

# Diseño y Construcción de un equipo para seguimiento solar automático, e implementación de un software de supervisión para un sistema móvil fotovoltaico

J. Almeida

P. Ayala

*Escuela Politécnica del Ejercito - 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 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) para el seguimiento del punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico.

**Palabras clave**— Convertidor DC-DC, Algoritmo perturbar y observar (MPPT), Sistema móvil fotovoltaico, Curvas características.

**Abstract**— This project is based on activating a mobile photovoltaic system with 3 solar panels that generates an effective power of 300 W. An automatic solar tracker was designed and built with two degrees of freedom, implementing a monitoring software which keeps a historic record and allows for the creation of characteristic operating and performance curves for the parameters involved in the photovoltaic solar power system. This project makes use of the energy produced by the photovoltaic cells to transform solar energy into electricity, which is consumed locally and supplies the system itself, making it an autonomous system. DC-DC converter circuits were installed to achieve characteristic curves and proper tracker functioning. The system operates with the Perturb and Observe algorithm (Maximum Power point Tracking, MPPT) for tracking the photovoltaic system's maximum power point.

**Index Terms**— DC-DC Converter, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Mobile Photovoltaic System, Characteristic Curves

## 1. 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 problema actual es que esta energía sigue siendo aún costosa, ya que la eficiencia de la conversión luz solar - energía eléctrica es aproximadamente entre 9 y 17% en los paneles más comunes del mercado, tomando en cuenta que la eficiencia cambia a lo largo del día, dependiendo de la irradiancia y la temperatura del panel solar. Ambas variables son fundamentales en la generación de energía por dicho panel.

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 (VMPPT) y corriente en el punto máximo (IMPPT) para los cuales la potencia extraída del arreglo fotovoltaico es máxima (PMPPT). 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

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Modelo panel solar

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

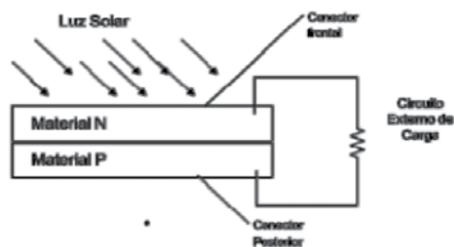


Figura 2: Esquemático de la celda PV [Townsend, 1989]

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.

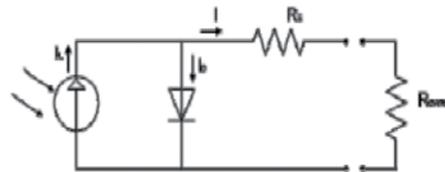


Figura 3: Circuito Eléctrico equivalente de la celda PV [Eckstein, 1990]

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 ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  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.

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

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

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

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

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).

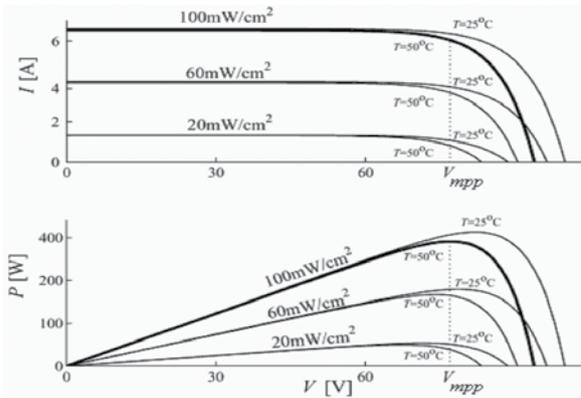


Figura 4: Características I-V y P-V de un panel fotovoltaico.

### 2.1.1 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.

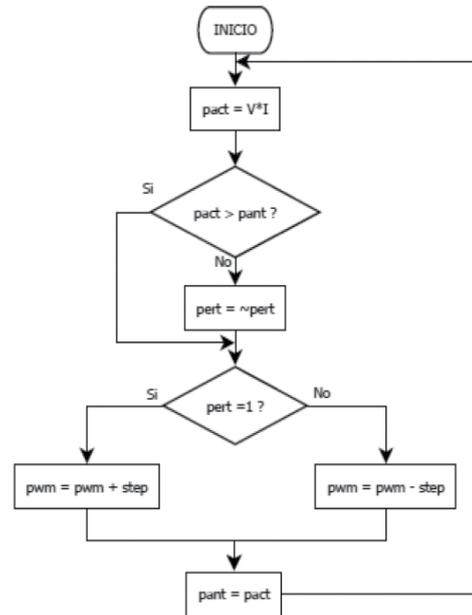


Figura 5: Algoritmo Perturbar y Observar.

### 2.1.2 Análisis Transitorio

Se utiliza un convertidor DC-DC para modificar la potencia a la salida de los paneles fotovoltaicos, esta energía será almacenada en un banco de baterías y se utilizará para él funcionamiento del seguidor solar y un conversor DC-AC.

SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter) se ha utilizado esta topología porque el voltaje de salida puede ser más alto o más bajo que la entrada, además la salida no es invertida como en el caso de la topología Cúk.

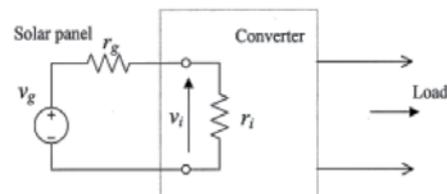


Figura 6: Circuito equivalente de Thevenin de un panel solar conectado a un convertidor

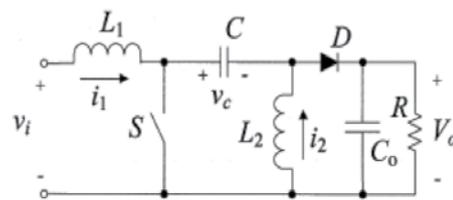


Figura 7: Diseño del convertidor Sepic

El circuito Sepic fig.7 funciona en modo de corriente del inductor discontinuo (DICM) o el modo de tensión del condensador (DCVM). Este tipo de convertidor tiene la particularidad que la resistencia de entrada

es proporcional a la conmutación de frecuencia. Por lo tanto, mediante el ajuste del ciclo de trabajo del interruptor principal, se puede hacer que la resistencia de entrada del convertidor sea igual a la salida, obteniendo una salida equivalente a la del panel. Esto asegura la máxima transferencia de potencia. En la fig.6 el convertidor que está conectado al panel solar es un SEPIC operando en DICM o DCVM [10], [11].

Este circuito, se analiza entre los dos estados de conducción del transistor Mosfet, en estado encendido y estado apagado. Para eso, se tendrá en cuenta el ciclo útil de trabajo de la señal PWM que es usada para disparar el transistor en los diferentes modos de conducción.

#### Estado del Mosfet encendido ( $0 < t < DT$ )

Durante este periodo de trabajo, el transistor es activado, obteniendo el circuito equivalente que se muestra en la fig.8, con sus respectivas tensiones y corrientes. Durante este proceso, el inductor L1 es cargado con la tensión de la fuente de entrada, mientras que el inductor L2 es cargado con la energía almacenada por el condensador C1. Adicionalmente la carga se encuentra aislada de la tensión de entrada y es alimentada con la energía almacenada en el condensador de salida C2:

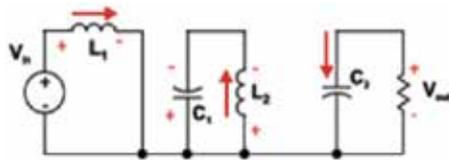


Figura 8: Sepic transistor activado

La tensión a través del inductor L1 está determinada por la relación

$$V_{L1ON} = V_1 = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = L_1 \frac{\Delta i_{L1}}{DT} \quad (5)$$

La tensión que aparece a través del inductor L2 es igual a

$$V_{L2ON} = V_{C1} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = L_2 \frac{\Delta i_{L2}}{DT} \quad (6)$$

Finalmente, la corriente que circula sobre el condensador de salida es igual a

$$i_C = \frac{-V_o}{R} \quad (7)$$

El diodo se encuentra polarizado en sentido inverso, por lo que la corriente a través del mismo es  $i_D = 0$ , y la tensión entre sus terminales es

$$V_D = -(V_o + V_{C1}) \quad (8)$$

Mientras que el transistor al estar activo posee una tensión  $V_Q = 0$  una corriente igual a la del inductor de entrada  $L1 \ i_Q = i_{L1}$ .

#### Estado del Mosfet apagado ( $DT < t < T$ )

El siguiente paso es analizar cuando el transistor está apagado, obteniendo el circuito que se muestra en la fig.9. Durante este momento, las corrientes a través de los inductores L1 y L2 actúan como fuentes de corriente obligando al diodo a polarizarse en forma directa.

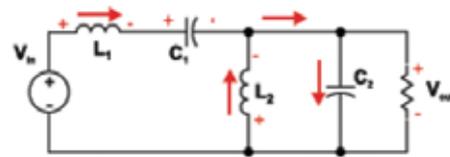


Figura 9: Sepic transistor apagado

La tensión en las terminales del inductor L2 es igual a

$$V_{L2OFF} = -V_o = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = L_2 \frac{\Delta i_{L2}}{(1-D)T} \quad (9)$$

Recordando que la tensión media en un inductor es igual a cero durante un ciclo en régimen permanente, hallamos la tensión del inductor en el estado encendido (que es el mismo del condensador C1) en términos de alguna tensión más conocida del circuito:

$$\begin{aligned} \overline{V_{L2}} = 0 &= \frac{1}{T} \left( \int_0^{DT} V_{L2ON} + \int_{DT}^{(1-D)T} V_{L2OFF} \right) \\ &= \frac{1}{T} \left( \int_0^{DT} V_{C1} - \int_{DT}^{(1-D)T} V_o \right) \\ &= DV_{C1} - (1-D)V_o \Rightarrow V_{C1} = \frac{(1-D)V_o}{D} \quad (10) \end{aligned}$$

Una vez obtenido el voltaje en el condensador en términos de tensiones más conocidas, se halla el valor de la tensión en el inductor L1, recordando que la tensión de un condensador no puede cambiar de manera abrupta. Por medio de la ley de conservación de energía aplicada en la primera malla, la ecuación resultante es:

$$-V_I + V_{L\text{OFF}} + V_0 \frac{(1-D)}{D} + V_0 = 0 \Rightarrow V_{L\text{OFF}} = V_I - \frac{V_0}{D} \quad (11)$$

Y recordando que la tensión media de un inductor es cero durante un ciclo en régimen permanente, llegamos a la expresión:

$$\begin{aligned} \overline{V_{L1}} = 0 &= \frac{1}{T} \left( \int_0^{DT} V_{L\text{ION}} + \int_{DT}^{(1-D)T} V_{L\text{OFF}} \right) \\ &= \frac{1}{T} \left( \int_0^{DT} V_I + \int_{DT}^{(1-D)T} \left( V_I - \frac{V_0}{D} \right) \right) \\ &= DV_I + (1-D) \left( V_I - \frac{V_0}{D} \right) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

De donde se despeja la función de transferencia de la función, es decir:

$$\frac{V_0}{V_I} = \frac{D}{1-D} \quad (13)$$

Usando la expresión anterior, es fácil ver que se pueden simplificar algunas tensiones ya obtenidas, dando como resultado que

$$V_{CI} = V_I \text{ y } V_{L\text{OFF}} = -V_0 \quad (14)$$

Al encontrarse el transistor apagado, la corriente por el mismo es igual  $i_Q = 0$  mientras que la tensión entre sus terminales es igual a

$$V_Q = V_I - V_{L\text{OFF}} = V_I + V_0 \quad (15)$$

La corriente de polarización en el diodo depende de las corrientes de los dos inductores L1 y L2, y por medio de la ley de corrientes en un nodo es igual a  $i_D = i_{L1} + i_{L2}$ . La tensión sobre el diodo en este estado es igual a  $V_D = 0$  en el caso ideal, suponiendo que no cae ninguna tensión sobre el diodo cuando se polariza en directo. La corriente promedio del inductor de entrada L1 es igual a la corriente promedio de entrada del circuito o entregada por la fuente de alimentación  $I_{L1} = I_I$ . Considerando que en el sistema no existen pérdidas, la potencia de entrada es igual a la potencia de salida, por lo que se puede obtener:

$$\begin{aligned} P_I = P_0 = V_I I_I = V_0 I_0 &\Rightarrow V_I I_{L1} = V_0 I_0 \Rightarrow \\ I_{L1} = \frac{V_0 I_0}{V_I} = \frac{D I_0}{(1-D)} \end{aligned} \quad (16)$$

Y con el valor anterior, se calcula los valores máximo y mínimo de la corriente sobre el inductor L1:

$$\begin{aligned} i_{L1\text{MAX}} &= I_{L1} + \frac{\Delta i_{L1}}{2} = \frac{D I_0}{(1-D)} + \frac{V_I DT}{2L_1} \\ i_{L1\text{MIN}} &= I_{L1} - \frac{\Delta i_{L1}}{2} = \frac{D I_0}{(1-D)} - \frac{V_I DT}{2L_1} \end{aligned} \quad (17)$$

A partir del valor mínimo de corriente sobre el inductor podemos calcular la inductancia mínima para que el circuito opere en modo de corriente continua, hallando así el límite en el que puede operar el circuito entre modo continuo y discontinuo. Para eso, el mínimo valor de corriente que puede tener el inductor es cero, despejando allí la inductancia mínima:

$$\begin{aligned} i_{L1\text{MIN}} = 0 &= I_{L1} - \frac{\Delta i_{L1}}{2} = \frac{D I_0}{(1-D)} - \frac{V_I DT}{2L_1} \Rightarrow \\ L_{1\text{MIN}} &= \frac{V_I (1-D)}{2 I_0 f_s} = \frac{V_0 (1-D)^2}{2 D I_0 f_s} \end{aligned} \quad (18)$$

Donde  $f_s$  es la frecuencia de conmutación del transistor. Claramente se ve que para calcular esta inductancia mínima, se debe considerar la carga que entregue el mínimo valor de corriente de salida sin llegar al caso extremo de circuito abierto, así como el valor de ciclo útil que pueda ser crítico.

El siguiente valor a calcular es el inductor L2, el cual debemos asegurarnos que también trabaje en modo corriente continua por simplicidad del circuito. Procedemos a calcular primero el valor medio de corriente sobre el mismo. Si recordamos, durante el ciclo de encendido, la corriente sobre L2 es la misma del condensador C1 pero en sentido inverso, es decir  $i_{L2} = -i_{C1}$ , y en estado de apagado, la corriente es igual a  $i_{L2} = -i_D - i_{C1}$ , donde además la corriente en el diodo es igual  $i_D = -i_{C2} + i_0$  a como se ve a la salida del circuito de la fig.9. Recordando que la corriente promedio a través de un condensador es igual a cero, es fácil llegar a deducir que la corriente promedio del inductor L2 es igual a la corriente promedio de la carga, en otras palabras  $I_{L2} = I_0$ . Por lo que los valores máximo y mínimo de la corriente son:

$$\begin{aligned} i_{L2\text{MAX}} &= I_{L2} + \frac{\Delta i_{L2}}{2} = I_0 + \frac{V_I DT}{2L_2} \\ i_{L2\text{MIN}} &= I_{L2} - \frac{\Delta i_{L2}}{2} = I_0 - \frac{V_I DT}{2L_2} \end{aligned} \quad (19)$$

Realizando el mismo procedimiento para L1, la corriente mínima la igualamos a cero para calcular el valor mínimo del inductor L2:

$$\begin{aligned} i_{L2\text{MIN}} = 0 &= I_{L2} - \frac{\Delta i_{L2}}{2} = I_0 - \frac{V_I DT}{2L_2} \Rightarrow \\ L &= \frac{V_0 (1-D)}{2 f_s I_0} = \frac{R_L (1-D)}{2 f_s} \end{aligned} \quad (20)$$

Donde  $R_L$  es la carga de salida que se colocara a la salida del convertidor.

La forma de onda de corrientes y tensiones de todos los elementos se observa en la fig. 10.

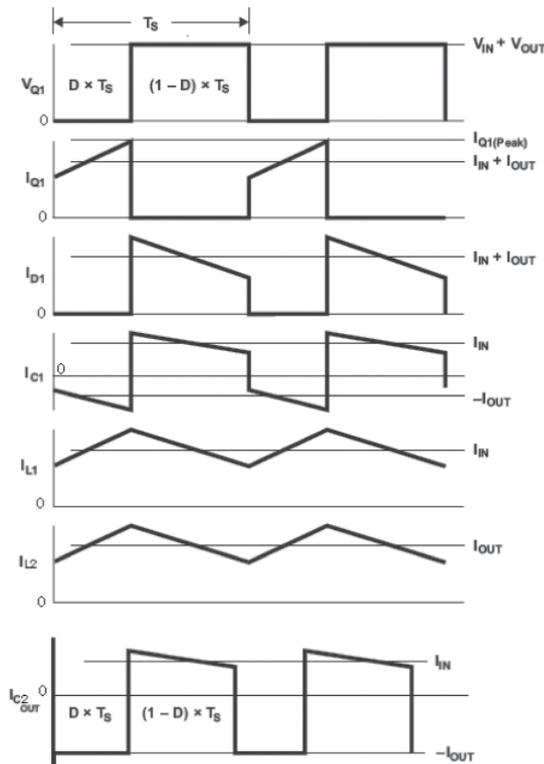


Figura 10: Formas de Onda

De la fig.10, se calcula los valores de los condensadores a partir de las áreas que se muestran. Comenzamos calculando el valor del condensador C1, recordando que durante el ciclo de apagado del transistor, la corriente sobre C1 es la misma que circula por L1.

Si observamos que el área de corriente de C1 durante el ciclo de apagado del transistor es un trapecio con alturas iguales al valor mínimo y máximo de la corriente del inductor L1, el diferencial de carga que es el área bajo esta curva es igual a:

$$\begin{aligned} |\Delta Q| &= (i_{L1MIN} (1-D)T) + \frac{(1-D)T\Delta i_{L1}}{2} \\ &= (1-D)T \left( i_{L1MIN} + \frac{\Delta i_{L1}}{2} \right) \\ &= (1-D)T I_L = \frac{I_0 D}{f_s} \end{aligned} \quad (21)$$

Y recordando la definición de capacitancia  $\Delta Q = C_1 \Delta V_0$ , despejando C1 se tiene el valor de:

$$C_1 = \frac{\Delta Q}{\Delta V_0} = \frac{I_0 D}{\Delta V_0 f_s} \quad (22)$$

Finalmente, para el condensador de salida C2, durante el estado de encendido del transistor, la corriente sobre C2 es la misma de la carga pero en sentido inverso, luego el diferencial de carga obtenido es igual a

$$|\Delta Q| = \frac{V_0 D T}{R} = \frac{V_0 D}{R f_s} \quad (23)$$

Por lo que el condensador es igual a:

$$C_2 = \frac{\Delta Q}{\Delta V_0} = \frac{V_0 D}{\Delta V_0 R f_s} \quad (24)$$

El circuito Sepic, es usado en aplicaciones de corrección de potencia, sin embargo posee gran ventaja sobre este último en que la tensión de salida puede llegar a ser menor que la tensión de entrada, lo que lo hace muy llamativo para la aplicación de cargador de baterías.

Presenta una fácil implementación y aislamiento entre la entrada y la salida, y un menor rizado de corriente de entrada a altas frecuencias. Sin embargo, una mejora de este circuito puede ser obtenida acoplando los dos inductores vistos bajo un mismo núcleo, teniendo la posibilidad de aumentar la eficiencia en un 2% y reduciendo la emisión de ruido, lo que conlleva a simplificar el filtro de entrada del convertidor.

### 3. SIMULACIÓN

Se utilizó el programa de matlab para realizar la simulación del convertidor en cuestión.

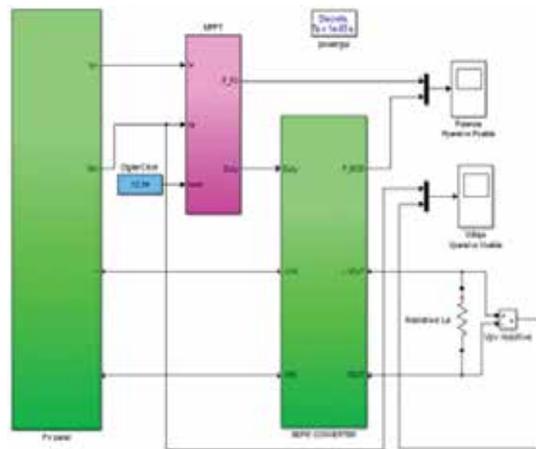


Figura 11: Sistema Fotovoltaico con control MPPT

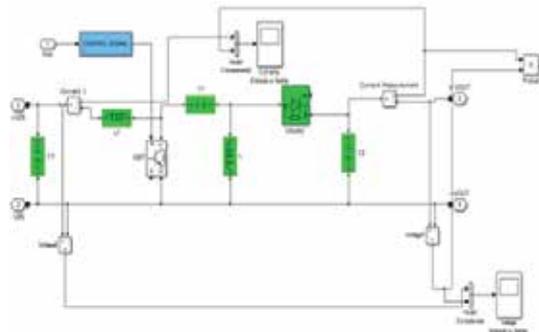


Figura 12: Circuito conversor SEPIC

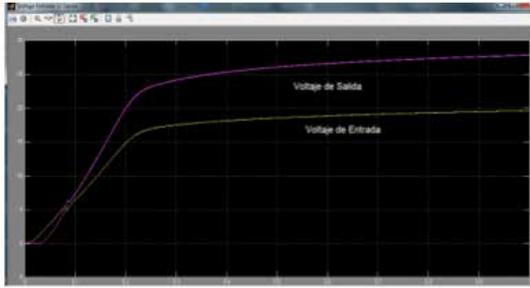


Figura 13: Respuesta de Voltaje

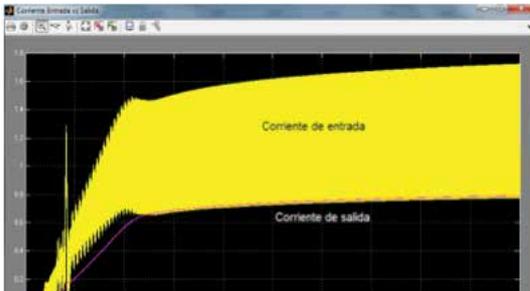


Figura 14: Respuesta de Corriente

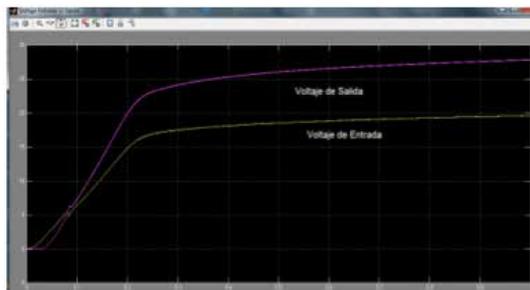


Figura 15 : Respuesta de Potencia

Se usó un panel fotovoltaico Isofotón I-110, que tiene una tensión nominal 12V, una potencia máxima de 110W, corriente de cortocircuito 6.54A, tensión de circuito abierto 21.6V, corriente de máxima potencia 6.1A, tensión de máxima potencia 17.4V.

Inductor L1 = 1mF, L2 = 300uF, C1=100uF, C2=1000uF, frecuencia de 73 kHz y ciclo de carga del 50% regulado por el control de MPPT.

## 4. IMPLEMENTACIÓN

### 4.1. 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

Estos tipos de cables se utilizan fundamentalmente para: conversión de energía, emisión y recepción en alta frecuencia, electrónica de potencia, detectores de proximidad inductiva, etiquetas electrónicas, equipos de transmisiones telefónicas múltiples, uniones flexibles para relays, bobinas, transformadores, motores, etc.



Figura 17 : Inductor bobinado con cable Litz

Montaje:

De lo dispuesto en la simulación se consideró el capacitor de 50[V]. Además transistores mosfet IRFB52N15D con sus respectivos disipadores, diodos ultrarápidos hfa15tb60, la resistencia de carga es el cargador de baterías, ya que la energía entregada por el panel se implementa para cargar la batería.



Figura 18 : Implementación del convertidor DC-DC Sepic

## 4.2. 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 19: Placa de control y pantalla gráfica

## 4.3. Montaje Completo

Se observa en la fig. 20, 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 20: Sistema Adquisidor y control del Seguidor Fotovoltaico

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [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 Technique" Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 2004. 35th Annual. vol. 3, pp 1939 – 1944, 20 –25 Junio 2004.

- [3] Trishan Esum 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 Esum 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 energia 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] 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.



Edison Javier Almeida Baroja.- Egresado de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE).



Jaime Paúl Ayala Taco.- Ingeniero Electrónico graduado en la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) en 1997, obtuvo su MBA en la ESPE en 2000 y su maestría en Mecatrónica en la Universidad Politécnica de Cataluña-España en 2004.

Actualmente es candidato a Doctor en Ciencias en Automática y Controles por la CUJAE Cuba. Su campo de investigación se encuentra en los accionamientos estáticos y control avanzado e inteligente en aplicaciones de electrónica de potencia..