

# DISEÑO DE LA LÓGICA DE CONTROL DE UN CONVERTIDOR REDUCTOR DE CORRIENTE CONTINUA A CORRIENTE CONTINUA TIPO FORWARD AISLADO<sup>1</sup>

Germán Andrés Xander<sup>2</sup>; Jorge Alberto Olsson<sup>3</sup>; Lea Santiago<sup>4</sup>; Víctor Hugo Kurtz<sup>4</sup>; Héctor Rolando Anocibar<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Trabajo de Investigación, Proyecto del Programa de Incentivos Código 16I091 y 16I109

<sup>2</sup> Integrante de Proyecto, Ingeniero Electrónico, [gaxander@fio.unam.edu.ar](mailto:gaxander@fio.unam.edu.ar)

<sup>3</sup> Integrante de Proyecto, Ingeniero Electrónico, [olsson@fio.unam.edu.ar](mailto:olsson@fio.unam.edu.ar)

<sup>4</sup> Integrante de Proyecto, Lab. Química Industrial, [santiagolea@fio.unam.edu.ar](mailto:santiagolea@fio.unam.edu.ar)

<sup>5</sup> Director de Proyecto Cód.16I091, Magister Ingeniero Electricista, [kurtzvh@fio.unam.edu.ar](mailto:kurtzvh@fio.unam.edu.ar)

<sup>6</sup> Director de Proyecto Cód.16I109, Doctor Ingeniero Electricista, [anocibar@fiobera.unam.edu.ar](mailto:anocibar@fiobera.unam.edu.ar)

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es el de diseñar el controlador para un convertidor continua-continua (CC-CC) estático aislado de topología forward electrónico reductor de 24 Vcc a 12 Vcc, para una corriente nominal de 10 A. Este tipo de convertidor es el que se debería utilizar para adaptar las tensiones (22 V a 30 V) provenientes de la microgeneración de energía alternativa, de los vehículos industriales y generadores fotovoltaicos a la tensión de las cargas comerciales, generalmente alimentados con tensión de 12 Vcc, donde se hace necesario aparte de la reducción eficiente de tensión, aislación galvánica. Se utiliza una técnica de ubicación de polos-ceros para lograr el comportamiento deseado.

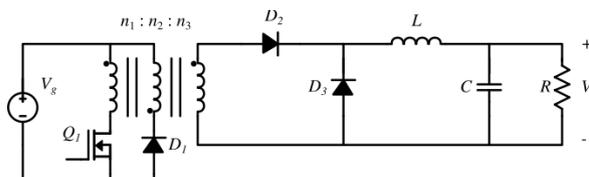
**PALABRAS CLAVE:** *convertidor-forward- control- conversor electrónico- adaptar tensiones-*

## INTRODUCCIÓN

El convertidor forward en configuración de lazo abierto puede ser diseñado para que entregue una tensión específica a la salida, la cual permanecerá constante siempre y cuando no varían las condiciones de carga o la tensión de alimentación. Si por el contrario, no se puede garantizar una tensión de alimentación constante, es indispensable utilizar un sistema de control que ajuste los parámetros del convertidor para asegurar una tensión de salida que se mantenga dentro de los límites aceptables.

## METODOLOGÍA

Para el modelo del sistema dinámico en el espacio de estado, las variables de estado pueden ser escogidas por una necesidad específica. Se muestra en la figuras 1 un esquema simplificado del convertidor, donde una de sus características principales es el filtro pasa bajos a la salida del mismo, a partir del cual y mediante la aplicación de las leyes de Kirchhoff, obtenemos las ecuaciones de estado que describen el comportamiento del filtro con la carga de diseño.



**Ilustración : Convertidor Forward**

## Modelo promedio

Se puede demostrar [2, cap. 7.3] que si la frecuencia natural del convertidor, así como la frecuencia de variación de sus entradas, son mucho menores que la frecuencia de conmutación el modelo promedio en espacio estado para estado estable es:

$\dot{x} = Ax + Bu$	$y = Cx + Du$
---------------------	---------------

Con esto se puede calcular el modelo de pequeñas señales y presentarlo en formato estándar, quedando.

$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\hat{u}$	$\hat{y} = C\hat{x} + D\hat{u}$
---------------------------------------	---------------------------------

## Validación del modelo

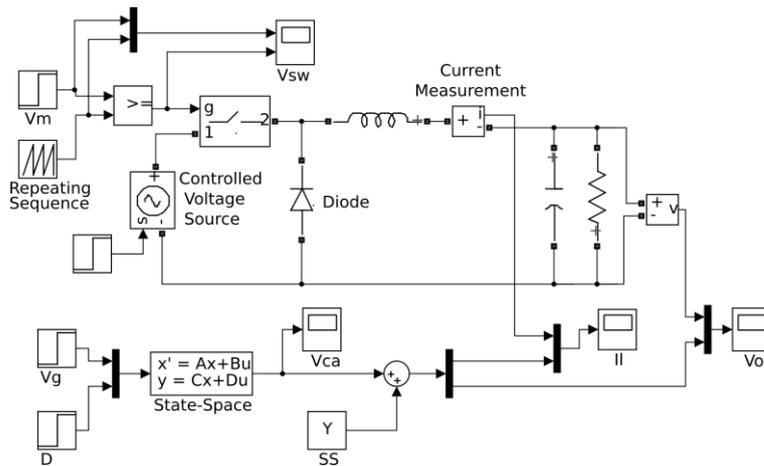


Ilustración : modelo del convertor Forward en Simulink

Para validar el modelo obtenido en el punto anterior, se utiliza el software denominado **Simulink**. En la figura 2 se presenta el sistema, donde se proyecta el convertor como modelo eléctrico y se compara con el modelo matemático en cuestión.

## Estado estable

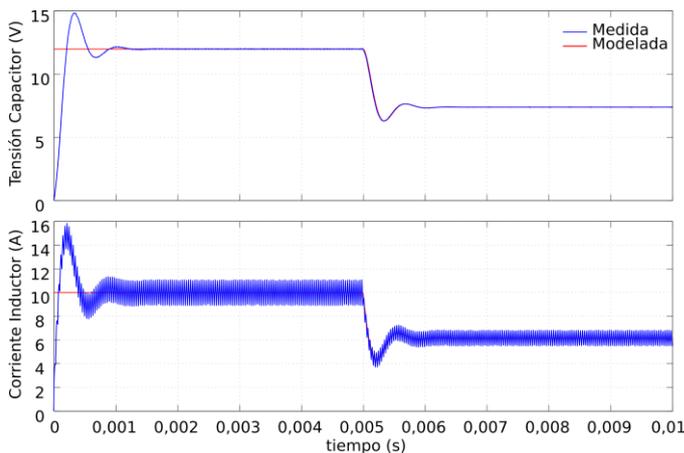


Ilustración : validación ante una variación del 60 % de la tensión de entrada

Estado estable se aprecia un comportamiento correcto ya que el modelo matemático se comporta igual que el eléctrico. Esto se aprecia en la primera parte de la figura 3.

## Variación en la tensión de entrada

En la figura 3 también se aprecia la respuesta ante una variación del 60 % de la tensión de entrada. El modelo matemático se comporta igual que el eléctrico.

### DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

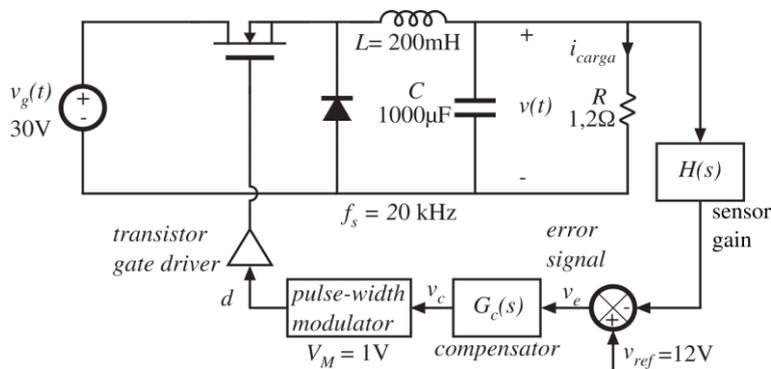


Ilustración : esquema del sistema de control

Se desea un sistema de control que permita a la tensión de salida, seguir la tensión de referencia, ante eventuales cambios en la corriente de carga. La corriente de carga a su vez es proporcional a la tensión en el capacitor.

### PROYECTO DEL SISTEMA DE CONTROL

Como se proyecta el convertidor para una salida constante, es menester eliminar el error en estado estable, lo que implica un polo en el origen el cual se logra con un compensador integral. Además, para mejorar la respuesta ante perturbaciones de carga, es conveniente el agregado de una acción de control que responda ante variaciones bruscas de carga. Esto se logra con un control derivativo.

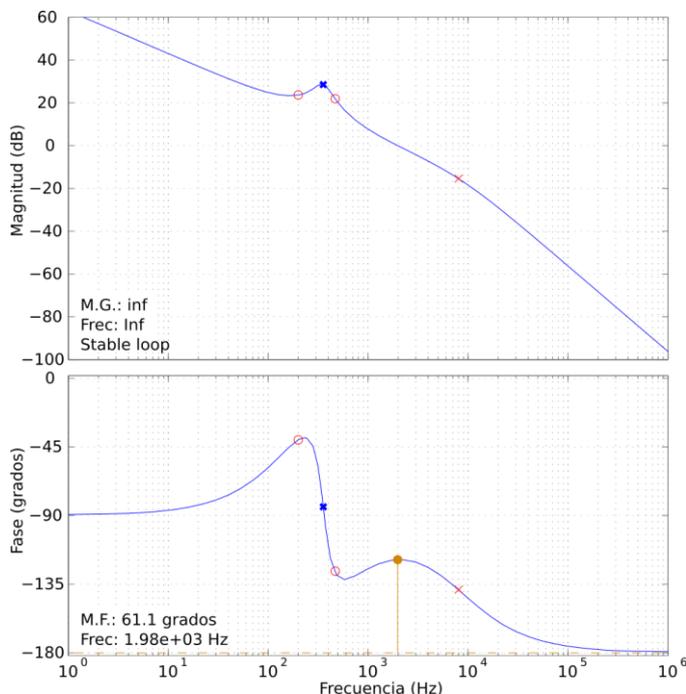


Ilustración : gráfico de bode con la ubicación de los polo/ceros del compensador

Los polos y ceros del compensador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) se pueden apreciar en la figura 5. En ella se ve la existencia de un polo en el origen

perteneciente al integrador, acompañado de un cero, para mejorar la estabilidad. Este cero se ubica en una frecuencia una década por debajo de la frecuencia de corte deseada. Para este caso el cero se ubica en 200 Hz.

La parte derivativa aporta un cero y un polo que se ubican de manera de aumentar el margen de fase hasta el valor deseado, en la frecuencia de corte. Además se busca que el margen de fase deseado sea el punto máximo en la alteración introducida por el par polo/cero en cuestión.

Finalmente se ajusta la ganancia para que el paso por 0 dB se produzca en la frecuencia deseada.

La función transferencia del controlador que logra el objetivo buscado.

	0
--	---

## RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

En la Figura 6, se presentan los resultados de las simulaciones ante distintos panoramas de funcionamiento.

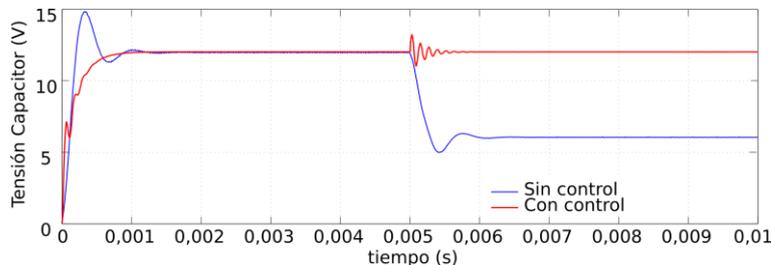


Ilustración : Comparación de la respuesta del sistema ante variación de tensión de alimentación

De la misma figura, se puede inferir que el sistema se estabiliza antes de los 20 ms.

### Con componentes reales

En el modelo simulado anteriormente, se consideró componentes ideales. A continuación se analizará el sistema utilizando componentes reales.

Si consideramos las resistencias parásitas tanto en el inductor como en el capacitor de filtro y sometemos al sistema a una variación de carga. Comparando esta respuesta con la obtenida con elementos ideales se puede apreciar los siguientes puntos:

- *Menor sobrepaso.*
- *Menor tiempo de asentamiento.*
- *Leve incremento en la tensión de rizado.*

El comportamiento descrito se explica con el cero introducido por la resistencia “interna” serie del capacitor.

En el diagrama de Bode de la figura 7, se aprecia que este cero produce un aumento en el ancho de banda y en el margen de fase.

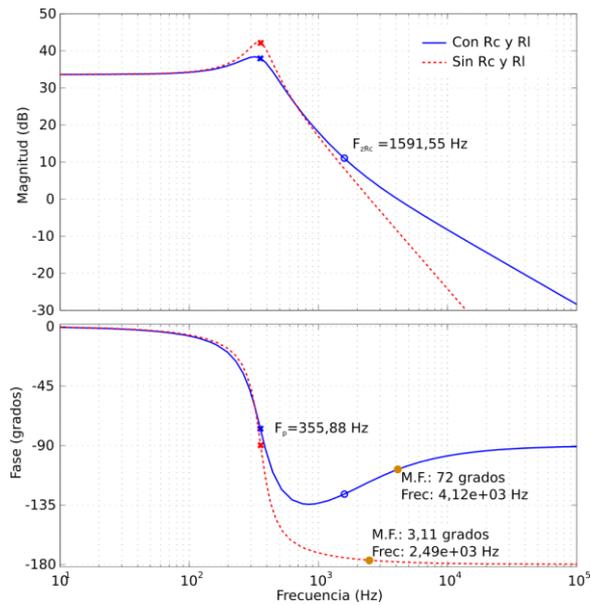


Ilustración : efecto del cero producido por la resistencia serie del capacitor

## CONCLUSIONES

Se puede concluir, que usando las técnicas de diseño expuestas por C. Rech. [5] se obtiene un controlador para el sistema propuesto. El mismo logra estabilizar el convertidor en menos de 3 ms que es un comportamiento más que aceptable para un convertidor CC-CC (corriente continua a corriente continua). El sobre paso, al reducir la carga al 50 %, no superó el 12 %, también aceptable (figura 8).



Ilustración : respuesta ante variación de la carga del 100 % al 50 % con componentes reales

Estos parámetros se podrían mejorar aumentando el ancho de banda del sistema, pero se impone la necesidad de limitar el mismo a una frecuencia de corte una década por debajo de la frecuencia de conmutación, para evitar amplificar las componentes no deseadas producidas por la conmutación. El leve aumento del ancho de banda producido por las resistencias series de los componentes, que en principio parece mejorar el desempeño del sistema, en realidad viene acompañado de un aumento en el rizado. Este comportamiento se condice con lo expuesto ya que el sistema real atenúa menos la frecuencia de conmutación. Además, hay que tener en cuenta que ambas resistencias puede disipar una potencia del 10 % de la potencia nominal.

De lo expuesto anteriormente se puede concluir que la función transferencia laplaciana, para el dominio de la frecuencia, representada por la ecuación (3). Cumple satisfactoriamente lo requerido. Esto es, se logra un buen equilibrio entre tiempo de asentamiento y respuesta en estado estable.

## REFERENCIAS

- [1] J. A. Olsson, Proyecto Y Modelación De Un Convertidor Continua- Continua Aislado Tipo Forward 2015.
- [2] I. Barbi, Conversores CC-CC Básicos Não Isolados, 2006.
- [3] L. Schuch, “Eletrônica de Potência I” ELC 836, 2014.
- [4] R. W. Erickson y D. Maksimović, Fundamentals of Power Electronics, 2nd ed. Kluwer Academic Publishers, 2004, 0-306-48048-4.
- [5] C. Rech. (2015) Apuntes MCIE09 - Modelación y Control de Convertidores Estáticos.
- [6] J.M. Benítez, V. H. Kurtz, F. Botteron, “Proyecto E Implementacion De Un Convertidor Cc-Cc Tipo Buck Para Control De Carga Balasto” 2010