

Lab 9: Convertidor Buck utilizando Control Moderno

Objetivos

- Estudiar, analizar, modelar e implementar un circuito convertidor Buck.
- Aplicar técnicas de control moderno para controlar el sistema.

Duración: 2 semanas.

En esta práctica diseñarán e implementarán un controlador para un convertidor Buck, ilustrado en la Figura 1. Se usarán técnicas de modelado y control moderno. **Esta vez no deberán elaborar un reporte escrito.** La nota será por la asistencia y trabajo en el laboratorio, y la **demonstración de los resultados de simulación y los físicos.**

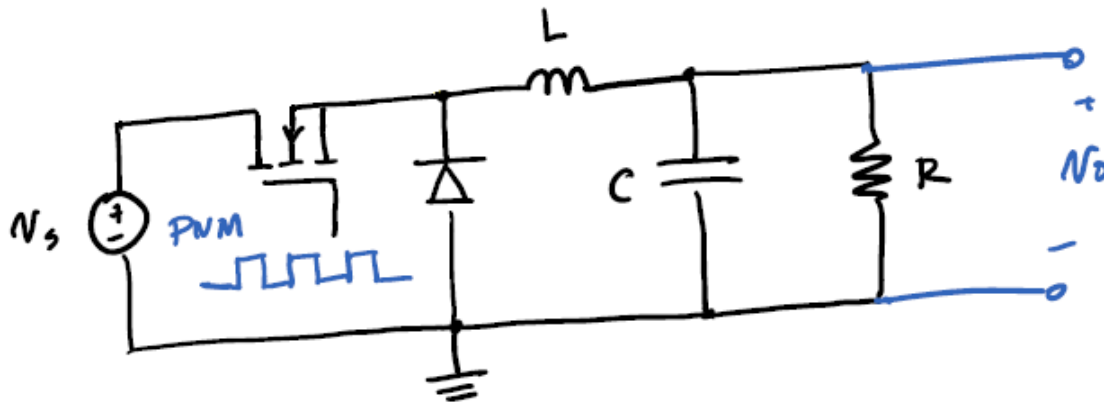


Figura 1. Convertidor Buck. Tomado de notas de Miguel Zea.

Prelaboratorio: Revisión del análisis y modelado del sistema

Antes de la primera sesión deberán revisar el documento “IE3041 - Lab 9, modelado convertidor Buck.pdf”, en el que se hace un modelado en espacio de estados del sistema. Deberán identificar las variables de estado, la(s) salida(s) y la(s) señal(es) de control.

Primera Parte: Simulación del sistema en lazo abierto

Teniendo el modelo del sistema, deberán simular el sistema en lazo abierto. Lo harán en Simulink, y usarán componentes eléctricos/electrónicos de *Simscape* (resistores, capacitores, inductores, diodos, transistores), en combinación con un bloque para el PWM.

Nota: entre la señal del PWM y el MOSFET se requiere una etapa de acople con resistores y transistores. En la Figura 2 se observa el circuito con dicha etapa. Así lo deberán simular (e implementar en físico en la Tercera Parte).

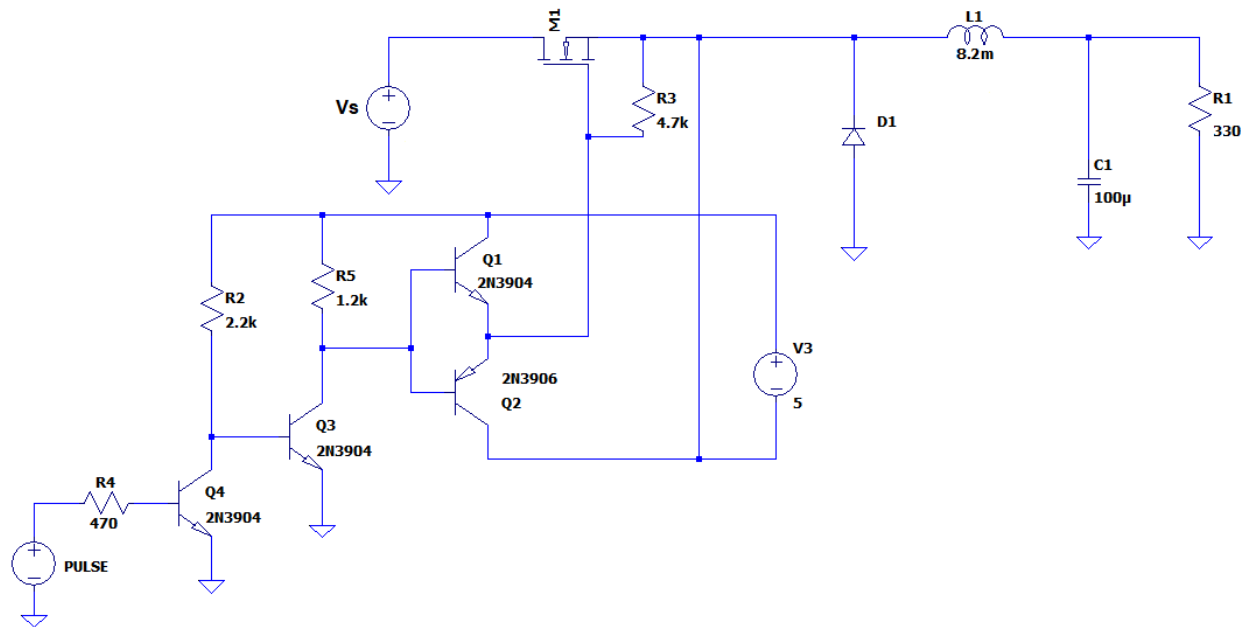


Figura 2. Convertidor Buck con etapa de acople para entre el PWM y el MOSFET.

1. En Simulink, construyan el circuito mostrado en la Figura 2 (notar que es en lazo abierto). Para los transistores BJT usen los bloques *NPN Bipolar Transistor* y *PNP Bipolar Transistor*, respectivamente. Para el MOSFET, usen el bloque *N-Channel MOSFET*. Para el diodo, cambien el modelo a exponencial, como en el lab 5. El pulso es la señal del PWM. Usen el bloque *PWM*. La entrada del bloque *PWM* será una constante (en este caso de lazo abierto), que representa un ciclo de trabajo. La salida del bloque *PWM* está entre 0 y 1. Deberán amplificarla, para que esté entre 0 y 3.3 (porque así lo sacará la Tiva C en la implementación física). El bloque tiene como parámetro el período del pulso. Usen un período de 0.0001 s. Coloquen un *Scope* para ver el voltaje deseado (constante) y el voltaje de salida.

Nota: la librería básica de *Simscape (Foundation Library)* cuenta con elementos eléctricos básicos, aunque no con transistores ni el diodo con modelo exponencial. La librería *Simscape Electrical* sí cuenta con transistores y otros elementos más complejos. Si no tienen *Simscape Electrical*, la pueden adquirir, pero NO es obligatorio. Si no la adquieren, deberán usar bloques de *switches* en lugar de los transistores. Pueden usar el diodo básico con modelo lineal.

2. Del análisis revisado en el prelaboratorio se tiene que la entrada del sistema es el ciclo de trabajo del PWM. Siguen los pasos del ejemplo al final del documento para encontrar el valor u_{ss} , dados los siguientes valores de los parámetros: $L = 8.2 \text{ mH}$; $C = 100 \text{ }\mu\text{F}$; $R = 330 \text{ }\Omega$; $v_s = 3.3 \text{ V}$; $v_o = 2 \text{ V}$ (la salida deseada). u_{ss} será la entrada en lazo abierto.
3. Ajusten el “*Sample time*” del *Scope* a 0.0001 y el tiempo de simulación a 0.02 s. Corran la simulación. **Observen en el voltaje de salida deseado (pueden usar un bloque constante y conectarlo directamente al Scope) y la salida del circuito.**

Segunda Parte: Diseño del controlador y simulación del sistema en lazo cerrado

Como se indica en el documento del modelado del Buck, usarán el controlador

$$u = -\mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{ss}) + u_{ss}$$

Los valores para el punto de operación se obtienen del análisis del circuito en estado estacionario. En la Primera Parte ya obtuvieron u_{ss} . Para el control usarán **LQR** (se podría usar *Pole Placement*, pero no es necesario). Usarán las variables estado medidas; no usarán observadores de estado.

1. En Simulink, constuyan el sistema en lazo cerrado. Al circuito construido en la Primera Parte deberán agregar los bloques adecuados para implementar la ley de control indicada arriba.

Ayuda 1: noten que las cantidades u_{ss} y \mathbf{x}_{ss} son constantes. Pueden usar bloques constantes tanto para escalares como para vectores.

Ayuda 2: \mathbf{x} es el vector de variables de estado. Las deberán medir del circuito para usarlas para la ley de control, como se hizo en el laboratorio 6. A pesar de que existe un sensor de corriente, similar al sensor de voltaje que han usado antes, se recomienda hacer una medición indirecta de la corriente, por medio de una resistencia *shunt*. Esto es porque así se medirá la corriente en el sistema físico. **El instructor les dará detalles al respecto.**

Ayuda 3: noten que la señal de control u es la entrada del bloque **PWM** (ya no es constante como en lazo abierto).

Ayuda 4: noten que no se está haciendo un rastreo, sino una regulación. Por lo tanto, NO hay una señal de referencia, por lo que NO se debe usar un factor de escala “Nbar” ni término integral, como en laboratorios anteriores. Sí hay un voltaje de salida deseado, v_o , pero ese valor ya está embebido en el cálculo del punto de operación.

2. Apliquen LQR para obtener la matriz de control \mathbf{K} . Ajusten el tiempo de simulación a 0.01 s y corran la simulación. **Observen el voltaje de salida deseado junto con la salida controlada del circuito.** Ajusten \mathbf{Q} y \mathbf{R} hasta lograr que la salida se establezca en el valor deseado antes de los 0.003 s. Puede observarse un poco de *overshoot* o ninguno.

Tercera Parte: Sistema físico e implementación del controlador con la Tiva C

Armarán el sistema físico y observarán la salida tanto en lazo abierto como en lazo cerrado. Los componentes son los siguientes. Todo está disponible en el lab, salvo la resistencia *shunt*.

- Resistores, capacitor, inductor y transistores BJT indicados en la Figura 2. La resistencia *shunt* debe ser pequeña. De 1 Ω estaría bien.
- MOSFET: IRF1407 o IRF540.
- Diodo de uso general: 1N4001 o 1N4007.
- Tanto v_s (3.3 V) como el voltaje V3 (5 V) los obtendrán de la fuente de voltaje, NO de la Tiva C. Noten que v_s y la Tiva C deben tener tierra común (respecto a esa tierra se medirán las señales en el osciloscopio). **Sin embargo, como vieron en la simulación, V3 NO tiene la misma tierra. La terminal negativa de esa fuente se conecta al *source* del MOSFET.**

En Canvas pueden encontrar el programa de prueba **pwm_timer_adc.c** para la Tiva C, que muestra cómo configurar y usar un módulo de PWM en la Tiva C.

1. Corran el programa de prueba del PWM. Todavía no conecten el puerto de la Tiva C al circuito. Observen la señal en el osciloscopio. Prueben cambiar el ciclo de trabajo con el *debugger* o por medio de un potenciómetro conectado como divisor de voltaje. Noten que la frecuencia del pulso debería ser de por lo menos 10 kHz (5 a 10 veces la frecuencia de muestreo que usen en el programa que implemente el controlador).
2. Conecten la señal del PWM del programa de prueba al circuito en lazo abierto (se conecta a la resistencia de 470 Ω). Ajusten el ciclo de trabajo a valores bajos, medios y altos. **Observen la salida del circuito junto con la señal del PWM en el osciloscopio.** Notarán que la salida es 0 V para un ciclo de trabajo de aproximadamente 15%. Ciclos menores dan una salida un poco menor a cero. Encuentren el valor exacto para su sistema.
3. Creen un nuevo proyecto para la Tiva C a partir del programa de ejemplo anterior. Implementen el controlador. Noten que deberán configurar más de un canal ADC, ya que necesitarán muestrear voltajes para las variables de estado.

Ayuda 1: El valor de ciclo de trabajo para el cual la salida es 0 V que encontraron en el inciso anterior deberá usarse como cota inferior de la variable de control. La cota superior es 1 (100%). Pueden usar una cota ligeramente inferior (ej. 0.98).

Ayuda 2: conecten la resistencia *shunt* en serie con el inductor, pero a la derecha. Es decir, estará entre el inductor y el nodo del voltaje de salida (que es el mismo que el voltaje del capacitor). Al conectarlo de esta forma, únicamente necesitarán dos canales ADC para medir las variables de estado: una en la salida y otra en el nodo entre el inductor y la resistencia *shunt*.

4. Armen el sistema en lazo cerrado.
5. Prueben el controlador diseñado con LQR. **Observen la salida del circuito junto con la señal del PWM en el osciloscopio.**
6. Finalmente, **presten atención a las indicaciones del instructor** sobre variaciones que pueden hacer a las condiciones del circuito. Esto, para ver el comportamiento si se tiene el controlador y si no se tiene. La idea es que el controlador regule el voltaje, es decir, lo mantenga prácticamente constante aunque cambien un poco condiciones como v_s y la carga del circuito. **Deberán mostrar algunos casos solicitados.**

Evaluación:

Como se mencionó anteriormente, para este laboratorio no deberán entregar un reporte escrito. Tampoco necesitan entregar sus programas. Únicamente deberán asistir a las sesiones de trabajo y **demostrar al instructor los resultados obtenidos.**

Asistencia y trabajo durante la sesión:	40%
Demostraciones:	60%