

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

DOCUMENTO 1

CONSTRUCCIÓN DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA
EXPERIMENTAL

Código de proyecto VIE: 5401-1801-0301

MAYO 2016

Investigadores participantes: Sergio Morales (coordinador), Marvin Hernández, Carlos Meza

Tabla de Contenidos

1. Resumen	3
2. Palabras claves	3
3. Introducción	3
4. Marco Teórico: Características de una instalación fotovoltaicas experimentales	4
4.1. ¿Por qué es necesario una estación fotovoltaica experimental?	5
4.2. Variables que afectan el desempeño de una instalación fotovoltaica	5
4.2.1. Variables relacionadas con la posición relativa del Sol	5
4.2.2. Variables relacionadas con el clima	6
4.2.3. Variables relacionadas con el material del módulo fotovoltaico	7
4.2.4. Variables relacionadas con la configuración de la instalación fotovoltaica	8
4.3. Características principales de una estación fotovoltaica experimental	9
5. Metodología	10
6. Resultados: Instalación Fotovoltaica Experimental	10
6.1. Requerimientos de la Instalación Fotovoltaica Experimental	10
6.1.1. Usos de la Instalación Fotovoltaica Experimental	11
6.2. Descripción de la instalación fotovoltaica experimental	11
6.2.1. Estación Experimental Fotovoltaica	12
6.2.2. Foliage	15
7. Discusión y conclusiones: Aportes de la Instalación Fotovoltaica Experimental	21
7.1. Conclusiones	21
7.2. Discusión y aportes	21
7.2.1. Actividades de docencia y extensión	21
7.2.2. Actividades de investigación	22

8. Agradecimientos	23
9. Referencias	23
Referencias	23
10. Apéndice	24

1. Resumen

En este documento se presentan los resultados obtenidos de un proyecto de aporte tecnológico que tuvo como objetivo construir una instalación fotovoltaica experimental que permita el posterior estudio del aprovechamiento de la energía fotovoltaica en el país. La instalación fotovoltaica desarrollada fue contruida y diseñada para evaluar distintas tecnologías fotovoltaicas en las condiciones del Campus Central de Cartago del Tecnológico de Costa Rica. Para su desarrollo se utilizó la metodología de diseño ingenieril basada en un conjunto de especificaciones determinadas según su funcionalidad. Como resultado de este proyectó se logró construir la estación fotovoltaica experimental que permitió atender labores de investigación y educación de la Escuela de Ing. en Electrónica. Esta instalación también permitió crear capacidades en cuanto al diseño de sistemas fotovoltaicos. Además se diseñó y construyó un kiosco fotovoltaico aislado a la red eléctrica con características arquitectónica orgánicas y ergonómicas. Este kiosco sirvió para dar a conocer la tecnología fotovoltaica entre los estudiantes y visitantes del Campus Central Cartago.

2. Palabras claves

Energía solar fotovoltaica, instalaciones fotovoltaicas, estación experimental.

3. Introducción

La generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar ocurre debido al efecto fotoeléctrico, el cual ocurre en algunos materiales cuando fotones incidentes logran liberar electrones que luego circulan por un circuito eléctrico. Desde su aplicación práctica (alrededor de 1940) ha tenido una evolución sostenida, tanto a nivel científico como económico. Actualmente la energía fotovoltaica representa uno de los medios más sostenibles de generar energía eléctrica. La vida útil de un módulo fotovoltaico varía entre los 25 y 30 años pero en promedio se requiere de tan sólo dos años para que un módulo (o panel) fotovoltaico genere la cantidad de energía que se requirió para construirlo.

La energía fotovoltaica es una fuente de generación eléctrica altamente escalable, existen comercialmente módulos fotovoltaicos que generan potencia en el orden de miliwatts (orden de 1×10^{-3} W) al orden de cientos de watts (orden de 1×10^2 W). Así mismo, los módulos se pueden interconectar entre sí para obtener instalaciones que generen megawatts (1×10^6 W) o inclusive gigawatts (1×10^9 W). Esta gran escalabilidad de la energía fotovoltaica permite que pueda ser utilizada en gran número de aplicaciones, desde dispositivos electrónicos portátiles hasta plantas de generación eléctrica.

Si bien es cierto la radiación solar se encuentra en todo el globo terrestre, el desempeño de un módulo fotovoltaico depende de la zona geográfica en donde se coloque. La tecnología fotovoltaica disponible comercialmente depende fuertemente de condiciones ambientales como,

- El espectro lumínico y la radiación solar incidente : dependen fuertemente de la nubosidad presente en la región.

- La temperatura: contrariamente a lo que se puede pensar, la elevada temperatura reduce la eficiencia del módulo.
- La humedad: la cual puede reducir considerablemente la vida útil del módulo.

Así mismo, es importante destacar que el efecto fotovoltaico es un fenómeno no lineal que presenta un punto de máxima potencia asociado a sus características eléctricas. Es por ello que la energía generada por un módulo fotovoltaico no puede ser aprovechada al máximo sin la electrónica de potencia asociada que le permita operar en su punto de máxima potencia. Así mismo, existen en el mercado diferentes tecnologías de construcción de módulos fotovoltaicos que alteran en mayor o menor medida sus características eléctricas.

De esta forma, a pesar de que la energía fotovoltaica tiene más de 60 años de constante evolución, aún hay muchos detalles técnico-científicos que restan por resolver y, aún más importante, el **uso óptimo de este tipo de energía depende de las condiciones ambientales de la región en donde se pretende aprovechar**. En este sentido, este documento describe una instalación fotovoltaica experimental que permite estudiar el comportamiento de diferentes tecnologías fotovoltaicas las condiciones climáticas del Cartago, Costa Rica. Así mismo, esta instalación fotovoltaica ha permitido dar a conocer entre estudiantes y público en general los beneficios de la energía fotovoltaica. Además, ha permitido la generación conocimiento acerca de buenas prácticas y buenos materiales para iniciar un proyecto que utilice energía fotovoltaica.

El proyecto que permitió el diseño y construcción de esta instalación fotovoltaica obtuvo los fondos de una convocatoria para solicitud de recursos del Fondo Especial para la Educación Especial (FEES) para proyectos de Aporte Tecnológico. Estos fondos fueron asignados por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del ITCR para ser ejecutados durante el 2010. El proyecto se desarrolló entre el 2010 y 2011 en el Campus de Cartago del Tecnológico de Costa Rica. El objetivo principal de este proyecto fue la construcción de una instalación fotovoltaica experimental que permita el posterior estudio del aprovechamiento de la energía fotovoltaica en el país. La instalación fotovoltaica experimental deberá ser construida para evaluar la tecnología fotovoltaica y el diseño de instalación más adecuados para las condiciones climáticas del país.

El resto del documento se estructura de la siguiente forma: En la Sección 4 se presentan las principales variables que afectan el desempeño de una instalación fotovoltaica y que por lo tanto tienen que ser tomados en cuenta a la hora de diseñar una instalación fotovoltaica experimental. Luego, se presenta la metodología seguida para el diseño de la instalación fotovoltaica experimental. En la Sección 6.2.2 se presentan las principales características de la instalación fotovoltaica experimental para luego, en la sección siguiente, mencionar los principales aportes a las tareas de docencia, extensión e investigación en la institución. Al final de este documento se presenta un póster sobre el diseño del kiosco solar fotovoltaico Foliage mostrado en el Quinto Foro Energético Mundial sobre Cubiertas Solares Fotovoltaicas, actividad celebrada en Bresannone, Italia.

4. Marco Teórico: Características de una instalación fotovoltaicas experimentales

Existen distintos tipos de estaciones fotovoltaicas experimentales. La diferencia entre cada una de ellas radica en el objetivo para el cual se construye y la razón de estudio. En esta sección se presentan las principales características de las estaciones fotovoltaicas experimentales y sus características más relevantes.

4.1. ¿Por qué es necesario una estación fotovoltaica experimental?

Tal y como se mencionó en la introducción, un generador fotovoltaico transforma la radiación solar en energía eléctrica. La eficiencia de este proceso de transformación depende de diferentes variables y parámetros. Una estación fotovoltaica experimental tiene como objetivo estudiar la dependencia de un conjunto determinado de variables en el proceso de transformación de energía. A continuación se presentan las principales variables que afectan el proceso de transformación de energía.

4.2. Variables que afectan el desempeño de una instalación fotovoltaica

4.2.1. Variables relacionadas con la posición relativa del Sol

La esfera celeste, mostrada en la Figura 1 es una semiesfera centrada en una posición determinada de la superficie terrestre. Es una construcción artificial que facilita la ubicación de estrellas y planetas desde un punto determinado de la Tierra (Carroll y Ostlie, 2013). Son sólo necesarias dos coordenadas, altitud y azimuth, para definir la posición de un objeto en la esfera celeste tal y como se puede deducir de la Figura 1.

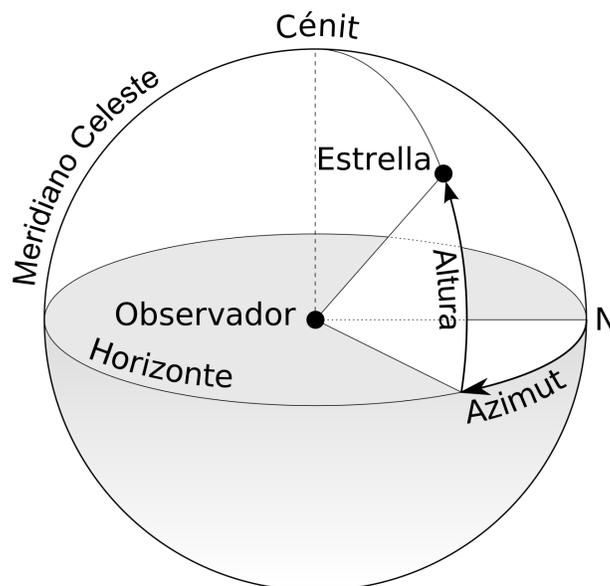


Figura 1: Esfera celeste y sistema de coordenadas altitud-azimut. Diagrama elaborado por TWC Carlson y distribuida bajo la licencia CC BY-SA 3.0. en Wikimedia Commons.

La posición relativa del Sol es su posición descrita en el sistema de coordenadas altitud-azimut en la esfera celeste. Es posible definir una expresión de la intensidad de radiación incidente sobre una superficie en función de la posición relativa del Sol (Sibaja y Peterson, 1985). De esta forma, diferentes posiciones del Sol en la esfera celeste se relacionan con distintas intensidades de radiación solar.

El Sol recorre distintas trayectorias en la esfera celeste según sea la posición del observador. Esto quiere

decir que en el caso hipotético en el cual se tenga dos instalaciones fotovoltaicas en distintos puntos de la Tierra con exactamente el mismo clima, existirá una diferencia en la energía generada por ambas instalaciones debido a la diferencia en la trayectoria relativa del Sol en ambos sitios.

Así mismo, la posición relativa del Sol también hace que el ángulo de inclinación óptimo de una superficie captadora sea distinto en ambos sitios. En donde, el ángulo de inclinación óptimo se entiende como aquel ángulo en donde se obtiene mayor cantidad de energía solar. De igual forma, el diseño y la conveniencia de sistemas de seguimiento solar será distinto en lugares con latitudes diferentes.

De esta forma, una instalación fotovoltaica experimental normalmente debe tener estructuras de soporte de módulos fotovoltaicos que permitan variar su ángulo de inclinación de forma manual o automática para poder estudiar el efecto de la posición relativa del Sol en la producción de energía eléctrica.

4.2.2. Variables relacionadas con el clima

El clima afecta el desempeño de una instalación fotovoltaica. Altas temperaturas reducen la eficiencia de los módulos fotovoltaicos (Patel, 1999). En general se pierde alrededor de 0.4% por cada grado centígrado de temperatura.

Así mismo, la nubosidad no sólo reduce la intensidad de la radiación solar fotovoltaica sino también modifica su espectro, lo cual repercute en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos. Este mismo efecto se presenta cuando existen partículas suspendidas en el aire. Esto es debido a las características de la energía solar radiante la cual se explicará brevemente a continuación.

La energía radiante en ondas electromagnéticas se caracteriza por dos parámetros: la longitud de onda λ y la frecuencia ν , siendo ambas inversamente proporcionales, es decir, una radiación de longitud de onda corta tendrá elevada frecuencia. La energía irradiada está compuesta por varias ondas electromagnéticas con distintas longitudes de onda. De esta forma para caracterizar la energía electromagnética radiada se utiliza un gráfico que muestra la intensidad del flujo de energía en función de la longitud de onda, tal y como el que se muestra en la Figura 2.

El Sol emite radiación en todas las longitudes de onda existentes, aunque la mayor parte de la energía llega a la Tierra en forma de radiación del espectro visible e infrarrojo (7% ultravioleta, 47,3% visible y 45,7% infrarrojo).

La cantidad de energía que llega a la Tierra procedente del Sol depende de factores como la difusión debida al polvo, la contaminación del aire que provocan por los aerosoles, o los efectos meteorológicos como la nubosidad, la lluvia o la nieve.

En un día parcialmente nublado un módulo fotovoltaico puede generar hasta un 80% de la energía generada en un día claro. Inclusive en un día con gran nubosidad el módulo puede llegar a generar un 30% de potencia (Patel, 1999).

La lluvia, aunque está asociada a una nubosidad mayor, también puede tener un efecto positivo sobre una instalación fotovoltaica ya que ayuda quitar el polvo de su superficie.

Es por lo tanto importante poder determinar el efecto que tiene un conjunto de condiciones climatológicas sobre el desempeño de una instalación fotovoltaica.

Espectro de la radiación solar (Tierra)

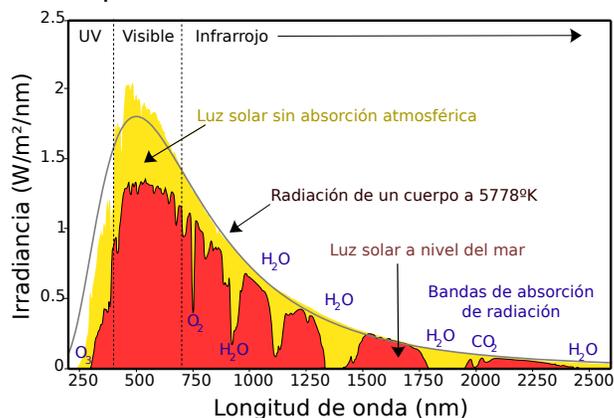


Figura 2: Espectro de la radiación solar para la luz directa tanto en la parte superior de la atmósfera de la Tierra y al nivel del mar. Diagrama elaborado por Nick84 y distribuida bajo la licencia CC BY-SA 3.0. en Wikimedia Commons.

4.2.3. Variables relacionadas con el material del módulo fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico está compuesto por un conjunto de celdas fotovoltaicas que no son más que junturas p-n de distintos materiales semiconductores. Hoy en el día en el mercado existen tres tecnologías fotovoltaicas predominantes para aplicaciones terrestres: Silicio monocristalino, silicio policristalino y película delgada.

La celda monocristalina fue la primera tecnología de celdas fotovoltaicas que se produjo a nivel industrial. En esta, las celdas se obtienen a partir un gran cristal de Silicio. A continuación se listan algunas de sus características:

- Como provienen de un único cristal sus átomos perfectamente ordenados. Esto por que en el proceso de cristalización los átomos se disponen en el mismo orden.
- Tienen un color azulado oscuro y con un cierto brillo metálico.
- Su eficiencia es de un 14 – 16
- Es la tecnología más cara.

Las celdas monocristalinas tienen una estructura molecular más simétrica y ordenada que las celdas policristalinas. Para lograr una estructura molecular ordenada es necesario un silicio más puro lo cual hace el proceso de fabricación de las celdas monocristalinas es más caro (energéticamente y económicamente) que el proceso de fabricación de las celdas policristalina. Por otro lado, las celdas monocristalinas tienen una eficiencia mayor que las celdas policristalinas (Lasnier, 1990).

Las celdas policristalinas no se fabrican a partir de un único gran cristal, sino que se utiliza un bloque de Silicio formado por muchos cristales. A continuación algunas de sus características:

- Las direcciones de alineación de los cristales van cambiando cada cierto tiempo durante el proceso de deposición.
- Tiene un color más claro con distintas tonalidades e irregularidades, tiene un aspecto vetado.
- Su eficiencia se sitúa típicamente en 12
- Son más económicas que las celdas monocristalinas.

Los módulos fotovoltaicos de película delgada están constituidos por un material generado por un proceso de crecimiento de especies atómicas, iónicas o moleculares en un sustrato. El grosor final del material puede variar desde pocos nanómetros hasta decenas de micrómetros (Poortmans y Arkhipov, 2006). En el caso de las capas delgadas el material más utilizado es el Silicio-Hidrógeno (Silicio amorfo), sin embargo también se pueden utilizar otros materiales como el Cobre-Indio-Selenio (CIS) y el Teluro de Cadmio (CdTe). En esta tecnología no se utilizan láminas de cristal para hacer las celdas, sino que el material a utilizar se rocía sobre un sustrato, el cual puede ser incluso un material flexible. La capa de material rociado puede tener un espesor que puede ser menor a 2 micrómetros. Con esta tecnología se pueden hacer módulos formados por una sección continua de material, sin la necesidad de unir varias celdas. Entre las características de los sistemas de Silicio amorfo se pueden mencionar:

- No existe estructura cristalina ordenada, el silicio se deposita sobre un soporte transparente en forma de una capa fina.
- Presentan un color marrón y gris oscuro
- Menos extendido en fotovoltaica. Aplicaciones típicas en calculadoras, relojes, etc.
- Eficiencia, 6-10
- Permite láminas muy finas.
- Muy económico y expectativa de futuro.
- La potencia que producen inicialmente se va reduciendo hasta estabilizarse luego de algunos meses.

La diferencia principal entre los distintos tipos de módulos radica en que cada tecnología absorbe distintos rangos de espectro de la radiación solar. Por ejemplo, las celdas monocristalinas no generan electricidad para la radiación solar con una longitud de onda superior a $1.1 \mu\text{m}$ (Cobarg, 1983). Dado que las nubes y las partículas suspendidas en la atmósfera modifican el espectro de radiación solar se tiene que distintas tecnologías de módulos responderán de forma diferente en condiciones climáticas diversas.

4.2.4. Variables relacionadas con la configuración de la instalación fotovoltaica

La energía eléctrica generada por medios fotovoltaicos presenta variaciones en la tensión y corriente presentes en sus terminales. Para que ésta energía pueda ser aprovechada debe ser acondicionada por medio de un

convertidor de potencia de forma tal que la energía entregada a la carga final (la red eléctrica o un sistema aislado) tengan la forma de corriente y tensión adecuadas. Existen múltiples topologías de convertidores de potencia que logran este objetivo (Simoes y Farret, 2004), (Patel, 1999). La topología utilizada depende de cómo se asocien los módulos y el uso final de su energía.

La asociación de módulos fotovoltaicos, también conocida como configuración o matriz de generadores fotovoltaicos (*module array* en inglés), consiste en conectar eléctricamente varios módulos fotovoltaicos en serie y/o paralelo con el objetivo de alcanzar niveles de tensión y corriente adecuados para ser utilizados con un convertidor de potencia específico. La selección de un convertidor de potencia se puede deber a razones de costo o de optimización.

De esta forma, tal y como se indica en (Meza, Negroni, Guinojan, y Biel, 2010) se identifican las siguientes configuraciones de instalaciones fotovoltaicas:

- Configuración con inversor centralizado: Grupo de módulos fotovoltaicos conectados en serie y paralelo que inyectan energía eléctrica por medio de un inversor, denominado, inversor central.
- Configuración con inversor en cadena: Grupo de módulos fotovoltaicos conectados únicamente en serie que se encuentran conectados a la red eléctrica por medio de un inversor, denominado inversor de cadena.
- Configuración con inversor por módulo o microinversor: Cada módulo fotovoltaico tienen su propio inversor fotovoltaico.

Tal y como se detalla en (Meza y cols., 2010), cada configuración puede extraer una cantidad distinta de energía del conjunto de módulos fotovoltaicos. De esta forma, una estación fotovoltaica experimental también puede ser utilizada para estudiar los efectos que tienen el uso de distintas configuraciones sobre la eficiencia de una instalación fotovoltaica.

4.3. Características principales de una estación fotovoltaica experimental

Con base en lo expuesto anteriormente se puede afirmar que una estación fotovoltaica debe tener las siguientes características:

- Utilización de estructuras de montaje que permitan evaluar el efecto de distintos grados de inclinación en su desempeño.
- Medición de las variables climáticas para determinar su efecto en la instalación fotovoltaica.
- Estar compuesta de distintas tecnologías fotovoltaicas para evaluar el desempeño de cada una de ellas bajo condiciones climáticas determinadas.
- Posibilidad de asociar la instalación fotovoltaica o parte de ella a distintas configuraciones y convertidores de potencia.

5. Metodología

Como se mencionó en la introducción, el proyecto descrito en este documento consiste en el desarrollo de una instalación fotovoltaica. De esta forma, el proyecto no representa una investigación en si misma, sino el diseño de una construcción fotovoltaica experimental que permita evaluar distintas tecnologías fotovoltaicas.

En este sentido es importante destacar que la metodología de diseño difiere de la metodología utilizada en la investigación de las ciencias naturales. Esta discusión ha sido tratada ampliamente desde hace varias décadas por ejemplo en (Finger y Dixon, 1989) y en (Cross, Naughton, y Walker, 1981). La diferencia metodológica radica en que en el caso del diseño el objeto de interés es un elemento artificial que responde especificaciones concretas.

De esta forma el presente proyecto fue desarrollado siguiendo el proceso de diseño ingenieril el cual implica la definición de especificaciones que se relacionan directamente con el uso final de la instalación. La especificaciones de la instalación de presentan en la sección 6.1 y en los usos que tendrá la instalación se detallan en la sección 6.1.1. Esta línea metodológica es en algunos casos denominada diseño conceptual (Finger y Dixon, 1989) o estructuración para el diseño (Dym, Agogino, Eris, Frey, y Leifer, 2005), y parte de una construcción abstracta y funcional de los requerimientos del sistema que luego, por medio de elementos existentes, son desarrollado en un artefacto concreto, en este caso, la instalación fotovoltaica.

Para definir las especificaciones del sistema (Sección 6.1), se partió del análisis teórico presentado en la Sección 4 y del criterio experto de los participantes del proyectos y de empresas que instalan sistemas fotovoltaicos en la región. De esta forma se concretó una descripción de la instalación fotovoltaica desarrollada la cual se detalla en la Sección 6.2.

Como es común en la metodología de diseño ingenieril (Finger y Dixon, 1989) y (Dym y cols., 2005), el proceso fue iterativo y concluyó en la construcción de una prueba de concepto experimental que se detalla en la sección de resultados.

6. Resultados: Instalación Fotovoltaica Experimental

En esta sección se describe la instalación fotovoltaica experimental construida en el costado Sur del Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESLab) de la Escuela de Ingeniería en Electrónica, Campus Central, Cartago, Costa Rica.

6.1. Requerimientos de la Instalación Fotovoltaica Experimental

Con base en las características descritas en la Sección 4 se determinó que la instalación fotovoltaica experimental debe tener los siguientes requisitos:

- Estar conformada por módulos fotovoltaicos de distintas tecnologías,
- tener la capacidad de medir y registrar las variables climáticas,

- tener estructuras de soporte que permitan el ajuste de los ángulos de inclinación de los módulos fotovoltaicos,
- permitir la integración de diferentes configuraciones y convertidores de potencia.

6.1.1. Usos de la Instalación Fotovoltaica Experimental

Además de los requerimientos técnicos mencionados anteriormente, a la hora de diseñar la instalación fotovoltaica experimental se tomó en cuenta la forma en que esta se utilizaría en el futuro. Más específicamente, la instalación fotovoltaica descrita en este documento se diseñó para ser utilizada como un espacio para

- evaluar distintas tecnologías de módulos fotovoltaicos,
- evaluar convertidores de potencia,
- evaluar el uso de sistemas fotovoltaicos en sistemas conectados a red para uso residencial,
- evaluar el uso de sistemas fotovoltaicos aislados de la red eléctrica,
- apoyar labores docentes en cursos de la carrera de ingeniería en electrónica y cursos de actualización profesional,
- demostrar el uso de la energía solar fotovoltaica en estructuras innovadoras.

En la Sección 7.2.2 se presentan algunas actividades en las cuales se utiliza la instalación fotovoltaica.

6.2. Descripción de la instalación fotovoltaica experimental

La instalación fotovoltaica experimental construida está conformada por dos espacios:

- Una Estación Experimental Fotovoltaica (EEF): consiste de un espacio de 7 m² encerrado con malla en donde caben hasta 10 módulos fotovoltaicos con sus respectivas estructura de montaje. La EEF tiene un cableado eléctrico subterráneo que permite acceder a cada uno de los módulos fotovoltaicos desde el SESLab. Cuenta con una estación meteorológica para recolectar datos climatológicos.
- Kiosco Foliage: Instalación fotovoltaica aislada de la red eléctrica. Consiste de un conjunto de módulos fotovoltaicos, baterías y la electrónica de potencia necesaria para cargar hasta dos computadoras portátiles. Este espacio permite estudiar el comportamiento de una instalación fotovoltaica con baterías aislada de la red eléctrica.

A continuación se describirá cada una de los espacios.



Figura 3: Fotografía de la Estación Experimental Fotovoltaica

6.2.1. Estación Experimental Fotovoltaica

Para la Estación Experimental Fotovoltaica (EEF) se utilizaron módulos fotovoltaicos de distintas tecnologías. Más específicamente, en el EEF existen módulos fotovoltaicos de las siguientes tecnologías:

- 2 módulos monocristalinos marca Kyocera.
- 2 módulos policristalinos marca Evergreen.
- 2 módulos de película delgada marca SunPower.
- 2 módulos de multijuntura monocristalina y de película delgada marca Sanyo (modelo HIT).
- 2 módulos policristalinos marca Canadian Solar.



Figura 4: Algunos módulos fotovoltaicos adquiridos para la EEF

Se construyeron cuatro tipos de estructura de montaje:

- Estructura de montaje tipo cercha con láminas de zinc para emular una instalación fotovoltaica en el tejado (Figura 5).

- Estructura de montaje con inclinación ajustable de forma manual (Figura 3).
- Estructura de montaje fija (Figura 6).
- Estructura de montaje seguidor (Figuras 7 y 8).



Figura 5: Estructura de montaje tipo cercha



Figura 6: Estructura de montaje con inclinación fija



Figura 7: Estructura de montaje seguido solar

Además en la EEF existe una estación meteorológica marca Vantage Pro 2 que registra temperatura, humedad, lluvia y radiación solar (Figura 9).



Figura 8: Estructura de montaje seguido solar. Las líneas rojas indican los ángulos de excursión de la estructura.



Figura 9: Estación meteorológica en EEF

La EEF tiene una instalación eléctrica subterránea que permite acceder a cada uno de los módulos fotovoltaicos desde el interior del SESLab. Las terminales eléctricas de cada uno de los módulos llega a una caja eléctrica con sus respectivas protecciones (Figura 10). Esto permite probar desde el laboratorio distintos convertidores de potencia, ya sea equipo comercial o equipo desarrollado en el laboratorio. Por ejemplo algunos módulos fotovoltaicos se encuentran interconectados a la red eléctrica por medio de microinversores ubicados dentro del laboratorio, tal y como se indica en la Figura 11. También se adquirió dos caracterizadores de módulos fotovoltaicos MPPT 3000 (Figura 12) desarrollado por el Instituto de Sostenibilidad Aplicada al Ambiente Construido ubicado en Ticino, Suiza. Este caracterizador permite obtener las curvas características de cada uno de los distintos módulos fotovoltaicos.



Figura 10: Caja eléctrica con protecciones para cada una de las terminales de los módulos FV

6.2.2. Foliage

Como se mencionó anteriormente, además de la Estación Experimental Fotovoltaica se diseñó y construyó un kiosco fotovoltaico, denominado Foliage. Este kiosco permite complementar el estudio de los sistemas fotovoltaicos de la siguiente forma:

- Generar una estructura arquitectónica que integre desde su concepción los módulos fotovoltaicos como elementos constructivos.
- Evaluar el desempeño de una instalación fotovoltaica aislada de la red eléctrica con consumos de electricidad no determinísticos.

Así mismo, esta estructura servirá como un área de estudio y ocio que puede ser replicado para instalarse en áreas verdes sin acceso a la red eléctrica.

Para su diseño se tomaron en cuenta no sólo factores energéticos (Figura 13) sino también climatológicos (Figura 14) y ergonómicos (Figura 15).

En la Figuras 16, 17 y 18 se observan distintas imágenes en 3D del diseño del kiosco solar fotovoltaico y en la Figura 20 se muestra una fotografía del kiosco finalizado.

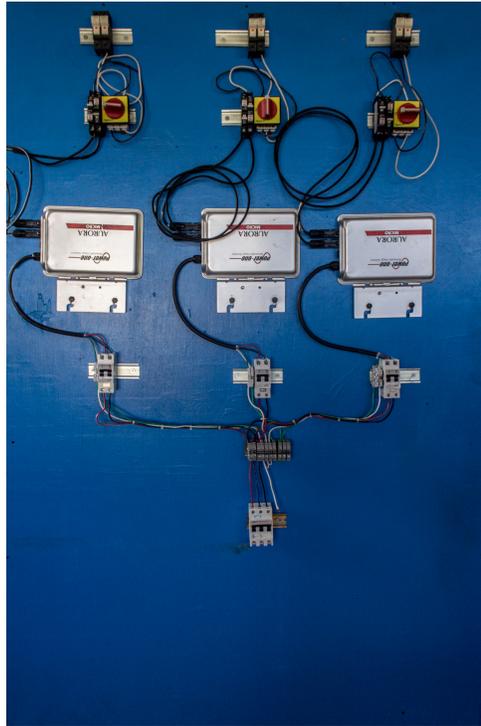
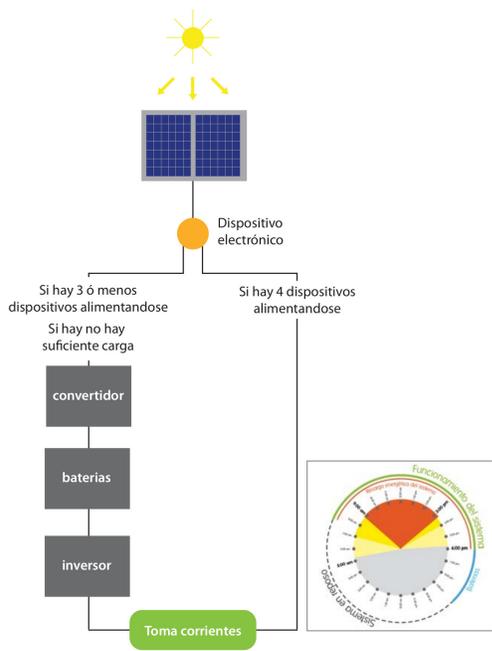


Figura 11: Microinversores conectados a algunos módulos fotovoltaicos del EEF



Figura 12: Caracterizador de módulos fotovoltaicos MPPT3000

Sistema Energético



Sistema de Almacenamiento

La pieza central de sistema es el elemento de almacenamiento de los elementos fotovoltaicos.

Esta compuesto por dos piezas de cemento y dos puertas de acceso para mantenimiento y reemplazo de partes

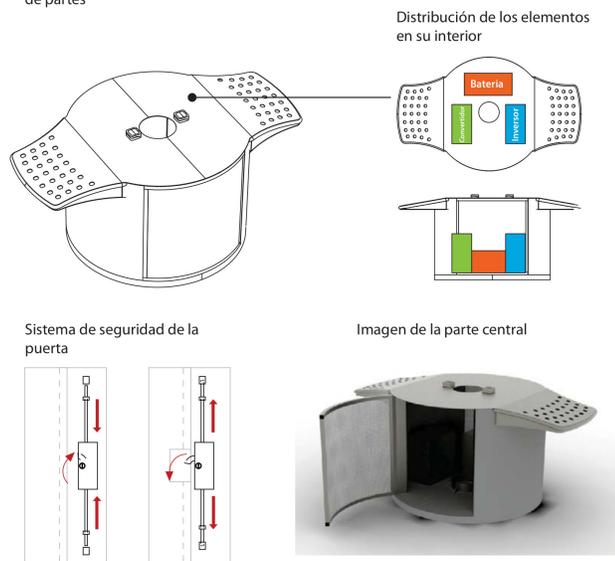
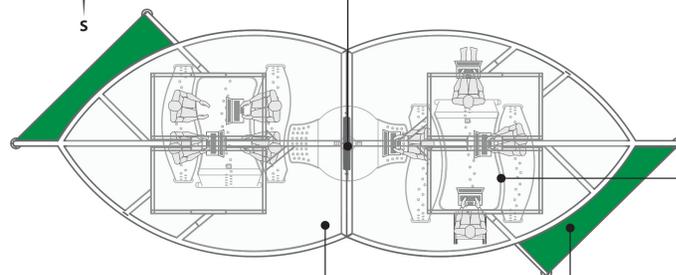


Figura 13: Diagrama que explica las consideraciones energéticas del kisoco solar fotovoltaico. Diseñado por la Ing. Yoselyn Walsh.

Factores Climatológicos

DIRECCIÓN DEL VIENTO



SOMBRA

El mobiliario está por debajo de las láminas de policarbonato, las cuales disminuyen el efecto de los rayos solares en el usuario principalmente. Además durante lluvias de baja intensidad el sistema puede utilizarse sin problemas

CARTAGO

BRILLO SOLAR 5 - 6 hrs

PRECIPITACIÓN 1500 - 2000 mm

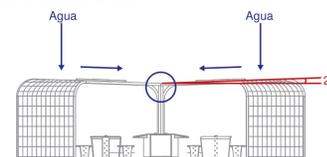
TEMPERATURA máx. 20 - 22° med. 16 - 18° min. 10 - 12°

VIENTO

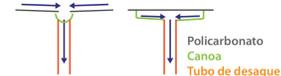
Cuando la pared vegetal se encuentre densa, va a ser una barrera contra el viento, contribuyendo con el confort del usuario. Dependiendo de la localización del sistema, se debe de prever que las paredes vegetales se encuentren en dirección al noroeste, que es la dirección predominante de los vientos en el campus.

AGUAS

El sistema de desagüe es el llamado "a dos aguas" es decir, funciona con dos inclinaciones, la del policarbonato a 2° y la de la canoa a 2° también. Esto ayuda a que el flujo de agua se evacue más rápidamente, disminuyendo la posibilidad de rebalse.



Punto de convergencia de las aguas



PANELES SOLARES

Como el Sol sale por el este y se pone por el oeste, la ubicación de los paneles solares debe corresponder a esta orientación para maximizar su eficiencia (un par tiene mayor eficiencia durante la mañana y el otro en la tarde. Además debe de considerarse para su ubicación, que sea una área libre de sombras, ya que el panel solar funciona por medio de luz solar.

Figura 14: Diagrama que explica las consideraciones climática que se tomaron en cuenta a la hora de diseñar el kisoco solar fotovoltaico. Diseñado por la Ing. Yoselyn Walsh.

Mobiliario

GRUPOS

Escenario con grupos de trabajo compuesto de 4 estudiantes en sus diferentes posibilidades
Cada grupo tiene a su disposición 2 tomacorrientes

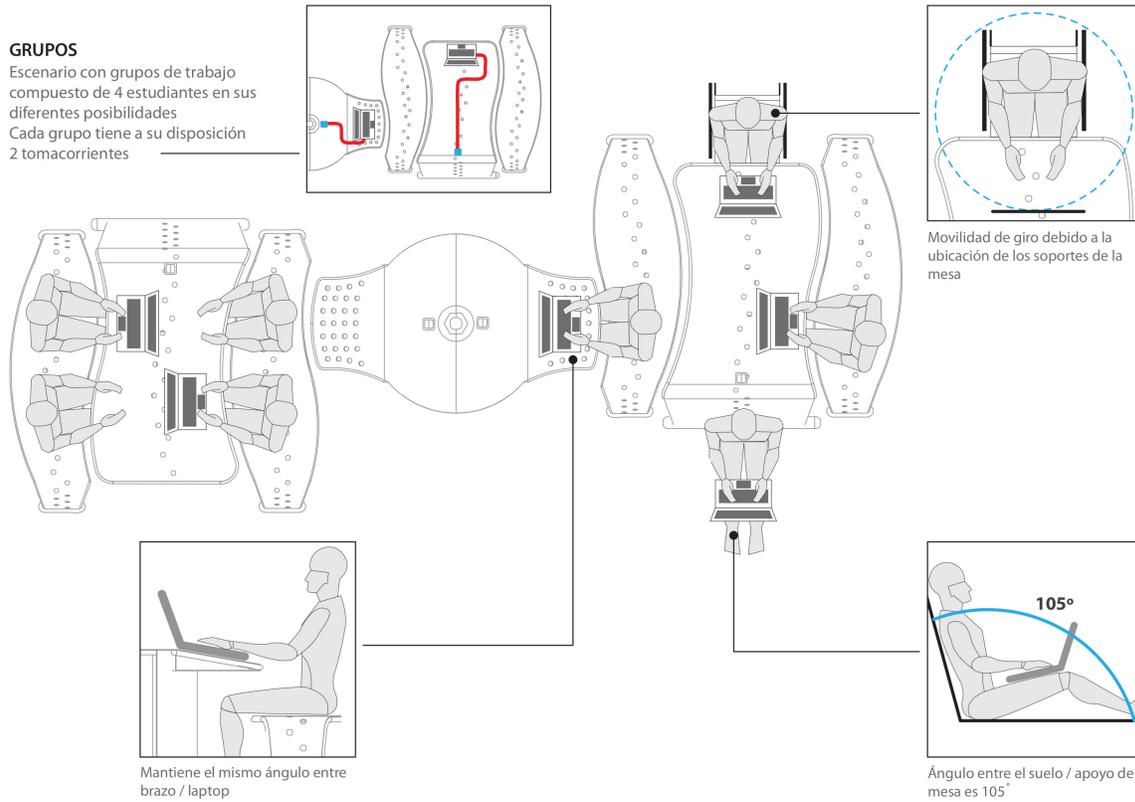


Figura 15: Diagrama que explica las consideraciones ergonómicas que se tomaron en cuenta para el diseño del kiosco solar fotovoltaico. Diseñado por la Ing. Yoselyn Walsh.



Figura 16: Imagen 3D del kiosco fotovoltaico aislado Foliage. Diseñado por la Ing. Yoselyn Walsh.

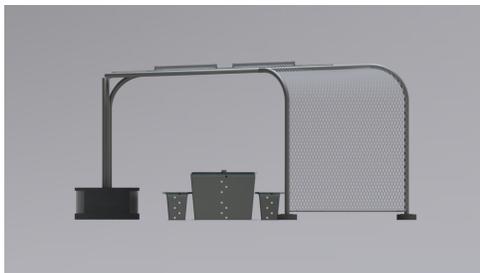


Figura 17: Imagen 3D del kiosco fotovoltaico aislado Foliage. Diseñado por la Ing. Yoselyn Walsh.

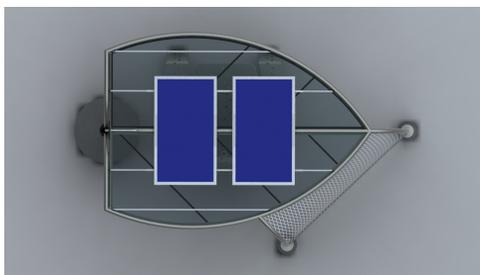


Figura 18: Imagen 3D del kiosco fotovoltaico aislado Foliage. Diseñado por la Ing. Yoselyn Walsh.



Figura 19: Imagen 3D del kiosco fotovoltaico aislado Foliage. Diseñado por la Ing. Yoselyn Walsh.



Figura 20: Fotografía del kiosco fotovoltaico aislado Foliage. Kiosco utilizado para que estudiantes y profesores utilicen dispositivos electrónicos en entornos naturales sin conexión a la red eléctrica principal.

7. Discusión y conclusiones: Aportes de la Instalación Fotovoltaica Experimental

7.1. Conclusiones

Como principales conclusiones y aportes del proyecto se tienen las siguientes:

- La estación fotovoltaica experimental construida ha permitido de forma satisfactoria atender necesidades docentes y de investigación de la Escuela de Ingeniería en Electrónica.
- El conjunto de instrumentos y la configuración de la instalación fotovoltaica experimental desarrollada permite la evaluación de distintas tecnologías fotovoltaicas.
- El proceso de diseño y construcción de la instalación fotovoltaica experimental permitió generar capacidades para el personal que participó en el proyecto.

7.2. Discusión y aportes

La instalación fotovoltaica experimental ha sido de gran utilidad en diversas actividades de docencia, investigación y extensión que se han realizado en el SESLab. En esta sección se discutirá brevemente algunas de ellas.

7.2.1. Actividades de docencia y extensión

La instalación fotovoltaica experimental se ha utilizado para impartir cursos de actualización profesional. Más específicamente ha representado el espacio para desarrollar las sesiones prácticas del programa de Especialización en Sistemas Fotovoltaicos. Esta capacitación es un programa internacional desarrollado por el SESLab en cooperación con la Agencia de Cooperación Alemana para el Desarrollo (GIZ). El programa se ha impartido a más de 150 personas a nivel nacional. Además se ha impartido en Honduras y Nicaragua.



Figura 21: Primera generación de graduados del Programa de Especialización en Sistemas Fotovoltaicos



Figura 22: Sesiones prácticas utilizando la Instalación Fotovoltaica Experimental en el Programa de Especialización de Sistemas Fotovoltaicos

7.2.2. Actividades de investigación

La Instalación Fotovoltaica Experimental también se ha utilizado para desarrollar distintos proyectos de investigación. Sobretudo se han desarrollado varias proyectos de graduación de licenciatura y se encuentran en desarrollo algunas tesis de maestría y doctorado.

A continuación se enumeran los proyectos de cursos y de graduación de licenciatura que se han desarrollado y se están desarrollando y que utilizan la Instalación Fotovoltaica Experimental:

- Evaluación de sistemas que eviten filtraciones en techos fotovoltaicos. Proyecto de curso de estudiantes de producción industrial.
- Seguidor solar fotovoltaico. Proyecto de graduación licenciatura en mecatrónica.
- Dispositivo electrónico para caracterizar módulos fotovoltaicos. Proyecto de graduación de licenciatura en mecatrónica.
- Cargador de baterías de ácido plomo e ión litio utilizando energía solar fotovoltaica. Proyecto de graduación en desarrollo. Licenciatura en electrónica.
- Estación meteorológica para la identificación de variables ambientales que afectan directamente la producción de energía fotovoltaica. Proyecto de graduación en desarrollo. Licenciatura en electrónica.

También se encuentran en desarrollo las siguientes tesis de maestría y doctorado que están usando la Instalación Fotovoltaica Experimental:

- Algoritmos para el seguimiento del punto de máxima potencia de módulos fotovoltaicos. Tesis de maestría en desarrollo. Maestría en Computación del ITCR.
- Convertidores conmutados para sistemas fotovoltaicos. Tesis de maestría en desarrollo. Maestría en Ing. Electrónica del ITCR.
- Configuración dinámica en instalación fotovoltaicas. Tesis de doctorado en desarrollo. Doctorado en Ingeniería del ITCR.

8. Agradecimientos

Además de los investigadores que participaron en este proyecto contribuyeron también las siguientes personas

- Ing. Sebastián Romero (egresado de la carrera de Ing. Mecatrónica, ITCR),
- Ing. Javier Carvajal (egresado de la carrera de Ing. Electrónica, ITCR),
- Ing. Hugo Sánchez (egresado de la carrera de Ing. Mecatrónica, ITCR),
- M.Sc. Jeiner Alvarado (egresado de la carrera de Ing. Electrónica y del programa de Maestría en Ing. Electrónica, ITCR),
- M.Sc. Yoselyn Walsh (egresada de la carrera de Ing. en Diseño Industrial del ITCR).
- Ing. Andrea Fajardo (egresada de la carrera de Ing. en Diseño Industrial del ITCR).
- Srta. Raquel Ramírez (estudiante de Ing. Electrónica, ITCR),
- Sr. Juan Carlos Vargas (estudiante de Ing. Electrónica, ITCR).

9. Referencias

Referencias

- Carroll, B., y Ostlie, D. (2013). *An introduction to modern astrophysics*. Pearson.
- Cobarg, C. (1983). *Energía solar: Bases y aplicaciones*. Paraninfo.
- Cross, N., Naughton, J., y Walker, D. (1981). Design method and scientific method. *Design studies*, 2(4), 195–201.
- Dym, C. L., Agogino, A. M., Eris, O., Frey, D. D., y Leifer, L. J. (2005). Engineering design thinking, teaching, and learning. *Journal of Engineering Education*, 94(1), 103–120.
- Finger, S., y Dixon, J. R. (1989). A review of research in mechanical engineering design. part i: Descriptive, prescriptive, and computer-based models of design processes. *Research in engineering design*, 1(1), 51–67.
- Lasnier, F. (1990). *Photovoltaic engineering handbook*. Taylor & Francis.
- Meza, C., Negroni, J., Guinojan, F., y Biel, D. (2010). Inverter configurations comparative for residential pv systems. En *IEEE industrial electronics, IECON 2006–32nd annual conference on* (p. 4361–4366).
- Patel, M. (1999). *Wind and solar power systems*. CRC Press.
- Poortmans, J., y Arkhipov, V. (2006). *Thin film solar cells*. Wiley.
- Sibaja, E., y Peterson, D. (1985). *Colectores solares*. Editorial Tecnológica.
- Simoes, M., y Farret, F. (2004). *Renewable energy systems*. CRC Press.

10. Apéndice

A continuación se incluye:

- versión en escala del poster titulado *"Design of a Green outdoor study space: Self-sustaining system inspired by the leaves of trees"* que se presentó en el *"5th International Energy Forum on Solar Building Skins"* en el 2010 en Bressanone, Italia.