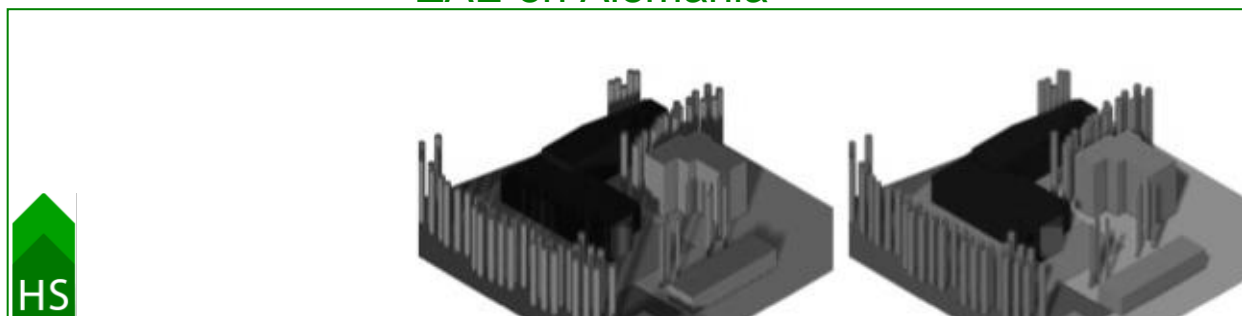


Building integration of **Integración de sistemas de energía solar**  
photovoltaic solar systems in the **fotovoltaica en el edificio de oficinas del**  
ZAE office building in Germany **ZAE en Alemania**



**Julia Mundo Hernández** [julia.mundo@udlap.mx](mailto:julia.mundo@udlap.mx)  
Departamento de Arquitectura – Universidad de Las Américas Puebla

**Benito de Celis Alonso** [benileon@yahoo.com](mailto:benileon@yahoo.com)  
Departamento de Física – Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

**M. Cristina Valerdi Nochebuena** [cvalerd@gmail.com](mailto:cvalerd@gmail.com)  
Departamento de Arquitectura – Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

**Jorge Sosa Oliver** [chepus46@hotmail.com](mailto:chepus46@hotmail.com)  
Departamento de Arquitectura – Benemérita Universidad Autónoma de Puebla



# Integración de sistemas de energía solar fotovoltaica en el edificio de oficinas del ZAE en Alemania

## Building integration of photovoltaic solar systems in the ZAE office building in Germany

Julia Mundo Hernández <sup>(a)</sup>, Benito de Celis Alonso <sup>(b)</sup>, M. Cristina Valerdi Nochebuena <sup>(c)</sup>, Jorge Sosa Oliver <sup>(d)</sup>

<sup>(a)</sup> Departamento de Arquitectura – Universidad de Las Américas Puebla – Méjico – email: julia.mundo@udlap.mx

<sup>(b)</sup> Facultad de Medicina – Benemérita Universidad Autónoma de Puebla – Méjico – email: benileon@yahoo.com

<sup>(c)</sup> Facultad de Arquitectura – Benemérita Universidad Autónoma de Puebla – Méjico – email: crvalerd@gmail.com

<sup>(d)</sup> Facultad de Arquitectura – Benemérita Universidad Autónoma de Puebla – Méjico – email: chepus46@hotmail.com

---

### RESUMEN

*Palabras Claves*  
Energía Fotovoltaica  
Polysun Software  
Energías renovables

El acceso a energía de manera segura y constante es actualmente una de las grandes preocupaciones mundiales. La continuación de la vida humana en el planeta y de los estilos de vida actuales están sujetos a la disponibilidad energética. Desde hace varias décadas numerosas investigaciones se han concentrado en buscar fuentes de energía limpias, seguras y renovables. Una de esas fuentes es la solar fotovoltaica, a través de la cual se puede obtener electricidad a partir de la radiación solar. Aquí se presenta un caso de estudio de integración, dimensionamiento y ubicación de módulos fotovoltaicos en un edificio de oficinas y laboratorios ubicado en Erlangen, Alemania. El trabajo se realizó a través de un levantamiento arquitectónico del sitio, un modelo en 3D del edificio, un estudio de sombras y simulaciones de sistemas fotovoltaicos utilizando el programa Polysun Simulation Software v.5.3 (Vela Solaris, 2012). Los resultados obtenidos demuestran las múltiples posibilidades que existen para integrar módulos fotovoltaicos en edificios, así como las ventajas y desventajas de cada opción en términos de producción de energía, orientación, dimensiones de los paneles, estética y de ahorro de CO<sub>2</sub>. Además se demuestran las ventajas que ofrece la utilización de un software especializado para tomar decisiones de diseño con mayor certeza.

### ABSTRACT

*Key Words*  
Photovoltaic Energy

Currently, one of the major concerns worldwide is the access to safe, clean and sustainable energy. People's current life-style and our life on this planet are subject to energy availability. Therefore, latest research projects have focused on developing ways of obtaining clean, safe and

Polysun Software  
Renewable energy

renewable energy. Solar photovoltaic energy (PV) is one of those energy sources, where electricity is directly obtained from solar radiation. This paper examines a case study showing the integration of PV modules into an office and lab building located in Erlangen, Germany. Polysun Simulation Software v.5.3 was used for simulating different types, size and location of PV modules in the building selected as case study (Vela Solaris, 2012). Results demonstrate the multiple possibilities for PV integration into buildings, and the advantages and disadvantages of every option regarding electricity production, orientation, modules dimension, aesthetics and CO<sub>2</sub> savings. Moreover, the benefits offered to designers and clients when using specialised software during design decision stages are discussed.

## 1. Introducción

La utilización de fuentes no renovables para producir energía como el gas, uranio, carbón y petróleo ya no es una alternativa viable para mantener los actuales estilos de vida y sobre todo para disminuir la contaminación que esas fuentes de energía producen. Una de las fuentes de energía renovable con más potencial es sin duda la energía del sol. Este astro emite cada segundo 15000 veces más energía de la que necesitan actualmente los 6,7 billones de personas que habitan el planeta Tierra (Alt, 2009). Pero todavía dependemos en gran medida de combustibles fósiles y de la energía nuclear<sup>1</sup>. Más del 90% de la energía solar que llega a la Tierra es absorbida por los océanos, y sólo una pequeña parte es utilizada por las plantas para la fotosíntesis (Behling, et al., 2002). El aprovechamiento humano de la energía solar ha sido poco relevante hasta el momento, sin embargo, parece que esa situación está cambiando.

Algunos países como Alemania, Francia, España, Estados Unidos y Japón, han dedicado grandes esfuerzos para el desarrollo y popularización de la industria fotovoltaica. Se han logrado grandes avances en la generación de energía a partir de campos solares conectados a la red pública, así como, de instalaciones fotovoltaicas integradas a edificios públicos y residenciales. Esos países han establecido diferentes estrategias para incentivar la difusión y utilización de esta fuente de energía renovable entre los ciudadanos comunes. Algunas de esas

estrategias incluyen: acceso a préstamos bancarios, compra de la electricidad producida a precios Premium y reducción de impuestos.

Los países Latinoamericanos nos encontramos con un retraso importante en cuanto al desarrollo de tecnología solar fotovoltaica y también en cuanto a su utilización para generar energía. Actualmente, la mayor parte de los países de América Latina producen su electricidad principalmente a partir de fuentes de energía no renovables como el petróleo y el gas natural, produciendo cantidades importantes de gases de efecto invernadero, contribuyendo así al cambio climático. En algunos países en vías de desarrollo se están utilizando sistemas fotovoltaicos para electrificar zonas rurales donde llevar líneas eléctricas de la red pública sería más caro. Sin embargo, el impacto a nivel nacional y mundial no es significativo. En comparación, la Agencia Alemana de Energía ha indicado que Alemania planea producir para el año 2050 el 50% del consumo de energía primaria a partir de fuentes renovables (DENA, 2010).

Este artículo pretende mostrar los aspectos más importantes a considerar para la integración de sistemas fotovoltaicos en edificaciones, a través del análisis de un estudio de caso de un edificio ubicado en Alemania. Diseñadores, arquitectos, ingenieros, clientes y usuarios deben tener presentes las opciones de tecnología fotovoltaica disponible en el mercado, sus características y ventajas ambientales para tomar decisiones apropiadas de diseño, instalación y uso de los equipos.

## 2. Desarrollo

### 2.1. La tecnología solar fotovoltaica

La tecnología fotovoltaica es el método más

<sup>1</sup> Alemania anunció el cierre total de sus 17 plantas nucleares para el año 2022, después de los problemas sufridos en Fukushima, Japón a causa del terremoto y tsunami del mes de marzo de 2011. Para lograrlo, el gobierno alemán aprobará una nueva ley de energías renovables cuya meta será producir el 35% de la demanda energética de ese país antes de 2020 (El país, 31 mayo de 2011).

directo de producir electricidad a partir de la radiación solar, sin producir ruido o emisiones de gases. La eficiencia de una célula solar se define por la proporción de radiación solar que llega a la superficie de la célula y es convertida en energía eléctrica (Boyle, 1996).

Desde 1958 a la fecha, la energía solar fotovoltaica se ha utilizado en la industria espacial de forma generalizada, entre otras muchas aplicaciones. Esta tecnología continúa mejorando constantemente. Actualmente se utiliza en edificios residenciales, oficinas, educativos, etc, y también se han construido campos solares conectados a la red pública eléctrica en países como Alemania, Suiza, Japón y España.

La mayoría de las células fotovoltaicas que hay en el mercado están hechas con silicio y pueden ser principalmente monocristalinas o policristalinas. Las primeras son células hechas con láminas muy finas cortadas de un solo cristal de silicio. Las policristalinas son células hechas a partir de un bloque de cristales de silicio. La eficiencia de ambos tipos de células se mantiene entre un 12% y 17% (EPIA, 2010). Existe otro tipo de células llamadas amorfas o thin film, están hechas por capas muy delgadas de materiales fotosensibles como el silicio amorfo, el cadmio o el cobre; éstos son colocados sobre materiales como vidrio, plástico y acero. La mayor ventaja de las últimas es que funcionan con luz difusa y no sólo con radiación solar directa, son flexibles y ligeras, lo cual permite colocar estas células o módulos en techos o fachadas de edificios (Alwitra, 2010).

Un módulo fotovoltaico es un conjunto formado por un determinado número de células fotovoltaicas eléctricamente interconectadas, formando una estructura compacta y resistente capaz de suministrar una corriente eléctrica a un circuito externo. Dependiendo de la producción de electricidad necesaria para un edificio, según su función, ubicación geográfica, operación y ocupación, se puede determinar cuántos módulos es necesario interconectar. A ese conjunto de módulos fotovoltaicos montados sobre una estructura común (por ejemplo de aluminio) e interconectadas eléctricamente en serie, paralelo o de forma mixta se le conoce como Panel fotovoltaico (ASIF, 2002).

Actualmente, en instalaciones fotovoltaicas en edificios es más común encontrar células de silicio tanto monocristalinos como policristalinos, ya que son más baratas y tienen una mayor eficiencia y duración que las células amorfas.

Aunque el mercado de estas últimas ha crecido considerablemente debido a su flexibilidad y ligereza (ya que no necesitan una estructura de aluminio, acero o fibra de vidrio para su montaje), instalación fácil y eficiencia bajo condiciones no sólo de luz solar directa sino también difusa, lo cual las hace ideales para sitios que tienen cielos nublados y parcialmente nublados durante la mayor parte del año. Los materiales utilizados para fabricar células fotovoltaicas industrialmente deben ser fáciles de conseguir, no contaminantes y cómodamente manipulables (Alcor, 2008). La proporción en la utilización de los diferentes materiales con que son construidas las células fotovoltaicas corresponde en un 91% a las células de silicio cristalinas, un 5% a las de silicio amorfo, y el 4% restante a células fabricadas con arseniuro de galio, telurio de cadmio, cobre-selenio-indio, etc. (Alcor, 2008).

En laboratorios de tecnología fotovoltaica y centros de investigación como el caso de estudio aquí presentado, se están realizando proyectos enfocados a disminuir el costo de las células y módulos fotovoltaicos, entre otras cosas reciclando células de módulos que ya se han utilizado durante treinta años aproximadamente, y utilizando materiales naturales para la fabricación de células nuevas. Además, se intenta continuamente mejorar la eficiencia de las células en la producción de electricidad, así como mejorar su apariencia o estética. Es así que se han desarrollado las BIPV o Building Integrated Photovoltaics. Estos son módulos que pueden ser integrados de forma estética en techos y fachadas de edificios. Se producen en varios colores. En Francia, por ejemplo, consideran como BIPV los módulos que reemplazan un material de construcción como una ventana, un muro o el recubrimiento del techo. Los llaman Fully-integrated Systems, y el gobierno paga la electricidad producida con estos módulos con las tarifas más altas del mercado (Sun & Wind Energy Journal, 2010). La elección de un tipo de célula y módulos se realiza con base en su disponibilidad en el mercado, costos, eficiencia al producir electricidad (tomando en cuenta la radiación solar y el clima del sitio), estética de los módulos (en caso de ser relevante), y tipo y cantidad de superficie disponible para la colocación de los sistemas fotovoltaicos.

### 3. Metodología y descripción del caso de estudio

El edificio utilizado como caso de estudio fue terminado a finales de 2011. Es el edificio nuevo

proyectado para albergar los laboratorios y oficinas del Centro Bávaro de Investigación en Energía, división 3: Energía Fotovoltaica (Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung, ZAE Bayern). Este centro estaba ubicado en una zona industrial entre las ciudades de Nuremberg y Erlangen en el sur de Alemania. El edificio nuevo se construyó en el campus de la Universidad de Erlangen (Friedrich-Alexander University of Erlangen-Nürnberg). Es importante mencionar que al momento de realizar este proyecto de integración de sistemas fotovoltaicos, el edificio nuevo se encontraba en construcción.

Al ser el ZAE un centro de investigación en energía solar fotovoltaica, resultaba necesario incorporar módulos fotovoltaicos en el edificio para cumplir con dos objetivos principales: producir electricidad y utilizar el edificio como un “muestrario” de sistemas fotovoltaicos<sup>2</sup>. Uno de los obstáculos principales para lograr los objetivos es que el terreno no se pudo escoger ya que fue donado por la universidad, y además los diseñadores del proyecto arquitectónico no tomaron en cuenta la integración de sistemas fotovoltaicos durante el proceso de diseño. La metodología empleada para realizar este proyecto incluyó:

- Características geográficas de Erlangen y análisis del sitio. Aquí deben considerarse los siguientes puntos: latitud del sitio, radiación solar anual, y tipo(s) predominante de cielo durante el año: cielo claro, parcialmente nublado o nublado. En lugares con fuertes vientos será necesario tomar en cuenta la velocidad del viento para el diseño de las estructuras de soporte para los paneles fotovoltaicos; también puede ser necesario considerar elementos como la nieve, lluvias y heladas, o la cercanía a la costa, ya que podrían afectar a los materiales empleados para la construcción de las estructuras.

- Revisión de todos los planos arquitectónicos del proyecto. Esta revisión permite determinar la superficie en techos y fachadas disponible para la colocación de paneles fotovoltaicos. Estas superficies deben estar libres de sombras provocadas por edificios colindantes, vegetación, elementos naturales como montañas o cerros, y equipos para instalaciones eléctricas, hidráulicas, de ventilación o de calefacción. En este punto es muy importante considerar la orientación del edificio para identificar las

superficies que reciben mayor radiación solar a lo largo del año. Si estamos en el hemisferio norte, la orientación ideal será siempre la Sur para aprovechar la radiación solar emitida a lo largo de todo el día.

- En el diseño del proyecto arquitectónico o en la revisión de los planos debe considerarse un espacio especial para resguardar las baterías, reguladores de carga e inversores necesarios para el correcto funcionamiento del sistema fotovoltaico. Este espacio debe ser un lugar seco, con ventilación, con una temperatura promedio de 25°C, con el tamaño necesario para que pueda entrar un técnico a realizar trabajos de mantenimiento; idealmente debe encontrarse lo más cerca posible de los paneles fotovoltaicos para eliminar pérdidas de electricidad en el cableado.

- Levantamiento fotográfico del sitio. Esto nos permitirá tener un registro de las condiciones del terreno y sus colindancias, presencia de árboles, postes o letreros que pudieran ser un obstáculo para los paneles fotovoltaicos.

- Modelo 3D de la propuesta arquitectónica para el ZAE. Al realizar el modelo en 3D del edificio es importante simular con precisión la geometría del edificio propuesto (o existente a intervenir), volúmenes en la azotea producto de escaleras o instalaciones de ventilación, hidráulicas o de calefacción, y la orientación del edificio. Además es necesario modelar el contexto con la ubicación y alturas precisas de elementos como: edificios colindantes, árboles, estructuras urbanas como letreros o postes de alumbrado público o telefonía, y la topografía del sitio, es decir, hay que modelar el terreno con sus niveles topográficos y la presencia de cerros o montañas que pudieran provocar sombras sobre el edificio.

- Análisis de sombras durante los solsticios y equinoccios del año en diferentes horas del día (se utilizó el software Vector Works 12.5) de acuerdo al sitio, al proyecto y a las características geográficas de Erlangen. Se recomienda realizar el análisis de sombras considerando la posición del sol al amanecer, al medio día y durante la puesta.

- Realización de propuestas para integrar módulos fotovoltaicos en el edificio. Las diferentes propuestas que se realizaron para este caso de estudio tomaron en cuenta la posición óptima de los paneles para recibir la mayor radiación solar posible, diferentes tipos de células fotovoltaicas y su disponibilidad en el mercado alemán,

<sup>2</sup> De acuerdo a la entrevista realizada al director del Centro: Dr. Richard Auer (Erlangen, Junio, 2010).

restricciones de espacio en la azotea y en las fachadas (ventanas, volúmenes). También se consideró el objetivo del ZAE de hacer visibles los paneles fotovoltaicos a sus visitantes. Finalmente, es decisión del cliente y del diseñador elegir una propuesta que ofrezca la mejor relación de producción de electricidad-costo-ahorro energético-ahorro de CO<sub>2</sub>. Cabe aclarar que el costo no se consideró para la realización del proyecto presentado aquí.

- Cálculo de la producción eléctrica de acuerdo al tipo de células fotovoltaicas, su orientación y a la superficie disponible<sup>3</sup> en azotea y en fachadas.

- Recomendaciones de ubicación y dimensionamiento de los módulos fotovoltaicos de acuerdo a las simulaciones realizadas.

Erlangen se ubica en la latitud 49°N, longitud 11°E, a una altitud de 293 msnm, y tiene una radiación solar promedio anual de 1,051 kWh/m<sup>2</sup>. Para las simulaciones de módulos fotovoltaicos se consideró un Azimut de 45° hacia el Sureste.

La revisión de los planos arquitectónicos del proyecto permitió determinar las superficies en techos y fachadas con mayor incidencia solar durante las diferentes épocas del año. Es así que se pudieron descartar algunas zonas de los techos que tienen sombras ocasionadas por un volumen del mismo edificio y otra sección de un techo con sombras ocasionadas por el edificio de cinco pisos colindante (Fig. 2). En fachadas se consideraron las orientadas hacia el Este, Sureste, Sur, Suroeste y Oeste. También existieron restricciones al respecto.

Existen algunas restricciones del sitio que se tomaron en cuenta para este proyecto. En primer lugar se realizó un análisis de las sombras que generan sobre el edificio propuesto los siguientes elementos: la existencia de árboles de aproximadamente 20 metros de altura dentro del terreno y también la presencia de un bosque que es considerado reserva natural y se encuentra protegido, por lo tanto no se podía quitar ningún árbol. El bosque se encuentra en el lado Suroeste del terreno. Además, hay un edificio de 5 pisos ubicado muy cerca de los límites del terreno dispuesto para el edificio de ZAE (figs. 1, 2 y 3). Se realizó un levantamiento arquitectónico para

encontrar la ubicación exacta de los árboles y hacer la simulación de sombras más precisa.



**Figura 1:** Vista Suroeste del sitio. Fuente: Elaboración Propia.  
**Figure 1:** Southwest view of the site. Source: Own Elaboration



**Figura 2:** Vista Norte del sitio. Fuente: Elaboración Propia.  
**Figure 2:** North view of the site. Source: Own Elaboration.



**Figura 3:** Vista Sureste del sitio. Fuente: Elaboración Propia.  
**Figure 3:** Southeast view of the site. Source: Own Elaboration.

#### 4. Descripción del edificio

El caso de estudio analizado está formado por dos edificios de dos pisos y un nivel subterráneo dispuestos en forma de "L" con dos

<sup>3</sup> La superficie disponible para sistemas fotovoltaicos se refiere a la superficie del edificio libre de instalaciones (agua, calefacción, etc.), libre de sombras provocadas por elementos del mismo edificio o del contexto natural o construido, de ventanas y puertas

techos inclinados hacia el Sureste (Fig. 4). Los edificios cercanos se muestran en color naranja, y los árboles son en número, ubicación y altura, los existentes en los alrededores del terreno. Es importante mencionar que los diseñadores trataron de utilizar de manera eficiente el terreno considerando su forma irregular y el programa arquitectónico solicitado por el ZAE. Sin embargo, no consideraron diseñar el edificio tomando en cuenta la mejor orientación para la integración de módulos fotovoltaicos, la cual en este caso es la orientación Sur. El programa arquitectónico del proyecto incluye: estacionamiento subterráneo, oficinas, laboratorios, sala de juntas, cocineta y bodega.

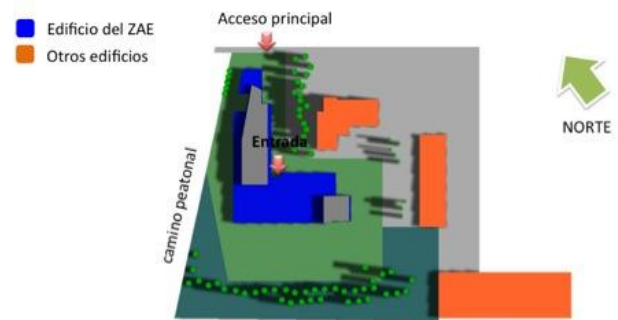
## 5. Resultados

El análisis del sitio realizado en el caso de estudio permitió determinar las obstrucciones más importantes que podrían influir en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos al producir sombras sobre ellos. Esas obstrucciones son principalmente los árboles más cercanos al edificio del ZAE y los dos edificios de la universidad (uno de cinco niveles y el otro de 2). El estudio de sombras permitió conocer el grado de influencia de cada obstrucción de acuerdo a su orientación, además de considerar que también el mismo edificio puede provocar sombras sobre sí mismo (Fig. 5).

El modelo en 3D del proyecto del edificio y su contexto sirvió para hacer las simulaciones de las sombras generadas sobre el edificio del ZAE, durante los solsticios y equinoccios del año. Abajo se muestran los resultados obtenidos a las 13 horas. Se hace evidente que las sombras más grandes proyectadas sobre el edificio corresponden al solsticio de invierno y al equinoccio de primavera, es decir, durante el invierno en Alemania. En esa época del año los días son más cortos y la trayectoria de la radiación es más horizontal que en verano; es por ello que se producen grandes sombras sobre las fachadas SE y SO del edificio en cuestión (Fig. 6). Ocurre lo contrario durante el verano, cuando el sol se encuentra en su posición más alta respecto a la superficie de la Tierra, causando pocas sombras sobre el edificio (Fig. 7). Por lo tanto, la inclinación de los paneles fotovoltaicos suele ser grande para aprovechar al máximo la escasa radiación invernal, logrando que los rayos incidan sobre los paneles. Se espera que durante el

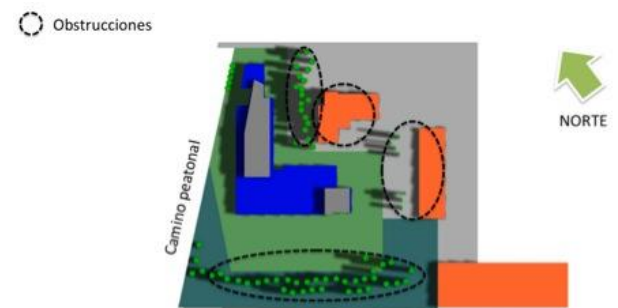
invierno el consumo eléctrico se eleve por el mayor uso de la iluminación artificial debido a que los días son cortos. Sin embargo, hay que considerar que los módulos fotovoltaicos posiblemente no produzcan el máximo de la electricidad posible ya que dependen directamente de la disponibilidad de radiación solar y en invierno los días son frecuentemente nublados.

Para explicar el efecto que tienen las obstrucciones en la producción de sombras se ha realizado una comparación para obtener el porcentaje de superficies con sombras cuando hay obstrucciones y el porcentaje de superficies con sombras cuando no hay obstrucciones. Este ejercicio se ha simulado para el 21 de Diciembre a las 13 horas, cuando los rayos solares se encuentran en su posición más horizontal ocasionando sombras sobre el edificio (Tabla 1).



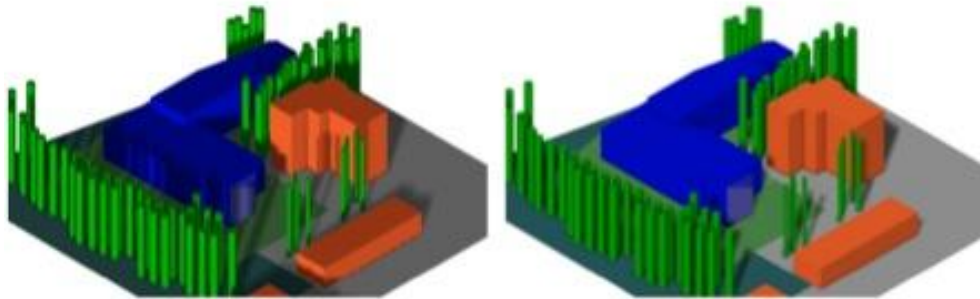
**Figura 4:** Planta de conjunto del proyecto propuesto para el ZAE. Fuente: Elaboración Propia

**Figure 4:** Site plan of the project designed for ZAE. Source: Own Elaboration

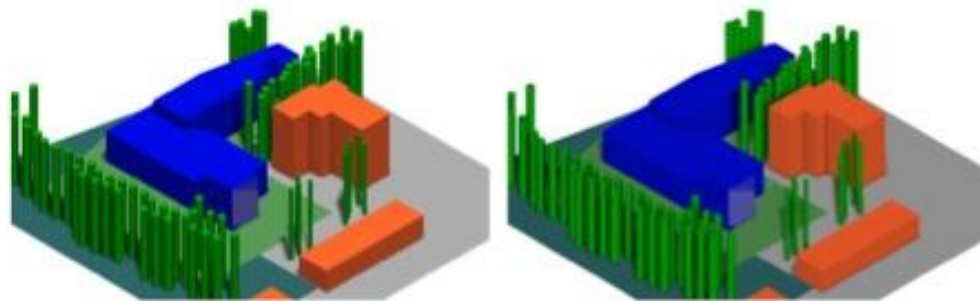


**Figura 5:** Principales obstrucciones solares para los módulos fotovoltaicos. Fuente: Elaboración Propia

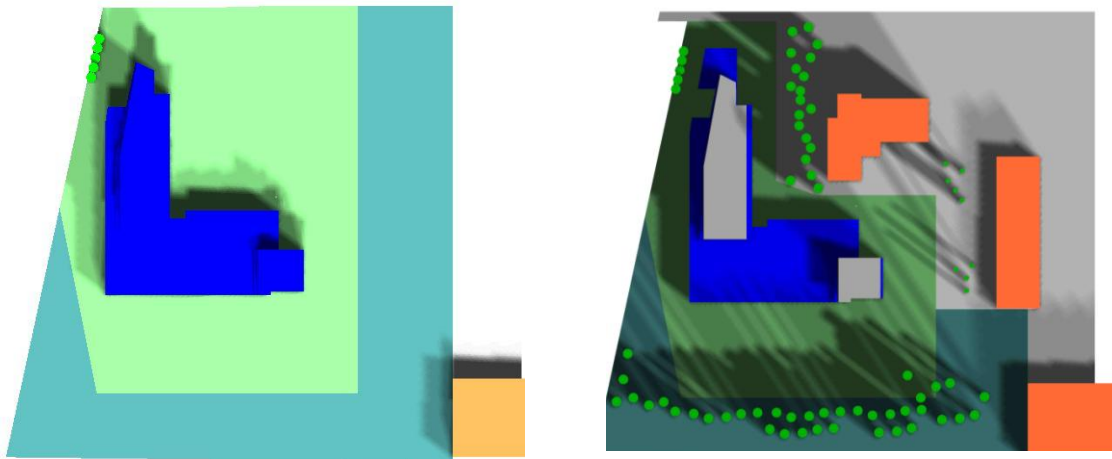
**Figure 5:** Main solar obstructions for PV modules. Source: Own Elaboration



**Figura 6:** Proyección de sombras el 21 de Diciembre (izq.) y 21 de Marzo (derecha) a las 13 hrs. Fuente: Elaboración Propia  
**Figure 6:** Shadow projection on the 21st of December (left) and 21st of March (right) at 13 hrs. Source: Own Elaboration



**Figura 7:** Proyección de sombras el 21 de Junio (izq.) y 21 de Septiembre (derecha) a las 13 hrs. Fuente: Elaboración Propia  
**Figure 7:** Shadow projection on the 21st of June (left) and 21st of September (right) at 13 hrs. Source: Own Elaboration



**Figura 8:** Proyección de sombras sin obstáculos (izq.) y con obstáculos (derecha), 21 de Diciembre a las 13 hrs. Fuente: Elaboración Propia  
**Figure 8:** Shadow projection without obstacles (left) and with obstacles (right), 21st of December at 13 hrs. Source: Own Elaboration

Es evidente que el efecto que tiene el entorno en la producción de sombras y por lo tanto, en la incidencia solar sobre los módulos fotovoltaicos es muy importante. En el peor escenario simulado para este caso de estudio, durante el invierno alemán, las superficies de las fachadas llegan a sombreadarse hasta en un

90%, y las cubiertas hasta en un 40%. Hay que considerar que en las simulaciones realizadas sin obstáculos, el mismo edificio también proyecta sombras sobre algunas zonas de las fachadas y de las cubiertas (Fig. 8). Debido a que es casi imposible disponer de un sitio sin obstrucciones es trascendental realizar un análisis de sombras



**Tabla 1.** Porcentaje de superficies sombreadas con y sin obstáculos, 21 de diciembre 13 hrs. Fuente: Own Elaboration  
**Table 1:** Percentage of shaded surfaces with and without obstacles, December 21, 13 hrs. Source: Own Elaboration

Tipo de Superficie	% superficie sombreada con obstrucciones	% superficie sombreada sin obstrucciones
Fachada SO	90%	0%
Fachada SE	80%	19%
Cubiertas Planas	42%	6%

para evitar la colocación de paneles fotovoltaicos en las superficies donde hay menor incidencia solar. Al entender esa relación con el entorno se podrán tomar decisiones durante la etapa de diseño en el caso de un edificio nuevo, y para especificar la ubicación de los módulos fotovoltaicos, tanto en un edificio nuevo como en uno existente.

De acuerdo a la proyección de sombras y a los objetivos planteados inicialmente, se realizaron las siguientes recomendaciones de diseño:

- *Incluir módulos fotovoltaicos integrados en las fachadas SE y SO.*

Hay que considerar que los módulos colocados en fachadas tienen una menor producción de energía que los módulos colocados en techos, ya que los rayos solares tienen un ángulo de incidencia más restringido. Sin embargo, la ventaja de su colocación en fachadas es que se lograría el objetivo de tener a la vista esta tecnología, además de que existen paneles fotovoltaicos traslúcidos que pueden servir para el control de la iluminación dentro del edificio.

- *Incluir módulos fotovoltaicos integrados en los techos inclinados orientados hacia el SE.*

En este caso se aprovecharía la inclinación existente de los techos para integrar los módulos. Esos techos tienen una buena orientación y por la altura a la que se encuentran no reciben sombras provocadas por el entorno en ninguna época del año. Los módulos podrían ser vistos desde el exterior del edificio, contribuyendo a cumplir uno de los objetivos de este proyecto: ser un "muestreo" de tecnología solar fotovoltaica. Si se está diseñando un edificio con techos inclinados sería conveniente desde la etapa de diseño orientarlos hacia el Sur o Sureste (para el hemisferio norte) y darles la inclinación óptima según la latitud del sitio para lograr una integración de módulos fotovoltaicos y evitar la

colocación de estructuras de soporte que nos ayuden a lograr esa orientación e inclinación óptimas. Así se ahorraría material y se lograría un efecto estético mucho más placentero. En el caso de estudio aquí presentado el proyecto arquitectónico ya estaba terminado y autorizado cuando se decidió integrarle los módulos fotovoltaicos, así que no se le podían hacer cambios. Afortunadamente el proyecto tenía dos techos orientados hacia el SE e inclinados 30° (esta inclinación de módulos fotovoltaicos es la recomendada para Erlangen como se explica más adelante).

- *Colocar módulos fotovoltaicos sobre los techos planos.*

Aquí hay que considerar algunas restricciones como: superficies sombreadas y el espacio que hay que dejar entre una fila de módulos y otra para que no se hagan sombra entre sí (ver fig. 13), esto reduce el número de módulos que pueden colocarse. Si se utilizaran módulos realizados con silicio amorfo se eliminaría la posibilidad de tener sombras generadas por los módulos y por las estructuras de soporte, como sería en el caso de emplear módulos de silicio mono y policristalino. En este caso la instalación fotovoltaica no sería fácilmente visible desde el exterior del edificio.

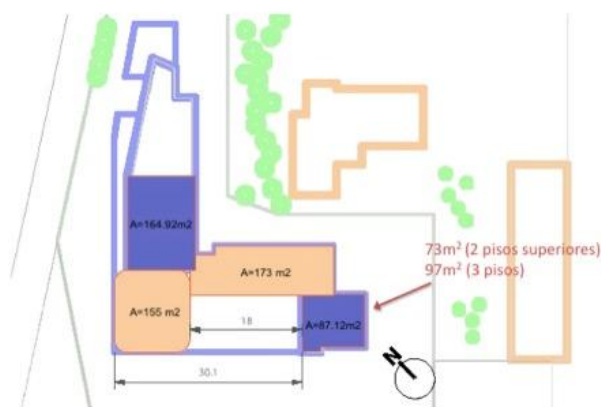
En total se lograría tener una superficie con módulos fotovoltaicos de 653 m<sup>2</sup> (Fig. 9). Según la Agencia Internacional de Energía (IEA) para la latitud de Erlangen el ángulo de inclinación de células fotovoltaicas recomendado para una pérdida de producción solar del 10% es de 30°. Para fachadas la mejor producción que podría obtenerse es de un 65% con un azimut de 0°, es decir, con una orientación Sur (IEA, 2002).

De acuerdo con las recomendaciones anteriores y el análisis de las sombras se plantean cuatro opciones de diseño.

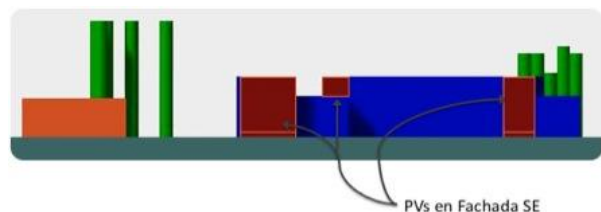
### Opción 1

Inclinar los techos más altos 30° hacia el SE. Colocar módulos fotovoltaicos flexibles (de silicio amorfo) en el techo, lo cual daría 250m<sup>2</sup> de fotovoltaicas. Esto considerando sólo el 50% del techo más grande ya que la otra mitad tiene obstrucciones solares considerables ocasionadas por los árboles y por el edificio de 5 pisos, por lo tanto se recomienda no colocar sistemas fotovoltaicos en él. También se pueden colocar células fotovoltaicas en la parte superior de la fachada SE en la zona de oficinas, con un área de

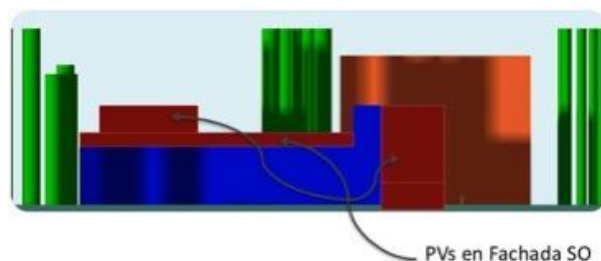
53m<sup>2</sup>; además 158 m<sup>2</sup> de fotovoltaicas en la fachada SO, y 73m<sup>2</sup> en la fachada SE donde se encuentra el elevador (figs. 10 y 11). En total se obtendrían 534m<sup>2</sup> de área con módulos fotovoltaicos (PV por sus siglas en inglés).



**Figura 9:** Superficie máxima donde se podrían ubicar los módulos fotovoltaicos. Fuente: Elaboración Propia  
**Figure 9:** Maximum area available for PV modules. Source: Own Elaboration



**Figura 10:** Colocación de PV en fachadas SE con menos obstrucción solar. Fuente: Elaboración Propia  
**Figure 10:** PV modules on SE facades with less solar obstruction. Source: Own Elaboration

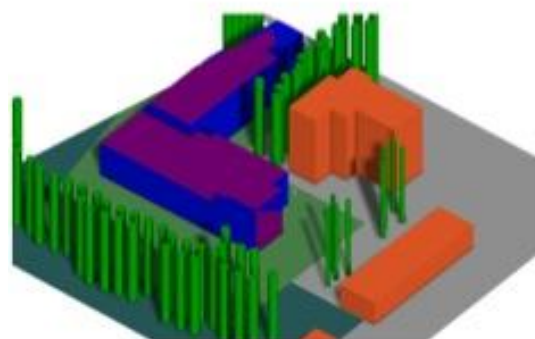


**Figura 11:** Colocación de PV en las fachadas SO donde hay menos obstrucción solar. Fuente: Elaboración Propia  
**Figure 11:** PV modules on SW facades with less solar obstruction. Source: Own Elaboration

### Opción 2

Utilizar módulos de silicio amorfo en los techos más altos y también en los techos planos para captar luz difusa. Total de PV área: 894m<sup>2</sup>,

es decir, 413 módulos con una producción de 59 kWp (superficie de color morado en la fig. 12).



**Figura 12:** Modelo de PV amorfo en techos y fachada del edificio. Fuente: Elaboración Propia  
**Figure 12:** Amorphous PV on roofs and facade. Source: Own Elaboration

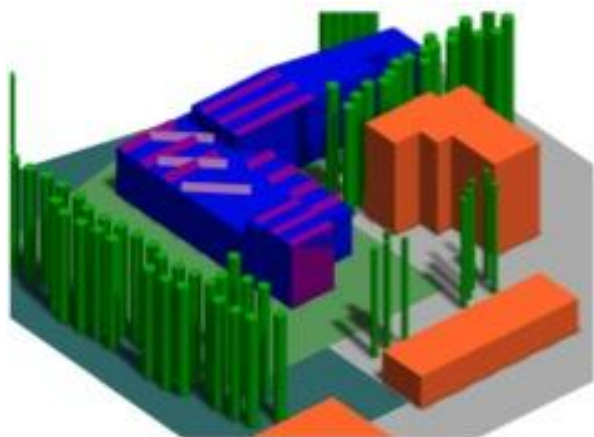
### Opción 3

Combinación de la integración de PV en techos inclinados (156 módulos) y PV en techo plano (50 módulos de 1.60x1.0m de células policristalinas). Todos orientados al SE, o algunos hacia el S (color rosa claro).

### Opción 4

Todos son PV monocristalinos colocados sobre techos inclinados y planos. 126 módulos de 1.213 x 0.547 m, con una separación entre filas de 2.8m para evitar sombras entre módulos. El ángulo de inclinación es de 30°. También pueden colocarse 50 módulos de 1.602 x 1.050 m con una separación entre filas de 3.7m y un ángulo de inclinación de 30°. El tamaño de los módulos depende del fabricante (Fig. 13).

Las cuatro opciones propuestas representan soluciones con ciertas ventajas y desventajas. Al utilizar módulos flexibles de silicio amorfo se tiene la ventaja de aprovechar tanto la luz solar directa como la indirecta, presente en un día nublado por ejemplo. Estas células se forman en láminas muy delgadas y flexibles que pueden adherirse a un soporte de plástico; son fáciles de colocar y de menor coste que los otros tipos de módulos fotovoltaicos. Los módulos de capa fina o silicio amorfo cuestan un 45% menos que las de silicio policristalino, y los monocristalinos cuestan un 15% menos que los policristalinos (Technosun, 2012). Sin embargo, la eficiencia de las células de silicio amorfo al producir electricidad es menor que la de células mono y policristalinas como se explicó en la sección de Antecedentes de la



**Figura 13:** Modelo con PV de tipo monocristalino sobre los techos con menor obstrucción solar. Fuente: Elaboración Propia

**Figure 13:** Monocrystalline PV modules on roofs with less solar obstruction. Source: Own Elaboration

tecnología solar fotovoltaica, y su vida útil también es menor. Otra desventaja es que los módulos flexibles colocados horizontalmente sobre los techos planos no se verían desde el exterior del edificio, lo cual no cumpliría con uno de los objetivos de diseño de este proyecto.

Los módulos fabricados con células monocristalinos nos ofrecen un mayor rendimiento (15-18%) (Perales, 2009) y menor precio que las otras opciones de módulos. Son los más utilizados en general. Son módulos más pesados que los de silicio amorfo ya que van montados sobre una estructura de aluminio o acero, por lo tanto hay que asegurarse que la estructura del techo sea diseñada para soportar ese peso extra. Otras ventajas de estos módulos es que podrían verse desde el exterior del edificio, y que pueden colocarse con la mejor orientación e inclinación posibles de acuerdo a la latitud del sitio y al entorno. Estas ventajas también aplican para los módulos de células policristalinas. Para tener la posibilidad de escoger el tipo de módulo fotovoltaico a instalar lo más recomendable es

solicitar distintas cotizaciones a empresas proveedoras de sistemas fotovoltaicos en el lugar donde se van a instalar, ya que la oferta de tipos de módulos y precios puede variar de un país a otro, o de una ciudad a otra.

Con el programa Polysun Photovoltaic Simulation v.5.3 (Vela Solaris, 2012) fue posible calcular la producción de energía de 10 módulos fotovoltaicos de distintos tipos (monocristalino, policristalino y amorfo), distintos fabricantes, orientaciones y ángulo de inclinación, para la latitud de Erlangen. Además se calculó el ahorro anual de emisiones de CO<sub>2</sub> alcanzado al utilizar energía solar fotovoltaica (Tablas 2-4). Este último es un tema importante ya que podría justificar la inversión a realizar para la instalación de un sistema fotovoltaico en un edificio. El cambio climático ocasionado principalmente por la presencia de gases de efecto invernadero, como el CO<sub>2</sub>, podría ser mitigado entre otras soluciones, a través de la generación de energía con fuentes renovables como el sol, el viento, el agua, etc. El impacto positivo del uso de la energía renovable sería mayor si se generara energía con renovables no sólo en las grandes plantas generadoras de energía, o en los edificios públicos, sino también en los edificios residenciales como viviendas unifamiliares y multifamiliares, y en edificios de gran consumo energético como gimnasios, escuelas y centros comerciales.

Es por ello que al diseñar un sistema de energía solar fotovoltaica se debe calcular la producción de energía que se generará para un sitio en específico, bajo las restricciones del entorno, arquitectónicas y económicas; así como calcular el ahorro de CO<sub>2</sub> que esa generación de energía con fuentes renovables evitará emitir al planeta.

Las Tablas 2, 3 y 4 muestran los resultados obtenidos en las simulaciones. Se puede observar que se produce una mayor cantidad de energía al

**Tabla 2:** Módulos de PV colocados en techos. Fuente: Elaboración Propia  
**Table 2:** PV modules placed on roofs. Source: Own Elaboration

Tipo de Módulo	Orientación y Ángulos de Inclinación	m <sup>2</sup> (10 módulos)	Producción Anual de Energía AC (kWh)	Ahorro de CO <sub>2</sub> por año (kg)	Energía Nominal Total (ZAE)
a-Si (Evalon Solar 6.0)	0° 3°	22	1,160	622	413 módulos = 53 kW
Monocristalino (S330-PM-2)	45° (SE) 30°	27	2,860	1,535	176 módulos = 58 kW
Policristalino (S-340-K)	45° (SE) 30°	27	2,960	1,590	200 módulos = 68 kW

colocar fotovoltaicas en techos en lugar de utilizar las fachadas. Se obtuvo una mayor cantidad anual de energía al utilizar módulos de células policristalinas orientados hacia el SE (45°) y con un ángulo de inclinación de 30° (Tabla 2). El tamaño de módulos Policristalino S-340-K nos permitiría integrar en el edificio de ZAE unos 200

módulos generando aproximadamente 59,200 kWh de energía al año. Al generar esa cantidad de energía se ahorrarían 31,790 Kg de CO<sub>2</sub> al año, o el equivalente a la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido por 21 coches al recorrer cada uno 10,000 Km (el uso aproximado de un año) (SunEarthTools, 2012).

**Tabla 3:** Módulos de PV colocados en fachadas (90° de inclinación). Fuente: Elaboración Propia  
**Table 3:** PV modules placed on facades (90 ° inclination). Source: Own Elaboration

Tipo de módulo	Orientación & ángulo de inclinación	m <sup>2</sup> (10 módulos)	Producción Anual de energía AC (kWh)	Ahorro de CO2 por año (Kg)	Energía nominal total (ZAE)
a-Si (Unisol PV10S single)	-45° (SW) 90°	8	222	119	405 módulos = 12.1 kW
	45° (SE) 90°		211	113	
Monocristalino (SR-90)	-45° (SW) 90°	9	592	317	360 módulos = 32.4 kW
	45° (SE) 90°		562	301	
Monocristalino (S330-PM2)	-45° (SW) 90°	27	2,154	1,155	120 módulos = 39.6 kW
	45° (SE) 90°		2,044	1,096	

**Tabla 4:** Módulos de PV policristalino colocados en fachadas (90° de inclinación). Fuente: Elaboración Propia  
**Table 4:** Polycrystalline PV modules placed on facades (90 ° inclination). Source: Own Elaboration

Tipo de módulo	Orientación & ángulo de inclinación	M <sup>2</sup> (10 módulos)	Producción Anual de energía AC (kWh)	Ahorro de CO2 por año (Kg)	Energía nominal total (ZAE)
Policristalino (S 340-K, total nominal power = 3.4kW)	-45° (SW) 90°	27	2,212	1,186	120 módulos = 40.8 kW
	45° (SE) 90°		2,099	1,126	
Policristalino (total nominal power = 1.8kW)	-45° (SW) 90°	14	1,150	617	231 módulos = 21.6 kW
	45° (SE) 90°		1,097	588	

## Conclusiones

Es posible integrar tecnología solar fotovoltaica en un proyecto arquitectónico con un grado alto de certeza sobre la eficiencia de los módulos. Para realizar un cálculo preciso es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- El sitio: latitud, radiación solar anual, tipo de cielo predominante.
- El terreno y su entorno: orientación del

terreno, obstrucciones solares como edificios colindantes, cerros o montañas, árboles, carteles publicitarios urbanos, postes e infraestructura urbana.

- El proyecto arquitectónico: si es un edificio existente hay que tomar en cuenta las posibles sombras provocadas por los volúmenes del mismo edificio, así como determinar la superficie disponible, ya sea en techos o fachadas libres de obstrucciones, para colocar módulos fotovoltaicos. Si es un proyecto en desarrollo entonces se debe diseñar tomando en cuenta los requerimientos para la integración de

fotovoltaicos: superficies libres de obstrucciones, una orientación óptima, inclinación óptima de los techos o fachadas para la integración de módulos, la utilización de un sistema constructivo capaz de soportar el peso de la instalación fotovoltaica. Normalmente este tipo de edificios cuya prioridad es integrar sistemas de energía renovable y sistemas de acondicionamiento pasivo, tienen una morfología distinta a un edificio común. Esta característica se puede utilizar positivamente al diseñar y construir un edificio distinto, “verde” o de bajo impacto ambiental.

- El presupuesto disponible para instalar sistemas de energía renovable: hay que tomar en cuenta que el costo de los sistemas solares fotovoltaicos han disminuido en un 50% durante los últimos cinco años (BSW-Solar, 2011). Se recomienda obtener cotizaciones con empresas locales y analizar los incentivos económicos o fiscales, y programas de financiación que cada país ha dispuesto para así calcular el tiempo de amortización de la inversión inicial.

- Tecnología fotovoltaica disponible: costos, expresión formal o estética de los módulos fotovoltaicos, vida útil, eficiencia energética y por consiguiente el ahorro en la emisión de CO<sub>2</sub>.

- La función del edificio, objetivos de diseño, tipo de ocupación y consumo energético del edificio. Idealmente es recomendable hacer una predicción del consumo energético del edificio para definir el porcentaje de energía que se generará con sistemas fotovoltaicos, o para considerar la posibilidad de instalar un sistema híbrido para generación de energía con distintos sistemas y fuentes de energía. Así se podría establecer el ahorro económico que significaría a mediano y largo plazo la instalación de PV, el tiempo de recuperación de la inversión y el coste ambiental.

- La posibilidad o necesidad de que el edificio funcione de manera independiente de las redes públicas eléctricas: depende principalmente de la ubicación del edificio, si el edificio está en una zona rural sin conexión a la red pública de electricidad sería necesario satisfacer el 100% del requerimiento energético del edificio. Esta opción es común en zonas rurales de países en desarrollo, ya que es más barato realizar una instalación fotovoltaica que llevar una extensión de la línea de la red pública. Es especialmente útil para satisfacer las necesidades eléctricas de viviendas con un bajo consumo de electricidad, para bombas de agua, para alumbrado público, teléfonos públicos o para algunos servicios de

salud rurales. Sin embargo, cuando el edificio se encuentra en una zona urbana y es de alto consumo energético se tienen dos opciones: satisfacer un porcentaje del consumo eléctrico total con un sistema fotovoltaico reduciendo el costo de la energía que consumimos, o generar electricidad con módulos fotovoltaicos y venderla a la red pública. Esta última opción sólo está disponible en algunos países desarrollados.

- En este ejercicio a pesar de las restricciones del proyecto si fue posible recomendar la integración de módulos fotovoltaicos al mismo. Sin embargo, hay que considerar que los árboles y edificios cercanos provocarán sombras sobre los módulos en invierno y especialmente durante la tarde. Los módulos de células de capa fina (*thin film*) colocados sobre el techo con una inclinación de 0° no serán visibles desde el exterior del edificio. Los módulos fotovoltaicos colocados sobre los techos, planos o inclinados, flexibles y en las fachadas, pueden ser instalados para lograr que el edificio sea un “muestrario” de módulos y células fotovoltaicas.

- Los PV integrados en las fachadas (90° de inclinación) producen sólo el 60% de la producción de los módulos colocados en techos. En general, los sistemas de PV trabajan mejor cuando están orientados hacia el SO que al SE (sin considerar las sombras provocadas por otros edificios y árboles). Los módulos de a-Si (Silicio amorfo) con color pueden ser utilizados para mejorar la estética del edificio. La generación de energía depende en gran medida del tamaño y eficiencia del módulo fotovoltaico y tipo de fabricación. Actualmente hay muchas empresas que fabrican y distribuyen PV con precios muy variados. De acuerdo a la simulación presentada en este artículo, los módulos Policristalinos tienden a producir más electricidad que los monocristalinos y que los de Silicio amorfo. Es importante mencionar que en este proyecto no fue posible obtener los datos de la predicción del consumo energético del edificio para definir qué porcentaje de electricidad se generaría con los sistemas fotovoltaicos.

- Finalmente, la utilización del software especializado para sistemas fotovoltaicos Polysun permite realizar una predicción de tipo cuantitativa sobre el comportamiento de diferentes sistemas con módulos existentes en el mercado internacional, tomando en cuenta la latitud y la radiación solar del sitio, y las distintas opciones de orientación e inclinación de los módulos que el proyecto en cuestión permita. Además, el

programa de cómputo ofrece un cálculo de la cantidad de CO<sub>2</sub> que se puede ahorrar al instalar el sistema fotovoltaico modelado. Esto último además de un pronóstico certero de la cantidad de energía generada con los módulos fotovoltaicos, facilitaría el convencimiento de diseñadores, clientes e inversionistas para que consideren realizar una inversión al integrar sistemas de energía solar fotovoltaica en edificios.

### Agradecimientos

Este trabajo de investigación fue financiado por el PROMEP-SEP (Ministerio de Educación) de Méjico. Se agradece la colaboración del Centro bávaro de Investigación en Energía Solar (ZAE Bayern) de Erlangen para la realización del mismo.

### Referencia Bibliográficas

- Alcor, E. (2008). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Sevilla, España: Progenisa.
- Alt, F. (2009) *El mensaje del siglo. El sol no emitirá ninguna factura*. DETAIL Green. España: Reed Business Information, N° 7, 772-773.
- ALWITRA (2010). *Evalon Solar product*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2010 de <http://www.alwitra.de/index.php?id=Evalon-Solar&L=1>.
- ASIF Asociación de la industria fotovoltaica (2002). *Sistemas de energía fotovoltaica, manual del instalador*. Sevilla, España: Progenisa.
- Behling, S. y Behling, S. (2002). *Sol Power, la evolución de la arquitectura sostenible*. Barcelona, España: Gustavo Gili.
- BIPV: A la Française. *Sun & Wind energy journal*, SE2/2010, 34-36.
- Boyle, G. (Ed) (1996). *Renewable Energy, power for a sustainable future*. Glasgow, Reino Unido: The Open University.
- BSW-SOLAR German Solar Industry Association. (Junio 2011) *Statistic data on the German Solar Power (Photovoltaic) Industry*. Recuperado el 20 de junio de 2012 de [http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/factsheet\\_pv\\_engl.pdf](http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/factsheet_pv_engl.pdf)
- DENA (German Energy Agency), (2010). *Renewables-Made in Germany*. Niestetal, Alemania: Autor.
- EPIA European photovoltaic industry association. (2010). *Photovoltaic Energy, electricity from the sun*. Recuperado el 20 de julio de 2011 de <http://www.epia.org/publications/photovoltaic-publications-global-mrket-outlook.html>
- Gómez, J., (2011, 31 de mayo). Merkel da marcha atrás a su plan nuclear. *El país*. Recuperado el 4 de octubre de 2012 de [http://elpais.com/diario/2011/05/31/internacional/1306792801\\_850215.html](http://elpais.com/diario/2011/05/31/internacional/1306792801_850215.html)
- IEA International energy agency. (2002). *PVPS Potential for Building Integrated Photovoltaics*. Recuperado el 20 de marzo de 2012, de [http://www.iea-pvps.org/index.php?id=9&no\\_cache=1&tx\\_damfrontend\\_pi1\[pointer\]=2](http://www.iea-pvps.org/index.php?id=9&no_cache=1&tx_damfrontend_pi1[pointer]=2)
- Perales, T. (2009) *Guía del instalador de Energías Renovables*. (4ª Ed.). Madrid, España: Creaciones Copyright, S. L.
- Sun earth tools. (2012). Las emisiones de CO<sub>2</sub>. Recuperado el 19 de junio de 2012, de <http://www.sunearthtools.com/dp/tools/CO2-emissions-calculator.php?lang=es#top>
- Technosun. (2012). Lista de precios, productos para instalaciones solares. N° 106. Recuperado el 18 de junio de 2012, de <http://www.technosun.com/es/descargas/lista-precios-solar-fotovoltaica.php>
- VELA SOLARIS. *Polysun Simulation Software v.5.3*. Recuperado el 10 de abril de 2012, de <http://www.velasolaris.com/vs2/index.php>

Recibido: 05|08|2012  
Aceptado: 27|08|2012