

Characterization of Photovoltaic Solar Energy Using Muneer Aniso Tropic Model

Caracterización de Energía Solar Fotovoltaica utilizando el Modelo Aniso Trópico de Muneer

E.N. De la Torre¹ L. F. Tipán²

¹Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador
E-mail: edel4@est.ups.edu.ec

²Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador
E-mail: ltipan@ups.edu.ec

Abstract

In this article, the solar resource is evaluated in order to determine its characterization using Muneer's anisotropic model. A conceptual analysis of the diffuse irradiance of the sky is also carried out, as well as an analysis of the model since a distinction is made between shaded and unshaded surfaces and, within the latter, between covered or clear skies. A mathematical model was carried out that based on the aforementioned model, the characterization of the solar resource was carried out, which is focused on the production of electrical energy. If you defined the parameters to be considered in the model, you will proceed to model it using Matlab with measurements of solar radiation taken from the Universidad Politécnica Salesiana.

Index terms— Anisotropic models, Diffuse, Incident radiation, Photovoltaic effects, Solar energy .

Resumen

En este artículo se evalúa el recurso solar con el fin de determinar su caracterización mediante el modelo anisotrópico de Muneer. En comparación con el modelo de variables difusas de Liu Jordan. Se realiza un análisis conceptual de la irradiancia difusa del cielo al igual que un análisis del modelo ya que este distingue entre superficies sombreadas y no sombreadas y dentro de estas últimas entre cielos cubiertos o despejados. Se desarrolló un modelo matemático que en base al modelo ya mencionado, se realice la caracterización del recurso solar, la cual está enfocada a la producción de energía eléctrica. Ya definidos los parámetros a considerar en el modelo, se procederá a modelar el mismo mediante Matlab con mediciones de radiación solar tomados de la Universidad Politécnica Salesiana.

Palabras clave— Modelo Anisotropico, difuso, radiación incidente, efecto fotovoltaico, Energía solar

Recibido: 20-10-2020, Aprobado tras revisión: 11-01-2021

Forma sugerida de citación: De la Torre, N.; Tipán, L. (2021). "Caracterización de Energía Solar Fotovoltaica utilizando el Modelo Aniso Trópico de Muneer". Revista Técnica "energía". No. 17, Issue II, Pp. 65-73

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2021 Operador Nacional de Electricidad, CENACE

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, como la tecnología tiende a evolucionar, se ha visto un incremento en la demanda de energía proveniente del sol en lugares urbanos, debido al crecimiento de la eficiencia energética. La energía y el medio ambiente son dos conceptos que van de la mano, ya que se busca producir energía eléctrica, pero con un mínimo impacto ambiental, esto se encuentra entre los retos más esenciales para el mundo en general. La energía solar fotovoltaica es una tecnología que ha llamado mucho la atención por su viabilidad económica y alta accesibilidad. [1] Es indispensable conocer el modelo de la célula fotovoltaica, el cual evalúa el rendimiento de un panel fotovoltaico, y también contribuye a la obtención de curvas de corrientes versus voltaje y potencia versus voltaje, para distintas modificaciones ajenas como la temperatura e irradiancia. [2][3]

En ciudades donde existen una gran cantidad de edificios y la demanda de energía eléctrica es alta, es factible la instalación de paneles solares para promover el autoconsumo. Para la estimación o aproximación de la energía solar en diferentes áreas, esta se puede adquirir de estaciones de monitoreo meteorológico o solar, en las cuales los valores, como la irradiancia se registran en planos horizontales, en cambio para valores en planos inclinados o verticales son muy pocos estos registros, para la energía solar en particular la radiancia difusa, en lugares urbanos es bastante común requerir irradiancia en superficies verticales, esto quiere decir que existe un gran grupo de modelos los cuales pretenden relacionar la radiación difusa en una superficie inclinada con la medida en una superficie horizontal [3][4]. El hecho de que se evidencie la existencia de muchos modelos, nos indica la dificultad que hay para convertir la radiación difusa medida en una horizontal en superficie inclinada, como ya se mencionó hay un sin número de modelos los cuales tienen algunas variaciones que pueden depender de los meses, la inclinación, la orientación, pero la radiación difusa necesita en gran parte de las condiciones del cielo, las cuales definen la distribución de radiación difusa sobre el domo del cielo. [5]

Cuando se pretende diseñar construcciones que cuenten con eficiencia energética, normalmente se necesita de la estimación de la radiación difusa directa y la iluminación en las superficies verticales y horizontales que esta estructura disponga. El aumento de la construcción de edificios de gran altura, tienden a presentar estructuras incorrectas, los cuales tienen una mínima entrada de luz del día, lo que se traduce en un efecto negativo ya que dependen mucho de la luz artificial. Por lo cual se ha visto necesario y llevado a cabo investigaciones de modelos de irradiancia, como es el caso del modelo de Muneer que se basa en datos meteorológicos en América del norte y Europa. [6]

La presente investigación aborda el tema sobre un modelo de radiación solar para superficies inclinadas el cual es o se le denomina modelo aniso trópico de Muneer.

Esta investigación se realizó debido a que no se tienen muchos trabajos en los cuales se aplique este modelo en específico y los pocos que hay, se enfocan más a Europa y América del norte, por lo cual con este trabajo se pretende realizar una caracterización de la energía solar fotovoltaica con fines de generación eléctrica. [5] [7].

El propósito de la investigación es generar energía eléctrica mediante el modelo en cuestión, el cual ayude a un mejor aprovechamiento de la energía debido a sus características, con el fin de que esta energía se utilice en la Universidad, con lo cual se obtendrá un menor consumo de electricidad, un menor impacto ambiental lo que se traduce a un gasto económico mucho más bajo [3].

2. MODELO ANISO TRÓPICO DE MUNEER

Este modelo se basa en la fórmula de Moon y Spencer la cual trata acerca de la distribución de luminancia bajo cielo nublado, también trata en el estudio de Kondratyev acerca de la similitud de la distribución de luminancia y radiancia.

En el estudio de Kondratyev se presenta la siguiente ecuación:

$$R_t = R_z * \frac{1 + b * \cos(z)}{1 + b} \quad (1)$$

R_t: radiancia de un parche en cielo cubierto.

R_z: radiancia cenital.

z: ángulo cenital.

b: índice de distribución de radiancia. [7]

Para el modelo de Muneer se integró la ecuación 2, dándolo como resultado una ecuación para cielo cubierto, en un inicio, este planteamiento se realizó solo para cielos cubiertos, sin embargo, las mediciones de Steven posibilitaron extenderlo para cielos no cubiertos.

Los modelos aniso trópicos tanto de Pérez como de Muneer son los más empleados debido a los resultados que los ubican dentro de los mejores modelos de cálculo de irradiancia más exactos. ESRA en sus siglas en inglés (European Solar Radiation Atlas) eligió al modelo de Muneer para emplearlo como base de datos de PVGIS en sus siglas en inglés (Photovoltaic Geographical Information System) debido a que este modelo posee una base teórica muy sólida y también porque tiene la capacidad de seguirse perfeccionando. [8]

El modelo de Muneer es seleccionado en esta investigación porque distingue entre superficies sombreadas y no sombreadas y dentro de estas últimas entre cielos cubiertos o despejados. Posee una base teórica muy sólida, los resultados que se han obtenido hasta el momento con este modelo lo ubican dentro de los mejores modelos de cálculo e irradiancia más exactos



2.1. Superficies sombreadas o superficies no sombreadas bajo cielo cubierto

A continuación, se detalla la respectiva ecuación, al igual que cada una de sus variables

$$Idif = Idif, h * \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \frac{2 * b}{\pi * (3 + 2 * b)} * \left(\cos(\beta) - \beta * \cos(\beta) - \pi * \left(\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right)^2 \right) \right] \quad (2)$$

Factor de inclinación.

Este factor nos indica la relación que existe entre la irradiancia difusa del fondo de la pendiente y la irradiancia difusa horizontal. [6]

$$FI = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \frac{2 * b}{\pi * (3 + 2 * b)} * \left(\cos(\beta) - \beta * \cos(\beta) - \pi * \left(\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right)^2 \right) \quad (3)$$

Idif: irradiancia difusa del cielo en superficie inclinada [W/m²].

Idif,h: irradiancia horizontal difusa del cielo [W/m²].

β : ángulo de inclinación [rad]. [5] [6]

b: índice de distribución de radiancia, este valor tendrá una variación dependiendo de si la superficie es sombreada o no sombreada bajo cielo cubierto. [8]

Con:

b= 5.73 para superficies sombreadas.

b= 1.68 para superficies no sombreadas bajo cielo cubierto.

Estos valores son utilizados para Europa [8][9], sin embargo, a nivel mundial Muneer propuso un valor promedio de b que es igual a 2.5 para superficies sombreadas o superficies no sombreadas bajo cielo cubierto, mientras que para superficies no sombreadas bajo cielo no cubierto el valor de b tiende a variar. [6]

2.2. Superficie no sombreada bajo cielo cubierto

Al igual que en las superficies sobradas o no sombreadas bajo cielo cubierto se involucran los parámetros ya mencionados, pero con una pequeña diferencia, en la cual se añaden una serie de parámetros como:

$$Idif = Idif, h * \left[\left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \frac{2 * b}{\pi * (3 + 2 * b)} * \left(\cos(\beta) - \beta * \cos(\beta) - \pi * \left(\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right)^2 \right) \right) * (1 - Al) + Al * Yb \right] \quad (4)$$

l=Ih/Ioh: Índice de anisotropía que dentro de este se encuentra, la irradiancia directa sobre una superficie horizontal (Ih) [W/m²] y la irradiancia solar extraterrestre

en una superficie horizontal (Ioh) [W/m²].

Yb=cos(θ)/cos(z): Factor que explica la dirección de la radiación del haz, θ : ángulo de incidencia [rad], z: ángulo cenital solar [rad]. [5]

La irradiancia solar extraterrestre que recibe la tierra, se le suele denominar constata solar, de manera que se le da un valor de

$$1367 \text{ [W/m}^2\text{]} [10]$$

Hay que tener mucho en cuenta que en este caso el factor de inclinación en uno de sus elementos se verá modificado, esto va a depender en qué parte del mundo se esté ubicado como por ejemplo en el norte de Europa, sur de Europa, Japón o para el resto del mundo.

Para el norte de Europa:

$$\frac{2 * b}{\pi * (3 + 2 * b)} = 0.00333 - 0.415 * Al - 0.6987 * Al^2 \quad (5)$$

Para el sur de Europa:

$$\frac{2 * b}{\pi * (3 + 2 * b)} = 0.00263 - 0.712 * Al - 0.6883 * Al^2 \quad (6)$$

Para Japón

$$\frac{2 * b}{\pi * (3 + 2 * b)} = 0.08 - 1.05 * Al - 2.84 * Al^2 \quad (7)$$

Para el resto del Mundo

$$\frac{2 * b}{\pi * (3 + 2 * b)} = 0.04 - 0.82 * Al - 2.026 * Al^2 \quad (8)$$

En nuestro caso, como nos encontramos ubicados en Quito-Ecuador escogeríamos la ecuación número 8.

2.3. Angulo Zenital

El ángulo cenital es aquel que se encuentra entre la dirección del sol y la vertical del sitio (cenit).

Se puede decir que el ángulo cenital (z) es complementario al ángulo de altura solar (h).

$$\cos(z) = \cos(\vartheta) * \cos(\delta) * \cos(w) + \sin(\vartheta) * \sin(\delta) \quad (9)$$

2.4. Angulo de Declinación (δ)

El ángulo de declinación es aquel que se encuentra entre el eje de la tierra y un plano perpendicular una línea entre el sol y la tierra. El ecuador de la tierra posee una inclinación de 23.45 grados con relación al plano de la órbita terrestre alrededor del sol, por lo tanto la



declinación cambia de 23.45 grados norte a 23.45 grados sur a lo largo de un año. [1]

$$\delta = \frac{23.45 * \pi}{180} \text{Sen} \left(\frac{2 * \pi * (284 + n)}{365} \right) \quad (10)$$

Donde n: es el día del año por ejemplo en nuestro caso el 1 de mayo sería el día número 121 del año y así sucesivamente el valor cambiaría según necesitemos [1][4][11].

2.5. Angulo de Hora solar (w)

El ángulo de declinación es aquel que se encuentra

El ángulo de hora solar es aquel que se encuentra entre la longitud de un sitio en la superficie de la tierra y la longitud paralela del haz del sol.

Podemos decir que el valor del ángulo solar al mediodía es cero, negativo en la mañana y positivo en la tarde. La tierra da una vuelta completa de 360 grados en 24 horas, por lo tanto, cada hora corresponde a 15 grados. [1]

Se calcula a través de la rotación diaria de la tierra alrededor de su eje. [11]

$$w = 15 * (TVS - 12) \quad (11)$$

2.6. Ángulo acimut (Y)

El ángulo de acimut es aquel que se encuentra entre el meridiano y la ubicación de la superficie vertical, la cual pasa a través del sol. [11]

$$\text{Sen}(Y) = \frac{\text{Cos}(\delta) * \text{Sen}(w)}{\text{Cos}(h)} \quad (12)$$

2.7. Ángulo de altura solar (h)

El ángulo de altura solar o también denominado altitud es aquel que se encuentra entre la dirección del sol y la superficie horizontal. [11]

$$\text{Sen}(h) = \frac{\text{Sen}(\vartheta) * \text{Sen}(\delta) + \text{Cos}(\vartheta) * \text{Cos}(\delta) * \text{Cos}(w)}{\text{Cos}(\delta) * \text{Cos}(w)} \quad (13)$$

2.8. Ángulo de Incidencia (θ)

El ángulo de incidencia es aquel que está formado por el vector de dirección del haz solar y el normal que sale de la superficie. [11]

$$\begin{aligned} \text{Cos}(\theta) = & \text{Sen}(\delta) * \text{Sen}(\vartheta) * \text{Cos}(\beta) - \\ & \text{Sen}(\delta) * \text{Sen}(\vartheta) * \text{Cos}(Y) + \text{Cos}(\delta) * \\ & \text{Cos}(\vartheta) * \text{Cos}(\beta) * \text{Cos}(w) + \text{Cos}(\delta) * \\ & \text{Sen}(\vartheta) * \text{Sen}(\beta) * \text{Cos}(Y) * \text{Cos}(w) + \\ & \text{Cos}(\delta) * \text{Sen}(\beta) * \text{Sen}(Y) * \text{Sen}(w) \end{aligned} \quad (14)$$

2.9. Ángulo de Inclinación (β)

El ángulo de inclinación es aquel que está formado por la superficie plana con la horizontal. [12] [13]

2.10. Ángulo de Latitud (ϕ)

El ángulo de latitud es aquel que se encuentra formado por la línea radial la cual une la ubicación al centro de la tierra con la proyección de la línea en el plano ecuatorial. [12][13]

2.11. Modelo de células solares de un solo diodo

Una celda fotovoltaica bajo el modelo detallado puede ser representada mediante un circuito eléctrico como el de la Figura 5. [3]

Como se puede apreciar en el circuito eléctrico tenemos una corriente I_{ph} , una corriente I_d , una corriente I_{Rp} y por último una corriente I las cuales se describirán más adelante.

También está constituido por dos resistencias una conectada en paralelo, llamada R_p la cual representa las fugas de corriente en la unión p-n y por último una resistencia R_s conectada en serie la cual representa las pérdidas en los contactos, en algunos casos estas dos resistencias no tomadas en cuenta debido a que adoptan valores bastante grandes en el caso de R_p y valores bastante pequeños en el caso de R_s . [16]

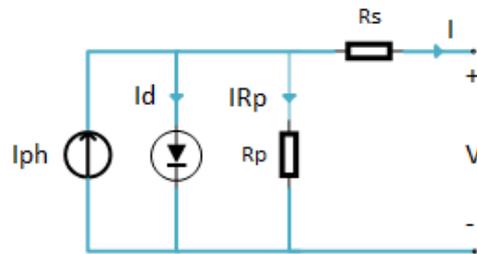


Figura 1: Circuito equivalente de una celda o celular solar (modelo detallado)

Este es uno de los modelos que más se aproxima al trabajo real que realiza una célula solar. [17]

Según la Fig. 1 la cual representa al circuito equivalente de una celda solar (modelo detallado), si se le aplica la ley de corrientes de Kirchhoff obtendremos la siguiente ecuación:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (15)$$

I : corriente de salida de la celda solar.

I_{ph} : corriente foto generada.

I_d : corriente del diodo

I_{Rp} : es la pérdida de corriente en la resistencia en paralelo. [18]

Corriente foto generada

Podríamos decir que esta corriente es la más importante entre este conjunto de intensidades debido a que depende de la temperatura e irradiancia solar, siendo este último parámetro el que más nos interesa debido a que el modelo anisotrópico de Muneer pretende calcular la irradiancia difusa para una superficie inclinada.

Y se puede definir esta corriente por medio de la siguiente ecuación.

$$I_{ph} = I_{sc_((STC))} * [1 + K * (T - T_{(STC)})] * \frac{G}{G_{(STC)}} \quad (16)$$

El Standard Test Conditions que tiene como siglas (STC) o también llamado Condiciones Estándar de Medida, es un concepto o termino que utilizan los productores para realizar una serie de pruebas a los paneles fotovoltaicos dentro de un equipo denominado flash-test, este dispositivo es calibrado para que produzca una irradiancia de 1000 [W/m²], una temperatura de 25-27 [°C] o (298.15-300.15) [K] y un espectro de aire de masa de 1.5 (AM1.5), con el objetivo de establecer cómo reacciona el panel bajo estos estados y establecer las diferentes curvas que se presentan en hoja de datos.[19]

$I_{sc_((STC))}$: corriente de corto circuito en (Standard Test Conditions) o Condiciones Estándar de medida [A].

K: coeficiente de temperatura de la corriente de corto circuito [A/K].

$T_{(STC)}$: Temperatura nominal en Condiciones Estándar de Medida = 298.15 [K].

T: Temperatura de la celda solar [K].

G: Irradiancia que recibirá el panel solar [W/m²].

$G_{(STC)}$: Irradiancia nominal en Condiciones Estándar de Medida = 1000 [W/m²].[10][16]

Corriente del diodo

Cabe mencionar que esta corriente tal y como lo indica su nombre es la que circula por el diodo. De acuerdo a las características que posee un diodo semiconductor, podemos determinar la ecuación correspondiente para su corriente, denominada como ecuación de Shockley.

$$I_d = I_s * \left(e^{\frac{q*(V_d)}{Aq*k*T}} - 1 \right) \quad (17)$$

I_s : corriente de saturación del diodo [A].

q: carga del electrón = 1.6 X 10⁽⁻¹⁹⁾ [C].

V_d : voltaje del diodo [V].

A_q : factor de idealidad del diodo, el cual puede variar entre 1 y 2.

k: constante de Boltzmann = 1.38X10⁽⁻²³⁾ [J/K].

T: temperatura absoluta [K].

De acuerdo con [20] se puede dar un valor aproximado de 0.004 [A] a la corriente del diodo.

Corriente que expresa la disminución de corriente en la resistencia en paralelo. Esta es la última corriente que se describirá, pero no la menos importante, es la intensidad que atraviesa la resistencia en paralelo, la cual es definida a través de la siguiente ecuación

$$I_{Rp} = \frac{V_d}{R_p} \quad (18)$$

V_d : voltaje del diodo [V].

R_p : resistencia en paralelo [Ω].

2.12. Modelo Simplificado

Una celda fotovoltaica bajo el modelo simplificado puede ser representada mediante un circuito eléctrico como el de la Figura 2. [3]Este modelo es muy parecido al anterior, pero posee una pequeña modificación, de acuerdo al documento [20] podemos decir que la eficiencia de una célula solar no se verá modificada con el cambio de la resistencia en paralelo, como ya mencionamos anteriormente esta resistencia puede tomar valores muy altos y podríamos asumir que su valor es igual a infinito. R_p no representa un valor relevante de pérdida, por lo cual el termino I_{Rp} se simplificaría, aplicando la ley de corrientes de kirchoff obtenemos la siguiente ecuación.

$$I = I_{ph} - I_d \quad (19)$$

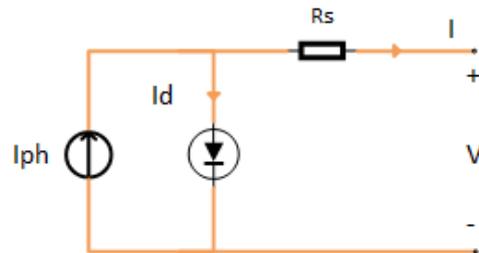


Figura 2: Circuito equivalente a una celda o celular solar (modelo simplificado). [Autor]

3. MODELO MATEMÁTICO

Para el desarrollo del modelo matemático se realizó un programa utilizando el software Matlab, el cual calcula la potencia en paneles fotovoltaicos que estén sombreados o no sombreados bajo cielo cubierto y paneles no sombreados bajo cielo no cubierto, ya que como se ha explicado anteriormente este modelo distingue entre estos dos tipos de condiciones. Se ingresará por teclado la opción correspondiente para poder calcular la potencia del panel en las condiciones ya mencionadas.

Sera el número 1 para las superficies sombreadas o superficies no sombreadas bajo cielo cubierto y el número 2 para las superficies no sombreadas bajo cielo no cubierto.

Al igual que el día, que va a variar entre el 1 al 31 de mayo de 2019, es decir el número 4 para el día 4 y así sucesivamente para cualquier día que se requiera.

Otros valores que son necesarios para el cálculo son: el ángulo de inclinación del panel en [°] y la temperatura de la celda solar en [°C]. Estos serán los únicos datos necesarios para poder calcular la potencia en un panel bajo las condiciones establecidas, ya que el modelo de Muneer, así como el de Perez, [7] permite determinar tanto la orientación (Y) como la inclinación (β) óptima a colocar un panel para tener la mayor captación y como resultado mayor producción de energía eléctrica.

3.1. Algoritmo

Paso 1: Inicio

Paso 2: Selección y asignación de variables.

Paso 3:

Opciones.

1. Superficies sombreadas o superficies no sombreadas bajo cielo cubierto.

2. Superficies no sombreadas bajo cielo no cubierto.

Día del mes.

Inclinación del panel fotovoltaico [°].

Temperatura de la celda fotovoltaica [°C].

Paso 4:

1. Superficies sombreadas o superficies no sombreadas bajo cielo cubierto

$$dif = Idif, h * \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \frac{2 * b}{\pi * (3 + 2 * b)} * \left(\text{Sen}(\beta) - \beta * \cos(\beta) - \pi * \left(\text{Sen} \left(\frac{\beta}{2} \right) \right)^2 \right) \right]$$

2. Superficies no sombreadas bajo cielo no cubierto.

$$dif = Idif, h * \left[\left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \frac{2 * b}{\pi * (3 + 2 * b)} * \left(\text{Sen}(\beta) - \beta * \cos(\beta) - \pi * \left(\text{Sen} \left(\frac{\beta}{2} \right) \right)^2 \right) \right) * (1 - Al) + Al * \sin \beta \right]$$

Paso 5:

Visualización de resultados.

Paso 6:

Fin.

Aquí se puede ver el algoritmo del programa para las dos condiciones que establece este modelo de radiación solar.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la validación del modelo propuesto se va a realizar la comparación de generación de energía frente a un sistema ya construido y ubicado en la Universidad Politécnica Salesiana campus sur, para ello necesitamos las características técnicas de este sistema las cuales se las describe en los párrafos siguientes:



Figura 3: Ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos ubicados U.P.S.

Para la medición del ángulo de inclinación se utilizó la ayuda de un inclino metro, como se puede observar en la imagen, los paneles fotovoltaicos se encuentran a una inclinación de 23.25°, este valor, se empleó para los respectivos cálculos de la potencia. También se manejaron algunos datos que se encuentran en la ficha técnica de los paneles fotovoltaico como son:

Tabla 1: Datos técnicos del panel

Parámetro	Valor
Número de celdas	72
Corriente de cortocircuito Isc	5.52[A]
Potencia pico de cada panel	190[W]
Coefficiente de T (NOTC)	0.052%/oC

STC:

Irradiancia 1000 [W/m²]

Espectro de masa de aire 1.5

Temperatura 25 [°C]

Velocidad del viento 0 [m/s]

NOTC:

Irradiancia 800 [W/m²]

Espectro de masa de aire 1.5

Temperatura 25 [°C]

Velocidad del viento 1 [m/s]

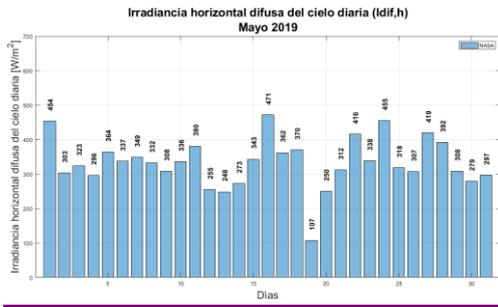


Figura 4: Valores diarios de irradiancia horizontal difusa del cielo (Idif,h)

En la Fig. 4 tenemos la irradiancia horizontal difusa del cielo (Idif,h), que son datos los cuales se obtuvieron de la NASA, según las coordenadas geográficas en donde se encuentra la Universidad Politécnica Salesiana campus Sur, Latitud: 0.281979-Longitud;78.549618.

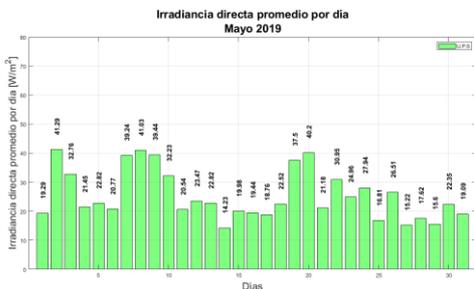


Figura 5: Valores diarios de la irradiancia directa promedio

La Fig. 5 indica la irradiancia promedio por día, estos valores fueron proporcionados por la Universidad Politécnica Salesiana de la base de datos de los paneles fotovoltaicos que se encuentran instalados en el campus Sur. Otro valor que se utilizó es la hora solar local (TVS) igual a 12 horas, finalmente utilizaremos una temperatura de la celda fotovoltaica de 30 °C.

4.1. Superficies sombreadas o superficies no sombreadas bajo cielo cubierto

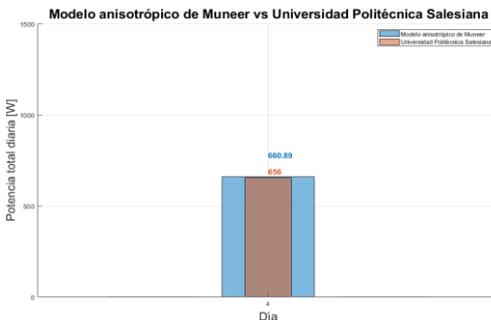


Figura 6: Potencia-día (superficies sombreadas o no sombreadas bajo cielo cubierto)

La Fig. 6 describe la comparación entre la potencia total diaria del modelo aniso trópico de Muneer y la potencia de los paneles que se encuentran instalados en la Universidad Politécnica Salesiana, cabe mencionar que en esta figura observamos dichas potencias de un determinado día, que en este caso es el día 4.

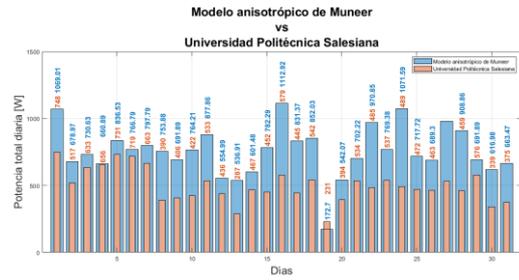


Figura 7: Potencia-mes (superficies sombreadas o no sombreadas bajo cielo cubierto)

En la Fig. 7 podemos observar potencias de todo un mes. Los valores de la potencia total diaria del modelo aniso trópico de Muneer son mayores a los de la U.P.S., por lo cual, podemos decir que este modelo aprovecha de manera más eficiente la radiación solar.

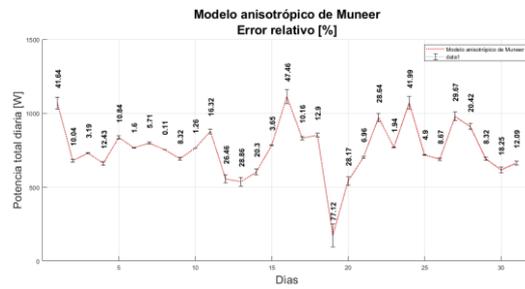


Figura 8: Error relativo (M.A.M - superficies sombreadas o no sombreadas bajo cielo cubierto)

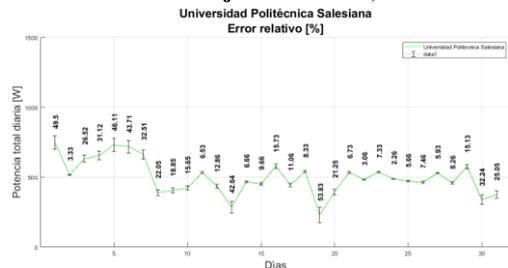


Figura 9: Error relativo respecto a sistema FV (U.P.S)

En la Fig. 8 y Fig. 9, nos encontramos con el error relativo [%] de las potencias del modelo aniso trópico de Muneer y de la Universidad Politécnica Salesiana respectivamente, estos resultados nos dan una idea del error que se está cometiendo en porcentaje.

Podemos verificar el error relativo tanto del modelo en estudio, como el de la U.P.S, en los cuales si realizamos un promedio Modelo aniso trópico de Muneer 17.55 y Universidad Politécnica Salesiana 19.26, tenemos como resultado que el modelo de la Universidad tiene un porcentaje de error más alto que el modelo de Muneer.

4.2. Superficies no sombreadas bajo cielo no cubierto

A continuación, se muestra la comparación del modelo tomando en consideración superficies no sombreadas.



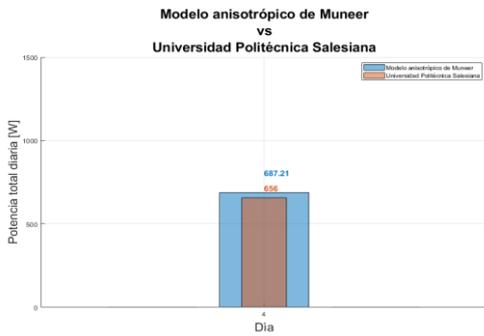


Figura 10: Potencia-día (superficies no sombreadas bajo cielo no cubierto)

En las Fig. 10 y Fig. 11, podemos ver prácticamente los mismos resultados con respecto a las figuras de las superficies sombreadas o no sombreadas bajo cielo cubierto, pero con la diferencia de que la potencia total diaria tiene un incremento, por lo cual los errores relativos del modelo anisotrópico de Muneer tienden a crecer.

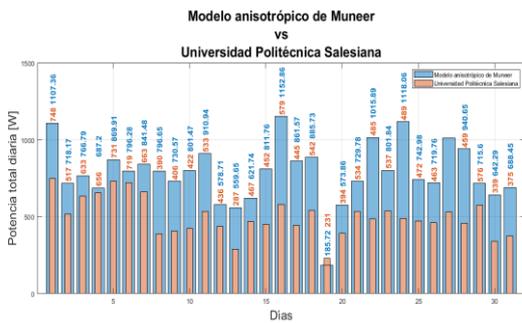


Figura 11: Potencia-mes (superficies no sombreadas bajo cielo no cubierto)

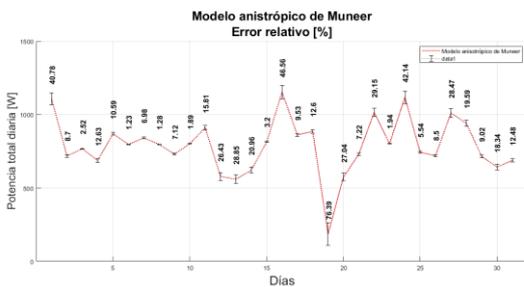


Figura 12: Error relativo (superficies no sombreadas bajo cielo no cubierto)

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la evaluación del recurso solar mediante el modelo propuesto, se puede comparar el desempeño del modelo anisotrópico de Muneer y el de un sistema ya implementado para este caso se utilizó el sistema fotovoltaico de la Universidad Politécnica Salesiana como ejemplo por la facilidad de acceso, se notó que el

modelo de Muneer tiene un mejor desempeño que el sistema fotovoltaico utilizado para el ejemplo, ya que, las potencias calculadas por el modelo de Muneer son mayores a las del sistema fotovoltaico ya implementado, esto se traduce a un mejor aprovechamiento de la radiación solar, con ello si en un futuro se pretende realizar una nueva implementación de un sistema fotovoltaico con la misma demanda de energía, se lo podría efectuar pero con un menor costo de inversión, dado que, se instalaría menos paneles fotovoltaicos para producir la misma energía demandada o una mayor.

Cabe resaltar que el modelo anisotrópico de Muneer distingue entre distintas condiciones del cielo (cubierto o no cubierto), con ello, se puede aplicar este modelo en cualquier periodo del año, por otro lado, si se determina adecuadamente el ángulo óptimo de inclinación, se tendrá una mayor captación de radiación solar.

Con la aplicación de este modelo, se obtienen buenos resultados, considerando la irradiancia solar sobre superficies sombreadas o no sombreadas bajo cielo cubierto y en superficies no sombreadas bajo cielo no cubierto y con ello solucionar problemas de generación eléctrica en lugares en donde el clima es muy variante y además en sitios que tengan muy poca disponibilidad de iluminación (luz natural).

Para último, analizando los paneles instalados en el sistema fotovoltaico de la Universidad Politécnica Salesiana se determina que tienen una inclinación de 23 grados, si por ejemplo se aumenta los grados de inclinación de 23° a 33°, la potencia total disminuye en un 7,08%, caso contrario si se disminuye los grados de inclinación de 23° a 13°, la potencia total aumenta en 4,88%, lo que denota que el modelo anisotrópico de Muneer nos da un punto óptimo de inclinación dependiendo de las características del lugar en el cual se implementará el sistema fotovoltaico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Ullah, H. Imran, Z. Maqsood, and N. Z. Butt, "Investigation of optimal tilt angles and effects of soiling on PV energy production in Pakistan," vol. 139, pp. 830–843, 2019.
- [2] Á. A. B. Rújula, Energías renovables: sistemas fotovoltaicos, 1st ed. Zaragoza, 2009.
- [3] Y. Chaibi, A. Allouhi, M. Malvoni, M. Salhi, and R. Saadani, "Solar irradiance and temperature influence on the photovoltaic cell equivalent-circuit models," Sol. Energy, vol. 188, pp. 1102–1110, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.07.005.
- [4] D. A. A. Lozano, "Evaluación de la orientación y el ángulo de inclinación óptimo de una superficie plana para maximizar la captación de irradiancia solar en cuenca-ecuador." Cuenca-Ecuador, p. 99, 2017.
- [5] Z. Li, H. Xing, S. Zeng, J. Zhao, and T. Wang, "Comparison of Anisotropic Diffuse Sky Radiance Models for Irradiance Estimation on Building



- Facades,” *Procedia Eng.*, vol. 205, pp. 779–786, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.010.
- [6] H. J. Kong and J. T. Kim, “Evaluation of global vertical illuminance and irradiance models against data from Yongin, South Korea,” *Energy Build.*, vol. 91, pp. 139–147, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.01.025.
- [7] S. M. Ivanova, “Estimation of background diffuse irradiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky: Part II - Horizontal surfaces,” *Sol. Energy*, vol. 100, pp. 234–250, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2013.12.010.
- [8] “Evaluación de recursos solares,” *Foreign Affairs*, vol. 91, no. 5, p. 316, 2017, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [9] M. C. Di Piazza and G. Vitale, *Photovoltaic Sources*. Springer London, 2013.
- [10] M. Nfaoui and K. El-Hami, “Extracting the maximum energy from solar panels,” *Energy Reports*, vol. 4, pp. 536–545, 2018, doi: 10.1016/j.egyr.2018.05.002.
- [11] S. P. Sukhatme and J. K. Nayak, “Solar Energy : Principles of Thermal Collection and Storage.” p. 425, 2008.
- [12] I. MONAR, “Diseño de una instalación fotovoltaica optimizando el ángulo de inclinación de los paneles solares,” Guayaquil- Ecuador, 2015.
- [13] J. de la Cruz, A. de la Cruz, and R. Úbeda, “Guía en de mantenimiento instalaciones fotovoltaicas”, Ediciones. Barcelona: ProQuest Ebook Central, 2009.
- [14] H. P. M. Palaguachi and C. V. P. Guiracocha, “Simulación del perfil tensión – corriente para paneles solares mediante convertidor cc-cc reductor,” Cuenca-Ecuador, 2017.
- [15] B. Khatherine and M. Valdiviezo, “Algoritmo de detección de puntos calientes en paneles fotovoltaicos,” 2018.
- [16] M. Sánchez, “Desarrollo de una herramienta para el modelado del comportamiento eléctrico de células solares,” 2019.
- [17] X. Jian and Z. Weng, “A logistic chaotic jaya algorithm for parameters identification of photovoltaic cell and module models,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 203, p. 164041, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijleo.2019.164041.
- [18] J. Cata and F. Rodríguez, “Análisis matemático de un panel solar fotovoltaico de silicio,” p. 98, 2015.
- [19] R. L. B. Louis, N. Boylestad, N. Décima, and E. Décima Edición, “Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos”. 2009.
- [20] E. Granda, J. Diaz, M. Jiménez, M. Osorio, and M. Gonzalo, “Modelado y simulación de celdas y paneles solares.” Chihuahua, 2013, doi: 10.13140/2.1.4192.8968.



Esteban Nicolás De La Torre.- Nació en Quito en 1995. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Carrera de electricidad de la Universidad Politécnica Salesiana en 2020. Sus áreas de interés son las energías alternativas y generación distribuida, actualmente realiza investigaciones sobre la optimización en MPPT de sistemas fotovoltaicos convencionales.



Luis Fernando Tipán. - Nació en Quito en 1982. Recibió su título de Ingeniera Electrónica en Control de la Escuela Politécnica Nacional en 2008. Recibió su título de Maestría en Eficiencia Energética en Escuela Politécnica Nacional en 2015. Su experiencia profesional la dedico principalmente al campo petrolero e industrial, su campo de investigación se encuentra relacionado con la Electronica de Control basada en tarjetas inteligentes domótica, Electrónica de los Sistemas de Potencia en energias alternativas.