

Control de un convertidor CD-CD tipo *buck* por medio del microcontrolador ATMEGA328

Irving Eduardo Vargas Morales¹, Jorge Arturo Pérez Venzor¹, Juan de Dios Cota Ruiz¹,
Manuel Iván Castellanos García¹, Oscar Nuñez Ortega¹, Jaime Romero González¹,
Adriana Cecilia González Saucedo¹

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

En el siguiente artículo se muestra la implementación de un convertidor de CD-CD tipo buck utilizando el microcontrolador ATmega328. Se presenta el análisis matemático del convertidor de voltaje con el cual se encontraron las características propias para ejercer una técnica de control apropiada. El análisis matemático para el controlador está basado en el primer método de Ziegler-Nichols. Este método proporciona los parámetros del controlador de forma experimental de una manera comprensible, con la finalidad de determinar los componentes del sistema que se usarán. El control del convertidor se realiza por medio del microcontrolador ATmega328, programado con el lenguaje C. Para comprobar el funcionamiento del control se realiza una simulación en el software MATLAB, el cual ayuda a depurar el circuito antes de su implementación. Finalmente se realiza la integración del programa y el circuito electrónico. La medición obtenida tanto en simulación como en físico se compara y se observa la diferencia entre ambas.

Palabras clave: Convertidor de voltaje, atmel, microcontroladores, convertidor buck, control digital..

Introducción

Los convertidores de potencia son dispositivos que nos ayudan en la transformación de la energía eléctrica, que se toma de la red, en otro tipo de energía eléctrica requerida para una tarea especial. Los convertidores son de amplia utilización, gracias a ellos se puede transformar la energía eléctrica con eficiencia, seguridad y bajo costo. Muchas cargas necesitan de este tipo de convertidores tales como soldadores eléctricos, equipos de telecomunicaciones y aparatos biomédicos, entre otros. Los

convertidores de potencia deben proporcionar un determinado nivel de voltaje, bien sea en tareas de regulación o de seguimiento, y deben ser capaces de rechazar cambios en la carga. Se estima que alrededor del 90% de la energía eléctrica se procesa a través de convertidores de potencia antes de su uso final. Una de las cualidades en estos dispositivos es su eficiencia en el desempeño, la cual puede ser mejorada mediante el uso de dispositivos de conmutación, correctamente implementados,

que permitan generar la salida deseada con un bajo consumo de potencia.

El esquema simplificado del convertidor reductor (también llamado convertidor buck o step down), usado en los experimentos, se muestra en la figura 1. Con esta configuración se puede hacer regulación de voltaje CD positiva. En general esta carga podría ser del tipo resistiva, no lineal, etc. Sin embargo, las técnicas propuestas han sido probadas para cargas resistivas.

El modelo matemático del convertidor buck se realizará de modo de conducción continua (MCC) en donde la corriente del inductor y el voltaje del capacitor adquieren un valor constante y de un valor promediado. En la ecuación 1, se puede observar las condiciones del MCC del convertidor reductor, el cual está ligado con la carga, la frecuencia de conmutación y el ciclo de trabajo al cual opera.

$$\frac{2Lf}{R} > (1 - U) \quad (1)$$

La técnica más utilizada para obtener el modelo matemático del convertidor buck se basa en espacio de estados. Dichos estados están dados por el interruptor Q cuyas fases son encendido y apagado. Se toman dos estados del sistema, los cuales están dados por la corriente del inductor (i_L) y el voltaje del capacitor (V_c). En la figura 2 se pueden observar los modos de operación del convertidor reductor.

El modelo del convertidor se puede dar por las ecuaciones 2 y 3. La variable de control (μ) define el estado del interruptor (0 ó 1) Q.

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_o}{L} + \frac{Vin}{L}\mu \quad (2)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{RC} + \frac{i_L}{C} \quad (3)$$

Este modelo del sistema es promediado y, en las ecuaciones (4, 5, 6) se encuentran con estados definidos.

$$x_1 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_L(\tau) d\tau \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_o(\tau) d\tau \quad (5)$$

$$x_3 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \mu(\tau) d\tau \quad (6)$$

En las ecuaciones anteriores, al integrar la variable de control del interruptor sobre el periodo de conmutación T, la nueva variable de control u se convierte en el ciclo de trabajo. El modelo promediado del convertidor incluyendo las variaciones del voltaje de alimentación está dadas por las ecuaciones 7 y 8.

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{x_2}{L} + \frac{Vin}{L}u + \frac{\widehat{Vin}}{L}u \quad (7)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{x_1}{C} - \frac{x_2}{RC} \quad (8)$$

Los valores en CD de las variables de estado pueden tenerse a partir del modelo promediado. Se toma la derivada igual a cero y se despeja en cada caso. El valor promedio en i_L es igual a $\frac{V_o}{R}$ mientras que el valor en el voltaje V_o está dado por $U * Vin$.

Finalmente, la aproximación lineal más cercana está dado por un modelo lineal en espacio de estados como se puede observar en las ecuaciones 9 y 10.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Vin/L \\ 0 \end{bmatrix} \hat{u} + \\ &+ \begin{bmatrix} U/L \\ 0 \end{bmatrix} \widehat{vin} \end{aligned} \quad (9)$$

$$y = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Dado esto, se pueden obtener 2 funciones de transferencia (11 y 12) con

respecto a las variaciones en el voltaje de salida \widehat{v}_o :

$$G_1(s) = \frac{\widehat{v}_o(s)}{\widehat{u}(s)} = \frac{Vo}{U} * \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (11)$$

$$G_2(s) = \frac{\widehat{v}_o(s)}{\widehat{vin}(s)} = U * \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (12)$$

Estas ecuaciones representan el efecto de las variaciones del ciclo de trabajo con respecto al voltaje de salida ($G_1(s)$) y las variaciones del voltaje de entrada que, normalmente están dadas como perturbaciones con respecto al voltaje de salida ($G_2(s)$) (Campos, s.f.)

Métodos

Problemática

Las fuentes convencionales (lineales) suelen ser muy ineficientes. Esto se debe al componente de regulación que siempre se encuentra en la zona activa haciendo que el consumo de potencia siempre este presente. Además, el tamaño y el costo de las fuentes lineales suelen ser muy grandes debido a los filtros y transformadores que utiliza. Estas fuentes no resultan ser muy prácticas y su voltaje de salida tiende a ser menor de lo esperado, por lo que no podrán aprovechar su eficiencia al máximo.

Existen otros tipos de fuentes de alimentación como las fuentes conmutadas las cuales pueden mejorar la eficiencia, el tamaño y el costo utilizando distintos métodos de control hacia el componente de regulación.

Convertidor Buck

En un regulador reductor, el voltaje promedio de salida V_a , es menor que el voltaje de entrada V_s . En la figura 1 se muestra el diagrama del circuito de un regulador reductor. La operación del circuito se puede dividir en dos modos. El modo 1 empieza cuando el transistor Q1 en $t=0$. La corriente de entrada, que se eleva, fluye a través del inductor L, del capacitor de filtro C y de la resistencia de carga R. El modo 2 empieza cuando se desconecta el transistor Q1 en $t=t_1$. El diodo de marcha libre D_m conduce debido a la energía almacenada en el inductor y la corriente del inductor y la corriente del inductor continúa fluyendo a través de L, C, la carga y el diodo D_m . La corriente del inductor se abate hasta que en el siguiente ciclo del transistor Q1 se vuelve

a activar. Los circuitos equivalentes correspondientes a los modos de operación

se muestran en la figura 2.

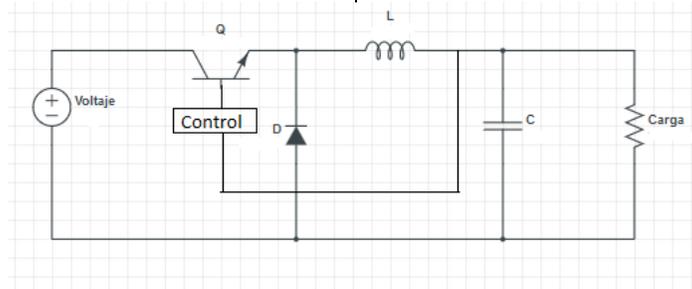


Figura 1. Circuito básico de un regulador reductor

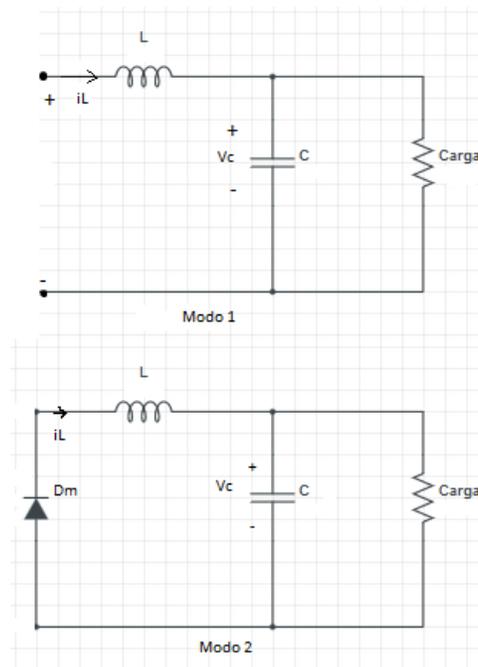


Figura 2. Circuito equivalente en modo de operación

El regulador reductor requiere de un solo transistor, es sencillo y tiene una alta eficiencia, mayor del 90%. La corriente de entrada es discontinua y por lo general requiere de un filtro suavizante de entrada. Proporciona una polaridad de voltaje de salida y corriente unidireccional de salida. En caso de posible corto circuito a través de la trayectoria del diodo, requiere de un

circuito de protección (Rashid, González, & Fernández, 2004).

Microcontrolador ATmega328.

El ATmega328 es un microcontrolador creado por Atmel y pertenece a la serie megaAVR. El ATmega328 es un circuito integrado de alto rendimiento que está basado en un microcontrolador RISC,

combinando 32 KB ISP flash, 1 KB de memoria EEPROM, 2 KB de SRAM, 23 líneas de E/S de propósito general, 32 registros de proceso general, tres temporizadores/contadores con modo de comparación, 6 canales de PWM, interrupciones internas y externas, programador de modo USART, una interface serial orientada a byte de 2 cables (I2C), interface serial SPI, 6-canales 10-bit conversor análogo-digital (ADC),

temporizador watchdog programable con oscilador interno, y seis modos de ahorro de energía seleccionables por software. El dispositivo opera entre 1.8 y 5.5 voltios y cuenta con una velocidad entre 0-20 MHz (Atmel Corporation, s.f.).

Modelado en MATLAB-Simulink.

En la figura 3 se observa el diagrama de bloques realizado en lazo abierto (Mahesh Gowda, Kiran, & Parthasarthy, 2014).

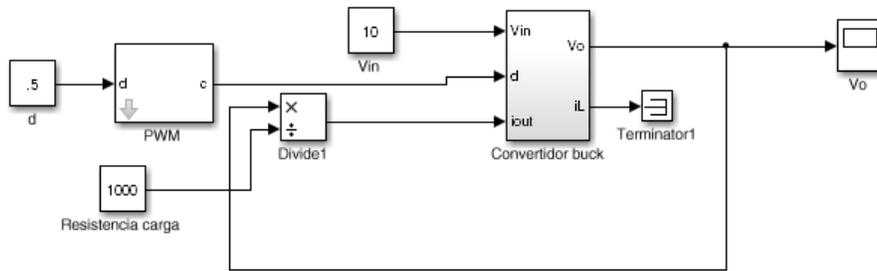


Figura 3. Vista general del modelo del convertidor buck a lazo abierto

En la figura 4 se observa el bloque del PWM que se tenía en la vista general, en él se hace una comparación entre el ciclo de

trabajo (d) dado en decimales contra la señal de diente de sierra para obtener una onda cuadrática.

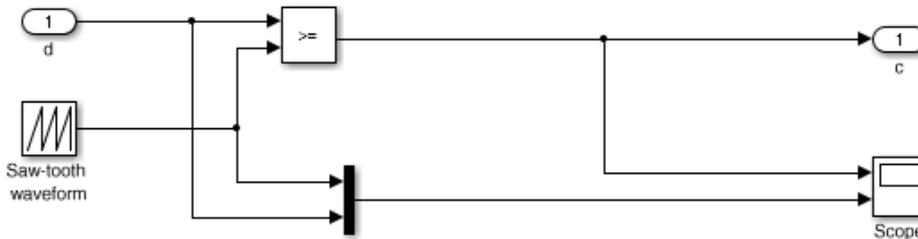


Figura 4. Bloque del PWM

En la figura 5 se observa el bloque del convertidor buck, que se toman en

consideración las resistencias que se tienen en los inductores y en los capacitores.

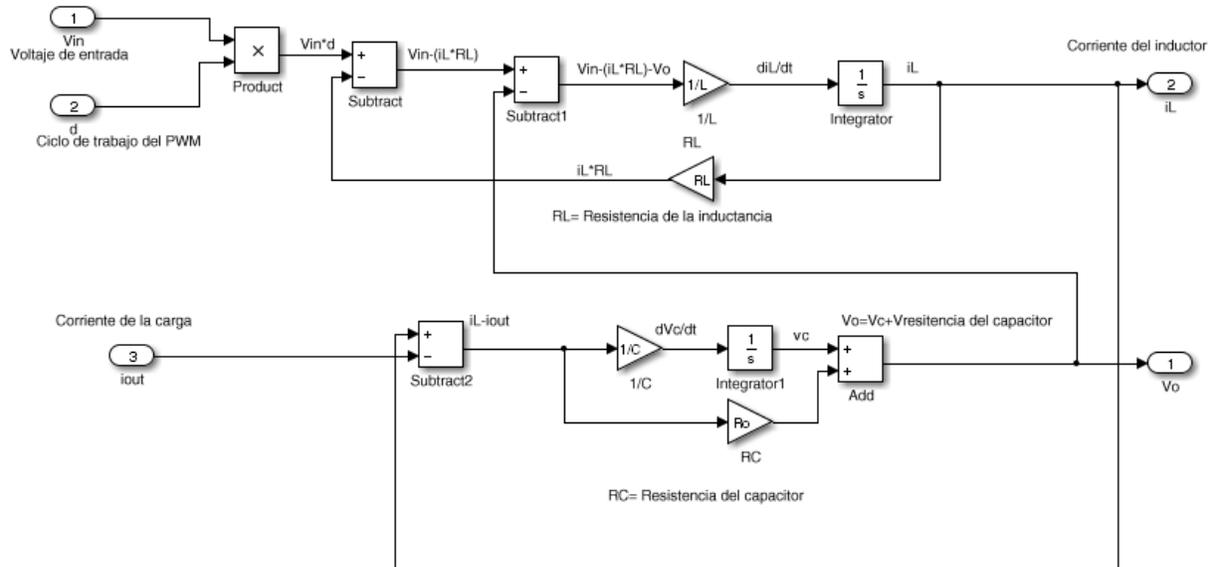


Figura 5. Bloque del convertidor buck

Los valores que se utilizan para obtener una respuesta en lazo abierto fueron los siguientes: $C= 100 \mu\text{F}$, $L= 4.62 \text{ H}$, $R_L= 220 \Omega$, $R_C=10 \Omega$, $f= 15 \text{ KHz}$, ciclo de trabajo = 50% y una resistencia de carga de 1000Ω . En la figura 6 se puede observar la

curva que se obtuvo del modelo hecho en simulink.

Con respecto a la curva, se logró estabilizar en un tiempo de 0.25 segundos llegando aproximadamente a 4.2 V.

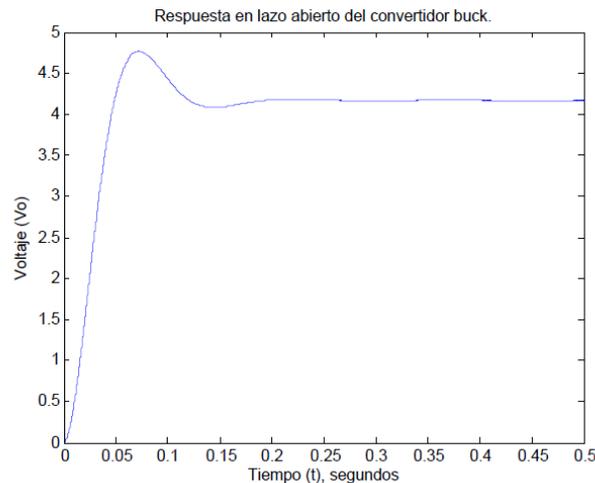


Figura 6. Respuesta en lazo abierto del convertidor buck

Sintonización del controlador

Obteniendo la respuesta en lazo abierto (figura 6) se procedió a utilizar el primer método de Ziegler-Nichols en donde se obtienen L y T al trazar una recta y obtener el punto de inflexión para calcular los valores del controlador PI que se utilizó para mantener un voltaje deseado a la salida del sistema.

En la figura 7 se trazaron las líneas para calcular los valores de L y T para un controlador PI.

Los valores que se obtienen son los siguientes: $L= 0.01132$ y $T= 0.04569$.

Se aplica las fórmulas de la tabla 1.1 y se obtienen los valores de K_p y T_i que equivalen a 3.632597173 y 0.037733333 respectivamente. Los parámetros obtenidos fueron utilizados en simulaciones posteriores y en la implementación con el microcontrolador.

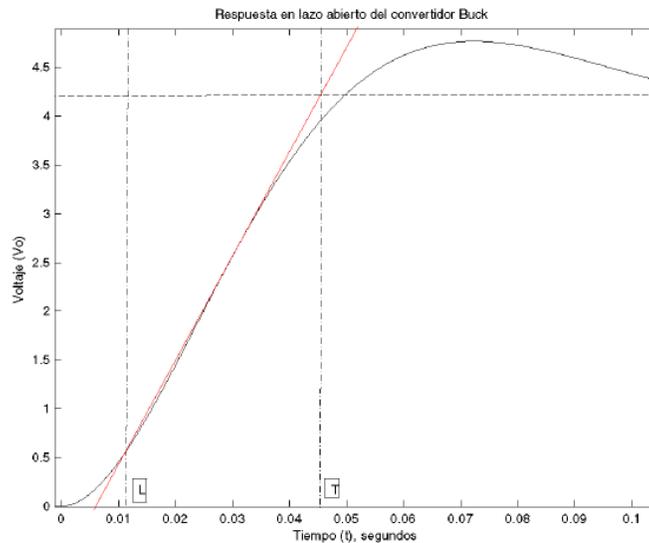


Figura 7. Respuesta en lazo abierto del convertidor buck aplicando el primer método de Ziegler-Nichols

Circuito del convertidor buck

Para llevar a cabo la implementación, se requiere que el hardware este acondicionado para llevar a cabo el control.

El ADC del microcontrolador solo puede leer valores entre 0 y 5V por lo que se tiene que reducir el voltaje de salida de la carga. También requiere un MOSFET

adicional para conmutar el PWM generado desde el microcontrolador.

En la figura 8 se puede observar el circuito básico del ATmega328 en donde solo se utilizan dos líneas para hacer el control. En el pin 15, se encuentra el OC1A que servirá como salida del PWM. En el pin

23, se encuentra el ADC0 que servirá como

nuestro convertor de datos.

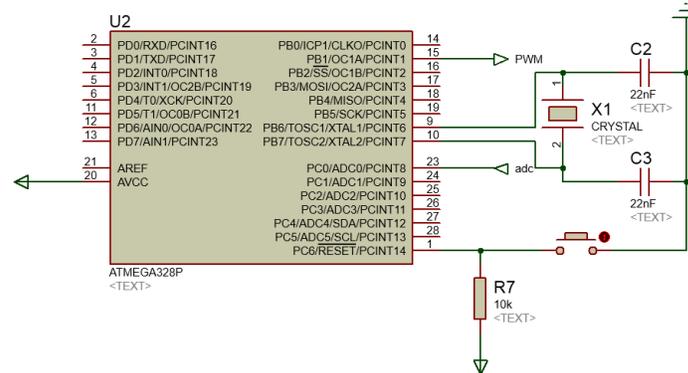


Figura 8. Conexión básica del ATmega328

En la figura 9 se puede observar el circuito del convertidor buck en el cual se hace uso de los valores propuestos con

anterioridad y, añadiendo un MOSFET adicional para efectuar una rápida conmutación en el circuito.

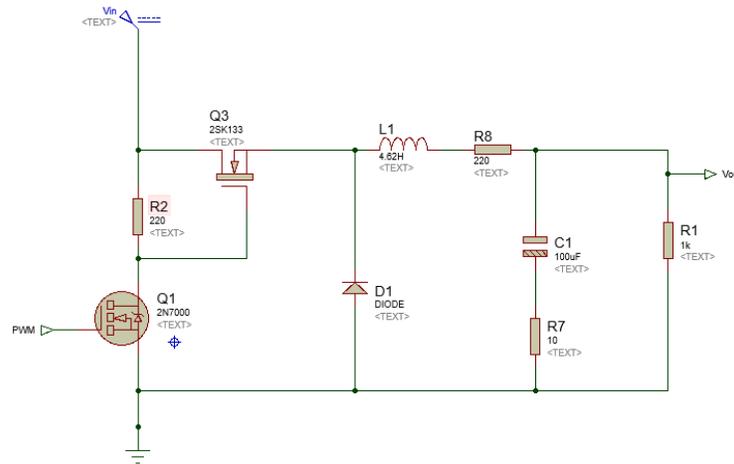


Figura 9. Conexión del convertidor buck

Para acondicionar el ADC, se necesitó reducir el voltaje de salida a la mitad. Por medio de los amplificadores operacionales, se redujo a la mitad el voltaje al cual le llega al convertor de datos que se

encarga de hacer la retroalimentación para hacer un control en el voltaje de la carga. En la figura 10 se puede observar dicho circuito.

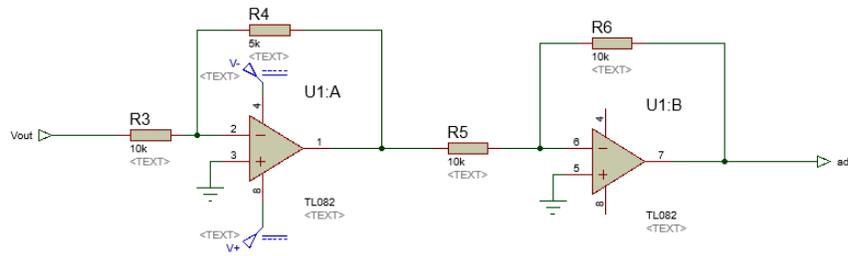


Figura 10. Acondicionamiento para la entrada del ADC

Posteriormente, el circuito fue controlado por medio del microcontrolador programado en lenguaje C. Cabe destacar que se utilizó un registro del temporizador 1, el cual consta de 16 bits lo que permite

hacer cuentas más grandes y obtener una mejor precisión. Además, se utilizó los mismos parámetros del controlador previamente propuesto con un tiempo de muestreo de 10 ms.

Resultados

En la simulación hecha con solo bloques de Simulink, la cual propusieron Gowda et al. (2014); se agregó una retroalimentación para controlar el voltaje de salida a un valor

deseado. En la figura 11 se muestra el bloque general retroalimentado con un controlador proporcional.

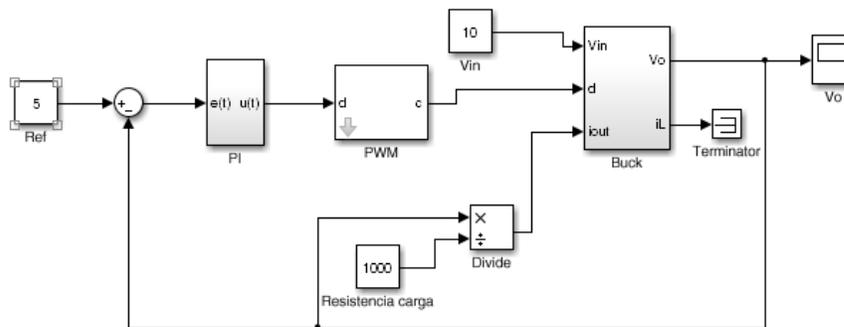


Figura 11. Control del convertidor buck utilizando bloques de simulink

En el bloque PI del controlador de la figura 12, los valores para K_p y K_i fueron obtenidos por el primer método de Ziegler-

Nichols. Dichos resultados se implementaron y posteriormente se agregaron a la simulación.

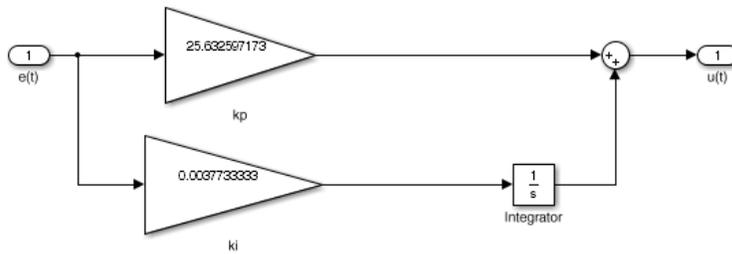


Figura 12. Diagrama del convertidor PI

La respuesta que se obtuvo al final de la simulación, con una carga de 1000Ω y un voltaje de referencia de 5V, se muestra en la figura 13



Figura 13. Respuesta a lazo cerrado del convertidor buck

Resultados obtenidos en el ATmega328

En la figura 14 se muestran los resultados obtenidos en el osciloscopio utilizando los

mismos valores de las ganancias obtenidas anteriormente. El sistema se llegó a estabilizar en 1.45 segundos a 5.17 V.

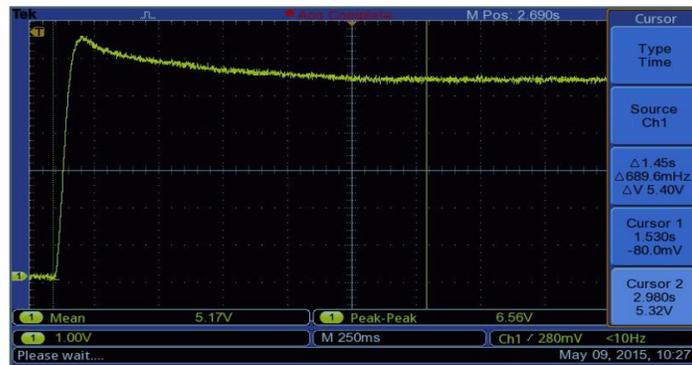


Figura 14. Respuesta a lazo cerrado del controlador buck utilizando el ATmega328

La ganancia propuesta hace que el sistema tarde en estabilizarse en un tiempo muy largo. Sin embargo, se aumentó la ganancia a 20.7 para lograr una respuesta rápida. Se hicieron varias pruebas en las cuales se aumentaba la ganancia a más de 30 pero hacia que el sistema oscilará con un margen de error del 20% logrando

estabilizarse en cuestión de minutos. Se optó por dejar la ganancia a 20.7 para evitar que el sistema no actuase lento. En la figura 15 se puede observar la respuesta que se obtuvo al aumentar la ganancia, cabe destacar que llega a estabilizar alrededor de 400ms llegando a medir un voltaje promedio de 4.76.

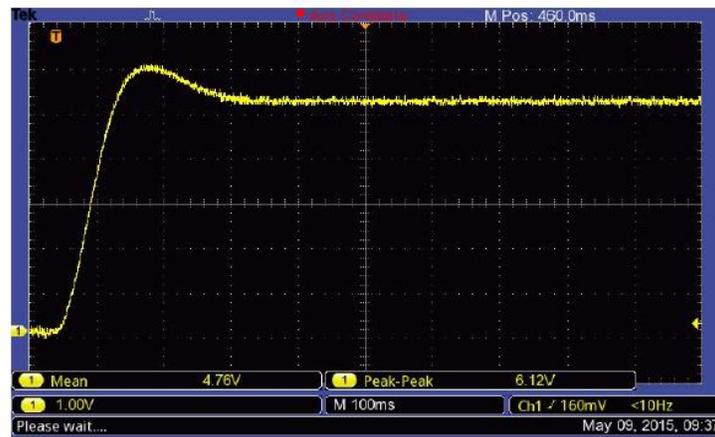


Figura 15. Respuesta a lazo cerrado del controlador buck con el ATmega328 aumentando la ganancia

Conclusiones

El sistema se desarrolla utilizando el microcontrolador ATmega328 con el cual se tiene una exactitud aceptable debido a la resolución de 10 bits tanto del ADC como del PWM y técnica de control empleada. Una de las ventajas de este microcontrolador fue el uso del lenguaje C el cual permitió crear el código del controlador PI de manera sencilla y eficaz. Además, debido a su alta integración, permitió adquirir la señal de voltaje a controlar, procesarla y enviarla al dispositivo de control por medio de una salida modulada en ancho de pulso.

El microcontrolador reguló voltajes entre 1 y 6V con una carga de 1K Ω en un

tiempo aproximado de 400ms. La precisión que marca el voltaje de salida está en un rango de $\pm 0.05V$. Esto se debe a que el circuito de acondicionamiento, que se mostró en la figura 1.14, provocó un pequeño ruido al reducir el voltaje de salida para acoplarlo con el ADC.

Con respecto a las discrepancias en los resultados de las simulaciones (figura 18 y figura 19), se debe a que no se consideraron factores como: frecuencia máxima a la cual operan los componentes, resistencias parásitas, método por el cual se simuló, entre otros. Además, se produjeron algunos sobreimpulsos y no llegó al voltaje

de referencia deseado, es decir, presentó un error de estado estable aproximado de 0.2V.

El proyecto se puede mejorar con un microcontrolador más veloz, un PWM que trabaje frecuencias más altas y un circuito de

acondicionamiento más preciso y un filtro más selectivo. Además, si se controlara la retroalimentación por sensado de corriente y voltaje, se obtendría una mejor respuesta en la salida del sistema.

Referencias

Atmel Corporation. (s.f.). Atmel 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable Flash, Atmel Corporation, San José, CA.

Campos, D. U. (s.f.). Experimentos en teoría de control: convertidores CD-CD, Facultad de Ciencias (UASLP).

Mahesh Gowda, N. M., Kiran, Y., & Parthasarthy, D. S. (2014). Modelling of Buck DC-

DC Converter Using Simulink. International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, 3(7), 14965-14975.

Rashid, M. H., González, M. H. R. V., & Fernández, P. A. S. (2004). Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones. Pearson Educación.