

Trabajo Práctico Final: Controlador Digital de un convertidor Buck DC-DC

Cignetti, Mateo Antonio (Autor)

Departamento de Ingeniería Electrónica, UTN Facultad Regional San Francisco
Av. de la Universidad 501, San Francisco, Córdoba - Argentina
mateo@cignetti.ar

Galliano, Ignacio (Autor)

Departamento de Ingeniería Electrónica, UTN Facultad Regional San Francisco
Av. de la Universidad 501, San Francisco, Córdoba - Argentina
igalliano@facultad.sanfrancisco.utn.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo práctico se desarrolla un sistema de control sobre un convertidor buck en carácter de aprendizaje e investigación universitaria. Se realizó el modelado matemático del sistema, y luego la identificación del mismo mediante datos experimentales. A partir del modelo obtenido se diseñó un controlador PID, el cual fue implementado mediante un microcontrolador ESP32-S3. Además, se realizaron análisis temporales y de respuesta en frecuencia del sistema, así como su estabilidad. Finalmente, se montó el circuito físicamente y se logró un correcto funcionamiento del sistema de control, con un voltaje de salida estable a pesar de perturbaciones en la entrada y salida.

Palabras clave: sistema de control, convertidor Buck, PID, modelado, identificación.

INTRODUCCIÓN

Sistemas y variables

Un sistema es una combinación de componentes que actúan conjuntamente y cumplen un determinado objetivo. Un sistema es expresado mediante un modelo matemático descrito por las leyes fundamentales que lo gobiernan. Así, nos referiremos a las variables independientes en este modelo como las señales de entrada o simplemente entradas y las variables dependientes como señales de salida o simplemente salidas.

Las entradas son aquellas variables que estimulan independientemente el sistema y pueden inducir cambios en sus condiciones internas. Se definen dos tipos de entrada a saber, las manipuladas y las perturbaciones exógenas. Las variables manipuladas son aquellas variables de entrada al sistema que están a nuestra disposición para ser accionadas libremente. Por otro lado las perturbaciones son todas las señales restantes de entrada al sistema que no son manipulables. Por lo general, las perturbaciones son señales que tienden a afectar adversamente al sistema, suelen ser no medibles y no se pueden prever el instante de tiempo en que actuarán.

Las salidas son aquellas mediante las cuales obtenemos información a cerca del estado interno del proceso. Consisten en dos tipos: variables controladas y no controladas. Las controladas consisten en señales de salida que son accesibles al controlador vía sensor. Las no controlables son el resto de las señales de salida de un modelo. (Adam 2020)

Conceptos de sistemas de control

Un sistema de control contempla las siguientes tres tareas:

- Monitorear las variables de salida mediante mediciones.
- Tomar decisiones racionales observando que acción correctiva es necesaria sobre la base de la información del estado actual del proceso y el objetivo deseado.
- Implementar efectivamente estas decisiones sobre el proceso.

Estabilidad: Un sistema controlado es considerado estable si las respuestas en el tiempo frente a cambios acotados son acotadas y cuyas oscilaciones son amortiguadas, o bien no existen. Mientras que, es considerado inestable si dichas respuestas son crecientes indefinidamente. Un punto de transición entre la estabilidad y la inestabilidad es aquel en que se producen oscilaciones sostenidas, es decir, de amplitud constante frente a cambios acotados. (Adam 2020)

Sistema de conversión DC-DC

Un sistema de conversión básico de conversión de potencia de CC a CC consta de una fuente de alimentación de CC, el convertidor CC-CC y una carga. La fuente de CC provee una tensión de CC arbitraria al convertidor. El convertidor luego convierte el nivel del voltaje dado al valor requerido por la carga, y lo suministra a la carga. La carga es un sistema de aplicación que opera con una tensión de CC fija y eventualmente consume potencia eléctrica.

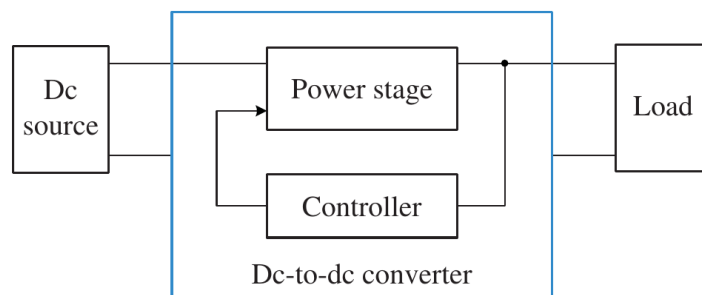


Figura 1: Sistema autónomo de conversión de potencia de CC a CC.

La fuente de alimentación de CC no alcanza las características de una fuente de voltaje ideal en varios aspectos. Primero, el nivel de voltaje de la fuente de CC podría variar con el tiempo, como es en el caso de las baterías, las celdas de combustible y otras fuentes de CC independientes.

Segundo, una fuente de CA rectificada se utiliza frecuentemente como un sustituto de la fuente de CC. En este caso, la fuente de CA rectificada usualmente contiene una cantidad considerable de componentes de CA, conocidas como ripple de CA. En adición, la salida de la fuente de CA rectificada podría ser corrompida con varios ruidos.

Por esta razón, como se puede ver en la Figura 1, el convertidor está agrupado en dos bloques funcionales: la etapa de potencia y el controlador. La etapa de potencia altera el nivel del voltaje de entrada al valor deseado utilizando varios componentes circuitales activos y pasivos, mientras que el controlador provee las señales necesarias para que la etapa de potencia ejecute su función.

El convertidor Buck ideal

El convertidor Buck es la configuración de circuito más sencilla que realiza la conversión de potencia de CC a CC, reduciendo el voltaje.

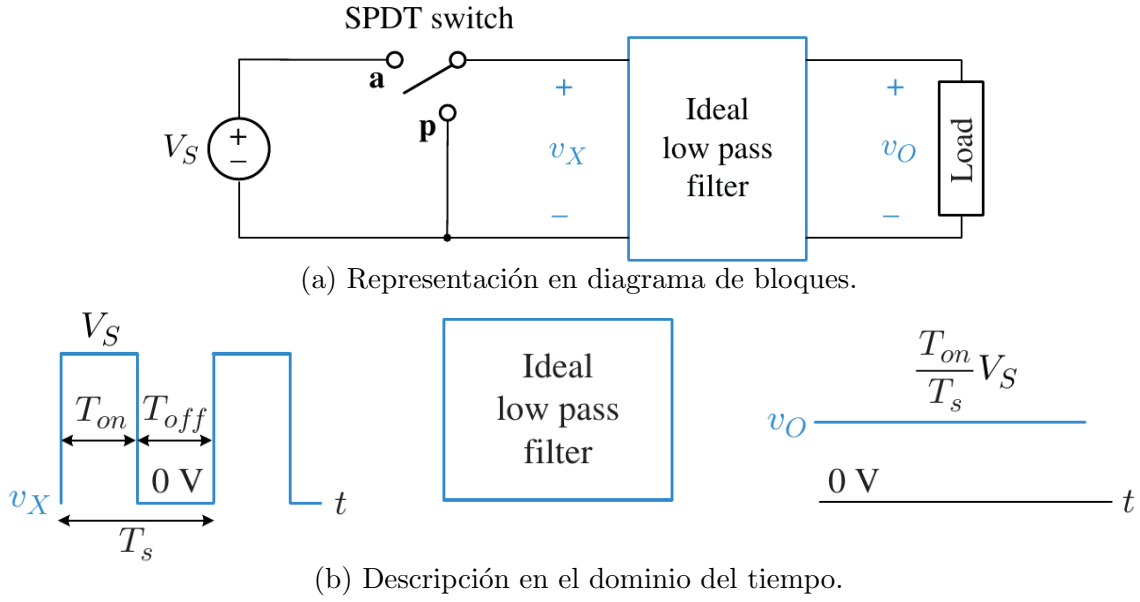


Figura 2: Conversión de potencia DC-DC reductora de tensión ideal.

La conversión reductora de tensión se explica utilizando un diagrama conceptual, como se muestra en la Figura 2a, consistiendo de dos bloques funcionales: un interruptor unipolar de dos posiciones (SPDT) y un filtro pasa-bajos ideal. Dentro de un período de conmutación T_s , el interruptor mantiene la posición **a** por T_{on} y la posición **b** por T_{off} . El período de tiempo T_{on} es definido como el período de encendido, mientras que T_{off} es denotado el período de apagado. La relación entre T_{on} y T_s es definido como la relación de trabajo o el ciclo de trabajo D del interruptor SPDT.

El interruptor SPDT transforma la tensión de entrada V_S en una onda rectangular v_X , como se muestra en la figura 2b. La onda rectangular v_X es luego aplicada a la entrada del filtro pasa-bajos ideal. Si la frecuencia de corte del filtro ideal, ω_c , es menor que la frecuencia fundamental de v_X , todos los componentes armónicos son completamente bloqueados y solo la componente de CC aparece en la salida del filtro pasa-bajos:

$$v_o = \bar{v}_X(t) = \frac{T_{on}}{T_s} \cdot V_S = D \cdot V_S \quad (1)$$

Esta conversión de potencia DC-DC tiene las siguientes propiedades:

- El circuito provee una tensión de CC pura para la carga, debido a las características ideales del filtro pasa-bajos.
- La ganancia de tensión del circuito, la relación v_o a V_S , es simplemente la relación de trabajo D del interruptor SPDT. Por lo tanto, el voltaje de salida es ajustado controlando el ciclo de trabajo del interruptor.
- Porque $0 < D < 1$, la tensión de salida v_o es siempre menor que la tensión de entrada V_S .

Por estas razones, el convertidor Buck ideal es un convertidor de potencia CC-CC reductor de tensión.

El convertidor Buck práctico

En la práctica, se implementa el convertidor Buck reemplazando el interruptor SPDT ideal por conmutadores semiconductores, como un transistor MOSFET y un diodo. El conmutador MOSFET es encendido y apagado por la señal de compuerta V_{GS} , mientras

que el estado del diodo es determinado por la condición del conmutador MOSFET. Cuando el MOSFET está encendido, el diodo está apagado porque la tensión de entrada V_S polariza inversamente la unión p-n. En cambio, cuando el MOSFET está apagado, las corriente del inductor fuerza al diodo a conducir.

Un filtro de segundo orden LC es utilizado como un sustituto funcional para el filtro pasa-bajos ideal. El filtro LC, a pesar de sus características lejanas a lo ideal, provee un filtrado más que adecuado para la mayoría de las aplicaciones.

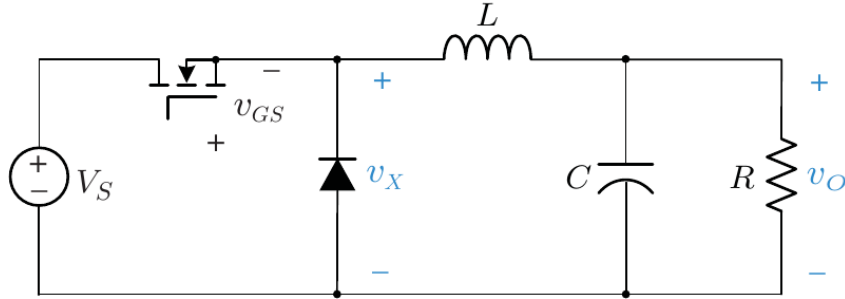


Figura 3: Convertidor Buck con par MOSFET-Diodo y filtro LC.

(Choi 2022)

DESARROLLO

Sistema de control PID

Para obtener una tensión de salida constante, sin importar variaciones en la tensión de entrada del convertidor, o en la impedancia de la carga, se implementa un controlador PID.

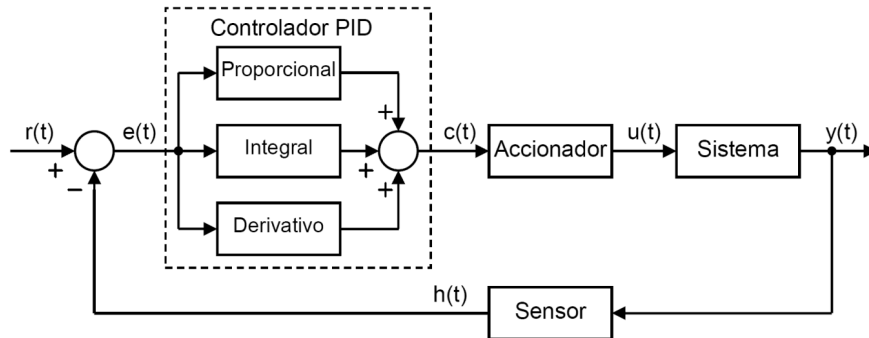


Figura 4: Diagrama de un sistema de control PID. (Picuino 2024)

Donde:

- $r(t)$ es la señal de referencia, que indica el valor deseado a la salida del sistema.
- $h(t)$ es la señal de retroalimentación, que es la medición de un sensor de la salida del sistema.
- $e(t)$ es la señal de error, que es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de retroalimentación del sistema.
- $c(t)$ es la señal de control, que es la salida del controlador PID.
- $u(t)$ es la señal de entrada al sistema.
- $y(t)$ es la salida del sistema.

El controlador PID consiste de tres acciones de control diferentes, que se suman para poder obtener la señal de control. Estas acciones son:

Acción de control proporcional (P): es simplemente la multiplicación de la señal de error por una constante K_p . Esto significa que su acción es proporcional al error. Su función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2)$$

Acción de control integral (I): es la suma acumulada de la señal de error en el tiempo, multiplicada por una constante K_i . Su función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

Acción de control derivativa (D): es la derivada de la señal de error en el tiempo, multiplicada por una constante K_d . Su función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d \cdot s \quad (4)$$

Para reducir el ruido de alta frecuencia en la señal de control, así como para evitar inestabilidades en el sistema, se utiliza un filtro pasa-bajos en la acción derivativa. La función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d \cdot \frac{N}{1 + \frac{N}{s}} \quad (5)$$

Sumando las tres acciones de control, obtenemos la función de transferencia en forma paralela del controlador PID:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot \frac{N}{1 + \frac{N}{s}} \quad (6)$$

Como en nuestro sistema de control se utiliza un microcontrolador, se debe discretizar la función de transferencia del controlador PID para implementarla correctamente. Utilizando la transformación de Euler, se obtiene la siguiente función de transferencia discreta:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_i \cdot \frac{T_s}{z-1} + K_d \cdot \frac{N}{1 + N \cdot \frac{T_s}{z-1}} \quad (7)$$

Aplicando denominador común y agrupando términos, se obtiene:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{(K_p + K_d N) z^2 + (-2K_p - 2K_d N + K_i T_s + K_p N T_s) z + (K_p + K_d N - K_i T_s - K_p N T_s + K_i N T_s^2)}{z^2 + (-2 + N T_s) z + (1 - N T_s)} \quad (8)$$

Finalmente, se puede obtener la ecuación en diferencias del controlador PID:

$$u[n] = (K_p + K_d N) e[n] + (-2K_p - 2K_d N + K_i T_s + K_p N T_s) e[n-1] + (K_p + K_d N - K_i T_s - K_p N T_s + K_i N T_s^2) e[n-2] - (2 - N T_s) u[n-1] - (1 - N T_s) u[n-2] \quad (9)$$

Modelado del sistema

El sistema convertidor Buck es un sistema conmutado. Consta de dos estados de conmutación: en primer lugar, cuando el interruptor está conectado al nodo 1, estado de carga; en segundo lugar, cuando el interruptor está conectado al nodo 2, estado de descarga. El sistema conmutado se puede modelar como un sistema promediado.

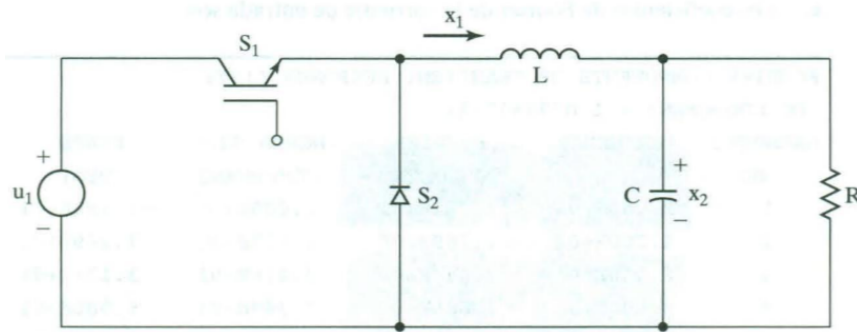


Figura 5: Circuito general del sistema.

Primero, la fuente se incluye en el circuito cuando el interruptor está conectado al nodo 1.

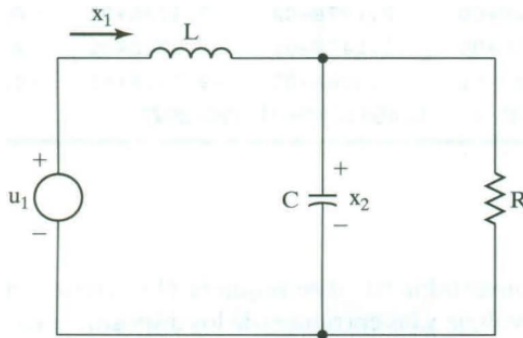


Figura 6: Circuito con fuente de voltaje.

Aplicando ley de Kirchoff obtenemos:

$$u_1 = Lx_1' + x_2 \quad (10)$$

$$Cx_2' = x_1 - \frac{1}{R}x_2 \quad (11)$$

Donde x_1 es la corriente que circula por el inductor, x_2 es la tensión en el capacitor y u_1 la tensión de entrada. Reordenando nos queda:

$$x_1' = -\frac{1}{L}x_2 + \frac{1}{L}u_1 \quad (12)$$

$$x_2' = \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \quad (13)$$

De aquí podemos obtener las matrices A_1 y B_1 :

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Cuando el interruptor está conectado al nodo dos, la fuente de tensión no se incluye en el circuito.

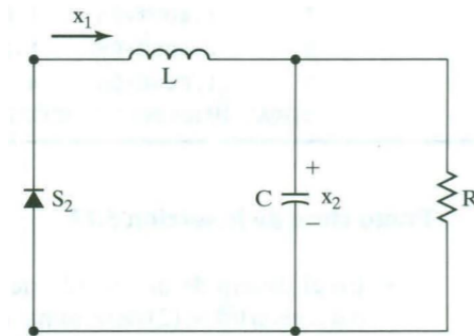


Figura 7: Circuito sin fuente de voltaje.

Nuevamente aplicando ley de Kirchoff, y reordenando las ecuaciones:

$$0 = Lx_1' + x_2 \quad (16)$$

$$Cx_2' = x_1 - \frac{1}{R}x_2 \quad (17)$$

$$x_1' = -\frac{1}{L}x_2 \quad (18)$$

$$x_2' = \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \quad (19)$$

De aquí podemos obtener las matrices A_2 y B_2 :

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Para los dos casos, la salida es igual a la tensión en el capacitor, x_2 :

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Obtención del sistema promediado:

La solución total se puede obtener promediando en espacio de estados, esto es, sumando los términos para cada análisis del modo lineal conmutado. Como solo cambia la matriz B, se hace sobre esa única matriz. Suponiendo el ciclo de trabajo d , tenemos:

$$B_{Promedio} = d \cdot B_1 + (1 - d) \cdot B_2 \quad (23)$$

Sustituyendo obtenemos la matriz A, B y C del sistema:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Lo que resulta en el siguiente sistema de estado:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_1 \\ y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (27)$$

Aunque el sistema original es lineal para toda condición dada de conmutación, el sistema que resulta en general es no lineal debido a que el ciclo de trabajo d es en general una función de x_1 , x_2 y u_1 . (Muhhammad H. 2004)

Se procede a implementar el circuito físico para luego obtener un modelo del sistema lineal e invariable en el tiempo mediante identificación empírica.

Circuito

Para construir el circuito físico, primero se realizó el siguiente diagrama:

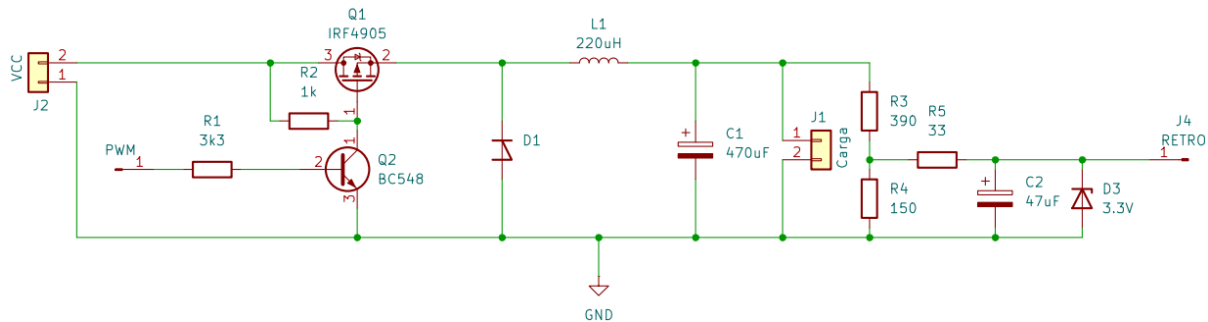


Figura 8: Diagrama de circuito.

Los componentes fueron seleccionados según disponibilidad y costos, teniendo en cuenta que cumplan los requerimientos del circuito. El IRF4905 es un transistor MOSFET canal P que se utiliza como interruptor en el convertidor. Su baja resistencia $R_{ds(on)}$ cuando está activado y su capacidad para manejar corrientes altas lo hacen adecuado para aplicaciones de conversión de potencia.

El filtro LC se diseña para rechazar la frecuencia de conmutación del transistor (establecida arbitrariamente en 19 kHz), resultando en una frecuencia de corte de 770 Hz. Además, se coloca un filtro RC a la salida de la retroalimentación, con una frecuencia de corte de 100 Hz para filtrar cualquier dinámica indeseada del sistema que no haya sido eliminada por el filtro LC.

El divisor resistivo que conecta la retroalimentación al microcontrolador está diseñado para que entregue una tensión de 0 V a 3,3 V. Para ello se realizó una tabla con valores de entrada y salida:

Voltaje de retroalimentación (V)	Voltaje en la carga (V)
0	0
0,27	1
0,55	2
0,83	3,05
1,07	3,9
1,38	5,01
1,66	6,03
1,95	7,09
2,19	8,02
2,44	9,06
2,65	9,96
2,87	11
3,04	12

Tabla 1: Calibración de voltaje de retroalimentación

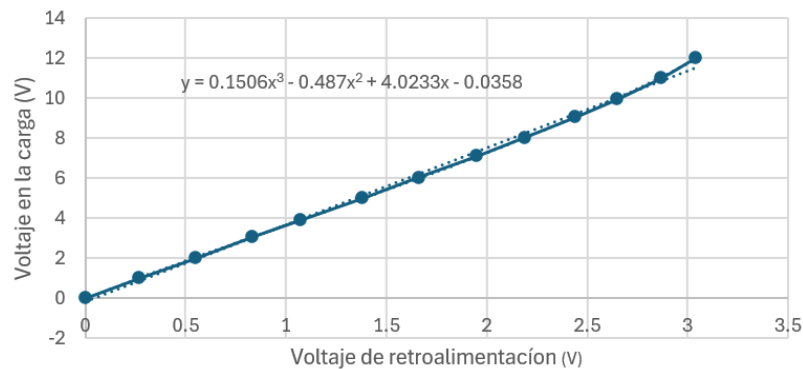


Figura 9: Curva de calibración de voltaje de retroalimentación.

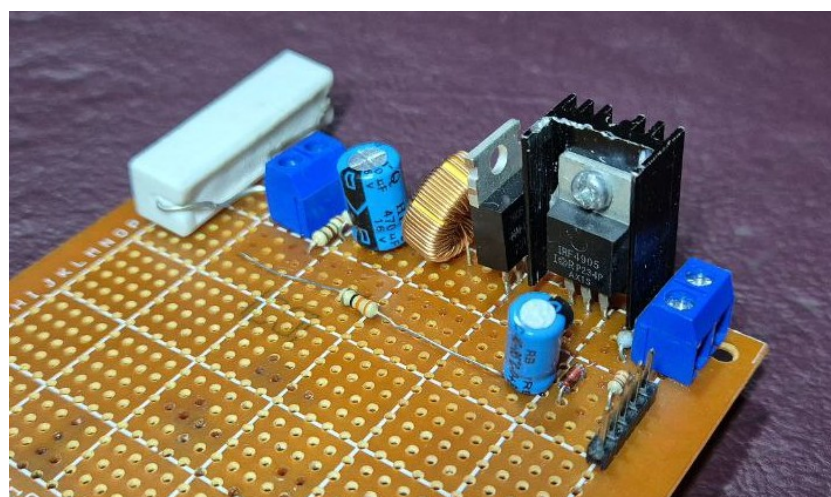


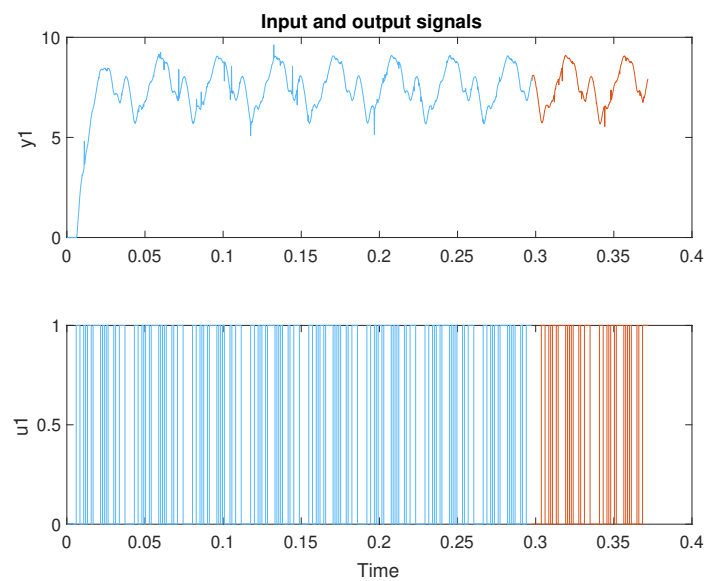
Figura 10: Circuito montado en placa perforada, con carga resistiva montada.

Identificación del sistema

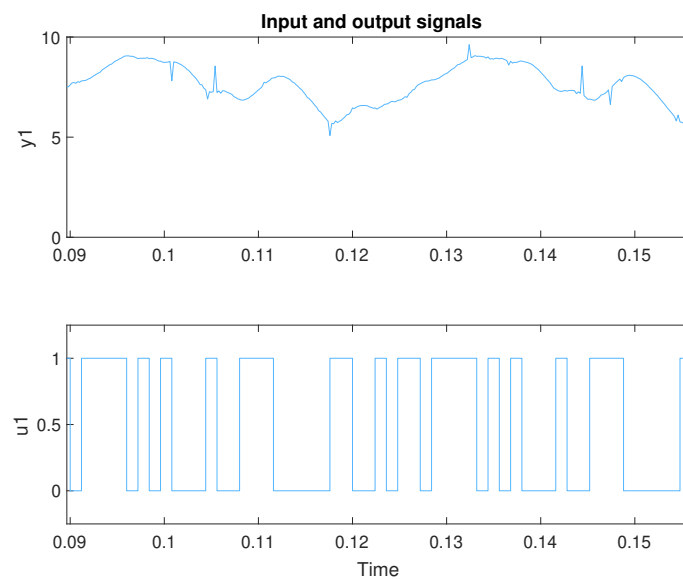
Si bien el modelo del sistema se puede obtener a partir de las ecuaciones de Kirchhoff, se procede a obtener un modelo empírico. Para ello, se aplica una señal de entrada al sistema físico y se mide la respuesta del mismo.

En esta ocasión, se optó por utilizar una señal de entrada PRBS (Pseudo Random Binary Sequence, en español Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria). La misma intenta cubrir todo el rango de frecuencias posibles, y es útil para identificar sistemas lineales y no lineales. Utilizando MATLAB, se genera una señal PRBS con un tiempo de muestreo de 200 microsegundos, frecuencia máxima 800 Hz, y una duración de 10 períodos. Esta señal es una secuencia de 186 valores en 0,0372 segundos repetida diez veces. Es decir, 1860 valores en un rango de 0 a 0,372 segundos.

Se programa el microcontrolador para reproducir la señal PRBS en el convertidor Buck, medir la salida del sistema y luego enviar los datos mediante comunicación serial. A través de un programa en Python, se guardan los valores en un archivo csv para luego introducir en el System Identification Toolbox de MATLAB:



(a) Vista completa de la señal de evaluación y validación.

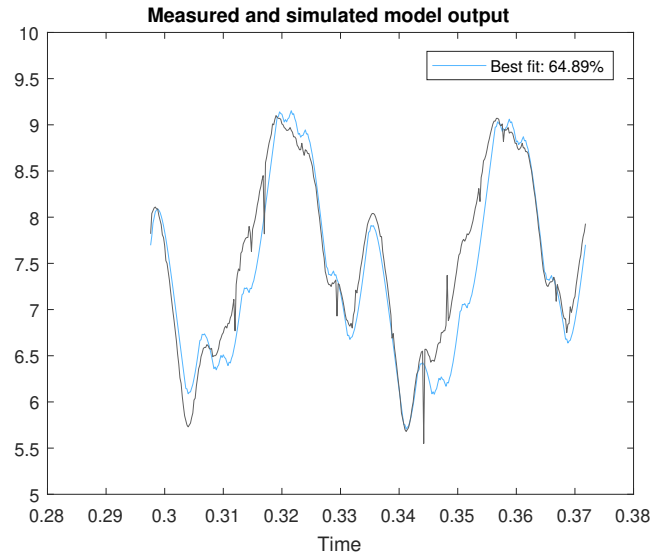


(b) Vista acercada de la señal de evaluación.

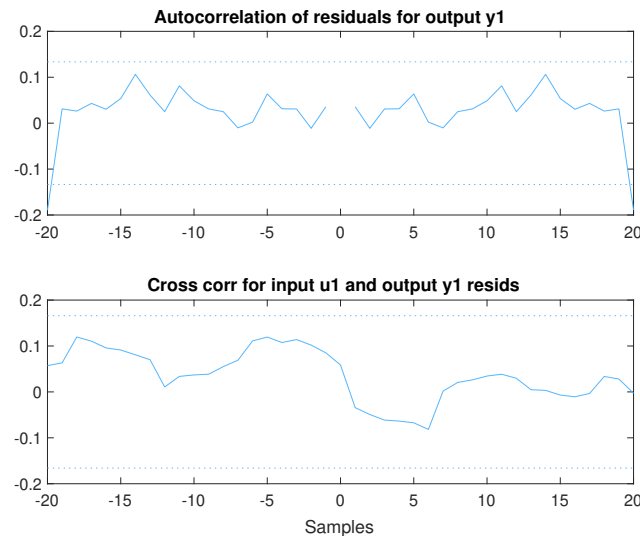
Figura 11: Salida (arriba) y entrada (abajo) del sistema con la señal de identificación.

Se seleccionan los primeros 1488 valores (80 % de los valores totales) como la señal

de evaluación y los restantes 372 valores (20 % de los valores totales) como la señal de validación. Finalmente, se estima un modelo en espacios de estado de orden 3 utilizando la función $N4SID$ del System Identification Toolbox:



(a) Comparación del modelo estimado con la respuesta medida.



(b) Análisis residual del modelo estimado.

Figura 12: Resultados de la estimación del modelo del sistema.

Como se puede observar en la Figura 12, el modelo estimado coincide con la respuesta medida del sistema (señal de validación) en un 64,89 %. Respecto a la señal de evaluación, coincide en un 92,61 %. Además, el análisis residual del modelo estimado demuestra un buen resultado en la autocorrelación de residuales para la salida y para la correlación cruzada de residuales entre la entrada y la salida.

El modelo estimado en espacios de estado discreto es el siguiente:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + B \cdot u + K \cdot e \\ y = C \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + e \end{cases} \quad (28)$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} 0,9933 & -0,01093 & -0,0006102 \\ 0,1064 & 0,8617 & -0,2955 \\ 0,005556 & -0,02709 & -0,6608 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0,000438 \\ -0,005044 \\ 0,02667 \end{bmatrix} \quad (30)$$

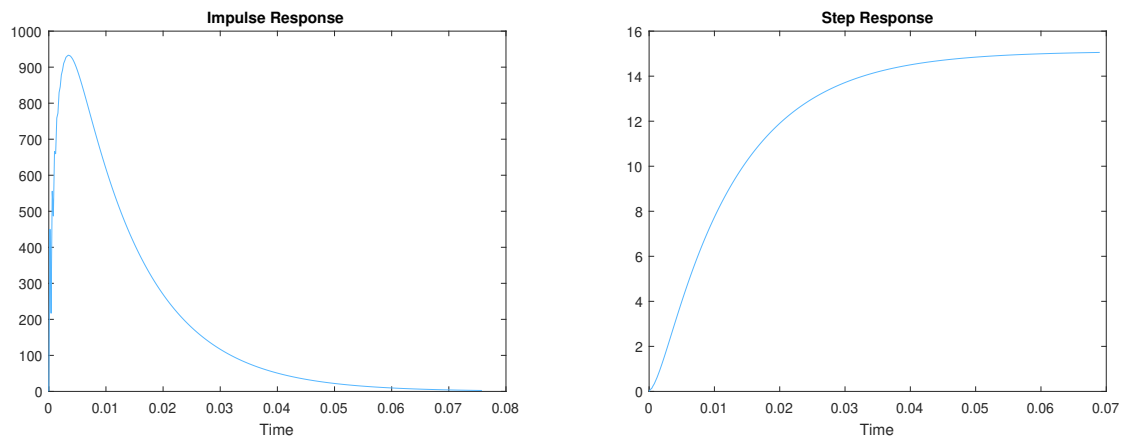
$$C = [188,4 \quad 2,647 \quad 0,7808] \quad (31)$$

$$K = \begin{bmatrix} 0,002016 \\ -0,0145 \\ -0,008185 \end{bmatrix} \quad (32)$$

El mismo se puede representar en función de transferencia luego de transformarlo mediante MATLAB:

$$H(z) = \frac{0,09 z^{-1} - 0,06406 z^{-2} + 0,02537 z^{-3}}{1 - 1,194 z^{-1} - 0,3768 z^{-2} + 0,5743 z^{-3}} \quad (33)$$

A continuación se grafican las respuestas temporal y en frecuencia del sistema identificado:



(a) Respuesta al impulso.

(b) Respuesta al escalón.

Figura 13: Respuesta temporal del sistema estimado.

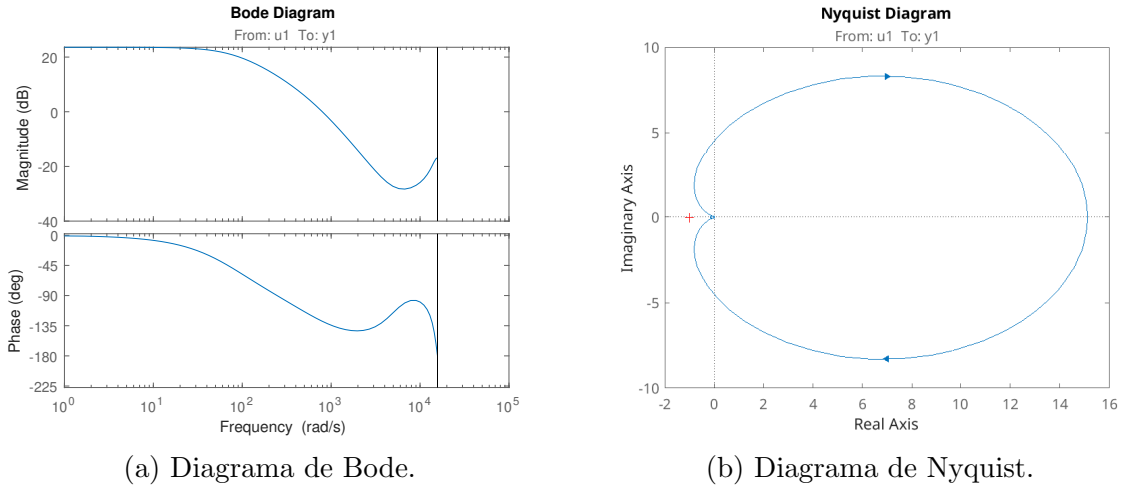


Figura 14: Respuesta en frecuencia del sistema estimado.

Análisis de estabilidad

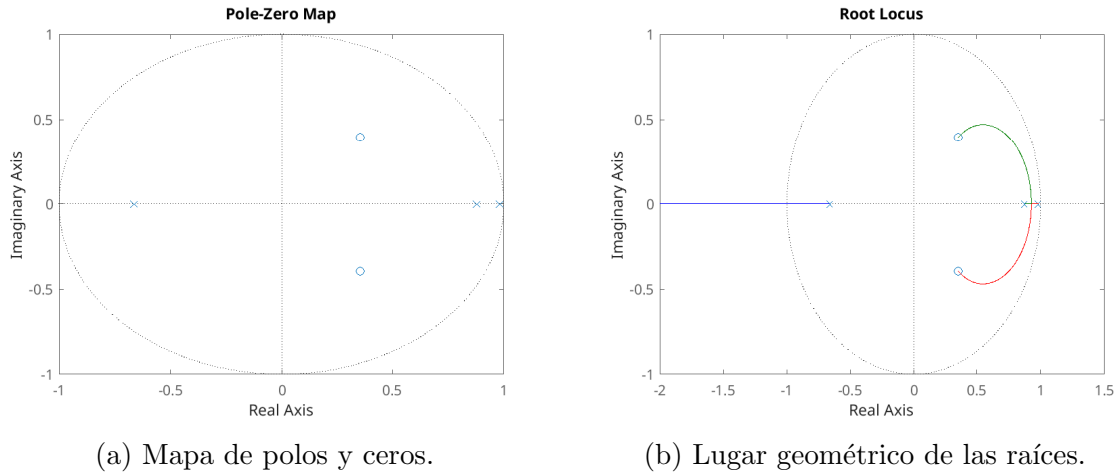


Figura 15: Análisis de la respuesta temporal del sistema estimado.

La respuesta al impulso del sistema converge a cero cuando el tiempo tiende al infinito. En la respuesta al escalón, el sistema converge a un valor. La ubicación de polos y el lugar geométrico de las raíces están ubicados dentro del círculo unitario en el plano z . Además, en la figura 14b, la curva no rodea el punto crítico $(-1, 0)$. Debido a estas características se determina que el sistema es estable.

En la figura 15b, se observa que para ciertos parámetros del sistema, un polo puede ubicarse por fuera del círculo unitario en el plano z , resultando en un sistema inestable.

Implementación en microcontrolador

Para implementar el sistema de control en el microcontrolador, se implementó un timer de 200 microsegundos, que llama a una función de control cada vez que termina. Este temporizador corre periódicamente durante el funcionamiento del programa. Se configura también un canal de PWM para controlar el MOSFET del convertidor buck, con frecuencia de 19 kHz y ciclo de trabajo variable.

En la función de control, se mide el valor del ADC (convertidor analógico a digital) para obtener el valor de setpoint, que varía de 0 V a 10 V. Luego, se mide por el ADC el valor de la retroalimentación, que, aplicada a una curva de calibración, se obtiene el valor

de tensión de salida. El setpoint restado a este valor resulta en el error que, ingresado en la fórmula de ecuación en diferencias del controlador PID con filtro derivativo, se obtiene la señal de control. Esta señal se aplica al PWM (modulación por ancho de pulso) del pin de salida que controla el MOSFET del convertidor buck.

La programación se realizó mediante esp-idf, utilizando la referencia de API oficial de Espressif para el ESP32-S3. (Espressif Systems 2024)

Sintonización del controlador PID

Para la sintonización del controlador PID, se utilizó la herramienta de MATLAB PID Tuner. A partir de valores obtenidos, se modifican levemente para obtener una respuesta deseada. En la figura siguiente, se observa como ejemplo la configuración de una respuesta lenta y robusta:

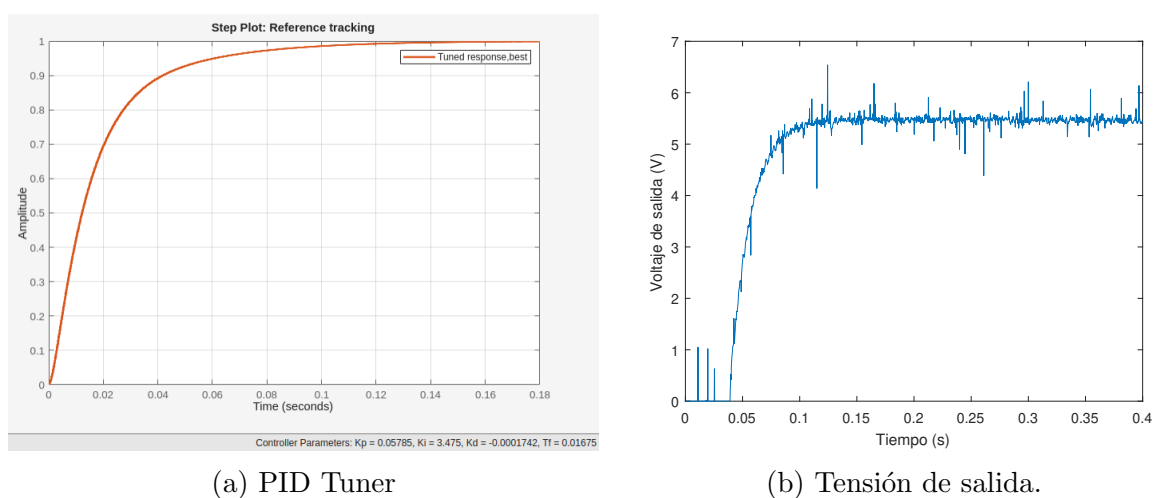


Figura 16: Sintonización con $K_p=0,06$; $K_i=3,47$; $K_d=-0,0002$; $N=0,02$.

Resultados

A continuación se presentan distintas figuras con diferentes valores de constantes K_p , K_i , K_d y N :

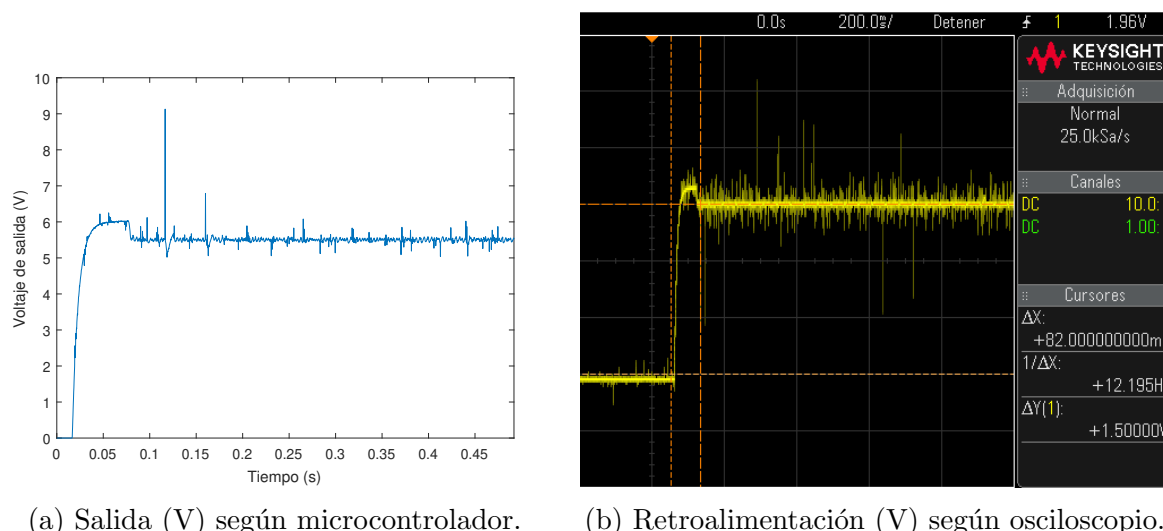
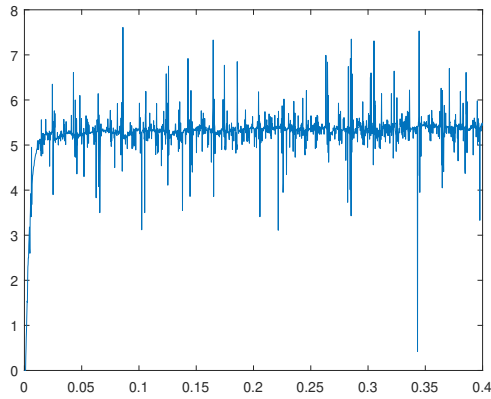
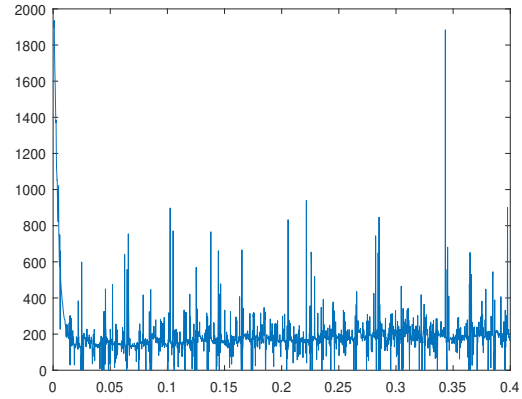


Figura 17: Respuesta temporal con $K_p=0,02$; $K_i=9,78$; $K_d=0$; $N=92,75$.

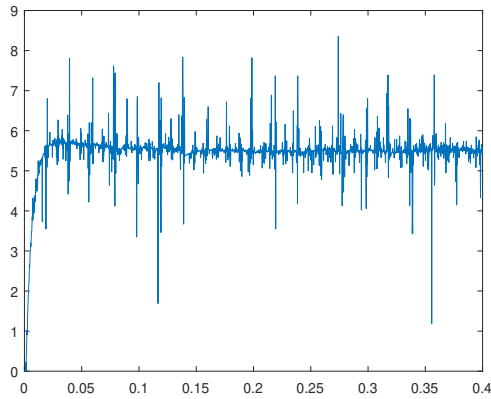


(a) Señal de salida (Volts).

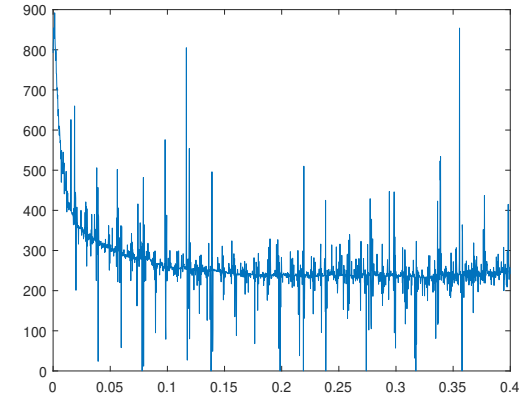


(b) Señal de control (duty cycle en bits).

Figura 18: Respuesta temporal con $K_p=1$; $K_i=5$; $K_d=0$; $N=0$.



(a) Señal de salida (Volts).



(b) Señal de control (duty cycle en bits).

Figura 19: Respuesta temporal con $K_p=0,42$; $K_i=33.16$; $K_d=8,3 \times 10^{-6}$; $N=0,00012$

Estas últimas gráficas poseen un ruido excepcional debido a la mala calidad de la fuente de alimentación de entrada disponible en el hogar, a comparación de la fuente de laboratorio utilizada en las mediciones anteriores.

CONCLUSIÓN

Luego de realizar este proyecto, se puede concluir que:

- Se diseñó e implementó un sistema de control PID para un convertidor Buck.
- El convertidor Buck es capaz de mantener la tensión constante a la salida independientemente de las variaciones del valor de entrada y perturbaciones en la salida.
- Se obtuvo un modelo del sistema de manera empírica que se comporta de manera similar a la planta.

REFERENCIAS

- [1] Eduardo Adam. *Instrumentación y control de procesos*. 3ra. Santa Fe: Ediciones UNL, 2020.
- [2] Byungcho Choi. *Pulsewidth Modulated DC-to-DC Power Conversion: Circuits, Dynamics, Control and DC Power Distribution Systems*. 2nd. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2022.
- [3] Picuino. *Control PID*. 2024. URL: <https://www.picuino.com/es/control-pid.html> (visitado 26-08-2024).
- [4] Rashid Muhammad H. *Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones*. 3ra. Naucalpan de Juárez, Edo. de México: Pearson Educación, 2004.
- [5] Espressif Systems. *ESP-IDF Programming Guide*. 2024. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.3/esp32s3/api-reference/index.html> (visitado 30-08-2024).