



UNIVERSIDAD PÓLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL
Grado en Ingeniería Eléctrica

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Aplicación web para la estimación del coste de una instalación solar conectada a red

Autor: Ionut Cristian Morariu

Tutor: Óscar Perpiñán Lamigueiro
Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Electrónica, Automática y Física aplicada

Madrid, 27 de abril de 2020

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Análisis previo de soluciones	2
1.3. Aspectos técnicos	3
1.3.1. Backend	3
1.3.2. Frontend	3
2. Estado del arte	4
2.1. Situación actual de la generación fotovoltaica	4
2.2. Soluciones existentes y sus carencias	5
3. Parte teórica y desarrollo del código	8
3.1. Obtención de datos del usuario	8
3.1.1. Emplazamiento del usuario	8
3.1.2. Área, inclinación, orientación y nivel de suciedad de la superficie de instalación	10
3.2. Obtención de la irradiación global media en el plano horizontal	10
3.3. Cálculo de las componentes de la irradiación solar	11
3.3.1. Separación de la irradiación global diaria en sus componentes	11
4. Ejemplo práctico de aplicación	13
5. Conclusión	14
Bibliografía	15

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivos

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de una aplicación o página web de fácil acceso para todos los usuarios, con la finalidad de ofrecer una estimación inicial del coste y la posible generación de una instalación fotovoltaica doméstica de conexión a red.

Para poder llevar a cabo esta estimación, el usuario introducirá una serie de datos acerca de su emplazamiento y edificación en la que desea situar la instalación, y la aplicación hará todos los cálculos necesarios para ofrecer una aproximación lo más cercana al resultado final teniendo en cuenta todas las variables que puedan intervenir.

La aplicación también ofrecerá otros datos de posible interés para el usuario como: el número de paneles que se pueden instalar, la potencia de dichos paneles y la potencia del inversor.

La idea de esta aplicación surge de una conversación que tuve con un conocido cuando estaba planificando la construcción de su nueva vivienda, en la cual quería realizar una instalación fotovoltaica para reducir el gasto en la factura de electricidad.

En su búsqueda no encontró ningún servicio que fuera lo suficientemente sencillo de entender para una persona sin ningún tipo de conocimiento previo acerca de la generación fotovoltaica, que le aportase la posibilidad de poder personalizar los cálculos a su emplazamiento y planos de construcción.

Otro de los puntos clave de la aplicación es que sea de código abierto y gratuita para los usuarios, usando fuentes de información disponibles para cualquier interesado. Todos los pasos y operaciones se podrán obtener, analizar y reutilizar de manera gratuita desde un repositorio de Github ¹.

Los objetivos detallados de esta aplicación son los siguientes:

- Diseñar una interfaz de usuario amigable y sencilla de usar para que la pueda utilizar un gran número de personas sin necesidad de conocimientos sobre energía fotovoltaica.

¹*Github.com*: Plataforma online de almacenamiento de código y documentación de fuentes abiertas.

- Obtención de los datos de irradiación en el emplazamiento indicado por el usuario mediante el uso de API² externas.
- Realizar todos los cálculos necesarios para ofrecer una estimación competente de los siguientes datos:
 - Número de paneles que se pueden instalar.
 - Potencia máxima a instalar.
 - Potencia del inversor.
 - Energía eléctrica producida en un año.

1.2. Análisis previo de soluciones

Antes de comenzar el desarrollo del proyecto, dediqué un tiempo a estudiar las soluciones existentes de estimaciones de instalaciones fotovoltaicas existentes en el mercado para decidir si tenía cabida una aplicación como la que se iba a desarrollar.

Algunas de las soluciones encontradas fueron:

1. PVSyst - Photovoltaic Software

El software PVSyst, desarrollado por la empresa suiza con el mismo nombre es quizá el más conocido dentro del ámbito del estudio y la estimación de instalaciones fotovoltaicas. Ofrece una amplia capacidad de personalización de todos los componentes de la instalación.

2. CalculationSolar.com

Es el primer resultado de Google al buscar el término “*calculadora de instalaciones fotovoltaicas*”, por tanto será una de las primeras aplicaciones que una persona que desea realizar una instalación en su vivienda visite.

3. SISIFO

Es una herramienta web diseñada y desarrollada por el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid. Ha sido y es la herramienta interna utilizada por los ingenieros de dicho instituto.

En el apartado 2.2 se lleva a cabo un desarrollo mas detallado de las características de las soluciones mencionadas así como sus diferencias con la propuesta de este proyecto.

²*Application Programming Interface*: conjunto de funciones y procedimientos que ofrece la posibilidad de un software a interactuar con otro.

1.3. Aspectos técnicos

Para construir cualquier página web se deben desarrollar dos sistemas diferentes llamados Backend y Frontend. El Backend es la parte de cálculo y tratamiento de peticiones, comúnmente llamado server o servidor. Por otro lado se encuentra el Frontend que es la parte de cara al usuario, la que se encarga de recoger los datos introducidos por este y enviarlos al servidor.

1.3.1. Backend

Para el Backend se ha empleado una tecnología basada en Javascript llamada NodeJS³, con la ayuda de las librerías ExpressJS⁴ y Mongoose⁵.

La base de datos que se ha utilizado para almacenar los datos necesarios ha sido MongoDB.

En el servidor se realizan varias tareas relacionadas con los cálculos necesarios. Algunas de estas tareas son:

- Obtención de los datos de irradiación global media en el plano horizontal para el emplazamiento indicado
- Proceso completo de cálculo para pasar de la irradiación en el plano horizontal al plano inclinado y orientado según los datos introducidos por el usuario
- Proceso de obtención de los datos relacionados con el perfil horario de temperatura en el emplazamiento indicado
- Gestión de las diferentes rutas que constituyen la API.

1.3.2. Frontend

Para el Frontend de la página se han utilizado las tres tecnologías necesarias para poder desarrollar una página web: HTML5, CSS3, Javascript.

Esta parte de la página es la encargada de recoger los datos del usuario y enviarlos al servidor para que se realicen los cálculos. Una vez realizados dichos cálculos, la página mostrará la información relevante al usuario, junto con algunos gráficos adicionales.

Tanto el backend como el frontend están almacenados en un servidor de Linux remoto activo 24/7.

Todas las tareas mencionadas tanto en la parte de Backend como en la parte de Frontend se describirán en detalle en la sección 3, junto con todos los cálculos en los que se ha basado.

³NodeJS: Entorno de ejecución basado en el motor de Chrome llamado V8. <https://nodejs.org/en/>

⁴ExpressJS: Framework web para el entorno de NodeJS. <https://expressjs.com/es/>

⁵Mongoose: Capa intermedia de interacción para las BBDD MongoDB <https://mongoosejs.com/>

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Situación actual de la generación fotovoltaica

Según el informe anual de la UNEF¹ en 2019[2] la evolución de las energías renovables superó incluso las expectativas mas optimistas alcanzando valores proximos a los 100 GW.

Los aspectos que más han influido en estas cifras han sido, entre otros, la reducción drástica del coste de producción de dichas tecnologías. De hecho, la energía fotovoltaica es ya más barata que la generada por plantas de combustibles fósiles en términos de LCOE². Según menciona Bloomber Energy Finance, la fotovoltaica seguirá reduciendo sus costes un 34 % hasta 2030.

Sumado a la reducción del coste, el aumento de compraventa de energía a largo plazo - que sigue en alza desde 2018, alcanzando los 14 GW - es otro de los factores influyentes en el crecimiento del sector. Así lo es también la reducción del precio de la energía en las subastas, alcanzando valores tan bajos como 20\$/MWh.

Concretamente en Europa, el crecimiento anual de la capacidad solar instalada ha sido de un 23 %, con Alemania como líder sumando otros 2,95 GW respecto a la capacidad del año anterior. En segundo y tercer lugar se encuentran Turquía y los Países Bajos.

Bajando un nivel más, nos encontramos con el mercado español, que, según estimaciones del mismo informe de la UNEF, la potencia total instalada experimentó un crecimiento significativo, llegando hasta el valor de 262 MW, sumando la potencia instalada tanto de generación centralizada como la de autoconsumo.

Para este año 2020 se estima se estima que la instalación de energia fotovoltaica alcance el umbral de los 20 GW. Si se cumplen las expectativas, la capacidad podría llegar a alcanzar los 200 GW para 2023.

¹UNEF: Unión Española fotovoltaica

²LCOE: Levelized Cost of energy: Medición del coste medio de generación de energía de una planta a lo largo de su vida útil

Un papel importante lo juegan las autoridades tanto nacionales como a nivel europeo, que apuestan por las fuentes de energías limpias. Para ser exactos, el año 2018 fue uno de los más relevantes en materia de política energética europea desde que se aprobó el tercer paquete de energía en 2009. De las ocho propuestas que se aprobaron, destaca por su importancia para el sector fotovoltaico la directiva 2018/2001, en la que se recoge el derecho básico al autoconsumo, individual o colectivo, al almacenamiento y sobretodo a la venta de excedentes.

En el panorama español, tras varios años de parálisis debida a la compleja situación política de los últimos años, la energía fotovoltaica volvió a recuperar algo de impulso a final del año 2019. Durante el año 2018 y especialmente el 2019, se han incrementado sustancialmente las instalaciones de fotovoltaica, en gran parte gracias a las expectativas generadas por la eliminación del denominado impuesto al sol y la progresiva suspensión de trabas administrativas todas ellas propiciadas por el nuevo marco legal establecido por la administración pública mediante los Reales Decretos 15/2019 y 244/2019.

Según datos proporcionados por la Red Eléctrica Española ³, la potencia instalada en España ha experimentado un crecimiento de 1,2GW en los últimos 4 años, pasando de 4.6 GW en 2016 a 5.8 GW en 2019.

Se trata del mayor ritmo de crecimiento desde 2008, cuando se instalaron cerca de 2.7 GW de nueva potencia. Es una buena noticia, pero no exenta de dificultades debidas sobre todo a la unidireccionalidad de la red eléctrica de nuestro territorio. Sin ir mas lejos, el operador técnico del sistema, REE ha denegado la instalación de 26,3 GW de nueva potencia debido a la imposibilidad de los nudos para gestionar la energía producida por dicha capacidad.

Esto no significa que dicha energía no se vaya a instalar, sino que habrá que esperar a la nueva planificación energética prevista para el periodo 2021-2026 en la que ya están trabajando tanto la REE como las comunidades autónomas para brindar mas oportunidades para los sistemas de conexión a red.

En definitiva, como podemos observar, las energías renovables, y en especial la fotovoltaica esta dando mucho que hablar y cada vez es una tema más tratado por el público general y por tanto, es un aspecto a tener en cuenta a la hora de construir nuevas edificaciones o mejorar la eficiencia energética de las existentes.

Surge por tanto la necesidad de aplicaciones y soluciones para la estimación de instalaciones fotovoltaicas que sean intuitivas y fáciles de usar para aprovechar el gran interés que está mostrando el público general.

2.2. Soluciones existentes y sus carencias

Como ya se ha mencionado en el apartado 1.2 existen multitud de soluciones para la estimación o simulación de instalaciones fotovoltaicas. Sin embargo, considero que la aplicación descrita en este proyecto sigue teniendo cabida porque ofrece ciertas funciones que, a mi parecer, no existen en las soluciones que se han estudiado.

A continuación se describirán con detalle las soluciones mencionadas anteriormente, junto con sus capacidades y carencias.

³<https://www.ree.es/es/datos/publicaciones/series-estadisticas-nacionales>

1. PVSyst - Photovoltaic Software

El software PVSyst, desarrollado por la empresa suiza con el mismo nombre es quizá el más conocido dentro del ámbito del estudio y la estimación de instalaciones fotovoltaicas. Ofrece una amplia capacidad de personalización de todos los componentes de la instalación.

PVSyst es capaz de calcular con amplio detalle el diseño y dimensionado del sistema, zonas de sombra, envejecimiento del material, almacenamiento de energía, entre otras opciones.

PVSyst se diferencia de la aplicación que se desarrolla en este proyecto en algunos puntos importantes como:

- Es de pago, con una licencia anual de aproximadamente €952 mientras que mi solución es gratuita.
- Es un programa que se debe instalar en un ordenador de Windows (No funciona en Linux u OSX).
- Es poco intuitivo para un usuario con bajos conocimientos de instalaciones fotovoltaicas.

En resumen, PVSyst es un software mucho mas completo y complejo que la solución que yo propongo, y que va enfocada a un público con una base sólida sobre energía fotovoltaica.

2. CalculationSolar.com

Como ya se ha mencionado en la introducción, CalculationSolar.com es el primer resultado que aparece en el motor de búsqueda de Google cuando se introduce el término “*calculadora de instalaciones fotovoltaicas*” y por tanto será una de las primeras opciones que un usuario que está interesado en realizar una instalación fotovoltaica considere.

A diferencia de PVSyst, CalculationSolar.com es una solución en la web y gratuita, por lo que la barrera de acceso es mas baja. Nada mas entrar a la pagina lo primero con lo que nos encontramos es con un formulario sencillo sobre el emplazamiento y la configuración de la instalación. La información que se solicita es sencilla e intuitiva, incluso se ofrece la posibilidad de clicar en un mapa interactivo para determinar las coordenadas.

Lo siguiente es introducir la información acerca de las necesidades de potencia, dado que esta calculadora esta enfocada a las instalaciones de autoconsumo sin conexión a red.

Una vez introducidos estos datos, el programa realiza los cálculos y nos ofrece un resultado bastante detallado del campo fotovoltaico, el regulador de carga, la batería y el inversor que mejor encajaría con nuestro requisitos.

La principal diferencia con la aplicación que yo he desarrollado es requisitos versus limitaciones. Es decir, CalculationSolar.com te permite seleccionar tus requisitos de potencia y te indica el generador que vas a necesita para poder hacer frente a dicha carga. En cambio, mi solución indica la potencia y energía que se puede llegar a generar con las limitaciones arquitectónicas impuestas por el usuario.

3. SISIFO

La solución propuesta por el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid es también un solución web para el calculo de instalaciones solares tanto de bombeo de agua como conectadas a red.

El sistema de input de información del usuario es muy completo. Paso por paso le permite a éste introducir desde los datos geográficos y meteorológicos hasta hasta los valores de

perdidas en los diferentes cableados del sistema. No obstante, los valores por defecto son muy válidos así que incluso un usuario con poco conocimiento sobre energía podría llegar a obtener unos resultados fiables.

Una vez realizada la simulación, la aplicación aporta multitud de resultados detallados tales como Irradiaciones en el plano horizontal e inclinado, temperaturas y energía producida.

Esta aplicación es la más parecida, salvando las distancias, a la que se desarrolla en este proyecto. Sin embargo, considero que puede llegar a abrumar un poco a un usuario que desea solamente conocer cual es la potencia o energía que puede llegar a producir en su casa, para saber si le va a ser rentable la inversión.

Capítulo 3

Parte teórica y desarrollo del código

El proceso de cálculo que se va a seguir para la estimación completa de la instalación fotovoltaica conectada a red es el que se detalla en el libro de Óscar Perpiñán, tutor de este trabajo, denominado Energía Solar Fotovoltaica [1]. También se harán menciones a las presentaciones que se encuentran en el mismo enlace que el libro.

A lo largo de este capítulo, se utilizará el término **aplicación** para referirse a todo el conjunto de código relacionado tanto con proceso de obtención de todos los datos necesario como el de mostrar la información relevante al usuario.

3.1. Obtención de datos del usuario

Como he mencionado anteriormente, el objetivo principal de la aplicación es de realizar todos los cálculos que se necesitan para estimar una instalación fotovoltaica conectada a red, de la manera mas exacta posible, en un emplazamiento concreto elegido por el usuario. Por tanto, el primer paso que tuve que dar con la aplicación fue la de obtener todos los datos necesarios para realizar dichos calculos. Estos datos son:

- Emplazamiento del usuario
- Área, inclinación, orientación y nivel de suciedad de la superficie de instalación

3.1.1. Emplazamiento del usuario

Mas adelante, para poder obtener los datos de irradiación global en el plano horizontal, se necesitan los datos de latitud y longitud del sitio del que se quieren obtener dichos datos. Sin embargo, es poco intuitivo pedirle a un usuario que introduzca sus coordenadas, dado que la mayoría desconocen dichos datos.

Por lo tanto, la ruta que he tomado es la de pedirle al usuario su dirección, o una dirección cercana a su localización, y utilizar la API de Google Maps ¹ para convertir dicha dirección en las

¹API Google Maps: Enlace interactivo al que se le pueden enviar los datos de una dirección y devuelve las coordenadas de latitud y longitud de un emplazamiento.

coordenadas de latitud y longitud que necesito para poder extraer la irradiación que he mencionado antes.

Este proceso comienza por recoger los datos de la dirección, municipio y código postal a través del formulario que aparece en la página web.

Estos datos son recogidos en el código a través de un nombre único que han recibido:

```
1 const addressInput = document.querySelector('#address');
2 const cityInput = document.querySelector('#city');
3 const postalInput = document.querySelector('#postal');
```

Listing 3.1: Variables correspondientes a los tres campos

Una vez que tenemos estos datos recogidos en las variables, podemos pedir a la API de Google Maps las coordenadas de latitud y longitud de dicho emplazamiento encadenando las tres variables y una clave única de identificación, para obtener un enlace único que se corresponde a dicha localización.

```
1 const getCoordinates = async () => {
2   const address = addressInput.value.split(' ').join('+');
3   const city = cityInput.value;
4   const postal = postalInput.value;
5   const requestURL = `${googleEndpoint}address=${address},${city},${postal}
6     ,spain&key=${googleApiKey}`;
7   const response = await fetch(requestURL);
8   const data = await response.json();
9   const info = {
10     formattedAddress: data.results[0].formatted_address,
11     lat: data.results[0].geometry.location.lat,
12     long: data.results[0].geometry.location.lng
13   };
14
15   return info;
16 };
```

Listing 3.2: Función encargada de solicitar los datos a la API

La función de **getCoordinates** (3.2) recoge el valor de la dirección y reemplaza los espacios con el signo + (formato requerido por la API) y lo concatena con el valor del campo de la ciudad y el código postal. Al final le añade una clave única que identifica la aplicación a la hora de establecer límites de uso y evitar abuso de la API.

Una vez creado este enlace único, el código lanza la petición al servicio y retorna con la información que es recogida y se guarda en dos variables **lat** y **long** para ser utilizadas posteriormente, a la hora de obtener los datos de irradiación global.

3.1.2. Área, inclinación, orientación y nivel de suciedad de la superficie de instalación

Además de las información de latitud y longitud del emplazamiento, el cálculo de la instalación también requiere de información relacionada con el área, la inclinación, la orientación y el nivel de suciedad de la superficie donde se va a realizar la instalación, para poder realizar una estimación lo mas exacta posible.

Estos valores son recogidos directamente de los campos de la pagina web, al igual que los campos anteriores, sin necesitar ningún trato especial:

```
1 const slope = document.querySelector('#slope');  
2 const area = document.querySelector('#area');  
3 const orientation = document.querySelector('#orientation');  
4 const dirtLevel = document.querySelector('#dirt-level');
```

Listing 3.3: Variables correspondientes a los campos indicados

3.2. Obtención de la irradiación global media en el plano horizontal

El primer paso del cálculo de una instalación fotovoltaica es el de conocer la irradiación global media en el plano horizontal para el emplazamiento donde se va a realizar el cálculo. En la sección anterior se obtuvieron las coordenadas de latitud y longitud del emplazamiento introducido por el usuario.

En esta sección, se va a obtener la irradiación para las dichas coordenadas utilizando un servicio de ADRASE ², un proyecto realizado por el CIEMAT. Este servicio ofrece de manera gratuita y de uso libre, datos correspondientes a valores medios mensuales de irradiación global en el plano horizontal para toda la geografía española.

Los datos están disponibles a través de un mapa interactivo y de unos enlaces personalizados que incluyen la valores de latitud y longitud para los que se desea obtener dicha información. En esos enlaces se ofrecen los datos de irradiación global mínima, media y máxima en el plano horizontal.

Con el objetivo de no saturar la pagina de ADRASE y evitar error de funcionamiento de la aplicación debidos a la posibilidad de que la página desaparezca en un futuro, se ha realizado una descarga de los datos de la página, con un intervalo de 0.1 tanto en longitud como en latitud y se han guardado en una base de datos. De esta forma también se reducen los tiempos de cálculo en gran medida al tener un acceso casi instantáneo a los valores medios de irradiación. Una explicación detallada de como se ha realizado dicha descarga se incluye en el Anexo. (** TO DO Anexo con explicación **).

²ADRASE: Acceso a Datos de irradiación Solar en España <http://www.adrase.com/>

3.3. Cálculo de las componentes de la irradiación solar

Partiendo de los datos obtenidos en la sección anterior debemos calcular las componentes de irradiación directa y difusa en el plano horizontal y después realizar el paso al plano inclinado. Un esquema resumido del proceso se indica a continuación:

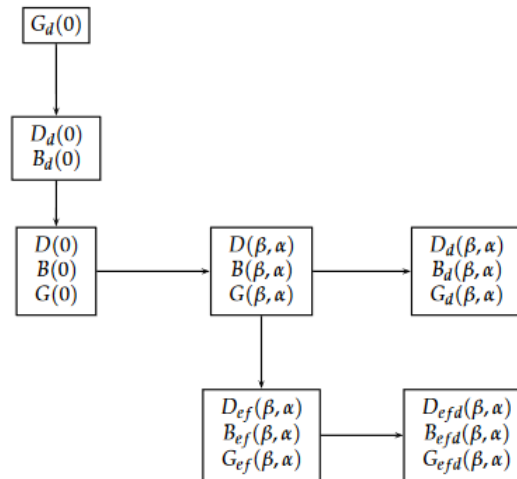


Figura 3.1: Procedimiento de cálculo (Figura 3.3 pág 31 [1])

En la figura 3.1 se muestra el proceso de cálculo que se va a seguir para llegar a los valores necesarios para poder estimar la potencia y energía de la instalación.

Los pasos descritos son:

1. Separar la irradiación global diaria en el plano horizontal en sus componentes de irradiación difusa y directa.
2. Convertir la irradiación diaria a un perfil horario de irradiación global, directa y difusa en plano horizontal.
3. Pasar del perfil horario en el plano horizontal a un perfil con la inclinación y orientación indicada por el usuario.
4. Aplicar las pérdidas relacionadas con el ángulo de incidencia y el nivel de suciedad.
5. Volver a convertir el perfil horario a unos valores diarios de irradiación global, difusa y directa.

3.3.1. Separación de la irradiación global diaria en sus componentes

Como se ha indicado anteriormente, el primer paso del proceso de cálculo es el de separar la irradiación global diaria en el plano horizontal en sus dos componentes, la directa y la difusa.

Al tener solamente un valor de irradiación por cada uno de los meses, utilizaremos el día promedio de cada mes, ya que es posible demostrar que el promedio mensual coincide con el valor diario correspondiente al denominado día promedio.

Estos doce días promedios son:

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
d_n	17	45	74	105	135	161	199	230	261	292	322	347

Cuadro 3.1: Dias promedio

Capítulo 4

Ejemplo práctico de aplicación

Capítulo 5

Conclusión

Bibliografía

- [1] Perpiñán, O. 2018. Energía Solar Fotovoltaica. <http://oscarperpinan.github.io/esf/>.
- [2] Unión Española Fotovoltaica. 2019. Informe anual 2019: El sector fotovoltaico impulsor de la transición energética. https://unef.es/wp-content/uploads/dlm_uploads/2019/09/memoria_unef_2019-web.pdf.