

Clase 5: Modelado AC

Gestión de Energía en CI

Gabriel Gabian

Universidad de Buenos Aires

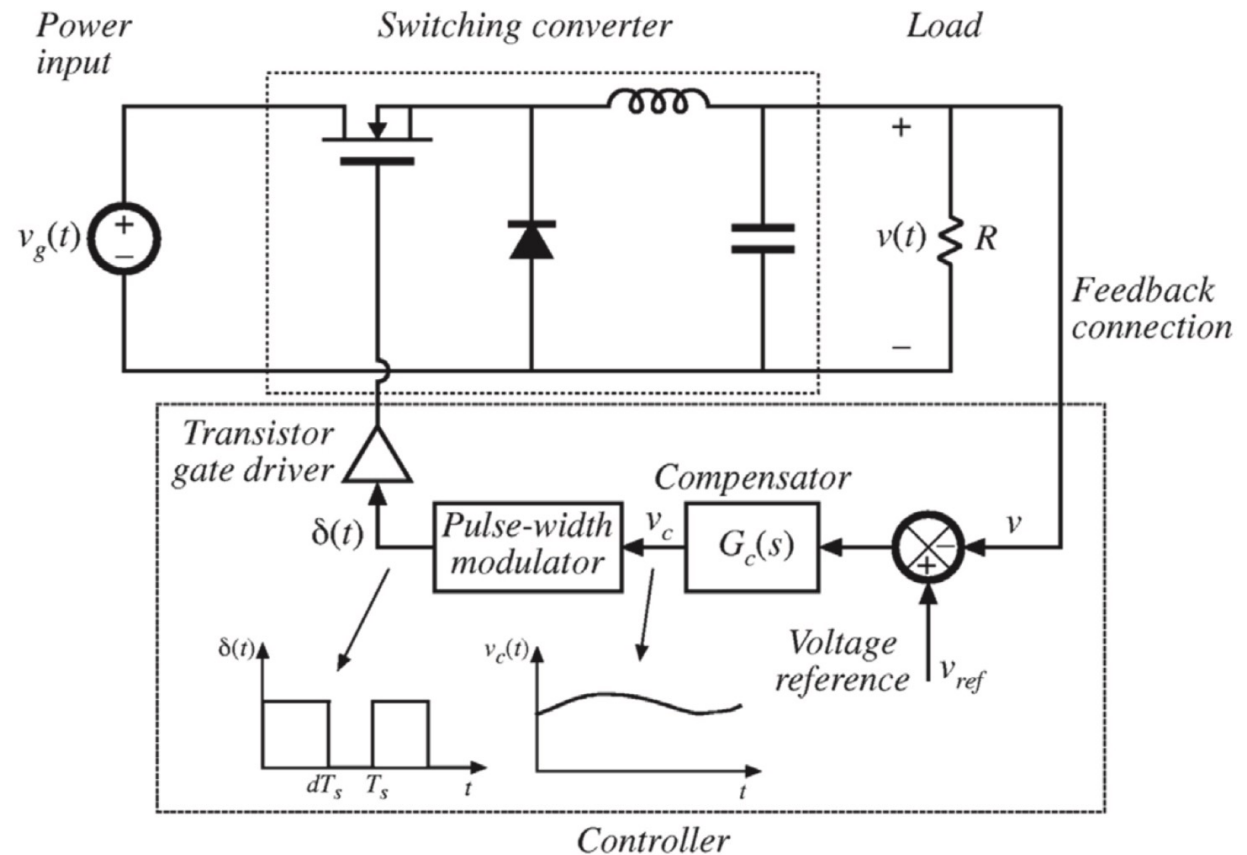
Facultad de Ingeniería

1er Cuatrimestre 2025

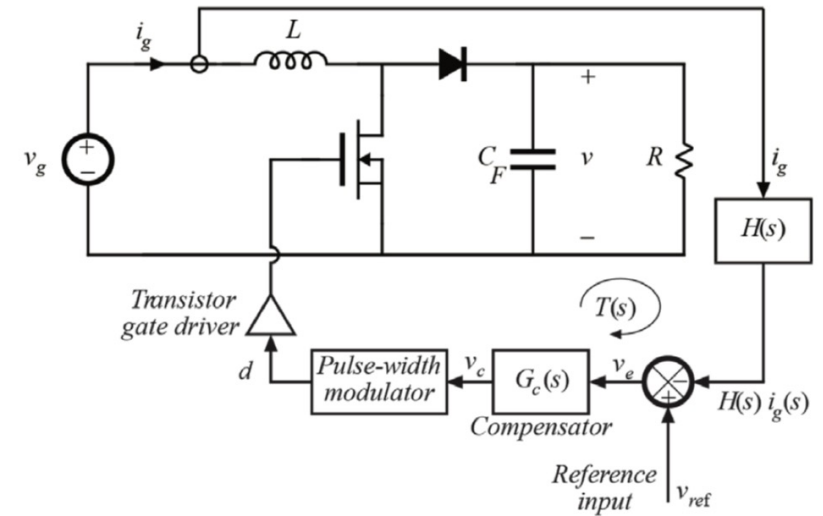
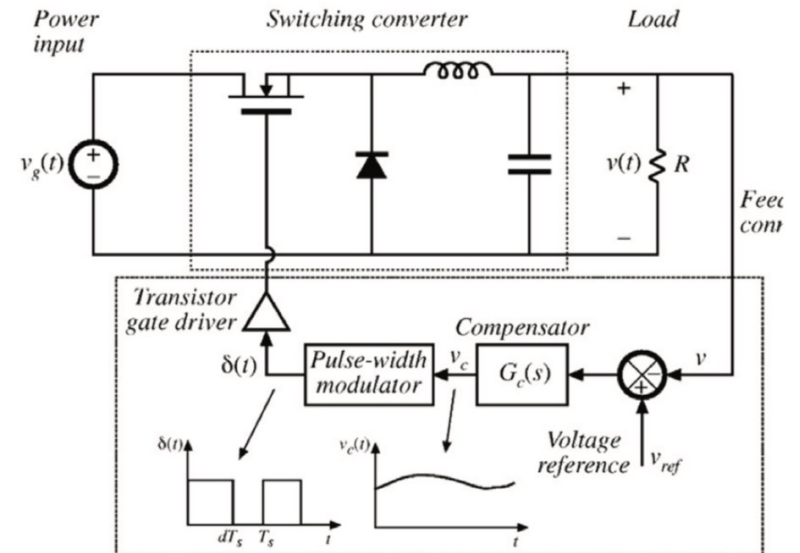


Introducción

- Objetivo: mantener $v(t)$ constante a V
- Perturbaciones:
 - en $v_g(t)$
 - en R
- Incertidumbres
 - En el valor de elementos
 - En $v_g(t)$
 - En R



Entradas y Objetivo de Control



Objetivos

Desarrollar herramientas para el análisis, modelado y diseño de sistemas de control para convertidores de potencia

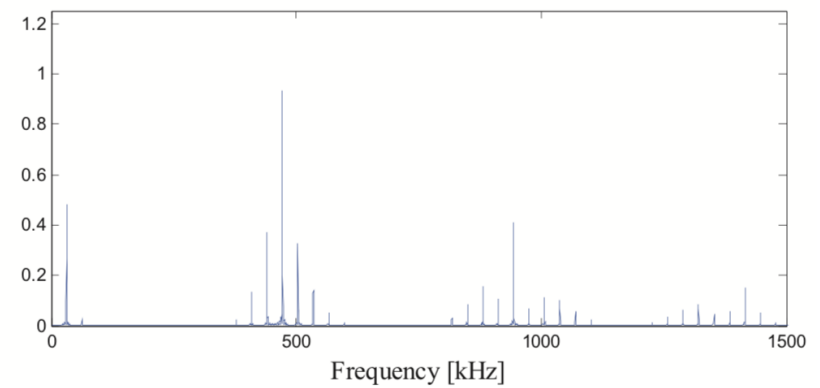
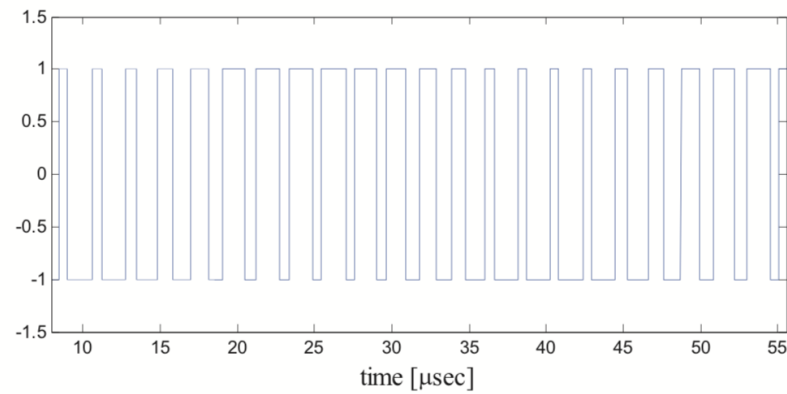
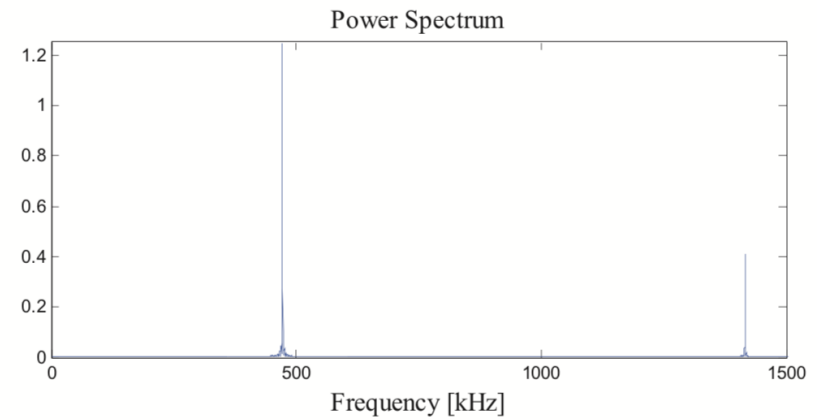
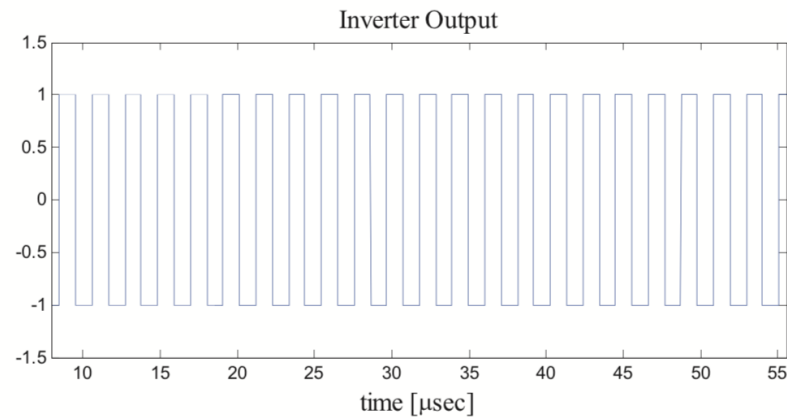
Necesitamos modelo dinámico de convertidores

¿Cómo afectan las perturbaciones en $v_g(t)$, R o $d(t)$ a la tensión de salida?

¿Cuál es la función transferencia de pequeña señal de un convertidor?

- Extender lo visto en Capítulos 3 y 4 (convertidores en equilibrio) para incluir la dinámica de los convertidores (Capítulo 7)
- Construir transferencia de pequeña señal (Capítulo 8)
- Diseñar sistema de control (Capítulo 9)

Espectro PWM



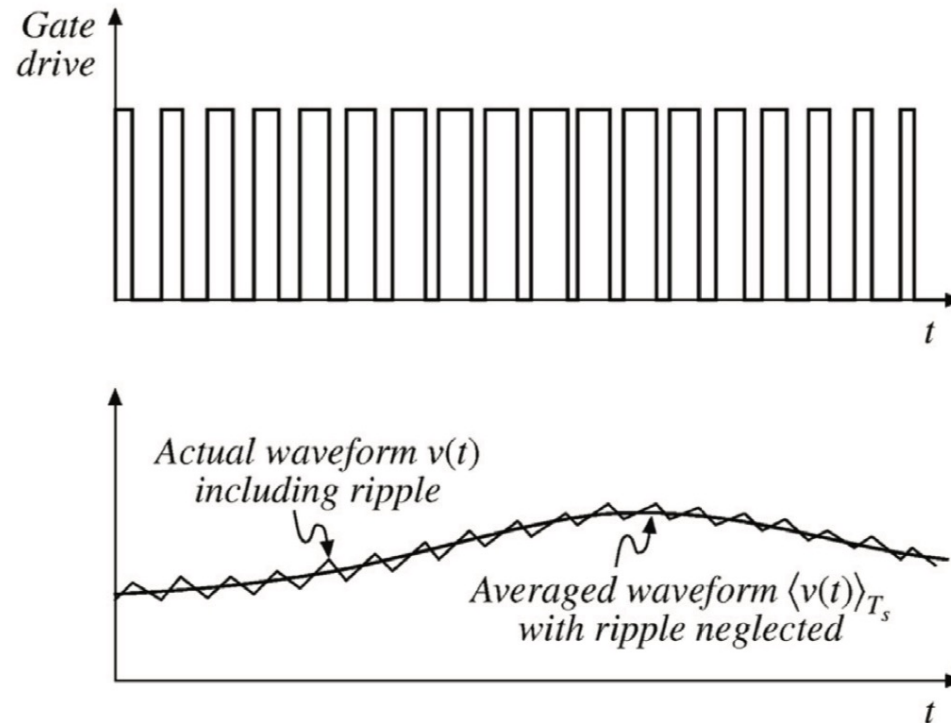
Omitiendo el ripple por conmutación

Supongamos un ciclo de trabajo modulado senoidalmente

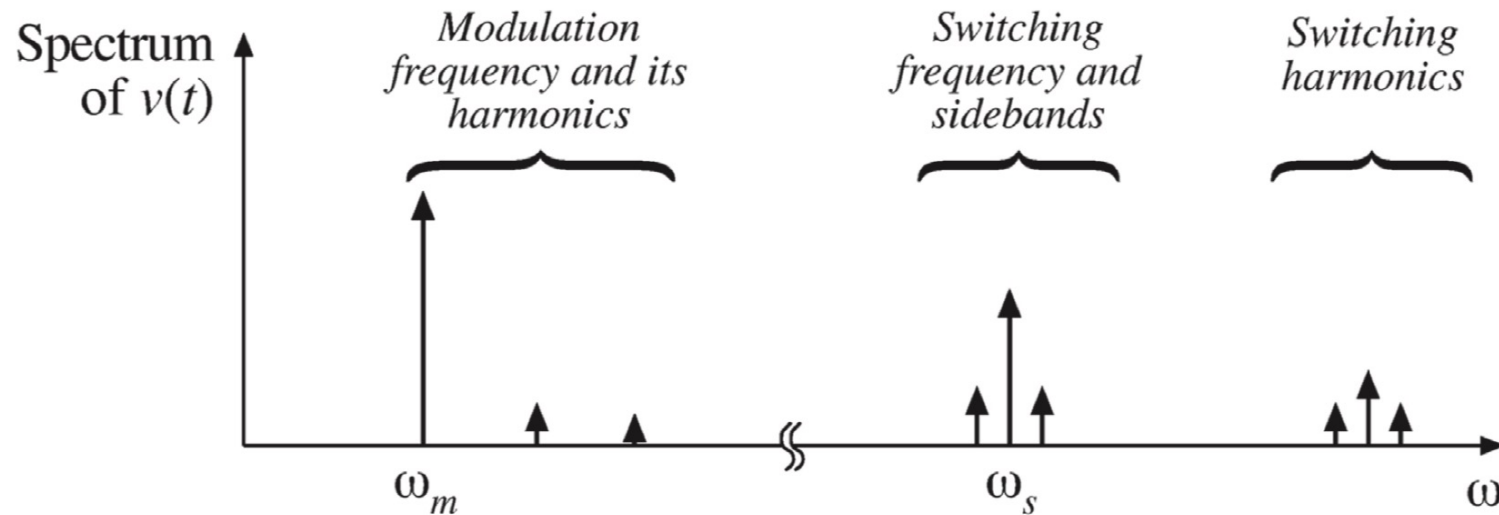
$$d(t) = D + D_m \cos \omega_m t$$

donde D y D_m son constantes, $|D_m| \ll D$, y la frecuencia de modulación ω_m es mucho menor que la frecuencia de conmutación ω_s

Variaciones en señal de gate y tensión de salida del conversor :



Espectro de la Tensión de Salida



Contiene componentes en:

- frecuencia de modulación y sus armónicos
- frecuencia de conmutación y sus armónicos
- bandas laterales de la frecuencia de conmutación

Con ripple pequeño de conmutación, las componentes de alta frecuencia (armónicos y bandas laterales), son despreciables.

Si se omite el ripple, las únicas componentes que prevalecen son de baja frecuencia (modulación y armónicos).

Objetivos de Modelado AC

- Predecir cómo variaciones de baja frecuencia en el ciclo de trabajo producen variaciones en tensiones y corrientes
- Ignorar ripple de conmutación
- Ignorar armónicos y bandas laterales de conmutación

Estrategia:

- Eliminar armónicos de conmutación mediante el promediado de las formas de onda sobre un período de conmutación

Promediado

Promediar sobre un período de conmutación para eliminar ripple de conmutación

$$L \frac{d\langle i_L(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \langle v_L(t) \rangle_{T_s}$$

$$C \frac{d\langle v_C(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \langle i_C(t) \rangle_{T_s}$$

donde

$$\langle x(t) \rangle_{T_s} = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} x(\tau) d\tau$$

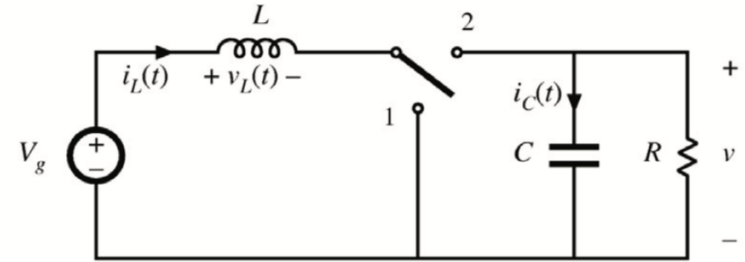
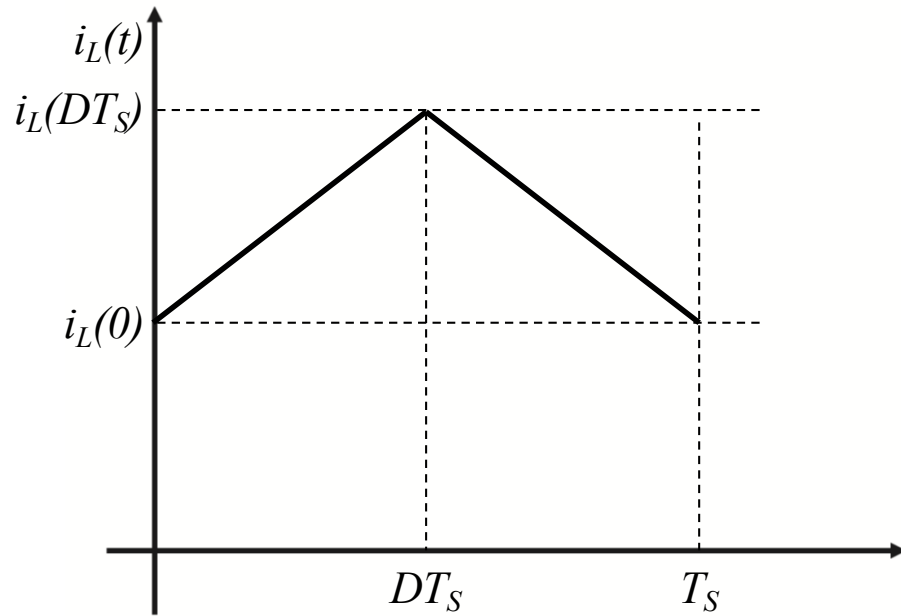
Notar que, en estado estacionario,

$$\langle v_L(t) \rangle_{T_s} = 0$$

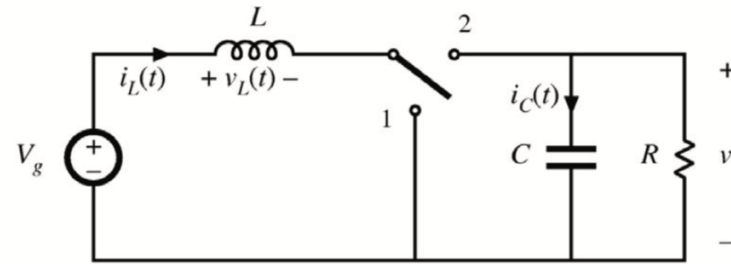
$$\langle i_C(t) \rangle_{T_s} = 0$$

por balance volt-segundo en inductor y balance de carga en el capacitor

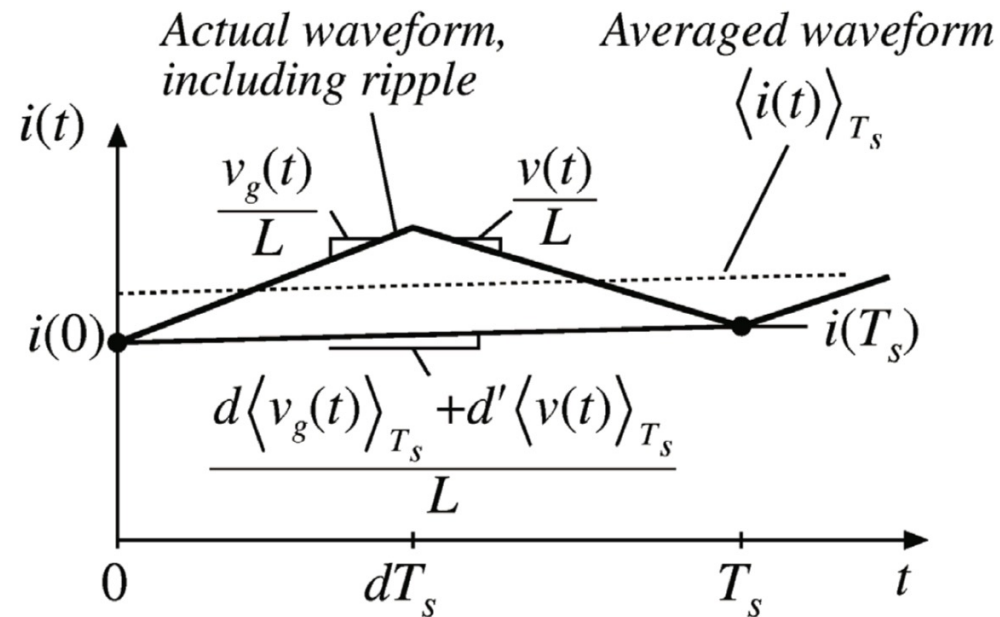
Promediado en Estado Estacionario



Promediado en Estado Transitorio



Promediado: Predicción Correcta



El cambio neto en la corriente del inductor sobre un período de conmutación es igual al período T_s multiplicado por $\langle v_L \rangle_{T_s} / L$.

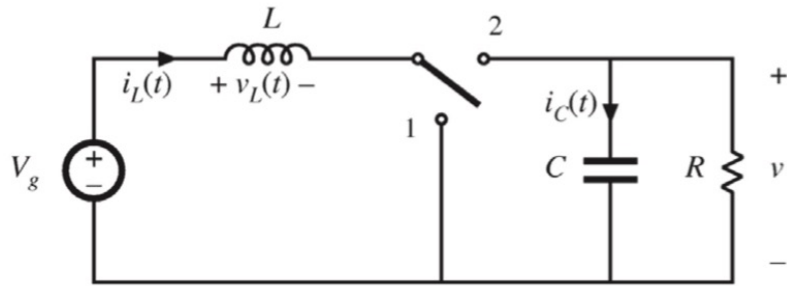
Promediado: Discusión

Modelado de Pequeña Señal: Linearización

(1) Perturbar y Linearizar

(2) Expansión en Series de Taylor de 1^{er} Orden

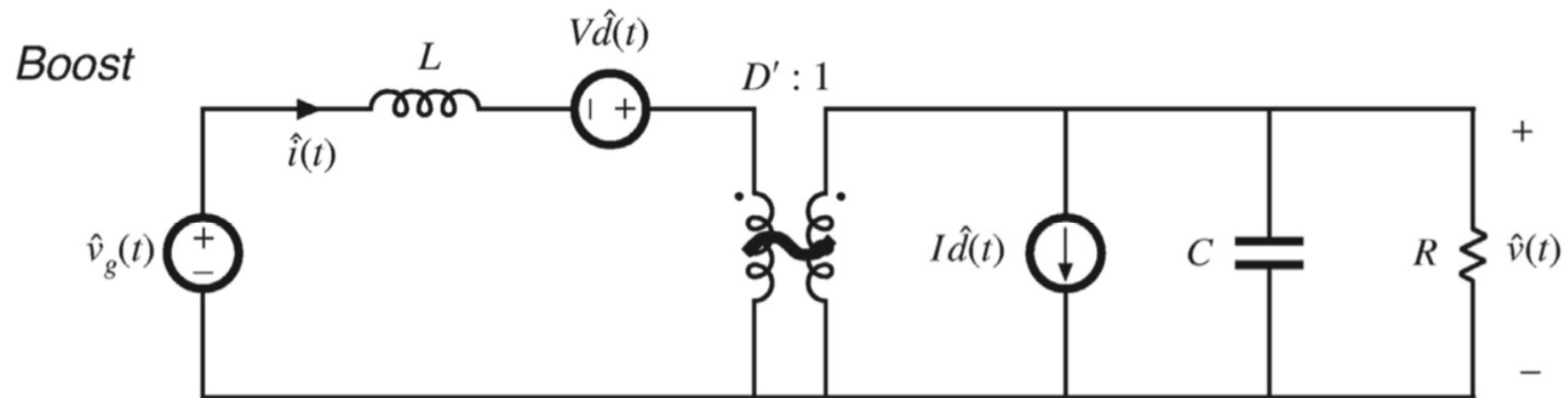
Modelado de Circuito Equivalente: Boost



Linearización

Modelo Circuito Equivalente

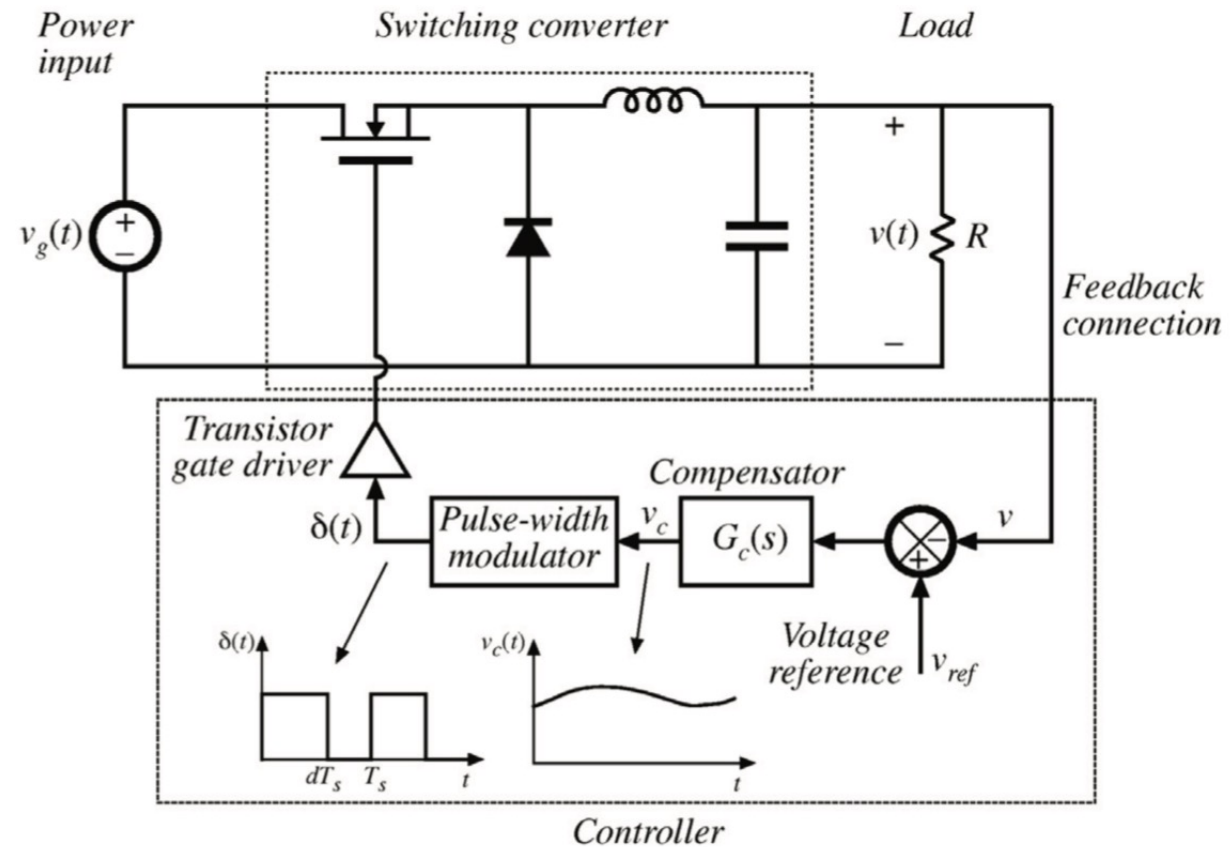
Modelo de Boost Promediado, AC, Lineal



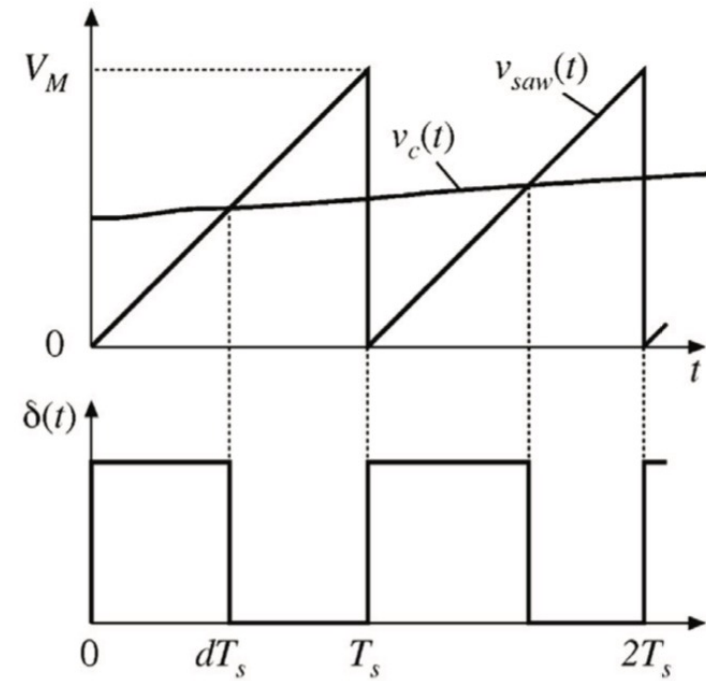
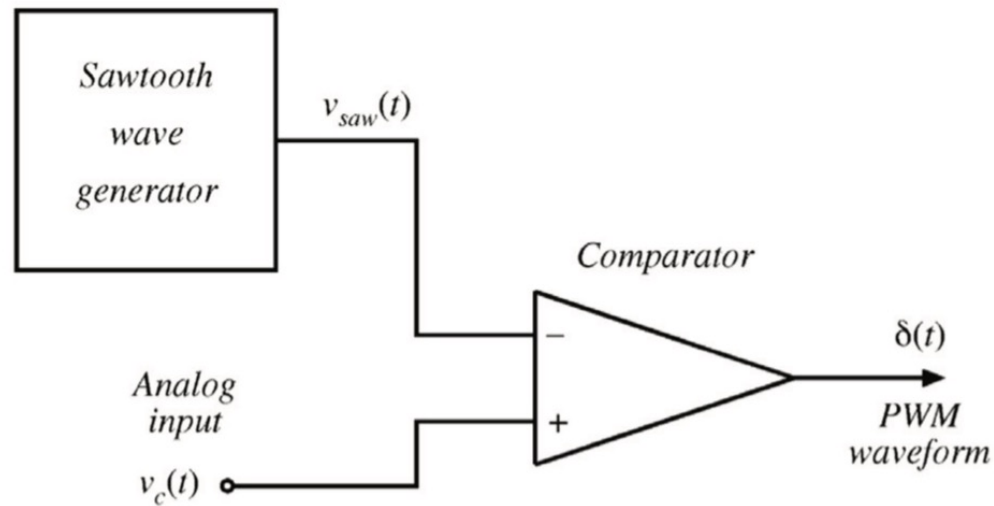
Modelado de PWM

PWM convierte la señal $v_c(t)$ en el ciclo de trabajo $d(t)$.

¿Cuál es la relación entre $v_c(t)$ y $d(t)$?



Modelo Funcional PWM

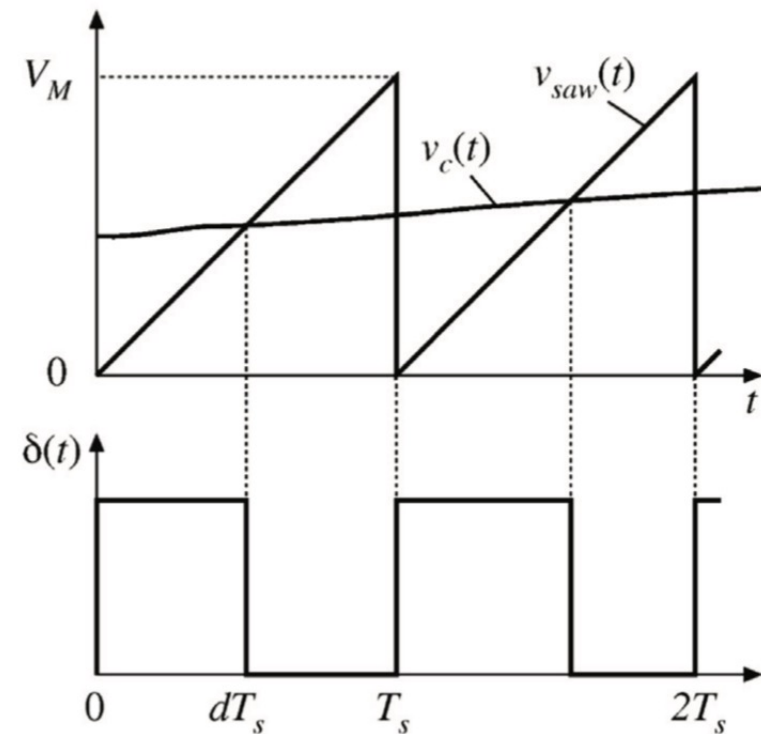


Ecuaciones del Modelo PWM

Para una forma de onda diente de sierra:

$$d(t) = \frac{v_c(t)}{V_M} \quad \text{for } 0 \leq v_c(t) \leq V_M$$

$d(t)$ es una función lineal de $v_c(t)$



Modelo Perturbado de PWM

Ecuación PWM:

$$d(t) = \frac{v_c(t)}{V_M} \quad \text{for } 0 \leq v_c(t) \leq V_M$$

Perturbar:

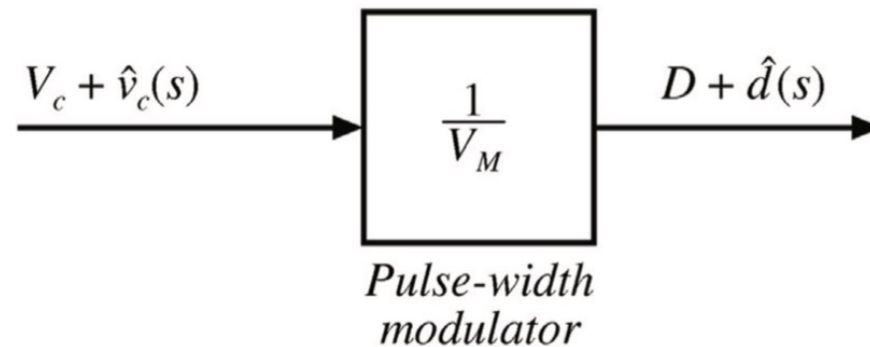
$$v_c(t) = V_c + \hat{v}_c(t)$$

$$d(t) = D + \hat{d}(t)$$

Resultado:

$$D + \hat{d}(t) = \frac{V_c + \hat{v}_c(t)}{V_M}$$

Diagrama en bloque:

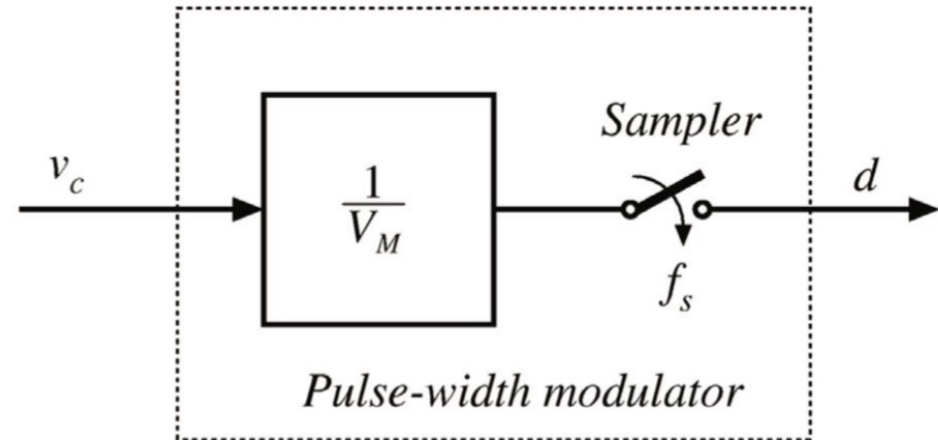


Relaciones AC y DC:

$$D = \frac{V_c}{V_M}$$

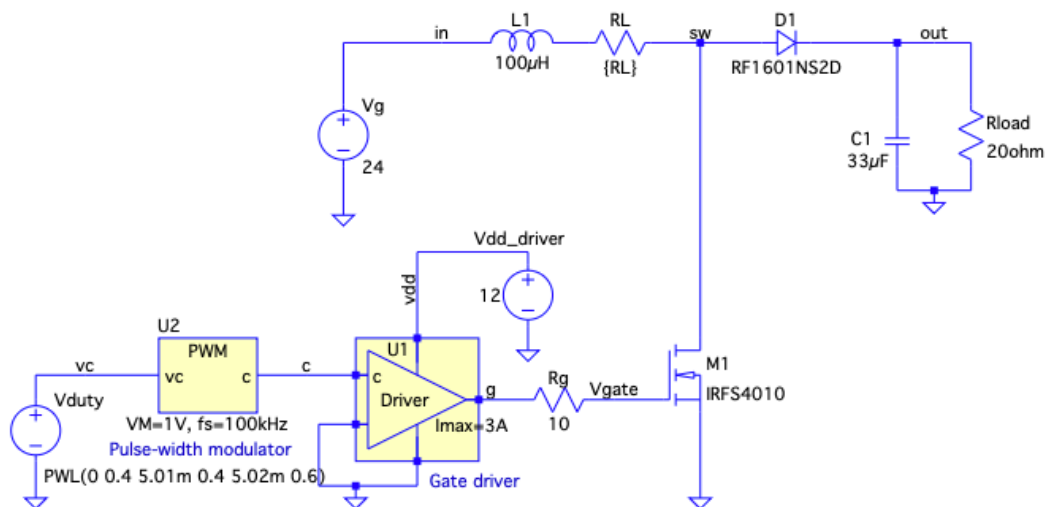
$$\hat{d}(t) = \frac{\hat{v}_c(t)}{V_M}$$

PWM: Muestreo

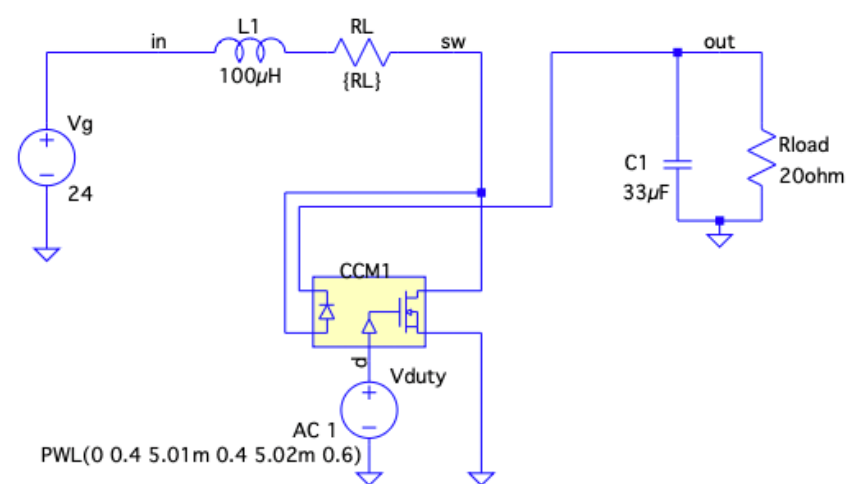


Modelo Circuito Promediado

- Permite estudiar las características del conversor (respuesta en frecuencia, impedancia de salida, etc) manteniendo el circuito original y solo cambiando las llaves
- Permite simular *.tran*, *.dc* y *.ac*
- Funciona tanto en CCM como en DCM
- Se realiza el promedio del circuito y no de ecuaciones

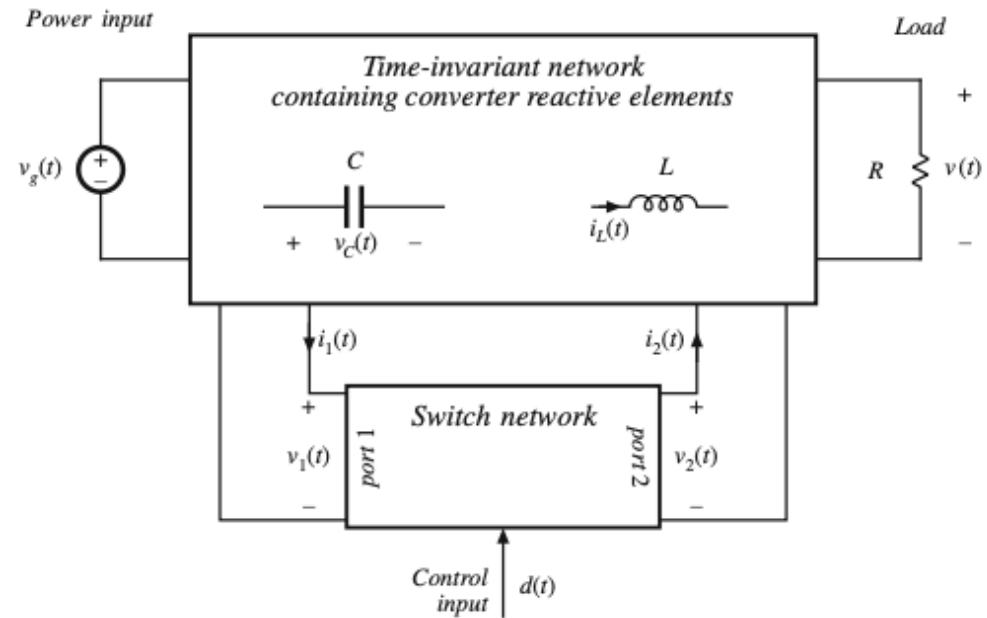


Modelo Conmutado



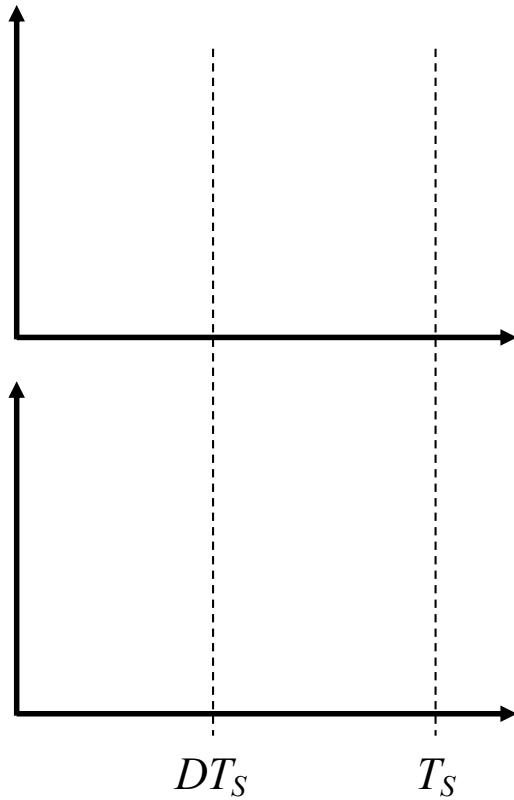
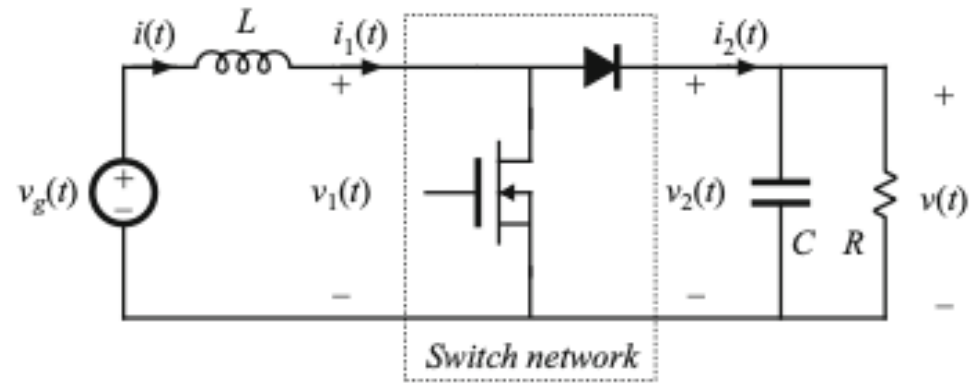
Modelo Promediado

Modelo de Llave Promediado

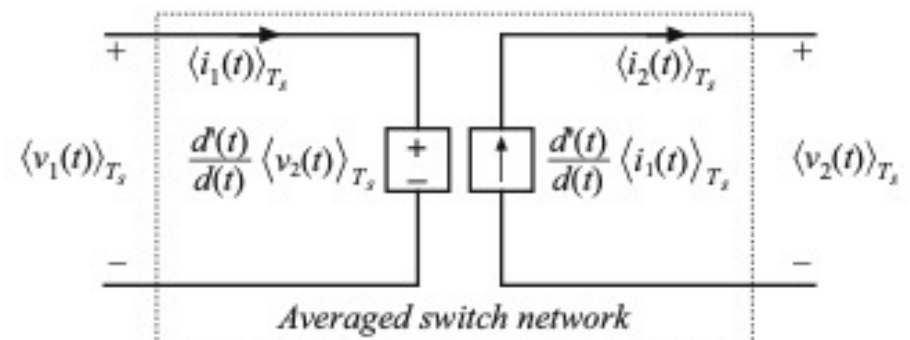
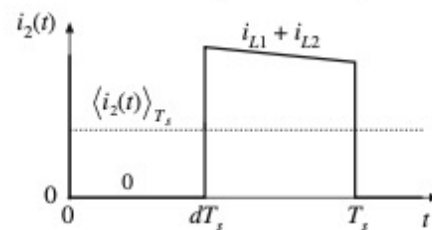
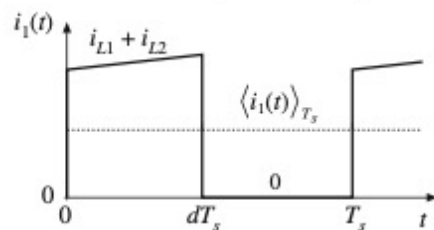
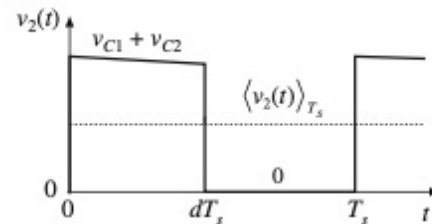
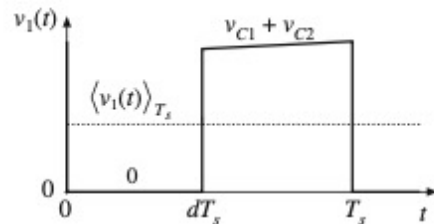
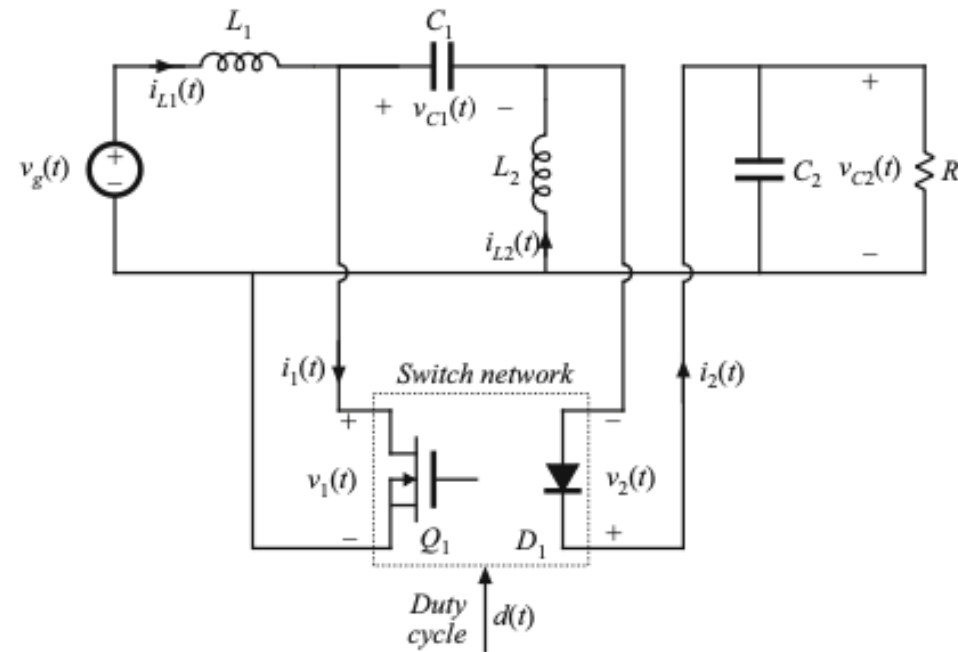


1. Separar la red conmutada (llaves) del resto del circuito
2. Definir los puertos de la llave
3. Promediar las *formas de onda* de los puertos

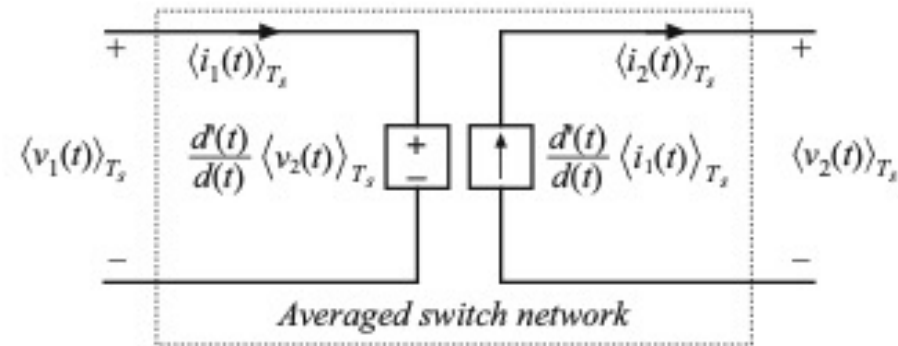
Derivación Llave Promedio - Boost



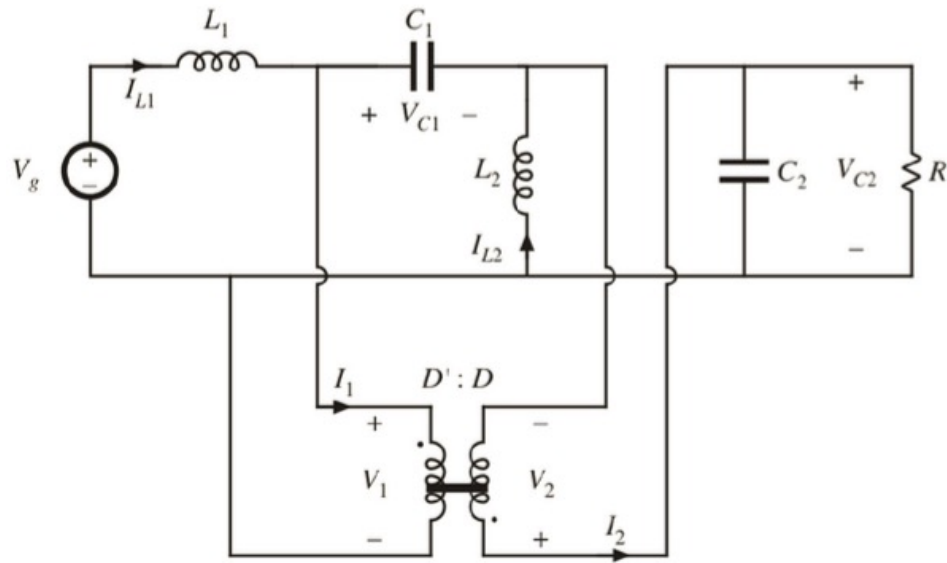
Llave Promediada Genérica



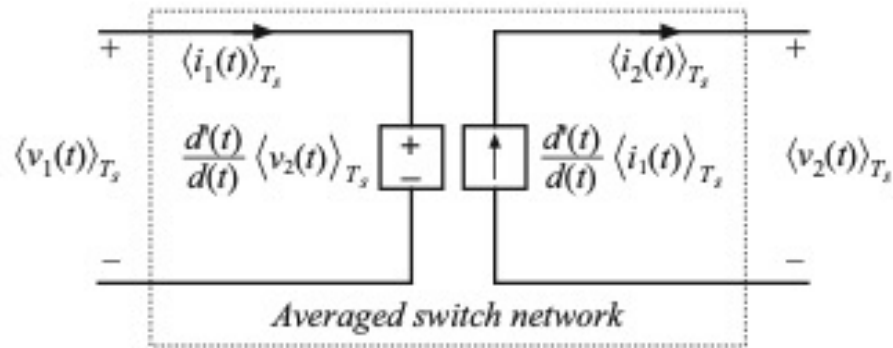
Solución DC Usando Llave Promediada



Solución DC SEPIC



Solución AC Usando Llave Promediada



Perturbar y Linearizar

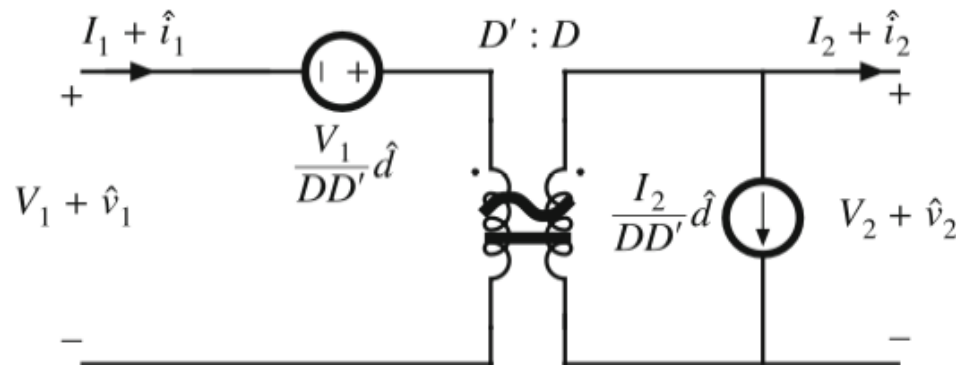
$$d(t) = D + \hat{d}(t)$$

$$\langle v_1(t) \rangle_{T_s} = V_1 + \hat{v}_1(t)$$

$$\langle i_1(t) \rangle_{T_s} = I_1 + \hat{i}_1(t)$$

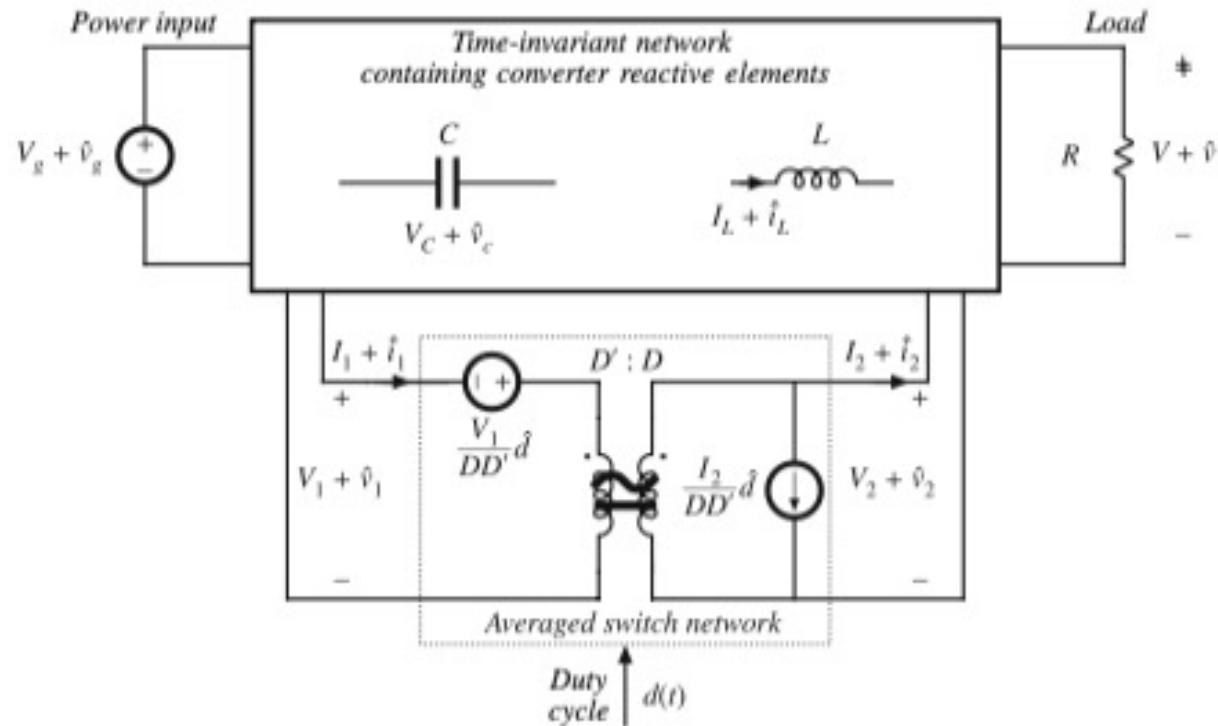
$$\langle v_2(t) \rangle_{T_s} = V_2 + \hat{v}_2(t)$$

$$\langle i_2(t) \rangle_{T_s} = I_2 + \hat{i}_2(t)$$

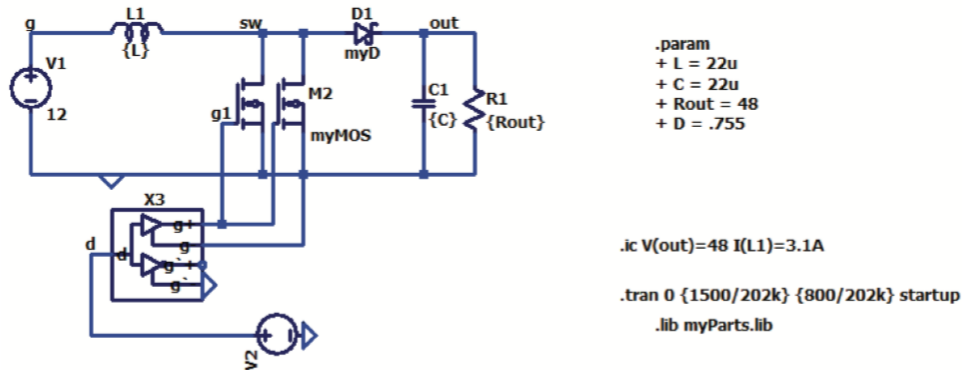


Llave Promediada CCM para DC y AC

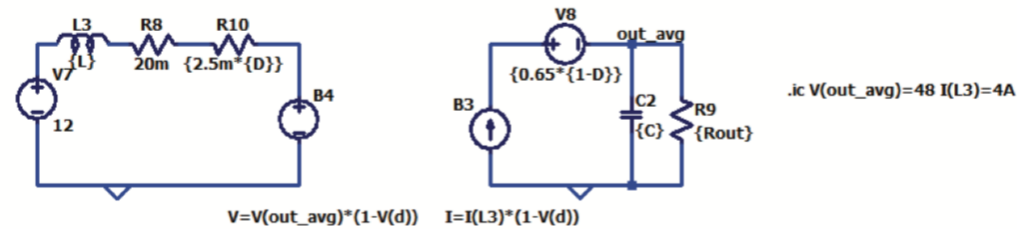
Solución AC Usando Llave Promediada



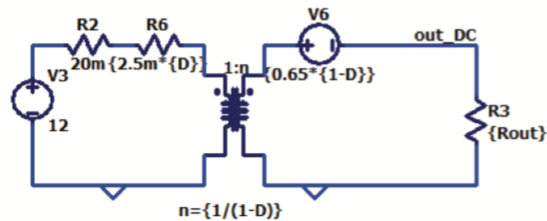
Simulación



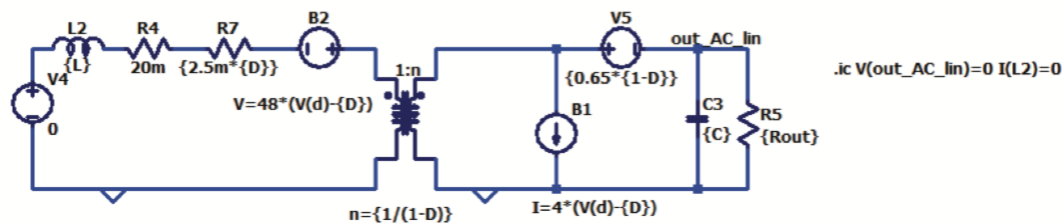
Modelo Completo Conmutado



Promediado, no Lineal

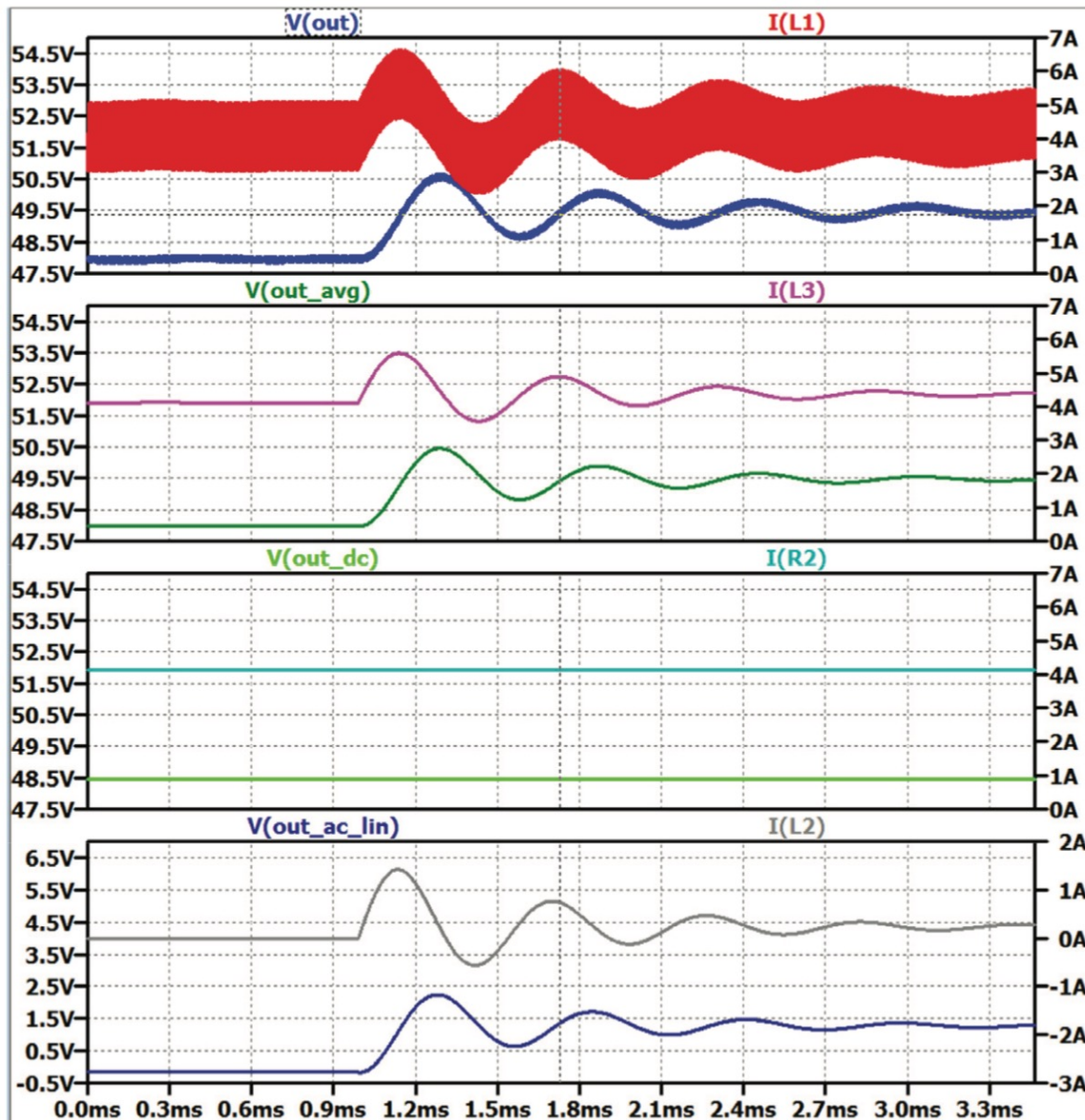


Modelo Promediado DC



Modelo Promediado AC

Comparación de Modelos



Modelo Completo Conmutado

Promediado, no Lineal

Modelo Promediado DC

Modelo Promediado AC