



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE EL SEGUIMIENTO SOLAR FOTOVOLTAICO

Jorge M. Mendoza¹, Rafael D. Gómez^{*2}, Adrián E. Avila³ y Valery J. Lancheros⁴

^{1,4} Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Córdoba
Carrera 6 No. 76-103 Montería Colombia
correo-e: jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co, valancheros@hotmail.com

^{*2,3} Facultad de Ingeniería Mecánica – Universidad Pontificia Bolivariana
Km 8 vía Cereté Montería Colombia
correo-e: rafael.gomezv@upb.edu.co, adrian.avila@upb.edu.co.

RESUMEN

La energía eléctrica en la actualidad es indispensable para cualquier proceso y actividad que realice el hombre. Conocer los potenciales reales de aprovechamiento de las energías alternativas ha impulsado esta investigación en la cual se evaluó el potencial de generación de energía eléctrica aprovechando la radiación solar y teniendo en cuenta factores como la nubosidad y la opción de seguimiento de ángulo solar. De esta forma se obtuvieron los verdaderos potenciales de aprovechamiento en el Departamento de Córdoba – Colombia, por ende, se implementó la medición de potencia en un módulo fotovoltaico mono-cristalino con rendimientos según el fabricante de 16% con radiación incidente de 100W/m² y 25°C de temperatura en las celdas (condiciones controladas). No obstante la Costa Atlántica, alcanza temperaturas ambientales de 39°C lo que reduce la eficiencia de los paneles así como la nubosidad en época invernal. A partir del estudio de las condiciones del lugar, los modelos matemáticos y las variables que influyen en la captación de energía solar, Para determinar la generación de potencia se partió de estimar la radiación incidente en una superficie, y luego se validó experimentalmente para obtener dicha potencia. Usando un Piranómetro de radiación global tomando muestras durante el transcurso del día, en diferentes condiciones de tiempo que se consideraron entre un día no lluvioso. Los datos obtenidos previos al diseño de experimento, fueron empleados para ajustar el modelo de radiación, el cual arrojó valores de irradiación solar sobre el lugar de estudio. Conociendo los niveles de radiación se procedió a ajustar la orientación y el ángulo de inclinación de la superficie captadora, garantizando la perpendicularidad de los rayos incidentes; hecho que conlleva al aumento del rendimiento del colector. Consecuente a esto se obtuvo que la mayor potencia arrojada por el panel en 111.51 W/m² a las 13:36 con un ángulo de 0° y un porcentaje de nubosidad de 0,65 % en escala del método de cielo cubierto, teniendo un rendimiento aproximadamente de 12.8%. En promedio las eficiencias sin seguimiento solar se registraron en un 12.1% en contraste a el rendimiento del panel con seguimiento, el cual mostro valores de 12.91%. Dicha variación es significativa en horarios donde la radiación es más fuerte por lo que se puede recomendar que los seguidores sean de gran utilidad.

Palabras claves: .Panel solar, Fotovoltaico, Nubosidad, Piranómetro, Superficie respuesta



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica en la actualidad es indispensable para cualquier proceso u/o actividad que realice el hombre. Esta tiene su aplicabilidad desde una bombilla incandescente hasta una computadora. Existen muchas formas de generarla, sin embargo no todas son viables debido a que algunas no son muy amigables con el medio ambiente, otras porque son demasiado costosas para quien las genera y resulta poco rentable en pequeña escala. Una vez obtenida, la potencia eléctrica debe ser conducida a los sitios de demanda aumentando el costo del servicio, convirtiéndose este en una barrera para lugares remotos de las redes eléctricas; tales como, fincas, colegios, etc.

Como solución al problema de carencia del servicio eléctrico, en muchos lugares aislados del sistema interconectado nacional se ha optado por generación con paneles fotovoltaicos, que transforman directamente la energía lumínica del sol en energía eléctrica. El problema de implementar esta tecnología es el alto costo que constituye adquirir los paneles (inversión inicial), pues una vez en operación esta resultaría muy económica.

Uno de los factores que hacen costosa la adquisición de un sistema fotovoltaico (quizás el más importante) es la baja eficiencia de los módulos que van desde un 15-35%, y cuyo efecto es para satisfacer la demanda adquirir demasiados paneles. Además el rendimiento se ve afectado por la nubosidad y el ángulo de incidencia de la radiación.

Consecuentemente, se plantea una interrogante de qué tan eficiente es la generación eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos. Para ello se evaluó, el potencial de generación eléctrica, a partir de la captación de radiación solar. Para la implementación de esta tecnología, es necesario hacer un estudio de los índices de radiación solar a distintas horas del día, para estimar el máximo y mínimo índice de energía solar disponible en condiciones de tiempo normal.

Partiendo de que es posible aumentar el rendimiento del panel, garantizando la perpendicularidad de los rayos incidentes en este, se seleccionaron varios modelos matemáticos de radiación solar para validar la experimentación, llevada a cabo en un sistema fotovoltaico o colector solar, y de esta forma establecer el potencial de generación eléctrica en el lugar de estudio bajo las condiciones climáticas, es decir si el cielo está despejado o cubierto de nubes; optimizando las condiciones con el seguimiento solar.

En Colombia el aprovechamiento de la energía solar es muy bajo en comparación con otros países, contado con buenas condiciones para un rendimiento óptimo a la hora de implementar paneles solares para captar la energía del sol, Gracias a la energía solar se está desarrollando un tipo de energía limpia y segura que no contamina; además de ser un ahorro de dinero debido a que es el único suministro de energía que se considera eterno "Luz Solar" la cual nos llega de manera continua y eficiente. Esta tecnología está revolucionando a nivel mundial y por fin en Colombia podemos disponer de energía eléctrica independiente para nuestros hogares o en el campo donde la electrificación es casi "imposible" de llevar. En el departamento de Córdoba es poco inusual observar formas masivas de captación de la energía solar, sin embargo contamos con una ubicación privilegiada para realizar captaciones de energía del Sol implementando modelos teóricos y evaluándolos experimentalmente, para así adaptarlos a las condiciones de nuestro



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

departamento aumentando el rendimiento del dispositivo. La energía que nos suministra el sol podría ser una salida en las zonas de difícil acceso en las poblaciones rurales del departamento de Córdoba.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

En la investigación realizada se optimizó el aprovechamiento energético del uso de la energía del sol en un colector solar (ver figura 1) para llevar a cabo el desarrollo de seguidores solares fotovoltaicos [1]. Los cuales constarán con el método de cielo cubierto para amortiguar uno de los factores más incidentes, el cual es la nubosidad aumentando el rendimiento con la variación angular [2], para ello se emplearon en la investigación un módulo compuesto por células de silicio mono-cristalino de 200W, con una eficiencia comercial de 16% bajo condiciones de laboratorio de 100W/m² y 25°C. La medición de la radiación incidente el panel se realizó con un pirómetro de radiación solar global en (W/m²) usando un fotodiodo de silicio (400nm-1100nm) con una incertidumbre menor al 4%.



Figura 1. Colector Solar

Cuando se habla de modelo físico se hace referencia a los métodos y los principios para obtener el modelo, consistente en una serie de parametrizaciones basadas en integraciones previas de las funciones de transmitancia espectral, teniendo en cuenta separadamente las fuentes de extinción de la radiación que existen en la atmósfera; esto conlleva a una relación entre la aproximación puramente teórica de los “modelos rigurosos” (basados en una solución de la ecuación de transferencia radiativa), y la aproximación empírica que se utiliza en los “modelos de regresión”. Por orden cronológico se da a conocer, ligeramente, un conjunto de modelos de irradiancias solares. Algunos de ellos deben su interés a ser pioneros en este campo, otros introducen simplificaciones o mejoras sustanciales. Todos ellos han sido adoptados por la comunidad científica [3].

La necesidad de nuevas fuentes de energía ha renovado el interés por el aprovechamiento de la energía solar objetivo general de investigación donde la primera condición que debe reunir un sistema de aprovechamiento de energía solar poder recoger la mayor cantidad posible de energía recibida en un determinado lugar.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

Los sistemas actuales de seguimiento solar que se pueden encontrar en el mercado pueden enmarcarse en la siguiente clasificación: sistemas de seguimiento basados en foto-sensores y sistemas de seguimiento basados coordenadas calculadas, además, los métodos de seguimiento del sol por coordenadas calculadas obtienen la posición del sol mediante el cálculo de su trayectoria astronómica y no precisan, por tanto, de la presencia física de los rayos solares. Se utilizan frecuentemente en los sistemas de aprovechamiento de la energía solar que requieren un seguimiento indirecto del sol, como ocurre en el caso de los campos de helióstatos de las centrales solares de tipo térmico.

Según la Satel-light para maximizar el rendimiento de los módulos fotovoltaicos hay que garantizar la perpendicularidad entre los rayos incidentes y la superficie de estos. Es decir que el ángulo de incidencia [4], basándose en el sistema de coordenadas celestes horizontales que tiene como componentes, el ángulo azimutal y la altura solar ó su complemento ángulo cenital que permiten seguir la ubicación del sol de forma continua. Constructivamente se logra minimizar el efecto del ángulo de incidencia montando los módulos en sistemas de seguidor solar.

Partiendo de su importancia o no a la hora de la simulación de los datos obtenidos, para realizar un diseño óptimo del experimento, y mejorar las prestaciones del colector solar, donde la evaluación del rendimiento del panel convencional de forma experimental se mejorará el aprovechamiento de la energía solar una energía limpia y amigable con el medio ambiente. Con este proyecto se avanzó un poco sobre el uso de las energías renovables, en zonas donde no la hay en el departamento de Córdoba [5]

Según los métodos de índices de claridad y distribución de cielo cubierto (CLD) asociados al software MATLAB (imtool) con las mediciones tomadas se puede llegar a la siguiente tabla 1:

Tabla 1. Índices de claridad y distribución de cielo cubierto (CLD).

Matriz RGB	Tipo de Cielo	Kt (asociado)
255	Despejado	0.65
200	Parcialmente nublado	0.55
150	Parcialmente nublado	0.40
100	Nublado	0.30

Teniendo los parámetros y los metodos asociados con ayuda de MATLAB se promediaron los datos uno a uno (angulos y potencias), y matrices RGB es decir la variabilidad de R,G,B siendo una matriz "Nx3" para llegar al concepto RGB, se realizó una prueba anexa la cual consistia en tomar una haz de luz en primera instancia y llevarlo a una escala de grices para tomar los numeros correspondientes de R,G,B. Lo cual arrojó que todos estaban en un rango máximo de "255", como segunda instancia se tomo el mismo haz de luz contrapuesto con el color negro por que este absorbe la luz, simulando así una nube que no deja pasar la luz arrojando rangos mínimos de "0,7 ≈ 0" [6] teniendo así, rangos máximos y mínimos, se procesan las imágenes (ver figura 2) de acuerdo a las horas en las que fueron tomadas para mayor precisión, aplicando esta a una nueva medición [7], aplicando está a una nueva medición como se presenta en la siguiente imagen y matrices RGB de MATLAB (ver figuras 3 y 4).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

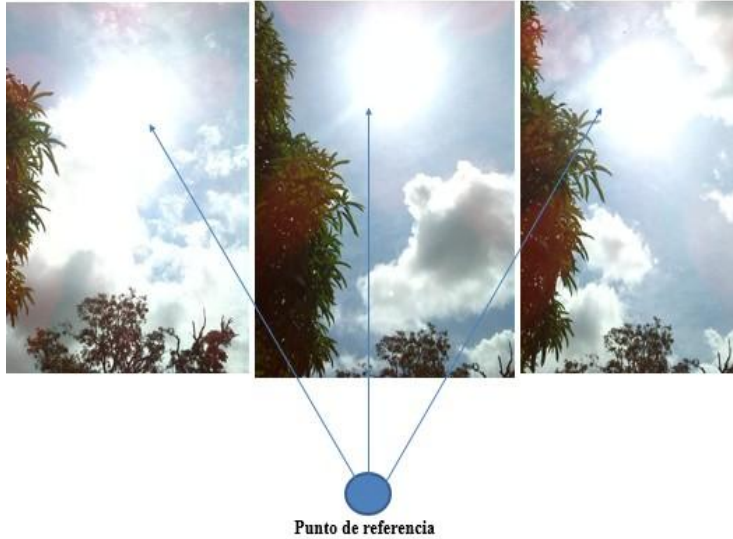


Figura 2. Nubosidad y movimiento del sol durante el día

Las siguientes imágenes fueron tomadas a las 8:00 a.m

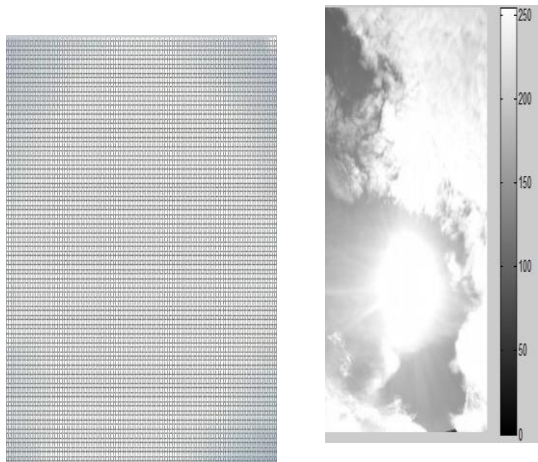


Figura 3. Escala de grises y Matriz RGB (sol)

Figura 4. Valores de la Matriz RGB

La figura 5 resume la metodología de medición en forma de bloque para llegar a los efectos analizados.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

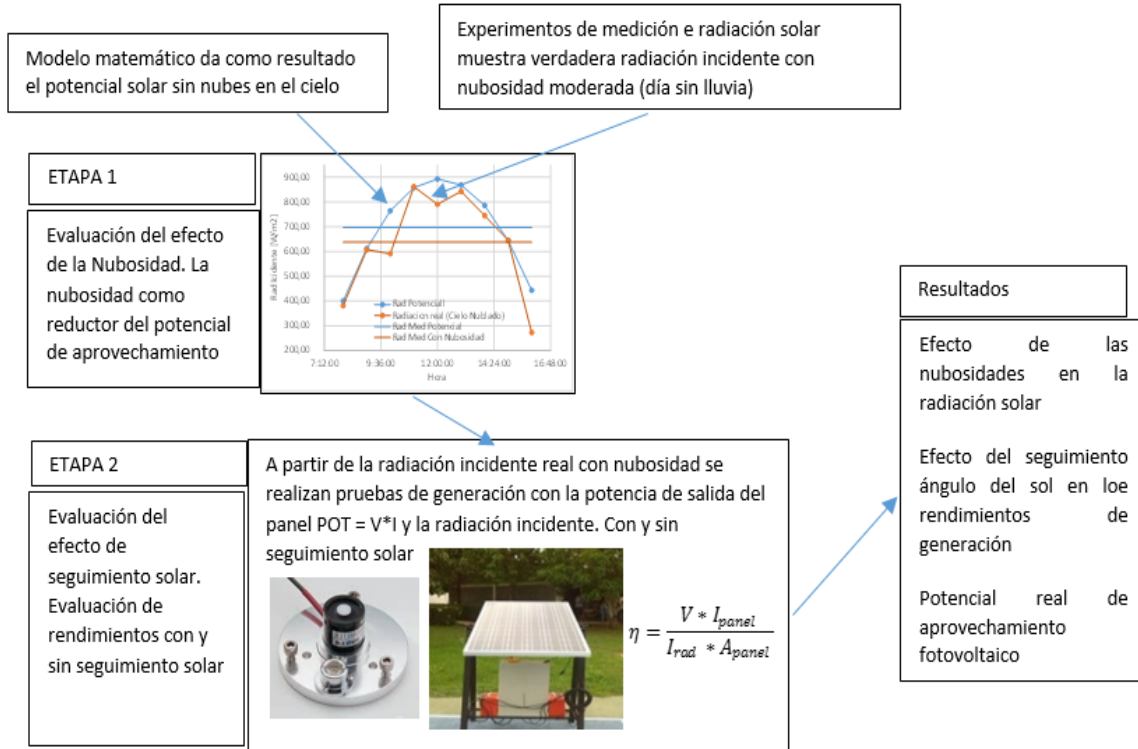


Figura .5 Diagrama de bloques del proceso de experimentación

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluó el efecto de la nubosidad moderada sin lluvia sobre la radiación incidente. Que permitió determinar que la nubosidad en el mes de agosto en el departamento de Córdoba – Colombia, reduce el potencial promedio de aprovechamiento de radiación solar incidente de 700W/m2 a 630W/m2 aproximadamente 10%. La idea de usar el método de cuantificación de índices de claridad y matriz RGB es la de correlacionar la radiación y la nubosidad sin requerir de instrumentación especializada por lo cual, los estudios puedan llevarse en simultaneo y con mayor número de datos empleando cámaras y Smartphone. (Ver figura 6).

Adicionalmente, como se puede evidenciar en la figura 7 y 8 investigando la perpendicularidad de los rayos solares se obtiene mayor potencia también cabe resaltar que los picos y los puntos donde es máximo, se presentan debido a que en la experimentación hubo nubosidad y como se presentan en datos anteriores de nubosidad se muestra cuanto potencia se puede perder por dichos efectos que son aceptables pero demuestran que buscando el ángulo se aumenta la potencia y el rendimiento del panel en la generación de electricidad.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

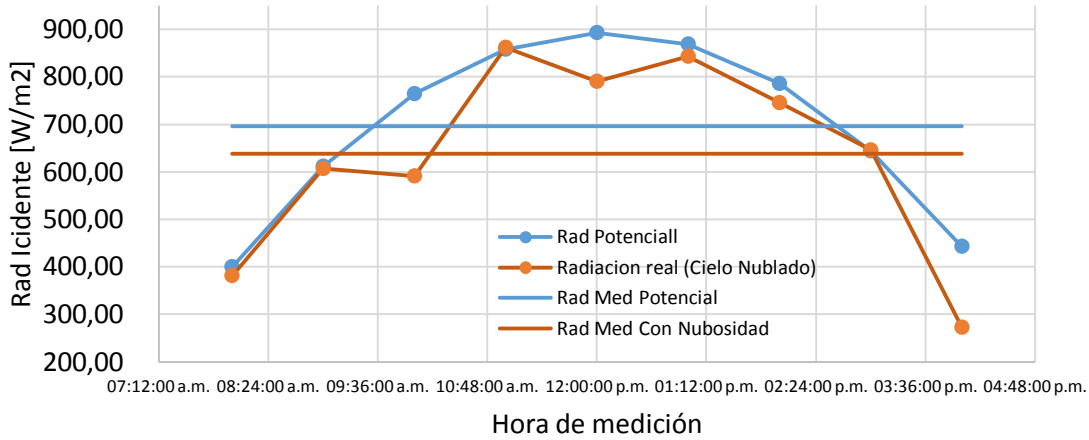


Figura 6. Comparaciones de la potencia variando el ángulo y sin variarlo

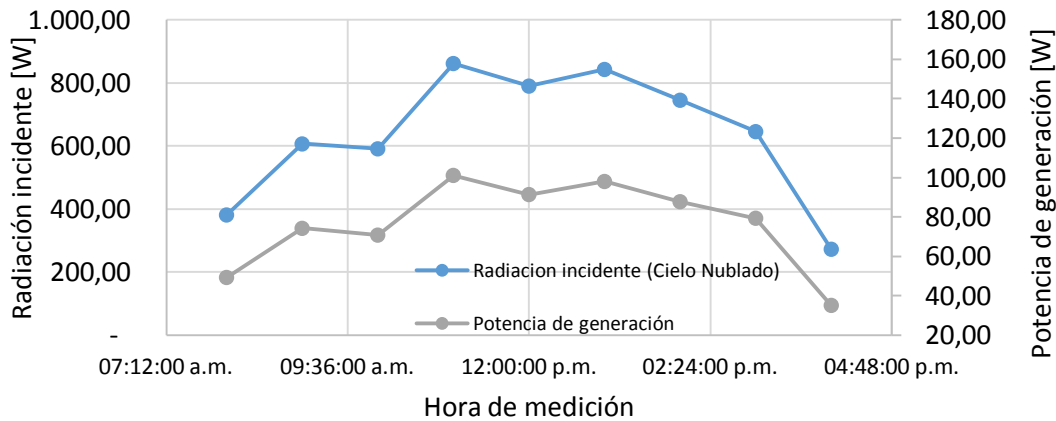


Figura 7. Comparaciones de la potencia variando el ángulo y sin variarlo

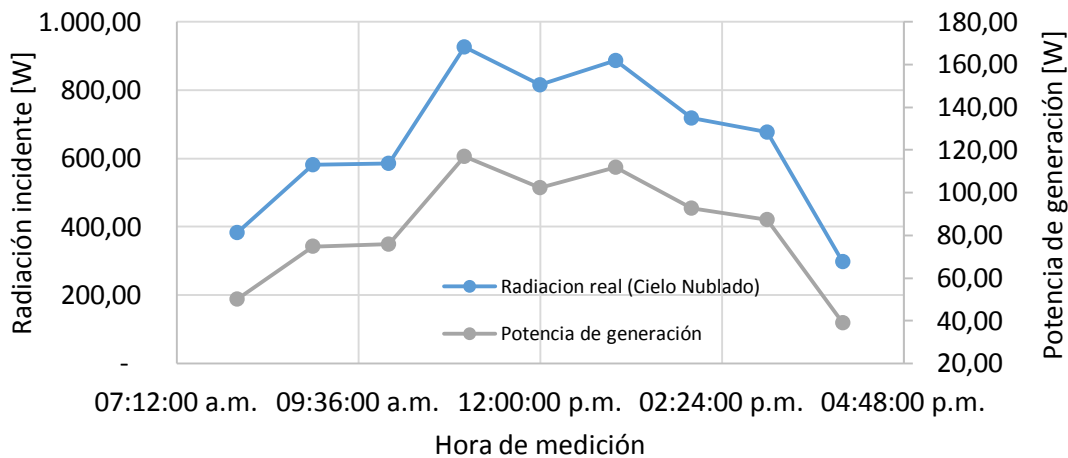


Figura 8 Evaluación del rendimiento variando el ángulo y sin variarlo



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Para los rendimientos se tomó como base potencia de generación con la corriente de salida del panel al voltaje de operación y la radiación solar incidente medida con el piranómetro en el área del panel. La figura 9 muestra la variación de eficiencias en el horario establecido. Es notable una mejora con el seguimiento, sin embargo ambas tienden a reducir en la zona de mayor radiación. Esto puede explicarse debido a que el incremento de temperaturas reduce la eficiencia.

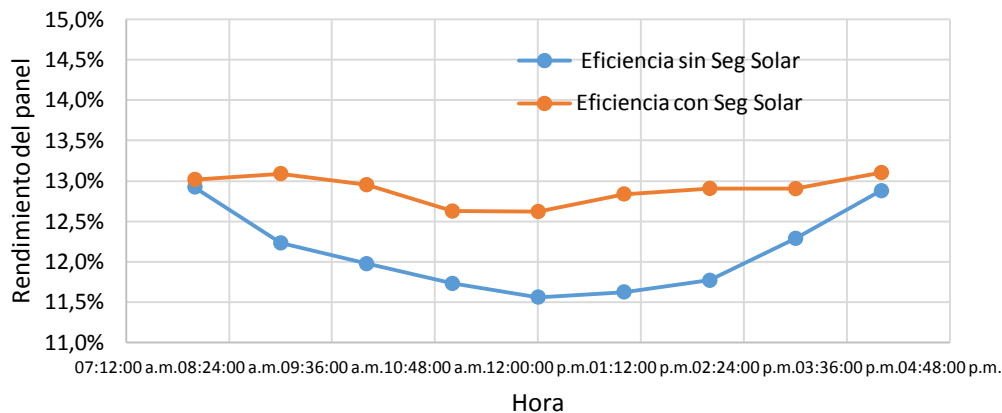


Figura 9. Eficiencias del colector solar variando el ángulo y sin variarlo

Se realizó un barrido donde se identificó cuáles son los límites tanto de tiempo y ángulos como se muestra en la siguiente tabla 2:

Tabla 2. Datos del diseño de experimento con los nuevos límites

hora	Angulo (°)	Potencia de Generación promedio [W]
7:12:00	0	68,27
7:12:00	20	69,15
7:12:00	40	83,77
7:12:00	60	69,10
10:24:00	0	99,95
10:24:00	20	99,19
10:24:00	40	94,81
10:24:00	60	86,27
13:36:00	0	111,51
13:36:00	20	94,75
13:36:00	40	81,67
13:36:00	60	57,02
16:48:00	0	34,52
16:48:00	20	34,19
16:48:00	40	35,52
16:48:00	60	40,23



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Como se observa en la figura 10 la diferencia del barrido las áreas rojas aumenta la potencia, lo cual garantiza el experimento, al ser notable que la potencia en definitiva depende del ángulo, y si se combina esto con la nubosidad. Teniendo en cuenta el gráfico es muy claro que buscar la perpendicularidad de la incidencia solar afecta drásticamente el rendimiento.

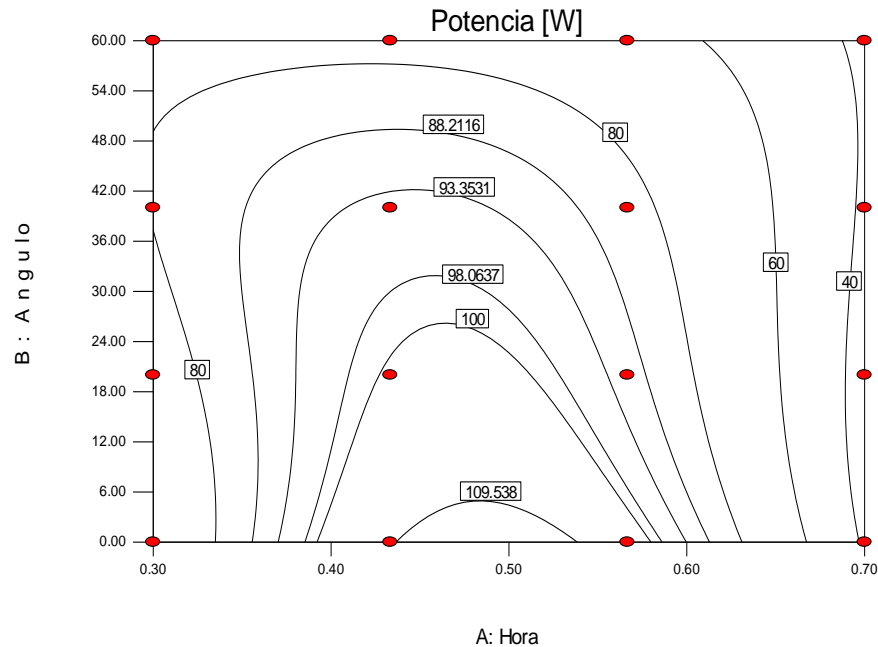


Figura 10 Potencia de generación con variación de ángulos y horarios

4. CONCLUSIONES

- Debido a la antigüedad de los modelos matemáticos precedentes se estima que continuar la verificación y optimización de manera teórica complicaría el trabajo debido a que muchas de las variables requieren equipo especializado para ser medidas, obstaculizando el método investigativo y experimental de este proyecto, no obstante e independiente de ello se llegó la selección del modelo fundamental el de Spokas & Forcella el cual resulta adaptable por que corrige un factor importante como lo es el efecto de los gases contaminantes presentes en la atmosfera lo que va de la mano con la nubosidad y el tipo de nube presente.
- Dejando de manera estática el panel solar su rendimiento solo se limita a un 12.1% de rendimiento en comparación con un 12.91% teniendo en cuenta la inclinación solar donde que es la intensidad de radiación emitida por el sol, no teniendo en cuenta el factor de nubosidad debido a que siempre se mantendrá disperso por las repeticiones experimentales.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- Existe un efecto positivo sobre la eficiencia en el seguimiento solar, sin embargo este es más marcado cuando la radiación incidente es mayor entre las 10:00 y 14:00.
- La variación angular es uno de los métodos más utilizados para mejorar el rendimiento de los paneles, lo que abre paso a realizar diseños de seguidores solares en base a una experimentación teniendo los mejores ángulos de inclinación de dicho panel solar a las diferentes horas del día, lo cual mejorara el rendimiento en un 92% y la eficiencia del 29,5% ya que corrige el efecto de la nubosidad del 8%.
- Teniendo los ángulos de inclinación del panel se pondría en marcha la realización de un seguidor solar basado en la tecnología de ARDUINO ya que este nos permite almacenar los ángulos encontrados de acuerdo al tipo de nubosidad que se presente en el día.

5. REFERENCIAS

[1] Simon G.W, L. R. Velocity fields un solar atmosphere and solar indication methods clearty. Astrophysical journal, vol 140 p. 1220, (2013).

[2] European Desalination Society. Sun tracking system productivity enhancement of solar Desalination and environment sponsored by the European Desalination society and center for research and tecnology (págs. 22-25). Halkidiki Greece: Center for REsearch and TEcnology. (2007).

[3] Martínez, M. A. Modelos empíricos para la estimación de la irradiancia solar ultravioleta. Badajoz, España: Universidad Extremadura (2004).

[4] Satel-Light. Obtenido de Satel-Light: <http://www.satel-light.com/>: the European Database of Daylight and Solar Radiation.com, (20 de febrero de 2001).

[5] Ecoresponsabilidad. Ecoresponsabilidad. Obtenido de seguidores solares, una optimización de la energía solar: <http://www.ecoresponsabilidades.es/ecoinnovacon/HISPANOTRACKERsegudoressolares.pdf> (18 de junio de 2009).

[6] Vázquez, J. Z. método de clasificación de días solares y aplicación de los métodos KT y análisis fractal. Sevilla: independiente. (2008).

[7] Appleyard, D. Solar trackers: Facing the sun. Renewable Energy Network for News. (2009).

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer los estudiantes Dagoberto Moreno y Plinio Angulo, así como a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Montería, y al aporte de recursos del convenio 753 de 2013 "DESARROLLO DE INTEGRACIÓN TECNOLÓGICA DE RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVABLES EN SISTEMAS PRODUCTIVOS AGRÍCOLAS Y AGROINDUSTRIALES MONTERÍA, CÓRDOBA, CARIBE" BPIN No. 2012000100026.