

Implementación de reguladores sincrónicos para convertidores DC-DC de alto rendimiento

Implementation of synchronic regulators for high performance DC-DC convertors

Recibido: : 27 de febrero 2014, aceptado: 10 de octubre 2014

Edward Arévalo, Carlos Bran*

Resumen

La necesidad de fuentes de voltaje estables bajo condiciones de alimentación por medio de baterías, demanda un amplio rendimiento en el proceso de conversión del voltaje de entrada ya sea para un proceso de elevación o reducción, dependiendo del tipo de aplicación son parámetros importantes a considerar, la disipación de potencia, los rangos de variación de los voltajes de entrada, la demanda variable de corriente de salida además de los porcentajes de rizo. Las demandas de cada diseño en particular hacen difícil encontrar una solución general implementada comercialmente, por lo que resulta importante adaptar la solución a las necesidades específicas para un mejor rendimiento del sistema implementado. El presente trabajo muestra el proceso de diseño y prototipado de un convertidor DC-DC de alto rendimiento con un rango amplio de voltajes de entrada y demandas amplias de corriente, iniciando con un análisis comparativo de las características de los reguladores sincrónicos y asincrónicas así como los efectos de la variación de los voltajes de entrada, luego se discuten las características del controlador monolítico de la fuente y los cálculos del prototipo implementado.

Palabras Clave: regulador sincrónico, regulador asincrónico, MOSFET, convertidor BUCK-BOOST, fuentes de potencia de adaptación dinámica.

Abstract

The need for stable sources of low voltage under conditions of battery powered supply demands a comprehensive performance in the process of converting the input voltage to either a process of elevation or reduction, depending on the type of application. Important parameters to take into consideration are power dissipation, the variation ranges of input voltages, the variable demand for

* Instituto de Investigación e Innovación en Electrónica, Universidad Don Bosco. Edward.arevalo@udb.edu.sv; cbran@udb.edu.sv

output current plus the ripple percentages. The demands of each particular design make it difficult to find a commercially implemented general solution, so it is important to tailor the solution to the specific needs for a better performance of the implemented system. The present work shows the process of designing and prototyping a high performance DC-DC converter with a wide range of input voltages and large current demands, starting with a comparative analysis of the characteristics of synchronous and asynchronous regulators as well as the effects of varying input voltages. Then the characteristics of the monolithic source controller and calculations of the implemented prototype are discussed

Keywords: synchronic regulator, asynchronous regulator, MOSFET, BUCK-BOOST converter, power sources of dynamic adaptation.

Introducción

La necesidad de reguladores que se adapten a las demandas de las cargas, alimentados con baterías cuyo rango es variable, además de una adecuada eficiencia para aprovechar el ciclo de carga/descarga de las baterías; demanda de diseños de reguladores que puedan cumplir con estos requisitos.

Los convertidores DC-DC son las soluciones mas adecuadas para resolver este problema, los cuales pueden estar basados en reguladores sincrónicos o asincrónicos, que deben ajustar los voltajes de entrada provistos por la batería a valores de salida de un orden superior (Step-up) o inferior (Step-down).

Los reguladores persistentes o buck, son circuitos diseñados para elevar el voltaje de la entrada de un convertidor DC-DC a un voltaje de salida regulado normalmente de un valor fijo para ciertas condiciones de demanda de corriente; por otro lado los reguladores de impulso o boost, son circuitos que permiten obtener a la salida un voltaje regulado mayor que el estimulado a la entrada del mismo; para ambos circuitos la fuente de entrada suele ser una batería que de acuerdo a su ciclo de carga/descarga puede presentar variaciones que deben poder ser sostenidas por los respectivos circuitos ya sea reduciendo o elevando su voltaje.

Por la naturaleza de algunas aplicaciones y la necesidad de hacer que los convertidores DC-DC sean universales, el rango de variación de los voltaje se vuelve amplio para una salida fija lo que implica que circuitos reductores-elevadores sean implementados integrando dichas funciones de forma conmutada y continua en la operación del circuito; entre mayor sea el rango de voltaje de entrada que se pretende convertir, mayor es la necesidad de integrar estas soluciones, los cuales se pueden reducir a dos topologías típicas: (a) Convertidor no inversor buck-boost y (b) Convertidor de un solo terminal de inductancia primaria, en ambos casos la idea principal es reducir al mínimo el número de componentes activos los cuales puedan integrarse en un ASIC (Circuito integrado de aplicación específica).

Muchos de los trabajos relacionados con convertidores DC-DC se enfocan en soluciones donde los rangos de variación de los voltajes que estimulan los circuitos son pequeñas para demandas de corriente perfectamente acotadas, en la solución que evaluaremos en el presente artículo se tiene la particularidad de que los rangos de voltajes de entrada presentan variaciones muy considerables desde 9 a 38 voltios, además de demandas de corriente elevadas superiores a los 5A, en circuitos compactos con una eficiente disipación de la potencia preferentemente sobre la placa de circuito impreso PCB, sin disipadores externos.

El presente trabajo está dividido en cinco partes. La primera describe las soluciones de reguladores asincrónicos y sincrónicos, para justificar la selección de una de estas para aplicarlas a nuestro problema; posteriormente se evalúan los efectos de reducción elevación de los voltajes para resolver la alta variabilidad del voltaje de entrada; luego, procedemos a analizar el funcionamiento de un chip monolítico que se utilizara para el control de la sincronía del convertidor, para luego describir los cálculos y consideraciones del diseño del circuito, cerrando con los resultados obtenidos de la implementación del prototipo y algunas conclusiones finales.

Regulación sincrónica vs regulación asincrónica

Los circuitos reguladores constituyen la base de los convertidores DC-DC y AC-DC, el principio básico es que la salida del circuito mantenga un nivel de voltaje predefinido lo suficientemente fijo sin dependencia de un rango de variaciones del voltaje de entrada; de forma básica, un diodo zener, permite efectuar esta tarea, sin embargo no con la eficiencia más óptima lo que ha implicado el desarrollo de circuitos reguladores que presente una mejor eficiencia, las dos soluciones más utilizadas son los reguladores Asincrónicos y lo Sincrónicos de los que nos ocuparemos en los siguientes párrafos.

Reguladores asincrónicos: La figura 1 presenta la forma básica de un regulador asincrónico y esta constituido por un arreglo de un capacitor/inductor que estimulan una carga dada de acuerdo al estado de conmutación del interruptor que de forma regular es de estado activo además de un diodo de protección para evitar la conducción durante dicho estado y permitir la por una corriente en reversa del estado pasivo. En el estado activo el transistor del regulador se cierra, esto permite la circulación de corriente desde la fuente de tensión hacia la carga por medio de la bobina, la cual a su vez se almacena energía junto con el capacitor, una vez que se ha alcanzado el tiempo suficiente para alojar un almacenamiento cercano al 100% en la bobina y el capacitor, el interruptor se abre pasando al estado pasivo donde se interrumpe la corriente que fluye por el inductor, el cual por su inercia eléctrica se opone a este cambio forzando una corriente en reversa que hace que el diodo entre en conducción y se trate de mantener la demanda de la carga que alimentan, una vez que el voltaje cae a un valor inferior a un punto de control el interruptor pasa a modo activo y el ciclo se repite.

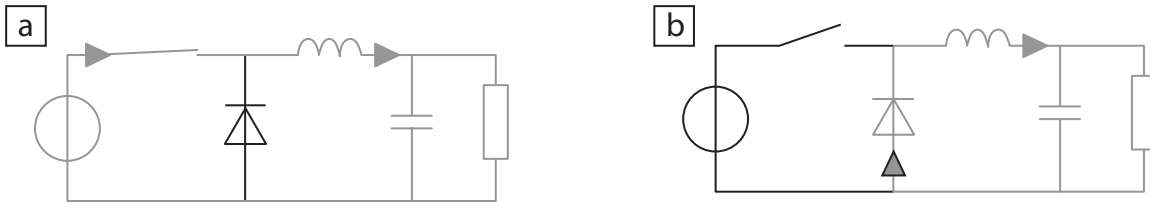


Figura 1: Regulador asincrónico, a) Estado activo, b) Estado pasivo

Debido a la naturaleza de la conmutación en uno de los ciclos el diodo disipa energía en forma de calor proporcional a la demanda de corriente de la carga, sin importar si se hace uso de diodos convencionales o diodos Schottky, por otro lado al integrar todos los componentes de este regulador en un solo chip se presentarían elevadas disipaciones de potencia proporcionales a la demanda, además de una mayor impedancia del conjunto, haciendo caer la eficiencia de este tipo de circuitos.

Reguladores sincrónicos: Una solución ideal para un circuito regulador es el que se muestra en la figura 2, donde la impedancia y caída de tensión entre sus terminales es cero, esto se logra manipulando los interruptores para los dos ciclos de trabajo del regulador, el cual demanda un controlador de disparo de los interruptores bastante complejo que gobierne múltiples parámetros de medición para sincronizar su disparo; este constituye el concepto principal de los reguladores sincrónicos cuyo circuito básico se muestra en la figura 3, este aprovecha la ventaja de la baja impedancia de los MOSFET y su velocidad de conmutación estos dispositivos de forma sincronizada se abren y cierran en complemento para brindar los dos ciclos de trabajo con los que la carga se alimenta.

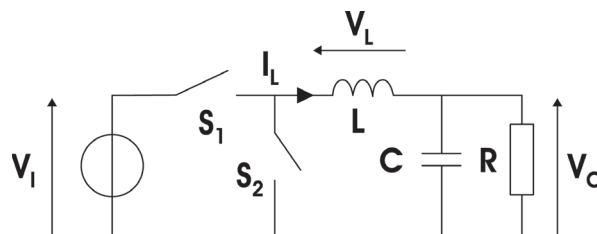


Figura 2: Circuito regulador ideal

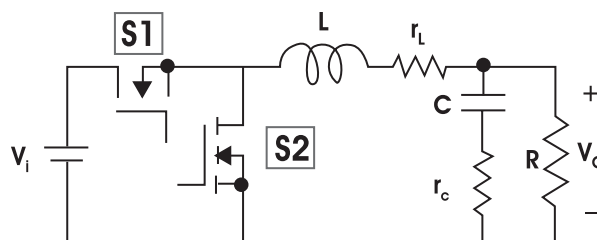


Figura 3: Regulador sincrónico básico

La exactitud de los tiempos de conmutación de los transistores es la condición fundamental para una correcta operación de estos circuitos, de lo contrario la fuente no trabaja de manera adecuada provocando caídas de tensión o elevación de voltajes a la salida y hasta producir un cortocircuito en la entrada de la fuente.

Para evitar inconvenientes los tiempos de activación de cada transistor deben tener un leve desfase que garantice que S2 este desconectado antes que S1 se cierre, de la misma manera S2 se cierra un tiempo después que S1 se desconecta, como muestra el diagrama de la figura 4, con esto se evita que los MOSFET entren en cortocircuito con la fuente de entrada; sin embargo, se genera un nuevo problema que es la discontinuidad del servicio de la demanda de la carga en los instantes desfasados, los cuales pueden generar impulsos que dañen el circuito; para evitar estos daños se agrega un diodo de protección algunas veces interno al MOSFET para que lo protejan de la anomalía que se presenta durante el desfase como se muestra en la figura 5.

Con estas modificaciones se acerca el circuito de un regulador sincrónico a las características de un regulador ideal.

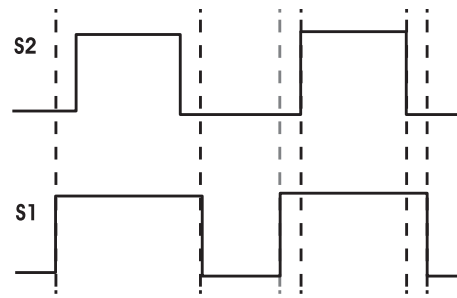


Figura 4: Ciclos de trabajo de los MOSFET

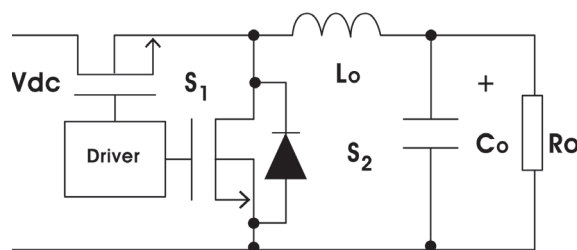


Figura 5: Regulador sincrónico con diodo de respaldo

Los circuitos sincrónicos aprovechan la baja impedancia de los MOSFET para reducir significativamente las pérdidas y mejorar la eficiencia respecto a los reguladores asincrónicos, sin embargo la complejidad del controlador de disparo de los MOSFET es mucho mayor para los circuitos sincrónicos, por lo que deben incorporar un microprocesador para el manejo con precisión de las secuencia en los que deben abrirse y cerrarse los MOSFET.

La variación del voltaje de entrada en el convertidor DC-DC

Cuando las necesidades de las aplicaciones implique tener un amplio rango de voltajes de entrada, que estén por encima y debajo del voltaje de salida, no se puede usar solo una solución de fuente reductora como normalmente ocurre con las fuente lineales.

Para poder solventar la situación se utilizan circuitos elevadores de tensión para los casos donde el voltaje de salida sea mayor al de entrada (Convertidor Boost o step-up) o bien circuitos reductores para el caso de que la salida sea menor a la entrada (Convertidor Buck o step-down), los esquemas básicos de estas soluciones se presentan en la figura 6, en ambos casos el principio de funcionamiento esta determinado por la inercia eléctrica de los arreglos de bobina y capacitor que compensan las diferencias de voltaje en los estados activos y pasivos.

Ambos circuitos pueden combinarse en un arreglo buck-boost con inversión de polaridad. En todos los casos la clave esta determinada por la estrategia de conmutación usada para el interruptor activo típicamente desarrollado por un MOSFET, las cuales soportan perfectamente circuitos de conmutación sincrónicos y asincrónicos.

Cuando los circuitos reguladores son asíncronos se tiene que usar dos fuentes separadas en cascada, lo cual requiere unos componentes extra como la bobina y capacitor para cada etapa, además del inconveniente de tener que estar en operación durante todo el tiempo ya que no siempre se tiene un control que verifique los voltajes de entrada.

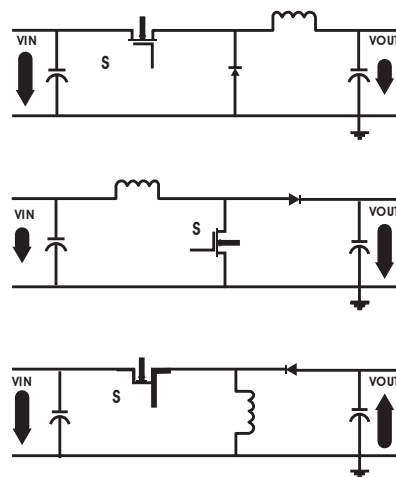


Figura 6: (a) Topología Buck, (b) Topología Boost, (c) Topología Buck-Boost

Por otro lado con los circuitos reguladores sincrónicos la etapa de potencia se simplifica, ya que puede combinar las dos fuente en un solo chip o controlador, donde el sistema de potencia funciona de forma similar a un puente H, figura 7, con el que se reduce el numero de bobinas y capacitores que se usan para el arreglo.

El circuito combinado Buck-Boost no trabaja de forma simultánea sino mas bien de las condiciones recibidas en el voltaje de entrada lo que mejora la eficiencia y adaptabilidad de la solución, la figura 8 muestra los circuitos básicos de operación del arreglo.

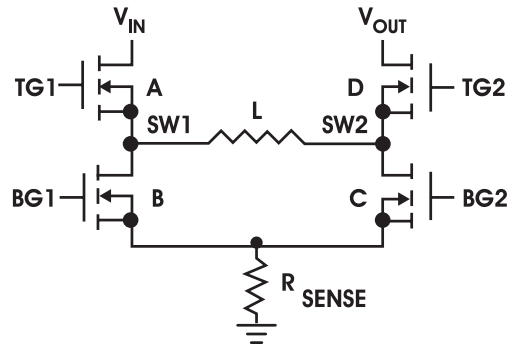


Figura 7: arreglo de la salida de potencia para reguladores síncronicos

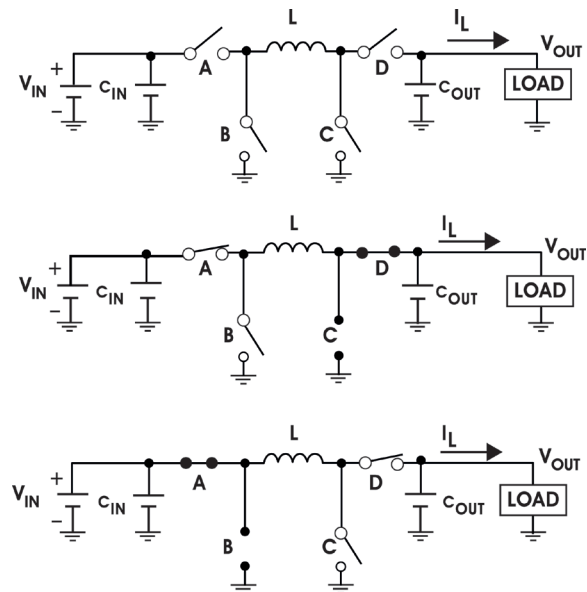


Figura 8: (A) circuito combinado Buck-Boost, (B) Operación en Buck, (C) Operación en Boost

Los interruptores A y B hacen la función de la fuente step-down donde B esta en lugar del diodo, la fuente step-up la conforman C y D donde D es hace las funciones del diodo.

Para la primera condición figura 8 (A) se puede observar que el circuito además de funcionar como una fuente reguladora puede ser usada como un interruptor para desconectar la carga de la fuente de entrada sin necesidad de dispositivos mecánicos complejos con una demanda relativamente baja de recursos; para la segunda condición figura 8 (B) $V_{in} \gg V_{out}$, el interruptor C se abre y D se cierra y A con B funcionan como un regulador reductor normal, por otro lado para la tercera condición figura 8 (C) $V_{in} \ll V_{out}$ luego el interruptor A se cierra y B se abre. De esta manera solo operan C y D, fuente trabaja como un elevador de voltaje normal; por ultimo para la condición

cuando $V_{in} = V_{out}$ de forma aproximada con diferencias menores, el circuito hace trabajar los cuatro MOSFET en ciclos muy pequeños y alternados, brindando una estabilidad en el voltaje de salida con una disipación de energía menor; los diagramas de transición estas condiciones se muestran en la figura 9.

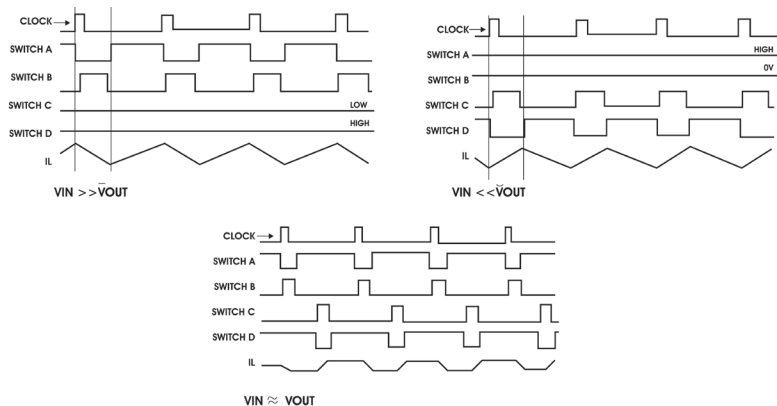


Figura 9: Diagramas de transición de los MOSFET

El Chip LTC3789

La complejidad de las transiciones de conmutación en un convertidor buck-boost para un regulador síncrono, demanda una gran precisión, ya que si existiera alguna falla en este proceso no se podría obtener una solución funcional.

El chip monolítico LTC3789 es un controlador de conmutación buck-boost de alto rendimiento, que opera con voltajes de entrada superiores e inferiores al requerido a la salida. La estabilidad de su frecuencia se basa en un PLL que mantiene independientemente de la demanda de corriente la frecuencia de operación hasta los 600Khz, con una corriente de realimentación de salida que brinda soporte para circuitos de cargado de baterías.

Cuenta con un amplio rango de voltaje de entrada desde los 4V a los 38V además de inyectar bajo ruido durante los procesos de transición.

El dispositivo puede operar en múltiples dos modos programables por el usuario: Por saltos de pulsos (pulse-skipping) y por continuidad forzada (forced continuous), el primero es ideal para cargas livianas con un bajo ruido y alta eficiencia, mientras el segundo es ideal para aplicaciones sensibles al ruido operando a una frecuencia constante.

Los requerimientos de nuestra aplicación se adaptan muy bien con las prestaciones que ofrece este controlador.

Implementación del prototipo

Para la implementación del prototipo fue necesario el cálculo de múltiples variables con cuyos datos se establecen los parámetros de operación del controlador, los principales cálculos de

describen en los siguientes párrafos.

El parámetro de R_{sense} representa una resistencia utilizada como sensor de corriente de salida y para detectar posibles cortocircuito mientras los transistor están conmutando, este sensor se debe establecer por las dos condiciones de operación del convertidor es decir cuando opera en step-up o boost o bien en step-down o buck. La operación en modo boost demanda la mayor circulación de corriente ya que al ser bajo el voltaje debe compensarse la corriente para mantener la potencia de salida; por otro lado para el modo buck la mayor demanda de corriente esta relacionada con la carga conectada a la salida, para nuestro casos los requerimientos del diseño hacen que el circuito opere con mayor frecuencia en la condición boost, por lo que se orientaran los cálculos para esta condición, la figura 10 representa el esquema del sensor de corriente de salida y las ecuaciones para el calculo de la corriente en los dos modos de operación.

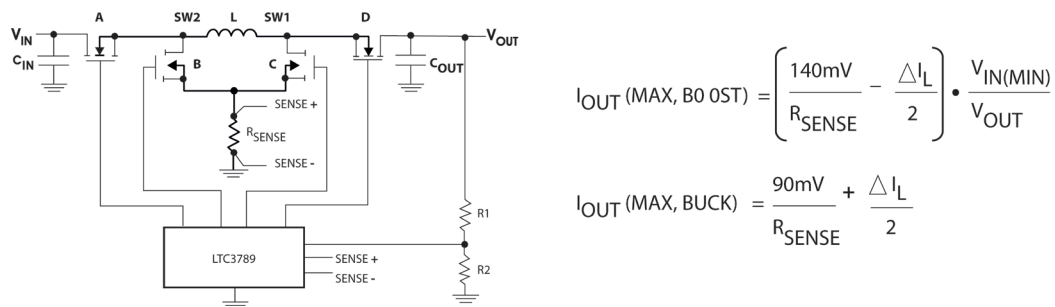


Figura 10: Esquemático del sensor y ecuaciones de calculo

Con las curvas del datasheet del chip LTC3789, se pueden obtener los voltajes de referencia para la relación de voltaje de entrada y salida V_{in}/V_{out} , para las condiciones donde la relación es menor de 1 la referencia es de 140mV la que corresponde al modo boost, por otro lado para valores mayores de 1 la referencia es de 90mV, equivalente al modo buck.

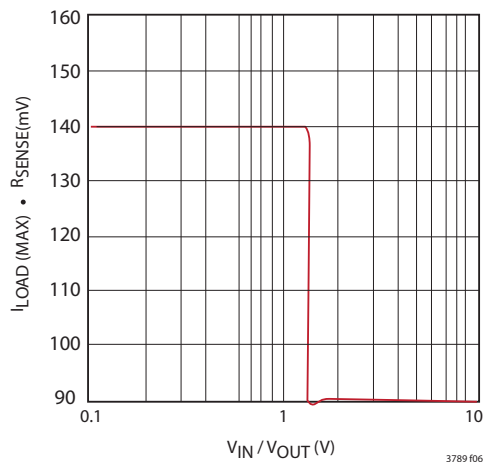


Figura 11: Curvas de voltaje de referencia.

Adicional a lo anterior el chip controlador tiene un par de líneas de entrada de sensor de corriente (I_{osense}) que permite controlar las corriente de entrada o de salida. Este mecanismo tiene como propósito limitar la corriente en condiciones normales de la fuente y detectar cortocircuito en la salida o corrientes elevadas en la entrada. Un esquemático de la forma de conectar este sensor se muestra en la figura 12. Para nuestro caso este mecanismo se aplicará como detector de corriente de salida y detector de cortocircuito para asegurar la integridad de la placa.

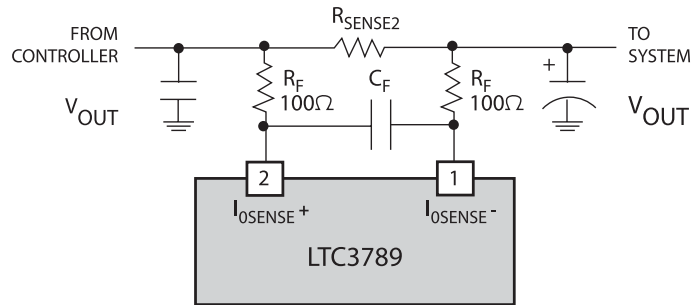


Figura 12: Esquemático del sensor de corriente.

Las ecuaciones de la figura 13 son las utilizadas como referencia para el dimensionamiento de los componentes pasivos y están relacionadas con los parámetros como: voltaje de salida, voltaje de rizo y disipación de potencia para los dos modos boost y buck.

$$V_{OUT} = 0.8V \cdot \left[1 + \frac{R2}{R1} \right]$$

$$\text{Ripple (Boost, Cap)} = \frac{I_{OUT (MAX)} \cdot (V_{OUT} - V_{IN (MIN)})}{C_{OUT} \cdot V_{OUT} \cdot f} \text{ V}$$

$$P_{A, BOOST} = \left[\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \cdot I_{OUT (MAX)} \right]^2 \cdot P_{\pi} \cdot R_{DS(ON)}$$

$$P_{B, BUCK} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{V_{IN}} \cdot I_{OUT (MAX)}^2 \cdot P_{\pi} \cdot R_{DS(ON)}$$

Figura 13: Ecuaciones para dimensionamiento de componentes

Otra de las ventajas de usar el controlador LTC3789 es que su etapa de potencia es gobernada por componentes externos lo cual permite seleccionar los MOSFET mas adecuado según la demanda de corriente que desea manejarse en el convertidor.

Uno de los factores cruciales en la selección del MOSFET es el valor R_{DS(ON)} este valor es la resistencia intrínseca del dispositivo y la cual sera responsable por el consumo de energía pasiva, así entre mas bajo sea este valor menor potencia disipara la solución en calor.

Unos últimos parámetros mas a considerar son el voltajes de ruptura y la temperatura de operación que debe ser mayor a 125°C en caso de esta en condiciones extrema o poca ventilación, el circuito deberá de responder protegiéndose.

Resultados

Para la medición de los resultados del prototipo se consideraron tres voltajes de entrada: 12.5V para probar la respuesta a voltajes de entrada inferiores al voltaje de salida con el que se desarrollaron los cálculos, 24V para voltajes de entrada cercanos al de salida y 38V para voltajes de entrada superiores al voltaje de salida; además de una potencia de demanda máxima de 105W.

Para acondicionar la carga demandada a la fuente se usó una carga dinámica modelo 3711A de ItekPower que permite establecer cargas de hasta 300W, la imagen de la figura 14 muestra el arreglo para las mediciones de la eficiencia.

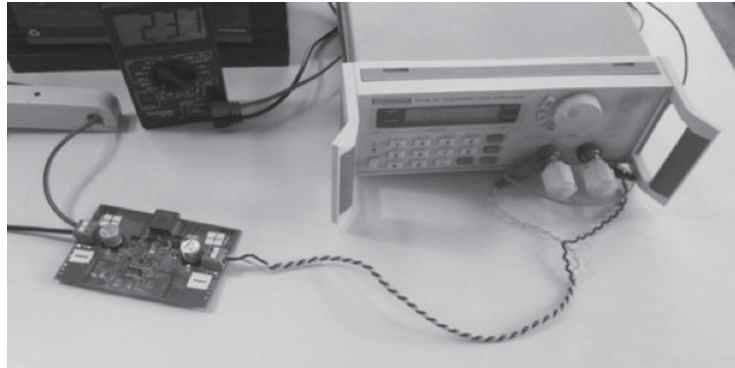


Figura 14: Banco de pruebas del prototipo.

Las condiciones de voltaje de entrada permitieron evaluar los modos de operación de la fuente, cuyas conmutaciones son automáticas en modo Boost, Buck-Boost y Buck, los cambios de operación del controlador son automáticos y controlados por el voltaje de entrada detectado, haciendo trabajar dos o cuatro MOSFET según sea el caso, la figura 15 muestra los resultados obtenidos con el banco de pruebas, reflejando la eficiencia de la solución en función de la variación de potencia demandada.

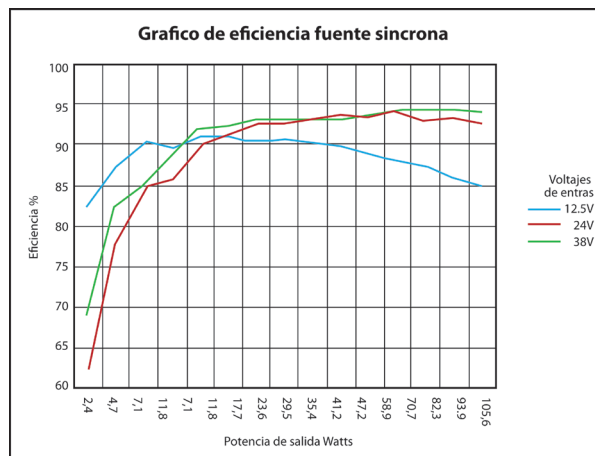


Figura 15: Gráfico de eficiencia para cada nivel de voltaje.

En el caso del modo Boost con voltajes de entrada 12.5V la eficiencia decae después de 30W ya que la corriente de entrada se incrementa más del doble de la corriente de salida provocando una mayor disipación de potencia en los componentes semiconductores. Aunque su eficiencia disminuye a 85% es superior a la de una fuente asíncrona que en promedio es de 75%.

Con voltaje de entrada similar al de salida la eficiencia se mantiene cercana al 93% controlando potencias por encima de los 25W. En este modo los cuatro transistores operan alternadamente disminuyendo así la disipación del circuito, las mediciones de la corriente de entrada son muy cercanas a las demandadas por la salida, por lo que la disipación de potencia en forma de calor es mínima.

El modo Buck es el que presenta una mayor eficiencia cercana a la 95% con una potencia de 100W, esto es debido al ciclo de trabajo de los transistores, lo que proporciona un menor consumo de potencia, como referencia para un convertidor Buck asíncrono su eficiencia máxima es en promedio de 78%.

Conclusiones

La solución de convertidores DC-DC con reguladores sincrónicos ofrece tasas de rendimiento muy por encima de las que ofrecen las soluciones con reguladores asíncrónicos; los cuales al estar adecuadamente configurados pueden brindar eficiencias del orden de 85% a 95%.

Cuanto más cercanos son los voltajes de entrada a la salida configurada en los convertidores DC-DC la eficiencia del circuito es mayor, por lo que para diseños de aplicaciones más específicas, es conveniente que estas diferencias de voltajes sean más cercanas o con valores de voltaje de entrada superiores.

Los circuitos elevadores y reductores con un adecuado controlador pueden adaptarse eficientemente a las demandas de una carga de forma automática, el rendimiento de estos circuitos difiere siendo menor para los circuitos elevadores, debido a la necesidad del sostenimiento de corrientes altas para compensar las demandas de potencia.

La solución del convertidor DC-DC presentada será mucho más efectiva cuando las demandas de potencia sean mayores a 10W y con voltajes de entradas mayores a la mitad de la tensión de salida. Como se muestra la gráfica de rendimiento, la eficiencia de la solución cae dramáticamente para potencias menores a 5W, hasta valores de casi un 62%. Esto se debe a la corriente de mantenimiento que se necesita en la bobina para que pueda regular la tensión de salida, provocando una mayor pérdida de calor en este componente.

Referencias

- Ajith Jain (2009). *Synchronous vs. Asynchronous Buck Regulators*. Semtech Corporation Application Note.
- Biranchinath Sahu, Gabriel A. Rincón-Mora (2004). A Low Voltage, Dynamic, Noninverting, Synchronous Buck-Boost Converter for Portable Applications; *IEEE Trans. Power Electronics*. Vol. 19, No. 2.

Fang Lin Luo, Hong Ye (2005). *Synchronous and Resonant DC/DC Conversion Technology, Energy Factor, and Mathematical Modeling*; CRC Press, ISBN-13: 978-0849372377.

Linear Technology (2010). *LTC3789 Data Sheet High Efficiency, Synchronous, 4-Switch Buck-Boost Controller*; Linear Technology 3789fa.

Möblacher Christian, Guillemant Olivier (2012). *Improving Efficiency of Synchronous Rectification*; Infineon Technologies Application Note. AN 2012-03 2012.

Texas Instrument (2011). *LM2747,LM3100,LM5035 Synchronous Rectification in High-Performance Power Converter Design*; Texas Instrument SNVA595.

Yong Ang (2009). *Synchronous rectifier reduces conduction loss in LLC resonant power supplies*; Zetex Corporation Application Note AN69.