

PROPUESTA DE CONTROLADOR APLICADO A UN CONVERTIDOR SEPIC CON TÉCNICA DE MPPT PARA GESTIÓN DE ENERGÍA DE NANO SATÉLITE DEL TIPO CUBESAT

PROPOSAL OF CONTROLLER APPLIED TO A SEPIC CONVERTER WITH MPPT TECHNIQUE FOR NANO SATELLITE ENERGY MANAGEMENT OF THE CUBESAT TYPE

José Pablo García Fernández

Instituto Politécnico Nacional, México
pablogfdz@gmail.com

Marcos Yair Bote Vázquez

Instituto Politécnico Nacional, México
marcos_ybv@hotmail.com

Leobardo Hernández González

Instituto Politécnico Nacional, México
bilbito_98@yahoo.com

Jazmín Ramírez Hernández

Instituto Politécnico Nacional, México
jazzrh@hotmail.com

Recepción: 1/noviembre/2021

Aceptación: 20/diciembre/2021

Resumen

El siguiente trabajo presenta el análisis teórico de los parámetros eléctricos de una celda solar monocristalina para una simulación en ambiente espacial, los cuales servirán de base para dimensionar la propuesta de un convertidor DC/DC del tipo SEPIC (Single Ended Primary Inductance Converter) multi rama que operará en modo continuo, el convertidor será operado por la técnica de control predictivo que se basa en el método numérico de Euler, que permite predecir los valores del voltaje a la salida de las celdas solares, para controlar el seguimiento del punto de máxima potencia, MPPT (Maximum Power Point Tracker) se utiliza el algoritmo de perturbación y observación. Se presentan resultados del modelo de celda solar donde se comparan parámetros eléctricos reales y parámetros obtenidos en

condiciones de variación de irradiación y temperatura; como resultado del modelado del convertidor SEPIC; por último, se presentan los principales resultados de la técnica de control como respuesta ante variaciones de irradiancia que validan la correcta operación del convertidor propuesto.

Palabras clave: Control predictivo, CubeSat, MPPT, SEPIC multi rama.

Abstract

The following presents the theoretical analysis of the electrical parameters of a monocrystalline solar cell for a simulation in a space environment, which will serve as the basis for sizing the proposal of a multi-branch SEPIC (Single Ended Primary Inductance Converter) DC / DC converter that will operate in continuous mode, the converter will be operated by the predictive control technique that is based on the Euler numerical method, which allows predicting the voltage values at the output of the solar cells, the disturbance and observation algorithm is used to control the maximum power point tracking, MPPT (Maximum Power Point Tracker). Results of the solar cell model are presented where real electrical parameters and parameters obtained under conditions of irradiation and temperature variation are compared; as a result of the modeling of the SEPIC converter; Finally, the main results of the control technique are presented in response to irradiance variations that validate the correct proposed converter operation.

Keywords: CubeSat, MPPT, multi-branch SEPIC, predictive control.

1. Introducción

El desarrollo satelital permite realizar envío de información masiva (telefonía, internet, radio), observación y monitoreo del medio ambiente (meteorológicos), aplicaciones científicas remotas, entre otras. Una opción viable para desarrollar tecnología satelital de bajo costo es el estándar CubeSat, el cual se desarrolló para su estudio en instituciones académicas.

El estándar CubeSat establece un satélite del tamaño de un cubo de 10x10x10 cm y un peso no mayor a 1.33 kg, A este cubo de le denomina de una unidad (1U), Inicialmente los CubeSats se concibieron principalmente como herramientas

educativas o plataformas de demostración de tecnología de bajo costo que podrían desarrollarse y lanzarse en uno o dos años. Recientemente se han desarrollado y propuesto misiones CubeSat más avanzadas, lo que indica que el estándar CubeSats comienza a transitar de ser únicamente plataformas educativas y de demostración tecnológica a ofrecer oportunidades para misiones científicas reales de bajo costo con un alto valor potencial en términos de rendimiento científico e ingresos comerciales [Poghosyan, 2017].

Los satélites al ser dispositivos semiautónomos en el entorno espacial requieren de una fuente de generación y almacenamiento de energía eficiente, la cual garantice la demanda de suministro a todos los subsistemas electrónicos que lo conforman a lo largo de su vida útil.

El principal generador de energía en nano satélites del tipo CubeSat son los paneles solares, comúnmente se encuentran situados en cada una de las caras que conforman el dispositivo.

La energía captada está limitada por el área de las celdas por lo que se requiere maximizar mediante técnicas de seguimiento de máxima potencia el flujo de energía proporcionado por cada panel solar en función de su posición a la incidencia de rayos solares [Darbali, 2017]. El módulo de potencia asegura los niveles de voltaje y corriente requeridos por los diferentes módulos del satélite hasta en los escenarios de operación más críticos y en las condiciones más adversas [Salamanca, 2018].

Una característica del convertidor SEPIC, es que la tensión de salida puede ser mayor o menor que la tensión de entrada, debido a esta característica es que este tipo de convertidor se emplea ampliamente como regulador de voltaje. En [Salazar, 2016] y [Waghulde, 2016] se emplea como elemento regulador a convertidores tipo reductor y elevador, una característica deseada de los convertidores de potencia con aplicaciones satelitales es el que presenten un mejor rendimiento debido a las variaciones de irradiancia. Los requisitos de tensión de salida deben ser confiables, para garantizarlo lo dos modos de control comúnmente usados y que son: control de corriente y tensión [Bayimissa, 2015]. Las variables de control como la corriente y la tensión se pueden ajustar a través de la función de costo a evaluar [Cortes, 2009]. La propuesta que se presenta integra un convertidor SEPI multi rama

controlado por medio de la técnica de control predictivo para lograr seguimiento del punto de máxima potencia de las celdas solares que integran a un CubeSat.

2. Métodos

Modelo de celda solar

Mediante el circuito equivalente de una celda solar de diodo único [Seddaoui, 2011] como se muestra en la figura 1, se determinan los parámetros para un coeficiente de masa de aire de cero con una irradiancia solar de 1366 W/m^2 para una celda solar modelo SM531K10L, en la tabla 1 se muestran las características eléctricas evaluadas con un coeficiente de masa de aire de 1.5 a $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

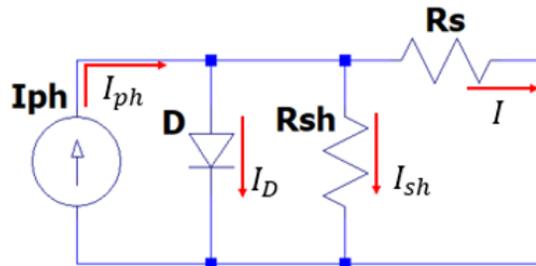


Figura 1 Circuito equivalente de una celda solar de único diodo.

Tabla 1 Parámetros eléctricos de la celda SM531K10L.

Símbolo	Parámetro	Valores
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto	6.9 V
I_{sc}	Corriente de corto circuito	218 mA
V_{mpp}	Punto máximo de voltaje	5.58 V
I_{mpp}	Punto máximo de corriente	205 mA
P_{mpp}	Punto máximo de potencia	1141 mW
FF	Factor de llenado	>70%
η	Eficiencia	25%
$\Delta V_{oc}/\Delta T$	Coeficiente de temperatura a circuito abierto	-17.4 mV/K
$\Delta I_{sc}/\Delta T$	Coeficiente de temperatura a corto circuito	95.8 $\mu\text{A/K}$

Las expresiones de una celda fotovoltaica son las siguientes: corriente ecuación 1, foto corriente ecuación 2, corriente del diodo ecuación 3, corriente de saturación ecuación 4, corriente de saturación inversa ecuación 5, corriente de resistencia de derivación ecuación 6, en la ecuación 7 se muestra el modelo general de la celda.

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha(T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (2)$$

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nKN_sT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_{g0}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)}{nK}\right] \quad (4)$$

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{nKN_sT}\right) - 1} \quad (5)$$

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (6)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{A}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (7)$$

En la tabla 2 se muestra la nomenclatura de las ecuaciones.

Tabla 2 Nomenclaturas.

Símbolo	Parámetro
I_{ph}	Fotocorriente (A)
I_0	Corriente de saturación (A)
I_{sr}	Corriente de saturación inversa (A)
K	Constante de Boltzmann (1.38x10 ⁻²³ J/K)
q	Carga del electrón (1.602x10 ⁻¹⁹ C)
E_{g0}	Banda prohibida del silicio (1.11)
T_{ref}	Temperatura de celda(K)

Aplicando las ecuaciones mencionadas de forma modular en Simulink como se muestra en la figura 2, se logra el modelado de una celda solar, el esquema general presenta como parámetros de entrada la temperatura y la irradiación solar; y como parámetros de salida: el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito, los cuales son mandados al Workspace de Matlab.

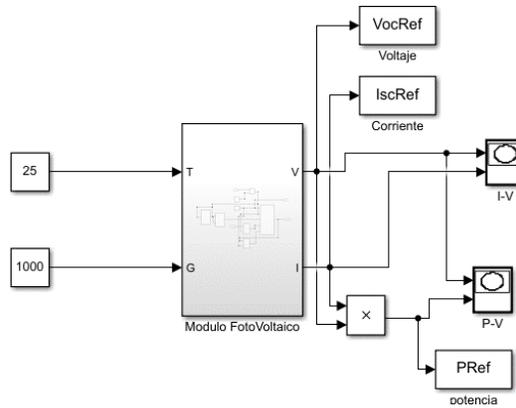


Figura 2 Esquema modular de una celda solar.

Modelo del convertidor DC/DC SEPIC multi rama

Con los datos eléctricos obtenidos será posible dimensionar los elementos que se implementarán en un convertidor DC/DC no aislado del tipo SEPIC multi rama que se muestra en la figura 3, donde se indica la respuesta del comportamiento eléctrico (voltaje y corriente) de las celdas solares que tendrán a la entrada del convertidor, las cual tendrá variaciones en función de la irradiancia solar y la temperatura. La operación del convertidor depende del sistema de control utilizado el cual permitirá activar el estado de conducción o bloqueo del Mosfet de cada rama del convertidor.

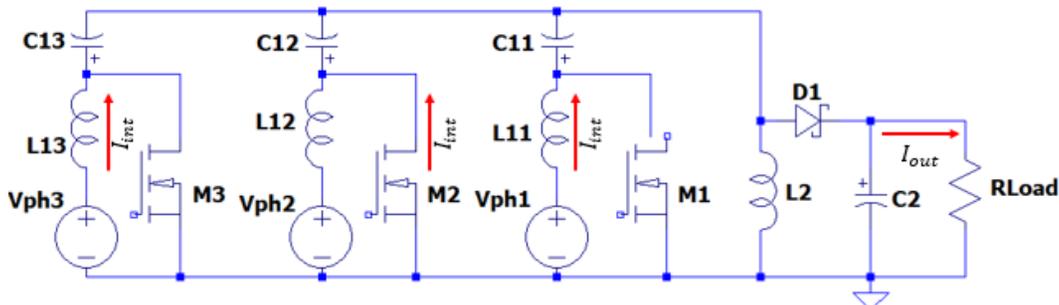


Figura 3 Convertidor SEPIC multi rama.

Primer modo de operación: Mosfet conduce (ON)

En este modo de operación se cumple que M1, M2 y M3 se encuentran en conducción al aplicarles una señal de control en estado alto, el voltaje de entrada circula por el inductor 1 (L11, L12, L13) presentando un incremento de corriente,

mientras es aplicado en el mismo instante el voltaje de entrada al inductor 2 (L2) debido al voltaje de C11, C12 y C13; el diodo se encuentra en desconexión como se muestra en la figura 4.

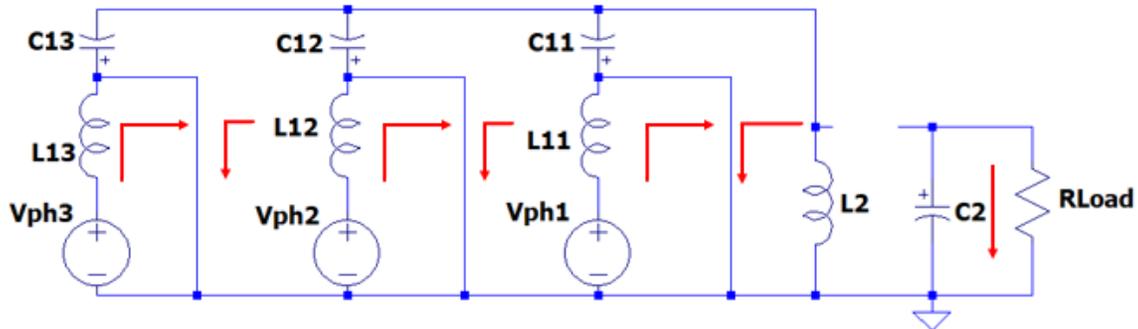


Figura 4 Circuito equivalente con Mosfet's en conducción.

Segundo modo de operación: Mosfet's no conducen (OFF)

En este modo de operación se cumple que M1, M2 y M3 se encuentran en bloqueo al aplicarle una señal de control en estado bajo, las corrientes de los inductores L11, L12, L13 fluyen hacia C11, C12, C13 respectivamente, estas hacia el diodo D, mientras que la corriente del inductor L2 fluye hacia el diodo D y el capacitor C2, en la carga se obtiene la suma de las corrientes de los inductores circulando por el diodo D como se muestra en la figura 5.

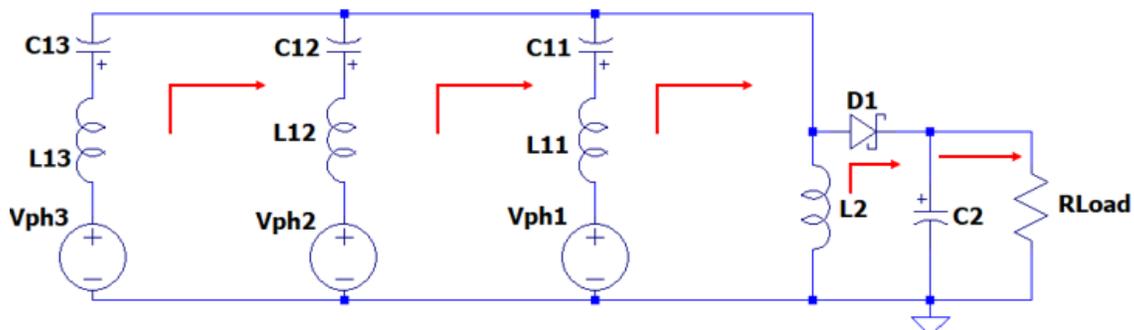


Figura 5 Circuito equivalente con Mosfet en desconexión.

En las ecuaciones 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15 se muestran las expresiones de conmutación unificadas, donde \bar{u} tomará los valores dependiendo del estado ON u OFF de cada Mosfet.

$$\frac{di_{L11}}{dt} = \frac{V_{ph1}}{L_{11}} + \bar{u} \left(\frac{V_{C11}}{L_{13}} + \frac{V_{C2}}{L_{13}} \right) \quad (8)$$

$$\frac{di_{L12}}{dt} = \frac{V_{ph2}}{L_{12}} + \bar{u} \left(\frac{V_{C12}}{L_{13}} + \frac{V_{C2}}{L_{13}} \right) \quad (9)$$

$$\frac{di_{L13}}{dt} = \frac{V_{ph3}}{L_{13}} + \bar{u} \left(\frac{V_{C13}}{L_{13}} + \frac{V_{C2}}{L_{13}} \right) \quad (10)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \bar{u} \left(\frac{V_{ph3}}{L_2} - \frac{V_{L13}}{L_2} \right) - \frac{V_{C13}}{L_2} + \bar{u} \left(\frac{V_{ph2}}{L_2} - \frac{V_{L12}}{L_2} \right) - \frac{V_{C12}}{L_2} + \bar{u} \left(\frac{V_{ph1}}{L_2} - \frac{V_{L11}}{L_2} \right) - \frac{V_{C11}}{L_2} \quad (11)$$

$$\frac{dV_{C11}}{dt} = \frac{i_{c13}}{C_{11}} + \frac{i_{c12}}{C_{11}} + \frac{i_{L2}}{C_{11}} + \bar{u} \left(\frac{i_{L11}}{C_{11}} \right) \quad (12)$$

$$\frac{dV_{C12}}{dt} = \frac{i_{c13}}{C_{12}} + \frac{i_{c11}}{C_{12}} + \frac{i_{L2}}{C_{12}} + \bar{u} \left(\frac{i_{L12}}{C_{12}} \right) \quad (13)$$

$$\frac{dV_{C13}}{dt} = \frac{i_{c12}}{C_{13}} + \frac{i_{c11}}{C_{13}} + \frac{i_{L2}}{C_{13}} + \bar{u} \left(\frac{i_{L13}}{C_{13}} \right) \quad (14)$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \bar{u} \left(\frac{i_{L13}}{C_2} + \frac{i_{L12}}{C_2} + \frac{i_{L11}}{C_2} + \frac{i_{L2}}{C_2} \right) - \frac{V_{C2}}{RC_2} \quad (15)$$

Técnica de control predictivo

Para el diseño del controlador que permitirá cambiar el estado de conmutación de los Mosfet's se utilizará la ecuación 15 dado que se necesita controlar el voltaje de salida del convertidor para suministrar la máxima corriente a la carga; se utilizará el método numérico de Euler, ecuación 16, para definir un modelo matemático que permitirá determinar el voltaje del capacitor V_{C2} en el instante $k + 1$, igualando la ecuación 15 con la ecuación 16, se obtiene la expresión final, ecuación 17.

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{V_{C2(k+1)} - V_{C2(k)}}{T} \quad (16)$$

$$v_{C2(k+1)} = \frac{T}{C_2} \left[(i_{L13} + i_{L12} + i_{L11} + i_{L2})\bar{u} - \frac{V_{C2}}{R} \right] + v_{C2(k)} \quad (17)$$

La ecuación 17 en principio dará dos resultados predictivos para el voltaje en el capacitor, para seleccionar el adecuado se debe implementar una función de costo

que permitirá minimizar el error del resultado [Aliaga, 2019], aplicando una diferencia entre el valor del voltaje de referencia menos el valor predicho, como se muestra en la ecuación 18.

$$g = |v_{ref} - v_{c2(k+1)}| \quad (18)$$

El voltaje de referencia estará determinado por el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) el cual se ajustará de manera continua mediante el sensado de voltaje y corriente de la celda solar con el objetivo de mantener el funcionamiento del sistema fotovoltaico en el punto cercano a potencia pico ante las condiciones variantes de irradiancia y temperatura. El algoritmo que se utilizará será el de perturbación y observación (P&O), el cual perturba la tensión (disminuyendo o aumentando) para garantizar la potencia máxima, Si la potencia actual $P(k)$ es mayor que en la anterior medida $P(k - 1)$, entonces la dirección de la perturbación se mantiene, de lo contrario se invierte [Farkas, 2013], el comportamiento esperado se muestra en la figura 6.

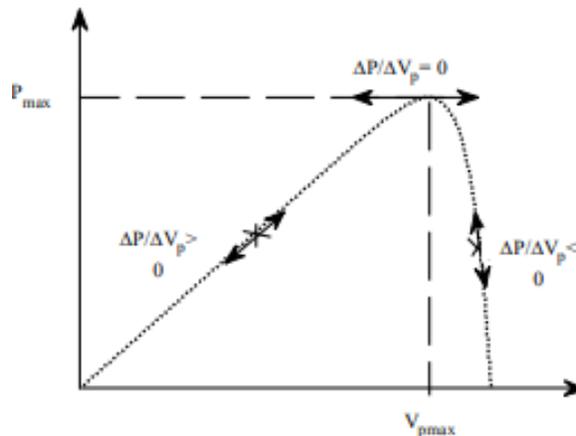


Figura 6 Relación tensión potencia.

3. Resultados

Resultado modelo de celda solar

En la figura 7a, se muestra la respuesta que tendrán las curva IV y PV con una variación de irradiancia de 500 a 1366 W/m² a 25 °C, en la tabla 3 se muestran los valores de la variación.

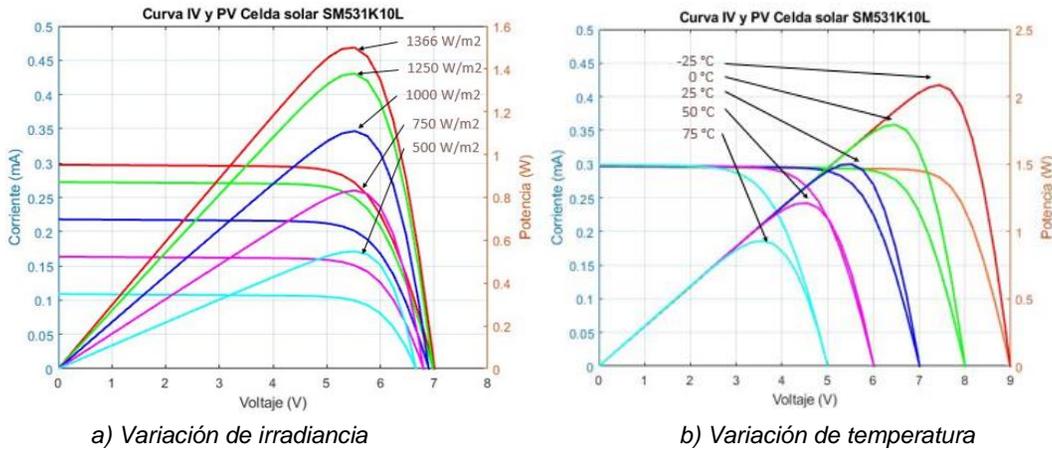


Figura 7 Curvas IV y PV de la celda solar SM531K10L.

Tabla 3 Resultados variación de irradiancia en el modelo de celda solar.

Símbolo	Irradiancia (W/m ²) a 25 °C					
	$G_R = 1000$	$G_C = 500$	$G_C = 750$	$G_C = 1000$	$G_C = 1250$	$G_C = 1366$
V_{oc} (V)	6.91	6.66	6.8	6.9	6.98	7.009
I_{sc} (A)	0.218	0.1089	0.1633	0.2178	0.2722	0.2975
V_{mpp} (V)	5.58	5.52	5.52	5.52	5.52	5.52
I_{mpp} (A)	0.205	0.0993	0.1507	0.2010	0.2496	0.2716
P_{mpp} (W)	1.141	0.5480	0.8302	1.1093	1.378	1.499

En la figura 7b, se muestra la respuesta de las curvas IV y PV con variación de temperatura de -25 °C a 75 °C a 1366 W/m², en la tabla 4 se muestran los valores de la variación. En la tabla 5 se presentan la comparativa de los valores reales y de los valores calculados, así como los valores de errores absolutos, relativo y porcentual.

Tabla 4 Resultado de variación de temperatura del modelo de celda solar.

Símbolo	Irradiancia 1366 (W/m ²)				
	-25 °C	0 °C	25 °C	50 °C	75 °C
V_{oc} (V)	8.988	8	7.009	6.01	5.001
I_{sc} (A)	0.2961	0.2868	0.2975	0.2982	0.2989
V_{mpp} (V)	7.44	6.48	5.52	4.56	3.6
I_{mpp} (A)	0.2804	0.2766	0.2716	0.2655	0.2583
P_{mpp} (W)	2.0865	1.7921	1.499	1.2106	0.9297

Tabla 5 Comparativa de valor real y calculado del modelo de celda solar.

Símbolo	Irradiancia (W/m ²) a 25 °C				
	$G_R = 1000$	$G_C = 1000$	$E_{absoluto}$	$E_{relativo}$	$E(\%)_{relativo}$
$V_{oc} (V)$	6.91	6.9	0.0100	0.0014	0.1447
$I_{sc} (A)$	0.218	0.2178	0.0002	0.0009	0.0917
$V_{mpp} (V)$	5.58	5.52	0.0600	0.0108	1.0753
$I_{mpp} (A)$	0.205	0.2010	0.0040	0.0195	1.9512
$P_{mpp} (W)$	1.141	1.1093	0.0317	0.0278	2.7783

Resultado del modelo del convertidor DC/DC SEPIC

En la tabla 6 se muestran los valores de los componentes utilizados en las simulaciones, como se utilizarán el mismo tipo de celdas solares los valores serán los mismo para cada componente de las tres ramas.

Tabla 6 Valor de componentes del convertidor SEPIC.

Descripción	Parámetro	Valor
Voltaje de entrada	V_{in}	6.9 V
Voltaje de salida	V_{out}	5 V
Corriente de salida	I_{out}	840 mA
Potencia de salida	P_{out}	4.2 W
Carga	R_{Load}	5.9 Ω
Frecuencia	F_{SW}	50 kHz
Capacitor 1	C_1	20.4 μ F
Capacitor 2	C_2	51.1 μ F
Inductor 1	L_1	190.5 μ H
Inductor 2	L_2	138 μ H

En la figura 8 se presentan la señal de salida del convertidor SEPIC multi rama, donde se observa el valor del voltaje de entrada (azul) y el voltaje de salida (rojo) que se encuentra cerca del valor de voltaje al que fue diseñado con una irradiación de 1366 W/m². En la figura 9a se muestran las corrientes del diodo (rojo) y la corriente del MOSFET (azul). En la figura 9b se muestra la señal de control que es aplicada al MOSFET. En la figura 10a se muestra la corriente de entrada (rojo) y la corriente de salida (azul), en la figura 10b se muestra el detalle de ambas corrientes. Con los resultados obtenidos se obtiene un $V_{out} = 5 V$, $I_{out} = 840 mA$, para un voltaje de celdas de 5.52 V y una demanda de corriente de celdas de 813 mA, lo que indica una eficiencia de 93%.

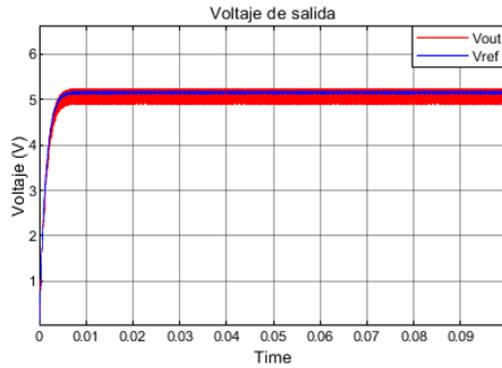
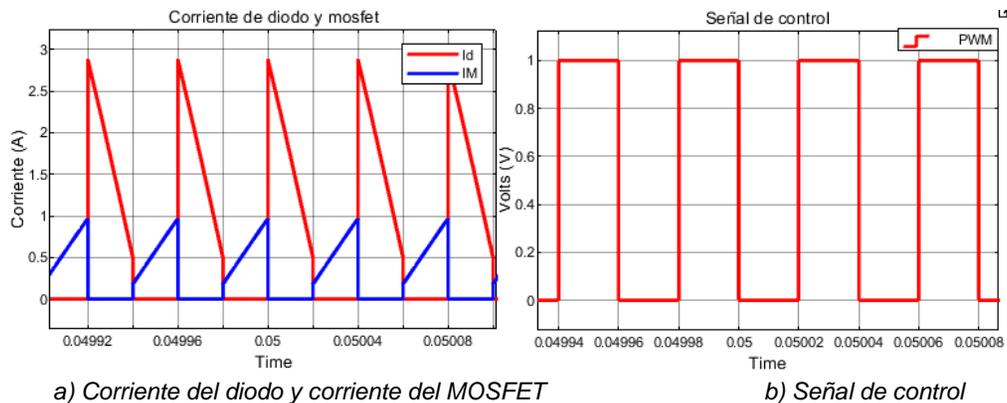


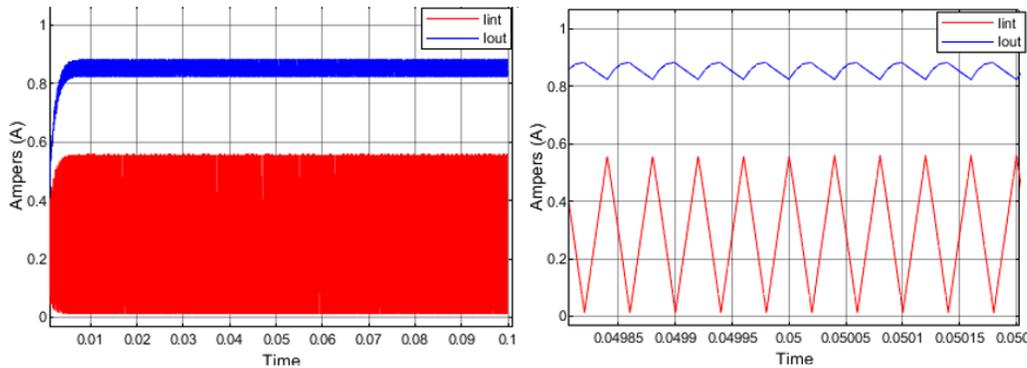
Figura 8 Voltaje de salida del convertidor SEPIC multi rama.



a) Corriente del diodo y corriente del MOSFET

b) Señal de control

Figura 9 Corrientes de diodo, MOSFET y señal de control.



a) Corriente de entrada y salida

b) Vista ampliada de las corrientes

Figura 10 Corriente de entrada y salida.

Resultado de la técnica de control predictivo

En la figura 11 se muestra el comportamiento del voltaje de salida a cambios de referencia, como se observa la técnica de control utilizada, permite un correcto seguimiento para cambios de irradiación solar. En la figura 12a se muestra el

seguimiento del voltaje de salida ante una perturbación, en la figura 12b se muestra una vista ampliada del voltaje de salida, donde se puede observar con más detalle el correcto seguimiento del algoritmo de control ante perturbaciones.

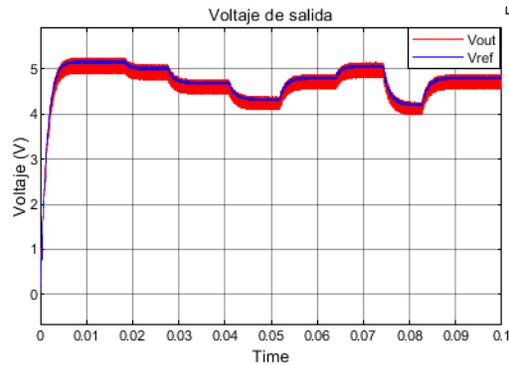
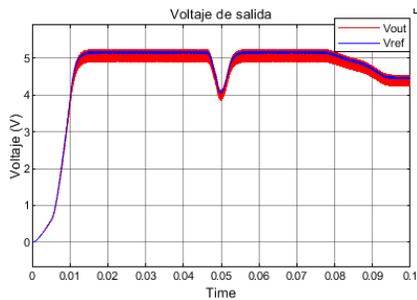
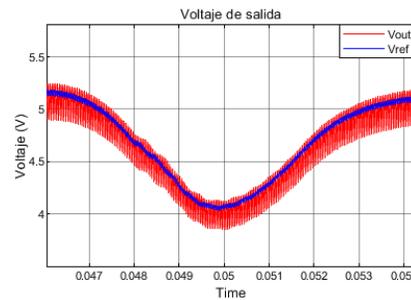


Figura 11 Respuesta del control predictivo a cambios de irradiación solar.



a) Variación de voltaje de referencia



b) Vista ampliada del cambio de voltaje

Figura 12 Seguimiento de voltaje de salida mediante control predictivo.

4. Discusión

En el presente trabajo se propone una estrategia para la implementación de celdas solares monocristalinas de bajo costo, lo que permite la gestión de componentes del convertidor en un cuerpo principal.

5. Conclusiones

Las simulaciones obtenidas del modelo de celda solar permitieron conocer los parámetros eléctricos en diversas variaciones de irradiancia solar, principalmente la irradiancia en un ambiente de simulación espacial, lo que permitió dimensionar adecuadamente los valores para cada uno de los dispositivos electrónicos del

convertidor SEPIC multi rama. Esta propuesta de convertidor permite agregar o quitar ramas en el cuerpo principal de un SEPIC pudiendo integrar más de 2 convertidores, haciéndolo una propuesta viable para implementarse en la tecnología CubeSat que está limitada en dimensiones y en peso; por lo que se requiere de una buena gestión de energía proveniente de las celdas solares. La implementación del modelo predictivo permite ajustar el valor de la señal que controla el MOSFET ante las perturbaciones ambientales que se presentan en las celdas solares, por lo que se requiere un trabajo en conjunto con la técnica de MPPT, lo que permite obtener la máxima potencia ante las condiciones cambiantes. Los resultados obtenidos permiten validar el modelado y control del convertidor propuesto para su implementación física en una segunda etapa, tabla 7.

Tabla 7 Comparativa topologías.

Factor/topología	Propuesta SEPIC 3 ramas (Reductor-elevador)	SEPIC [Darbali, 2018]	SEPIC [Waghulde, 2016]
Número de fuentes de voltaje	3	1	1
Potencia	4.2 W	6 W	32.6 W
Eficiencia	93%	(80%-87%)	85%
Voltaje de entrada	5.52 V	4 V	4.9 V
Voltaje de salida	5 V	8.4 V	9.7 V
Frecuencia de conmutación	50 kHz	No especifica	220 kHz
Numero de dispositivos de conmutación	3	1	1
Numero de diodos	1	1	1
Numero de inductores	4	1	1
Numero de capacitores	4	1	1

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Aliaga, R., Muñoz, J., Rojas, D., Villalón, A., Troncoso, J. and Gaisse, P., Predictive Control of a Buck Converter for Photovoltaic Energy: An Experimental Implementation, IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2019.
- [2] Bayimissa, K. D. M., Raji, A. K., Adonis, M., Performance evaluation of voltage and current control mode controller for SEPIC converter in CubeSats application, International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 2015.

- [3] Cortes, P., Kouro, S., Guidelines for weighting factors design in Model Predictive Control of power converters and drives. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2009.
- [4] Darbali Zamora, Cobo Yepes, R., N., Salazar Duque, J. E., Ortiz Rivera, E. I. and Rincon Charris, Buck Converter and SEPIC Based Electronic Power Supply Design with MPPT and Voltage Regulation for Small Satellite Applications, IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2017.
- [5] Farkas, Rusirawana. Identification of model parameters of the photovoltaic solar, ISES Solar World Congress, 2013.
- [6] Granda Gutiérrez, Everardo, Orta, O., Díaz Guillén, J. C., Jiménez, Marco, Osorio, Mario, González Albarrán, Marco, Modelado y simulación de celdas y paneles solares, 2013.
- [7] Maissa Farhat, Oscar Barambones, Ramos Jose A., Duran, Eladio, Andujar, Jose M., Diseño e Implementación de un Sistema de Control estable basado en Lógica Borrosa para optimizar el rendimiento de un sistema de Generación Fotovoltaico. Universitat Politecnica de Valencia, 2015.
- [8] Poghosyan, Golkar., CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions, Progress in Aerospace Sciences, 2017.
- [9] Salamanca Céspedes, Jorge & Escobar, Roberto., Diseño e Implementacion de un Módulo de Gestión de Energía para un Pico-Satelite Tipo Cubesat. KnE Engineering, 2018.
- [10] Salazar Duque, J. E., Ortiz Rivera, E. I. and Gonzalez Llorente, J., A fuzzy-logic-controller based on output reference tracking applied to photovoltaic systems using a SEPIC converter. IEEE ANDESCON, 2016.
- [11] Seddaoui, N., Rahmani, L., Chauder, A. and Kessal, A., Parameters extraction of photovoltaic module at reference and real conditions, 46th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), 2011.
- [12] Waghulde, D., Simulation, design and implementation of various MPPT systems for micro cube-satellite application. Second International Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their Impact on Humanity (CIPECH), 2016.