

HERRAMIENTA PARA EL CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS.

C. RUS, F. ALMONACID, L. HONTORIA, P. J. PEREZ Y F. J. MUÑOZ.
*Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática. Escuela Politécnica Superior.
Universidad de Jaén. España
Grupo I+DEA
Campus de las Lagunillas. Edif. A3. Jaén. España. Tel:+34.953.212812.
Correo-e: crus@ujaen.es.*

Este documento pretende presentar una herramienta software de carácter didáctico que hace más sencillo tanto la enseñanza como el aprendizaje del cálculo de la radiación solar sobre superficies inclinadas. Este concepto forma parte de los contenidos de la asignatura optativa, “Instalaciones fotovoltaicas”. Ésta es ofertada por la Universidad de Jaén en el plan de estudios correspondiente a Ingeniero Técnico Industrial en las especialidades de: Mecánica, Electricidad y Electrónica Industrial.

1. Introducción

Hoy en día las políticas medioambientales, de prácticamente todos los países, apuestan por el desarrollo e implementación de tecnologías aplicadas a la puesta en marcha de instalaciones energéticas que usen energías renovables [1].

En la Universidad de Jaén, conscientes del aumento del número de instalaciones que usan energía solar, se pretende fomentar el uso de las fuentes de energías respetuosas con el medio ambiente implicando a la comunidad universitaria en el desarrollo y uso de energías renovables.

La Universidad de Jaén tiene una amplia experiencia en la formación en energía solar fotovoltaica. En concreto la asignatura optativa “Instalaciones fotovoltaicas”, que es ofertada en el plan de Ingeniero Técnico Industrial en las especialidades de: Mecánica, Electricidad y Electrónica Industrial, con una carga lectiva de 6 créditos. La asignatura es impartida por miembros del grupo de investigación IDEA (Investigación y Desarrollo en Energía solar y Automática), siendo una de sus líneas prioritarias la Energía Solar Fotovoltaica. Este grupo ha generado en los últimos años abundante producción científica que se aprovecha por los alumnos matriculados en esta asignatura, trasladando conocimientos y experiencia tanto en instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red como en sistema fotovoltaicos autónomos.

2. Contenidos de la asignatura Instalaciones Fotovoltaicas

Antes de abordar la descripción de la herramienta software, es interesante enumerar los contenidos que se imparten en la asignatura Instalaciones Fotovoltaicas (Fig. 1)

Estos contenidos sirven para conseguir el objetivo final de la asignatura, que es el de establecer las bases tecnológicas y conocer las herramientas y métodos para que el alumno adquiera las competencias necesarias, tanto a nivel cognitivo, procedimental-instrumental así como actitudinal para que quede capacitado en el diseño, cálculo y análisis de instalaciones fotovoltaicas, tanto conectadas a red como autónomas, así como analizar sus distintas aplicaciones [2, 3, 4].

I. INTRODUCCION	Componentes de los sistemas fotovoltaicos. Tipos de sistemas. Aplicaciones. Situación actual del mercado fotovoltaico.	
II. FUNDAMENTOS	célula solar, el módulo y el generador FV	La
III. RADIACIÓN SOLAR	Naturaleza de la radiación solar. Nociones de astronomía. Radiación incidente sobre planos inclinados.	
IV. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED (SFCR)	Estructura y funcionamiento, interconexión de subsistemas, inversores, conexión a red, especificaciones de diseño. Monitorización de Instalaciones. Integración arquitectónica. Aspectos económicos, elaboración de proyectos.	
V. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS (SFVA)	Estructura y funcionamiento, acumuladores, acondicionamiento de potencia. Diseño y dimensionado.	

Figura 1. Temario de la asignatura.

Dentro del contenido del programa de la asignatura cabe resaltar el bloque dedicado a radiación solar. Debido a la propia naturaleza del capítulo, así como por estar ofertada a alumnos con distintas trayectorias curriculares, se ha observado que resulta de difícil comprensión.

Cuando el alumno aborda la última parte de la asignatura en la que se diseña un sistema fotovoltaico [5, 6], tanto sistemas conectados a red o autónomos, debe calcular los valores de funcionamiento del sistema por lo que hay que tener en cuenta algunas cuestiones relacionadas con el tema de radiación solar como:

- a- Determinar la situación óptima de los módulos de un sistema fotovoltaico (orientación e inclinación).
- b- Calcular la captación energética anual cuando el sistema realiza un seguimiento del sol total (orientación e inclinación).
- c- Estudiar de manera comparativa las pérdidas de la captación de los casos en estudio.

Por todo lo de arriba enumerado es necesario conocer la radiación solar global incidente sobre la superficie del generador, así como la inclinación óptima del mismo. En ambos casos se debe medir la irradiación diaria media mensual en el plano horizontal o consultar una base de datos en la que esté

disponible. Con este dato se procede al cálculo siguiendo el esquema que se recoge a continuación (Fig. 2).

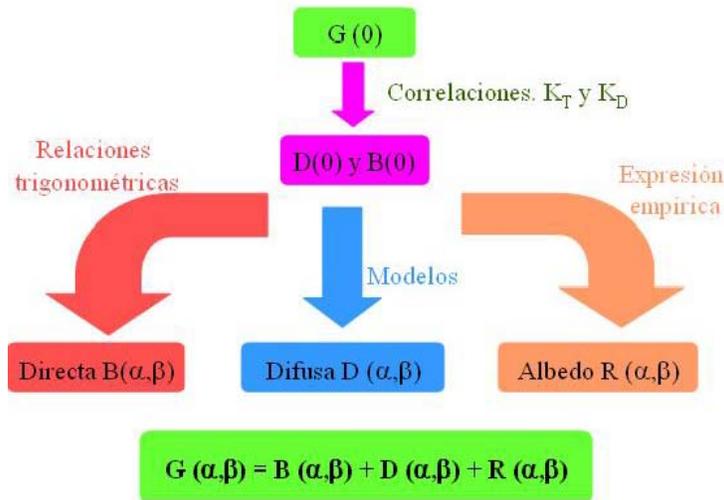


Figura 2. Esquema para el cálculo de la irradiancia sobre superficies inclinadas.

Para obtener la expresión final el alumno debe combinar distintas expresiones matemáticas con el objetivo final de conseguir del sistema que la energía procedente del mismo sea lo máxima posible, con lo que se deben minimizar las pérdidas de captación energética.

Para el cálculo de las pérdidas de captación energética que se producen en los sistemas fotovoltaicos se deben tener en cuenta factores astronómicos, que son aquellos que dependen de la geometría Tierra – Sol. Éstos son función de la posición relativa Sol – Tierra (Fig. 3), de las coordenadas geográficas del lugar considerado y del ángulo de incidencia de los rayos solares. Dependen, por tanto, de la posición y altura del Sol en cada instante, y además factores climáticos, que son aquellos que hacen que la radiación solar no sea la máxima esperable para una zona geográfica determinada en un mes, día y hora concreto. Esto es debido a que los llamados factores climáticos atenúan en muchos casos la misma, por ejemplo: las nubes, la cantidad de vapor de agua, el ozono, los aerosoles, etc. contenidos en la atmósfera y que son los responsables de que esta atenuación se produzca.

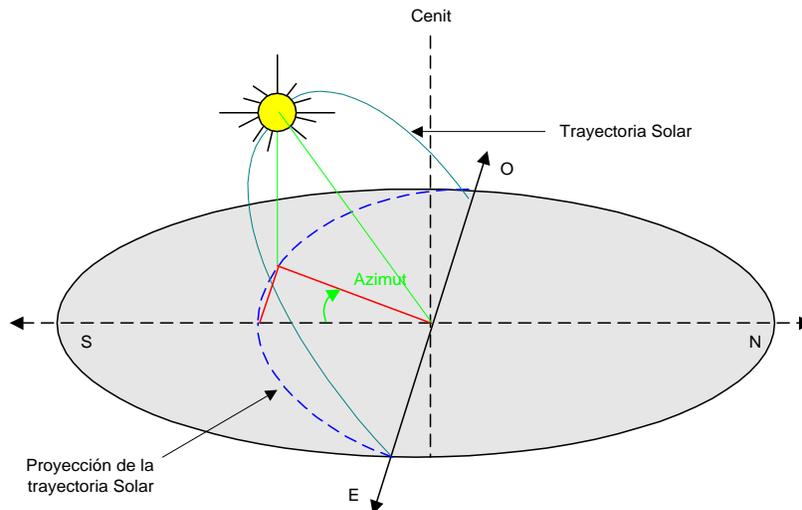


Figura 3. Trayectoria solar.

La dificultad de trabajar con gran cantidad de datos, así como con expresiones matemáticas complejas, han motivado a la realización del software que se presenta en este trabajo, donde se ha obtenido una aplicación que permite realizar un exhaustivo estudio de las pérdidas de captación energética producidas en el sistema fotovoltaico.

Además, también se ha pretendido proporcionar una idea clara de cómo influye la elección de una topología adecuada para la colocación de dichos paneles según el lugar geográfico y la finalidad que pretendamos darle a la instalación (uso anual, estacional o mensual) para que de esta manera se puedan minimizar las pérdidas energéticas producidas.

3. Descripción de la herramienta OrientSol

La herramienta OrientSol ha sido desarrollada en el entorno de programación Visual Basic [7, 8]. Este lenguaje ha sido seleccionado por que permite de manera óptima la realización de cálculos matemáticos, la generación de tablas para la visualización de éstos, además de poseer una amplia gama de posibilidades gráficas en lo que se refiere al dibujo de líneas y formas geométricas.

Una vez instalada la aplicación, al ejecutar el programa, éste presenta el aspecto que se recoge a continuación (Fig. 3). Inicialmente, se debe seleccionar una de las ciudades disponibles en la base de datos, en la que se han introducido los datos de radiación sobre superficie horizontal media mensual de todas las capitales de provincia de España.



Ciudad: Jaén	
Latitud: 37,8°	
Kwh/m²	
Enero:	1,9
Febrero:	2,8
Marzo:	4
Abril:	5
Mayo:	5,6
Junio:	6,8
Julio:	7,4
Agosto:	6,7
Septiembre:	5,3
Octubre:	3,3
Noviembre:	2,3
Diciembre:	1,8

Figura 3. Entorno de OrientSol y tabla de datos de radiación media mensual sobre superficie horizontal.

Estos datos son los que se usan de partida para los cálculos una vez que en el programa se seleccione una opción de inclinación (Fig. 4) para los mismos de entre: óptima anual, óptima estacional, óptima mensual, orientación variable e inclinación óptima, seguimiento total o todos.

El siguiente paso en la puesta en marcha de la aplicación sería pulsar la opción de cálculo de los datos, que pone de manifiesto la principal característica del programa, ya que realiza los cálculos de forma transparente al usuario.

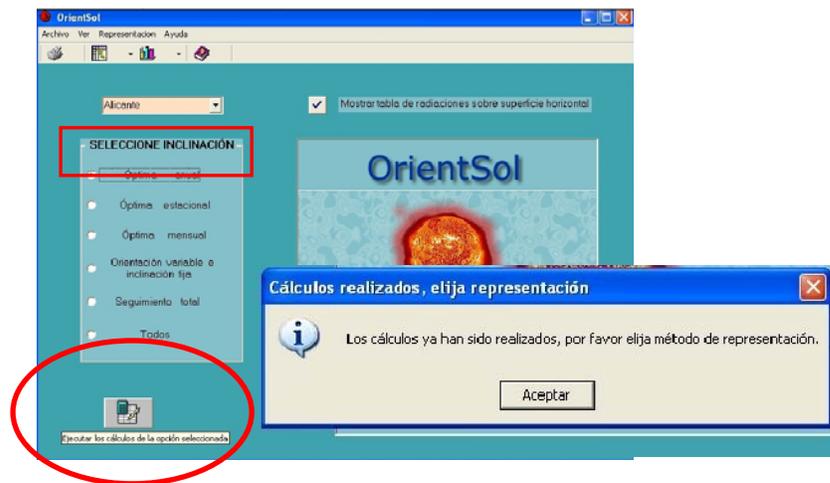


Figura 4. Procedimiento de cálculo de OrientSol .

A continuación el programa ofrece la posibilidad de representar los resultados de los cálculos realizados, en forma de tabla (Fig. 5) o de gráfica (Fig. 6) y una vez seleccionada una de estas opciones, debemos elegir el tipo de radiación cuyos datos van a ser representados (global, directa, difusa o albedo).

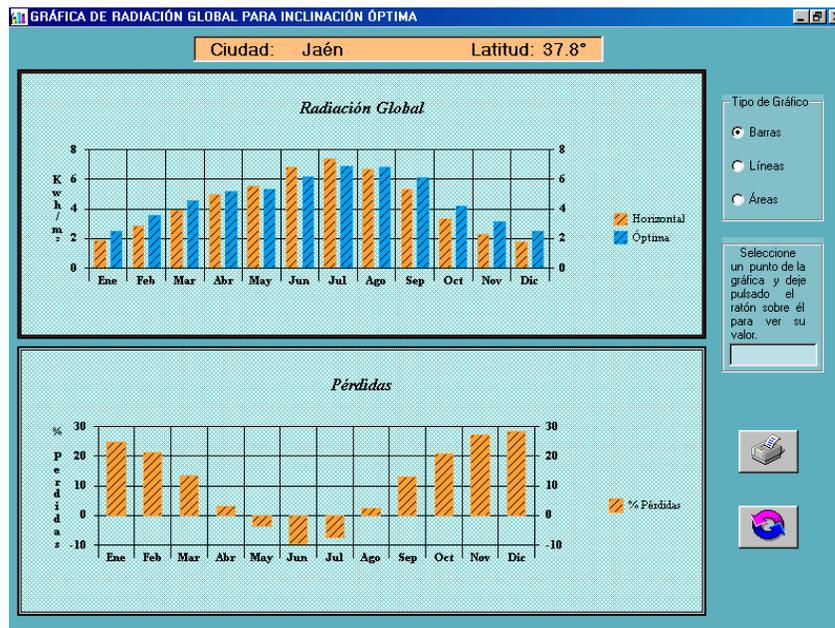


Figura 5. Representación de los datos en forma de gráfica.

En el caso de la representación en tabla, aparecen representadas las radiaciones para cada mes del año, la media anual y para la inclinación óptima anual (en kWh/m²), con inclinaciones que van desde 0° hasta 90° e incrementos de 10°. De este modo se puede ver claramente la variación de las radiaciones para las diferentes inclinaciones, en el caso de tener seleccionada la opción de orientación fija y hacia el sur.

Otro dato que queda reflejado son las pérdidas mensuales y las medias anuales, en kWh/m² y en %, de la posición horizontal respecto a la inclinación óptima anual.

TABLA DE RADIACIÓN GLOBAL PARA UNA INCLINACIÓN ÓPTIMA

Ciudad: Alicante Latitud: 38.4° Inclinac. Óptima

Kwh/m ²	Gdm(0)	Gdm(10)	Gdm(20)	Gdm(30)	Gdm(40)	Gdm(50)	Gdm(60)	Gdm(70)	Gdm(80)	Gdm(90)	Gdm(32°)
Enero:	2,37	2,77	3,15	3,46	3,69	3,82	3,86	3,8	3,65	3,4	3,51
Febrero:	3,33	3,77	4,17	4,48	4,68	4,76	4,73	4,59	4,33	3,97	4,53
Marzo:	4,43	4,79	5,08	5,25	5,31	5,23	5,04	4,72	4,3	3,79	5,28
Abril:	5,18	5,35	5,43	5,39	5,07	4,82	4,47	4,03	3,52	2,94	5,37
Mayo:	6,41	6,36	6,3	6,11	5,54	5,13	4,62	4,01	3,07	2,42	6,05
Junio:	6,91	6,74	6,6	6,32	5,64	5,16	4,56	3,56	2,9	1,88	6,24
Julio:	7,11	7	6,89	6,63	5,97	5,48	4,87	4,16	3,14	2,39	6,56
Agosto:	6,25	6,43	6,49	6,4	5,95	5,61	5,14	4,56	3,89	2,92	6,36
Septiembre:	5,11	5,47	5,74	5,88	5,73	5,6	5,33	4,94	4,44	3,84	5,89
Octubre:	3,82	4,3	4,74	5,06	5,26	5,33	5,27	5,08	4,76	4,33	5,11
Noviembre:	2,66	3,12	3,56	3,91	4,17	4,32	4,37	4,3	4,12	3,84	3,97
Diciembre:	2,1	2,48	2,86	3,16	3,39	3,53	3,59	3,56	3,44	3,23	3,21
MEDIA ANUAL	4,64	4,88	5,08	5,17	5,03	4,9	4,65	4,28	3,8	3,25	5,18

Kwh/m ²	Gdm(0)	Gdm(32°)	Pérdidas	% Pérdidas
Enero:	2,37	3,51	1,14	32,48
Febrero:	3,33	4,53	1,2	26,49
Marzo:	4,43	5,28	0,85	16,1
Abril:	5,18	5,37	0,19	3,54
Mayo:	6,41	6,05	-0,36	-5,95
Junio:	6,91	6,24	-0,67	-10,74
Julio:	7,11	6,56	-0,55	-8,38
Agosto:	6,25	6,36	0,11	1,73
Septiembre:	5,11	5,89	0,78	13,24
Octubre:	3,82	5,11	1,29	25,24
Noviembre:	2,66	3,97	1,31	33
Diciembre:	2,1	3,21	1,11	34,58
MEDIA ANUAL	4,64	5,18	0,53	13,44

Figura 6. Representación de los datos en forma de Tabla.

Si se hubiese elegido la opción de óptima estacional, en la tabla aparecerá igualmente radiaciones mensuales, ordenadas por estaciones (en kWh/m²) para cada inclinación de 0° a 90° e incrementos de 10° y con una orientación fija (hacia el sur), para poder apreciar la variación de la radiación para cada una de las inclinaciones en cada estación del año, las inclinaciones óptimas para cada estación del año con sus correspondientes radiaciones tanto mensuales como estacionales y la media anual, todas ellas en kWh/m².

4. Análisis de los resultados obtenidos con la aplicación. Experiencias en el uso de OrientSol.

Una vez finalizados los cálculos, como ya se ha explicado en la sección anterior, para la opción seleccionada, el programa permite tanto imprimir los resultados como exportar los mismos a una hoja de cálculo de Microsoft Excel, con la versatilidad que esta opción puede llegar a ofrecer, ya que de este modo se puede trabajar con más cantidad de datos y realizar las operaciones que se consideren oportunas.

De esta forma los resultados obtenidos pueden enlazarse con otras aplicaciones, que permiten el estudio comparativo de los datos obtenidos. En este sentido se les propone a los alumnos que generen datos a través de la aplicación software de varias ciudades según su situación geográfica dentro de España, realizando comparaciones para los resultados en ciudades del centro, norte y sur de España, ya que en las ciudades con estas situaciones podremos obtener datos de radiaciones y de latitud más diferentes entre sí y por lo tanto extraer conclusiones que relacionen de una forma interesante los resultados obtenidos con la posición geográfica.

El estudio se puede completar analizando si existe dependencia entre la latitud del lugar y la inclinación óptima anual, o los valores de la máxima radiación en un sistema en posición horizontal y compararlos con los que se obtendrían en caso de la opción de seguimiento total. También se puede analizar el máximo porcentaje de pérdidas al comparar la posición horizontal con el sistema con seguimiento total comparándolo con la inclinación óptima anual, las pérdidas entre un sistema con inclinación fija óptima anual y orientación variable frente a uno con seguimiento total. En definitiva apreciar claramente la dependencia directa de ciertas magnitudes como la inclinación óptima respecto a la latitud.

Por último, hay que destacar que se ha podido apreciar una buena receptividad en el uso de la aplicación por parte de los alumnos. Cuando el alumno se matricula de la asignatura Instalaciones Fotovoltaicas, lo hace buscando el lado práctico de la materia, y en ese sentido la aplicación proporciona una herramienta, que pone de manifiesto la adquisición de las competencias prácticas y el desarrollo de las capacidades en un lugar central, como marca el contexto del Espacio Europeo de Educación Superior. Además los conocimientos se asimilan en menos tiempo, lo que es importante en asignaturas con tiempo limitado.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado una herramienta con fines didácticos para el cálculo de radiación solar sobre superficie inclinada. Con ella se puede calcular la captación energética, de cualquier capital de provincia española, según la orientación e inclinación que se seleccione para el sistema fotovoltaico. Además de obtener de manera comparativa las pérdidas de la captación en los distintos casos en estudio.

La herramienta proporciona al alumno un entorno de fácil manejo, con el que poder obtener los datos de partida necesarios para el diseño de una instalación fotovoltaica.

Por otro lado, como docentes nos gustaría destacar que se ha logrado una asimilación de las competencias prácticas más sencilla. En el tiempo en el que el programa se está usando se ha conseguido mejorar el conocimiento de esta parte de la asignatura por parte de los alumnos, y los resultados conseguidos por ellos han mejorado.

Referencias

- [1] Las energías renovables en España. Balance y perspectivas. IDEA Ministerio de Industria y Energía.
- [2] J.Adell., *Educación En La Internet. Universitas* , Serie IV, Vol. Extraordinari XX Setmana Pedagògica (ISSN 0211-3368), Pág. 207-214. (1995)
- [3] J. D. Aguilar, et al. Sitio web como herramienta de apoyo a la docencia de sistemas fotovoltaicos. VI Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica. Valencia (2004)
- [4] F.J. Gimeno et al. "La formación en energía solar fotovoltaica en la Universidad Politécnica de Valencia". Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica. Barcelona. (2000)
- [5] M. Iqbal, *An introduction to Solar Radiation*, Academic Press. (1980).
- [6] E. Lorenzo. *Electricidad Solar*. Ed. Progenesa, Sevilla, (1994).
- [7] K. Jamsa y L. Klander. "1001 Trucos de programación con Visual Basic". Anaya. (1998).
- [8] Microsoft Press. "Manual del Programador" Microsoft Visual Basic 6.0. MC Graw Hill. (2000).