



ESTRATEGIAS DE CONTROL DE TENSION PARA UN CONVERTIDOR BOOST UTILIZADO EN BOMBEO FOTOVOLTAICO¹

Gabriel Y. Aguirre²; Guillermo A. Fernández³; Fernando Botterón⁴

¹Trabajo de Investigación

²Integrante de Proyecto, Ingeniero Electrónico, gabrielaguirre@fio.unam.edu.ar

³Codirector de Proyecto, Ingeniero Electrónico, guillermo.fernandez.fio@gmail.com

⁴Director de Proyecto, Ingeniero Electricista, botteron@fio.unam.edu.ar

Resumen

En este artículo se presenta el estudio y análisis de diferentes estrategias de control de la tensión de salida de un convertidor CC-CC elevador conectado a paneles solares fotovoltaicos, utilizado para riego en huertas rurales. El convertidor está conectado a un inversor PWM monofásico que alimenta a una bomba electromecánica. El convertidor *boost*, operando en modo de conducción continua, es de naturaleza no lineal, y debe ser linealizado entorno a un punto de operación. El enfoque del trabajo apunta al diseño de diferentes estrategias de control de la tensión de la barra CC, buscando el mejor desempeño cuando opera con el inversor monofásico. Los controladores analizados y comparados, son: (i) con un lazo simple de tensión, (ii) con lazos anidados de corriente y tensión, y (iii) con realimentación de estados con control integral (servo) y algoritmo anti-*windup*. La simulación digital demuestra que los mejores resultados posee el caso (iii), además de presentar anti-*windup*.

Palabras Clave:

Convertidor CC-CC – Inversor – Energía fotovoltaica – Sistemas autónomos – Riego.

Introducción

En las regiones de la provincia de Misiones los sistemas de bombeo generalmente son dependientes de la red eléctrica o algún sistema alternativo de generación, los cuales a través de una bomba alimentan de agua a las huertas, plantaciones, viveros, consumo familiar y/o pequeñas comunidades. Algunas zonas rurales poseen problemas de suministro de la energía eléctrica, como ser de disponibilidad, o de confiabilidad debido a los frecuentes cortes con el agregado de que la empresa que brinda el servicio no suele regularizar rápidamente la situación.

Para tratar de solucionar este problema se puede utilizar la energía solar, la cual se posee en abundancia en nuestra provincia y el sistema de conversión presenta bajo mantenimiento y es amigable con el medio ambiente.

Los sistemas de bombeo alimentados por paneles solares pueden ser sistemas que alimentan la bomba en corriente continua (CC) o en corriente alterna (CA); los primeros se conectan



6^{ta} JIDeTEV

Investigación. Desarrollo Tecnológico.
Muestra de la Producción.
Extensión. Vinculación.



directamente los paneles a la una bomba del tipo continua, pero son de elevados costos, además, los motores de continua necesitan mayor mantenimiento que los motores de alterna (Chandel, Nagaraju Naik, y Chandel 2015). Por otro lado, los sistemas alimentados en CA tienen una etapa más, que convierte la energía continua de los paneles solares en energía alterna, y esta última una bomba convencional de bajo costo que opera con las características de la red. Estos sistemas poseen menores costos y muy buenas prestaciones.

Entonces el sistema planteado en este trabajo es un sistema de bombeo de corriente alterna (CA) utilizando paneles fotovoltaicos (PFV). Para ello se utiliza convertidores estáticos que transformen la energía continua en energía alterna y entre niveles de tensiones diferentes. Las topologías propuestas son convertidor del tipo continua-continua CC-CC elevador de tensión no aislado (Kazmierczuk 2008; Imhoff 2007) junto a una topología continua-alterna CC-CA (Erickson y Maksimovic 2007; Mohan y Undeland 2007) o inversor alimentado en tensión.

Para controlar este convertidor se plantea controladores que mantengan la tensión de salida constante para cuando se conecta a la salida un inversor monofásico de $220V_{CA}/50Hz$. Para conseguir este objetivo, la tensión continua de salida del *boost* debe mantenerse en $400V_{CC}$.

El objetivo de este trabajo es el estudio, desarrollo y prueba, a través de simulación digital, de diferentes controladores de tensión aplicados al convertidor *boost*. Los resultados son analizados considerando como carga a un inversor monofásico PWM alimentado en tensión con carga no lineal.

El convertidor CC-CC se presenta en la Fig. 1, diseñado para una potencia de 5kW (Aguirre et al. 2015), con una tensión de entrada entre 80 a $350V_{CC}$ manteniendo el modo de conducción continua y posee una tensión de salida de $400V_{CC}$. Posee dos sensores de tensión, uno para la tensión de entrada y otro para la de salida y un sensor de corriente del inductor de entrada. La frecuencia de conmutación es de 20kHz.

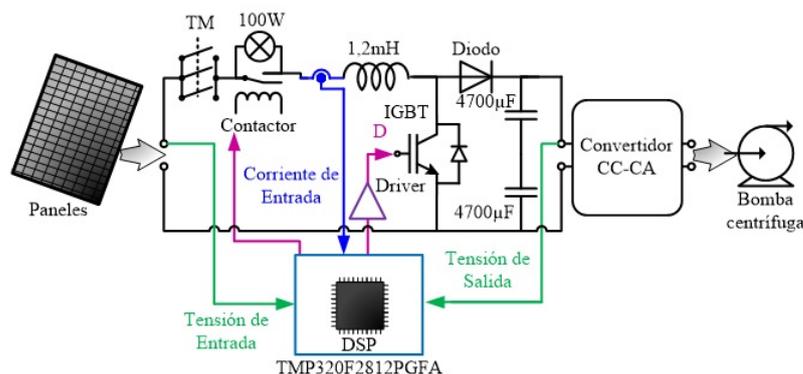


Fig. 1. Implementación de bombeo fotovoltaico utilizando bomba centrífuga de corriente alterna.



Metodología

I. Modelo del Convertidor *boost*

Como se desarrolla en (Aguirre, Kolodziej, y Botteron 2015), el modelo en espacio de estados del convertidor CC-CC en cuestión debe ser modelado para los casos cuando la llave S está cerrada y cuando está abierta.

El sistema en espacio de estados se describe como se muestra en la Ec.(1).

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{F}w(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}u(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde las variables de estado del sistema son la corriente en el inductor L y la tensión sobre el capacitor C , o sea, $\mathbf{x}(t) = [i_L \ v_C]^T$; mientras que la variable de salida es la tensión de carga $v_s(t)$.

Considerando despreciables las resistencias de pérdidas, y realizando la linealización del sistema en torno a un punto de operación se presenta en la Ec.(2).

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{V_{ibase}}{I_{ibase}} \frac{1-D}{L} \\ \frac{I_{ibase}}{V_{ibase}} \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = [0 \ 1]; \mathbf{B}_{BF} = [\mathbf{B} \ \mathbf{F}] = \begin{bmatrix} \frac{V_{ibase}}{I_{ibase}} \frac{1}{L} & \frac{V_c}{I_{ibase}} \frac{1}{L(1-D)} \\ 0 & -\frac{V_c}{V_{ibase}} \frac{1}{RC(1-D)^2} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

Donde \mathbf{B}_{BF} resulta ser una matriz compuesta por \mathbf{B} , que es la matriz de entrada que multiplica al ciclo de trabajo permitiendo controlar al sistema, y \mathbf{F} , que es la matriz de disturbios que multiplica a la tensión de entrada.

Para realizar la implementación digital de las estrategias de control que se proponen, se debe obtener el modelo en tiempo discreto, para esto se asume que el vector de entrada $u(t)$ se mantiene constante durante un periodo de muestreo " T ", además se incorpora el atraso $T_d = T$ necesario para el computo de la ley de control (Botterón 2005).

II. Estrategias de control de tensión

A. Controlador Proporcional Integral (PI)

El controlador se diseña en la bibliografía (Aguirre, Kolodziej, y Botteron 2015), donde la expresión del controlador está dada por la Ec.(3). El diseño fue realizado considerando que el sistema compensado tenga un margen de fase de 78° y error de régimen nulo.



$$G_{PI}(z) = \frac{0,09546z - 0,09541}{z - 1} \quad (3)$$

B. Lazo anidado de corriente y tensión utilizando el modelo entrada-salida del sistema.

El control propuesto está definido en tiempo discreto y posee un lazo interno de corriente del inductor y un lazo externo de tensión, la frecuencia de muestro a la que trabaja el lazo de corriente es de 20kHz y el lazo externo trabaja a una frecuencia de 2kHz. A la hora de diseñar el control se debe asegurar que el lazo interno sea más rápido que el lazo externo para no perjudicar la respuesta del sistema. El esquema de control se presenta en la Fig. 2.

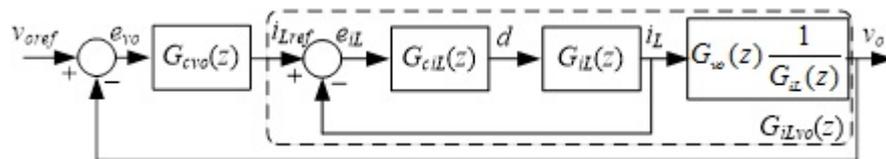


Fig. 2. Esquema de control de lazos anidados de tensión y corriente utilizado el enfoque de FT.

Para esta estrategia se utilizan controladores PI y para el diseño se aplica el método de reubicación de polos utilizando la condición de fase y magnitud. Con lo cual, considerando para el lazo de corriente un tiempo de establecimiento (t_s) de 0,45ms y sobrepaso (M_P) de 1%, y para el lazo de tensión t_s igual a 60ms y M_P de 1%. Los controladores obtenidos se presentan en la Ec. (4).

$$G_{cIL}(z) = \frac{5,2706z - 5,2348}{z - 1}; \quad G_{cvo}(z) = \frac{8,83z - 8,5598}{z - 1}; \quad (4)$$

C. Estrategia con realimentación de estados más acción integral con anti-windup (AW)

Para el diseño de esta estrategia, se parte del modelo obtenido en la Ec.(2). El esquema de control a implementar se presenta en la Fig. 3.

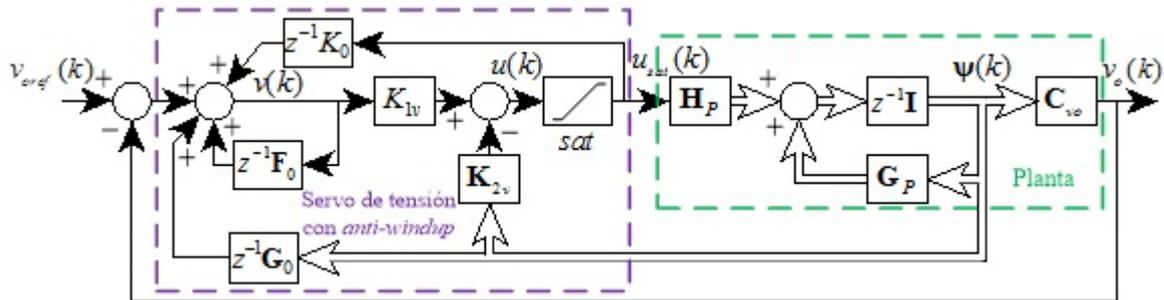


Fig. 3. Esquema de control utilizando realimentación de estados con integrador de tensión y anti-windup.

Observando el esquema se puede ver que la acción de control está dada por la siguiente expresión (Ogata 1996).

$$u(kT) = -\mathbf{K}_{2v}\boldsymbol{\psi}(kT) + K_{1v}v(kT) \quad (5)$$

Considerando una especificación de t_s igual a 15ms y un M_p del 1% y operando según (Ogata 1996) se obtienen las ganancias del compensador.

$$\mathbf{K}_{2v} = [0,0546 \quad 1,3435 \quad -0,8483]; K_{1v} = 0,0119; \quad (6)$$

Debido a la presencia de la acción integral, la inserción de un algoritmo de *anti-windup* resulta necesario ante operaciones del convertidor alejadas del punto de operación (Franklin, Powell, y Workman 1998; Botterón 2001); donde K_0 es la ganancia asociada a la acción del *anti-windup*, $\mathbf{F}_0 = \mathbf{I} - K_0 K_{1v}$ y $\mathbf{G}_0 = K_0 \mathbf{K}_{2v}$. Llegando a los valores $K_0 = 0,8392$, $\mathbf{F}_0 = 0,99$ y $\mathbf{G}_0 = [0,0458 \quad 1,1291 \quad -0,7119]$.

D. Estrategia con realimentación de estados más acción de un servo con AW de tensión y de corriente

Para esta estrategia se establece la necesidad de controlar, además de la tensión de salida, la corriente en el inductor de entrada. El esquema de control se visualiza en la Fig. 4.

Nótese que la representación del servo de corriente presenta un retardo de un periodo de muestreo para que pueda ser implementado.

Para el cálculo del controlador de corriente se debe operar de manera análoga al caso del apartado C.

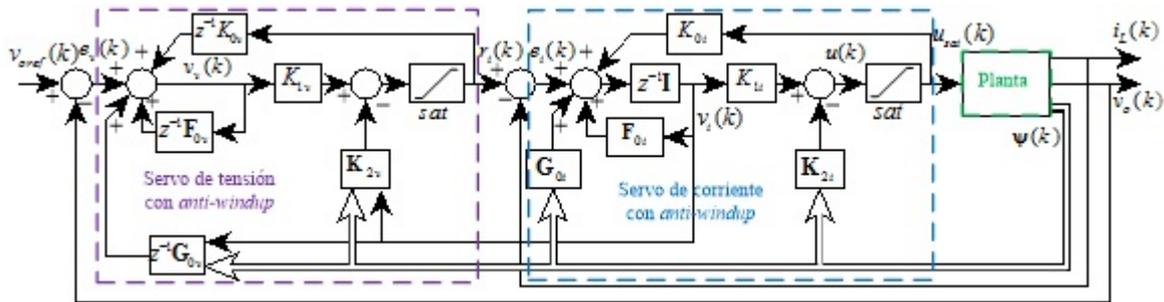


Fig.4. Esquema de control utilizando realimentación de estados con servo y *anti-windup* de tensión y corriente.

Con ésta nueva planta se procede a realizar el cálculo de las ganancias del controlador externo de tensión de manera similar al abordado en la sub-sección anterior.

Luego el algoritmo *anti-windup* de corriente y de tensión se diseña de manera independiente para cada control integral y de la misma manera que se estableció en el apartado anterior (Botterón 2001).

Las especificaciones para el lazo de corriente son t_s igual a 100ms y M_p de 0,1%; mientras que para el lazo de tensión 300ms y 1% respectivamente. Las ganancias asociadas a cada lazo se resumen a continuación.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_{2i} &= [0,0149 \quad -2,6246 \quad -0,9238]; \\
 K_{1i} &= 0,0021; \quad K_{1v} = 0,5359; \\
 \mathbf{K}_{2v} &= [6,4659 \quad 1195,533 \quad 86,693 \quad 0,9129];
 \end{aligned} \tag{7}$$

Al incorporar el algoritmo de *anti-windup* se incluyen las siguientes ganancias:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{G}_{0v} &= [0,1037 \quad 22,3123 \quad 1,6154 \quad 0,0170]; \\
 \mathbf{G}_{0i} &= [0,0817 \quad -12,6130 \quad -4,4396]; \\
 K_{0v} &= 0,0187; \quad K_{0i} = 4,8056; \quad F_{0v} = F_{0i} = 0,9900;
 \end{aligned} \tag{8}$$

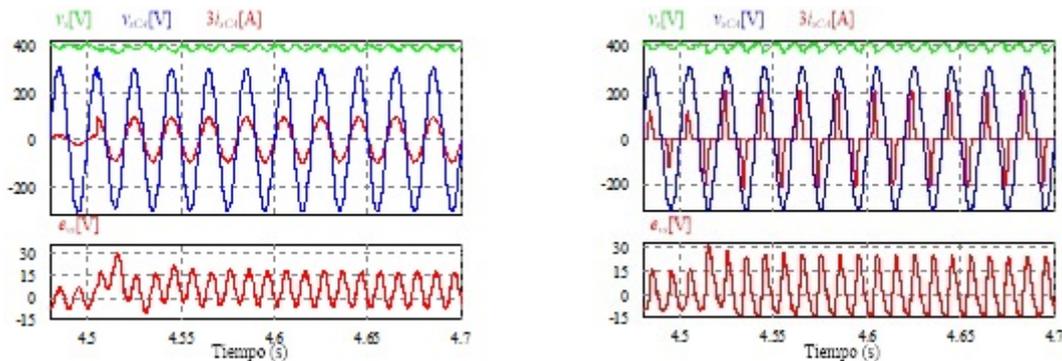


Para la evaluación del desempeño de los controladores se utiliza como carga un inversor monofásico PWM de 5kVA, que posee un control de la tensión de la salida utilizando un controlador proporcional derivativo más modelo interno (*DSIM – down-sampled internal model*) (Botteron et al. 2013; Botteron et al. 2012). Las simulaciones realizadas se dividen según la carga que presenta el inversor monofásico, por un lado se utiliza una carga resistiva, y por otro, una carga no lineal formada por un puente completo de diodos con filtro capacitivo. Las señales presentadas son la tensión de salida del *boost* (v_s), la tensión (v_{sCA}) y la corriente (i_{sCA}) de salida del inversor, y el error de tensión (e_{v_s}). Las tensión de alimentación del *boost* es de $120V_{CC}$ y las variaciones con la carga lineal son de 1,2 a 3,1 kW y con la carga no lineal de 0,6 a 1,2 kW.

Resultados y Discusión

A. Controlador Proporcional Integral (PI)

En laFig. 5(a) se presentan las formas de onda del convertidor CC-CC con el inversor alimentando la carga lineal, mientras que en laFig. 5(b) se muestra las curvas para la carga no lineal.



(a)

(b)

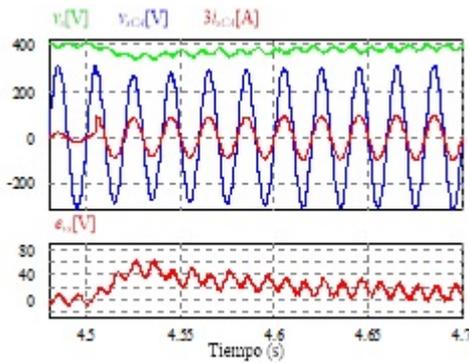
Fig. 5. Formas de onda con carga lineal para el control PI.

B. Estrategia con lazo anidado de corriente y tensión utilizando el modelo entrada-salida del convertidor.

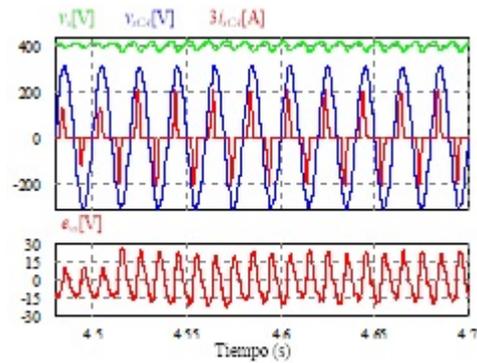
Para éste caso se presentan las formas de onda de la cadena de convertidores, alimentando la carga lineal en la



Fig. 6(a) y la carga no lineal en laFig. 6(b).



(a)

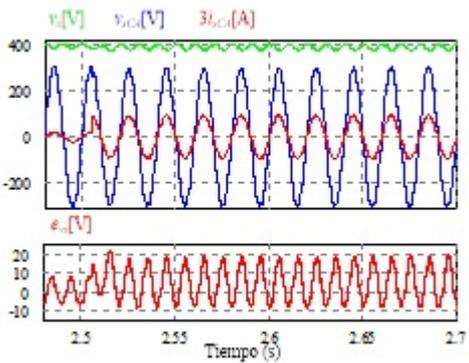


(b)

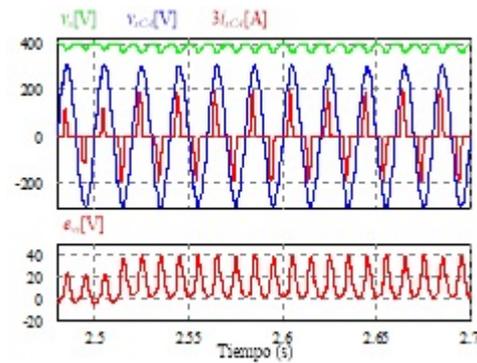
Fig. 6. Formas de onda con carga lineal para el controlador con lazo anidado de tensión y corriente usando el modelo entrada-salida.

C. Estrategia con realimentación de estados más acción de un servo de tensión con anti-windup

Cuando se utiliza este controlador, los gráficos de las tensiones y las corrientes de los convertidores con carga lineal y no lineal se muestran en laFig. 7(a) y (b) respectivamente.



(a)



(b)



Fig. 7. Formas de onda con carga lineal para el controlador con realimentación de estados más acción integral con AW de tensión.

D. Estrategia con realimentación de estados más acción de un servo de tensión y de corriente con anti-windup

En la Fig. 8(a) y (b) se presentan las formas de onda de tensión del convertidor boost para la carga lineal y no lineal respectivamente.

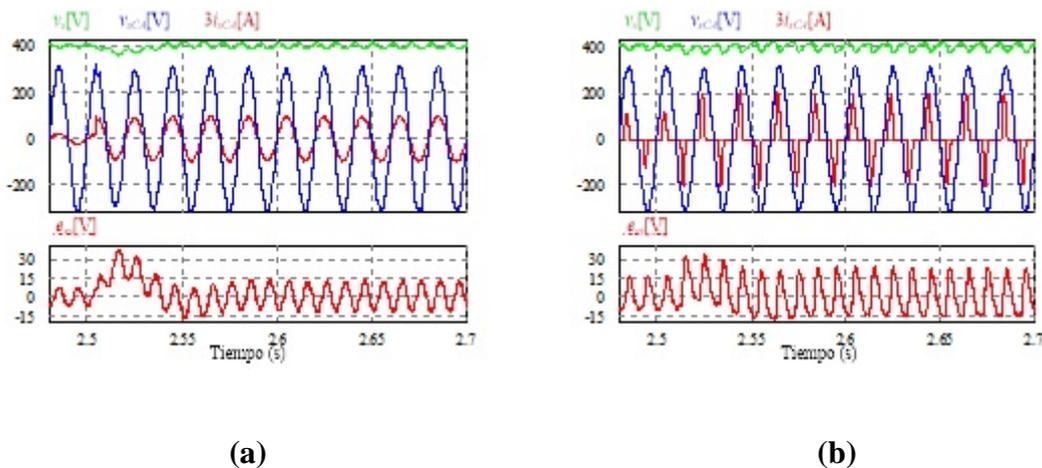


Fig. 8. Formas de onda con carga lineal para el controlador con realimentación de estados más acción integral con AW de tensión y de corriente.

Para evaluar el desempeño se definen tres parámetros, el primero es el error máximo de tensión ($e_{m\acute{a}x}$), luego el tiempo de asentamiento del error medio de tensión (t_{sm}) y el delta error de tensión presentado en régimen permanente (Δe_{ss}) debido a las oscilaciones presente en la tensión de salida del convertidor *boost*. En la TABLA I se resumen los resultados para las cargas evaluadas.

TABLA I: Desempeños del *boost* con el inversor con carga lineal.



Controlador	Carga lineal			Carga no lineal		
	$t_{sm}(s)$	$e_{m\acute{a}x}(V)$	$\Delta e_{ss}(V)$	$t_{sm}(s)$	$e_{m\acute{a}x}(V)$	$\Delta e_{ss}(V)$
PI	0,057	28,4	23,6	0,052	30,3	36,3
Lazo anidado de tensión y corriente	0,2	57,8	25,4	0,04	26,8	41,5
Realimentación de estados + servo de tensión con AW	0,025	21,8	26,5	0,025	39,7	38,1
Realimentación de estados + servo con AW de tensión y corriente	0,077	36,2	24,1	0,076	31,6	32,7

Se puede observar que las respuestas de la tensión del convertidor poseen valores muy próximos, presentándose los resultados menos favorables para el control de lazos anidados. Mientras que el controlador con realimentación de estados más integrador con *anti-windup* de tensión posee el menor tiempo de asentamiento pero posee mayor $e_{m\acute{a}x}$ con carga no lineal que las estrategias que usan controladores clásicos.

Conclusiones

El trabajo presenta un análisis comparativo de diferentes estrategias de controlador de tensión de salida de un convertidor *boost* que acondiciona la tensión de un arreglo fotovoltaico y alimenta un inversor monofásico PWM para comandar bombas centrífugas en riego de huertas para zonas rurales. Las estrategias analizadas presentaron buenos desempeños, sobresaliendo el control con realimentación de estados con acción servo de tensión y el control proporcional-integral. Sin embargo, a pesar de la poca diferencia entre estrategias, la estrategia de control por espacio de estados con lazos anidados, presenta la ventaja de poder limitar la corriente en los convertidores ante sollicitaciones anormales de carga por parte de la bomba.

Por otro lado, se puede percibir una señal alterna montada sobre la continua debido a la característica de impedancia de entrada del inversor monofásico. Esta peculiaridad será abordada en trabajos posteriores para reducir su efecto y así reducir los errores de tensión. Así mismo, se realizará la validación experimental de las estrategias propuestas y en particular de los algoritmos *anti-windup*.

Referencias



6^{ta} JIDeTEV

Investigación. Desarrollo Tecnológico.
Muestra de la Producción.
Extensión. Vinculación.





- Aguirre, Gabriel Y, Javier E Kolodziej, y Fernando Botteron. 2015. «Design and Experimental Implementation of a DC-DC Boost Converter for Renewable Energy Sources». En *XVI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control RPIC*.
- Botteron, F, R E Carballo, R O Nunez, A P Quintana, y G A Fernandez. 2013. «High Reliability and Performance PWM Inverter for Standalone Microgrids». *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)* 11 (1): 505-11. doi:10.1109/tla.2013.6502853.
- Botteron, F, R E Carballo, R O Nuñez, A P Quintana, y G A Fernandez. 2012. «Inversor PWM de Elevada Confiabilidad y Desempeño para Microredes Autónomas». En *ARGENCON*. Córdoba, Argentina.
- Botterón, Fernando. 2001. «Análise, Projeto E Implementação De Um Inversor Pwm Trifásico Para Ups De Média Potência». Universidade Federal de Santa Maria (UFSM-RS).
- Botterón, Fernando. 2005. «Controladores Discretos De Tensão Baseados No Princípio Do Modelo Interno Aplicados A Inversores Trifásicos PWM». Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS).
- Chandel, S. S., M. Nagaraju Naik, y Rahul Chandel. 2015. «Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 (septiembre): 1084-99. doi:10.1016/j.rser.2015.04.083.
- Erickson, Robert W, y Dragan Maksimovic. 2007. *Fundamentals of power electronics*. Springer Science & Business Media.
- Franklin, Gene F, J David Powell, y Michael L Workman. 1998. *Digital control of dynamic systems*. Vol. 3. Addison-wesley Menlo Park.
- Imhoff, Johninon. 2007. «Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos». Santa Maria, RS, Brasil: Universidad de Santa Maria.
- Kazimierczuk, Marian K. 2008. *Pulse-width modulated DC-DC power converters*. John Wiley & Sons.
- Mohan, Ned, y Tore M Undeland. 2007. *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons.
- Ogata, K. 1996. *Sistemas de control en tiempo discreto*. 2da ed. Prentice Hall Hispanoamericana.