. (Damia Solar, 2016)

Figura 9 Conexión de placas en serie

Fuente: AutoSolar, 2018.

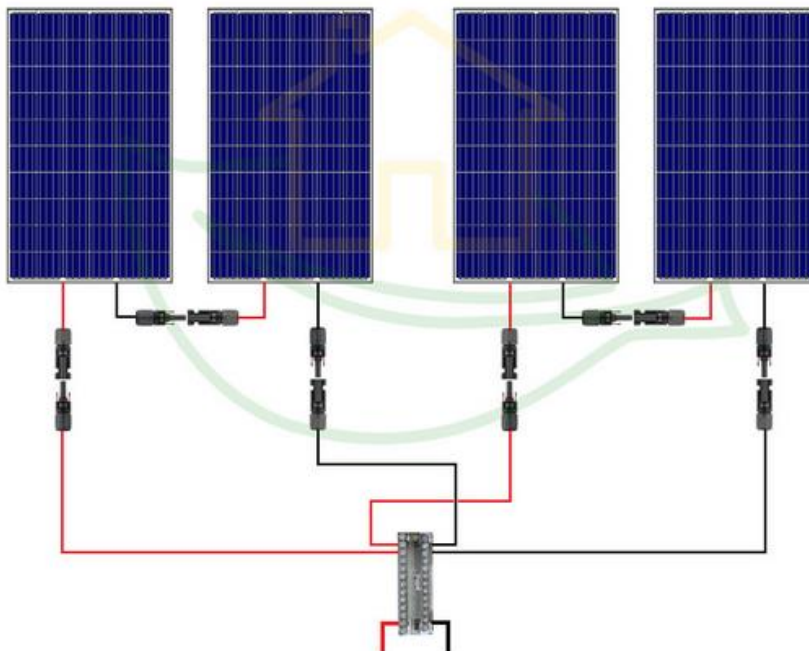


Conexión en serie y paralelo.

La conexión mixta en serie y paralelo se suele utilizar, habitualmente, en instalaciones solares donde se conecten 5 o más placas solares de 60 células y potencia superior a 200W, ya que permite obtener un voltaje no demasiado alto y, a su vez, multiplicar el amperaje total de la instalación. De esta forma, gracias a esta conexión, se aumenta tanto el voltaje como la intensidad. (Damia Solar, 2016)

Figura 10 Conexión de placas en serie y paralelo

Fuente: AutoSolar, 2018.



Reglamento Generación Distribuida para Autoconsumo con Fuentes Renovables.

La generación distribuida “puede presentar diversas modalidades. Entre ellas la medición neta sencilla, conocida también como balance neto, y la medición neta completa”. (MINAE, 2016).

En la modalidad medición neta completa, “los excedentes generados por la generación distribuida y vertidos a la red son objeto de compra por la empresa de distribución, por lo que no se trata solamente de autoconsumo. Por tanto, supuesto en que estamos ante una prestación de servicio público sujeta a lo dispuesto en la ley 7200 de cita y la Ley de la ARESEP. Por lo que la generación distribuida con venta de excedentes requiere concesión de servicio público, conforme lo dispuesto en las citadas leyes”. (MINAE, 2016).

El MINAE (2016) expresa lo siguiente:

En la generación distribuida con neteo simple, que es objeto de la presente consulta, el generador vierte la energía consumida, originándole un derecho a un consumo diferido de la energía producida e incorporada a la red. Para efectos de verter los excedentes generados, el generador requiere acceso y conexión a la red de distribución. Red y servicio de distribución que son regulados.

SECCIÓN II

De la empresa distribuidora

Artículo 9°—Empresa distribuidora. Es el titular de una concesión de servicio público de distribución y comercialización de energía eléctrica, encargada del planeamiento, construcción, operación y mantenimiento de la red, así como el trasiego y venta de electricidad.

Artículo 10. —Estudio técnico de capacidad máxima para interconexión de sistemas. La empresa distribuidora tiene la obligación de realizar los estudios técnicos para determinar la capacidad máxima de potencia que se puede agregar a cada circuito. El estudio técnico base debe incluir, al menos, los siguientes criterios:

- a) Variaciones de frecuencia.
- b) Sobrecorrientes.
- c) Capacidad máxima de la infraestructura para el flujo de potencia.
- d) Fluctuaciones de voltaje.
- e) Corto circuito.
- f) Coordinación de protección.

- g) Estabilidad transitoria.
- h) Límites de parpadeo y distorsión armónica.
- i) Topología de la red.

Artículo 11. —Normas técnicas aplicables. Para brindar el servicio de interconexión la empresa distribuidora debe cumplir con las normas técnicas establecidas por la ARESEP.

SECCIÓN III

Del productor-consumidor

Artículo 13. —Productor-consumidor. Toda persona física o jurídica que produce electricidad con fuentes renovables para ser aprovechada exclusivamente por él, en el mismo sitio donde se genera, con el único propósito de suplir parcial o totalmente sus necesidades de energía eléctrica.

Artículo 17. —Prohibición de interconexión, distribución y comercialización. Se prohíbe al productor-consumidor no interconectado, que se interconecte a la red de distribución y que distribuya o comercialice de alguna forma, la energía que produzca.

Artículo 19. —Responsabilidades del productor-consumidor con un sistema de generación interconectado a la red de distribución. Son responsabilidades del productor-consumidor interconectado:

- a) Previo a instalar el sistema de generación distribuida para autoconsumo deberá obtener la autorización por parte de la empresa distribuidora para su instalación.
- b) Instalar únicamente equipos que cumplan las especificaciones técnicas, constructivas y operativas contempladas en las normas técnicas.

- c) El diseño del sistema de generación distribuida deberá estar firmado y sellado por un ingeniero colegiado y visado por el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos.
- d) Adecuar y mantener el sistema estructural y eléctrico de su inmueble, para los nuevos requerimientos del sistema de generación distribuida.
- e) Diseñar, construir, operar y mantener el sistema de generación distribuida y sus instalaciones eléctricas de conformidad con las normas técnicas.
- f) Cumplir en todos sus extremos el contrato de interconexión suscrito con la empresa distribuidora.
- g) Cumplir con los procedimientos, requisitos, condiciones técnicas y cualquier otro requerimiento establecido por la empresa distribuidora.
- h) Permitir el acceso del personal de la empresa distribuidora al área donde se ubique el sistema de generación distribuida.
- i) Atender las consultas y recomendaciones que la empresa distribuidora le realice en cumplimiento con este reglamento y las normas técnicas.
- j) Hacer una correcta disposición final de los residuos de los sistemas de generación y almacenamiento de la energía, en concordancia con la Ley N° 8839, Ley para la Gestión Integral de Residuos y Reglamento N° 37567-S-MINAET-H, Reglamento General a la Ley para la Gestión Integral de Residuos.

Artículo 20. —Prohibición para la distribución y comercialización. La interconexión del sistema de generación distribuida no le otorga el derecho a utilizar la red de distribución para distribuir y comercializar energía, con el fin de satisfacer la demanda de electricidad a

terceros o bien satisfacer la demanda de electricidad en un sitio diferente al punto de interconexión establecido en el contrato.

Capítulo III

SECCIÓN III

Del Registro de Generación Distribuida para Autoconsumo

Artículo 32. —De la renovación, cesión, suspensión o cancelación. Para proceder a modificar el asiento de inscripción del contrato de interconexión, la empresa distribuidora deberá notificar a la Dirección de Energía cualquier modificación al contrato de interconexión (sea renovación, cesión, suspensión o cancelación) dentro de los diez días posteriores.

Disposiciones generales para el sistema de generación distribuida para autoconsumo.

Artículo 34. —Autorización para almacenamiento y retiro de energía. El productor-consumidor podrá depositar en la red de distribución la energía no consumida, y tendrá derecho a retirar hasta un máximo del cuarenta y nueve por ciento (49 %) de la energía total generada, para utilizarla en el mes o meses siguientes en un periodo anual.

La energía total producida y la energía no consumida serán contabilizadas de forma mensual por un período de un año dentro del proceso de facturación, siendo su fecha anual de corte un acuerdo de las partes dentro del contrato de interconexión.

Se exceptúan de estas limitaciones, previa evaluación y autorización de la empresa distribuidora, los sistemas de generación distribuida que utilicen residuos agroindustriales o la fuerza hidráulica para la generación de electricidad.

Artículo 42. —Tarifas. La ARESEP será la responsable de establecer las tarifas de interconexión, acceso, cargos por potencia, actividades de gestión administrativa y técnica y cualquier otro cargo aplicable a la actividad regulada asociada a la generación distribuida para autoconsumo modalidad contractual medición neta sencilla.

Artículo 44. —Capacidad máxima de sistemas conectados a un circuito. La capacidad máxima de todos los sistemas de generación conectados en un mismo circuito, incluyendo el sistema propuesto, no deberá exceder el quince por ciento (15 %) de la demanda máxima anual del circuito. Se considera demanda máxima, como aquella medida a la salida de la subestación a la cual está conectado el circuito bajo condiciones de operación normal del mismo, no se considera la potencia asociada a los circuitos de respaldo.

Análisis financiero.

El análisis financiero toma los resultados de todos los años en estudio y los presenta en términos de una sola cifra. No obstante, para alcanzar este objetivo, la metodología debe tomar en cuenta el valor decreciente del dinero y los beneficios generales que tienen lugar con el paso del tiempo. (FAO, s.f.)

Se basa en el hecho de que el valor del dinero cambia con el paso del tiempo. Aun con una inflación mínima, un peso de hoy puede “comprar menos” que un peso de hace un año. El VAN permite conocer, en términos de “pesos de hoy”, el valor total de un proyecto

que se extenderá por varios meses o años y que puede combinar flujos positivos (ingresos) y negativos (costos). (CalcuWorld, s.f.)

Se calcula utilizando la siguiente fórmula matemática (CalcuWorld, s.f.):

$$\text{VAN} = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

- V_t representa los flujos de caja en cada periodo t .
- I_0 es el valor del desembolso inicial de la inversión.
- n es el número de períodos considerado.
- k es el tipo de interés.

Tasa Interna de Retorno (TIR).

Este indicador se relaciona con el VAN, ya que, utilizando una fórmula similar, determina cuál es la tasa de descuento que hace que el VAN de un proyecto sea igual a cero. Es decir, que se expresa como un porcentaje (TIR=12 %, por ejemplo). En términos conceptuales, puede entenderse como la tasa de interés máxima a la que es posible endeudarse para financiar el proyecto, sin que genere pérdidas. (Equipo Editorial Buenos Negocios, 2013)

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

Enfoque de la investigación

Este estudio es considerado como no experimental, ya que se observa el comportamiento de las variables necesarias para realizar los diseños y, con esto, llegar a un diseño ideal para la institución, igualmente, cuantitativo, ya que las características del estudio son desarrolladas y recalculadas para obtener el diseño más eficiente y económico.

Método de la investigación

Esta investigación es exploratoria, debido a que en el colegio no se ha realizado ningún estudio de este tipo. También, es descriptiva, porque se observa, aprende y describe la situación actual de la institución.

Fuentes de información

En este estudio, se procuró utilizar las mediciones más actualizadas para obtener un diseño lo más real posible, también, la facturación del año 2017 para evitar grandes discrepancias, sin embargo, algunas citas bibliográficas o estudios no son los más recientes.

Variables

Las principales variables en este estudio son la velocidad del viento promedio y radiación solar en la zona de El Cocal, Puntarenas. Como variables secundarias están: la cantidad de paneles solares y aerogeneradores para conseguir suplir el consumo eléctrico del colegio y las dimensiones de cada dispositivo para asegurarse que el área que requiere es igual o menor de la que se tiene.

Instrumentos

En este estudio, se utilizarán diferentes instrumentos para poder realizar los cálculos adecuados, se seleccionó Microsoft Office Excel como herramienta principal, dado que se encuentran las fórmulas necesarias del análisis financiero y es más sencillo hacer los recálculos, también, se utiliza el NEC 2008, puesto que es la guía aprobada para hacer diseños eléctricos, igualmente, se hace uso de AutoCad para efectuar el diagrama unifilar.

Proceso para la recolección y análisis de datos



CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Diagnóstico

Descripción de la institución.

El Colegio Científico Costarricense Sede del Pacífico, está localizado en El Cocal, Puntarenas, es un colegio público, preuniversitario, en el cual se estudia en forma muy intensa. Se encuentran dentro del campus de distintas sedes de la Universidad de Costa Rica, debido a la necesidad del uso de los laboratorios de química, física, biología, idiomas, y cómputo.

Cuenta con un área de 182.36 m² y el techo tiene un área de 218.79 m², se utilizarán los techos para la colocación de los paneles, a pesar de que es un colegio no muy grande, tiene un alto consumo energético, debido a que, por ser una zona con temperaturas altas, utilizan varios aires acondicionados, ya que tienen diferentes máquinas que requieren estar a una temperatura menor.

Por este motivo, se requiere un proyecto que haga uso de energías renovables, la meta principal es reducir el consumo eléctrico, aprovechando la facturación mensual y radiación solar de la zona, con esto, se obtendrá la cantidad de paneles solares y aerogeneradores necesarios para cubrir el consumo energético del colegio, estos cálculos son realizados con el peor escenario posible para asegurar un funcionamiento adecuado.

Figura 11 Sección izquierda del techo disponible

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 12 Sección derecha del techo disponible

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 13 Espacio disponible para canaletas y tubería de conductores

Fuente: Elaboración Propia.



Definición del diseño.

Se plantean 3 diseños. Uno se realizará con base en el consumo eléctrico, la primera propuesta será únicamente fotovoltaica, diseñada para que cubra con el 100 % de la energía consumida del Colegio Científico Costarricense con inversores. La segunda propuesta contará con paneles solares y micro aerogeneradores con inversores, en este diseño, se calculará la potencia que genera la turbina eólica. Finalmente, el tercer diseño será realizado con la propuesta que resulte más rentable y microinversores para observar el comportamiento de estos, mediante un análisis financiero se comparará cada diseño con el fin de conseguir la propuesta más económica.

Radiación solar Puntarenas 2015-2017

Tabla 1 Radiación Solar Puntarenas 2015-2017

Fuente: National Aeronautics and Space Administration

Radiación Solar (HSP)	
Mes	Promedio
Enero	9,61
Febrero	9,55
Marzo	9,82
Abril	10,15
Mayo	10,49
Junio	10,44
Julio	10,37
Agosto	10,39
Septiembre	10,39
Octubre	10,39
Noviembre	10,30
Diciembre	9,95

Los datos de radiación solar de la tabla 1, fueron determinados con las coordenadas 09° 58' 55", -84° 48' 41" aproximadamente (Apéndice A y B).

El sistema se diseñará para el mes con menor HSP. Como se puede apreciar en esta tabla, el mes que cuenta con menor radiación solar es febrero, con 9.55.

Consumo energético del colegio en el 2017.

Tabla 2 Consumo de energía del Colegio Científico Puntarenas, 2017.

Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad

Mes	Consumo (kWh/mes)	Costo
Enero	571	¢75.385
Febrero	945	¢107.525
Marzo	2022	¢229.560
Abril	2654	¢304.635
Mayo	1824	¢222.945
Junio	2356	¢286.930
Julio	1665	¢203.980
Agosto	1285	¢167.250
Septiembre	2033	¢250.735
Octubre	1693	¢216.815
Noviembre	1393	¢179.080
Diciembre	1352	¢167.600
Total	19793	¢2.412.440

En la tabla 2 se pueden observar los kWh que consumió la institución en el año 2017, según la tabla, el mes con mayor consumo es abril, con 2654 kWh.

Velocidad del viento.

Tabla 3 Velocidad del viento promedio, Puntarenas 2015-2017

Fuente: National Aeronautics and Space Administration

Velocidad del viento promedio	
Mes	Velocidad (m/s)
Enero	2,24
Febrero	2,70
Marzo	3,05
Abril	2,96
Mayo	2,38
Junio	2,43
Julio	2,38
Agosto	2,34
Septiembre	2,33
Octubre	2,25
Noviembre	2,30
Diciembre	2

Los datos de la tabla anterior son los medidos a 10m de altura.

Como se citó anteriormente, el diseño del sistema se realizará con el mes de mayor consumo eléctrico del colegio y con el mes que posea menos radiación solar y menor velocidad del viento. De esta manera, se asegurará que el sistema sea capaz de suplir las necesidades del colegio aún en las peores condiciones, por tanto, se usarán los datos de abril de la tabla del consumo energético, febrero de la tabla de radiación solar y de la tabla de

velocidad de viento promedio se calculará la potencia generada por la turbina seleccionada, dicha turbina se escogerá con una velocidad de arranque del mes con menos velocidad.

Para esta investigación, se realizarán 3 diseños que cumplan con el 100 % del consumo eléctrico, los cuales son:

1. El primero está constituido por el 100 % de la demanda con paneles solares e inversores.
2. El segundo diseño será el 100% de consumo energético con turbinas eólicas y paneles e inversores.
3. El tercero será similar al más rentable entre los dos anteriores pero con microinversores.

Desarrollo

Caso #1 Primer diseño fotovoltaico con inversores.

Se plantea un sistema que pueda cumplir con el 100 % del consumo anual, igualmente, que reduzca considerablemente los cargos por el uso de electricidad.

Cantidad de paneles.

Se indicó previamente que abril es el mes con mayor gasto. En la tabla 2, se observa que la institución tuvo un consumo de 2654 kWh/mes, para el cálculo de paneles solares se necesita la potencia que es consumida a diario durante el mes.

El consumo energético es 2654 kWh/mes.

Abril cuenta con 30 días, por tanto, el consumo diario son los kWh consumidos entre la cantidad de días del mes.

$$\frac{2654 \text{ kWh/mes}}{30 \text{ días}} = 88.47 \text{ kWh/día}$$

Se seleccionó un panel con una potencia nominal de 325w.

El mes con menor HSP es febrero, con 9.55.

A continuación se calculará la cantidad de paneles solares necesarios para abastecer el colegio.

Ecuación 1 Energía generada por un panel solar

Fuente: SunFields Europe, 2018

$$E_{panel} = I_{panel} \times V_{panel} \times HSP \times 0,9$$

Siendo, I_{panel} y V_{panel} la corriente máxima y tensión máximas del panel, HSP son las horas sol pico, y 0,9 sería el coeficiente del rendimiento del panel (típicamente 85-90% al descontar ya las pérdidas). La energía resultante estaría expresada en Whd. (SunFields Europe, 2018)

Dado que esta fórmula es para obtener la energía que genera un panel, si se quiere saber cuánta energía va a generar un sistema, se tendría que multiplicar la energía que genera un panel por la cantidad de paneles, de la siguiente manera:

$$E_{panel} = I_{panel} \times V_{panel} \times HSP \times 0,9 \times N^{\circ} \text{ de paneles}$$

Despejando la fórmula anterior para obtener la cantidad de paneles se tiene:

$$N^{\circ} \text{ de paneles} = \frac{E_{panel}}{I_{panel} \times V_{panel} \times HSP \times 0,9}$$

$$N^{\circ} \text{ Paneles} = \frac{88.47 \text{ kWh/día}}{325 \times 9.55 \times 0,9}$$

$$N^{\circ} \text{ Paneles} = 32$$

Potencia en los paneles solares.

Para calcular la potencia en el sistema, se multiplica la corriente del panel por el voltaje y la cantidad de paneles.

Ecuación 2 Cálculo de potencia

Fuente: García, 2015

$$P = V \times I$$

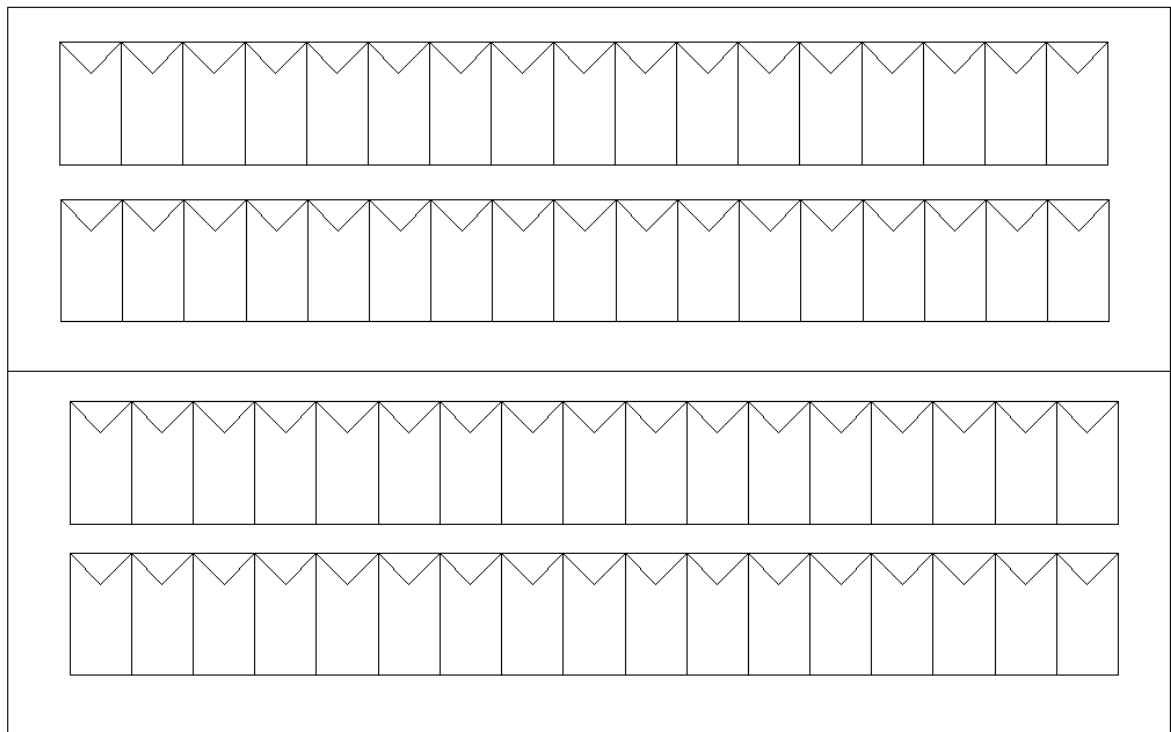
Esta ecuación se aplica en cada panel, por lo tanto, se multiplicará por la cantidad de paneles obtenidos.

$$P_p = 37 \times 8,78 \times 32 = 10\,395,52 \text{ W}$$

Las dimensiones de los paneles solares es de 1960x992x40 mm (Apéndice F) y las dimensiones de cada sección del techo es de 18.7x5.85 m, comparando estos datos, se obtiene que en ambas secciones del techo se pueden colocar un total de 68 paneles, tomando en cuenta las áreas para mantenimiento.

Figura 14 Cantidad de paneles que se pueden colocar en el techo

Fuente: Elaboración Propia.



En la siguiente tabla, se muestra la energía generada mensualmente por los 32 paneles, obtenida despejando la ecuación 1.

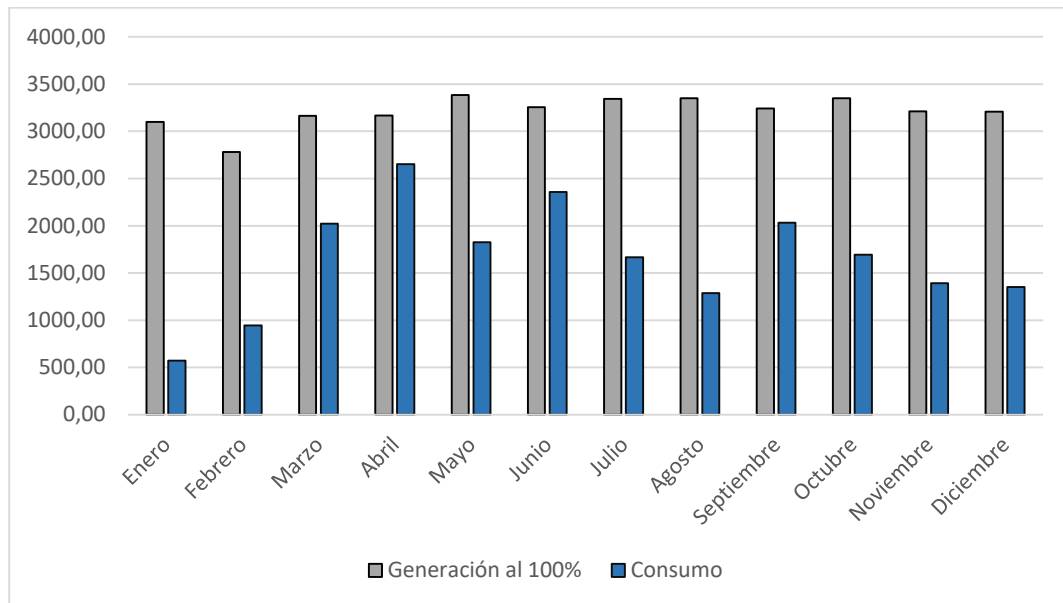
Tabla 4 Potencia generada por 32 módulos fotovoltaicos

Fuente: Elaboración Propia.

Mes	Días	Radiación (HSP)	Energía generada (kWh/mes)	Potencia Consumida (kWh/mes)	Excedente o faltante
Enero	31	9,61	3099,34	571	2528,34
Febrero	28	9,55	2781,93	945	1836,93
Marzo	31	9,82	3164,89	2022	1142,89
Abril	30	10,15	3166,80	2654	512,80
Mayo	31	10,49	3383,05	1824	1559,05
Junio	30	10,44	3257,28	2356	901,28
Julio	31	10,37	3343,29	1665	1678,29
Agosto	31	10,39	3349,74	1285	2064,74
Septiembre	30	10,39	3240,64	2033	1207,64
Octubre	31	10,39	3350,81	1693	1657,81
Noviembre	30	10,30	3212,56	1393	1819,56
Diciembre	31	9,95	3207,88	1352	1855,88
		Total	38558,21	19793	18765,21

Gráfico 1 Generación en 32 paneles vs Consumo

Fuente: Elaboración Propia.



Como lo muestra la tabla 4, para la energía anual producida por los paneles (32 38,558 kWh) contra el consumo anual (19 793 kWh). Hay una sobreproducción del 94.8 %. Debido a que este diseño no cuenta con banco de baterías, la energía producida que no se consumirá por la institución, tendría que ser inyectada a la red, por lo tanto, se realizará un recálculo para abastecer el sistema obteniendo menos sobre-producción, pues esta es ocasionada por exceso de paneles.

Se seleccionó una disminución en los paneles de 20 % del total, este porcentaje se escogió para analizar el comportamiento reduciendo una cantidad considerable de paneles.

Ecuación 3 Reducción de paneles

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Cantidad de paneles} = 32 \times 80 \%$$

$$\text{Cantidad de paneles} = 26$$

Potencia en los paneles.

Por la ecuación 2 y multiplicando por la cantidad de paneles.

$$P = 37 \times 8,78 \times 26 = 8.446 \text{ kW}$$

Para obtener la nueva generación, se repite el proceso aplicado en los datos de la tabla

4.

Tabla 5 Potencia generada por 26 paneles solares

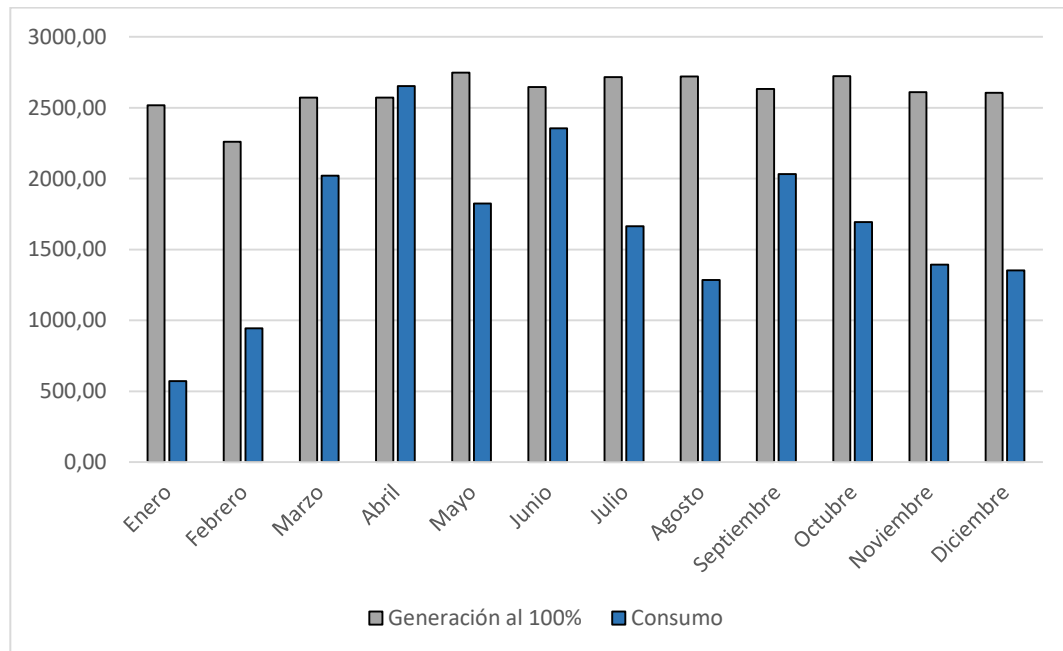
Fuente: Elaboración Propia.

Mes	Días	Radiación (HSP)	Energía generada (kWh/mes)	Potencia Consumida (kWh/mes)	Excedente o faltante (kWh/mes)
Enero	31	9,61	2518,21	571	1947,21
Febrero	28	9,55	2260,32	945	1315,32
Marzo	31	9,82	2571,48	2022	549,48
Abril	30	10,15	2573,03	2654	-80,97
Mayo	31	10,49	2748,73	1824	924,73
Junio	30	10,44	2646,54	2356	290,54
Julio	31	10,37	2716,42	1665	1051,42
Agosto	31	10,39	2721,66	1285	1436,66
Septiembre	30	10,39	2633,02	2033	600,02
Octubre	31	10,39	2722,53	1693	1029,53
Noviembre	30	10,30	2610,21	1393	1217,21
Diciembre	31	9,95	2606,40	1352	1254,40
		Total	31328,54	19793	11535,54

En esta ocasión la energía que genera el sistema tiene una sobreproducción de 11535,54 kWh, siendo este resultado un 58 % del total.

Gráfico 2 Nueva generación vs Consumo

Fuente: Elaboración Propia.



Segundo diseño, eólico/fotovoltaico con inversores.

Esta propuesta es un híbrido entre paneles solares y turbinas eólicas, se obtendrá la energía anual generada por los aerogeneradores y esta se le restará al consumo energético para tener lo que deben cubrir los paneles solares.

Cantidad de turbinas eólicas.*Tabla 6 Ficha técnica, Turbina eólica E70 Pro*

Fuente: Enair, 2018.

Número de palas	3
Material palas	Fibra de vidrio con resinas y núcleo de poliuretano
Generador	250rpm nominales imanes de neodimio
Potencia	5500W
Potencia nominal	4000W (IEC 61400-2)
Tensión	24 / 48 / 220V
Clase de viento	CLASS I / IEC 61400-2 / NVN I - A
Diámetro	4,3m
Sentido de giro	Horario
Area de barrido	14,5m²
Peso	165Kg
Aplicaciones	Carga de baterías 24 o 48V y conexión a red
Viento de arranque	2m/s
Velocidad nominal	11m/s

Para el cálculo de los turbinas, se seleccionó un aerogenerador Enair E70 Pro, según las especificaciones de Enair, la velocidad de arranque es de 2 m/s y la velocidad para tener la potencia nominal es de 11 m/s. Esta turbina se escogió a conveniencia, debido a que el mes con menor velocidad de viento es diciembre, con 2m/s. Así se asegura que en todos los meses se tenga suficiente velocidad como para que la turbina empiece a funcionar y se pueda aprovechar al máximo.

Como se observa en la tabla 6, para el aerogenerador E70 Pro, la velocidad requerida para obtener la potencia nominal es de 11 m/s, cualquier velocidad menor a esta reduce la generación, además en 8, tiene una potencia máxima de 5.5 kW y una potencia nominal de 4 kW.

Los datos de velocidad del viento promedio fueron proporcionados por la NASA, los cuales no incluyen la cantidad de horas por mes o día del viento.

Gráfico 3 Energía generada por la turbina E70 Pro

Fuente: Enair, 2018.

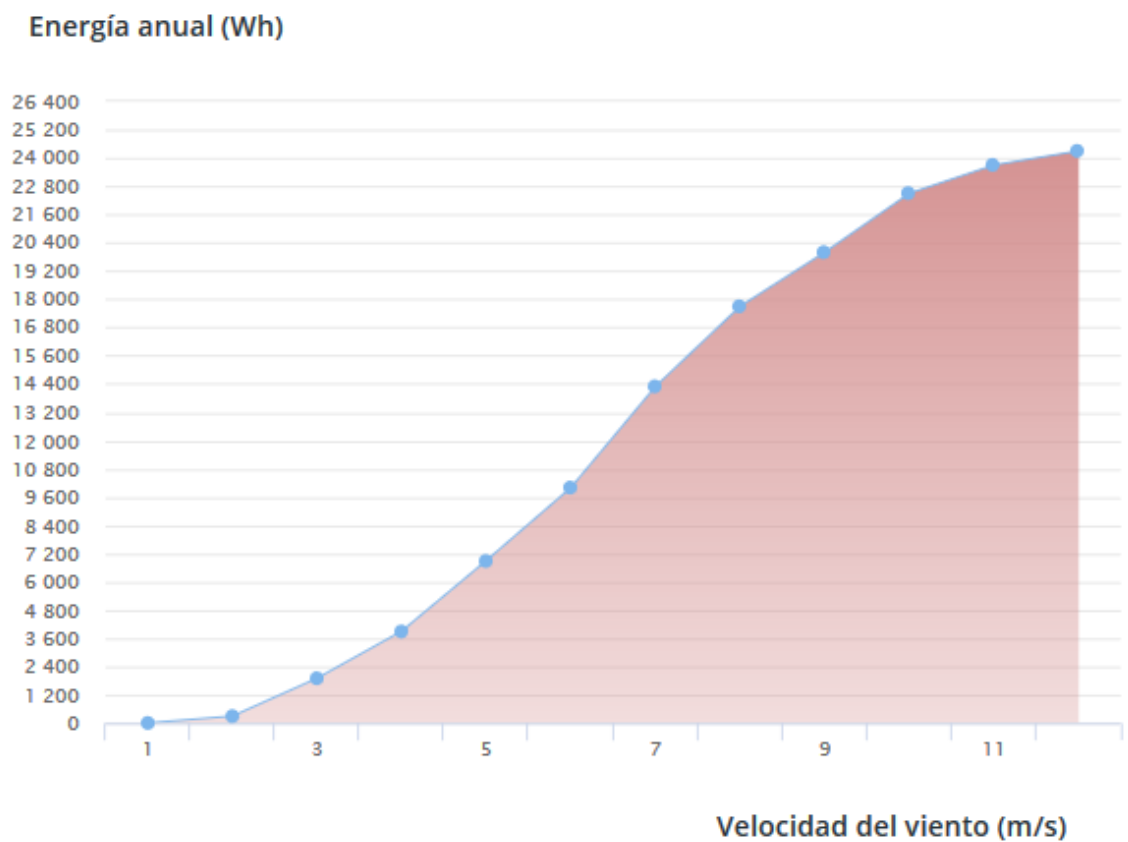


Tabla 7 Potencia generada por un aerogenerador

Fuente: Elaboración Propia.

Mes	Días	Velocidad del viento (m/s)	Energía Generada (kWh/mes)
Enero	31	2,24	50
Febrero	28	2,70	104
Marzo	31	3,05	160
Abril	30	2,96	144
Mayo	31	2,38	64
Junio	30	2,43	70
Julio	31	2,38	64
Agosto	31	2,34	60
Septiembre	30	2,33	59
Octubre	31	2,25	51
Noviembre	30	2,30	56
Diciembre	31	2,00	31
	Total	N/A	913

La tabla 7 fue obtenida con la gráfica de producción de la turbina E70 Pro, la energía generada por un solo aerogenerador Enair E70 Pro, según los datos de velocidad promedio del viento es de 913 kWh/año.

Para obtener la cantidad de aerogeneradores, se plantea la siguiente fórmula:

Ecuación 4 Cantidad de aerogeneradores

Fuente: Elaboración Propia

$$N^{\circ} \text{ de aerogeneradores} = \frac{\text{Energía anual a cubrir}}{\text{Energía generada}}$$

Se escogió una energía a cubrir por los aerogeneradores de 4000 kWh, este dato se seleccionó tomando en cuenta una reducción significativa de módulos fotovoltaicos.

$$N^{\circ} \text{ de aerogeneradores} = \frac{4\ 000\ kWh}{913\ kWh}$$

$$N^{\circ} \text{ de aerogeneradores} = 5$$

Potencia en las turbinas.

En la ficha técnica del aerogenerador, no se muestra el dato de la corriente o el voltaje, sin embargo, se tiene que la potencia en cada turbina eólica es igual a 5.5 kW, por lo tanto, se multiplica esta potencia por las 5 turbinas eólicas.

$$P = 5 \times 5.5\ kW = 27\ 500\ kW$$

Figura 15 Espacio disponible para los aerogeneradores

Fuente: PVCAD (PVSketch)



Figura 16 Dimensiones del aerogenerador

Fuente: Enair, 2018.



En la figura 15 se tiene el área disponible para la colocación de los aerogeneradores, mientras que en la figura 16 las dimensiones, con estos datos y con la ayuda de AutoCAD, se realizará un diseño de cómo podrían ir colocados los aerogeneradores.

Según la tabla 6, el área de barrido de cada aerogenerador es de 14.5 m^2 . Por la figura 15 se tiene que cada turbina eólica posee 4.3m de diámetro de las palas y un lateral de 3.4m

Para saber cuál es la distancia mínima a la que deben estar los aerogeneradores puestos en fila, se plantea la siguiente fórmula:

Ecuación 5 Distancia requerida

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Diámetro de las palas} \times \text{distancia} = \text{Área de barrido}$$

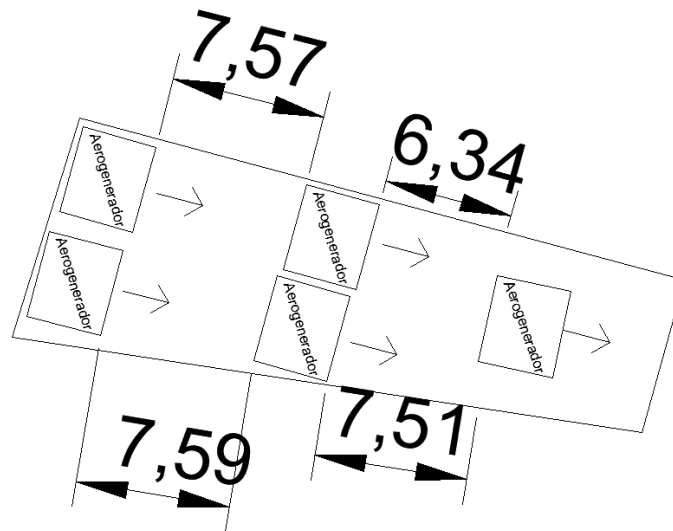
Despejando la distancia en la fórmula anterior y sustituyendo los valores, se tiene:

$$\text{Distancia} = \frac{14.5\text{m}^2}{4.3\text{m}} = 3.37\text{m}$$

A continuación, tomando en cuenta la distancia obtenida y los diámetros, se muestra una posible manera de colocar los aerogeneradores.

Figura 17 Posición de los aerogeneradores.

Fuente: Elaboración Propia.



Las flechas representan la dirección de las palas y las distancias mostradas se encuentran en metros.

Tabla 8 Potencia generada por 5 aerogeneradores

Fuente: Elaboración Propia.

Mes	Energía Generada (kWh/mes)
Enero	250
Febrero	520
Marzo	800
Abril	720
Mayo	320
Junio	350
Julio	320
Agosto	300
Septiembre	295
Octubre	255
Noviembre	280
Diciembre	155
Total	4565

La potencia que necesita abastecer el sistema de aerogeneradores es de 4000 kWh/año y lo que genera cada uno es de 913 kWh/año, al utilizar 5 aerogeneradores Enair E70 Pro,

como se muestra en la tabla 9, la potencia que producen es de 4565 kWh/año, sin embargo, no se considera viable que para tener 5 turbinas eólicas, se genere un poco más de la potencia nominal de uno, la velocidad promedio del viento en la zona es de aproximadamente 2.2 m/s y para conseguir la potencia nominal se necesita una velocidad de 11 m/s (Tabla 6), por lo tanto este diseño no será utilizado.

Cálculo de potencia para seleccionar el inversor.

Para este cálculo, se desarrollarán 2 casos, uno con inversor central y otro con microinversores, esto para verificar cuál de los dos es el recomendable para esta investigación, como se menciona anteriormente, el objetivo principal es encontrar el mejor diseño económicamente para el colegio.

Los paneles estarán colocados en serie, la corriente será la misma en el sistema mientras que el voltaje será la suma de cada elemento, para este cálculo se utilizará la propuesta que tenga mayor cantidad de paneles, si el inversor cubre con lo que esta necesita, también cumplirá con lo que necesita para la propuesta con menor cantidad, según la ficha técnica (Apéndice 7), el voltaje en cada panel es de 37 V y tienen una corriente de 8,78 A.

Ecuación 6 Voltaje de un sistema en serie

Fuente: Electricasas, 2018.

$$VT = V1 + V2 + V3 + \dots + Vn$$

Al ser el mismo voltaje en cada elemento, se multiplicará el voltaje en cada panel por la cantidad de paneles.

$$VT = 26 \times 37 = 962 V$$

Inversor.

- *Caso con 26 paneles solares.*

Por la ecuación 2 y con 26 paneles:

$$P = 8,78 A \times 37 \times 26 = 8.446 kW$$

La potencia que se requiere en el inversor también se puede obtener multiplicando la potencia nominal de cada panel por la cantidad de paneles, con estos datos, se tiene que se necesita un inversor de al menos 8.446 kW.

- *Caso con 32 paneles solares.*

Por la ecuación 2 y multiplicando por la cantidad de paneles:

$$Potencia\ del\ sistema = 8,78 A \times 37 \times 32 = 10\ 395.52 kW$$

Con este dato, se escoge un inversor SE11400A.

- *Caso con Microinversores.*

Se selecciona un microinversor Enphase Energy IQ6PLUS-60-2-US, dado que este microinversor es compatible con paneles de hasta 400W (Apéndice K).

Análisis financiero.

En este análisis financiero no se tomará en cuenta el costo de los aerogeneradores, esto debido a que como se mencionó anteriormente, esta propuesta no es viable.

Los Colegios Científicos Costarricenses están ubicados dentro de ciertas sedes de la UCR y cuentan con su propia Junta de Administrativa de Ahorros, esta junta es la que les entrega el presupuesto para cualquier tipo de gasto o inversión.

Los porcentajes de tasas de interés para proyectos eco amigables es de 8 % aproximadamente, este dato fue proporcionado por el Ing. Álvaro Rojas Camacho, ya que es un ingeniero con experiencia en el área y los bancos otorgan esta tasa solamente cuando se solicita el préstamo.

Se seleccionó un inversor Solis-1P9K-4G-US, el cual soporta hasta 9 kW.

Para este análisis, se escogieron paneles solares Canadian Solar CS6U-325P con una potencia nominal de 325 W (Apéndice G).

Según La Gaceta N° 174, Alcance N° 167 del viernes 21 de setiembre del 2018, para tarifa T-CO (Comercios y servicios) para un consumo menor o igual a 3000 kWh, cada kWh que se retire de la red se cobrará ¢115,42. (Apéndice C), y una tarifa de acceso de ¢27,86 (Apéndice D) por cada kWh consumido.

Para el análisis, se aplicará un aumento de 10 % de la facturación, esto debido a que, comparando facturas de años anteriores, se pudo percibir que es lo que el ICE aplica.

En vista de que la segunda propuesta no es viable, debido a que la velocidad del viento es baja, no se realizará análisis financiero de esta, en su lugar, se utilizará los datos obtenidos para la primera propuesta antes de hacer la reducción, por lo tanto, la que posee 32 paneles solares.

Se utilizará un periodo de 15 años para los análisis.

Ecuación 7 Cálculo del VAN

Fuente: CalcuWorld, s.f.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Vt}{(1+k)^t} - I_0$$

- V_t representa los flujos de caja en cada periodo t .
- I_0 es el valor del desembolso inicial de la inversión.
- n es el número de períodos considerado.
- k es la tasa de interés.

Para el cálculo del TIR, el VAN es igual a 0 y “ k ” pasa a ser la variable TIR.

Ecuación 8 Cálculo de TIR

Fuente: Sevilla, 2017.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1 + TIR)^t} - I_0$$

Tabla 9 Datos varios

Fuente: Elaboración Propia.

Equipo	Costo por unidad
Inversor Solis-1P9K-4G-US	¢1.242.858 (\$2,071.43)
Inversor SE11400A	¢1.350.876 (\$2,251.46)
Microinversor Enphase Energy IQ6 PLUS	¢93.000 (\$155)
Paneles Canadian Solar CS6U-325P	¢144.300 (\$240.5)
Cargos Fijos	¢115.428,15
Ahorro anual con cargos fijos, 26 paneles	¢2.284.859
Ahorro anual con cargos fijos, 32 paneles	¢2.287.115
Cargo por interconexión	¢48.687

Soporte IronRidge XR-1000-204A, 14'	C\$50.802 (\$84.67)
-------------------------------------	---------------------

La venta del dólar para el 21 de octubre de 2018 se encuentra en C\$600.

En vista de que no se cuenta con una cotización oficial, para la instalación, mantenimiento y mano de obra se considerará un 20% de la inversión de la propuesta que se esté analizando, dentro de este 20% se considera el aumento en el costo del mantenimiento, este dato también fue proporcionado por el Ing. Álvaro Rojas Camacho y como se mencionó anteriormente, es un ingeniero con experiencia en el área, por lo tanto, el dato se considera acertado.

El cargo por interconexión es de un medidor bidireccional es de C\$48.687, esta tarifa fue establecida por la ARESEP (Apéndice E).

Se realizará un análisis de la energía consumida contra la generada para obtener el ahorro en el primer año, este será utilizado en todos los años con una reducción del 10 % este porcentaje es aproximadamente lo que aumenta la facturación anualmente y en todos los casos de análisis financiero, es valorado.

Caso #1 Primer propuesta, 26 módulos fotovoltaicos e inversores.

Tabla 10 Análisis anual del consumo energético, primer año

Fuente: Elaboración Propia.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Energía almacenada (mes anterior)	0	1947,21	3262,53	3812,01	3731,04	4655,77
Energía generada	2518,21	2260,32	2571,48	2573,03	2748,73	2646,54
Energía consumida	571	945	2022	2654	1824	2356
Energía requerida	0	0	0	80,97	0	0
Energía sobrante (a subir a la red)	1947,21	1315,32	549,48	-80,97	924,73	290,54
Bajada de red (comercializadora)	0	0	0	0	0	0
Bajada de la red propia (49%)	0	0	0	80,97	0	0
Facturación con cargos fijos	€ 6.356	€ 7.312	€ 11.666	€ 16.520	€ 11.130	€ 13.272
Facturación actual	€ 75.385	€ 107.525	€ 229.560	€ 304.635	€ 222.945	€ 286.930

Mes	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Energía almacenada (mes anterior)	4946,31	5997,73	7434,39	8034,41	9063,94	10281,15
Energía generada	2716,42	2721,66	2633,02	2722,53	2610,21	2606,4
Energía consumida	1665	1285	2033	1693	1393	1352
Energía requerida	0	0	0	0	0	0
Energía sobrante (a subir a la red)	1051,42	1436,66	600,02	1029,53	1217,21	1254,4
Bajada de red (comercializadora)	0	0	0	0	0	0
Bajada de la red propia (49%)	0	0	0	0	0	0
Facturación con cargos fijos	€ 10.495	€ 9.190	€ 12.011	€ 10.779	€ 9.579	€ 9.272
Facturación actual	€ 203.980	€ 167.250	€ 250.735	€ 216.815	€ 179.080	€ 167.600

Ahorros (Año 1)	€2.284.859
Excedente (kWh)	11536

En la tabla 13, se puede observar que el ahorro del primer año con cargos fijos y paneles es de €2.284.859

Solo se permite bajar el 49 % de la generación, a pesar de esto, al tener una sobreproducción lo suficientemente alta no se necesitaría utilizar energía de la red del ICE.

Se obtiene que, para la primera propuesta, la inversión es de €6.783.562,8

Tabla 11 VAN y TIR

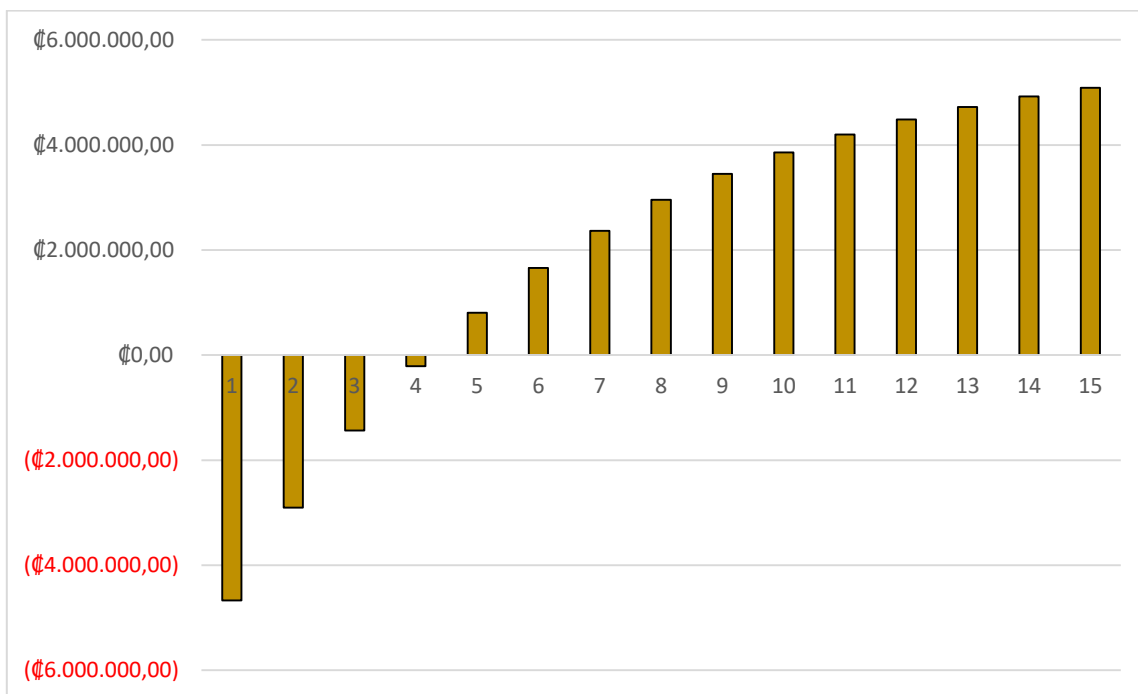
Fuente: Elaboración Propia.

Año	Ahorros	VAN
0	∅0,00	-∅6.783.563
1	∅2.284.859,00	-∅4.667.952,61
2	∅2.056.373,10	-∅2.904.944,13
3	∅1.850.735,79	-∅1.435.770,39
4	∅1.665.662,21	-∅211.458,94
5	∅1.499.095,99	∅808.800,60
6	∅1.349.186,39	∅1.659.016,89
7	∅1.214.267,75	∅2.367.530,46
8	∅1.092.840,98	∅2.957.958,43
9	∅983.556,88	∅3.449.981,75
10	∅885.201,19	∅3.860.001,17
11	∅796.681,07	∅4.201.684,03
12	∅717.012,96	∅4.486.419,74
13	∅645.311,67	∅4.723.699,51
14	∅580.780,50	∅4.921.432,64
15	∅522.702,45	∅5.086.210,25
	TIR	0,23

Con los datos obtenidos en la tabla 14, se posee un TIR de 23 % y un VAN de ∅5.086.210,25.

Gráfico 4 Recuperación de la inversión, primera propuesta

Fuente: Elaboración Propia.



En el gráfico 5, se puede apreciar que en el quinto año se recupera la inversión.

Tabla 12 Resumen primer caso

Fuente: Elaboración Propia.

Inversión	¢6.783.563
Año de recuperación de la inversión	5
Facturación anual con paneles	¢127580
Facturación actual	¢2.412.440
Ahorros generados en el primer año	¢2.284.859
VAN	¢5.086.210,25
TIR	23%

Caso #2 Primera propuesta, 32 módulos fotovoltaicos e inversores.

Tabla 13 Análisis anual del consumo energético, primer año

Fuente: Elaboración Propia

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Energía almacenada (mes anterior)	0	2528,34	4365,27	5508,16	6020,96	7580,01
Energía generada	3099,34	2781,93	3164,89	3166,8	3383,05	3257,28
Energía consumida	571	945	2022	2654	1824	2356
Energía requerida	-2528,34	-1836,93	-1142,89	-512,8	-1559,05	-901,28
Energía sobrante (a subir a la red)	2528,34	1836,93	1142,89	512,8	1559,05	901,28
Bajada de red (comercializadora)	0	0	0	0	0	0
Bajada de la red propia (49%)	0	0	0	0	0	0
Facturación con cargos fijos	₡ 6.356	₡ 7.312	₡ 11.666	₡ 14.264	₡ 11.130	₡ 13.272
Facturación actual	₡ 75.385	₡ 107.525	₡ 229.560	₡ 304.635	₡ 222.945	₡ 286.930

Mes	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Energía almacenada (mes anterior)	8481,29	10159,58	12224,32	13431,96	15089,77	16909,33
Energía generada	3343,29	3349,74	3240,64	3350,81	3212,56	3207,88
Energía consumida	1665	1285	2033	1693	1393	1352
Energía requerida	-1678,29	-2064,74	-1207,64	-1657,81	-1819,56	-1855,88
Energía sobrante (a subir a la red)	1678,29	2064,74	1207,64	1657,81	1819,56	1855,88
Bajada de red (comercializadora)	0	0	0	0	0	0
Bajada de la red propia (49%)	0	0	0	0	0	0
Facturación con cargos fijos	₡ 10.495	₡ 9.190	₡ 12.011	₡ 10.779	₡ 9.579	₡ 9.272
Facturación actual	₡ 203.980	₡ 167.250	₡ 250.735	₡ 216.815	₡ 179.080	₡ 167.600

Ahorros (Año 1)	₡2.287.115
Excedente	18765

En esta ocasión, al ser la generación un 94.8 % de la demanda, no se necesita bajar energía de la red, se tiene un ahorro de ₡2.287.115 en el primer año.

Tabla 14 VAN y TIR

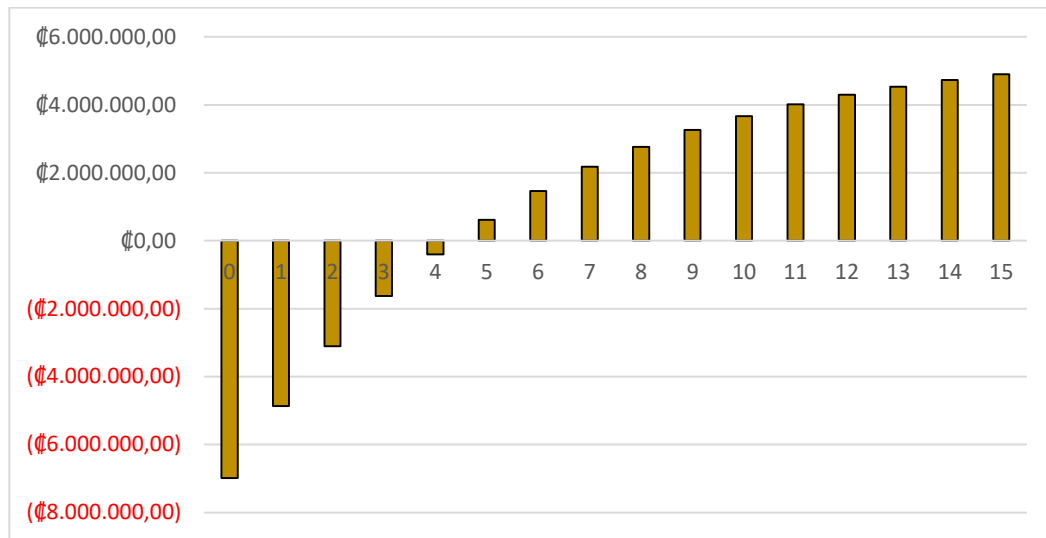
Fuente: Elaboración Propia

Año	Ahorros	VAN
0	Ø0,00	-Ø6.983.874,00
1	Ø2.287.115,00	-Ø4.866.174,93
2	Ø2.058.403,50	-Ø3.101.425,70
3	Ø1.852.563,15	-Ø1.630.801,34
4	Ø1.667.306,84	-Ø405.281,04
5	Ø1.500.576,15	Ø615.985,87
6	Ø1.350.518,54	Ø1.467.041,63
7	Ø1.215.466,68	Ø2.176.254,77
8	Ø1.093.920,01	Ø2.767.265,71
9	Ø984.528,01	Ø3.259.774,84
10	Ø886.075,21	Ø3.670.199,10
11	Ø797.467,69	Ø4.012.219,33
12	Ø717.720,92	Ø4.297.236,18
13	Ø645.948,83	Ø4.534.750,22
14	Ø581.353,95	Ø4.732.678,59
15	Ø523.218,55	Ø4.897.618,90
	TIR	0,22

Según la tabla 12, al final del periodo se obtiene un VAN de Ø4.897.618,90 y un TIR de 22 %.

Gráfico 5 Recuperación de la inversión

Fuente: Elaboración Propia



En el gráfico 5 se distingue que la inversión es recuperada en el quinto año.

Tabla 15 Resumen segundo caso

Fuente: Elaboración Propia

Inversión	€6.983.874,00
Año de recuperación de la inversión	5
Facturación anual con paneles	€125.325
Facturación actual	€2.412.440
Ahorros generados en el primer año	€2.287.115
VAN	€4.897.618,90
TIR	22%

Caso #3 Tercer propuesta, 100 % del consumo con paneles y microinversores

Esta tercera propuesta se realiza para comparar el funcionamiento de los inversores con el de los microinversores y a partir del análisis financiero seleccionar el diseño que sea mejor económicamente.

Como se menciona anteriormente, esta propuesta solo contará con análisis financiero, ya que será utilizada para observar si es más económico el uso de microinversores, se seleccionó un microinversor Enphase Energy IQ6 PLUS por la potencia que posee.

En las tablas 12 y 15 se observa que en las propuestas anteriores la inversión es recuperada el quinto año, sin embargo, en el primer caso la tabla 12 muestra VAN de $\text{C}\$5.086.210,25$; mientras que en el segundo caso, la tabla 15 muestra un VAN de $\text{C}\$4.897.618,90$, de la misma forma, el TIR de la primera propuesta es mayor al de la segunda, por lo tanto, se escoge el primer caso para esta tercera propuesta.

Los microinversores se conectan uno en cada panel, por esto, se requieren 26 microinversores. Para esta propuesta, se tiene una inversión de $\text{C}\$8.193.733$.

Tabla 16 VAN y TIR

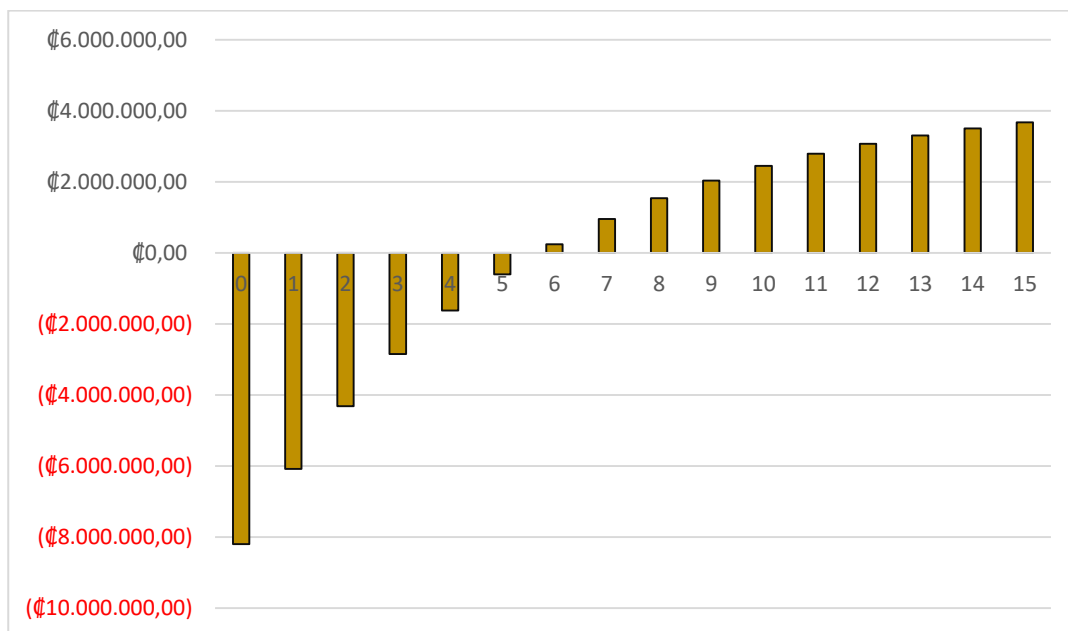
Fuente: Elaboración Propia.

Año	Ahorros	VAN
0	€0,00	-€8.193.733,20
1	€2.284.859,00	-€6.078.123,01
2	€2.056.373,10	-€4.315.114,53
3	€1.850.735,79	-€2.845.940,79
4	€1.665.662,21	-€1.621.629,34
5	€1.499.095,99	-€601.369,80
6	€1.349.186,39	€248.846,49
7	€1.214.267,75	€957.360,06
8	€1.092.840,98	€1.547.788,03
9	€983.556,88	€2.039.811,35
10	€885.201,19	€2.449.830,77
11	€796.681,07	€2.791.513,63
12	€717.012,96	€3.076.249,34
13	€645.311,67	€3.313.529,11
14	€580.780,50	€3.511.262,24
15	€522.702,45	€3.676.039,85
	TIR	0,17

Para esta tercera propuesta, se tiene un VAN de €3.676.039,85 y un TIR de 17 %.

Gráfico 6 Recuperación de la inversión, tercer propuesta

Fuente: Elaboración Propia



En el gráfico 6, se puede observar que la inversión es recuperada en el sexto año.

Tabla 17 Resumen tercer caso

Fuente: Elaboración Propia

Inversión	☉8.193.733
Año de recuperación de la inversión	6
VAN	☉3.676.039,85
TIR	17%

Inclinación de los paneles.

Los paneles estarán colocados viendo hacia el sur, esto es lo recomendado para el país, en este caso, sería en la sección del techo mostrada en la figura 11.

Como se mencionó en el marco teórico, la fórmula para saber cuál es la inclinación adecuada a la que deben colocarse los paneles es:

Ecuación 9 Inclinación de los paneles solares

Fuente: Blasco, 2012.

$$\beta = 3.7 + 0.69 \times (\phi + 10)$$

Siendo ϕ la latitud en grados.

En la zona donde se encuentra ubicado el colegio, la latitud es de 9.9819° .

$$\beta = 3.7 + 0.69 \times (9.9819 + 10)$$

$$\beta = 17.48^\circ$$

No se cuenta con el dato de la inclinación de techo de la institución, no obstante, sí se adquirió el dato de la altura que hay desde donde inicia el techo hasta el pico más alto y el largo de la base de este, serían 2m y 5.5m, respectivamente, entonces:

Ecuación 10 Inclinación aproximada del techo por trigonometría

Fuente: Gorostizaga, 2015.

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{2}{5.5} \right)$$

$$\beta = 21.3^\circ$$

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se cuenta con un área de 218,79 m² (18,7x11,7m), en la cual se pueden colocar los paneles, en las visitas realizadas al colegio, se pudo notar que, tanto las instalaciones eléctricas como la zona donde se plantea que se colocarán los paneles, están en buenas condiciones, por lo tanto, se concluye que no es necesario mejorarlo.

Con respecto al primer cálculo de paneles solares, en un inicio se calculó tomando las peores situaciones, dando como resultado un total de 32 paneles, sin embargo, al cumplir con lo que se requiere en el mes con mayor consumo, como se puede observar en la tabla 4 este diseño posee una energía generada por año de 38 558,21 kW/h, se genera una sobreproducción en los meses con menos demanda y una sobreproducción anual del 94.8 %, de modo que, para reducir este exceso, se hace un recalcu, utilizando una reducción del 20 % de los paneles esta decisión se encuentra justificada en el desarrollo. La nueva cantidad a implementar para compensar el consumo de la institución es de 26 paneles, tal como se puede apreciar en la tabla 5, en este caso se tiene una generación de 31 328,54 kW/h al año y una sobreproducción del 58 %.

Entre los casos que fueron desarrollados, se tuvo como resultado un máximo de 32 módulos solares, según la ficha técnica de los paneles seleccionados, se tiene que su dimensión es de 1960x992x40mm (Apéndice F), mientras que el techo cuenta con una dimensión de 18.7m de largo con 5.85m de ancho para una sección del techo como se observa en las figuras 11 y 12, también en la figura 14 se muestra que en cada sección se pueden colocar 34 paneles solares, debido a esto, se concluye que la instalación sí es posible.

Como se mencionó en el desarrollo, los paneles estarán viendo hacia el sur, en este caso, estarían colocados en la sección izquierda (Figura 11) dado que es la sección del techo que está hacia el sur y la colocación de los paneles se puede realizar en una sección.

Al haber examinado los diseños que fueron propuestos para suplir el consumo energético del colegio y reducir los gastos producidos por uso excesivo de electricidad, se tiene el primer caso con una inversión inicial de $\text{C}\$6.783.562,8$. Con los ahorros generados por el sistema, la inversión es recuperada en el quinto año y una tasa interna de retorno del 23 %, al final del periodo, también cuenta con un VAN de $\text{C}\$5.086.210,25$.

En el desarrollo se puede observar que la segunda propuesta no es viable, por este motivo, no se realiza análisis financiero de esta. Se sustituye este análisis por el dato obtenido de paneles antes de la reducción del 20 %, es decir, la de 32 paneles solares. Para este caso, se cuenta con una inversión de $\text{C}\$6.983.874$, la cual es recuperada en el quinto año. Al final del periodo, se obtiene un VAN de $\text{C}\$4.897.618,9$ y un TIR de 22 %, estos datos se pueden apreciar en la tabla 15.

Para el tercer caso, se tiene una inversión de $\text{C}\$8.193.733$, esta inversión es recuperada en el sexto año y tiene un TIR de 17 %, la tasa de interés es de 8 %, por lo tanto los tres casos son rentables.

Observando y comparando las tablas de resumen de cada caso (Tablas 12, 15 y 17), se concluye que la propuesta más rentable es el primer caso con 26 paneles solares e inversores, puesto que la inversión es recuperada en el quinto año, a pesar de que la propuesta con 32 paneles también se recupera en el quinto año, esta cuenta con una inversión mayor.

Utilizando la herramienta de AutoCad, se creó un diagrama unifilar con los datos obtenidos en el desarrollo para la primera propuesta y siguiendo lo descrito en el Código Eléctrico Nacional 2008, como base sobre la instalación de los paneles solares.

Para la colocación de los módulos solares, se seleccionó una estructura coplanar, puesto que el ángulo de inclinación del techo es similar al adecuado obtenido en el desarrollo.

Recomendaciones

Se recomienda programar el mantenimiento de los paneles, al menos, dos veces al año, para cerciorarse de que los paneles cumplan con su vida útil, además, de que la zona está localizada en donde existe alta corrosión, por lo que hay que estar verificando cada cierto tiempo que el funcionamiento del sistema sea el ideal.

Se recomienda no colocar aerogeneradores, puesto que es una inversión muy elevada y, en donde se encuentra el colegio, las velocidades del viento no son lo suficientemente altas para que la turbina sea capaz de generar la energía nominal, además, no se cuenta con el dato de cantidad de horas de viento, por lo tanto, no es viable.

Dado que no se cuenta con una cotización oficial, se recomienda contratar a una empresa que tenga suficiente conocimiento para asegurar una instalación y el mantenimiento adecuado y responsable.

En caso de que los consumos del colegio aumenten y se requiera que el sistema tenga una generación mayor, se recomienda realizar un rediseño, debido a que en el inversor no se seleccionó considerando futuras ampliaciones.

CAPÍTULO VI: PROPUESTA

En este trabajo, se desarrollaron y compararon financieramente diferentes casos con el fin de suplir el consumo energético de la institución; como se muestra la tabla 12 para el primer caso dando como resultado una facturación con paneles de ¢127.580 y un ahorro en el primer año de ¢2.284.859; la tabla 15 para el segundo caso tiene como resultados una facturación con paneles de ¢125.325 y un ahorro de ¢2.287.115; finalmente en tabla 17 para el tercer caso se tiene un VAN al final del periodo de ¢3.676.039,85.

De acuerdo con la tabla 1, datos que fueron descritos en el diagnóstico y obtenidos por National Aeronautics and Space Administration, en promedio, el mes con menor radiación solar es febrero, con 9.55 HSP en la ubicación exacta del colegio, mientras que en la tabla 2, el mes con menor consumo fue enero, esto debido a que en estas fechas solo se encuentra el personal administrativo, por lo que se tiene baja demanda, mientras que el mes con mayor consumo fue abril con 2654 kWh. Con base en los datos de las tablas mencionadas y un módulo fotovoltaico con una potencia nominal de 325 W, se requieren 32 paneles para cubrir el 100 % de la demanda con una potencia en el sistema de 10.4 kW.

En la tabla 4, se muestra la energía que generan 32 paneles mensual y anualmente, sin embargo, para el consumo que se tiene anualmente (19793 kWh), se tiene una sobreproducción del 94.8 % (18765,21 kWh), casi el doble de lo que se consume, por lo que se plantea un recálculo para minimizar la energía generada y, por consiguiente, el sobrante.

Para el recálculo, se definió un porcentaje de reducción del 20 % considerando una disminución considerable de la sobreproducción y así conseguir un aproximado de la cantidad real necesaria. El nuevo sistema con los datos mencionados anteriormente es de 26

paneles, con una potencia en ellos de 8.125 kWh, en la tabla 6 se aprecia la nueva generación, con una sobreproducción del 58 %.

En la tabla 3, se muestra la velocidad promedio del viento en la zona, del 2015 al 2017, siendo diciembre el mes en el que hay menor velocidad, con 2 m/s, se procede a escoger una turbina con este mínimo de velocidad, la cual fue la Enair E70 Pro con una potencia de 5.5 kW y una potencia nominal de 4 kW. En la tabla 6, se aprecia que la velocidad de arranque es de 2m/s. En el gráfico 3, se muestra la energía que genera un aerogenerador E70 Pro con respecto a la velocidad, con este gráfico, se obtuvo una aproximación de la energía que se genera con la velocidad de la zona, con un total de 913 kWh por año

Posteriormente, se ejecuta el diseño para la segunda propuesta, se plantea que los aerogeneradores tendrán que abastecer 4 000 kWh/año. Este dato se escogió debido a que un sistema con aerogeneradores debe cubrir lo suficiente para reducir significativamente la cantidad de paneles, con los datos de velocidad promedio de la zona, se tiene que, para abastecer los 4000 kWh/año, se necesitan 5 turbinas eólicas.

Al necesitar 5 aerogeneradores para generar aproximadamente lo que genera un solo aerogenerador, se sobreentiende la decisión de no realizar un análisis financiero de esta propuesta, ya que el costo de las turbinas es elevado y no es viable por la baja velocidad de viento que tiene la zona en la que se encuentra el colegio.

En lugar de la segunda propuesta, se selecciona el primer dato, 32 paneles solares. Mediante el análisis realizado en el primer año de instalación, se obtiene el ahorro con el proyecto de 26 y 32 paneles solares (Tabla 10 para 26 paneles y tabla 13 para 32 paneles),

este dato se usa para obtener el VAN y el TIR de ambos diseños, aplicando un 10 % de aumento en la facturación que es lo que aplica aproximadamente el ICE.

Con respecto a la tercera propuesta, se realiza debido a que un sistema con microinversores es más eficiente, seleccionando la propuesta más rentable entre las ya planteadas.

Se seleccionó una estructura coplanar, ya que el techo tiene un ángulo de aproximadamente 21° y la fórmula usada en el desarrollo para obtener una inclinación adecuada de los módulos solares dio como resultado 17.48° , similar al real, por lo tanto, es favorable.

Para el caso con 26 paneles solares, se seleccionó un inversor Solis-1P9K-4G-US con una potencia de 9 kW y para el de 32 paneles se seleccionó un inversor SE11400A. En ambos, todos los paneles estarán conectados a un único inversor, porque se puede utilizar un sistema, ya que el voltaje límite en un sistema para paneles solares Canadian Solar CS6U-325P es de 1500V. En el inversor Solar Edge, se cuenta con 1 kW (3 paneles), mientras que en el inversor Solis se cuenta con un espacio de 550 W (1 panel). No se consideró escoger inversores con mayor potencia tomando en cuenta futuras expansiones, debido a que el porcentaje de sobreproducción obtenido es muy alto, en caso de que la demanda aumente, es posible hacer un rediseño, el cual no es parte del proyecto, en vista de que no es necesario.

Cabe señalar que el costo del dólar para el 21 de octubre del 2018 se encuentra en $\$600$.

El análisis financiero fue realizado con la herramienta de Microsoft Office Excel, que posee las fórmulas necesarias para hacer este cálculo más sencillo, para las tarifas utilizadas

fueron las de La Gaceta N° 174, Alcance N° 167 del 21 de septiembre del 2018 para una tarifa T-CO (Comercios y servicios). Se acordó un periodo de 15 años para todos los casos.

Se mencionó que la tasa de interés para proyecto eco-amigables es 8 % aproximadamente, cualquier propuesta cuyo TIR sea mayor a 8 % se considera viable. Para el primer caso (26 paneles con inversores), se tiene que la inversión es de ¢6.783.563 y es recuperada en el quinto año (Tabla 12); en el segundo caso (32 paneles con inversores), se tiene una inversión de ¢6.983.874 (Tabla 15), mientras que la tercera inversión (26 paneles con microinversores) es de ¢8.193.733,2 (Tabla 17).

El primer caso tiene una tasa interna de retorno del 23 %, con un VAN al final del periodo de ¢5.086.210, el segundo caso cuenta con un TIR de 22 % y un VAN de ¢4.897.618,9. Dado que el VAN y TIR más elevado es el del primer caso, se selecciona este para hacer el análisis financiero con microinversores, teniendo este al final del periodo un VAN de ¢3.676.039,85 y un TIR de 17 % estos datos están descritos en el desarrollo y como ya se mencionó también se encuentran en las tabla 12 para el primer caso, tabla 15 para el segundo y tabla 17 para el tercero.

El ahorro que es generado con el sistema va disminuyendo 10 % anualmente, debido a que por año el ICE realiza ese aumento para la tarifa por cada kWh.

La mayor parte del ahorro que se genera anualmente es por los meses de enero y febrero, esto porque en estos solo se encuentran mayormente personal administrativo, esto es beneficioso, ya que cuando se esté consumiendo más de la energía que se genera, la sobreproducción que fue subida a la red en enero y febrero estará disponible a un menor precio.

Un sistema con microinversores tiene más ventajas, por ejemplo, si se presenta una obstrucción, como una nube, una hoja de un árbol o polvo, afectaría solo al panel en el que se encuentra el obstáculo. Igualmente, si se daña uno de los microinversores, solo tendría que sustituirse ese microinversor, entre otros, pero, dado que el objetivo principal de este proyecto es obtener el diseño más rentable, comparando la primera y tercera propuesta se puede distinguir que se tiene más ahorro, si se selecciona un inversor.

Tomando en cuenta todo lo descrito anteriormente, se decide que la propuesta más adecuada para el Colegio Científico Costarricense, Sede Puntarenas, es la primera, con un 100 % del consumo, inversores y 26 paneles solares Canadian Solar CS6U-325P.

Diagrama unifilar

Protecciones.

Se calcularán los calibres de los cables requeridos para la propuesta con 26 paneles e inversores.

Según la ficha técnica del panel solar seleccionado, se tiene una corriente de 8.78A (Apéndice G), un límite de voltaje máximo por sistema de 1500 V DC y un voltaje de cada panel de 37 V, mientras que el inversor tiene un máximo de voltaje de 600 V DC (Apéndice H), se utiliza el voltaje menor entre ambos.

Ecuación 11 Cantidad de sistemas

Fuente: Elaboración Propia

$$N^{\circ} \text{ de sistemas} = \frac{\text{Voltaje de cada panel} \times N^{\circ} \text{ de paneles}}{\text{Voltaje máximo por sistema}}$$

$$N^{\circ} \text{ de sistemas} = \frac{37V \times 26 \text{ paneles}}{600V}$$

$$N^{\circ} \text{ de sistemas} = 2$$

Se realizará un sistema paralelo y en serie para utilizar un inversor.

El departamento técnico de SunFields Europe (s.f.), menciona lo siguiente para un sistema en serie:

La tensión generada será igual a la suma de cada una de las tensiones de cada panel que compone la rama (string), o dicho de otro modo, multiplicamos la tensión unitaria por el número de paneles de la rama, pues siempre debemos conectar paneles de las mismas características unos con otros” y para un sistema en paralelo “se conectan todos los módulos por sus polos positivos y, por separado, por todos los polos negativos. Con esto, lo que conseguimos es aumentar la corriente generada en la rama (suma de las corrientes de cada panel) pero se mantiene la misma tensión que la de uno de los paneles que componen la rama.

Serán dos sistemas de 13 paneles cada uno, estos 13 paneles estarán colocados en serie y los sistemas se encontrarán en paralelo, esto para tener la potencia necesaria en la entrada del inversor.

Por lo anterior, se tiene que la corriente en el sistema será la suma de la corriente en ambos sistemas y, al estar en paralelo, el voltaje total será el mismo de los sistemas.

Se obtienen 17,56 A y 481V, en total. Según el artículo 690.8 (B) del Código Eléctrico Nacional 2008, “los conductores del circuito y los dispositivos de protección contra la sobrecorriente deben dimensionarse de modo que conduzcan como mínimo el 125 por ciento de la corriente máxima calculada”.

De modo que la corriente en el conjunto sería 21.95 A, por la Tabla 310.16 del NEC 2008, se utilizará calibre 12 AWG THW Cu, este conductor soporta hasta 25 A.

El inversor debe contener una protección tanto en AC como en DC, contra sobrecorrientes para asegurar ante fallos que se puedan generar en el sistema, sin embargo, según las especificaciones de este, estas protecciones están dentro del inversor, por lo tanto, no se realizarán estos cálculos (Ver apéndice I).

Para la selección del breaker que controlará el sistema en el tablero principal, por el artículo 690.10 (B) del NEC 2008, se debe dimensionar con respecto al valor nominal de salida del inversor, dicha salida de acuerdo con las especificaciones es de 47,5@240V y, según el artículo 240.6 del NEC 2008, se debe colocar una protección de 40 A.

A continuación, con el objetivo de calcular los conductores en la salida AC del inversor, se calcula el 125 % de la corriente en esta, teniendo 52.125 A y según la tabla 310.16 del NEC 2008 el calibre a utilizar sería 6 AWG THW Cu, puesto que es un solo inversor, la corriente que entra al tablero principal, es la misma de la salida de este inversor, por lo tanto, se utiliza el mismo calibre (6 AWG THW Cu).

Tierra.

Por la tabla 250-66 del NEC 2008, se tiene que para un calibre menor a 2 AWG, el calibre de conductor para puesta a tierra es #8 AWG THW Cu.

Tubería.

Para este cálculo, se utilizará una tubería de material de PVC en vista de que no se corroe y, al estar la zona cerca del mar, se necesita proteger la tubería ante la corrosión, además, será Conduit rígido de PVC Cédula 80, ya que es para uso expuesto e interiores y permiten la exposición a la luz solar y al ambiente.

Según la tabla 5 del NEC, el calibre #12, #8 y #6 (Todos AWG THW Cu) tienen un área de 11,68 mm², 28.19 mm² y 46.84 mm², respectivamente, dando como resultado, una suma de 86.71 mm². Luego, según la tabla 4 artículo 352, se necesitaría una tubería de 3/4".

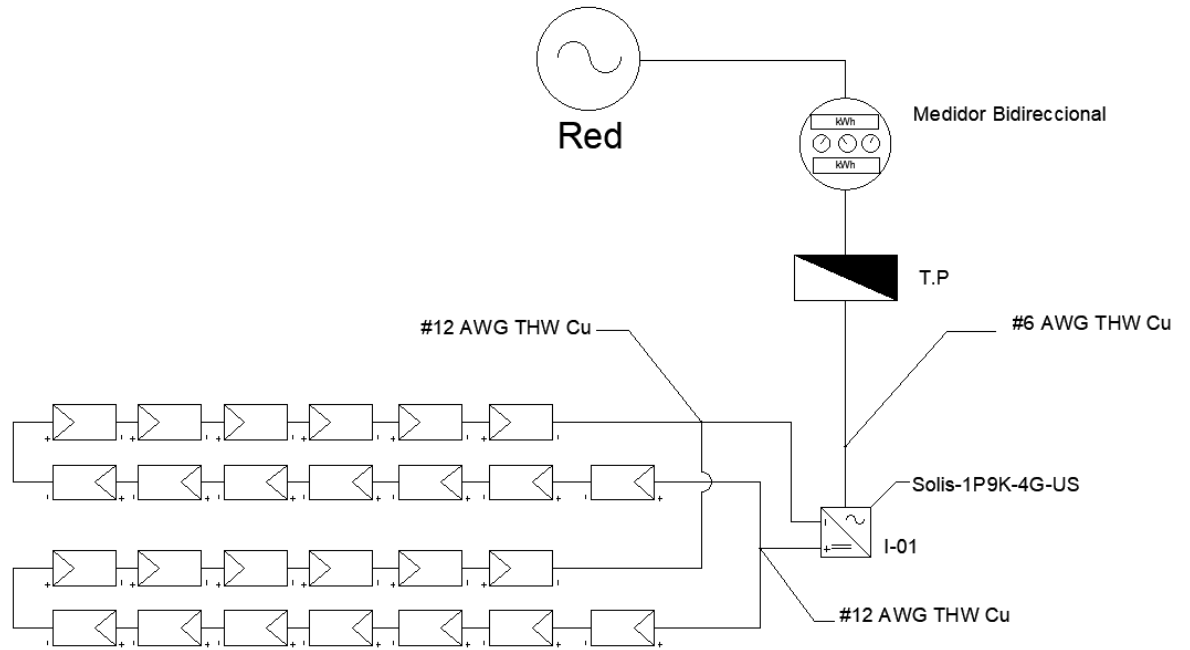
Utilizando el primer caso, se obtuvieron los calibres y protecciones que se requieren para el sistema, siguiendo lo establecido en el Código Eléctrico Nacional 2008, para los cables en los paneles, se selecciona calibre #12 AWG THW Cu, para la salida AC del inversor un calibre #6 AWG THW Cu y para tierra por la tabla 250-66 del NEC 2008 #6 AWG THW.

Para estos cables, se selecciona una tubería de PVC para evitar la corrosión y debido a que es para uso expuesto y permiten la exposición a la luz solar, según el área de los calibres obtenidos y la tabla 5 del NEC 2008, se requiere una tubería de 3/4".

De acuerdo con los datos obtenidos en el desarrollo de los calibres de cables y los elementos seleccionados para este sistema, se realizó un diseño de una forma posible de realizar la instalación.

Figura 18 Diagrama unifilar

Fuente: Elaboración Propia



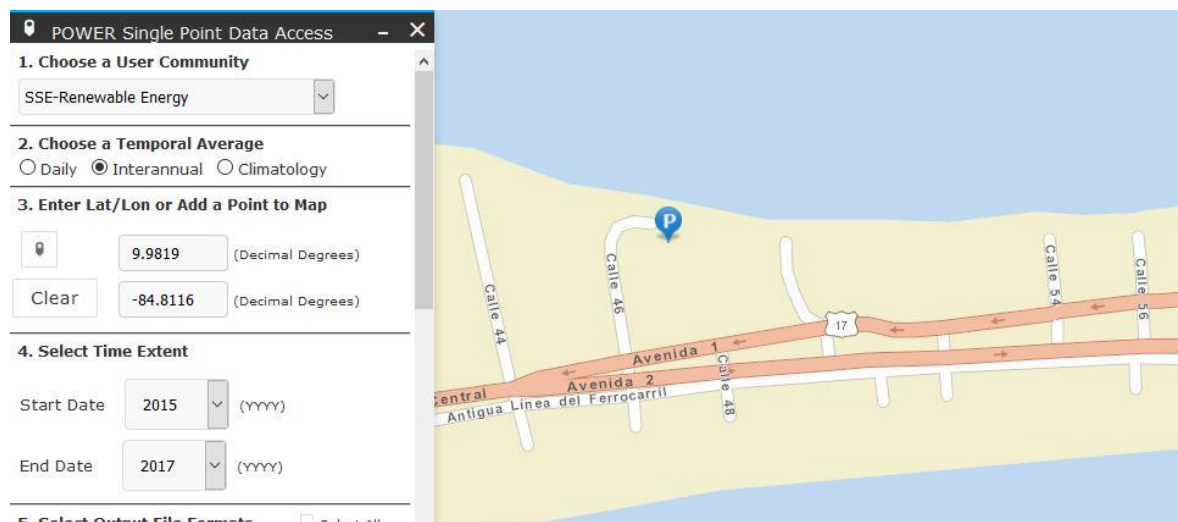
Referencias

- Acciona. (Julio de 2014). *Acciona*. Obtenido de <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/>
- AutoSolar. (4 de Abril de 2015). *AutoSolar*. Obtenido de <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/>
- Brusa, A., & Guarnone, E. (s.f.). *CECU*. Obtenido de <https://cecu.es/campanas/medio%20ambiente/res&rue/htm/dossier/1%20eolica.htm>
- CalcuWorld. (s.f.). *CalcuWorld*. Obtenido de [CalcuWorld: https://es.calcuworld.com/calculadoras-empresariales/calculadora-van/](https://es.calcuworld.com/calculadoras-empresariales/calculadora-van/)
- Damia Solar. (10 de Marzo de 2016). *Damia Solar*. Obtenido de Damia Solar La energía solar al mejor precio: https://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/conexion-paneles-solares-en-serie-en-paralelo_1
- Energía Solar. (24 de Mayo de 2018). Obtenido de Energía Solar: <https://solar-energia.net/>
- Equipo Editorial Buenos Negocios. (8 de Enero de 2013). *Buenos Negocios*. Obtenido de <http://www.buenosnegocios.com/van-y-tir-cuanto-vale-una-inversion-n247>
- Esri. (s.f.). *Esri: GIS Mapping Software, Spatial Data Analytics & Location Platform*. Obtenido de Esri: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/modeling-solar-radiation.htm>
- FAO. (s.f.). *FAO*. Obtenido de FAO: www.fao.org/docrep/008/a0323s/a0323s09.htm#fnB14
- Global Electricity. (30 de Septiembre de 2013). *Global Electricity*. Obtenido de <https://globalelectricity.wordpress.com/2013/09/>
- González, J. (2009). *Energías Renovables*. Barcelona: Reverté.
- Jarabo, F., Perez, C., Fernandez, J., Macias, J., & Elortegui, N. (1988). *El libro de las energías renovables*. España.

- MINAE. (18 de Febrero de 2016). *Sistema Costarricense de Información Jurídica*. Obtenido de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=81121&nValor3=103327&strTipM=TC
- NASA. (8 de Septiembre de 2018). *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources*. Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/>
- National Fire Protection Association. (2009). *Código Eléctrico Nacional Edición 2008*.
- REBACAS. (s.f.). *REBACAS*. Obtenido de <https://www.rebacas.com/estructuras-paneles-solares/935-estructura-paneles-solares-coplanares-6-paneles-solares.html>
- SotySolar. (6 de Julio de 2017). *SotySolar*. Obtenido de <https://sotysolar.es/blog/que-son-los-inversores-fotovoltaicos>
- SunFields Europe. (2018). *SunFields Europe*. Obtenido de SunFields Europe Distribución y venta de placas solares y equipos fotovoltaicos alta gama: <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/calcular-paneles-solares-necesarios/>
- SunSupply. (8 de Septiembre de 2017). *Sun Supply*. Obtenido de <https://www.sunsupplyco.com/componentes-de-un-sistema-de-energia-solar/>
- Victron Energy. (s.f.). *Titrec*. Obtenido de Tritec: <http://www.tritec-intervento.cl/productostritec/diferencia-entre-controlador-de-carga-pwm-y-mppt/>
- WeboSolar. (s.f.). *WeboSolar*. Obtenido de <https://webosolar.com/store/es/5-controladores-de-carga>

Apéndices

Apéndice A Aplicación de la NASA para obtener la radiación solar



Apéndice B Datos radiación solar de la zona

Value for missing model data cannot be computed or out of model availability range: -999

Parameter(s):	SRB/FLASHFlux	1/2x1/2 Downward Thermal Infrared (Longwave)	Radiative Flux (kW-hr/m ² /day)							
PARAMETER	YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP
ALLSKY_SFC_LW_DWN	2015	9.59	9.65	9.70	10.04	10.39	10.45	10.34	10.38	10.42
ALLSKY_SFC_LW_DWN	2016	9.72	9.56	10.04	10.17	10.50	10.36	10.29	10.36	10.28
ALLSKY_SFC_LW_DWN	2017	9.53	9.45	9.71	10.24	10.59	10.51	10.48	10.43	10.46

OCT	NOV	DEC	ANN
10.41	10.24	10.04	10.14
10.34	10.35	10.01	10.17
10.43	10.30	9.80	10.16

Apéndice C Tarifa de comercios y servicios (T-CO)

Tarifa T-CO tarifa comercios y servicios		
Cientes consumo exclusivo de energía		
<i>a. Consumo de Energía menor o igual a 3000 kWh</i>	cada kWh	115,42
Cientes consumo energía y potencia		
<i>Por consumo de energía (kWh)</i>		
<i>b. Consumo de Energía cada kWh</i>	cada kWh	69,05
<i>c. Consumo de Potencia cada kW</i>	cada kW	11 416,03

Apéndice D Precio de tarifa de acceso comercios y servicios (T-CO)

b. Precio mensual:

Por cada kWh retirado..... ¢ 27.86

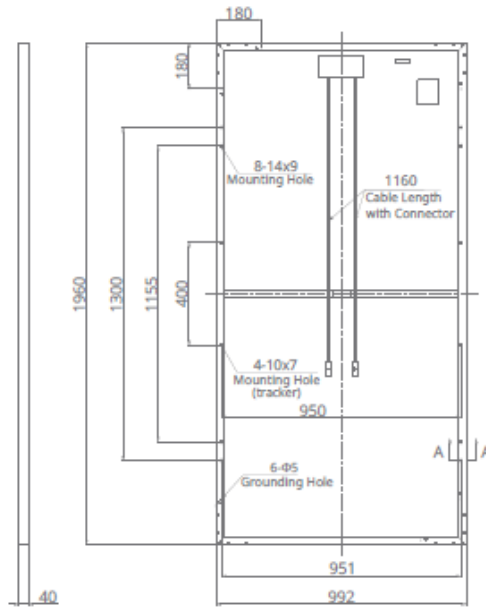
Apéndice E Cargos por interconexión

Tipo de Medidor	Cargo de Interconexión en colones
Medidor monofásico	48.687
Medidor trifásico sencillo	542.004
Medidor trifásico con registro	1.286.240

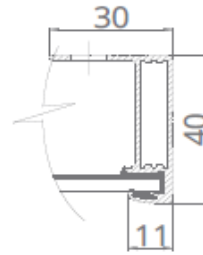
Apéndice F Dimensiones del panel solar

ENGINEERING DRAWING (mm)

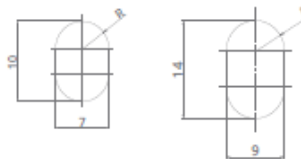
Rear View



Frame Cross Section A-A



Mounting Hole



Apéndice G Especificaciones del panel solar

ELECTRICAL DATA | STC*

CS6U	325P	330P	335P	340P
Nominal Max. Power (Pmax)	325 W	330 W	335 W	340 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37.0 V	37.2 V	37.4 V	37.6 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.78 A	8.88 A	8.96 A	9.05 A
Open Circuit Voltage (Voc)	45.5 V	45.6 V	45.8 V	45.9 V
Short Circuit Current (Isc)	9.34 A	9.45 A	9.54 A	9.62 A
Module Efficiency	16.72%	16.97%	17.23%	17.49%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1500 V (IEC) or 1500 V (UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	15 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS6U	325P	330P	335P	340P
Nominal Max. Power (Pmax)	239 W	242 W	246 W	250 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	34.0 V	34.2 V	34.4 V	34.6 V
Opt. Operating Current (Imp)	7.01 A	7.08 A	7.15 A	7.22 A
Open Circuit Voltage (Voc)	42.4 V	42.5 V	42.6 V	42.7 V
Short Circuit Current (Isc)	7.54 A	7.63 A	7.70 A	7.77 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	72 (6×12)
Dimensions	1960 × 992 × 40 mm (77.2 × 39.1 × 1.57 in)
Weight	22.4 kg (49.4 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 diodes
Cable	4.0 mm ² (IEC), 12 AWG (UL), 1160 mm (45.7 in)
Connector	T4 series
Per Pallet	26 pieces, 635 kg (1400 lbs)
Per Container (40' HQ)	624 pieces

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.41 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.31 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature (NMOT)	43 ± 2 °C

Apéndice H Especificaciones inversor Solis

Technical Specifications

Model

Energy Source

DC Values

Max. power per MPPT (Watts)
 Maximum input voltage (Volts)
 Startup voltage (Volts)
 Full power MPPT voltage range (Volts)
 Operating MPPT voltage range (Volts)
 Max. usable input current per MPPT (Amps)
 Max. short circuit input current (Amps)
 Number of MPPT
 Inputs per MPPT

AC Values (240Vac and 208Vac)

Nominal output power 240/208V grid (Watts)
 Max continuous output power for 240/208V (Watts)
 Operating voltage range (Volts)
 Relative humidity range
 Max. continuous output current 240/208V (Amps)
 Max. overcurrent protection device 240/208V (Amps)
 Output power factor
 Grid THD (current)
 Operating frequency range (Hertz)
 Ambient operating temperature range

Solis-1P6K-4G-US	Solis-1P7K-4G-US	Solis-1P7.6K-4G-US	Solis-1P8K-4G-US	Solis-1P8.6K-4G-US	Solis-1P9K-4G-US	Solis-1P10K-4G-US
PV						
			4000			
			600			
			120			
			200-500			
			100-500			
			10			
			15.6			
3				4		
			1			
6000/6000	7000/7000	7600/7600	8000/8000	8600/8600	9000/9000	10000/9000
6600/6000	7700/7000	8360/7600	8800/8000	9460/8600	9900/9000	10000/9000
183-228(for208Vrated)/211-264(for240Vrated)						
0-100%Condensing						
25/28.5	29.2/33.7	31.7/36.5	33.3/38.5	35.8/41.3	37.5/43.3	41.7/43.3
40/40	40/40	40/50	50/50	50/50	50/50	60/60
>0.99						
<1.5%						
59.5-60.5						
-25°C to 60°C/-13°Fto140°F						

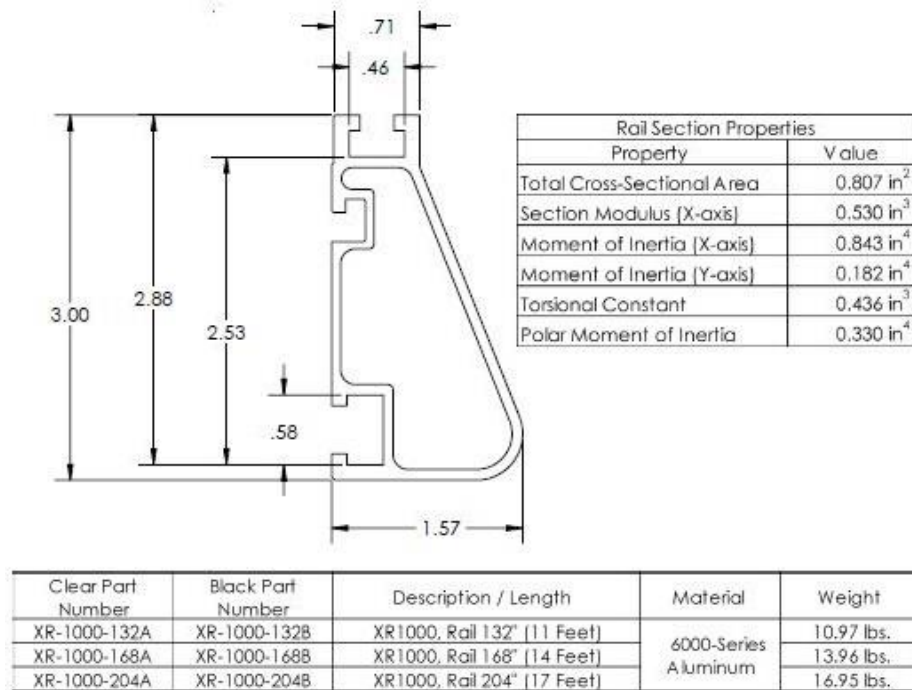
Apéndice I Protecciones inversor Solis

Protection

Temperature protection
 DC reverse-polarity protection
 AC short circuit protection
 AC output overcurrent protection
 Output overvoltage protection-varistor
 Ground fault monitoring
 Grid monitoring
 Islanding protection
 Integrated AFCI (DC arc fault circuit protection)
 Rapid shutdown

Temperature protection	Yes
DC reverse-polarity protection	Yes
AC short circuit protection	Yes
AC output overcurrent protection	Yes
Output overvoltage protection-varistor	Yes
Ground fault monitoring	Yes
Grid monitoring	Yes
Islanding protection	Yes
Integrated AFCI (DC arc fault circuit protection)	Yes
Rapid shutdown	Optional

Apéndice J Especificaciones de los soportes



Apéndice K Especificaciones microinversor

INPUT DATA (DC)	IQ6-60-2-US / IQ6-60-5-US		IQ6PLUS-72-2-US / IQ6PLUS-72-5-US	
Commonly used module pairings ¹	195 W - 330 W +		235 W - 400 W +	
Module compatibility	60-cell PV modules only		60-cell and 72-cell PV modules	
Maximum input DC voltage	48 V		62 V	
Peak power tracking voltage	27 V - 37 V		27 V - 45 V	
Operating range	16 V - 48 V		16 V - 62 V	
Min/Max start voltage	22 V / 48 V		22 V / 62 V	
Max DC short circuit current (module Isc)	15 A		15 A	
Overvoltage class DC port	II		II	
DC port backfeed under single fault	0 A		0 A	
PV array configuration	1 x 1 ungrounded array; No additional DC side protection required; AC side protection requires max 20A per branch circuit			
OUTPUT DATA (AC)	IQ 6 Microinverter		IQ 6+ Microinverter	
Peak output power	240 VA		290 VA	
Maximum continuous output power	230 VA		280 VA	
Nominal (L-L) voltage/range ²	240 V / 211-264 V	208 V / 183-229 V	240 V / 211-264 V	208 V / 183-229 V
Maximum continuous output current	0.96 A	1.11 A	1.17 A	1.35 A
Nominal frequency	60 Hz		60 Hz	
Extended frequency range	47 - 68 Hz		47 - 68 Hz	
Power factor at rated power	1.0		1.0	
Maximum units per 20 A (L-L) branch circuit	16 (240 VAC) 14 (208 VAC)		13 (240 VAC) 11 (208 VAC)	
Overvoltage class AC port	III		III	
AC port backfeed under single fault	0 A		0 A	
Power factor (adjustable)	0.7 leading ... 0.7 lagging		0.7 leading ... 0.7 lagging	
EFFICIENCY	@240 V	@208 V	@240 V	@208 V
CEC weighted efficiency	97.0 %	97.0 %	97.0 %	97.0 %