

Estudio y modelado de la recolección de energía de un generador fotovoltaico

Paulo Ángel Meza López
Departamento de posgrado
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
Chiapas, México
paulo_rolan@hotmail.com

Héctor Ricardo Hernández de León
Departamento de posgrado
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
Chiapas, México
hhernandezd@ittg.edu.mx

Ricardo Marroquín Arreola
Departamento de posgrado
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
Chiapas, México
marroquinarreola@gmail.com

Abstract—En este trabajo se muestra los resultados obtenidos de la simulación de un panel solar de 36 celdas con la herramienta Quite Universal Circuit Simulator (qucs). Se realizaron series de mediciones de corriente en corto circuito (I_{sc}) y voltaje en circuito abierto (V_{oc}) generadas por el panel solar, además de la medición de la temperatura del panel bajo diferentes condiciones de radiación. Se presenta el diseño de un sistema de medición de bajo costo que permite realizar la captura de las mediciones de I_{sc} y V_{oc} de forma autónoma y haciendo más rápida la toma de los datos en comparación con hacerlas de forma convencional con un multímetro.

Keywords—panel solar, temperatura del panel, punto de máxima potencia.

I. INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda de energía ha motivado una sobreexplotación de las fuentes de energía convencionales [1]. Por lo tanto, el uso progresivo de la fuente de energía renovable se ha convertido en esencial. Así, la energía fotovoltaica (EF) juega un papel importante como una forma de energía limpia y eficiente de generar electricidad. Estimar la energía proporcionada por los generadores fotovoltaicos es importante para analizar su viabilidad, supervisar su funcionamiento y garantizar óptima recolección de energía. Un generador fotovoltaico (GF) puede ser definido como un conjunto de módulos interconectados eléctricamente en combinaciones paralelas (controlador de carga y convertidor cd-cd) [2]. También incluye los cables y estructura que interconectan dichos módulos. La energía proporcionada por un GF depende de los parámetros atmosféricos, las características eléctricas del generador y su orientación e inclinación [3]. La recolección de energía de un GF es directamente proporcional a la irradiación global recibida en el plano del generador. Este valor no es real [4, 5] y deben tomarse en cuenta situaciones reales de pérdidas de energía producida, como las ocasionadas por la temperatura, desajuste, suciedad y polvo. Entonces, el cálculo de la recolección de energía de un GF no es trivial y requiere de la integración de métodos y algoritmos para su cálculo [6].

En [7] se presenta una breve discusión sobre la temperatura de operación de módulos / células solares basadas en silicio de grado comercial de un sol y su efecto sobre el

rendimiento eléctrico de las instalaciones fotovoltaicas. Se proporcionan tabulaciones adecuadas para la mayoría de las formas algebraicas conocidas que expresan la dependencia de la temperatura de la eficiencia eléctrica solar y, de manera equivalente, la energía solar. Finalmente, se discuten brevemente los aspectos térmicos de los principales métodos de clasificación de potencia / energía.

En [8] se propone un estudio comparativo detallado de cuatro técnicas de seguimiento de potencia máxima: Perturbación y Observación (P&O), Conductancia Incremental (InC), técnica de seguimiento basada en lógica difusa y un método, menos conocido, que utiliza solo la medición de corriente fotovoltaica. El inconveniente de los tres métodos estudiados; P&O, InC y un algoritmo de sensor, es que, en estado estable, el punto de operación oscila alrededor del punto de máxima potencia, lo que genera el desperdicio de energía disponible del panel de salida. Los resultados de la simulación muestran que el controlador lógico difuso propuesto (FLC) puede proporcionar una potencia máxima de rastreo más rápida y estable en comparación con los otros métodos estudiados.

El trabajo realizado en [9] tuvo como objetivo estudiar el comportamiento de diferentes técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) aplicadas a los sistemas fotovoltaicos. En este trabajo, se evalúan técnicas como el ascenso de pendientes (HC), la conductancia incremental (INC), la perturbación y la observación (P&O) y el controlador de lógica difusa (FLC). Se simuló un modelo de módulo fotovoltaico y convertidor de refuerzo de CC / CC con las diferentes técnicas de MPPT utilizando el software PSIM y Simulink. La co-simulación entre los paquetes de software PSIM y Simulink se utiliza para establecer la técnica FLC MPPT. La co-simulación se realiza para aprovechar cada programa y manejar cierta parte del sistema.

Otros autores presentan una nueva técnica de MPPT basada en el control de FL y el algoritmo P&O. El método propuesto incorpora las ventajas del P & O-MPPT para tener en cuenta los cambios lentos y rápidos en la irradiancia solar y el tiempo de procesamiento reducido para que el FL-MPPT resuelva problemas complejos de ingeniería cuando las funciones de membresía son pocas [10]. La prueba estándar

EN 50530 se utiliza para calcular la eficiencia del método propuesto en diferentes condiciones climáticas. Los resultados de la simulación demuestran que la técnica propuesta rastrea con precisión el punto de máxima potencia y evita el problema de la deriva, al tiempo que alcanza eficiencias superiores al 99.6%.

II. METODOLOGÍA

Desde la perspectiva de un circuito, una célula solar puede ser modelada por una fuente de corriente ideal (I_{ph}) en paralelo con un diodo y una resistencia R_{SH} , y a la salida una resistencia en serie R_s como se observa en la Fig. 1. Tomand en cuenta que la dirección de la fuente de corriente se opone al flujo de corriente del diodo [11].

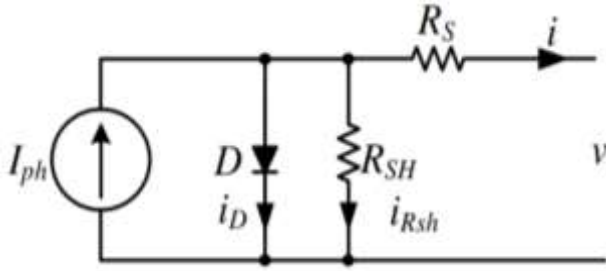


Fig. 1. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica utilizando el modelo exponencial.

Como se observa en la figura anterior, I_{ph} es la corriente fotogenerada en el Standar Test Condition (STC), i es la corriente de saturación oscura en STC, R_s es la resistencia de la serie de paneles, R_{SH} es la resistencia paralela del panel (derivación) [12].

La característica corriente-voltaje de un panel FV en el modelo exponencial es:

$$i = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{v+iR_s}{n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{v+iR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

V_t es el voltaje térmico de la unión:

$$V_t = \frac{AKT_{stc}}{q} \quad (2)$$

La ecuación (1) puede escribirse para I_{sc} , I_{mpp} e I_{oc} :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{v+iR_s}{n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{I_{sc} + R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

Para I_{mpp} :

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

Para I_{oc} :

$$I_{oc} = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{V_{oc}}{n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (5)$$

Donde I_{sc} es la corriente de corto circuito en STC, V_{oc} es el voltaje de circuito abierto en STC, V_{mpp} es el voltaje en el punto de máxima potencia (MPP) en STC, I_{mpp} es la corriente en el mpp en STC,

En la Fig. 2 se observa el circuito simulado en el programa *Quite Universal Circuit Simulator "qucs"* del modelo de una célula solar fotovoltaica con los parámetros del panel utilizado para el arreglo experimental.



Fig. 2. Simulación de una célula solar fotovoltaica.

Siguiendo este arreglo y uniendo en serie una cantidad suficiente se puede formar y simular un panel solar fotovoltaico, como se observa en la Fig. 3.

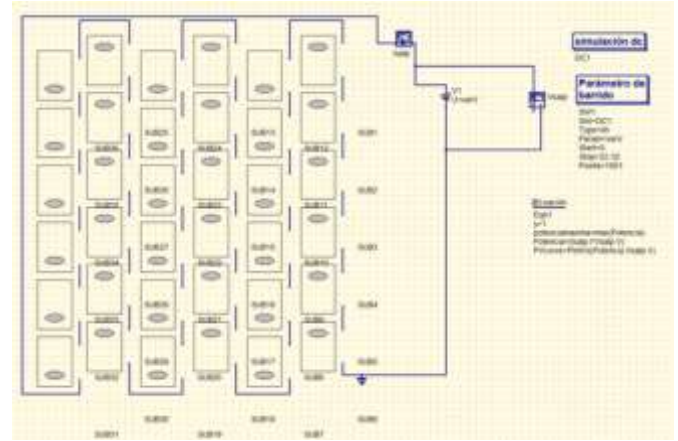


Fig. 3. Simulación del panel solar fotovoltaico.

Utilizando los parámetros adecuados del panel, se obtuvieron las gráficas I-V como se observa en la Fig. 4, en la cual se observa el comportamiento esperado de las curvas de potencia y corriente con respecto al voltaje del panel para un punto de máxima potencia (mpp) y con ello asegurar el correcto funcionamiento del sistema de recolección de energía en dicho punto.

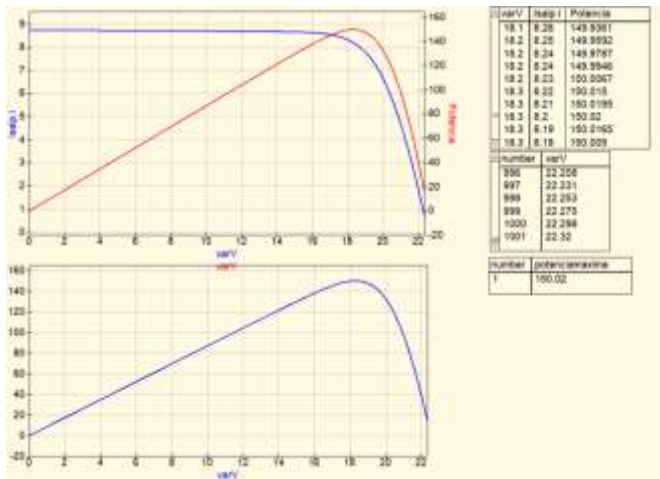


Fig. 4. Obtención e identificación del MPP por parámetros de barrido

III. ARREGLO EXPERIMENTAL

En esta sección se describe cada uno de los elementos que se utilizaron en el arreglo experimental y las variaciones de este, el componente principal para el arreglo es un panel fotovoltaico, que se muestra en la figura 5, las especificaciones de la celda solar se presentan en la Tabla 1.



Fig. 5. Panel solar del arreglo experimental.

TABLA I
ESPECIFICACIONES DEL PANEL DEL ARREGLO

STC	25 °C, 1 kW/m ²
Maximum power	10 Wp
Optimum operating voltage	17.5 V
Optimum operating current	0.58 A
Short circuit current	0.64 A
Open circuit voltage	21.5 V
Maximum system voltage	1000 V

Con base en las especificaciones de la Tabla I es necesario obtener el valor de la corriente y el voltaje para generar las características I-V del panel, además de considerar el valor de

la temperatura del panel y del ambiente los primeros dos parámetros se obtuvieron con el uso de un voltímetro y un amperímetro y el valor de la temperatura con sensores DHT11.

La adquisición de los datos para el caso de la corriente y voltaje se obtuvo de forma tradicional, el valor de la temperatura del panel y temperatura ambiente fue obtenida con dos sensores DHT11 con el uso del microcontrolador Arduino Uno; en este primer arreglo experimental el objetivo fue simular un panel instalado y obtener la respuesta del comportamiento del panel que fue situado sobre el techo de una casa particular como se muestra en la Figura 6.



Fig. 6. Instalación del panel solar al aire libre.

En una segunda adquisición y con la idea de disminuir la incidencia de las corrientes de aire sobre el arreglo se cambió la ubicación del panel hacia el “patio” de una casa quedando cubierto por cuatro paredes alrededor, es importante mencionar que la ubicación del panel no es arbitraria para ello se debe tomar en cuenta que los módulos solares del hemisferio norte estén dirigidos hacia el sur. Mientras que, en las regiones que son parte del hemisferio sur, se recomienda que los paneles solares se encuentren dirigidos al norte para los grados de inclinación del panel es igual al grado de latitud en donde se encuentra.



Fig. 7. Instalación del panel solar en espacio cerrado (4 paredes).

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las mediciones fueron obtenidas en el primer caso del arreglo experimental en un horario de 8:00 am a 8:00 pm cada 15 minutos en el que el panel se encontraba al aire libre.

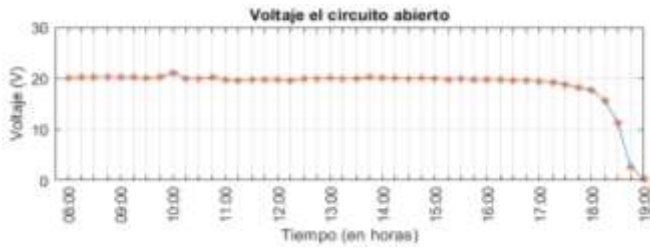


Fig. 8. Gráfica de voltaje en circuito abierto (V_{OC}) al aire libre.



Fig. 9. Gráfica de corriente en corto circuito (I_{SC}) al aire libre.

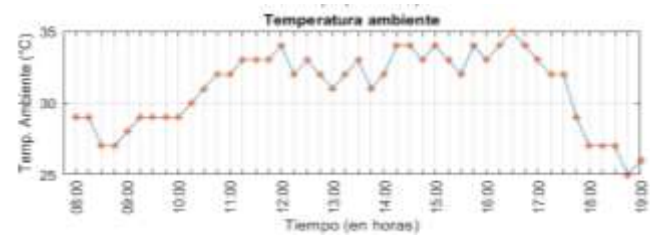


Fig. 10. Gráfica de temperature al aire libre.



Fig. 11. Gráfica de temperature del panel al aire libre.



Fig. 12. Gráfica de diferencia de temperatura aire libre.

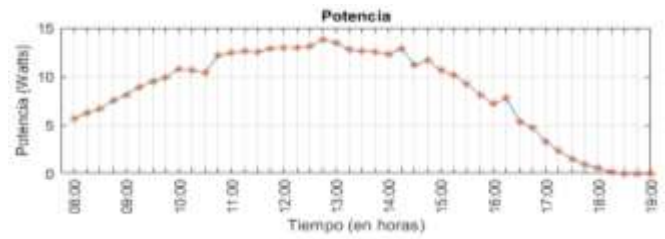


Fig. 13. Gráfica de potencia (P) al aire libre.

En el segundo caso en el que el panel se encontraba en el centro de cuatro paredes se obtuvieron de nuevo las gráficas de V_{OC} , I_{SC} , $T_{ambiente}$, T_{panel} , ΔT_{emp} y P como se observan en las Fig. 14 a la 19. El tiempo en que se hizo la medición fue un periodo más corto, de 11:00 am a 3:00 pm debido a que antes y después de esas horas, respectivamente, el panel se encontraba en condiciones de sombreado, estas mediciones se adquirieron con tiempo de 15 minutos entre cada muestra.

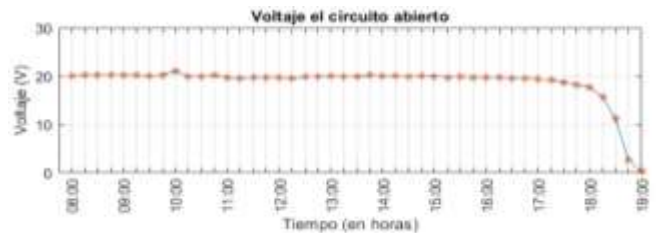


Fig. 14. Gráfica de V_{OC} en espacio cerrado (4 paredes).

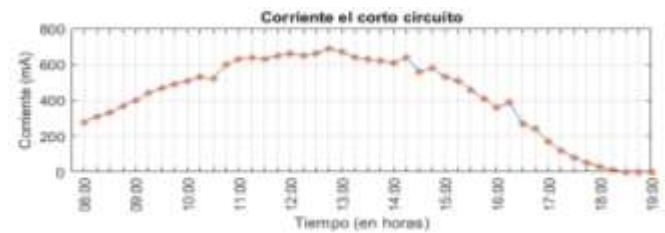


Fig. 15. Gráfica de I_{SC} solar en espacio cerrado (4 paredes).

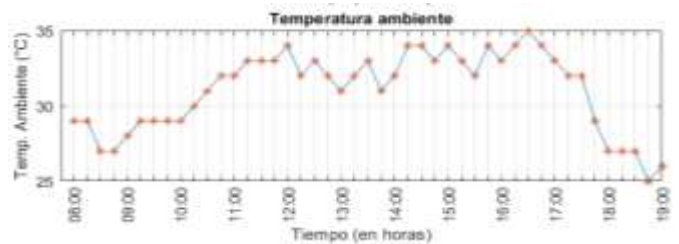


Fig. 16. Gráfica de temperature ambiente en espacio cerrado (4 paredes).

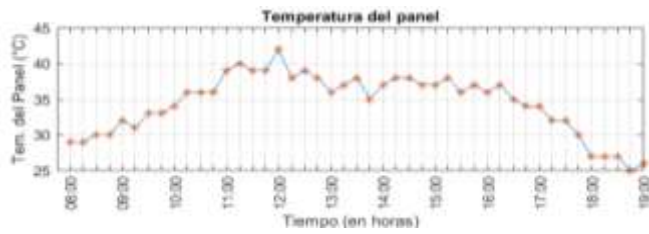


Fig. 17. Gráfica de temperature del panel en espacio cerrado (4 paredes).



Fig. 18. Gráfica de diferencia de temperatura en espacio cerrado (4 paredes).

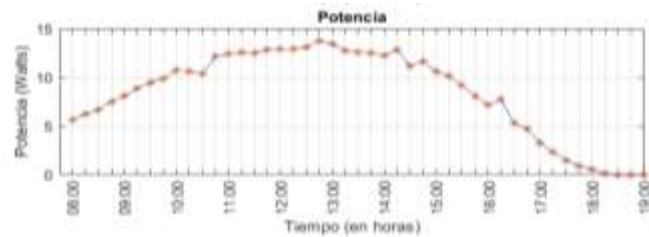


Fig. 19. Gráfica de potencia (P) en espacio cerrado (4 paredes).

Con base en los datos obtenidos en los dos casos del arreglo, en donde se puede apreciar mejor la influencia de la temperatura en la potencia de salida del generador fotovoltaico es en la Figura 13 debido a que no existía una corriente de aire sobre el panel provocando que se calentara considerablemente, es posible ver el incremento en la gráfica de diferencia de temperatura, utilizando este fenómeno después de obtener las mediciones de las 12:30 se incidió sobre el panel una corriente de aire con la ayuda de un ventilador con el objetivo de disminuir la temperatura del panel y adquirir el valor del voltaje y corriente en ese momento.

Además de ello, también se realizaron pruebas de enfriamiento del panel solar fotovoltaico para observar la mejora en la producción de energía cuando el panel no se calienta demasiado y mantiene una temperatura adecuada para su correcto funcionamiento. En la Fig. 20 se observa la gráfica de comportamiento del V_{oc} del panel cuando este se calienta por efecto propio de la radiación a la cual es expuesto, en la Fig. 21 se observa la mejora del comportamiento del V_{oc} cuando el panel es enfriado para obtener una mejora en la producción del mismo con lo que se comprueba el efecto negativo que presenta el calentamiento del panel para su correcto funcionamiento.

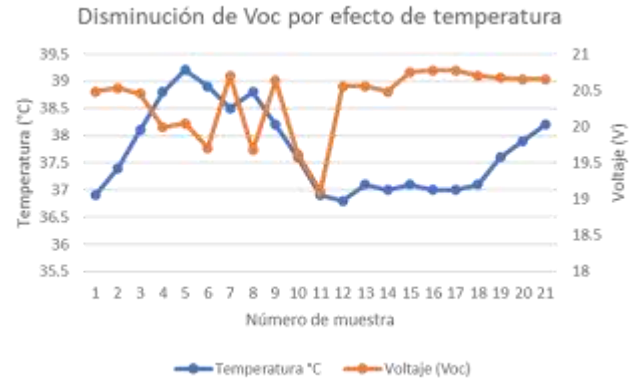


Fig. 21. Incremento del V_{oc} por enfriamiento del panel.

V. CONCLUSIONES

Las simulaciones realizadas que parten desde el circuito equivalente de una celda fotovoltaica y el cálculo de cada uno de los componentes eléctricos arrojaron resultados que se acercan a las especificaciones de potencia del fabricante y además permiten una aproximación a datos que no presenta el fabricante como la R_S y la R_{SH} , los experimentos demuestran que para una operación óptima del panel y generar la máxima potencia lo ideal es tener la mayor cantidad de irradiancia posible y una temperatura ambiente baja o mantener frío el panel mediante algún método. Como se muestra en la Fig. 21, al presentarse una disminución en la temperatura del panel el voltaje aumenta lo que resulta en un aumento en la potencia, mejorando la cantidad de recolección de energía del sistema en general.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado fue realizado gracias al apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), así como a los investigadores pertenecientes al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG).

REFERENCIAS

- [1] C. Rus-Casas, J. D. Aguilar, P. Rodrigo, F. Almonacid, y P. J. Pérez-Higueras, «Classification of methods for annual energy harvesting calculations of photovoltaic generators», *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, n.o Supplement C, pp. 527-536, feb. 2014.
- [2] Alonso, M. C. “El generador fotovoltaico. In *Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica*” Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT, 2004.
- [3] Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. “Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review”. *Energy Procedia*, 33, 311-321, 2013.
- [4] P. Rodrigo, C. Rus, F. Almonacid, P. J. Pérez-Higueras, y G. Almonacid, “A new method for estimating angular, spectral and low irradiance losses in photovoltaic systems using an artificial neural network model in combination with the Osterwald model”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 96, n.o Supplement C, pp. 186-194, ene. 2012.
- [5] A. J. N. Khalifa, “On the effect of cover tilt angle of the simple solar still on its productivity in different seasons and latitudes”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, n.o 1, pp. 431-436, ene. 2011.
- [6] Li, H., Yang, D., Su, W., Lü, J., & Yu, X. “An Overall Distribution Particle Swarm Optimization MPPT Algorithm for Photovoltaic System Under Partial Shading”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 265-275, 2019.
- [7] Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. “On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations”. *Solar energy*, 83(5), 614-624, 2009.
- [8] Beriber, D., & Talha, A. “MPPT techniques for PV systems”. In *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, Fourth International Conference on (pp. 1437-1442), mayo 2013.
- [9] Rezk, H., & Eltamaly, A. M. “A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems”. *Solar energy*, 112, 1-11, 2015.
- [10] Al-Majidi, S. D., Abbod, M. F., & Al-Raweshidy, H. S. “A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems”. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31), 14158-14171, 2018.
- [11] Mamur, H. & Ahiska, R. “Application of a DC-DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators”, *Energy Conversion and Management* 97, 265–272, 2015.
- [12] Subudhi, B. & Pradhan, R. “A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems”, *Sustainable Energy, IEEE Transactions on* 4(1), 89–98, 2013.