

Uso de Herramientas de Simulación Electrónica como Apoyo Docente en Electrónica de Potencia

Roberto Prieto, Jesús A. Oliver and Pedro Alou

Centro de Electrónica Industrial
Universidad Politécnica de Madrid

Resumen. El objetivo de este trabajo es el mostrar cómo las herramientas de simulación electrónica pueden apoyar didácticamente al profesor en la enseñanza de asignaturas relacionadas con la electrónica de potencia. Se va a presentar un ejemplo guiado de uso de este tipo de herramientas en para el diseño del circuito de control de un convertidor CC/CC para una aplicación de alimentación dual en el entorno del automóvil.

Para diseñar el circuito de control es necesario determinar en primer lugar la respuesta en frecuencia del convertidor. Se va a hacer uso del programa Simplorer con la biblioteca SMPS Library como herramienta de simulación para este ejemplo. Existen modelos en dicha biblioteca que permiten obtener la respuesta en frecuencia del circuito de forma directa.

Este artículo explica los pasos que deben seguirse para diseñar el circuito de control de un convertidor Buck multi-fase usando tanto modelos promediados como modelos conmutados.

I. REQUERIMIENTOS Y SELECCIÓN DE LA TOPOLOGÍA

Hace algunos años, se planteaba el uso de nuevas baterías de 42 V para los automóviles de nueva generación. Esta decisión hacía conveniente el uso de dos baterías (la nueva de 42V y la Antigua de 12V) y por ello la necesidad de emplear convertidores bidireccionales que permitiesen transferir energía de una batería a la otra. La topología seleccionada en este ejemplo para dicha aplicación ha sido un Buck multi-fase con rectificación síncrona.

Se usarán las siguientes especificaciones:

- Tensión de entrada: $V_g = 42 \text{ V}$

- Tensión de salida: $V_0 = 12 \text{ V}$

- Condensador del filtro de salida:

$$C_0 = 75 \cdot \mu\text{F}, Re_{sr} = 0.025\Omega \quad \text{Bobina del filtro de salida:}$$

$$L = 3.3 \cdot \mu\text{H}, R_w = 0.003\Omega$$

- Potencia de salida:

$$Power = 600 \text{ W}$$

- Frecuencia de conmutación:

$$F_s = 100 \cdot 10^3 \text{ Hz} \Rightarrow T_s = 10 \mu\text{s}$$

Especificaciones dinámicas:

- Frecuencia de corte: $f_c = 20 \text{ kHz}$

- Margen de fase: 45

Se ha seleccionado un convertidor Buck para reducir la tensión. Se ha seleccionado una topología multi-fase (ser figura 2) porque mediante ella es posible cancelar el rizado de corriente entre fases.

En este ejemplo se han seleccionado tres convertidores ya que con ellos se produce una teórica cancelación total de rizados (ver figura 1).

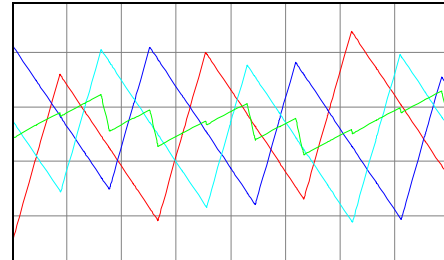


Figura 1 Cancelación de rizados en la topología multi-fase

Los pasos que deben seguirse para diseñar el convertidor son los siguientes:

1. Verificar la funcionalidad del convertidor en lazo abierto usando modelos conmutados de los convertidores.
2. Diseñar el regulador usando modelos promediados de los convertidores.
3. Verificar la funcionalidad del convertidor en lazo cerrado.

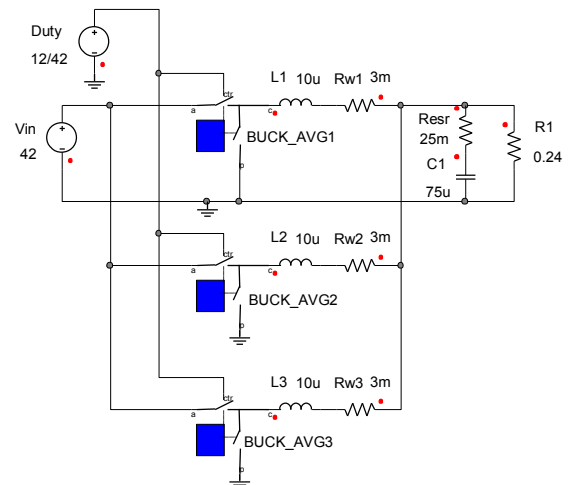


Figura 2 Esquema del convertidor Buck multi-fase

II. VERIFICACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DEL CONVERTIDOR EN LAZO ABIERTO

El primer paso es verificar que la topología seleccionada cumple con las especificaciones. Esto puede realizarse mediante una simulación transitoria de la topología usando modelos conmutados del convertidor. Esta simulación muestra el rizado de la tensión de salida y permite una verificación de las características estáticas.

Los parámetros necesarios para el uso de un modelo conmutado empleando la biblioteca SMPS son:

- F_s : frecuencia de conmutación del convertidor.
- L : bobina del convertidor.

- L_IC: valor inicial de la corriente por la bobina.
- Diode_CH: características del diodo del convertidor.
- Rsa: Resistencia de conducción del interruptor superior.
- Phase_DEG: retraso de fase, empleado para desfasar los convertidores multi-fase.



El modelo del convertidor se encuentra en la biblioteca, por lo que no es necesario describir la topología. Su uso es muy sencillo:



El análisis transitorio se realiza de la siguiente manera:

- Se crea un esquemático empleando el modelo conmutado del convertidor tal como muestra la figura 3. Basta con arrastrar los elementos de la biblioteca sobre el esquemático y conectarlos. El modelo del convertidor ya incluye la bobina.
- Se asignan los parámetros de los diodos usando una función exponencial.
- Se selecciona el modelo de simulación transitoria.
- Se seleccionan elementos de la biblioteca para visualizar las formas de onda.
- Se representan las formas de onda deseadas como muestran las figuras 4 y 5.

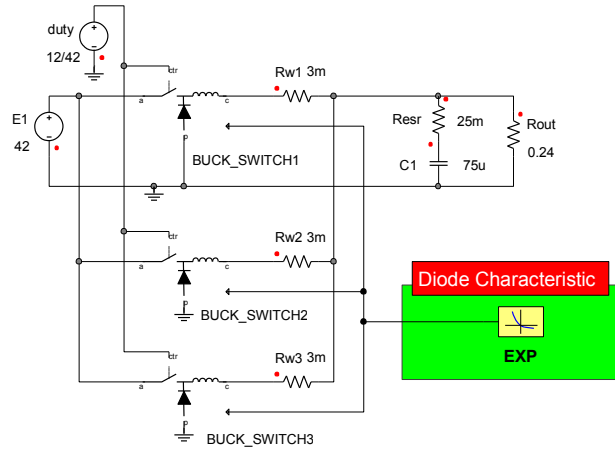


Figura 3 Esquemático del convertidor usando modelos conmutados.

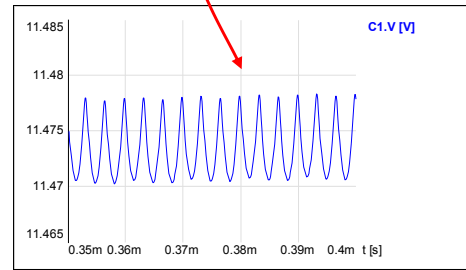
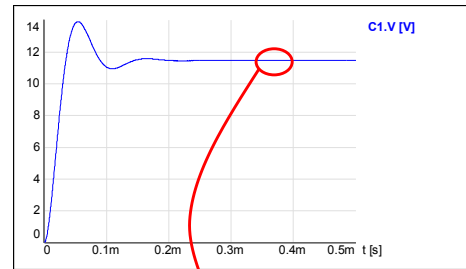


Figura 4 Rizado de la tensión de salida.

Los resultados mostrados en la figura 4 permiten verificar si el convertidor cumple con las especificaciones de rizado de tensión de salida o si fuese necesario modificar el valor del filtro de salida.

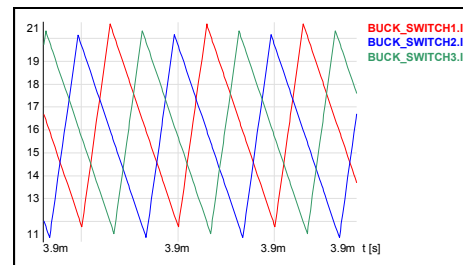


Figura 5 Corriente por las bobinas.

III. OBTENIENDO LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL CONVERTIDOR

Los modelos promediados que están implementados en la biblioteca SMPS son válidos para análisis AC, DC y transitorio. El análisis AC es muy útil para el diseño del lazo de control del convertidor.

Los parámetros que es necesario introducir en el modelo promediado de convertidor Buck síncrono son:

- Rsp: Resistencia de conducción del interruptor del lado de baja tensión.
- Rsa: Resistencia de conducción del interruptor del lado de alta tensión.



El modelo promediado del convertidor buck síncrono se encuentra entre los modelos promediados de la biblioteca como muestra la siguiente captura:



El análisis AC se realiza de la siguiente manera:

- Se crea un esquemático con el modelo promediado del convertidor como muestra la figura 6. Se arrastra y se sueltan el resto de componentes sobre el esquemático y se añade también la bobina del convertidor porque en este caso no está incluida en el modelo.
- Se asigna el valor de tensión de entrada AC a 0 y se asigna el valor AC del ciclo de trabajo a 1. Esto hace que el ciclo de trabajo sea la fuente en la simulación AC.
- Se selecciona el modo de simulación AC.
- Se selecciona un “Bode plot” de la biblioteca “Displays”.
- Se simula la respuesta en frecuencia de la tensión de salida frente al ciclo de trabajo como muestra la figura 7.

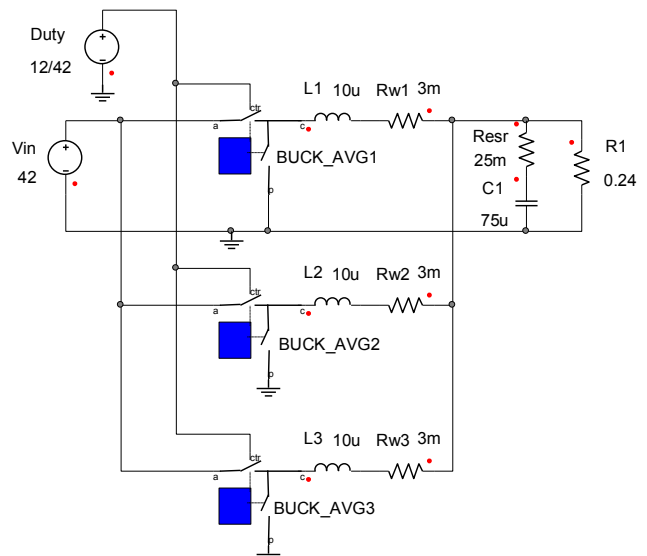


Figura 6 Esquemático del convertidor Buck síncrono multi-fase sin control.

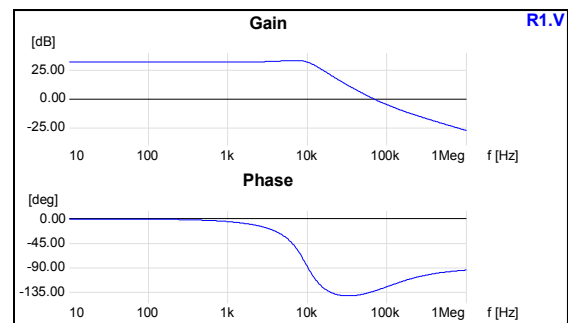


Figura 7 Respuesta en frecuencia del convertidor multi-fase

IV. DISEÑO DEL REGULADOR

De la respuesta en frecuencia de la tensión de salida frente al ciclo de trabajo es posible calcular el regulador que cumple con las especificaciones dinámicas.

Considerando las siguientes especificaciones:

- Frecuencia de corte: $f_c = 20 \text{ kHz}$
- Margen de fase: 45

Del diagrama de bode es fácil obtener la ganancia y la fase del convertidor a la frecuencia de corte (ver figura 7):

Ganancia = 13 dB

Fase = -80 deg

Por lo tanto, la ganancia y la fase del controlador necesario para cumplir las especificaciones son:

$H_{\text{gain}} = -13 \text{ db}$

$H_{\text{phase}} = -180 + \text{PM} + 80 = -55 \text{ deg}$

Los parámetros del controlador se pueden calcular como se muestra en el apéndice.

V. VERIFICACIÓN DEL DISEÑO DEL REGULADOR EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Para verificar el diseño es necesario obtener la respuesta en frecuencia del convertidor con el regulador incluido. Esto se realiza de la siguiente manera:

- Se incluye el regulador en el esquemático anterior con el modelo promediado tal como muestra la figura 8. Se arrastra y se suelta el símbolo del regulador PID de la biblioteca SMPS, que se encuentra en el apartado controladores tal como muestra la siguiente captura.

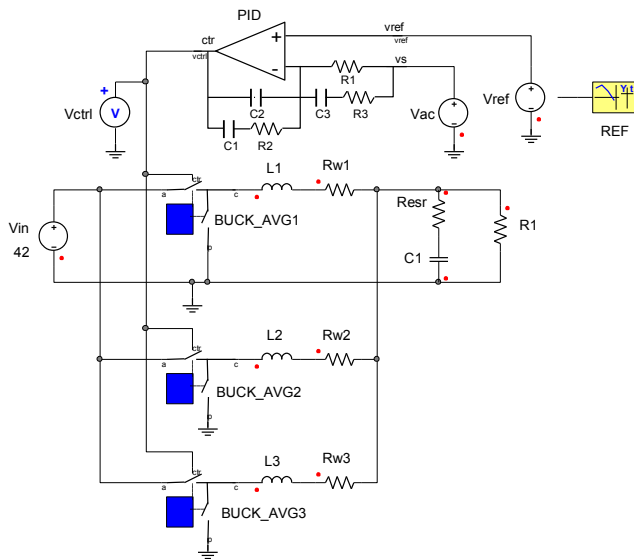


Figura 8 Esquemático del convertidor con controlador en lazo abierto

- Se introducen los valores de los condensadores y resistencias del regulador.
- Se asigna el valor del parámetro AC de la tensión de entrada a 0 y el valor AC del ciclo de trabajo a 1. Esto hace que de nuevo la fuente AC de la simulación sea el ciclo de trabajo.
- Se selecciona el modo de simulación AC.
- Se selecciona un "Bode plot" de la biblioteca "Displays".
- Representa la respuesta en frecuencia de la tensión de salida frente al ciclo de trabajo Vac (curva azul de la figura 9). Esta es la respuesta en frecuencia del convertidor controlado en lazo abierto.
- Representa la respuesta en frecuencia de la tensión de salida frente a la tensión del voltímetro Vctrl (curva verde de la figura 9). Esta es la respuesta en frecuencia del convertidor sin control.
- Representa la respuesta en frecuencia de la tensión del voltímetro Vctrl frente al ciclo de trabajo Vac (curva roja

de la figura 9). Esta es la respuesta en frecuencia del regulador.

- Verifica que el regulador cumple con las especificaciones de frecuencia de corte y margen de fase.

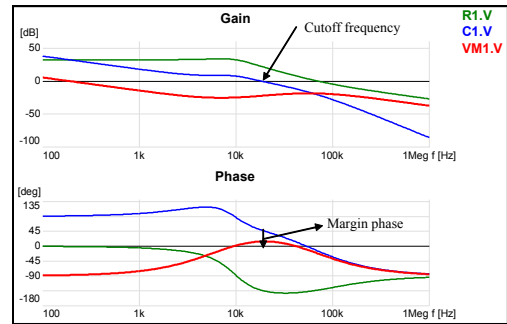


Figura 9 Respuesta en frecuencia del convertidor

VI. VERIFICACIÓN DEL DISEÑO DEL REGULADOR EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

El último paso en el diseño del convertidor consiste en correr una simulación del convertidor con su regulador verificando que el sistema cumple todas las especificaciones. Las simulaciones se van a realizar empleando tanto los modelos promediados como los conmutados.

La simulación empleando los modelos promediados se realizará de la siguiente manera:

- Se reconecta el circuito tal como muestra la figura 10.
- Se ha usado una carga variable para verificar el funcionamiento del regulador. Se puede crear empleando una onda trapezoidal.
- El valor de referencia debe ser el valor deseado para la tensión de salida. Se puede ajustar el valor de la referencia empleando una "2D look-up table". Esta "look-up table" ayuda también a definir el arranque suave del convertidor.

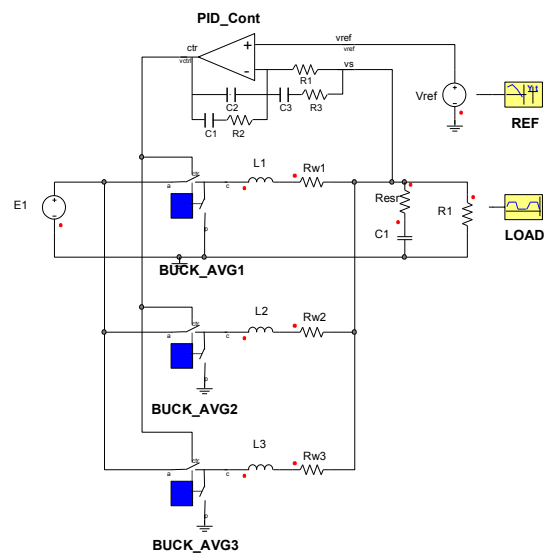


Figura 10 Modelo promediado del convertidor Buck multi-fase

Es recomendable correr primero simulaciones con el modelo promediado ya que son más rápidas y permiten detectar cualquier problema de una manera mas eficiente.

- Se selecciona el modo de simulación transitoria.
- Se representa la tensión de salida tal como se ve en la figura 11.
- Cuando el tiempo de simulación alcanza el punto de funcionamiento, se aplica un escalón de carga para verificar si el regulador actúa ante escalones de carga.

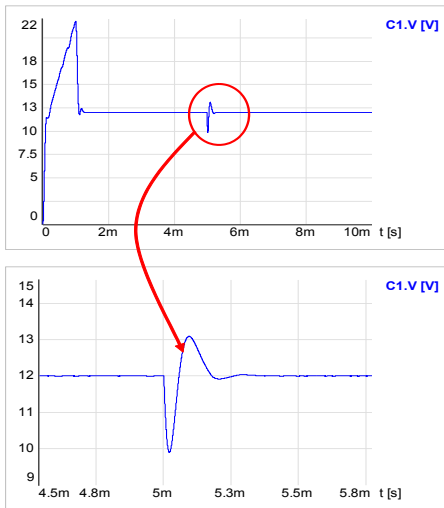


Figura 11 Tensión de salida ante un escalón de carga. Simulación con modelos promediados.

Las simulaciones del convertidor empleando modelos conmutados se realiza de la siguiente manera:

- Realizar el esquemático mostrado en la figura 12.

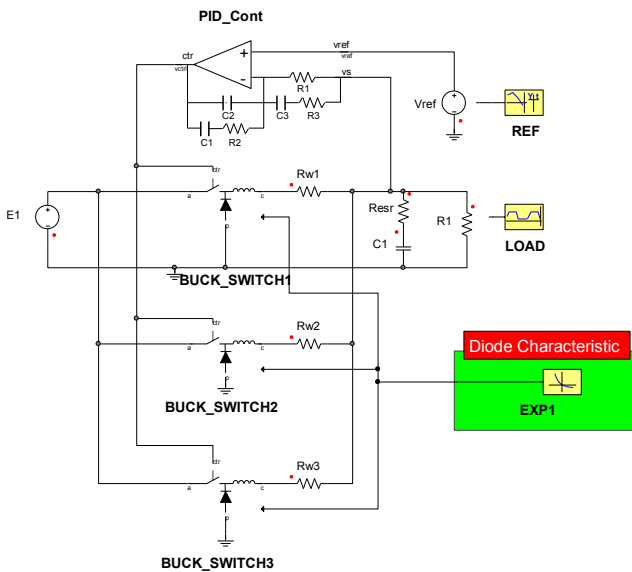


Figura 12 Modelo conmutado del convertidor Buck multi-fase

- Se ha usado una carga variable para verificar el funcionamiento del regulador. Se puede crear empleando una onda trapezoidal.
- Se elige el tipo adecuado de regulador (Regulador PID en este caso) y se definen los valores del regulador.
- El valor de referencia debe ser el valor deseado para la tensión de salida. Se puede ajustar el valor de la referencia empleando una “2D look-up table”.

Una vez que se ha probado que el convertidor cumple con

todas las especificaciones bajo condiciones de carga variable, es muy útil similar el convertidor con el regulador empleando un modelo conmutado:

- Se selecciona el modo de simulación transitorio.
- Se representa la tensión de salida tal como muestra la figura 13.
- Se representa la corriente por las bobinas de salida tal como muestra la figura 14.
- Cuando la simulación alcanza 5 ms, se aplica un escalón de carga al convertidor.

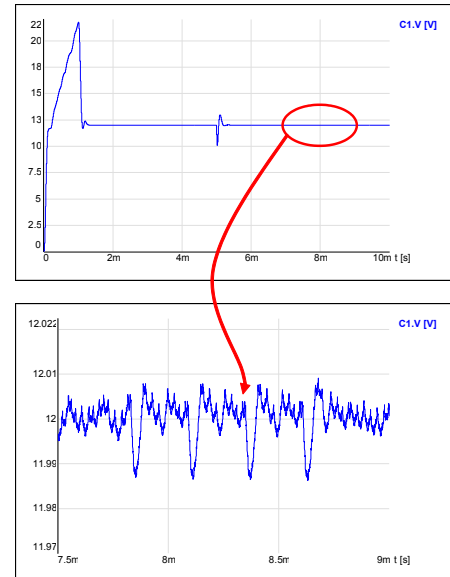


Figura 13 Tensión de salida con escalón de carga. Simulación con modelos conmutados.

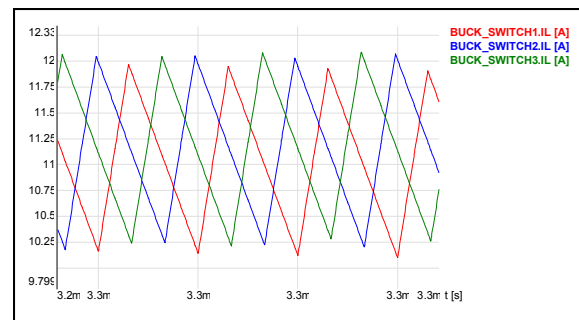


Figura 14 Corrientes por las bobinas de los convertidores

VII. CONCLUSIONES

Este ejemplo muestra cómo el uso de las herramientas de simulación pueden ser un gran apoyo para la creación de material didáctico que permita hacer entender a los estudiantes el diseño de determinadas conceptos de la electrónica de potencia. En este ejemplo se ha mostrado el proceso completo de diseño de un convertidor y de su controlador. Se han cubierto los siguientes objetivos:

- Verificar la funcionalidad del convertidor en lazo abierto empleando modelos conmutados de los convertidores.
- Diseñar el regulador empleando modelos promediados.

- Probar el diseño del regulador y el convertidor empleando tanto los modelos conmutados como los promediados.

Las ventajas del uso de modelos promediados son:

- Permiten obtener funciones de transferencia del convertidor y el regulador.
- Proporcionan simulaciones en menor tiempo, lo que les hace atractivos para la simulación de sistemas complejos

VIII. ANEXO (DISEÑO DEL REGULADOR)

Parámetros de diseño del regulador:

- Frecuencia de corte: $f_c = 20$ kHz
- Margen de fase: 45
- $R_1 = 100$ k Ω

Ganancia y fase del convertidor a la frecuencia de corte (obtenidos de la simulación):

$$\text{ph_cell} = \text{ph}G_{iC}(f_c) = -80.804$$

$$\text{gain_cell} = \text{mod } G_{iC}(f_c) = -12.915$$

Cálculo de la fase para el margen de fase deseado:

$$\text{phase_reg} = (\text{Phase_Margin} - \text{ph_cell} - 180) = -54.196$$

Se selecciona un regulador tipo PI:

$$K_{bu} = \tan \left[\frac{\text{phase_reg} \cdot \frac{\pi}{180}}{2} + \frac{\pi}{2} \right] = 1.954$$

Ganancia del regulador a la frecuencia de corte:

$$\text{Gain_Amp} = \left(\frac{1}{\frac{\text{gain_cell}}{10 \cdot 20}} \right) = 4.424$$

Cálculo del condensador C_2 :

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot \text{Gain_Amp} \cdot K_{bu} \cdot R_1} = 9.205 \cdot 10^{-12}$$

Cálculo del condensador C_1 :

$$C_1 = C_2 \cdot (K_{bu}^2 - 1) = 2.595 \cdot 10^{-11}$$

Cálculo de la resistencia R_2 :

$$R_2 = \frac{K_{bu}}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C_1} = 5.992 \cdot 10^5$$

El condensador C_3 y resistencia R_3 son nulas, ya que se usa un regulador PI.

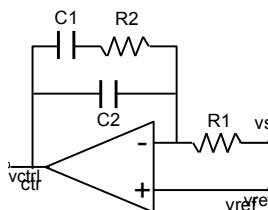


Figura 15 Regulador PI

Cálculo de polos y ceros:

$$\omega_i = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot (C_1 + C_2)} = 45.27 \text{ kHz}$$

$$\omega_{z1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_1} = 10.23 \text{ kHz}$$

$$\omega_{p1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}} = 39.09 \text{ kHz}$$

Función de transferencia del regulador:

$$\text{Reg}(s) = \frac{1 + \frac{s}{\omega_{z1}}}{\frac{s}{\omega_i} \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}} \right)}$$

Función de transferencia en lazo cerrado:

$$T(s) = \text{Reg}(s) \cdot G_{iC}(s)$$