

LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA EN EL PROCESO DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

COMPUTATIONAL SIMULATION AS A DIDACTIC TOOL IN
THE TEACHING-LEARNING PROCESS OF PHOTOVOLTAIC
SYSTEMS

Dr. Néstor Daniel Galán Hernández.

*Universidad Politécnica de Sinaloa, Unidad Académica de Ingeniería en Energía.
ngalan@upsin.edu.mx*

Dr. Eber Enrique Orozco Guillén.

*Universidad Politécnica de Sinaloa, Unidad Académica de Ingeniería en Energía.
eorozco@upsin.edu.mx*

Dr. Guillermo J. Rubio Astorga

*Instituto Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán guillermo.
rubio@itculiacan.edu.mx*

RESUMEN

En este trabajo se presenta la simulación computacional como herramienta didáctica para la estimación del recurso solar disponible en tres ciudades de la República Mexicana, con objeto de obtener la irradiancia y el ángulo de inclinación óptimo en la instalación de sistemas fotovoltaicos. Esto es debido a que, en el dimensionamiento de este tipo de sistemas, se tiene que recurrir a bases de datos con promedios históricos de irradiancia solar que no permiten estimar de forma precisa la disponibilidad energética de la región. Por lo que se recurre a modelos matemáticos para el desarrollo de una interfaz gráfica que permita al usuario proyectar a lo largo de un año o durante un día el recurso solar en cualquier parte del estado o país.

Palabras claves: Recurso solar, ángulo óptimo de inclinación, Interfaz gráfica, Sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

This work presents the computational simulations as a didactic tool for estimation of the solar resource available in three cities of the Guerrero State, in order to obtain the solar irradiance and the optimal tilt angle in the installation of photovoltaic systems. This is due to the fact that in the sizing of this kind of systems, it is necessary to resort to databases with historical averages of solar irradiance that do not allow to estimate accurately the energy availability of the region. Therefore, mathematical models are used to develop a graphical interface that allows the user to project the solar resource in any part of the state or country over a period of one year or one day.

Key Words: Solar resource, optimal tilt angle, graphical interface, Photovoltaic systems.

INTRODUCCIÓN

La diversificación de herramientas didácticas en el aula de clases es de vital importancia en la sociedad del conocimiento. En la era de la globalización y la digitalización, nuestros jóvenes hacen uso constante de las tecnologías de la información y comunicación. Por ello surge la necesidad de hacer modificaciones en la práctica docente, especialmente en lo que respecta al trabajo en el aula de clases, es muy necesario provocar inquietudes que generen curiosidad intelectual en los alumnos. Por ello, se requiere emplear nuevos modelos didácticos que desafíen genuinamente concepciones y rutinas profesionales (Fernández, Gil., Carrascosa, Cachapuz y Praia, 2003; Carrascosa, Martínez, Furió y Guisasola, 2008).

En este trabajo se presenta la simulación computacional como una herramienta que puede contribuir al proceso de enseñanza aprendizaje en lo que respecta al tema de los sistemas fotovoltaicos como una fuente de generación de energía limpia.

De acuerdo a Cristina Davini "La simulación es un método de enseñanza que se propone acercar a los alumnos a situaciones y elementos cercanos a la realidad, pero en forma artificial, a fin de entrenarlos en habilidades prácticas y operativas cuando las encaran en el mundo real" (Davini, 2007)

Teniendo en cuenta que una simulación permite representar determinados componentes y sucesos de la realidad que son complejos. Su utilización, en el aula de clases, para comprender el funcionamien-

to de un sistema fotovoltaico para producir energía eléctrica es de vital importancia, ya que permite reproducir computacionalmente el comportamiento del panel solar fotovoltaico en diferentes condiciones ambientales.

México posee un importante potencial en la generación de energía fotovoltaica Fuente especificada no válida., debido a sus condiciones geográficas y climáticas, ya que tiene una alta incidencia de radiación

solar en la mayoría de su superficie (Cooper, 1969). La potencia de la radiación varía según la hora y la fecha, ya que las condiciones atmosféricas provocan una reducción en su intensidad a lo largo de un día. Se puede asumir que en condiciones idóneas de radiación se tiene alrededor de 1000 W/m² en la superficie terrestre (Khatib & Elmenraich 2016).

Por la disponibilidad del recurso solar, considerado como inagotable, se desarrollan sistemas fotovoltaicos que captan y transforman la energía solar en energía eléctrica. El crecimiento del mercado eléctrico indica que la electricidad penetra

en muchas áreas que desde el punto de vista económico son viables, además, el aumento del número de sistemas que se instalan por particulares, compañías y gobiernos, permite la reducción de costos en la producción de los elementos que integran el sistema. Esto se suma a las distintas metas a nivel mundial para incrementar la producción de electricidad mediante energías renovables y sustentables (Castejón & Santamarina, 2010).



La simulación es un método de enseñanza que se propone acercar a los alumnos a situaciones y elementos cercanos a la realidad, pero en forma artificial, a fin de entrenarlos en habilidades prácticas y operativas cuando las encaran en el mundo real”

(Davini, 2007)



El estudio de la energía solar en zonas de difícil acceso es de suma importancia para diversas áreas tales como la agricultura e hidrología, debido a que se establecen métodos para determinar sus características, disponibilidad y comportamiento a lo largo de las diversas estaciones del año (Lang, 2006). Sin embargo, una nueva inquietud por el interés en la dinámica del recurso solar es la generación de energía, esto es un incentivo para que universidades y organismos que se dedican al monitoreo, formulen bases de datos y mapas para determinar la factibilidad de la instalación de proyectos de generación de energías renovables (Rosas, 2011).

La principal problemática que se tiene en el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos es que no se cuenta con datos que muestren la cantidad de radiación sobre la superficie del planeta de manera actualizada, por lo que para calcular la radiación solar se llevan a cabo análisis matemáticos con datos de sitios cercanos e históricos, con los cuales se evalúa y proyecta la disponibilidad del recurso a lo largo del año. Además, de que las bases de datos de empresas privadas son costosas y representan un incremento en el desarrollo del proyecto.

Este trabajo se propone para evaluar las tra-

yectorias solares en 3 ciudades costeras diferentes de México; que cuenta con un significativo potencial para la generación de energía de forma sustentable y limpia, mediante sistemas fotovoltaicos.

Con este trabajo se obtiene una herramienta computacional para estimar la dinámica y potencial del recurso solar disponible en un sitio de interés. Se presenta el desarrollo para estimar la posición solar y el cálculo de la radiación solar terrestre sobre una superficie horizontal, así como los respectivos resultados y conclusiones para los casos estudiados empleando la herramienta didáctica que se propone.

Estimación de la trayectoria solar:

Debido al movimiento de rotación de la tierra respecto al sol y a la inclinación del ecuador terrestre respecto a la eclíptica solar de aproximadamente 23.45° , los lugares a lo largo de un meridiano terrestre no tienen en ese mismo instante la misma iluminación del sol, sobre todo, considerando que este fenómeno se acentúa más en los polos y solsticios, cambiando a una distribución de luz a lo largo de un meridiano de manera casi uniforme en los equinoccios, lo que permite a un observador en cualquier punto de la tierra establecer su propia hora solar y su hora oficial.

En el estudio de la trayectoria del sol, se orienta al estudiante a determinar la posición del sol respecto a un punto en el planeta tierra, escogiendo entre los diversos modelos matemáticos un modelo de alta precisión con el objeto de realizar una estimación en la corrección del tiempo entre la hora solar y la hora del tiempo universal coordinado, este modelo es basado en el algoritmo de Yallop (Hughes, Yallop & Hohenkerk, 1989). En este algoritmo se relaciona el año (Y), mes (M), día (D), hora (h), minuto (min) y segundo (s) en la ecuación dinámica del tiempo (td) expresada en la ecuación 1:

$$(1) \quad t_d = \frac{1}{36535} \left(\frac{U_T}{24} + D + [30.6M + 0.5] + \dots \right. \\ \left. \dots [365.25(Y - 1976)] - 8707.5 \right)$$

donde el tiempo universal coordinado (UTC), es:

$$U_T = h + \left(\frac{\text{min}}{60} \right) + \left(\frac{s}{3600} \right)$$

y el mes con el año están bajo las siguientes condiciones,

$$M = \begin{cases} M - 3 & \rightarrow M > 2 \\ M + 9 & \rightarrow M \leq 2 \end{cases} \quad Y = \begin{cases} Y & \rightarrow M > 2 \\ Y - 1 & \rightarrow M \leq 2 \end{cases}$$

Es importante que el estudiante relacione que en los movimientos de rotación y de translación de la tierra sobre la eclíptica solar a lo largo del año va a existir una alteración en la distancia media sol-tierra, como se muestra en la Figura 1



La variación en la eclíptica solar se puede estimar con los siguientes parámetros: la anomalía media (A_m), ecuación del centro (E_c), longitud media (L_{me}), ascensión corregida (A_c) y la oblicuidad (O_e). Estos parámetros se requieren para obtener la ecuación del tiempo corregido y se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$(2) \quad A_m = 357.528 + 35999.05t_d \text{ [}^\circ\text{]}$$

$$(3) \quad E_c = 1.915 \sin(A_m) + 0.020 \sin(2A_m) \text{ [}^\circ\text{]}$$

$$(4) \quad L_{me} = 280.460 + 36000.770t_d + E_c \text{ [}^\circ\text{]}$$

$$(5) \quad A_c = L_{me} - 2.466 \sin(2L_{me}) + 0.053 \sin(4L_{me}) \text{ [}^\circ\text{]}$$

$$(6) \quad O_e = 23.4393 - 0.013t_d \text{ [}^\circ\text{]}$$

Conocidos estos parámetros se puede calcular la ecuación de corrección del tiempo (E_{tc}) mediante la ecuación 7,

$$(7) \quad E_{tc} = \frac{1}{15} (L_{me} - E_c - A_c)$$

Obteniendo finalmente el tiempo solar verdadero (T_{sv}) a partir de la ecuación 8:

$$(8) \quad T_{sv} = U_T + E_{tc} + \frac{1}{15} (L_{std} - L_{loc}) \text{ [hrs].}$$

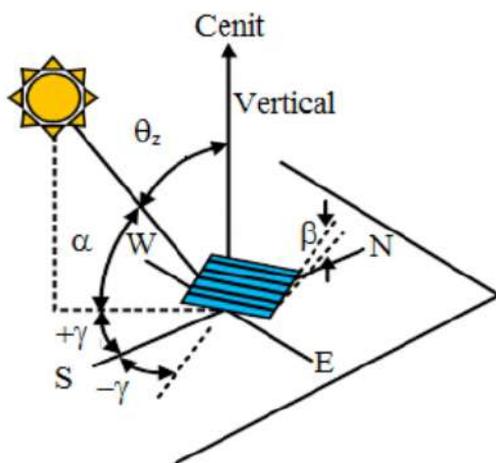
Donde L_{std} es la longitud del meridiano estándar basado en la zona horaria (UTC) y L_{loc} la longitud del meridiano local del observador.

El ángulo de declinación (δ_{dec}) se forma entre el plano de la eclíptica solar y el plano ecuatorial terrestre. Presentando una variación de -23.45° en invierno y $+23.45^\circ$ en verano (Cooper, 1969), de acuerdo al movimiento de translación:

$$(9) \quad \delta_{dec} = \tan^{-1} [\tan(O_e) \sin(A_c)].$$

Cuando se planea proyectar la ubicación de un sistema fotovoltaico (SFV) en determinado lugar, es necesario conocer la trayectoria del sol sobre la zona de instalación (Figura 2), lo que permitirá al SFV tener la máxima captación de irradiancia solar, obteniendo así un proceso de conversión de energía más eficiente. Por lo que el conocimiento de este comportamiento es de suma relevancia para el estudiante, quien lo puede relacionar y obtener a partir de los siguientes ángulos: el ángulo horario (ω_{hr}), expresado en la ecuación 10, se define como el desplazamiento angular del sol de este a oeste, al tomar como referencia un punto local y la altura solar (α), expresada en la ecuación 11, y se define como la altura angular del sol medida desde la horizontal. El ángulo cenital (θ_z), ecuación 12, se forma entre la vertical (cenit) y la línea del sol, el ángulo acimutal solar (γ), expresado en la ecuación 13, es el desplazamiento angular de la proyección de la radiación directa sobre el plano horizontal mostrado en la Figura 2.

Figura 2. Ángulos de posición solar.



Estos ángulos se estiman mediante las siguientes ecuaciones (Khatib & Elmenraich 2016),

$$(10) \quad \omega_{hr} = (15T_{ST}) - 180^\circ$$

$$(11) \quad \alpha = \text{sen}^{-1} \left[\begin{array}{l} \text{sen}(\phi_{LAT}) \text{sen}(\delta_{ec}) + \dots \\ \dots \cos(\phi_{LAT}) \cos(\delta_{ec}) \cos(\omega_{hr}) \end{array} \right]$$

$$(12) \quad \theta_{cen} = \text{cos}^{-1} \left[\begin{array}{l} \text{sen}(\phi_{LAT}) \text{sen}(\delta_{ec}) + \dots \\ \dots \cos(\phi_{LAT}) \cos(\delta_{ec}) \cos(\omega_{hr}) \end{array} \right]$$

$$(13) \quad \gamma = \text{cos}^{-1} \left[\frac{\cos(\delta_{ec})}{\cos(\alpha)} \left[\begin{array}{l} \cos(\phi_{LAT}) \tan(\delta_{ec}) - \dots \\ \dots \text{sen}(\phi_{LAT}) \cos(\omega_{hr}) \end{array} \right] \right]$$

donde: ϕ_{LAT} es la latitud del lugar en estudio. Estos ángulos son de suma importancia para estimar el ángulo de incidencia, ecuación 14, el cual permite al estudiante conocer el ángulo de inclinación (β) del módulo fotovoltaico en el que se tendrá la máxima captación de radiación solar sobre su superficie.

(14)

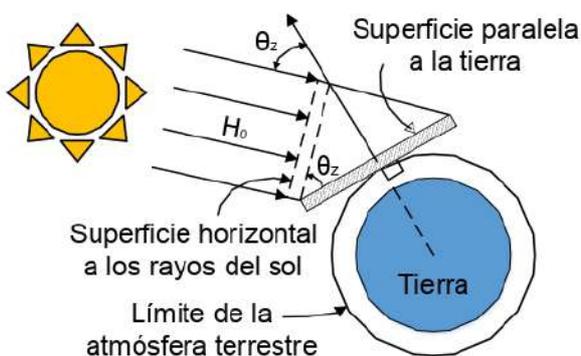
$$\theta = \text{cos}^{-1} \left[\begin{array}{l} \text{sen}(\delta_{ec}) \text{sen}(\phi_{LAT}) \cos(\beta) \dots \\ \dots - \text{sen}(\delta_{ec}) \cos(\phi_{LAT}) \text{sen}(\beta) \cos(\gamma) \dots \\ \dots + \cos(\delta_{ec}) \cos(\phi_{LAT}) \cos(\beta) \cos(\omega_{hr}) \dots \\ \dots + \cos(\delta_{ec}) \text{sen}(\phi_{LAT}) \text{sen}(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega_{hr}) \dots \\ \dots + \cos(\delta_{ec}) \text{sen}(\beta) \text{sen}(\gamma) \text{sen}(\omega_{hr}) \end{array} \right]$$

Estimación de la radiación solar terrestre sobre una superficie horizontal

El sol es una estrella que se encuentra a una temperatura de 5,505°C y en su interior se generan diversas reacciones nucleares de fusión que generan energía denominada radiación solar (Castejón & Santamarina, 2010). Esta estrella irradia 3.8x10²⁶W en un instante de tiempo, de los cuales, en promedio, en la parte externa de la atmósfera terrestre en un plano horizontal a la radiación incidente llegan 1.367kW/m² (Lang, 2006). Este valor se conoce como constante solar (GSC).

Los diferentes valores de radiación se deben a variaciones de la energía que emite el sol, y cambios en la distancia entre el sol y la tierra. Esto se representa por cambios en la actividad periódica del sol de un 1.5%, y por cambios durante el año en la distancia del sol a la tierra de un 3% (Rosas, 2011).

Figura 3. Radiación horizontal extraterrestre



La radiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal se define como la energía incidente fuera de la atmósfera de la tierra, al asumir que incide con un ángulo de 90° en una superficie, Figura 3.

La ecuación para determinar la radiación solar extraterrestre normal (G_0) es:

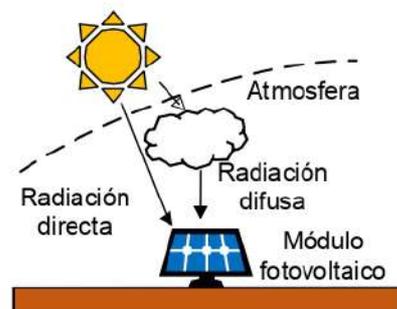
$$(15) \quad G_0 = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360D}{365} \right) \right] \cos \theta_{zen}$$

Y la ecuación para estimar la radiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal (G_{ext}) es:

$$(16) \quad G_{ext} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360D}{365} \right) \right] \sin(\varphi_{LAT}) \dots \\ \sin \delta_{dec} + \cos(\varphi_{LAT}) \cos(\delta_{dec}) \cos(\omega_{hr})$$

La radiación solar terrestre se encuentra compuesta por dos componentes, radiación directa y radiación difusa, Figura 4. Donde la radiación directa define como la radiación que incide sobre una superficie, sin sufrir ningún tipo de alternación. La radiación difusa es aquella que presenta diferentes tipos de perturbaciones por las partículas que se encuentran en la atmósfera, las condiciones climáticas o dobles trayectorias.

Figura 4. Radiación directa y difusa.



Para estimar la radiación solar terrestre promedio se pueden emplear diferentes métodos matemáticos como el método de Hottel (Hottel, 1976), que presenta la transmitancia atmosférica (τ_b) para la radiación directa utilizando θ_{zenit} , la altura sobre el nivel del mar (km) para una atmósfera estandarizada y 4 diferentes tipos de clima.

La ecuación de transmitancia (τ_{dir}) se define como:

$$(17) \quad \tau_{dir} = \frac{G_{dir}}{G_0} = a_0 + a_1 e^{\frac{-k_a}{\cos \theta_{zen}}}$$

Las variables a_0 , a_1 y k_a están dadas por:

$$a_0 = r_0 \left[0.4237 - 0.00821(6 - A_t)^2 \right] \\ a_1 = r_1 \left[0.5055 + 0.00595(6.5 - A_t)^2 \right] \\ k_a = r_k \left[0.2711 + 0.01858(2.5 - A_t)^2 \right]$$

Donde A_{it} es la altitud del observador en km y los factores r_0 , r_l y r_k son los mostrados en la tabla 1. La radiación directa (G_{dir}) se determina de:

$$(18) \quad G_{dir} = G_0 \tau_{dir} \cos \theta_{cenit}$$

Tabla 1.
Factores de corrección climática.

Tipo de clima	r_0	r_l	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Verano latitud media	0.97	0.99	1.02
Verano sub-ártico	0.99	0.99	1.01
Invierno altitud media	1.03	1.01	1.00

Para estimar la radiación total es necesario obtener la radiación difusa. Liu y Jordan desarrollaron una relación empírica entre el coeficiente de transmisión para la radiación directa y difusa para días despejados (Liu & Jordan, (1960),

$$(19) \quad \tau_{dif} = \frac{G_{dif}}{G_0} = 0.271 - 0.294 \tau_{dir}$$

Donde (τ_{dif}) es la razón entre la radiación difusa (G_{dif}) y la radiación solar extraterrestre directa sobre un plano horizontal.

La radiación difusa se obtiene a partir de:

$$(20) \quad G_{dif} = G_0 \tau_{dif} \cos \theta_{cenit}$$

La radiación solar terrestre promedio total (G_{terre}) se define como:

$$(21) \quad G_{terre} = G_{dir} + G_{dif}$$

Resultados

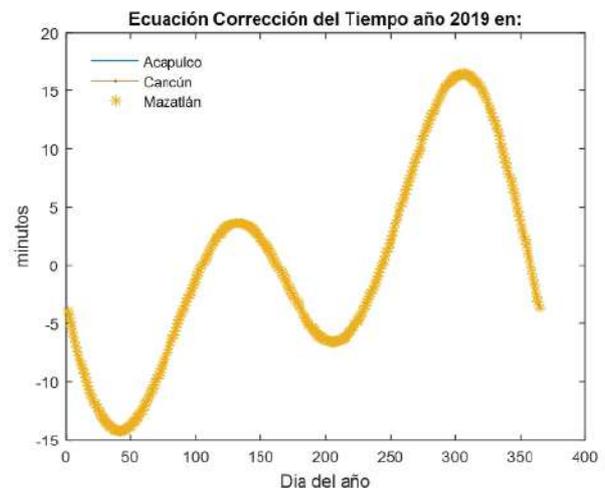
El estudio para el conocimiento del comportamiento de trayectoria solar, se realiza en tres ciudades ubicadas en zonas horarias diferentes de la República Mexicana: Acapulco, Cancún y Mazatlán, tomando como base los datos mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2.
Datos de Ciudades Costeras en México.

Parámetro	Acapulco	Cancún	Mazatlán
Latitud	16.86°	21.15°	23.22°
Longitud Local	99.89°	86.83°	106.42°
GMT	6	5	7
Longitud del meridiano estándar	15xGMT		
Altura Media (SNM)	30 m	11 m	10 m
Año	2019		

Para simular el comportamiento del sol, se desarrolla una interfaz gráfica en el Guide de MATLAB® donde se implementa el modelo matemático de Yallop, el estudio se realiza para el año 2019, con el objetivo de familiarizar al estudiante en el comportamiento del desplazamiento solar durante el año y también a lo largo de un día en específico.

Figura 5.
Corrección del tiempo en las tres ciudades.



En el análisis anual, a partir de los valores de corrección del tiempo entre la hora UTC respecto a la hora solar mostrados en la figura 5, se estima el valor de la declinación solar al medio día UTC para cada día del año, como se visualiza en la figura 6.

Tomando de referencia los datos de la tabla 2, además de la influencia del tiempo solar verdadero y la declinación solar, se obtiene el ángulo de la altura del sol en el medio día UTC (12:00hrs) respecto al horizonte, como lo muestra la figura 7, donde se puede observar la variación a lo largo del año entre las tres ciudades, presentando el sol una altura considerable en Mazatlán, Sinaloa en el equinoccio de primavera cercana a los 90°. El conocimiento del ángulo mínimo de altura solar al año es de suma importancia para determinar la distancia de los arreglos fotovoltaicos en base a la proyección de la sombra de un objeto sobre los mismos.

En base a la tendencia de la figura 7, la mínima altura solar se presenta en invierno, para la ciudad de Mazatlán el 20 de diciembre el sol tiene un ángulo de 43.4°.

El comportamiento de la irradiancia solar promedio en un día despejado a lo largo del año es ligeramente de mayor intensidad en Acapulco respecto a Cancún y Mazatlán, como lo muestra la figura 8, donde la Irradiancia media diaria anual (a las 12:00hrs) de Acapulco es de 0.97kW/m², de Cancún 0.93kW/m² y de Mazatlán 0.94kW/m², lo que hace a Acapulco una ciudad con un mayor recurso solar disponible para la generación de energía fotovoltaica.

Figura 6.
Declinación solar en 2019.

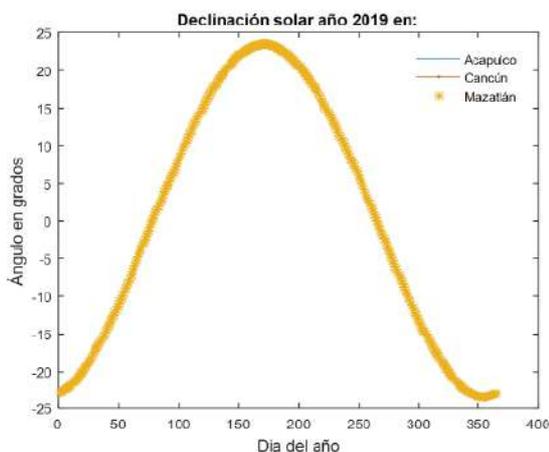


Figura 7.
Altura del sol al medio día del tiempo estándar UTC.

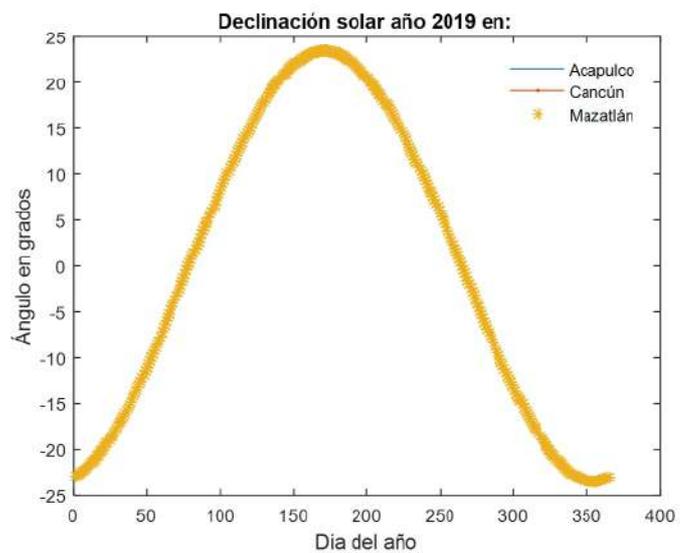


Figura 8.
Irradiancia en día despejado.

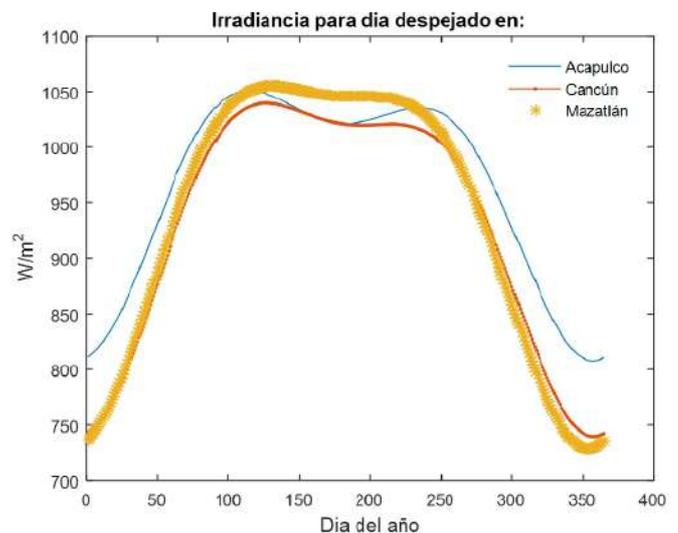


Figura 9.
Irradiación diaria extraterrestre.

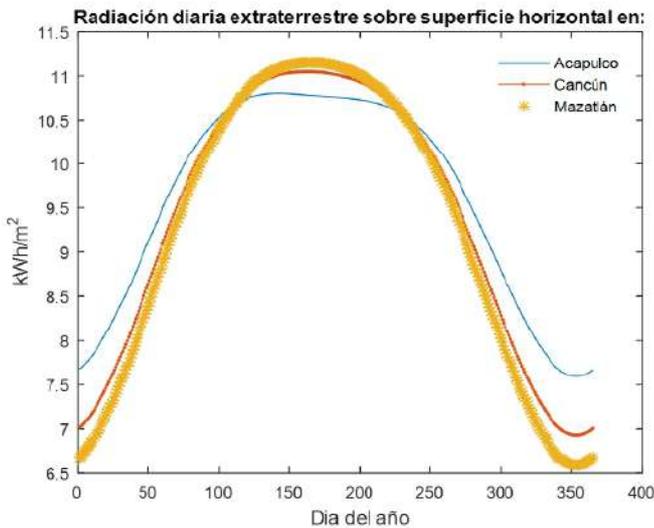


Figura 10.
Ángulo horario - 3 de enero de 2019.

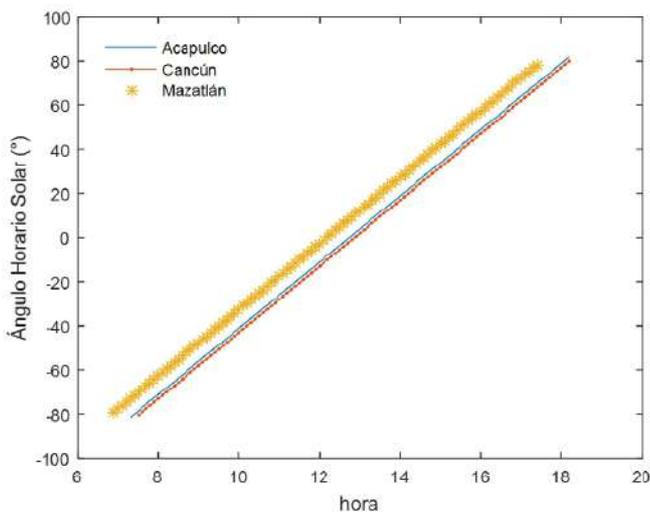
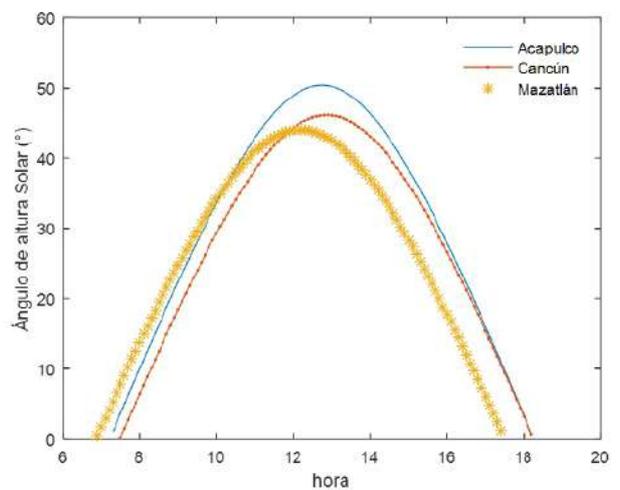


Figura 11.
Ángulo de la altura solar - 3 de enero de 2019.



La irradiancia solar al exterior de la atmosfera en su promedio diario también hay una mayor incidencia sobre la latitud de Acapulco, debido a su cercanía al ecuador cómo lo muestra la figura 9, donde la ciudad de Acapulco tiene un promedio anual de 9.63kWh/día/m², en Cancún es de 9.40kWh/día/m², y en Mazatlán este promedio es de 9.28kWh/día/m².

El estudio del comportamiento de la trayectoria solar durante el día en base al algoritmo de Yallop toma de día muestra el perihelio, que es el día donde la distancia media tierra-sol es la más cercana. Esto permite al estudiante visualizar el movimiento del sol desde el alba hasta el ocaso, donde los resultados obtenidos de la simulación para las tres ciudades se dan en los siguientes gráficos.

El ángulo de la posición del sol por hora se obtiene de la ecuación 10, del ángulo horario, para las tres ciudades se muestran los resultados en la figura 10, tomando de referencia el ángulo cero al medio día UTC (12:00hrs), con valores negativos al alba y positivos al ocaso.

El conocimiento de los diferentes ángulos de la altura del sol a lo largo del día, en este caso para Mazatlán y Cancún el sol al medio día UTC tiene una altura de 44°, mientras que para Acapulco tiene una altura de 49° como se muestra en la figura 11.

Estos datos proporcionan al estudiante una herramienta para estimar mediante la simulación la altura exacta del sol respecto al horizonte de referencia que, en combinación con el ángulo acimutal, figura 12. Lo que permite hacer la estimación de la distancia entre módulos fotovoltaicos para evitar la proyección de sombras a partir de cierta hora del día, según la fecha menos viable, figura 7, otorgándole un dominio total en el dimensionamiento y proyección de un sistema fotovoltaico.

Con el conocimiento de los ángulos previos y a partir de la ecuación 14 del ángulo de incidencia, se puede obtener el ángulo de inclinación óptimo de un módulo fotovoltaico para la posición del sol a lo largo del día, donde al medio día UTC para Mazatlán y Cancún el ángulo óptimo de inclinación del módulo fotovoltaico es de 46° y para Acapulco es de 41° como lo muestra la figura 13. El estudiante puede verificar que la sumatoria de los ángulos de altura y de inclinación da 90° coincidiendo este último ángulo con el ángulo cenital. El algoritmo de Yallop puede ser implementado en sistemas de seguimiento solar de un eje o de dos ejes.

En el estudio del ángulo óptimo de un módulo fotovoltaico fijo, el estudiante puede apoyarse de los resultados obtenidos en base al modelado matemático, lo que le permitirá conocer los ángulos de altura solar en cuatro épocas del año referentes (fecha de inicio de solsticios y equinoccios); tomando de ejemplo la ciudad de Mazatlán, los resultados de simulación mostrados en la figura 14, dan la siguiente información: en invierno el sol alcanza una altura máxima de 43.4° donde el día tiene una duración de 10.6hrs, relacionándolo a la mínima declinación, gráfico 2; en los equinoccios el sol alcanza una altura de 67° , la duración del día es de 12hrs, en este caso se debe a una declinación de cero grados; la máxima altura del sol se presenta en verano con un ángulo de 89.6° y la duración del día es de 13.4 hrs, relacionado a la máxima declinación.

Figura 12.
Ángulo acimutal - 3 de enero de 2019.

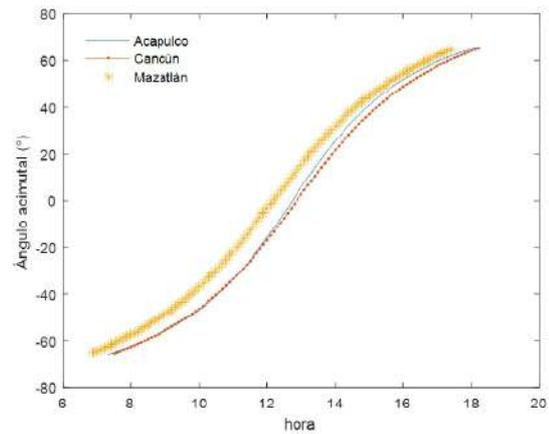


Figura 13.
Ángulo idóneo de inclinación de un panel fotovoltaico a lo largo del día 3 de enero de 2019.

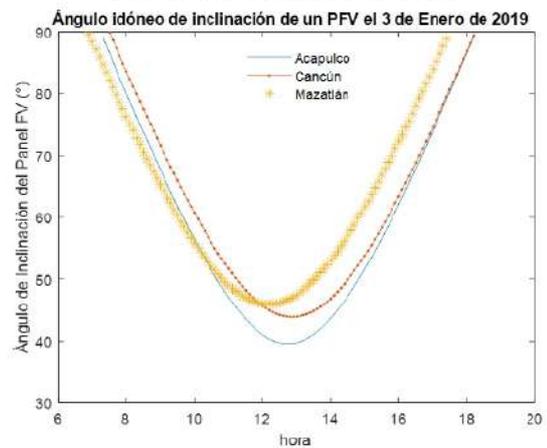
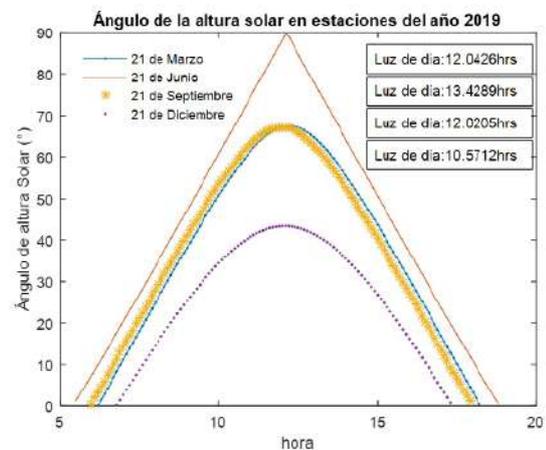


Figura 14.
Altura solar a lo largo del día en Mazatlán, Sinaloa.



Al conocer el estudiante la altura solar, la declinación, el ángulo horario y el acimut (en este caso fijo en cero grados que es la orientación sur) y por medio de la ecuación del ángulo de incidencia, puede obtener el ángulo de inclinación óptimo promedio anual en que se debe instalar el módulo fotovoltaico para aprovechar la máxima incidencia anual de irradiancia solar. En este caso, en base al promedio de los ángulos de las cuatro estaciones del año mostrados en la figura 15: verano de 0.4° , equinoccios de 23° e invierno de 46.6° , el ángulo óptimo de instalación es de 23° .

Este modelo matemático se implementa finalmente en una interfaz gráfica elaborada en MATLAB®, Figura 16, para simular el comportamiento de la geometría solar de forma anual o diaria, que permitirá tanto al estudiante o a cualquier usuario obtener los ángulos de mayor aplicación en sistemas fotovoltaicos, de una forma sencilla y sin conocimientos previos, además de ayudarlo a conocer la tendencia de irradiancia solar presente a lo largo del año, esta herramienta es útil para su uso en cualquier lugar del planeta.

Figura 16.
Interfaz gráfica en Matlab para simulación de comportamiento solar-fotovoltaico.



La implementación de este tipo de herramienta repercute en el aprendizaje del estudiante de la siguiente forma:

- ▶ Mejorando el proceso de enseñanza aprendizaje por medio del uso de tecnologías de la información, lo que permite incluir al estudiante en una actividad elemental diferente de aprendizaje.

- ▶ Proporciona al estudiante la posibilidad de desarrollar su propio software de trayectoria solar para visualizar comportamientos del movimiento del sol sobre una zona en específico. Teniendo con esto una gran ventaja, ya que el estudiante no solo comprenderá de forma analítica los conceptos abstractos de la geometría solar presentados por el maestro, sino que el mismo puede recrear el comportamiento dinámico de las ecuaciones matemáticas utilizadas y visualizar la problemática de forma gráfica, asociando el fenómeno de forma experimental ante diferentes condiciones, fechas y horarios. Esto permite al estudiante tener un mejor entendimiento y a la vez solidificar su conocimiento, mejorando su habilidad en la interpretación e implementación de estos sistemas complejos.
- ▶ Entrena al estudiante a implementar los conocimientos teóricos adquiridos en sus lecturas de clase al desarrollar sistemas fotovoltaicos reales.
- ▶ Alienta el trabajo colaborativo entre estudiantes, al realizar actividades en grupo.
- ▶ Repercute en la incorporación de terminología técnica en el lenguaje del estudiante.
- ▶ Además de permitir al estudiante adquirir las habilidades para emplear su conocimiento como herramienta de análisis en la implementación de sistemas fotovoltaicos reales, optimizando el dimensionado de este tipo de sistemas así como su desempeño.

CONCLUSIONES

Como resultado de este trabajo se obtiene un estudio basado en el modelo matemático del algoritmo de Yallop, que permite estimar en las tres ciudades costeras de México propuestas la radiación que se recibe sobre el módulo fotovoltaico, con su respectivo ángulo de inclinación óptimo durante el año y una interfaz gráfica como apoyo didáctico en la estimación anual o diario de

diferentes ángulos del astro solar. El conocimiento de estos ángulos evita considerar el factor de corrección en el número de módulos a instalar en un sistema fotovoltaico, lo que disminuye el costo y el dimensionamiento en los elementos que integran el sistema, como son: controladores, baterías, inversores e instalación eléctrica, según lo que aplique a cada sistema fotovoltaico. El conocer la dinámica del sol a lo largo del año, permite a un instalador orientar e inclinar de manera adecuada los módulos fotovoltaicos para una mayor captación de energía, además de que permite integrar el algoritmo en sistemas de seguimiento solar, proporcionando una gran precisión en este tipo de mecanismos. Estos modelos requieren como datos de entrada la latitud, longitud y el tipo de clima predominante para estimar la cantidad de radiación solar y el ángulo idóneo de inclinación del módulo fotovoltaico.



BIBLIOGRAFÍA

Castejón, A. & Santamarina G., (2010), *Instalaciones solares fotovoltaicas*, Madrid, España: Edítex.

Cooper, P., (1969). *The absorption of solar radiation in solar still*, Solar energy.

Davini, M.C. (2007), *Métodos de Enseñanza. Didáctica general para maestros y profesores*. Editorial Santillana. Buenos Aires, pp 144.

Fernández I., Gil D., Carrascosa J. Cachapuz A. y Praia, J. (2003). *Visiones Deformadas de la Ciencia Transmitidas por la Enseñanza*. Enseñanza de las Ciencias, 20 (3), 477-488.

Galán, N. D. & Ramírez, M. E., (2018), «Implementación de tres modelos para determinar

la precisión de la variación del tiempo solar y el ángulo de inclinación óptimo anual y diario de un MFV.» XXIII Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico. Nuevo Vallarta, Nayarit, México.

Hottel, H. (1976), «A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar*,» Solar energy, vol. 18, n° 129, 1976.

Hughes, D., Yallop, B. D., & Hohenkerk, C. Y. (1989), «The Equation of Time,» Mon. Not. Royal Astronomical Society, pp. 1529-1535.

Khatib, T., & Elmenreich W. (2016). *Modeling of Photovoltaic System Using Matlab*. Canadá:

John Wiley & Sons, Inc.

Lang, K., (2006), *Sun, Earth and Sky*, United States of America: Springer.

Liu, B., & Jordan, R. (1960), *The interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and total Solar Radiation*, Solar energy, vol. 4, n° 3, pp. 1-19.

Muneer, T., Gueymard, C., & Kambezidis, H. (2004). *Solar Radiation and Daylight Models*. Sheffield, England: Butterworth-Heinemann.

Rosas J. R., (2011) *Análisis, diseño y control de una unidad de conversión de energía de calor a electricidad con su motor Stirling*, Guadalajara: CINVESTAV