

# “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA SEGUIMIENTO SOLAR AUTOMÁTICO, E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE DE SUPERVISION PARA UN SISTEMA MOVIL FOTOVOLTAICO”

Carina Viteri  
cari\_xime\_vc-s-c@hotmail.com

Javier Almeida  
javierpollo\_13@hotmail.com

Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE

**Resumen--** El proyecto se basa en habilitar un sistema móvil fotovoltaico, el mismo que cuenta con 3 paneles solares que generan una potencia efectiva de 300W. Se diseñó y construyó un dispositivo de seguimiento solar automático con dos grados de libertad, implementando un software de supervisión el cual sirve para llevar un histórico, que permite obtener las curvas características de funcionamiento y operatividad de los parámetros que intervienen dentro del sistema solar fotovoltaico. Este proyecto aprovecha la energía producida por las células fotovoltaicas, transformando la energía solar en electricidad, que es utilizada en el consumo local y abastecimiento del propio sistema, volviéndose un equipo autónomo. Se implementaron circuitos conversores DC-DC que permiten obtener las curvas características y el correcto funcionamiento del seguidor. El sistema opera con el algoritmo perturbar y observar para el seguimiento del punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico.

**Palabras clave—** Convertidor DC-DC, Algoritmo MPPT, Sistema móvil fotovoltaico, Curvas características

## I. INTRODUCCIÓN

El sol es considerado una de las fuentes de energía más prometedoras, pues se considera una fuente inagotable, debido a esto las tecnologías de aprovechamiento de energía solar han tenido un gran auge en el mercado, donde la tecnología que mayor ha impactado es la fotovoltaica, la cual convierte directamente la energía solar en electricidad [1].

El principio físico que rige el funcionamiento de una célula fotovoltaica, puede ser explicado tomando como base una unión  $p-n$  de material semiconductor (normalmente silicio) sensible a la luz solar. Cuando ésta incide sobre la unión (generalmente sobre el lado  $n$ ), los fotones que la constituyen suministran la cantidad de energía necesaria a los electrones de valencia del semiconductor, para romper el enlace que los mantenía unidos a sus átomos respectivos.

Las celdas fotovoltaicas tienen curvas características V-I que definen el comportamiento de las mismas ante diferentes condiciones de operación. La potencia de una celda solar está dada por el producto de la corriente y el voltaje de la misma. El punto de máxima potencia (MPPT, Maximum Power Point Tracking) es el producto del voltaje en el punto máximo ( $V_{MPPT}$ ) y corriente en el punto máximo ( $I_{MPPT}$ ) para los cuales la potencia extraída del arreglo fotovoltaico es máxima ( $P_{MPPT}$ ). El punto de máxima potencia varía continuamente,

pues depende de factores como la temperatura de la celda solar y de las condiciones de irradiancia [2].

Los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) se utilizan en sistemas fotovoltaicos para maximizar la energía entregada por los mismos, dicho seguimiento se realiza básicamente variando el valor de ciclo útil de un convertidor de potencia. Existen gran variedad de algoritmos de seguimiento de punto de máxima potencia como por ejemplo [3]: perturba y observa, basados en lógica difusa, basado en redes neuronales artificiales, RCC (Ripple Correlation Control) [4], conductancia incremental (INC) [5, 6, 7] entre otros.

En los sistemas fotovoltaicos existe la posibilidad de implementar un dispositivo adicional con el fin de aumentar la captación de radiación solar y por ende la energía suministrada por la instalación, tal dispositivo es un seguidor solar.

Un seguidor solar fig. 1, es un equipo conformado por una parte fija y una móvil, que consta de 2 grados de libertad, cuya finalidad es la de proporcionar una mayor captación de la radiación solar, permitiendo que los paneles se encuentren de manera perpendicular con los rayos de sol durante el día y dentro del rango de movimiento.



Figura 1: Diseño de Seguidor Solar

## II. DESARROLLO

### A. Modelo panel solar

El circuito equivalente de una celda PV, tiene su configuración física y sus características eléctricas fig. 2.

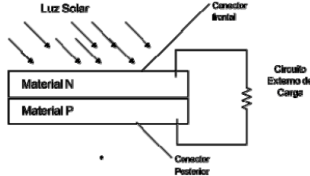


Figura 2: Esquemático de la celda PV [Townsend, 1989]

La juntura entre la capa N (red de carga negativa) y P (red de carga positiva) crea el efecto de un diodo. Cuando la celda fotovoltaica recibe la irradiación solar se obtiene una fuente de corriente constante y las pérdidas eléctricas internas son representadas por una resistencia fig. 3.

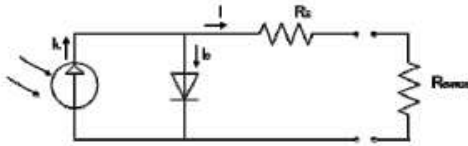


Figura 3: Circuito Eléctrico equivalente de la celda PV [Eckstein, 1990]

La fuente de corriente  $I_L$  es unidireccional y es función de la radiación incidente, temperatura y voltaje. La juntura P-N es representada por el diodo en paralelo con la fuente de corriente, que es atravesado por una corriente interna unidireccional  $I_D$  que depende de la tensión en las terminales de la celda y la temperatura, la resistencia en serie  $R_S$  representa las pérdidas eléctricas interna en la celda [8].

Una única célula, es capaz de proporcionar una tensión de apenas 0,5V y una potencia entre 1 y 2W. Para elevar la potencia suministrada, las células se conectan en serie y en paralelo, dando lugar a lo que se denomina panel o módulo fotovoltaico.

La expresión (1) describe la relación que existe entre la tensión (V) y la corriente (I) entregada por el módulo [9], donde  $n_p$  y  $n_s$  son las células conectadas en paralelo y en serie;  $R_p$  y  $R_s$  las resistencias intrínsecas paralelo y serie asociadas a la célula, K es la constante de Boltzman ( $1.38 * 10^{-23}$  J/K) y q es la carga del electrón. El factor A determina la desviación de las características de una unión p-n ideal, e  $I_S$  la corriente inversa de saturación.  $I_L$  representa la corriente generada por la radiación solar (G). Dicha corriente exhibe una relación respecto de la radiación y la temperatura.

$$I = n_p \left[ I_L - I_S \left( e^{\frac{q \left( \frac{V}{n_s} + \frac{P^* R_S}{n_s} \right)}{A^* K^* T}} - 1 \right) - \frac{n_s}{n_p} \frac{V}{R_p} \right] \quad (1)$$

$$P = I * V \quad (2)$$

$$P = n_p * V \left[ I_L - I_S \left( e^{\frac{q \left( \frac{V}{n_s} + \frac{P^* R_S}{n_s} \right)}{A^* K^* T}} - 1 \right) - \frac{n_s}{n_p} \frac{V}{R_p} \right] \quad (3)$$

$$\left( \frac{dP}{dV} \right)_{MPPT} = 0 \quad (4)$$

La expresión (1) (considerando la dependencia de los parámetros con T y G), proporciona las curvas características de I-V de un panel fotovoltaico, y su producto entrega la potencia suministrada. Se muestra en la fig. 4 las curvas de un panel determinado, así como la dependencia de las variables con la temperatura y la radiación solar. En la curva se representa el punto de máxima potencia ( $V_{mppt}$ ), indicando el punto óptimo de operación, para un uso eficiente del panel. Puntos importantes de esta curva son la tensión a circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ). La tensión en circuito abierto representa la máxima tensión que proporciona el panel a corriente cero (sin carga), la corriente máxima en cortocircuito representa la máxima corriente que se puede extraer del panel (carga en cortocircuito).

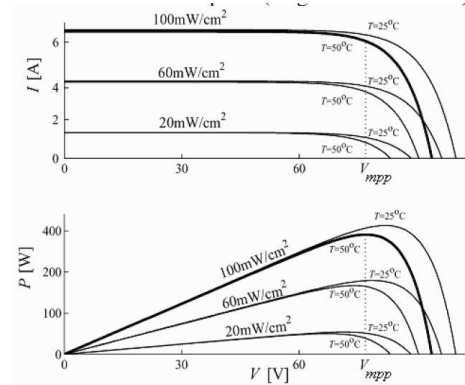


Figura 4: Características I-V y P-V de un panel fotovoltaico.

### B. Algoritmo “Perturbar y Observar (P&O)”

El algoritmo de perturbar y observar funciona bajo el siguiente criterio, si el voltaje de operación V, del arreglo fotovoltaico se perturba en cierta dirección y la potencia del mismo incrementa significa que el punto de operación se ha movido hacia el MPPT, por lo que el voltaje de operación deberá perturbarse en la misma dirección, de otra forma si la potencia extraída del arreglo fotovoltaico disminuye, el punto de operación se ha movido en dirección opuesta de la

ubicación del MPPT, por lo tanto deberá ser perturbado en dirección contraria a la que tenía [6].

En la fig. 5 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo P&O utilizado, donde la potencia medida (pact) es comparada con la potencia anterior (pant), esto determina si aplica la misma perturbación (pert es una variable binaria que indica la dirección de la perturbación) o se deberá invertir en el siguiente ciclo. La variable step representa el tamaño de la perturbación y pwm es el valor del ciclo útil utilizado.

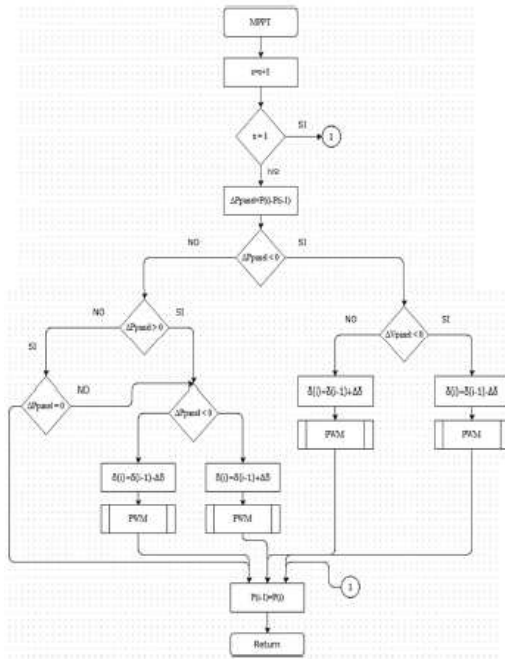


Figura 5: Algoritmo Pertubar y Observar

### III. IMPLEMENTACIÓN

#### IV-A. Convertidor SEPIC DC-DC

Para la implementación del prototipo del convertidor se han seleccionado los componentes basados en el estudio y desarrollo de la simulación de tal forma que los componentes son los siguientes:

**Bobina:** Se utilizó un toroide de núcleo de hierro pulverizado fig.16 por sus características para trabajar en altas frecuencias (máx. 500 kHz), ya que trabaja a una frecuencia de 73Khz entregada por el AVR 644pa. El bobinado se lo realizó con el cable Litz, un cable de 100 hilos esmaltados con capacidad de 7 [A] en bobina.



Figura 16: Modelo Arnold MS-226060-2

#### Cable Litz.

Los fabricantes del material magnético del núcleo toroidal proveen un dato que simplifica los cálculos llamado factor de inductancia (AL). El valor de AL surge de la ecuación general de la inductancia para un toroide, acomodada para que los cálculos sean más fáciles de realizar manualmente. Para la construcción de las bobinas se utilizarán toroides de Ferrita, debido a que tienen una mayor gama de aplicaciones, mayor factor de calidad (Q) y mayor permeabilidad relativa (u), que los toroides de Hierro Pulverizado, y lo más importante hay algunos tipos de mezcla de materiales, de toroides de Ferrita que tienen aplicaciones en convertidores de potencia y están hechos para trabajar a altas frecuencias, como la de 100KHz que se usa para el sistema.



Figura 17: Inductor bobinado con cable Litz

#### IV-B. Control MPPT

Para la implementación del control se hizo por separado de la etapa de potencia, el circuito permite la activación de los mosfet, mediante el uso del integrado tlp250, por otro lado, se tiene una pantalla gráfica TFT HY32D 3.2" donde se muestran las curvas de funcionamiento del panel, tanto en voltaje, corriente y potencia. En el circuito de potencia del conversor se tiene un sensor de corriente ACS715-20 que contiene un circuito de acondicionamiento entregando una señal de 0 [V] a 5 [V] captada por el microcontrolador AVR, el mismo que contiene el control de la pantalla.



Figura 18: Placa de control y pantalla gráfica

#### IV-C. Montaje Completo

Se observa en la fig. 19, el montaje en su totalidad del controlador, este posee una pantalla para visualizar el comportamiento de las curvas, adicional se almacenan en una

tarjeta Sd card la cual entrega un registro de los datos, posee un sistema de seguimiento manual, implementado mediante un joystick el que nos permite seleccionar el movimiento y que eje es el que va a moverse, esto se visualiza en el Lcd 16x2.



Figura 19: Sistema Adquisidor y control del Seguidor Fotovoltaico

#### IV. CONCLUSIONES

- El voltaje y corriente de salida del convertidor está en función de la variación del ciclo de trabajo de la señal que conmuta los transistores y sólo de ese valor, de tal forma que para  $D < 0.5$  se comporta como reductor y para  $D > 0.5$  se comporta como elevador. Este comportamiento es una ventaja, ya que el panel es una fuente variable de energía, y cuando existe una caída de tensión se regula la salida, para que el sistema no exija más energía de la que puede entregar el panel y en cambio se alimenta de las baterías.
- La correcta implementación de un convertidor DC-DC en este caso Sepic facilitó el funcionamiento del sistema, tanto para el almacenamiento de energía como para el consumo.
- Una ventaja del convertidor Sepic es que puede trabajar en voltaje o en corriente, dependiendo las características del sistema.
- Una ventaja de utilizar el control MPPT (Seguidor del Punto de Máxima Potencia), es que este varía en función de los parámetros de funcionamiento del panel, otorgando una eficiencia mayor al sistema y disminuyendo las pérdidas.
- Una desventaja del circuito Sepic es su eficiencia, ya que varía entre el 70% y 90%, esto básicamente es por los elementos de trabajo y por el período de conmutación del sistema.
- El tener un sistema de posicionamiento manual, os permite observar la variación de la potencia entregada en el panel solar, a una determinada hora y ubicación, a diferencia de un sistema estático.
- El almacenamiento de datos, permite al usuario, tener una referencia real, del funcionamiento del sistema en determinado periodo de tiempo o en todo el tiempo, dependiendo el requerimiento del usuario.

- El sistema es muy amigable y fácil de utilizar, no requiere mucho conocimiento, adicionalmente como es autónomo no necesita energía externa.

#### V. REFERENCIAS

- [1] Rashid Muhammad H. and Lana Char "Solar Power Conversion" Power Electronics Handbook, Capítulo 26, pp. 661 – 672, Academic Press, Segunda edición, 2007.
- [2] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli "Optimizing Duty-cycle Perturbation of P&O MPPT Techinque" Power Electronics Especialists Conference, 2004. PESC 2004. 35th Annual. vol. 3, pp 1939 – 1944, 20 –25 Junio 2004.
- [3] Trishan Eswam and Patrick L. Chapman "Comparision of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking techniques", IEEE Transactions on energy conversion, vol 22 (2), Junio de 2007.
- [4] Trishan Eswam and Patrick L. Chapman "Comparision of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Arrays Using Ripple Correlation Control" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21 (5), Septiembre 2006.
- [5] Chad Alberts, Justin Brown, Rpbert Button, Anna Flower and Srinivasa Vemuru "Solar Array Peak Power Tracker", American Socierty, 31 Marzo de 2006 – 1 Abril 2006.
- [6] Dezso Sera, Tamas Kerekes, Remus Teodorescu and Frede Blaabjerg "Improved MPPT algorithms for rapidly changing enviromental conditions", Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006, pp 1614–1619, 12th International. 30 Agosto 2006 1 Septiembre 2006.
- [7] J. Kouta, A. El-Ali, N. Moubayed, and R. Outlib "Improving the incremental conductance control method of a solar energy conversion system", International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ'08), Santander, Spain, March 12-14 2008.
- [8] Castro, Energias Renováveis e Producao Descentralizada, Introducao a energía fotovoltaica, Rui M.G. Castro, Universidad Técnica de Lisboa, 2004.
- [9] J.A. Grow, C.D. Manning: "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies". IEE Proc. On Electric Power Applications, vol. 146, no. 2, pp, 193-200, March 1999.
- [10] B. Lin and Y. Lee, "Power-factor correction using Cuk converters in dis-continuous-capacitor-voltage mode operation," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 44, pp. 648-653, Oct. 1997.
- [11] D. Maksimovic and S. Cuk, "A unified analysis of PWM converters in discontinuous modes," IEEE Trans. Power Electron., vol. 6 pp. 476-490, Mar. 1991.