

ISSN 2070-836X

APORTE SANTIAGUINO

Revista de Investigación

Volumen 6 n.º 2, julio – diciembre 2013



*Ciencia,
cultura,
tecnología
e innovación*

Huaraz, Perú



Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

ARTÍCULOS ORIGINALES

Diseño y construcción de un equipo para seguimiento solar automático e implementación de un software de supervisión para un sistema móvil fotovoltaico [Design and construction of a solar tracking automatic equipment, and implementation of a monitoring software for mobile photovoltaic system]

Javier Almeida B., Roberto Gutiérrez G., Paúl Ayala T. 9 - 24

Modelo estadístico para predecir la calidad del agua de consumo humano en el ámbito rural del Callejón de Huaylas [Statistical model for predicting the water quality human consumption in rural area of Callejón de Huaylas]

Fidel Aparicio R., Francisco Espinoza M., César Milla V., Esteban Reyes R. 25 - 34

Niveles de fertilización, mezclas de fertilizantes y métodos de aplicación en el cultivo de ajos *Allium sativum* L. cv. Barranquino, en distrito de Puerto Supe, Provincia de Barranca. [Fertilization levels, mixtures of fertilizers and application methods in the cultivation of garlic. *Allium sativum* L. Cv. Barranquino, Puerto Supe district, Barranca Province]

Carlos Laos O., Luis Laos T., Dalmira Roman Q., Miguel Román Q., Carlos Laos T. ... 35-46

Elaboración de una bebida fermentada a partir del fruto del Aguaymanto (*Physalis Peruviana* Linnaeus) producido en el Callejón de Huaylas, utilizando técnicas prefermentativas a baja temperatura [Elaboration of a fermented drink from the fruit of the aguaymanto (*Physalis Peruviana* Linnaeus) occurred in the Callejón de Huaylas, using techniques prefermentativas to low temperatura]

Paula Falcón R., Daniel Reeves L., Rosario Tarazona M., Jackeline Mejía B. .. 47-55

Efecto del acondicionamiento de humedad y tiempo de moronado en la calidad físico-química del morón de trigo (*Triticum vulgare*) analizado por la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) [Effect of moisture conditioning and moronado time in the physico-chemical quality morón wheat (*Triticum vulgare*) analyzed by Response Surface Methodology (RSM)]

Norma Gama "a" R., Ydania Espinoza B., Rosario Tarazona 56 - 64

La crítica sociológica y la comprensión lectora de textos narrativos de la literatura oral en los estudiantes de la especialidad de comunicación, lingüística y literatura de la FCSEC de la UNASAM. [The sociological review and reading comprehension of narrative texts of oral literature in students of the specialty communication, linguistics and literature FCSEC of UNASAM]

Vida Guerrero T., Macedonio Vil/añán B. 65 - 73

Caracterización de los sistemas agroforestales y sus bienes y servicios ambientales como estrategia de adaptación al cambio climático en el Callejón de Huaylas - Ancash, 2012 [Characterization of agroforestry systems and its goods and services as a strategy of adaptation to the climate changes in the Callejón de Huaylas-Ancash, 2012]	
<i>C. Prudencia Hidalgo C., Eladio Tuya C., Rafael Figueroa T., Judith Norabuena V.</i>	74 - 82
El empleador jurídico - laboral: marcadores (Genéticos) de una reformulación funcional partiendo de la legislación Española [The labor legal employer: genetic labels of a functional reformulation erected from Spanish Law.]	
<i>David Lantarón B</i>	83-94
Morosidad en el pago de impuesto predial, incide en la gestión económica de la Municipalidad Provincial de Barranca, 2010 [Late payment of property taxes, affects the economic management of the Provincial Municipality of Barranca, 2010.]	
<i>Zoila Lira C., José Ruiz V., Emiliano Gaitán C., Guillermo Peláez D.</i>	g5 -101
Una experiencia pedagógica en la formación medioambiental del estudiante de arquitectura. [A pedagogical experience in the environmental formation of the architecture student]	
<i>Aymé Alonso G., Carmen Leyva F.</i>
Impacto de la formación docente en educación intercultural bilingüe en la calidad educativa en el Callejón de Huaylas [Impact of teacher training in intercultural bilingual education in educational quality on Callejón de Huaylas]	
<i>Laura Nivin Vargas., Félix Julca G</i>	102 -112
Algunos factores del síndrome depresivo en estudiantes de enfermería de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo [Factors of depressive syndrome in nursing students of the National University Santiago Antúnez Mayolo]	
<i>Llermés Núñez Z., Bibiana León H</i>	113-119
Impacto de los efluentes de la industria pesquera en la calidad de las aguas costeras de Puerto Barranca - Perú 2010 [Impact of effluent from the fishing industry on the quality of the coastal waters of Puerto Supe-Barranca Perú 2010]	
<i>Hernán Verde L., Carlos Reyes P., Segundo Ponte V., David Zavaleta V</i>•.....•.....•.....•.....•.....•.....	120-128
Contribución del aprovechamiento de los recursos mineros al marco económico de Cantabria (España). [Contribution of the benefit of mineral resources in the economic framework of Cantabria (Spain)]	
<i>Gema Fernández M, Rubén Pérez., Julio de Luis R</i>	129-137

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

Design and construction of a solar tracking automatic equipment, and implementation of a monitoring software for mobile photovoltaic system

¹Javier Almeida B', ²Roberto Gutiérrez Gb., ³Paúl Aya la T".

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 convertidores 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

The project is based on a mobile system enabling photovoltaic, the same has 3 solar panels that generate an effective output of 300W. We designed and built an automatic solar tracking device with two degrees of freedom, implementing a supervision software which is used to take a historical, giving operating characteristic curves and operability of the parameters involved in the solar photovoltaic system. This project uses the energy produced by photovoltaic cells transform solar energy into electricity, which is used for local consumption and supply of the system itself, becoming a self. Circuits were implemented DC-DC converters that allow to obtain the characteristic curves and the proper functioning of the follower. The system operates with disturbing and observe algorithm (Maximum Power Point Tracking, MPPT) for tracking the maximum power point of the photovoltaic system.

Key words: DC-DC converter, disturbing and observe algorithm (MPPT) photovoltaic system mobile, Characteristic curves.

¹ESPE Universidad de las Fuerzas Armadas - Ecuador.

²Egresado de Ingeniería Mecatrónica.

³Ingeniero. Mecánico Msc.

Ingeniero. Electrónica y Control Msc.

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 (Esrám, 2007).

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.

Es importante, en consecuencia, introducir sistemas alternativos de energía limpia gobernados por sistemas de control electrónicos tendientes a optimizar y mejorar la eficiencia de los sistemas energéticos, especialmente en áreas de aplicación rural donde el tendido de la red pública no ha alcanzado.

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 (Esrám, 2006).

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 (Femia et al., 2004): perturba y observa, basados en lógica difusa, basado en redes neuronales artificiales, RCC (Ripple Correlation Control) (Grow, 1999), conductancia incremental (INC) (Kouta, 2008; Lin, 1997; Maksimovic, 1991) 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

MATERIALES Y MÉTODOS

A. Modelo panel solar

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

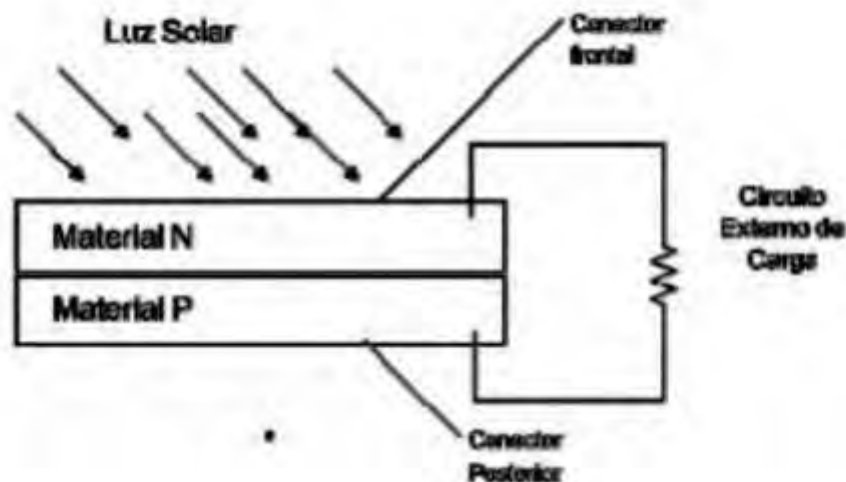


Figura 2. Esquemático de la celda PV [Townsend, 1989]

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).

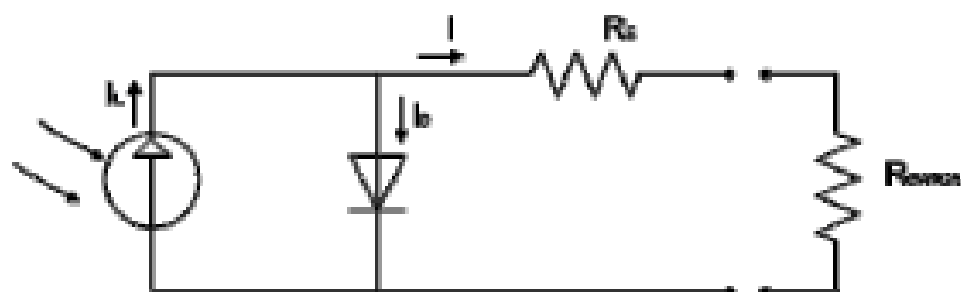


Figura 3. Circuito eléctrico equivalente de la celda PV [Eckstein, 1990]

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 internas en la celda (Muhammad, 2007).

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 conectaron 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 (Sera et al, 2006), donde n_p y n_s son las células que fueron 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 determinó 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.

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

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

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

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

La expresión (1) (considerando la dependencia de los parámetros con T y G), proporcionó 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 fueron la tensión a circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{sc}). La tensión en circuito abierto viene a representar 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).

El panel empleado es ISOFOTON de 17.4 voltios de tensión máxima y 100 W. Las baterías son de 12 voltios 11 Ah.

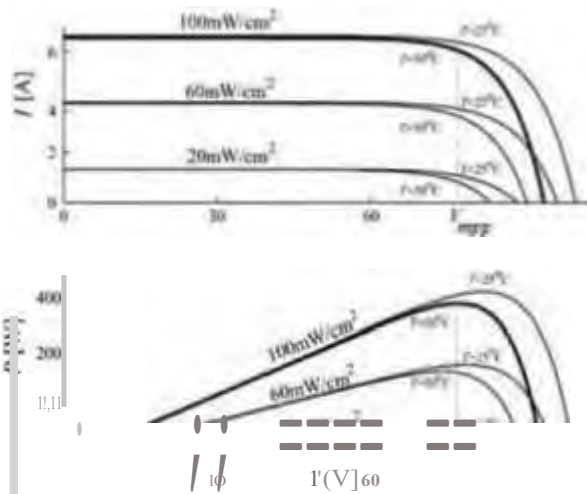


Figura 4. Características I-V y P-V de un panel fotovoltaico.

A. Algoritmo "Perturbary 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 (Graw, 1999).

En la Fig. 5 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo P&O utilizado, donde la potencia medida (p_{act}) es comparada con la potencia anterior (p_{ant}), 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.

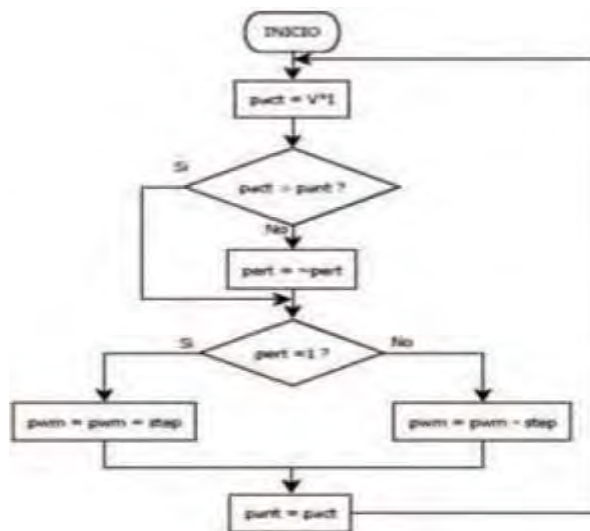


Figura 5. Algoritmo perturbar y observar

B. Análisis Transitorio

Se utilizó un convertidor DC-DC para modificar la potencia a la salida de los paneles fotovoltaicos, Esta energía fue almacenada en un banco de baterías y se utilizó para el funcionamiento del seguidor solar y un convertidor DC-AC.

SEPIC, (Single Ended Primary Inductor Converter) se ha manejado 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 $\hat{e}uk$.

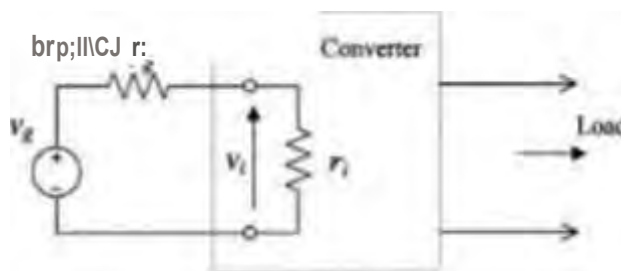


Figura 6. Circuito equivalente de Thevenin de un panel solar conectado a un convertidor.

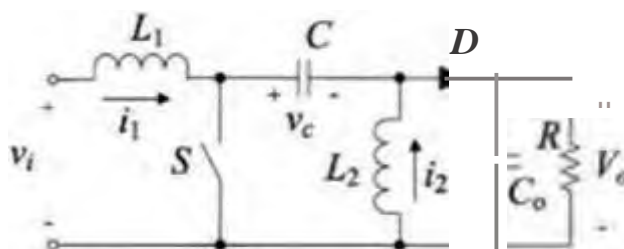


Figura 7. Diseño del convertidor sepic

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 de 120W que ha operado en DICM o DCVM (Muhammad,2007 y Sera,2006)

Este circuito, se analizó entre los dos estados de conducción del transistor Mosfet (IRFB52N15D), en estado encendido y estado apagado. Para eso, se tuvo en cuenta el ciclo útil de trabajo de la señal PWM que fue usada para disparar el transistor en los diferentes modos de conducción.

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

El siguiente paso fue 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 L_1 y L_2 actuaron como fuentes de corriente, obligando al diodo a polarizarse en forma directa.

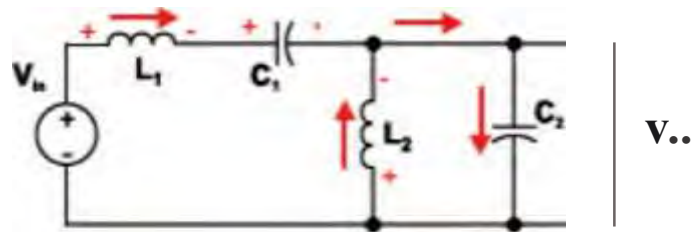


Figura 8. Sepic transistor apagado

La tensión en las terminales del inductor L_2 es igual a

$$v_{OPP} = -V_o = L_2 \frac{di}{dt} = L_2 \frac{I_{L2}}{(1-D)T} \quad (5)$$

Recordando que la tensión media en un inductor es igual a cero durante un ciclo en régimen permanente, se halló la tensión del inductor en el estado encendido (que es el mismo del condensador C_1) en términos de alguna tensión más conocida del circuito:

$$\begin{aligned} \overline{v} = 0 &= \frac{1}{T} \int_0^{DT} v_{ON} dt + \frac{1}{T} \int_{DT}^{(1-D)T} v_{OFF} dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^{DT} v_{C1} dt - \frac{1}{T} \int_{DT}^{(1-D)T} v_o dt \\ &= DV_{C1} - (1-D)V_o \Rightarrow V_d = (1-D)V_o \end{aligned} \quad (6)$$

Una vez obtenido el voltaje en el condensador en términos de tensiones más conocidas, se encontró el valor de la tensión en el inductor L_1 , 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:

$$-V_i + VL_{1OPP} + V_o \frac{(1-D)}{D} + V_o = 0 \Rightarrow VL_{1OPP} = V_i - \frac{V_o}{D} \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} \overline{VL_1} = 0 &= \frac{1}{T} \int_0^{DT} VL_{1ON} dt + \frac{1}{T} \int_{DT}^{(1-D)T} VL_{1OFF} dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_i dt + \frac{1}{T} \int_{DT}^{(1-D)T} \left(V_i - \frac{V_o}{D} \right) dt \\ &= DV_i + (1-D) \left(V_i - \frac{V_o}{D} \right) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$\frac{V_0}{V_I} = \frac{D}{1-D} \quad (9)$$

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

$$V_{C1} = V_I \text{ y } V_{L_{OFF}} = -V_0 \quad (10)$$

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

$$V_Q = V_I - V_{L_{OFF}} = V_I \pm V_0 \quad (11)$$

La corriente de polarización en el diodo depende de las corrientes de los dos inductores L_1 y L_2 , 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 L_1 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:

$$\begin{aligned} P_I = P_0 = V_I I_I = V_0 I_0 &\Rightarrow V_I I_{L1} = V_0 I_0 \Rightarrow \\ I_{L1} &= \frac{V_0 I_0}{V_I} = \frac{D I_0}{(1-D)} \end{aligned} \quad (12)$$

Y con el valor anterior, se calculó los valores máximo y mínimo de la corriente sobre el inductor L_1 :

$$\begin{aligned} i_{L1MAX} &= I_{L1} + \frac{\Delta i_{L1}}{2} = \frac{D I_0}{(1-D)} + \frac{V_I D T}{2 L_1} \\ i_{L1MIN} &= I_{L1} - \frac{\Delta i_{L1}}{2} = \frac{D I_0}{(1-D)} - \frac{V_I D T}{2 L_1} \end{aligned} \quad (13)$$

A partir del valor mínimo de corriente sobre el inductor se pudo 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:

$$\begin{aligned} i_{L1MIN} = 0 = I_{L1} - \frac{\Delta i}{2} &= \frac{D I_0}{(1-D)} - \frac{V_I D T}{2 L_1} \Rightarrow \\ L_{1MIN} &= \frac{V_I (1-D)}{2 I_0 f_S} = \frac{V_0 (1-D)}{2 D I_0 f_S} \end{aligned} \quad (14)$$

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 L_2 , el cual debió asegurarse que también trabaje en modo corriente continua por simplicidad del circuito. Se procedió a calcular primero el valor medio de corriente sobre el mismo. Si durante el ciclo de encendido, la corriente sobre L_2 es la misma del condensador C_1 pero en sentido inverso, es decir $i = -i_{C1}$, y en estado de apagado, la corriente es igual a $i = i_D - i_{C1}$, donde además la corriente en el diodo es igual a $i_D = i_{C2} + I_0$ como se ve a la salida del circuito de la Fig.9. Al recordar que la corriente promedio a través de un condensador es igual a cero, fue fácil llegar a deducir que la corriente promedio del inductor L_2 es igual a la corriente promedio de la carga, en otras palabras $I = I_0$. Por lo que los valores máximo y mínimo de la corriente fueron:

$$i_{L2\ MAX} = I + \frac{\Delta i_{L2}}{2} = I + \frac{V_i DT}{2L_2} \quad (15)$$

$$i_{L2\ MIN} = I - \frac{\Delta i_{L2}}{2} = I - \frac{V_i DT}{2L_2}$$

Al efectuar el mismo procedimiento para L_1 , la corriente mínima se iguala a cero para calcular el valor mínimo del inductor L_2 :

$$i_{L2\ MIN} = 0 = I_{L2} - \frac{\Delta i_{L2}}{2} = I_0 - \frac{V_i DT}{2L_2} \Rightarrow$$

$$L = \frac{V_o(1-D)}{2f_s I_0} = \frac{R L (1-D)}{2f_s}$$

Donde LR es la carga de salida que se colocó a la salida del convertidor.

La forma de onda de corrientes y tensiones de todos los elementos se observa en la Fig. 9.

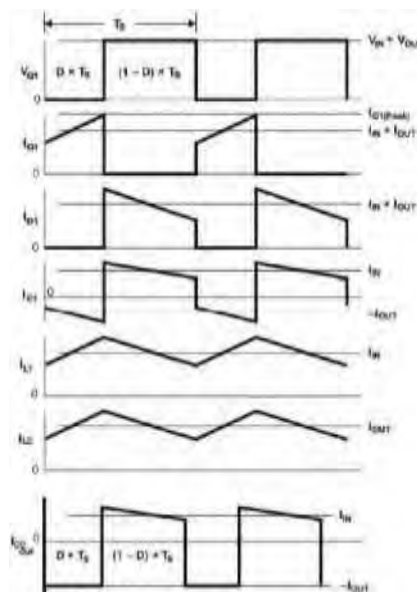


Figura 9. Formas de onda

De la Fig.10, se calculó los valores de los condensadores a partir de las áreas que se muestran. Se dio inicio calculando el valor del condensador C_1 , y al recordar que durante el ciclo de apagado del transistor, la corriente sobre C_1 es la misma que circula por L_1 .

Se observó que el área de corriente de C_1 durante el ciclo de apagado del transistor es un trapecio con alturas iguales al valor mínimo y máximo de la corriente del inductor L_1 , el diferencial de carga que es el área bajo esta curva es igual a:

$$\begin{aligned}
 |\Delta Q| &= \left(i_{L_1,MIN} (1-D)T \right) + \frac{(1-D)T \Delta i L_1}{2} \\
 &= (1-D)T \left(i_{L_1,MIN} + \frac{i L_1}{2} \right) \quad (17) \\
 &= (1-D)T I_L = \frac{I_0 D}{f_s}
 \end{aligned}$$

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

$$C_1 = \frac{\Delta Q}{\Delta V_0} = \frac{I_0 D}{\Delta V_0 f_s} \quad (18)$$

Finalmente, para el condensador de salida C_2 , durante el estado de encendido del transistor, la corriente sobre C_2 es la misma de la carga pero en sentido inverso, luego el diferencial de carga obtenido es igual a

$$|\Delta Q| = \frac{V_0 D T}{R} = \frac{V_0 D}{R f_s} \quad (19)$$

Por lo que el condensador es igual a:

$$C_2 = \frac{\Delta Q}{\Delta V_0} = \frac{V_0 D}{\Delta V_0 R f_s} \quad (20)$$

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

Este presentó 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.

RESULTADOS

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

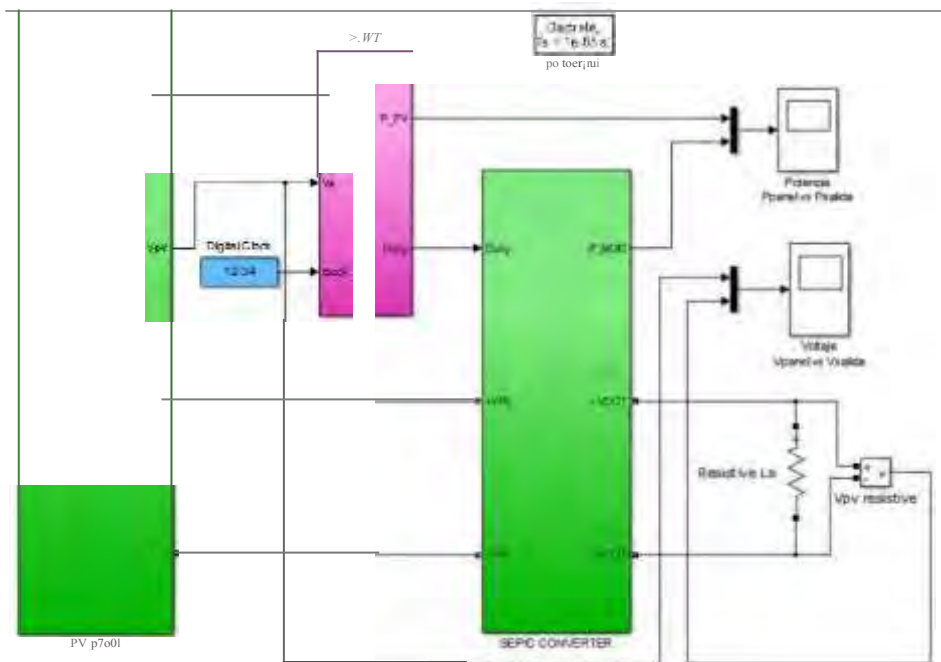


Figura 10. Sistema fotovoltaico con control MPPT

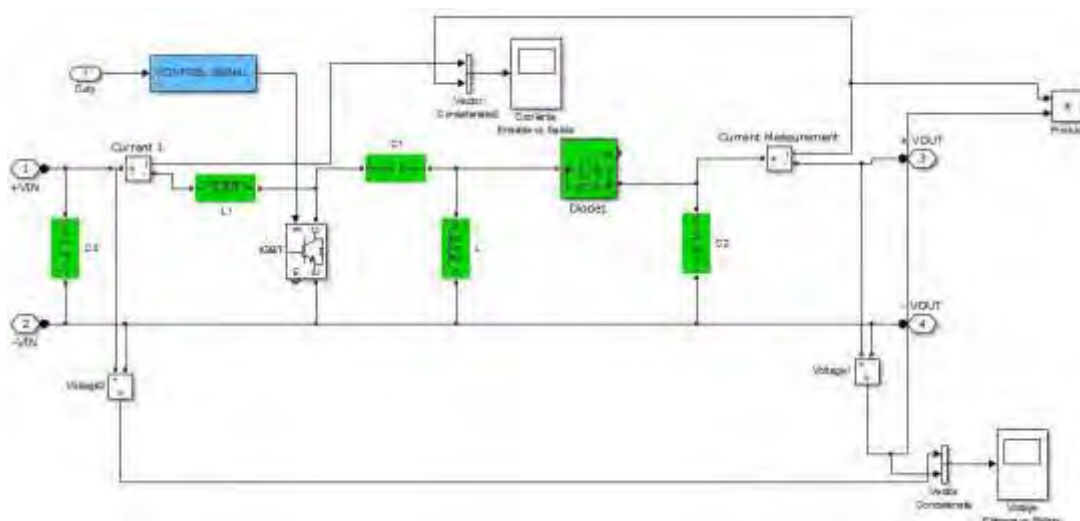


Figura 11. Circuito conversor SEPIC

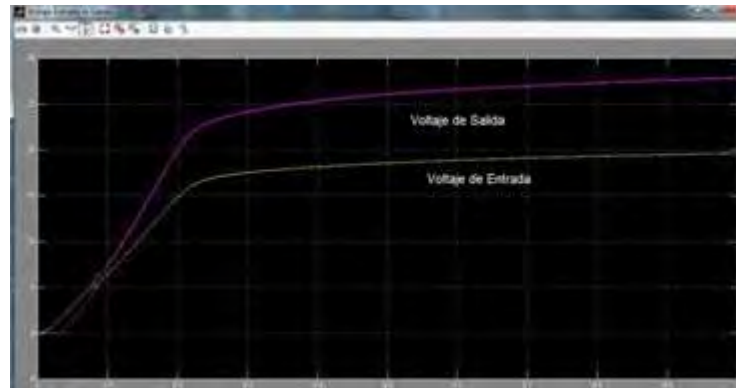


Figura 9. Respuesta de voltaje

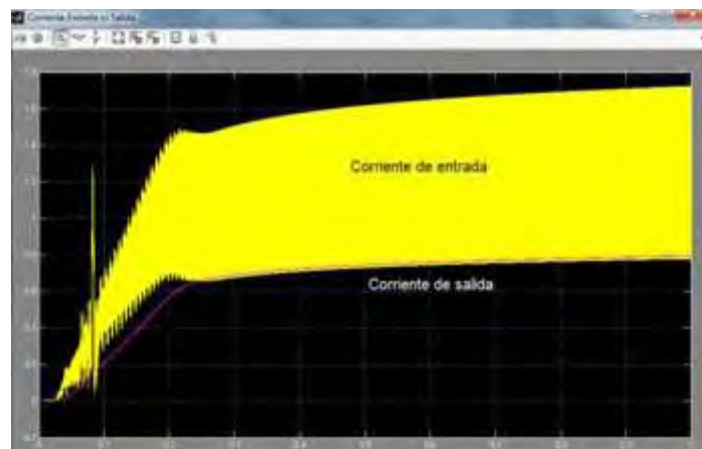


Figura 10. Respuesta de corriente

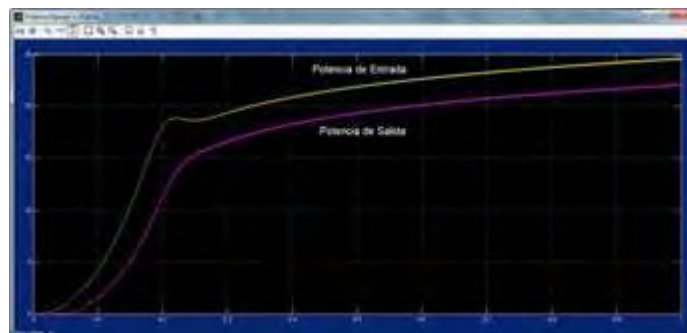


Figura 11. Respuesta de potencia

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 $L1 = 1\text{mF}$, $L2 = 300\mu\text{F}$, $C1=100\mu\text{F}$, $C2=1000\mu\text{F}$, frecuencia de 73 kHz y ciclo de carga del 50% regulado por el control de MPPT.

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.13 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 12. 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 relais, bobinas, transformadores, motores, etc.



Figura 13. 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 14. Implementación del convertidor DC-DC Sepic

Control MPPT

Para la implementación del control se hizo por hardware de la parte de potencia, el circuito permite la activación de los MOSFETs mediante el uso del integrado TL250, por otro lado, se tiene una pantalla gráfica TFT HY32D3.2" donde se muestra el nivel de potencia, el voltaje de salida y la potencia. En el circuito de potencia se tiene un módulo de potencia ACS71S-20 que contiene un circuito de acondicionamiento entregando una señal de corriente captada por el microcontrolador AVR, el mismo que contiene el control de la pantalla.



Figura 15. Placa de control y pantalla gráfica

Módulo de Control

Se observa en la Fig. 16, el montaje en totalidad del controlador, el mismo posee una pantalla para visualizar el comportamiento de las variables, adicional se almacenan en una tarjeta SD en la cual se registran 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 16. Sistema adquirente y control

DISCUSIÓN

En los últimos años se ha presentado la alternativa a un problema que nos afecta a todos, que es la generación de energía mediante componentes fósiles, ésta ha llevado a utilizar fuentes de energía más limpias y que no contaminen el medio ambiente, los sistemas fotovoltaicos se presentan como una alternativa a un tiempo prolongado, se estima que en la actualidad se han instalado en todo el mundo más de 100GW de potencia fotovoltaica. Los paneles solares actualmente poseen una eficiencia entre el 15% y el 20%, con ayuda de un sistema de seguimiento solar, estos porcentajes suben en un 10% a un 25%, dependiendo la eficiencia del sistema. El problema se presenta, cuando requerimos que nuestro sistema sea autónomo, ya que el consumo propio del seguidor, reduce la eficiencia, en una cantidad pequeña, pero que se vuelve considerable a lo largo del día. Existen varias investigaciones actuales, que apuntan al sistema de captación de energía mediante nuevos métodos, basados en el seguidor solar, que pretenden captar el mayor tiempo posible la energía solar, aumentando su eficiencia a un 45%.

Los sistemas de conversión de voltaje DC-DC, son útiles a pesar de las pérdidas producidas por los elementos electrónicos que manejan, la eficiencia en este caso del circuito conversor SEPIC es de un 80%, que podría mejorar, en nuestro caso esto se presenta por las limitaciones de la electrónica implementada en este sistema, si utilizamos sistemas más veloces y costosos la eficiencia aumentarla, pero eso demandaría una inversión más elevada. El análisis en un simulador como Matlab, nos permite tener una idea de cómo el sistema varía desde un punto de vista ideal o casi ideal, esta es una guía importante ya que nos anticipa cómo será el comportamiento de nuestro sistema.

El sistema de almacenamiento y supervisión de los datos, nos permite en conjunto con el seguidor móvil, tener un equipo didáctico capaz de otorgarnos datos en diferentes lugares

del país, lo que serviría para estimar zonas donde la producción energética es superior.

CONCLUSIONES

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. El tener un sistema de posicionamiento manual, permite observar la variación de la potencia entregada en el panel solar, a una determinada hora y ubicación, a diferencia de un sistema estático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alberts Chad, Brown Justin, Button Robert, Flower Arma and Vemuru Srinivasa. 2006. Solar Array Peak Power Tracker. American Society, 03 de marzo al 01 de abril.

Castro. 2004. Energías Renovables e Producción Descentralizada, Introducción a energía fotovoltaica. Universidad Técnica de Lisboa, Rui M.G. Castro.

Esrarn Trishan and Chapman Patrick L. 2007. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking techniques, IEEE Transactions on energy conversion, june, vol. 22 (2).

Esrarn Trishan and Chapman Patrick L. 2006. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Arrays Using Ripple Correlation Control. IEEE Transactions on Power Electronics, september, vol. 21 (5).

Fernia N., Petrone G., Spagnuolo G. and Vitelli M. Optimizing Duty-cycle Perturbation of P&O MPPT Techinque Power Electronics. Especialists Conference 2004. PESC 2004. 35thAnnual. vol. 3,pp 1939-1944.

Grow J.A., Manning C.D. 1999. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. IEE Proc. On Electric Power Applications, March, vol. 146, no. 2,pp, 193-200.

Kouta J., El-Ali A., Moubayed N., and Outlib R. 2008. 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.

Lin B. and Lee Y. 1997. Power-factor correction using Cuk converters in discontinuous-capacitor-voltage mode operation. IEEE Trans. Ind. Electronic, vol. 44, pp. 648-653, october.

Maksimovic D. and Cuk S. 1991. A unified analysis of PWM converters in discontinuous modes". IEEE Trans. Power Electron., vol. 6 pp.476-490, march.

Muhannad H. Rashid and Char Lana. 2007. Solar Power Conversion Power Electronics Handbook. New York: Academic Press, Second edition, Cap. 26, pp. 661-672.

Sera Dezso, Kerekes Tamas, Teodorescu Remus and Blaabjerg Frede. 2006. Improved MPPT algorithms for rapidly changing enviromental conditions. Power Electronics and Motion Control Conference. EPE-PEMC, 12th!nternational,pp 1614-1619.

Correspondencia:

JavierAimeidaB.
javierpollo_l3@hotmail.com

Roberto Guterrez G.
ergutierrez@espe.edu.ec

Paul Ayala T.
jpayalaespe.edu.ec