

Análisis Estadístico de la Irradiación Solar en el Municipio de Tequila

F. J. Hernández Ibarra

Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez,
Unidad Académica Tequila, Departamento de Investigación, Jalisco, México.
francisco.hernandez@tequila.tecmm.edu.mx

Resumen— Los datos de la irradiancia solar son muy importantes a la hora de planear los arreglos de diferentes sistemas fotovoltaicos. Ello depende de realizar una estimación efectiva de costo-beneficio. Para ello hemos medido y analizado estos mismos durante un año completo en el municipio de Tequila, Jalisco, México. Han sido tratados estadísticamente para analizar y caracterizar la estimación de la irradiancia en el área. Los resultados muestran que 300 días pueden ser clasificados como soleados, 37 parcialmente soleados, 21 parcialmente nublados y 7 totalmente nublados bajo un criterio de FWHM después de verificar que los datos siguen una distribución de tipo Gaussiana a partir de varios días que fueron analizados y tomados como representativos del año 2020. El promedio de la irradiación es de 5.63 kWh/m² y 6.14 kWh/m² como máximo entre los días soleados en acuerdo con estimaciones de técnicas de aprendizaje e inteligencia artificial que producen modelos para calcular este dato. Estimaciones anuales de la irradiación en todo el mundo calculan un dato de 2000 kWh/m² para la región mientras nuestros propios datos arrojan un resultado de 2055 kWh/m² para el año en cuestión. Los datos de la irradiación son muy importantes para muchas aplicaciones con la energía solar pero especialmente en la aplicación de proyectos fotovoltaicos que permitan aprovechar el gran potencial de la región.

Palabras clave—Irradiancia, Análisis Estadístico.

Abstract— Solar irradiance data are very important to estimate diverse photovoltaic arrangements. It depends on making a good cost-benefit project. For this reason, we have measured and analyzed irradiance data during a complete year in the city of Tequila, Jalisco, México. This data has been statistically treated to improve and characterize the irradiance estimation in the area. The results show 300 clear days classified as sunny, 37 partially sunny, 21 partially cloudy, and 7 mostly cloudy days, based on an FWHM criterion, after testing and verifying the data's Gaussian distribution across several days chosen as representatives of 2020. The average solar energy is 5.63 kWh/m² and 6.14 kWh/m² on very sunny days, in accordance with other studies conducted in neighboring regions. Annual estimates of global irradiance exceed 2000 kWh/m², in agreement with our calculation of 2055 kWh/m² for the year in this study. Irradiance data in the Tequila region is required for many solar energy applications, especially in photovoltaic projects, to leverage the region's great energy potential.

Keywords— Irradiance, Statistics Analysis.

I. INTRODUCCIÓN

La irradiancia solar, es una de las mediciones menos precisas, mientras que otras cantidades físicas como la masa, corriente eléctrica y demás, se pueden medir con precisiones de partes por millón o incluso mejores, la instrumentación para mediciones solares no lo es (aproximadamente 3 partes por mil). Esto, por la dificultad que implica físicamente convertir fotones en una determinada señal ya sea eléctrica o térmica que pueda medirse fácilmente. Las mediciones de irradiancia solar exactas no son muy comunes debido al costo de la instrumentación, mano de obra para la calibración y mantenimiento de estos instrumentos, así como la recopilación, procesamiento y almacenamiento de estos datos.

La potencia de radiación solar se distribuye sobre la superficie de una esfera cuyo radio aumenta constantemente con la velocidad de la luz, disminuyendo su valor por unidad de área como la inversa del cuadrado de ese radio. Cuando este frente de onda esférico llega a la atmósfera de la Tierra (donde dicho radio toma el valor de la distancia de la Tierra al Sol, unos 150 millones de kilómetros), la potencia por unidad de área del espectro total de la radiación (irradiancia solar fuera de la atmósfera) es de aproximadamente 1,367 W/m² [1].

La cantidad de radiación solar que llega a un punto en la tierra varía enormemente. A esto se le suma variaciones diarios o anuales por el movimiento aparente del sol, condiciones atmosféricas locales. Estas condiciones influyen en los componentes de radiación directa y difusa que llegan a la superficie. La dispersión de la luz solar genera el componente de radiación difusa. Una parte de la radiación solar es reflejada y es llamado “albedo” [2]. Utilizamos entonces un término denominado radiación global para referirnos al total de la radiación e incluye estos tres últimos componentes. El diseño óptimo de un sistema fotovoltaico depende de la ubicación y la cantidad de insolación solar que recibe [3].

En la región tenemos el privilegio de contar con muchas horas de sol a comparación de otros lugares que si explotan o utilizan la energía producida por los rayos de sol como algunos países de Europa. Por lo anterior, proponemos en este proyecto, proporcionar un dato de la irradiancia veraz y analizarlo para una mejor cuantificación y eficiencia del dimensionamiento e implementación de paneles solares en el área del municipio de Tequila Jalisco.

II. METODOLOGÍA

A. Recaudación de datos.

Trabajamos con datos de la radiación solar (24 datos diarios durante todo el 2020). Decidimos tomar datos cada hora de modo que la prueba estadística tuviera el número de los mismos más adecuados ($n \sim 25$ para comparar una distribución normal) y no sobre muestrear innecesariamente.

Los datos fueron tomados con un sensor que tiene una resolución de 1 W/m^2 , rango de 0 a 1800 W/m^2 y una precisión nominal del 5% a escala completa. Este sensor es montado en la estación meteorológica tipo Davis, modelo Vantage pro2 que está instalada en el edificio 2 del Instituto Tecnológico Superior de Jalisco campus Tequila. La estación está programada para generar registros de nuestro dato cada hora con mínimo y máximo además de su promedio. Utiliza un radio interceptor de espectro amplio de frecuencia, el sensor de radiación solar se ubica dentro de un protector solar por lo cual sus lecturas son fiables y precisas.

B. Análisis estadístico.

Analizamos varios días del año en el que la radiación solar sea promedio entre los días soleados y escogimos uno en representación promedio para llevar a cabo las pruebas estadísticas (sábado 8 febrero del 2020) y poder caracterizar su distribución de datos (ver figura 1 como ilustración). Primero, hacemos una prueba conocida como Kolmogórov-Smirnov (K-S) para saber si los datos se distribuyen como una gaussiana o distribución normal.

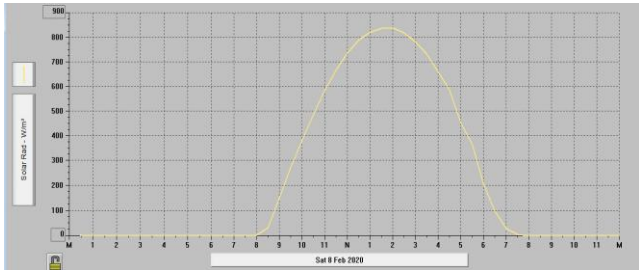


Fig. 1. Distribución de datos de la radiación solar del día Sábado 8 de Febrero del año del 2020.

La prueba Kolmogórov-Smirnov compara la función de distribución acumulada observada de una variable con una distribución teórica determinada. La distribución estándar Z de Kolmogórov-Smirnov se calcula a partir de la diferencia mayor (en valor absoluto) entre las funciones de distribución acumuladas teórica y observada. Básicamente es como una prueba de hipótesis entre dos distribuciones de datos.

Prueba K-S para $n=24$

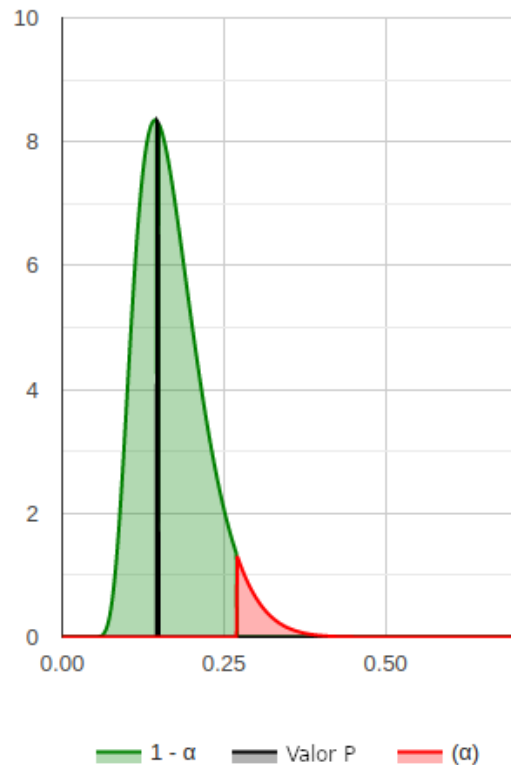


Fig. 2. Prueba K-S para comparar la distribución de los datos del Sábado 8 de Febrero del 2020.

En la figura 2, se muestra en color verde la zona del nivel de confianza que consta de un 95%, en línea negra el valor p que esta muy lejos de el área de error denotada por el color rojo.

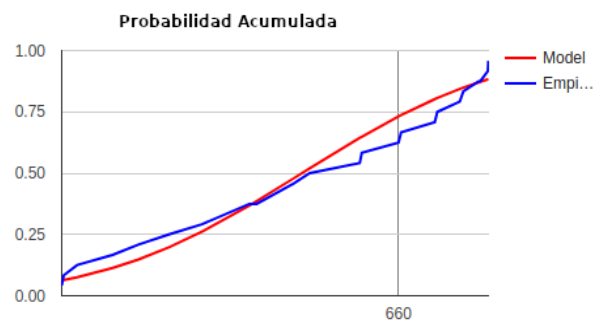


Fig. 3. Comparación entre las dos distribuciones Modelo y Empírico de la probabilidad acumulada.

En la figura 3, se muestra la probabilidad acumulada entre los modelos de la prueba K-S y los datos obtenidos para el día en comparación. La diferencia mayor entre los modelos se presenta en el dato de 660 w/m^2 . La figura 4 muestra las diferencias entre las distribuciones acumuladas de la prueba K-S normal y los datos del día 8 de Febrero.

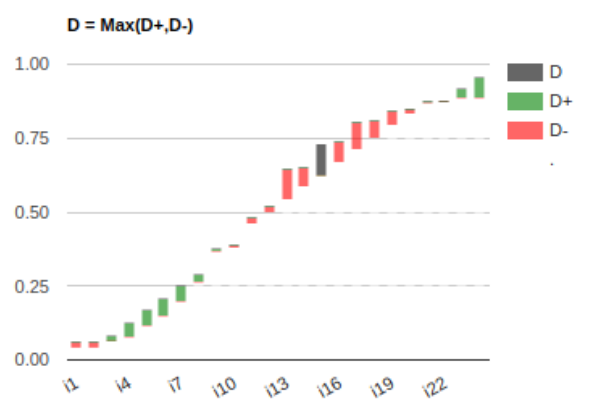


Fig. 4. Diferencias entre los datos y el modelo de distribución normal.

III. RESULTADOS

Hicimos la prueba K-S de 24 datos para el día 8 de Febrero, la conclusión fue que la distribución de los datos no difiere de una normal con un nivel de significación $\alpha = 0.05$, valor $p = 0.6162$ y $D = 0.1481$. El promedio de la distribución de datos es 470.7917, con una mediana de 535 y desviación estándar de 306.6435.

Dado que el valor de $p > \alpha$ se asume la hipótesis nula de que la distribución de los datos es de tipo normal. Los otros días promedio entre los soleados también fueron analizados con pruebas K-S y arrojaron resultados iguales. Es decir, siempre aceptando la hipótesis de que las distribuciones son de tipo normal.

Tomando en cuenta como referencia la distribución de los datos de nuestro día representativo y sus parámetros estadísticos, calculamos un ancho a potencia máxima (Full Width High Maximun FWHM por sus siglas en ingles) de 700 W/m². Esto nos permite establecer un criterio para separar entre días soleados, parcialmente soleados, medio nublados y nublados.

En el año del 2020, contabilizamos 300 días despejados que clasificamos como soleados ($\text{FWHM} > 700$), 37 días parcialmente soleados ($\text{FWHM} < 700$), 21 días como medio nublados ($400 < \text{FWHM} < 700$) y 7 días muy nublados ($\text{FWHM} < 400$ W/m²). Lo anterior, nos da un porcentaje al año de días soleados del 82% aproximadamente. También, mostramos en tabla I, los datos promedio generales de las variables climáticas más representativas en una región.

Los resultados de este estudio sobre la radiación solar promedio en el municipio de Tequila son de 5.63 KWh/m² día llegando a un dato máximo promedio entre los días más soleados de 6.14 KWh/m² día lo cual coincide con los datos obtenidos por la secretaria de energía en el 2010 [4] y por estimaciones anuales que nos ubican por encima de los 2000 KWh/m² [5] siendo nuestro cálculo anual el de 2055 KWh/m².

TABLA I.
VARIABLES CLIMÁTICAS PROMEDIO DE LA CIUDAD DE TEQUILA CORRESPONDIENTES AL AÑO 2020 .

Parámetro	Media	Desviación Estándar
Temp. Max °C	33.7	4.9
Temp. Min °C	12.1	3.3
Temp. Media °C	22.8	5.1
Humedad Rel. %	51.6	18.1
Precipitación, mm	957.0	94.7
Presión Atm. Mb	1010.6	2.7
Velocidad del Viento. Km/hr	4.6	3.7
Radiación Solar W/m ²	245.1	326.2

En el municipio de Tequila Jalisco, tenemos en verano entre 9 y 10 horas de exposición solar efectiva, mientras que en invierno es de entre 8 y 9 horas, eso nos convierte en un lugar muy privilegiado. Con mediciones directas de nuestra propia estación meteorológica, la irradiancia recibida suele pasar de los 1000 W/m² en tierra. Con estos datos parece factible pensar que las estimaciones hechas de la irradiancia solar en esta zona del estado está siendo subestimada (5.57 Kwh/m² día) [4]. Los datos de horas sol e irradiancia en el municipio de Tequila, que, de acuerdo a ello, estaríamos calculando valores mayores de 6 Kwh/m² día.

IV. DISCUSIÓN

Recaudamos los datos necesarios de todo un año para luego hacer las pruebas estadísticas de distribución (K-S), caracterizando así el comportamiento de los datos en una distribución de Gauss o normal. Luego, trabajamos con los perfiles ajustados para obtener los parámetros estadísticos que nos permitieron comparar y analizar nuestros resultados con otras mediciones hechas sobre todo en la zona metropolitana de Guadalajara [4].

Es evidente que México es uno de los mejores países del mundo para aprovechar la radiación solar en todos los sentidos. Países como Alemania y España que ya lo hacen, tienen hasta una radiación promedio de menos de la mitad y un 70 % respectivamente de lo que recibe México. Entonces, tomando como referencia estos países donde ha resultado un éxito la implementación de un sistema que aprovecha de forma eficiente la radiación para convertirla en energía eléctrica, es evidente que en el caso de nuestro país se tiene un potencial enorme para explotar este método de obtención de energía.

V. CONCLUSIÓN

Al estar el municipio de Tequila en la zona del Cinturón Solar Global dado su localización dentro de la zona tropical en el mundo y recibiendo una de las mayores radiaciones solares en el la tierra concluimos:

1.- Existe un enorme potencial en la zona del municipio de Tequila Jalisco para el aprovechamiento de la radiación solar tanto en su modo de tipo térmico como fotovoltaico para aprovechar la energía que viene del sol.

2.- Analizamos la distribución de los datos de la irradiación diaria para comprobar que siguen un patrón de distribución normal y poder obtener parámetros estadísticos en los cuales basar este trabajo.

3.- Para el año particular del 2020, hemos contabilizado 300 días despejados, 37 parcialmente nublados, 21 medio nublados y 7 días muy nublados con un criterio sobre la distribución de los datos considerando el FWHM.

4.- Hemos estimado una radiación promedio de 5.63 Kwh/m² que nos da un cálculo anual de 2055 Kw/m² que están dentro del rango dado por las estimaciones hechas por otros estudios a nivel nacional y mundial.

Ya en los últimos años se han venido implementado la instalación de paneles solares en lugares donde las condiciones sean económicamente rentables, pero es muy prometedor que cada vez más, a medida que pasa el tiempo, la rentabilidad de aprovechar la energía solar es más accesible.

No cabe duda que el aprovechamiento de la irradiancia solar será crucial en el desarrollo de nuestra comunidad y el mundo al utilizarse ampliamente en aplicaciones industriales, científicas, de energías renovables y recursos hidrológicos, así como en el desarrollo de modelos de transferencia de radiación, química y atmosféricos.

REFERENCIAS

- [1] E. Kabir, P. Kumar, A. A. Adelodun, and K.-H. Kim "Solar Energy: Potential and Future prospects", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82 pp. 89-900, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.
- [2] M. Hart, *Hubris: The troubling Science, Economics, and Politics of Climate Change*. Philadelphia, PA, USA: Compleat Desktops Publishing 2015.
- [3] M. A. Al-Tameemi and V. V. Chukin, "Global water cycle and solar activity variations", *Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol. 142, pp. 55-59, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.02.023>.
- [4] H. Ulloa, M. Garcia, A. Pérez, A. Meulenert y D. Ávila, "Clima y radiación solar en las grandes ciudades: zona metropolitana de Guadalajara (estado de Jalisco, México)," *Investigaciones Geográficas*. no. 56, pp. 165-175, 2011.
- [5] (2023) Secretaría de Energía. [En Línea]. Disponible en: <http://www.sener.gob.mx>
- [6] A. González Salazar, L. Loza Ramírez y J. H. Gómez Sención, "Características climáticas generales en la zona metropolitana de Guadalajara (ZMG)," *Sincronía*, No. 54, pp. 67-80, 2010.