



UNIVERSIDAD DE CHILE

Conversores DC-DC

Roberto Cárdenas Dobson

Profesor Titular U de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica

<https://sites.google.com/site/robertocardenasdobson/home>





Conversores DC-DC

- Los conversores DC-DC se pueden utilizar en varias aplicaciones. Por ejemplo control de máquinas de continua y fuentes de poder.
- En general los conversores dc-dc utilizan alguna topología “chopper” o troceadores como los denominan en España.
- Los chopper pueden ser elevadores y reductores. Además combinaciones entre elevadores y reductores.



Nosotros estudiaremos los siguientes

- Reductor, step-down o “buck”.
- Elevador, step-up o “boost”.
- La combinación que se conoce como “buck-boost”
- El conversor Cúk.
- El SEPIC.
- Finalmente también discutiremos el puente H, denominado también full-bridge (dos piernas de un inversor) que puede ser utilizado como inversor monofásico o en aplicaciones dc-dc.



Referencias

Estas diapositivas están basadas en el libro “Power Electronics: Converters, Applications and Design”.

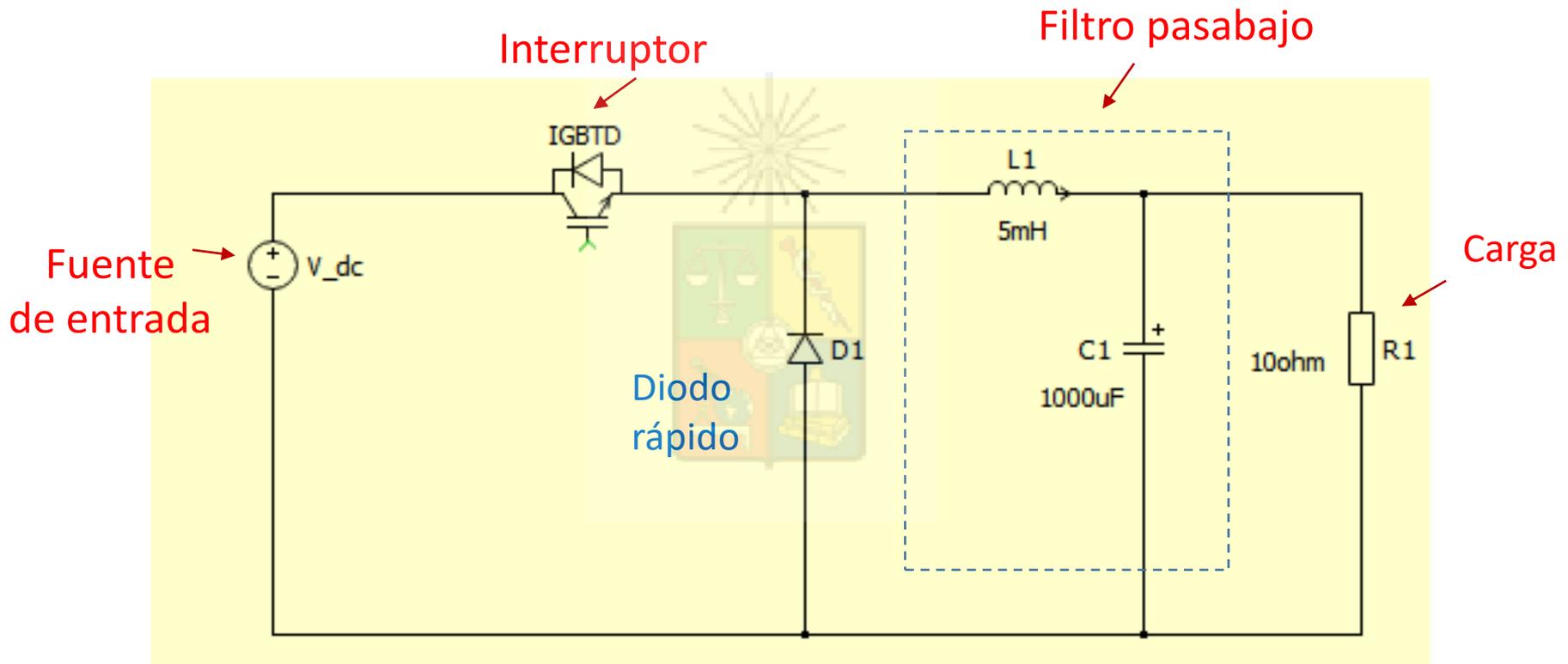
Mohan, Undeland and Robbins, tercera edición,
capítulo 7, 2003.



UNIVERSIDAD DE CHILE

Conversor Buck o Step Down Converter

Típico Conversor Reductor, Step-Down o Buck



Se entrega modelo en PLECS 4.1. Control de lazo abierto y también a lazo cerrado





Filtro pasabajo

- La que se muestra en la figura es una de las topologías utilizadas en el filtro pasabajo. También se puede utilizar solo la inductancia.
- Cuando se usa solo la inductancia la función de transferencia del filtro es:

$$V_{outf}(s) = \frac{V_{inf}(s)R_L}{sL + R_L}$$

- Cuando se usa el condensador se tiene:

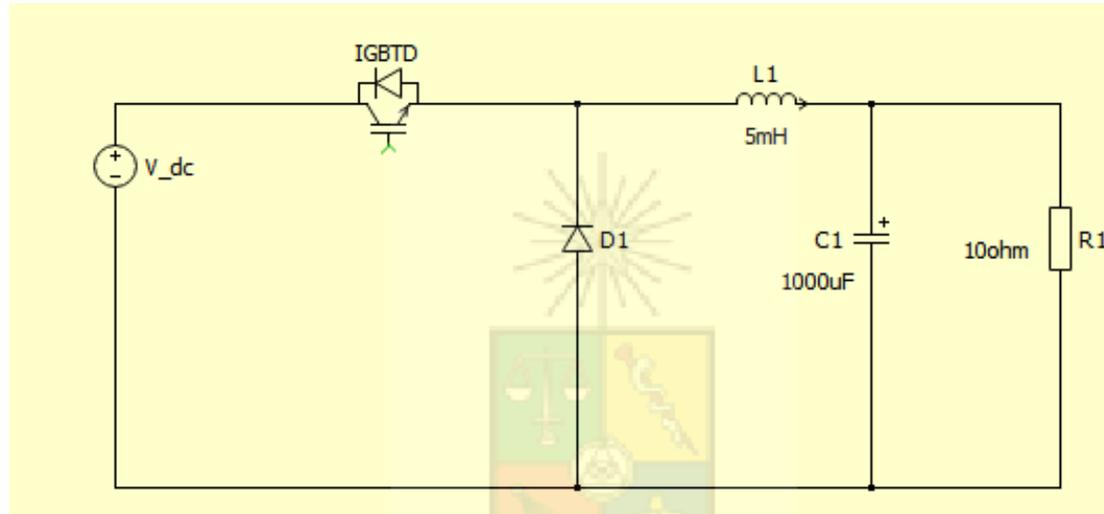
$$V_{outf}(s) = \frac{V_{inf}(s)R_L}{s^2R_LCL + sL + R_L}$$



Mas acerca del Filtro Pasa-bajo

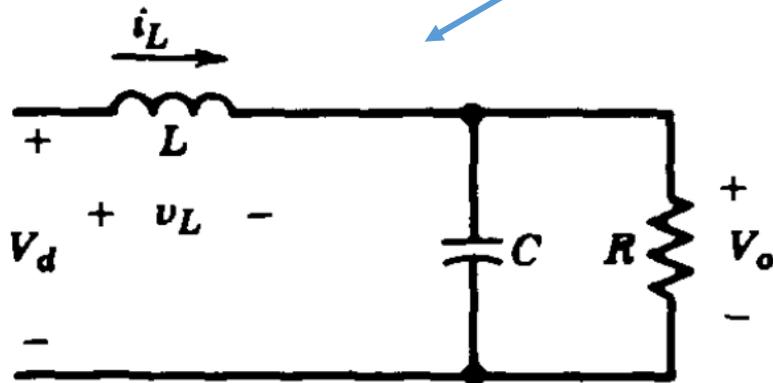
- El filtro L es de primer orden por lo tanto su ganancia a las altas frecuencias baja 20db por década.
- El filtro LC es de segundo orden, por lo tanto su ganancia a las altas frecuencias baja 40db por década.
- El filtro LC tiene mejor desempeño, atenúa mejor y puede tener mejor densidad de potencia. Sin embargo se debe diseñar mejor (el filtro y el sistema de control) para evitar efectos de resonancia al utilizar resistencias altas.
- El filtro LC no se debe conectar directamente a una red en el lado del condensador (donde esta R_L). Para esto se debe utilizar un filtro LCL.

Operación del conversor Buck asumiendo corriente plana en la inductancia

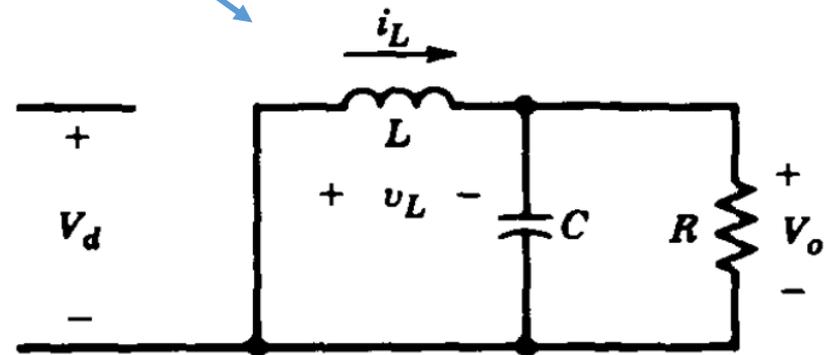


T_{on}

T_{off}



IGBT cerrado diodo no conduce



IGBT abierto diodo conduce



Criterio de las Áreas Iguales

- Asumir corriente plana es una simplificación que habitualmente se realiza en circuitos inductivos.
- La corriente en una bobina es:

$$i(t) = \frac{1}{L} \left(\int_0^{t_{on}} V_L^{on} dt + \int_{t_{on}}^{t_{off}} V_L^{off} dt \right)$$
$$= i_0 + \frac{1}{L} (V_L^{on} T_{on} + V_L^{off} T_{off})$$

Donde i_0 es la corriente inicial, V_L^{on} y V_L^{off} son las tensiones en la bobina durante el estado ON y OFF del IGBT respectivamente.

Criterio de las áreas iguales

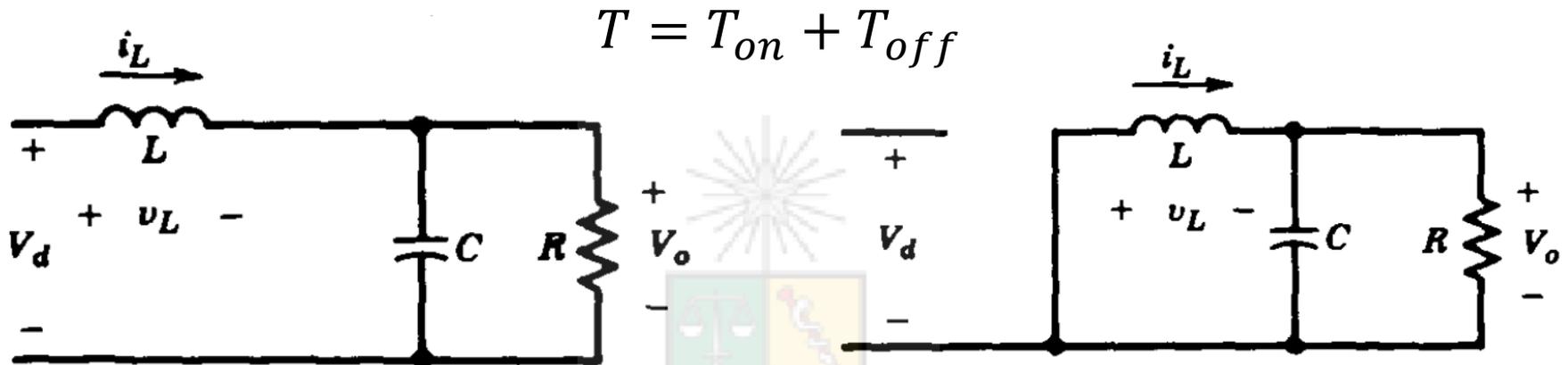
- Por lo tanto si la corriente es “plana” entonces se debe cumplir que:

$$V_L^{on}T_{on} + V_L^{off}T_{off} = 0 \rightarrow V_L^{on}T_{on} = -V_L^{off}T_{off}$$

- Es decir el área bajo la curva de carga de la bobina es igual al área bajo la curva de descarga. En inglés a este criterio se le conoce como equal Voltage-Time Area (VTA).
- La corriente no debe ser realmente plana para poder utilizar el análisis de igual VTA. Pero no deberían existir discontinuidades en la corriente del inductor.



¿Como se aplica?



$$VTA = (V_d - V_o)T_{on} - (V_o)(T - T_{on}) = 0$$

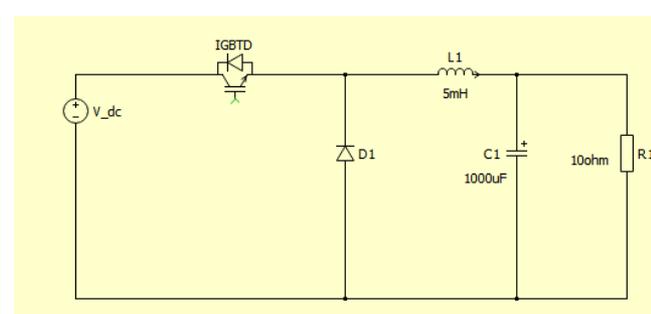
Resolviendo y considerando que δ el ciclo de trabajo es igual a $\delta = T_{on}/T$ se tiene:

$$V_{out} = \delta V_d$$

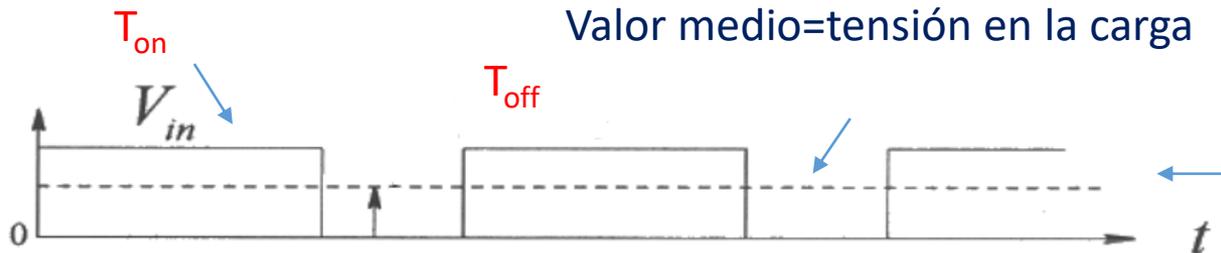
Dado que el ciclo de trabajo es menor a 1, este conversor es reductor.



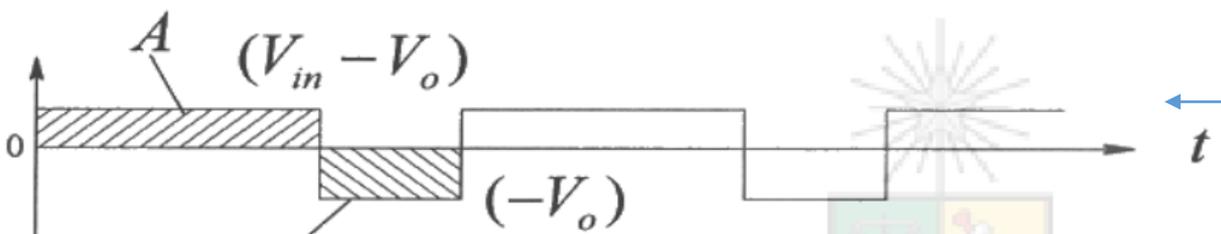
Algunas formas de onda



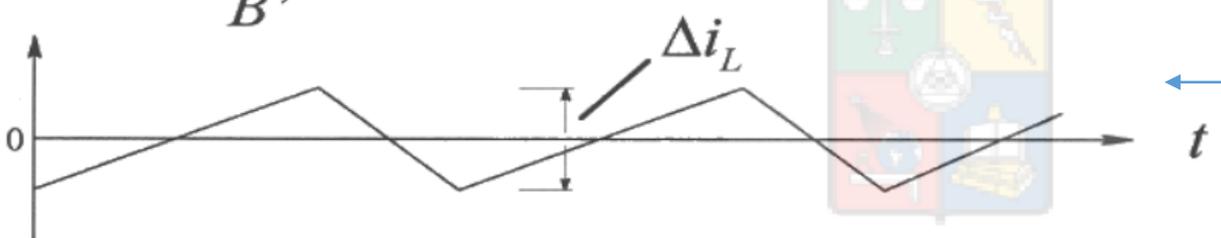
Valor medio=tensión en la carga



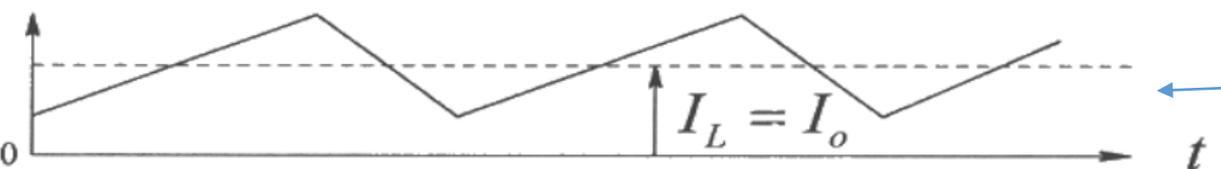
Salida del IGBT y tierra
(V diodo)



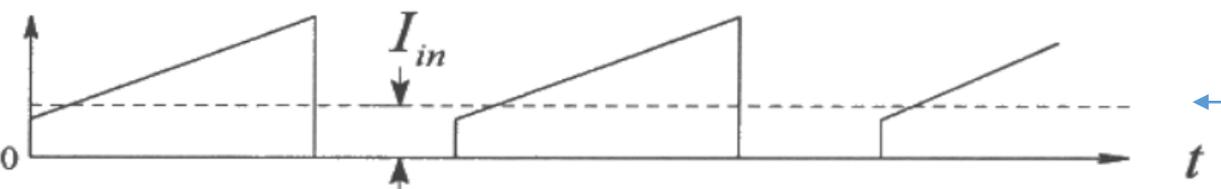
Tensión en la bobina



Ripple de corriente en L

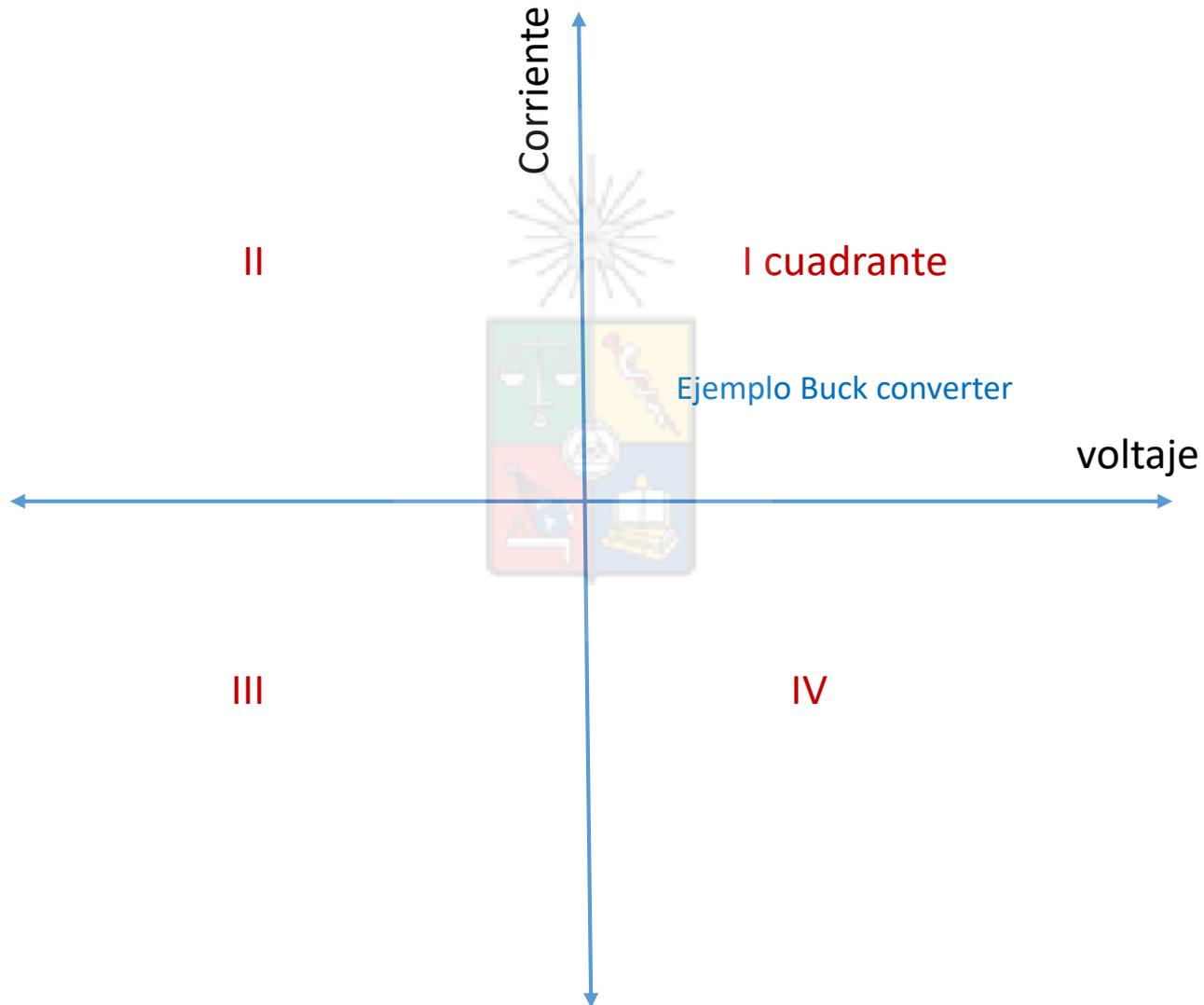


Corriente en la carga



Corriente en la entrada

Los “cuadrantes” son partes del espacio voltaje-corriente, torque-velocidad etc. En convertidores se utilizan para definir en que dirección se mueven los flujos de potencia

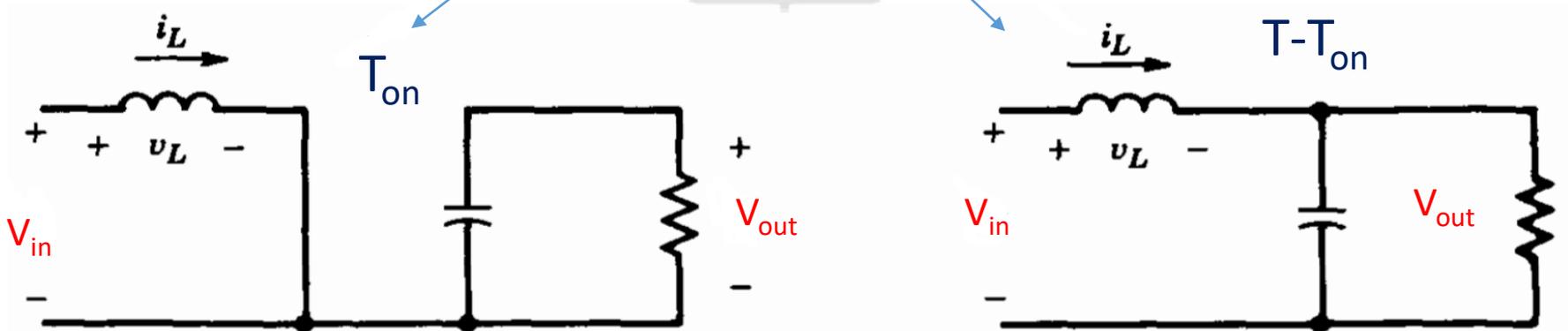
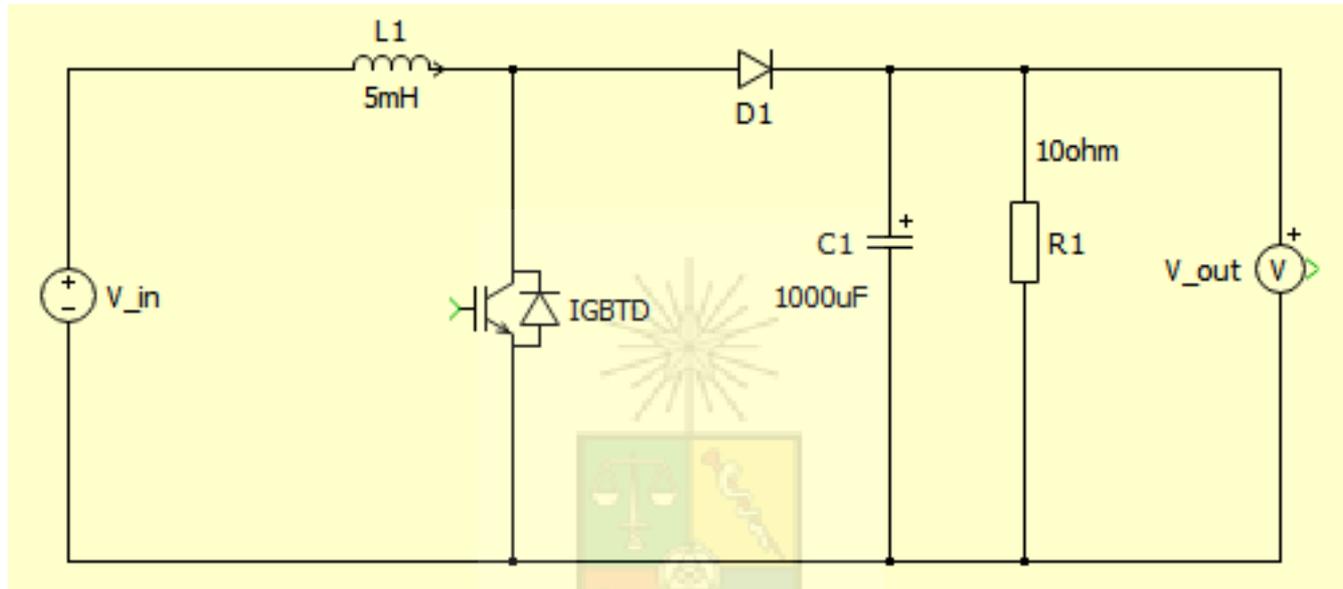




UNIVERSIDAD DE CHILE

Conservor Boost or Step Up Converter

Conversor Elevador, Step-Up o Boost



Se entrega modelo en PLECS 4.1. Control de lazo abierto

Ecuación Estática de Transferencia

- Aplicando VTA en la bobina e igualando los VTA se tiene:

$$V_{in}T_{on} + (V_{in} - V_{out})(T - T_{on}) = 0$$

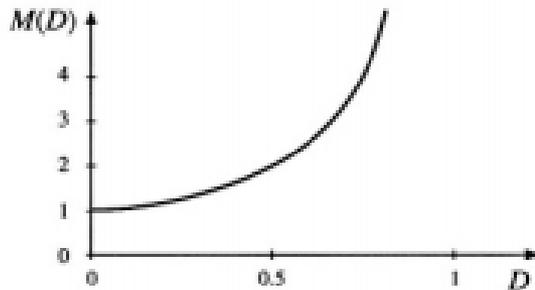
$$V_{in}\delta = -(V_{in} - V_{out})(1 - \delta)$$

- Despejando se encuentra:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - \delta}$$

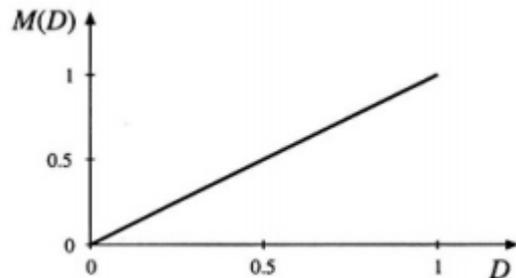


Ganancia del step-up converter



No es lineal con respecto a δ

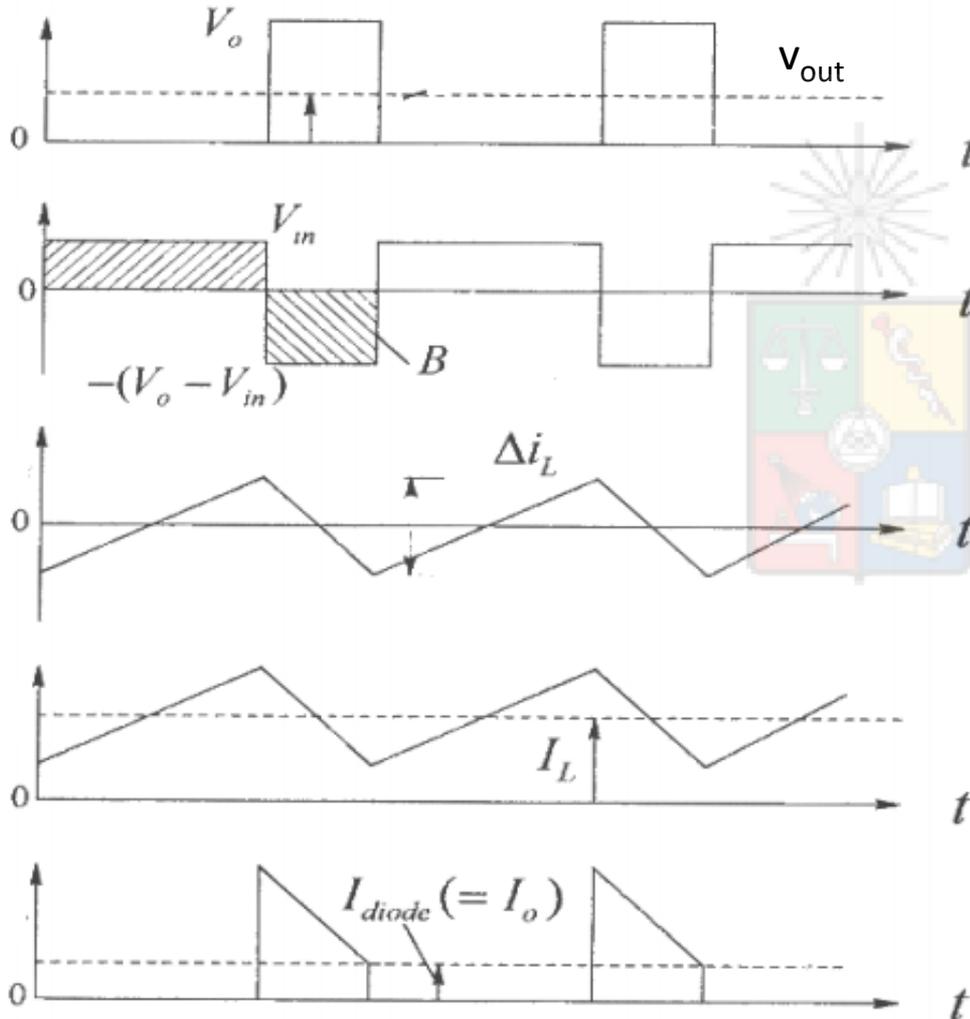
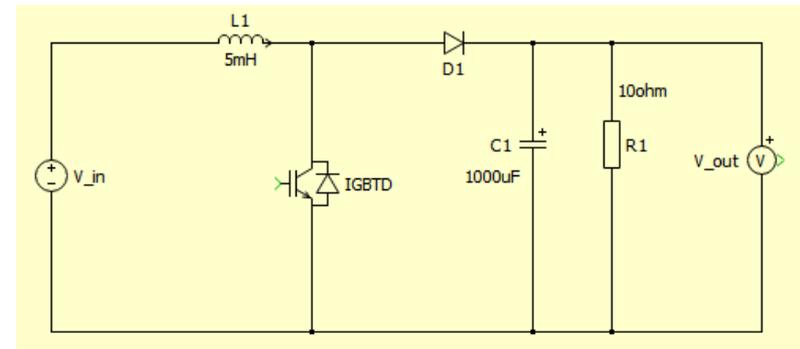
Ganancia del step-down converter



Es lineal con respecto a δ



Formas de Onda



- ← Tensión en el switch
- ← Tensión en la inductancia
- ← Ripple de corriente en la inductancia
- ← corriente total en la inductancia
- ← corriente en el diodo



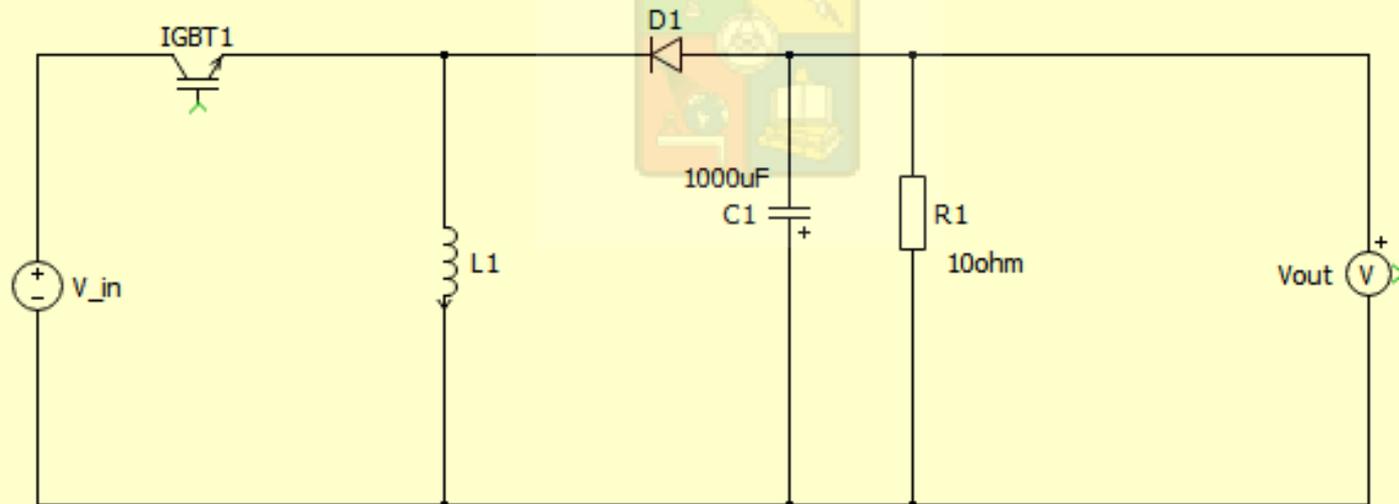
UNIVERSIDAD DE CHILE

Conversor Buck Boost



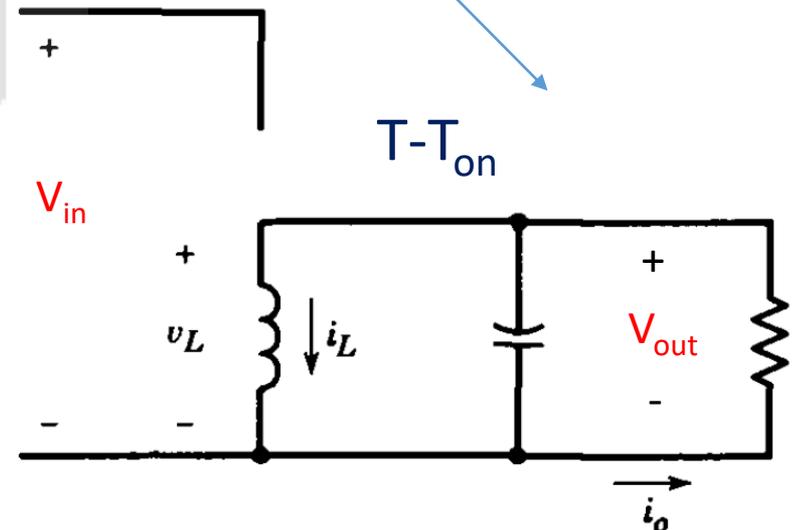
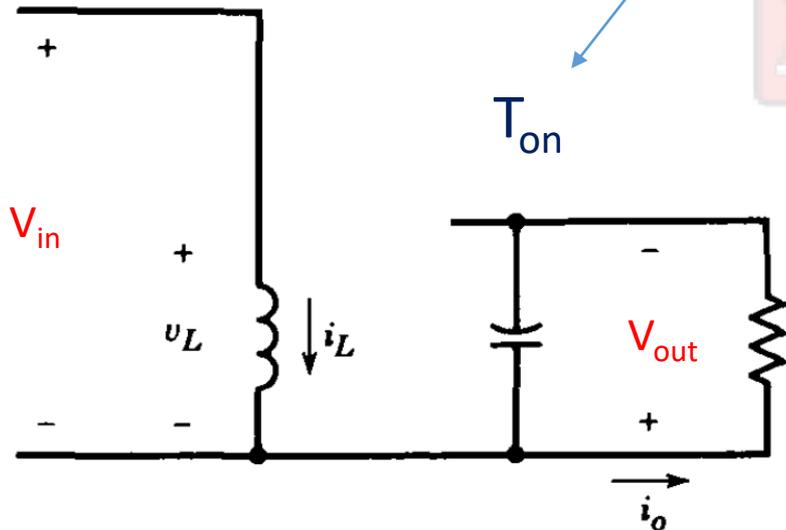
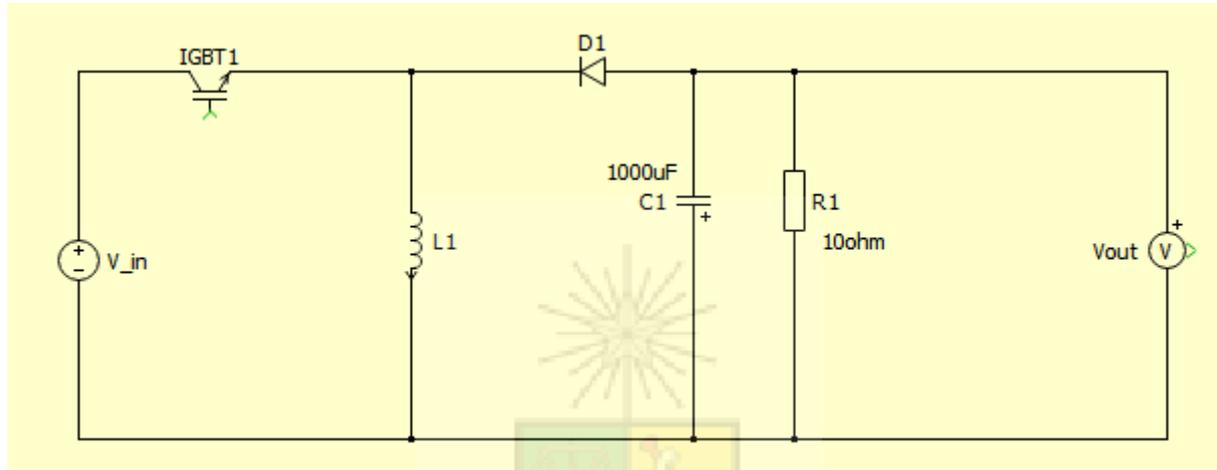
Conversor Buck-Boost

- Este conversor puede operar como reductor y elevador, dependiendo del ciclo de trabajo.
- Su voltaje de salida es negativo y eso puede ocasionar algunos problemas.

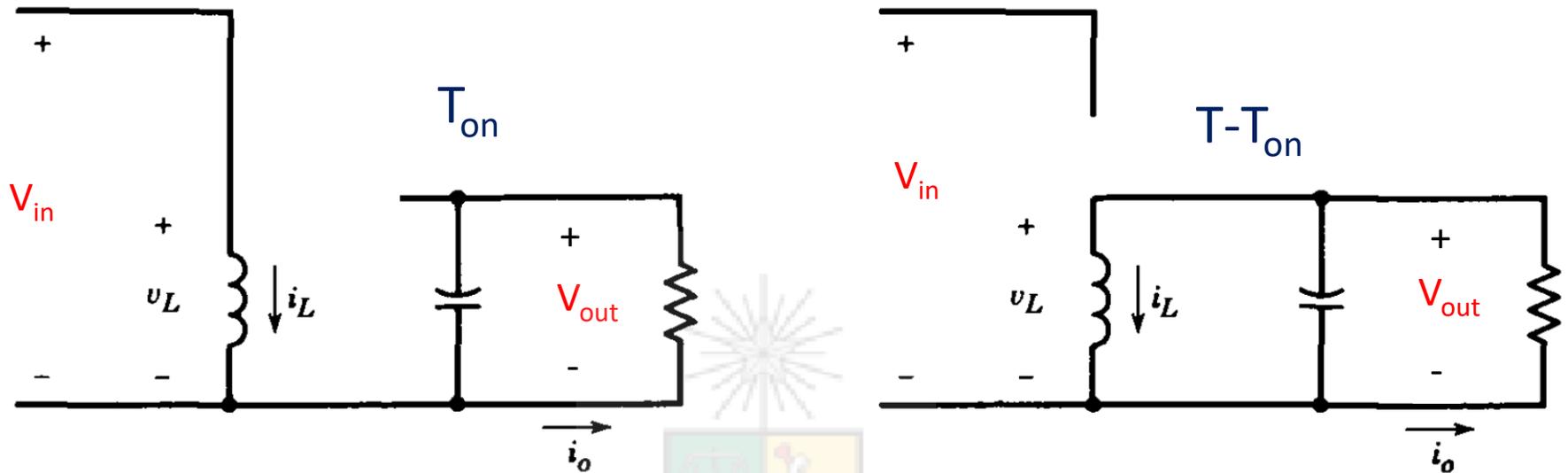


Se entrega modelo en PLECS 4.1. Control de lazo abierto

Análisis del Conversor



Función de Transferencia



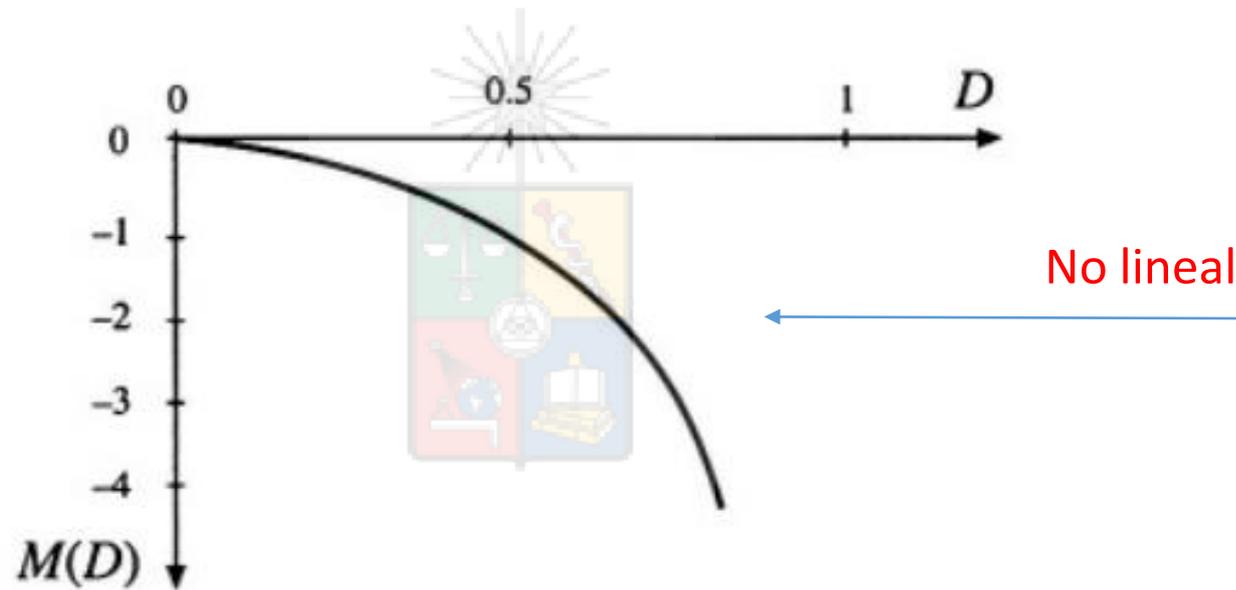
Ecuaciones VTA:

$$V_{in}T_{on} + V_{out}(T - T_{on}) = 0 \rightarrow V_{in}\delta = -V_{out}(1 - \delta)$$

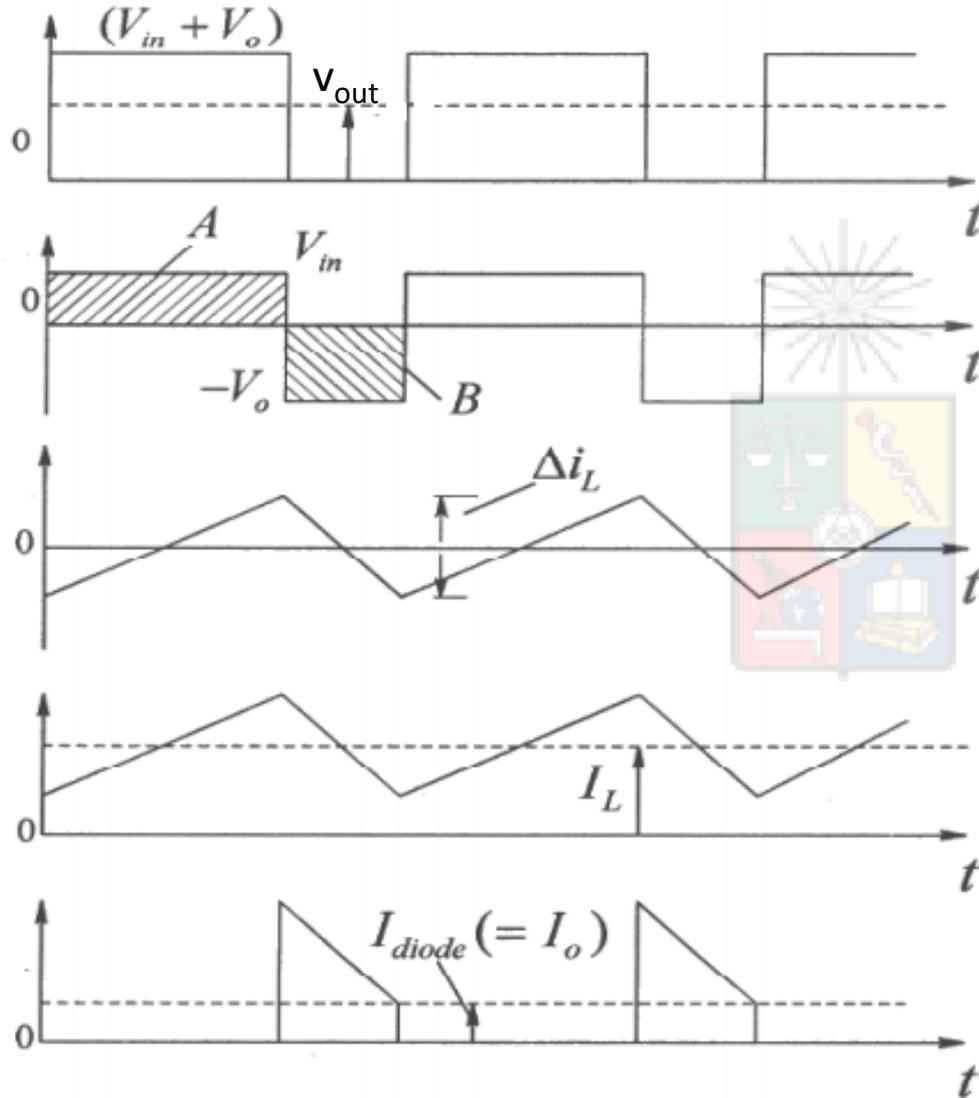
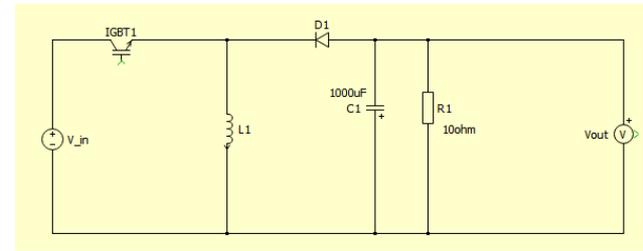
$$V_{out} = -V_{in} \frac{\delta}{1 - \delta}$$



Función de Transferencia



Formas de Onda



Tensión en el diodo

Tensión en la inductancia

Ripple de corriente en la inductancia

corriente en la inductancia

corriente en el diodo



UNIVERSIDAD DE CHILE

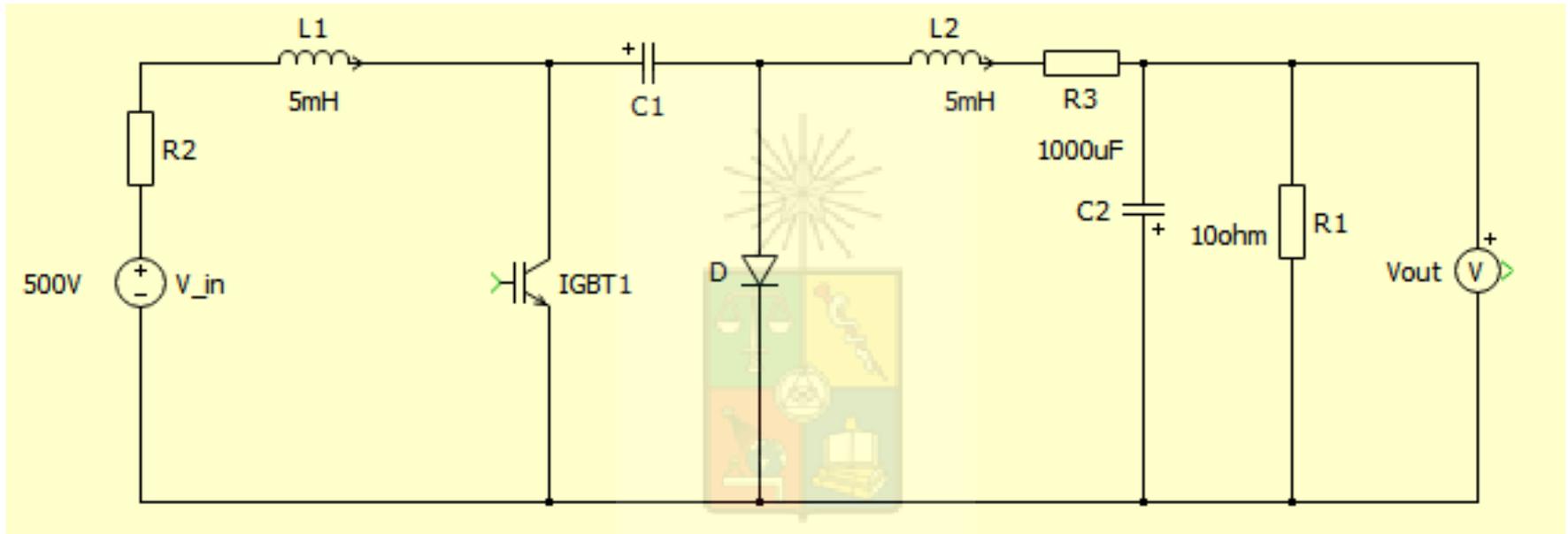
Conversor Cúk



Conversor Cúk Buck-Boost

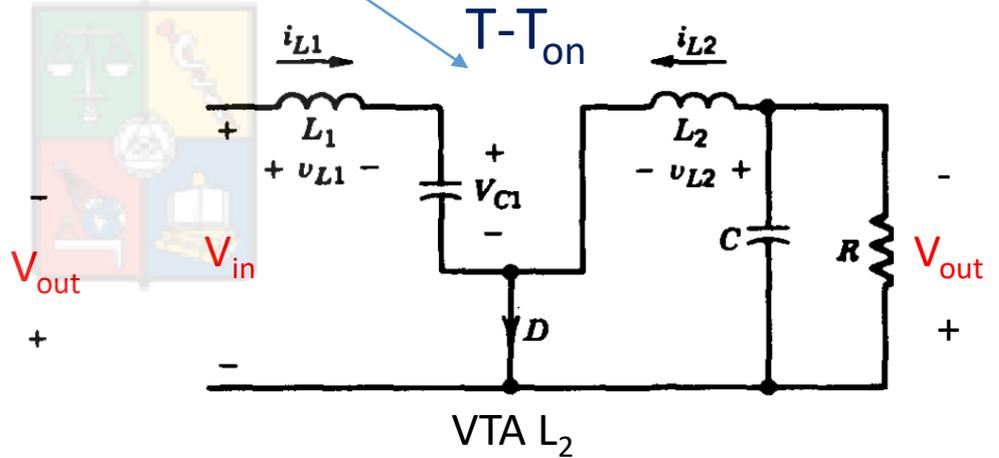
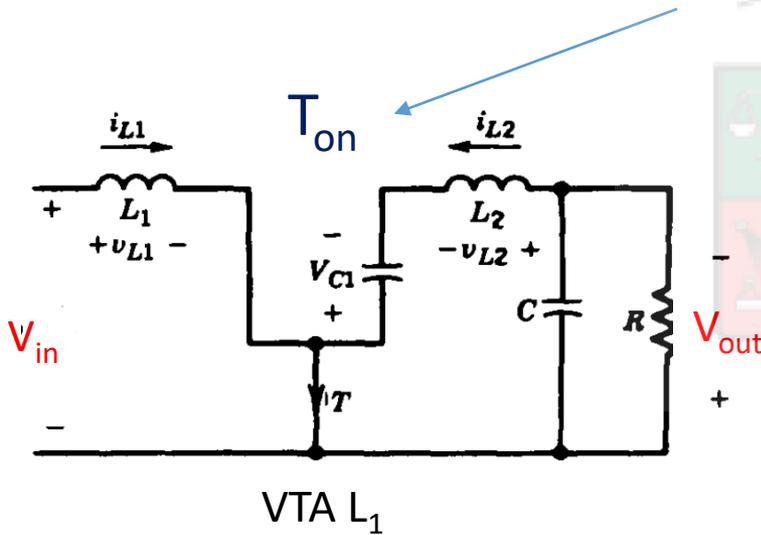
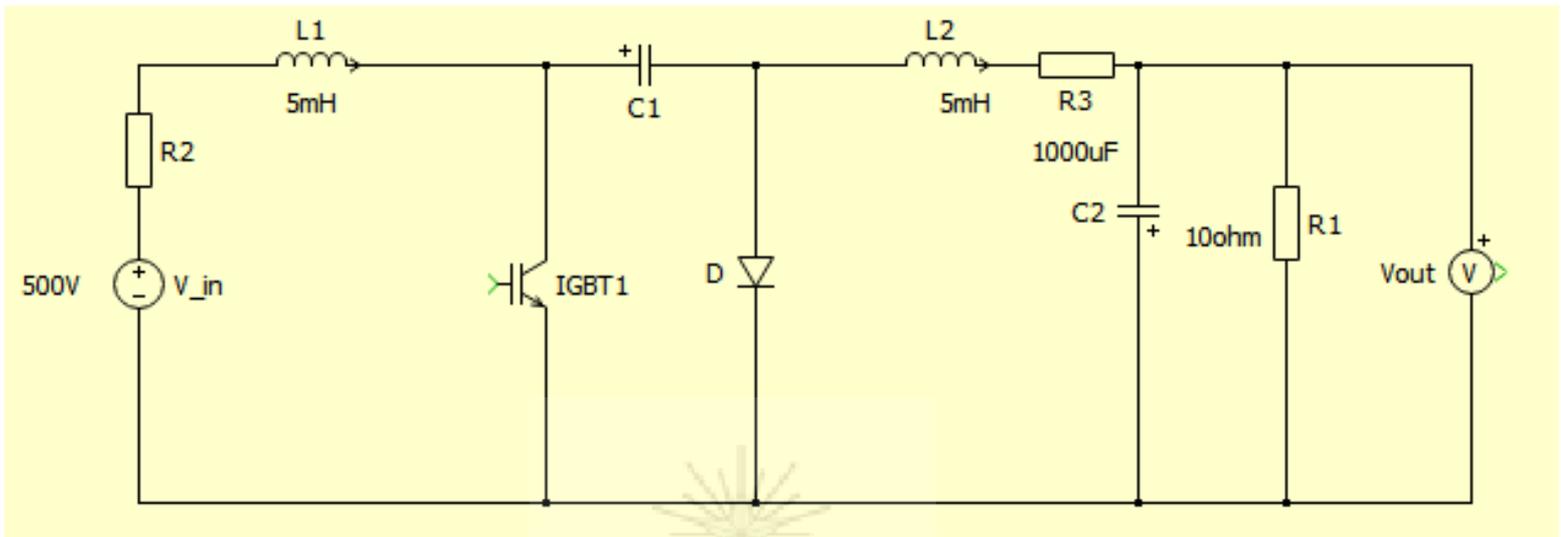
- El conversor anterior tiene el problema de entregar corrientes con alto ripple en la entrada y en la salida (condensador en paralelo con la carga).
- El conversor Cúk (nombrado así por su inventor) elimina este problema. El ripple en las corrientes se puede reducir hasta hacerlo despreciable.
- Sin embargo requiere un condensador y una bobina extra. La bobina adicional elimina ripple y armónicos en la corriente de entrada.
- El condensador adicional actúa como un buffer para transferir energía desde la entrada a la salida.

- El condensador C_1 se carga a un valor igual a la suma de los voltajes de entrada y salida.



Topología del conversor Cuk

Se entrega modelo en PLECS 4.1. Control de lazo abierto



$$V_{in}T_{on} + (V_{in} - V_{C1})(T - T_{on}) = 0$$

$$(V_{C1} - V_{out})\delta - V_{out}(1 - \delta) = 0$$

$$V_{in}\delta + (V_{in} - V_{C1})(1 - \delta) = 0$$

$$V_{C1} = \frac{V_{in}}{1 - \delta}$$

$$V_{out} = \delta V_{C1}$$

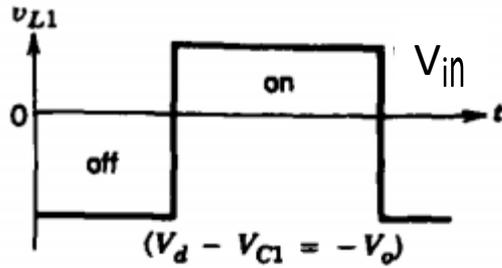
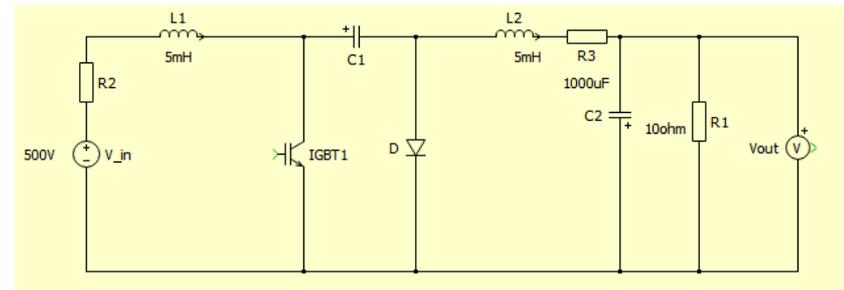


- Finalmente, combinando ambos VTA L_1 y VTA L_2 se llega a:

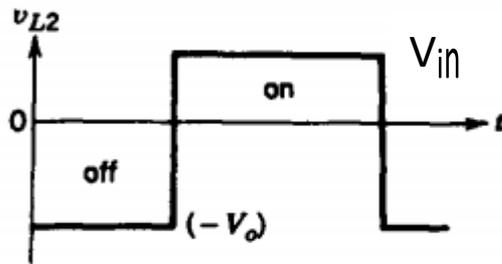
$$V_{out} = \frac{\delta}{1 - \delta} V_{in}$$

- Nótese que, de acuerdo a la definición utilizada anteriormente en el análisis, la tensión V_{out} es intrínsecamente negativa.

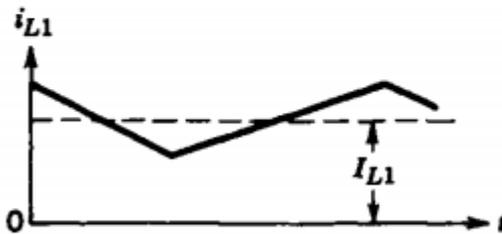
Formas de onda



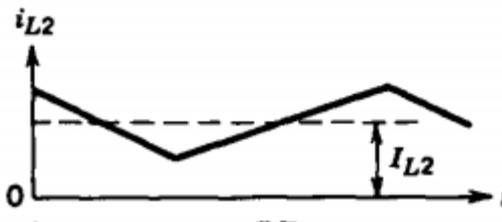
Tensión en la Bobina uno



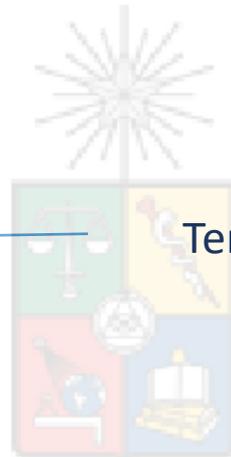
Tensión en la Bobina dos



Corriente en la bobina 1



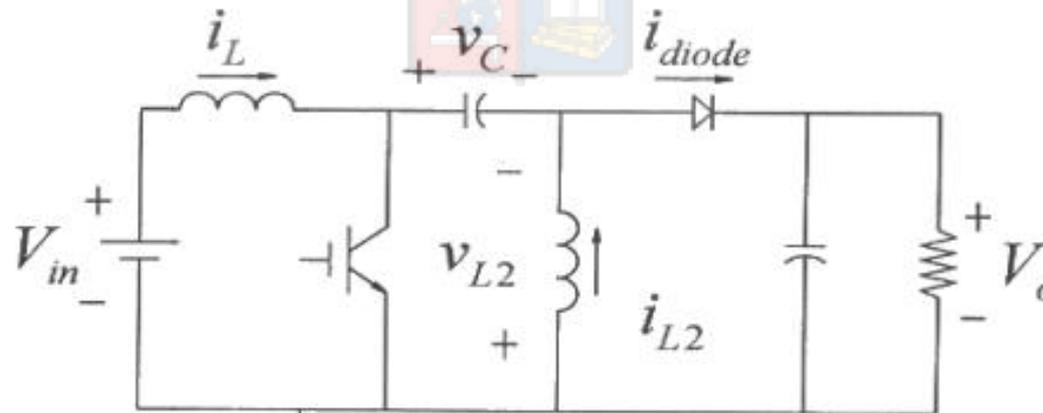
Corriente en la bobina 2



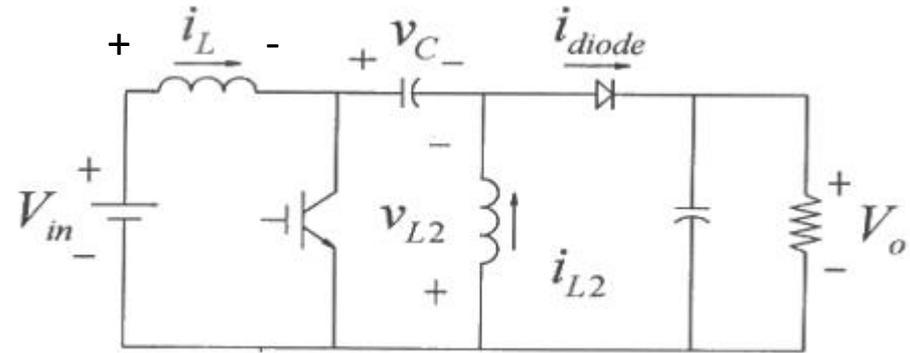


Tarea

- Para el conversor SEPIC (Single-Ended Primary Inductor Converters) se pide:
 - a) Encontrar la ganancia, utilizando el método de igual VTA y realizar el modelo en PLECS.
 - b) Encontrar además, analíticamente, la tensión máxima y corriente máxima en el diodo y transistor.



Solución



VTA Equation L_1

$$V_{in}T_{on} + (V_{in} - V_c - V_o)(T - T_{on}) = 0$$

$$V_{in}\delta + V_{in}(1 - \delta) - V_o(1 - \delta) = V_c(1 - \delta)$$

$$V_c = \frac{V_{in}}{1 - \delta} - V_o$$

VTA Equation L_2

$$V_cT_{on} - V_o(1 - T_{on}) = 0$$

$$V_c = \frac{(1 - \delta)}{\delta} V_o$$

$$V_o = \frac{\delta}{1 - \delta} V_{in}$$

Conversor SEPIC

- El modelo en PLECS del conversor SEPIC se entrega en el sitio WEB del curso.
- Encontrar los valores peaks de la corriente y voltaje en el transistor se deja al alumno.
- Encontrar los valores peak y RMS de la corriente y tensión en el diodo se deja al alumno como tarea.



UNIVERSIDAD DE CHILE

Convertidor Puentes Completo

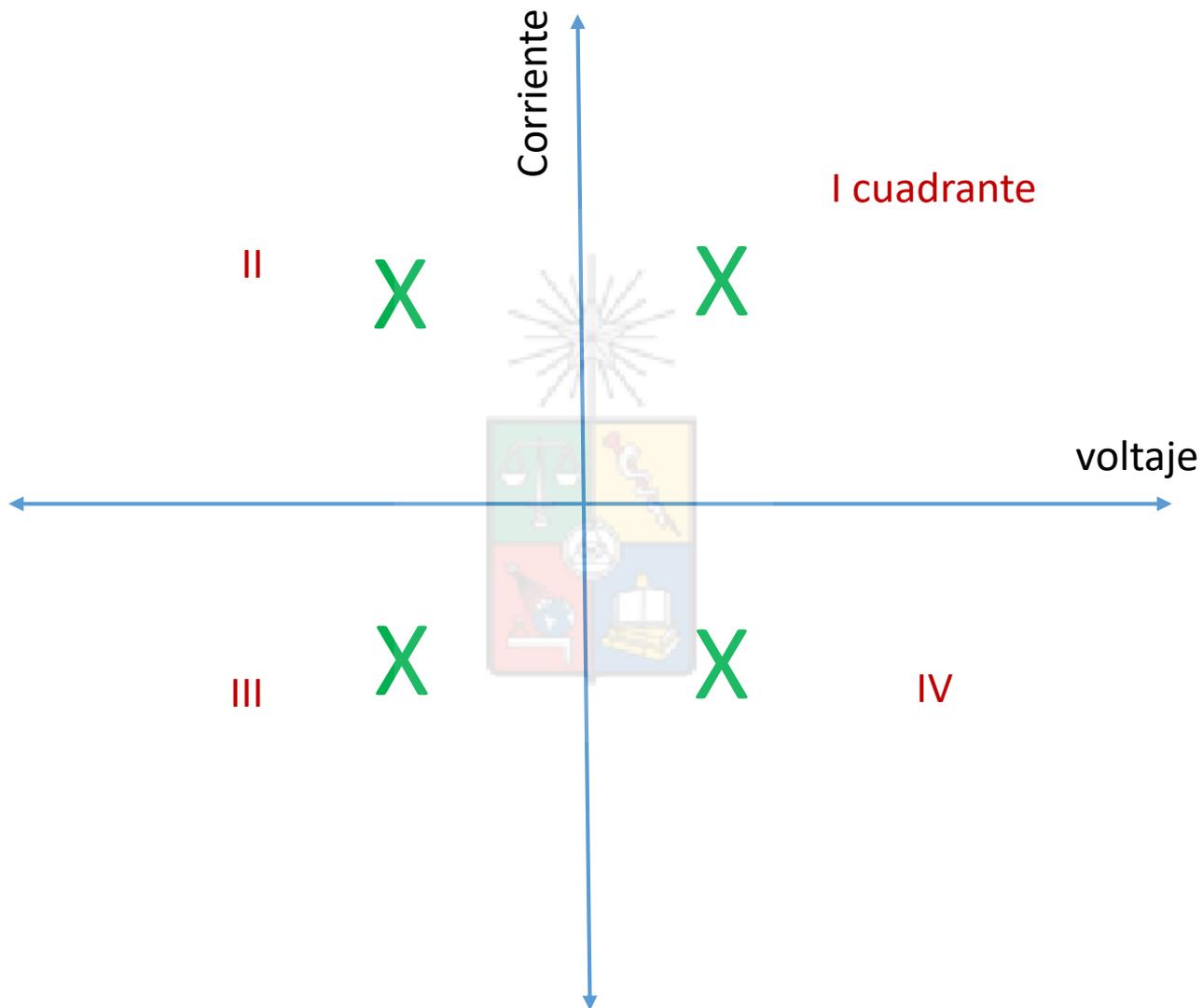


die

Puente completo o Full H-Bridge

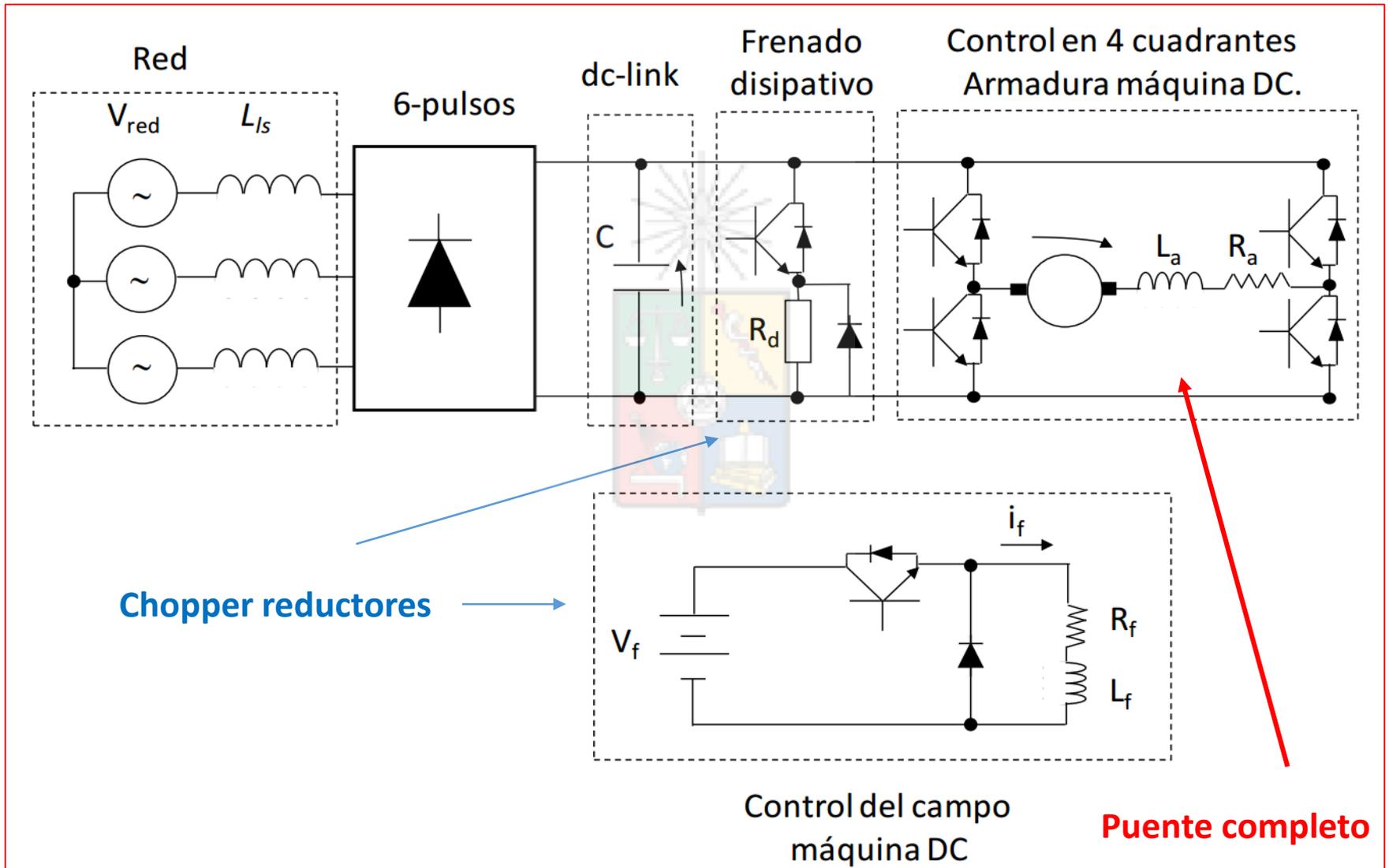
- El puente completo de interruptores, usualmente IGBTs con diodos en antiparalelo, es una de las estructuras fundamentales de electrónica de potencia.
- Entrega control en los cuatro cuadrantes.
- Se puede utilizar como rectificador DC-DC y para el control de máquinas de continua.
- Se utiliza también en transformadores de alta frecuencia, conversores multiniveles y en inversores monofásicos entre otros.





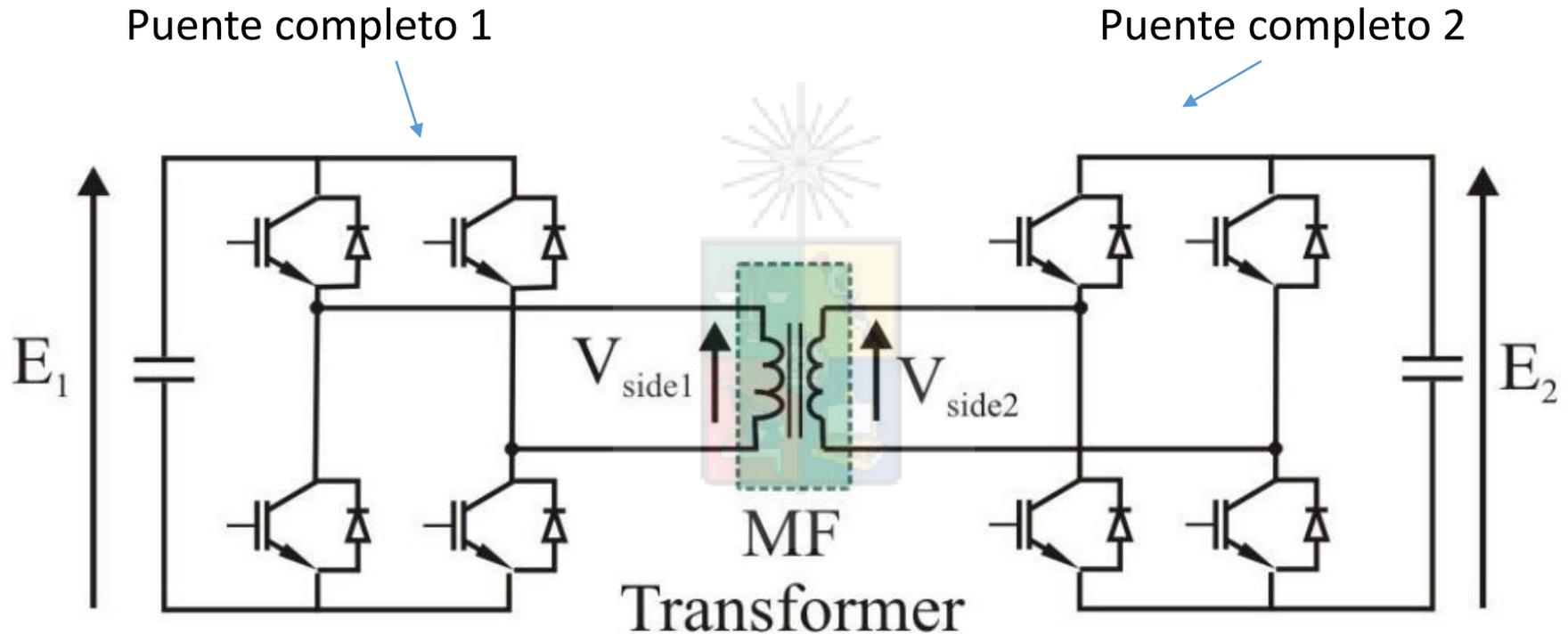


Ejemplo: Control de máquina DC utilizando un puente completo y un chopper reductor.





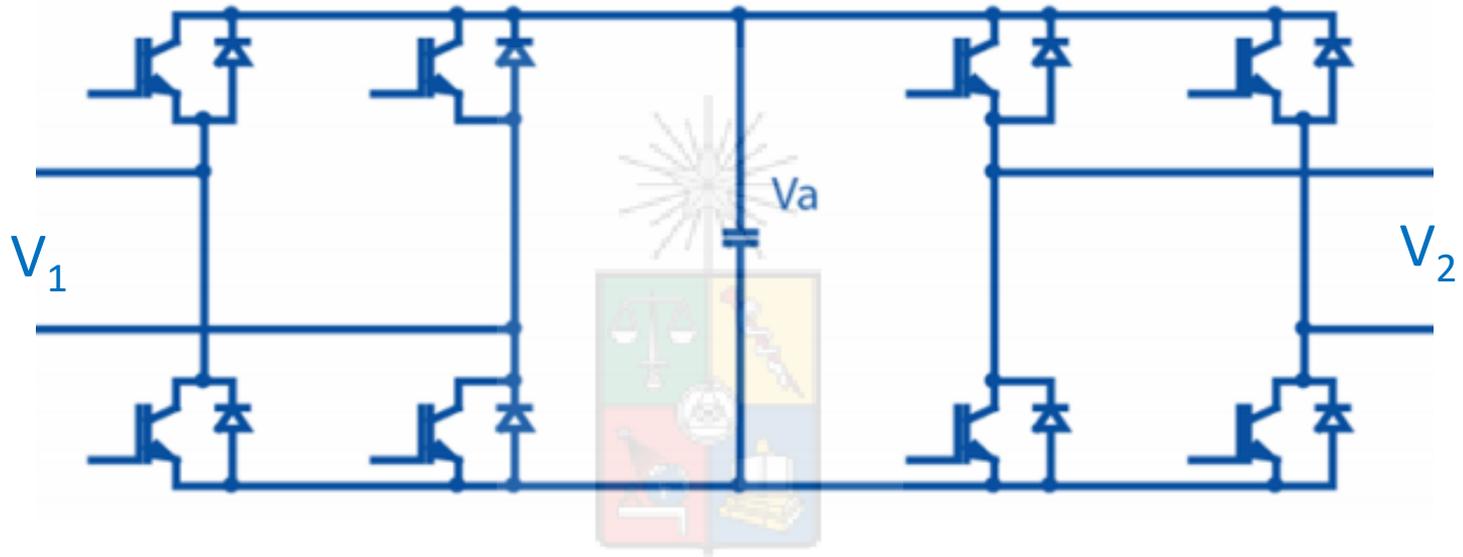
Ejemplo: Transformador de media/alta frecuencia.



¿Por qué utilizar un transformador de media frecuencia, por ejemplo funcionando a 20kHz? . Reduce el volumen y peso del transformador. Por ese motivo en aviones se utilizan 400Hz o más.



Ejemplo: conversor “back-to-back” monofásico



Flujo de potencia bidireccional por utilizar topologías cuatro cuadrantes. De la entrada a la salida y viceversa.

Entrada y salida con ondas sinusoidales. Sin armónicos.



Puente completo como conversor DC-DC

- El puente completo puede utilizarse en dos modalidades de modulación. Estas se llaman bipolar y unipolar respectivamente.
- La bipolar es mas simple de implementar pero genera solo dos niveles en el voltaje de salida. De $+E$ y $-E$, donde E es el voltaje del enlace dc que alimenta el puente.
- La unipolar genera dos niveles al mismo tiempo, pero aplica la mitad de la tensión. Ej. 0 a $+E$ (y viceversa) si se está sintetizando una tensión positiva, y 0 a $-E$ (o $-E$ a 0) cuando se sintetiza una tensión negativa.

Puente completo como conversor DC-DC

- La frecuencia de switching “efectiva” se dobla. Es decir cada dispositivo funciona a f_{sw} pero la carga “ve” armónicos de orden $2f_{sw}$. Por lo tanto la señal es mas fácil de filtrar.
- Además de eso los dv/dt son menores (la mitad) cuando se tienen mas niveles. En modulación bipolar los cambios son de $-E$ a $+E$ y de $+E$ a $-E$. En cambio, con modulación unipolar los cambios son de 0 a $\pm E$ y de $\pm E$ a 0 .
- Altos dv/dt producen problemas en las cargas, por ejemplo en la aislación de los devanados de una máquina.



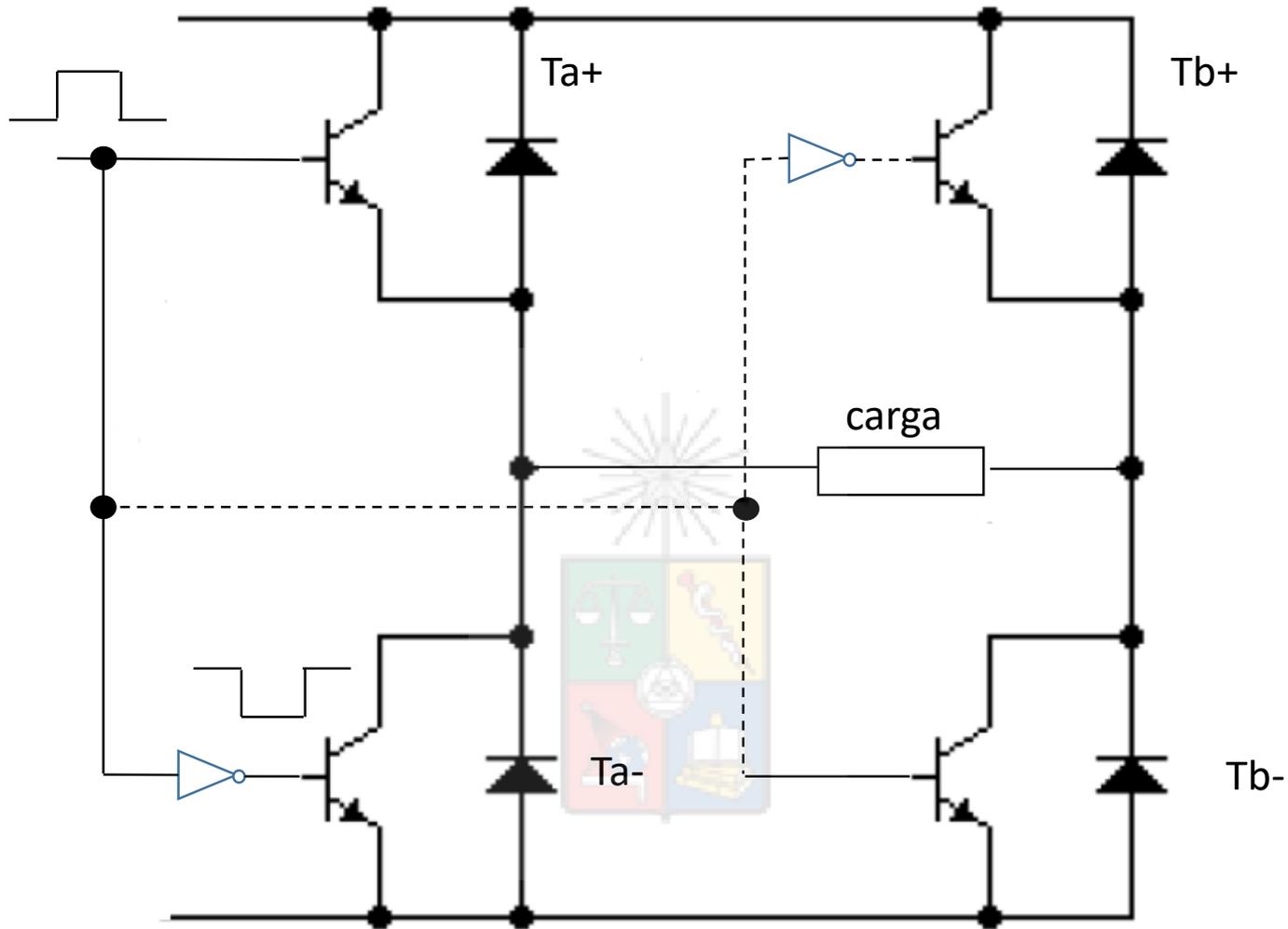


UNIVERSIDAD DE CHILE

Modulación Bipolar



Se entrega modelo en PLECS 4.1. Control de lazo abierto y lazo cerrado



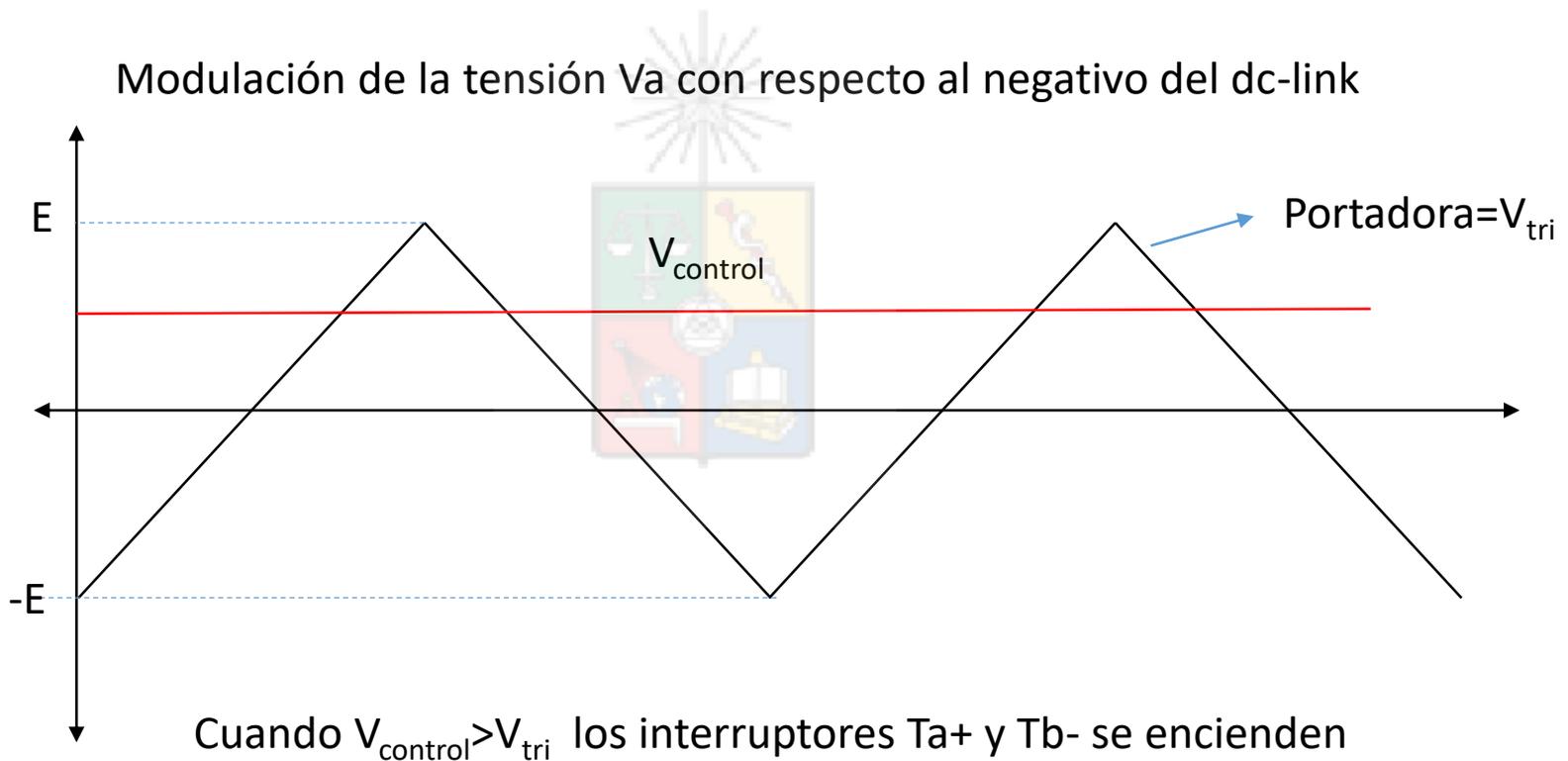
Quando se enciende T_{a+} se apaga T_{a-} y viceversa. Un tiempo muerto se le debe agregar a cualquiera de ellos al encenderse.

Lo mismo sucede con T_{b+} y T_{b-} . Cuando uno de ellos se enciende el otro debe apagarse. Al que se enciende se le aplica un tiempo muerto.



Modulación Bipolar

- Cuando se enciende T_{a+} , se debe encender también T_{b-} .
- Cuando se enciende T_{b+} , se debe encender T_{a-} .

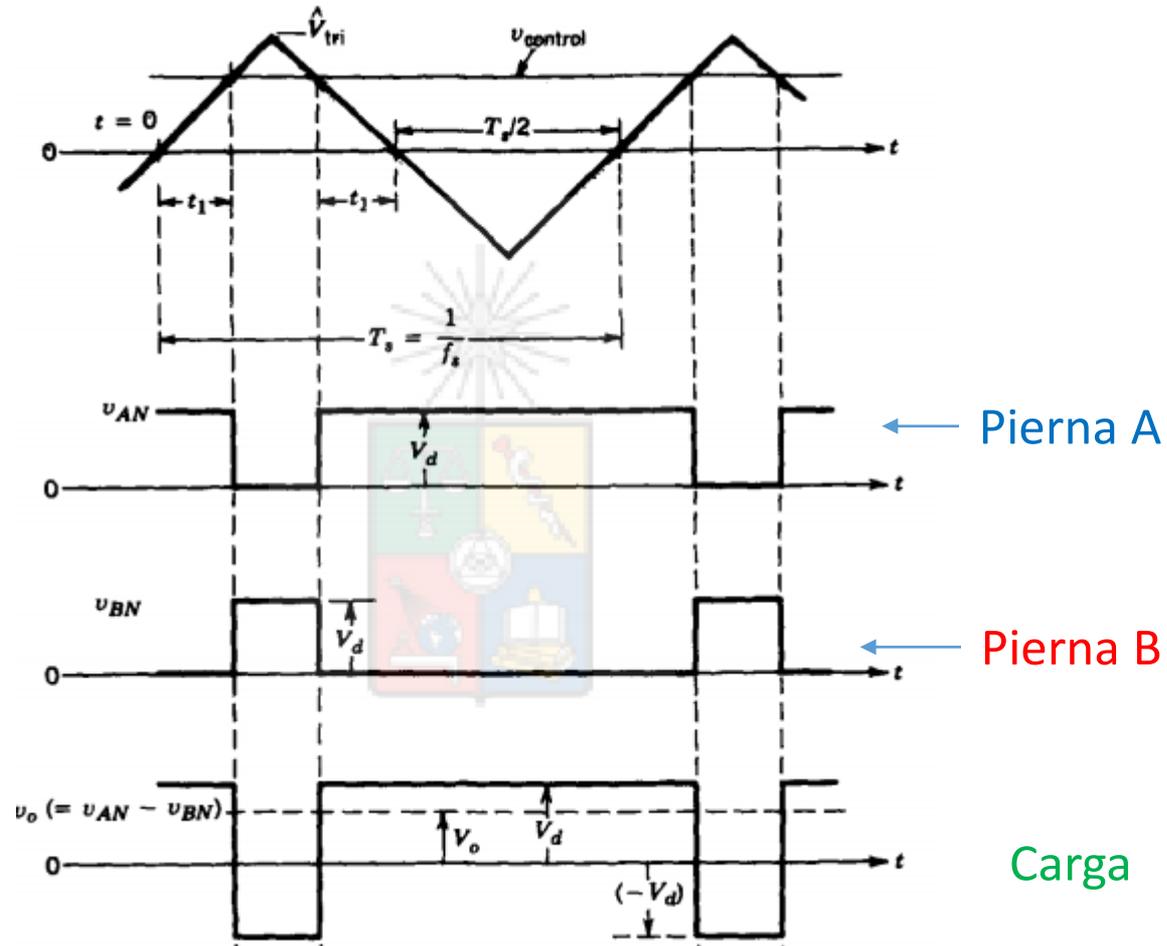


$$\delta_a = \frac{T_{on}}{T} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_{control}}{E} \right]$$



Modulación bipolar

Modulación de la tensión V_a con respecto al negativo del dc-link



Frecuencia igual a la de la portadora



Ver el libro Power Electronics: Converters, Applications and Design, Mohan and Undeland



Modulación bipolar

- Por lo tanto la tensión de salida es:

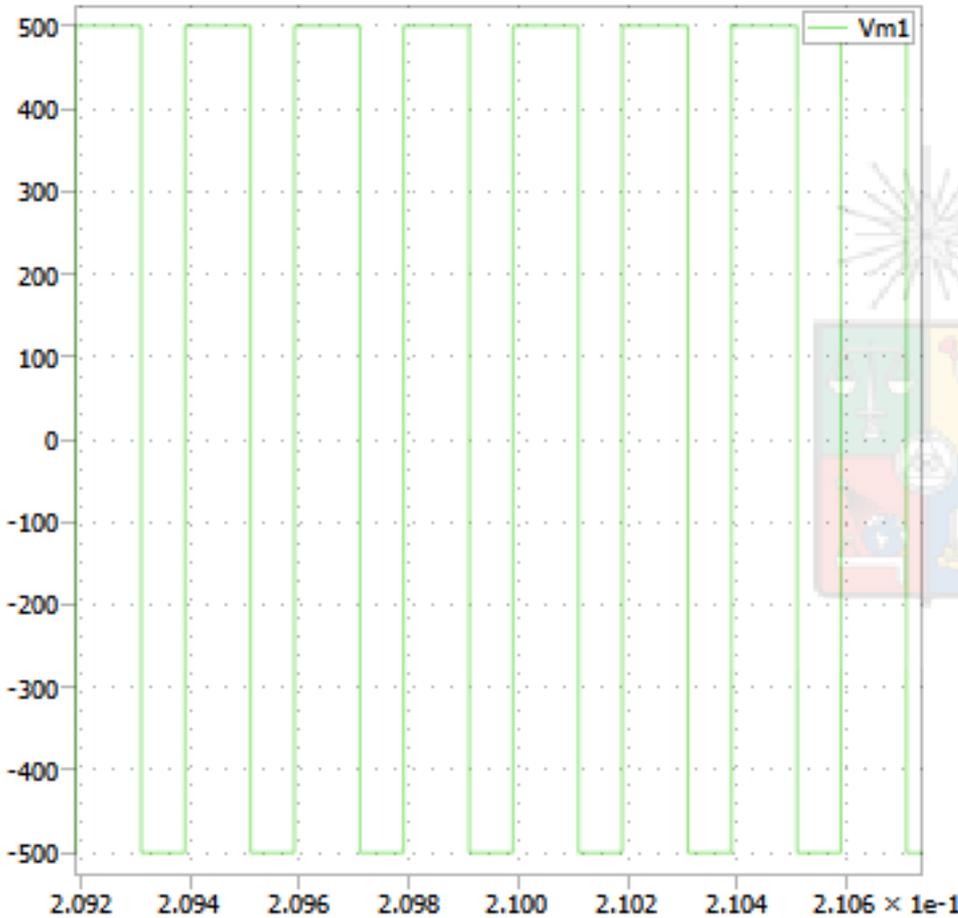
$$V_{out} = (\delta_a - \delta_b)E$$

- El ciclo de trabajo δ_b es: $\delta_b = 1 - \delta_a$.
- Asumiendo esto, la tensión de salida es:

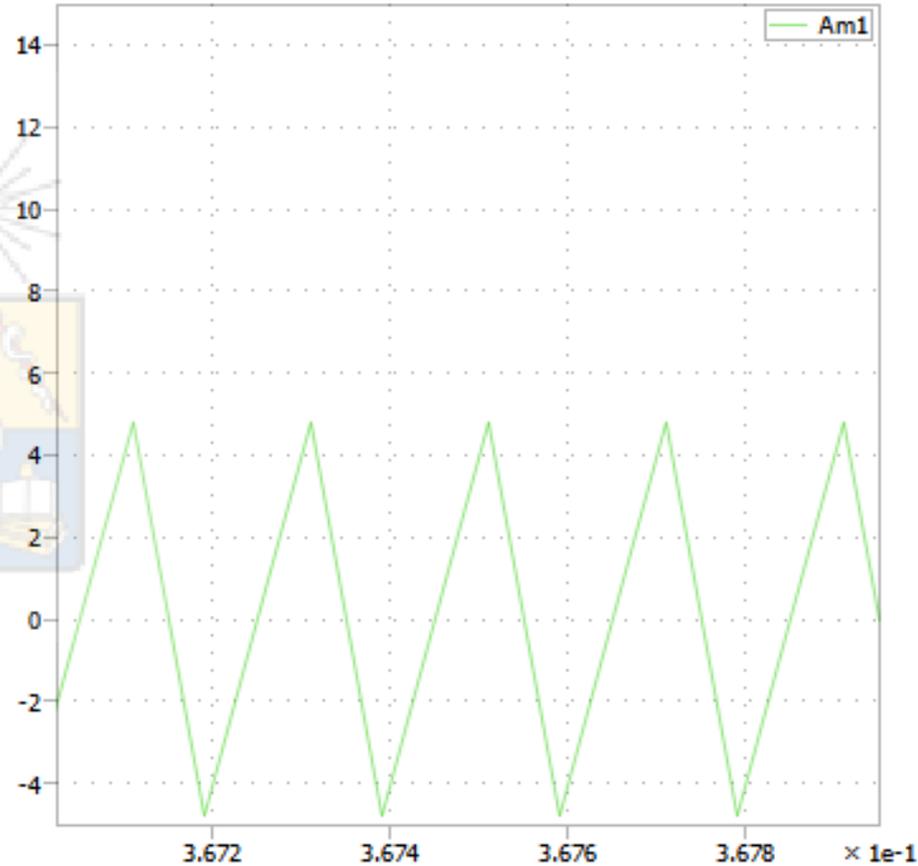
$$V_{out} = (2\delta_a - 1)E$$



Resultados Bipolar 5kHz, 100V en la carga



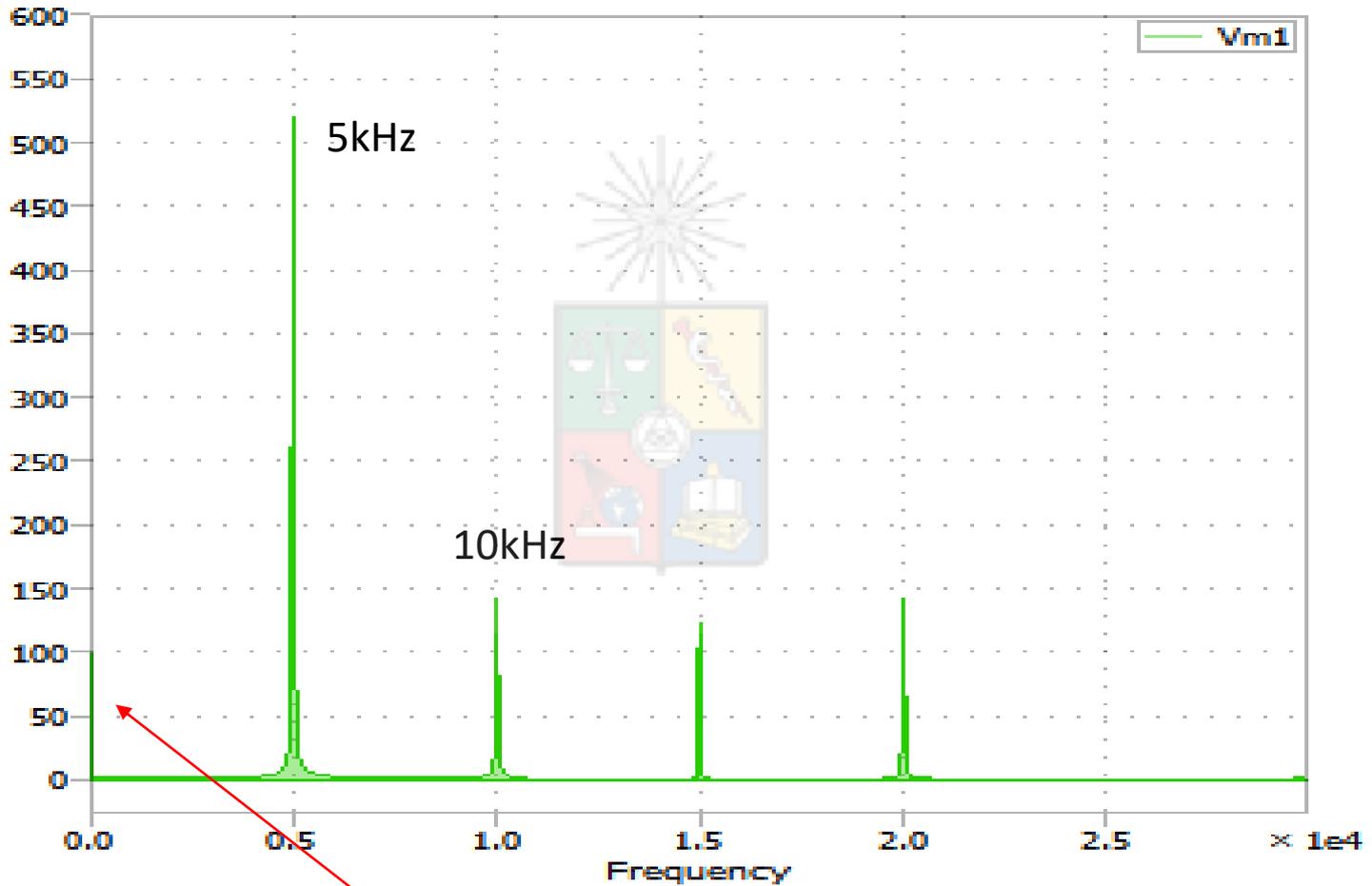
Voltaje de dos niveles



Corriente



Espectro Bipolar $f_{sw}=5kHz$



La tensión de control es 100 V



Modulación Unipolar

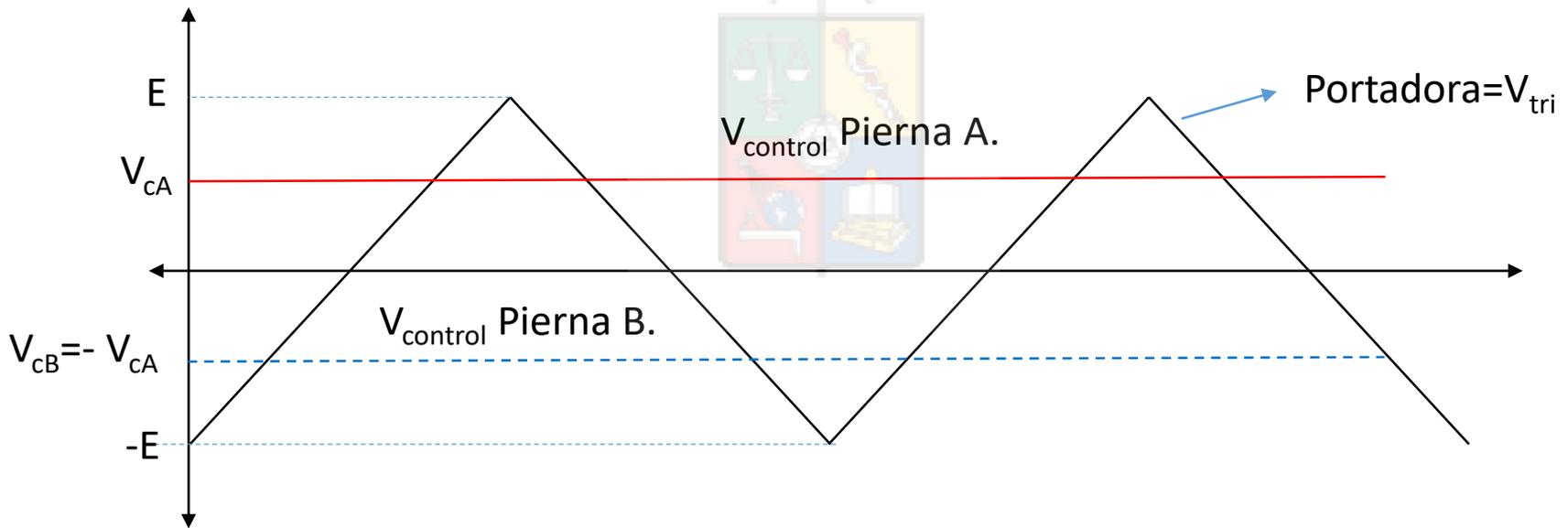


Se entrega modelo en PLECS 4.1. Control de lazo abierto y lazo cerrado



Modulación Unipolar

- La modulación unipolar se denomina también de doble PWM.
- La diferencia con la bipolar es ya no se operan $(Ta+, Tb-)$ y $(Tb+, Ta-)$ como si fueran un solo interruptor.
- Se utiliza modulación PWM de la señal de control y su negativo para controlar ambas piernas.



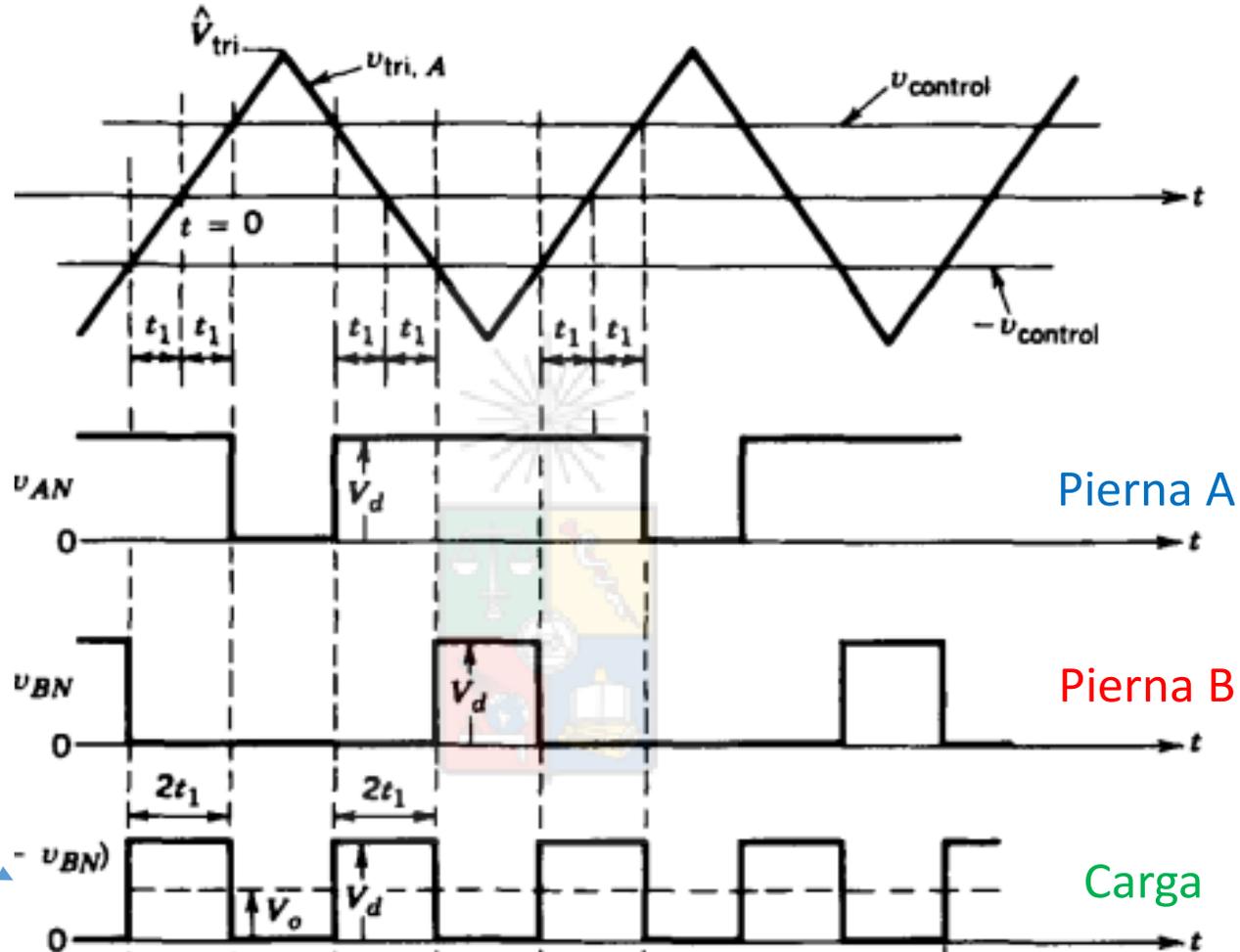
Cuando $V_{control A} > V_{tri}$ el interruptor $Ta+$ se enciende (por supuesto $Ta-$ se apaga)

Cuando $V_{control B} > V_{tri}$ el interruptor $Tb+$ se enciende (por supuesto $Tb-$ se apaga)



Modulación unipolar

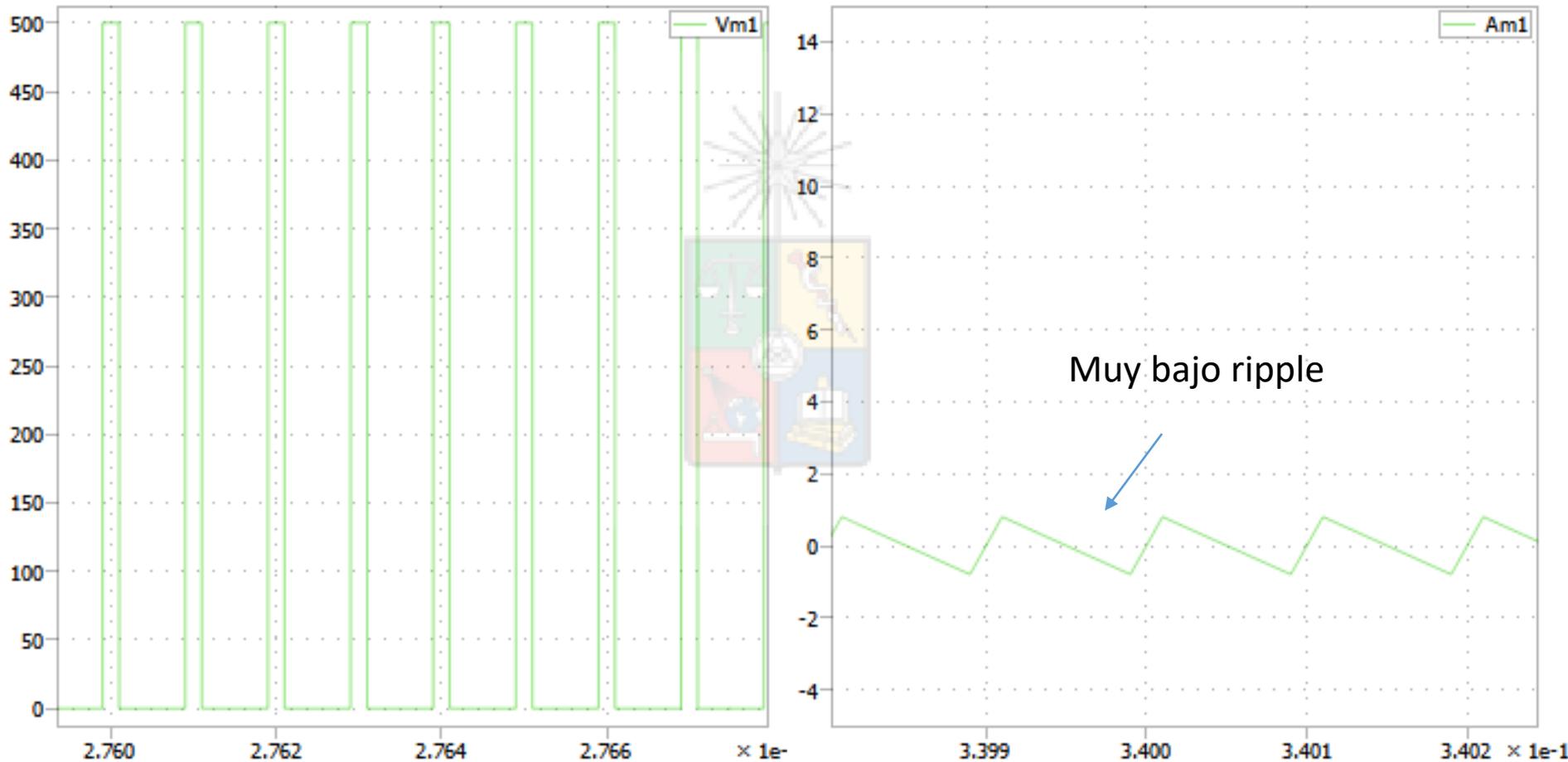
- El valor medio en la salida es el mismo y aproximadamente igual a V_{control} . La diferencia es que el armónico principal se encuentra a dos veces la frecuencia de switching.
- Esto permite menor distorsión armónica en la salida.



Ver el libro Power Electronics: Converters, Applications and Design, Mohan and Undeland

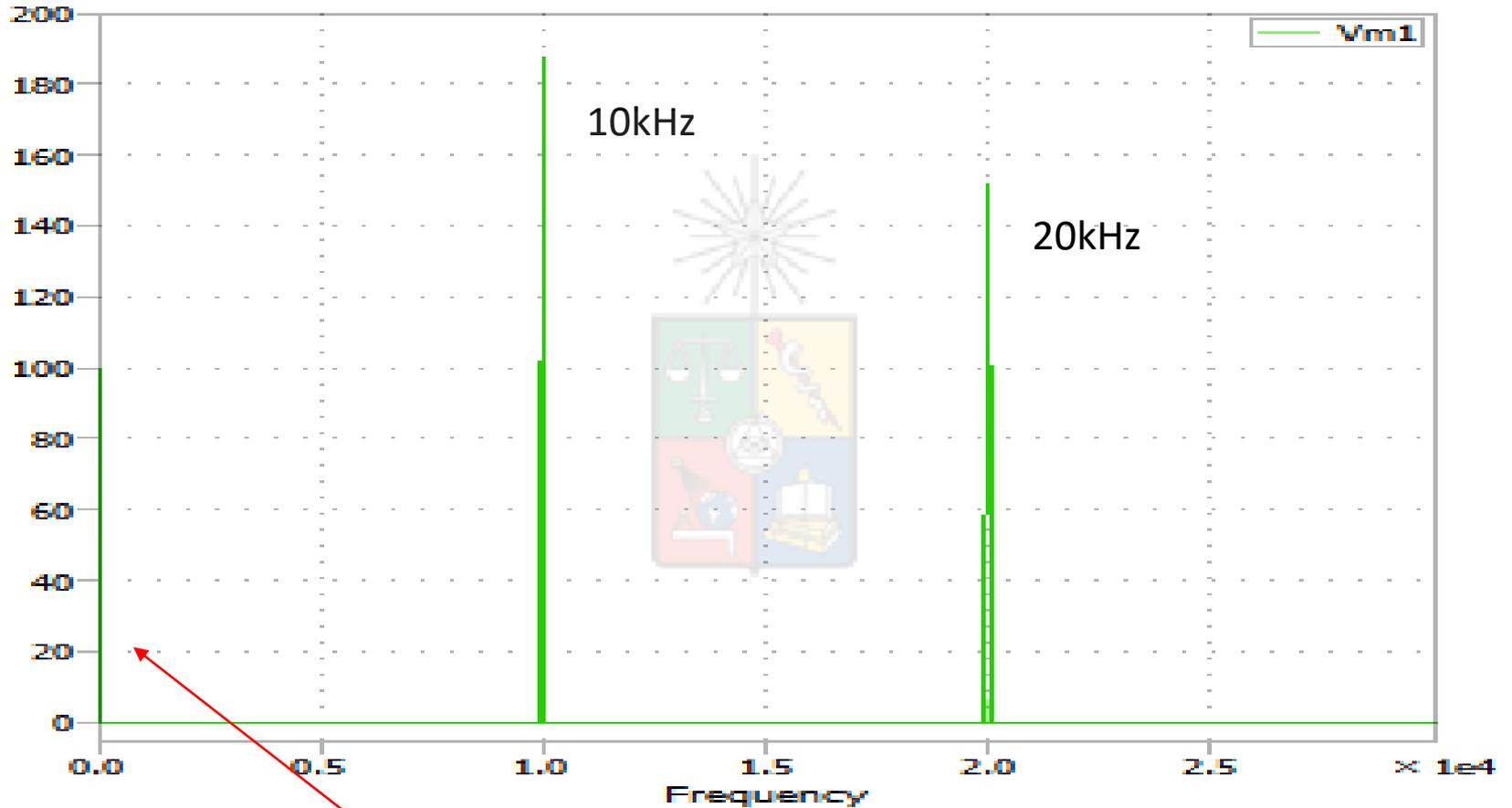


Resultados Unipolar 5kHz, 100V en la carga





Espectro Unipolar 5kHz



La tensión de control es 100 V



UNIVERSIDAD DE CHILE

Diseño del sistema de control



Ejemplo de diseño del sistema de control

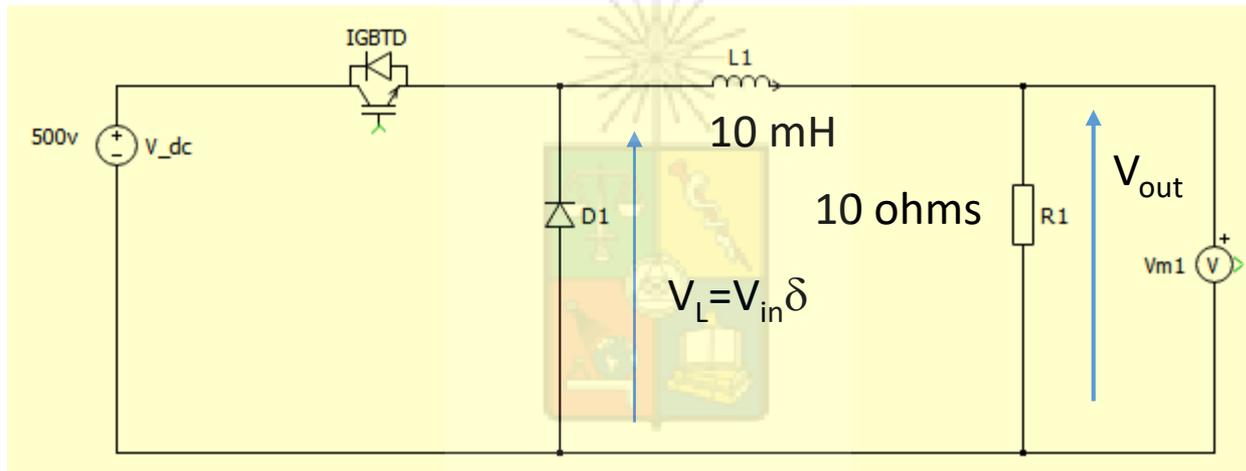
- Este no es un curso de control así que solo se entregaran lineamientos generales. Se asume que todos conocen los fundamentos de control automático y los métodos de diseño como Bode o Root Locus.
- Vamos a diseñar un controlador en un ejemplo muy básico. Se considerará el chopper reductor el que tiene una ganancia lineal (ciclo de trabajo vs voltaje de salida).
- Se utilizará el concepto de impedancia virtual lo cual habitualmente no se enseña en los cursos de control de pregrado.





Chopper reductor

- Primer caso. Filtro de primer orden en la carga.



- Generalmente la resistencia de carga (R_1) limita la corriente.
- Si no existe riesgo de sobrecorriente en la bobina se pueden evitar los lazos anidados.



Diseño del controlador

- Se asume que los armónicos de salida son bajos y se ignoran.
- Se diseña solo para las bajas frecuencias sintetizadas por el chopper en la carga.
- El conversor es el actuador sintetizando v_L

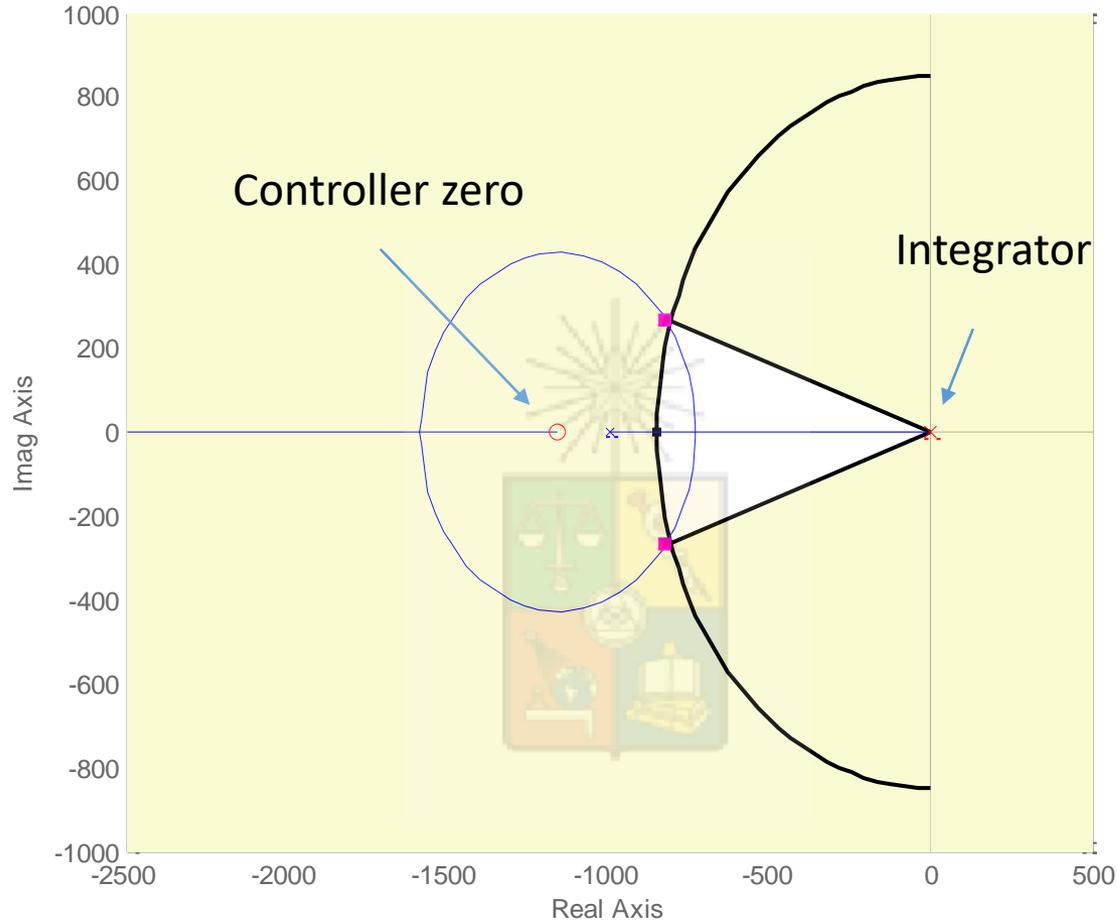
$$V_{out} = \frac{R_1}{sL_1 + R_1} \delta V_{in} = \frac{R_1}{sL_1 + R_1} V_L$$

- Utilizando 5mH y 10Ω se tiene el siguiente Root locus.



Root Locus

Root Locus Editor for Open Loop 1(OL1)

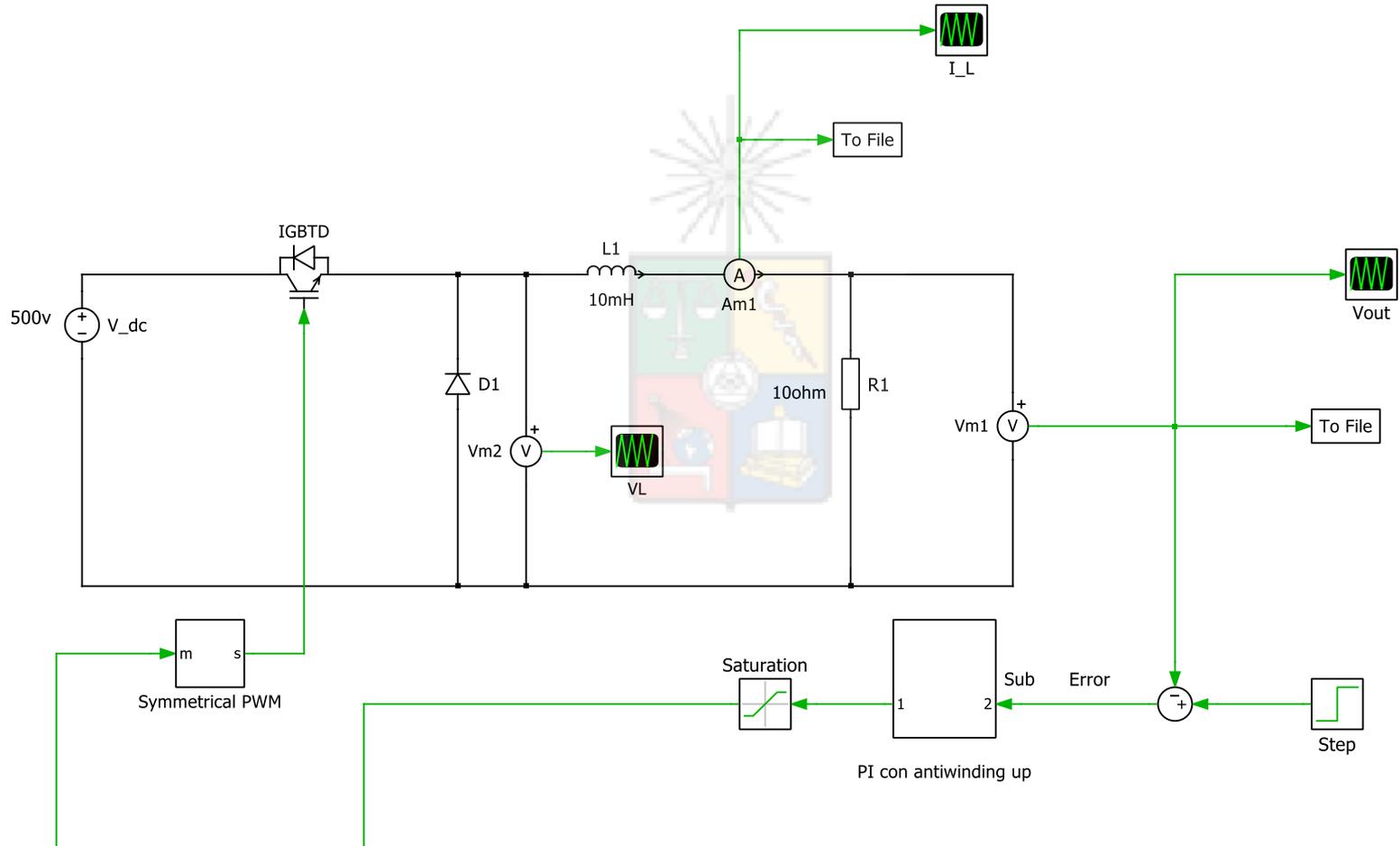


- Función de transferencia del controlador es:

$$G(s) = 0.65 \frac{s + 1160}{s}$$



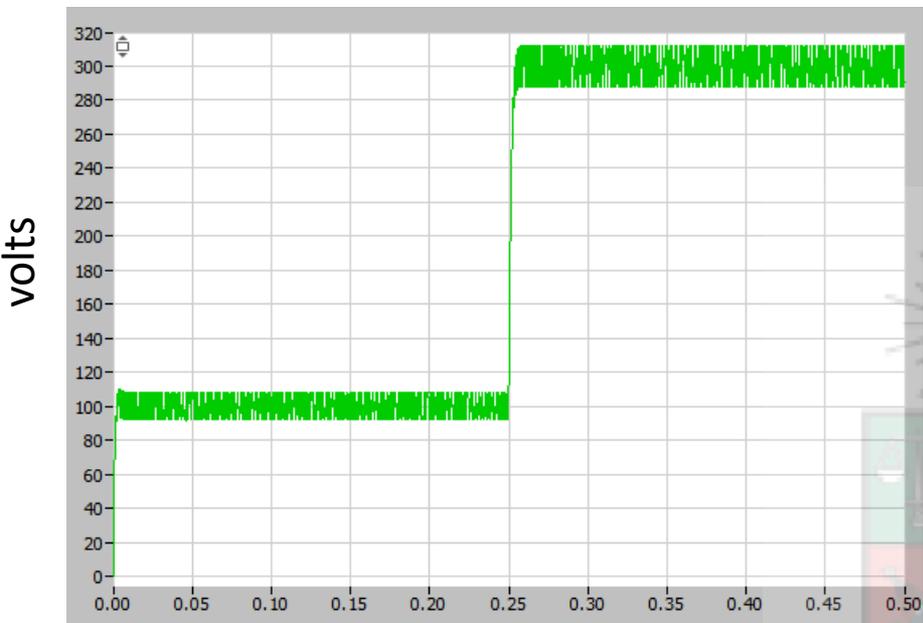
Diagrama de control (se entrega)





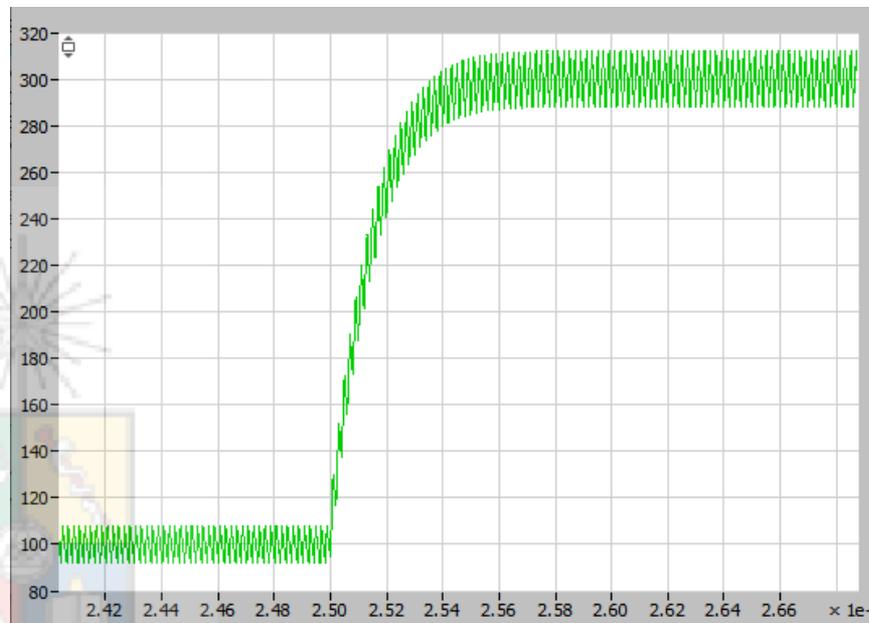
Resultados

Voltaje en la carga



Tiempo (s)

Vista ampliada



Tiempo (s)

El tiempo de establecimiento es aproximadamente 40ms



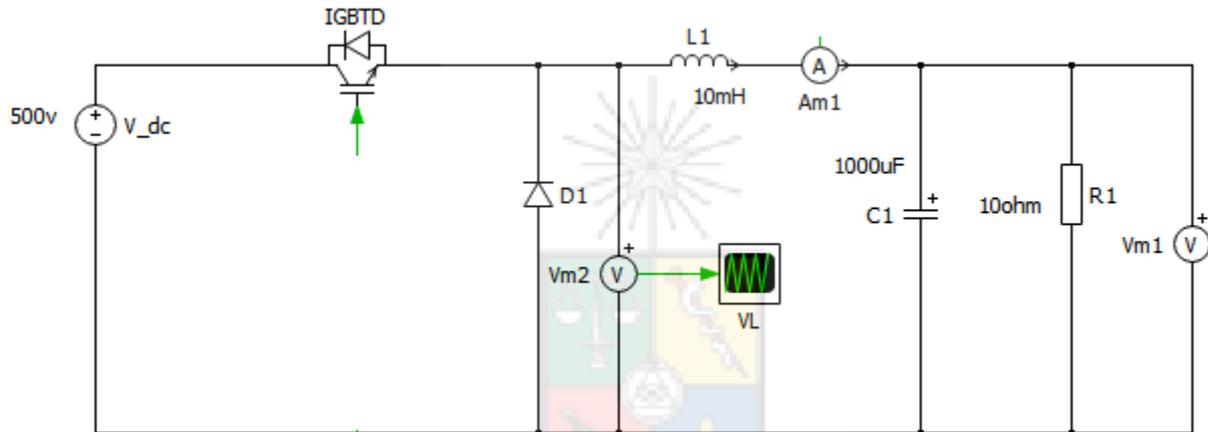
Análisis de la respuesta

- Se tiene una respuesta bastante rápida la cual habitualmente no es necesaria en una salida regulada de tensión. Se pueden implementar controladores mas lentos.
- Sin embargo, si el objetivo es controlar rápidamente la corriente (por ejemplo en el devanado de una máquina), esta topología es adecuada.
- Nótese el (relativamente) alto ripple en la salida. Esto se debe a que la bobina por si sola no es un buen filtro a menos que se aumente su valor (y su costo y tamaño).



Diseño del controlador

- Ahora se considerará un filtro de segundo orden en la salida.



- En este caso la salida no puede ser tan rápida debido al condensador en paralelo.
- El condensador, además de filtrar, estabiliza la carga ante perturbaciones externas.
- Si el condensador es muy grande puede ser necesario utilizar lazos anidados.



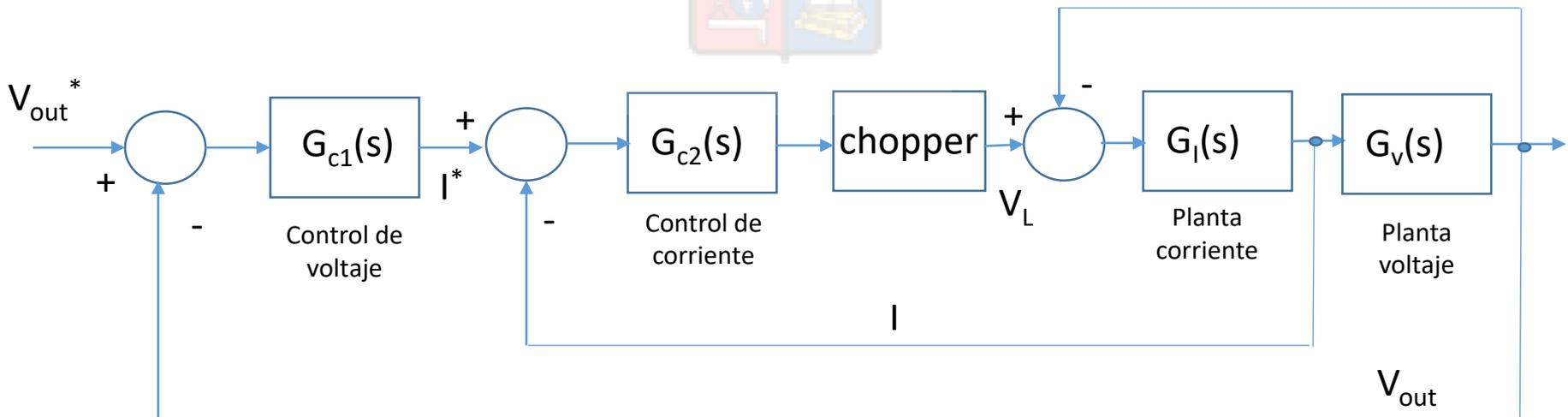
Diseño del controlador

- La planta del lazo de voltaje es:

$$G_v(s) = \frac{R_1}{sC_1R_1 + 1}$$

- La planta en el lazo de corriente (en la bobina) es:

$$G_I(s) = \frac{1}{sL + R_v}$$



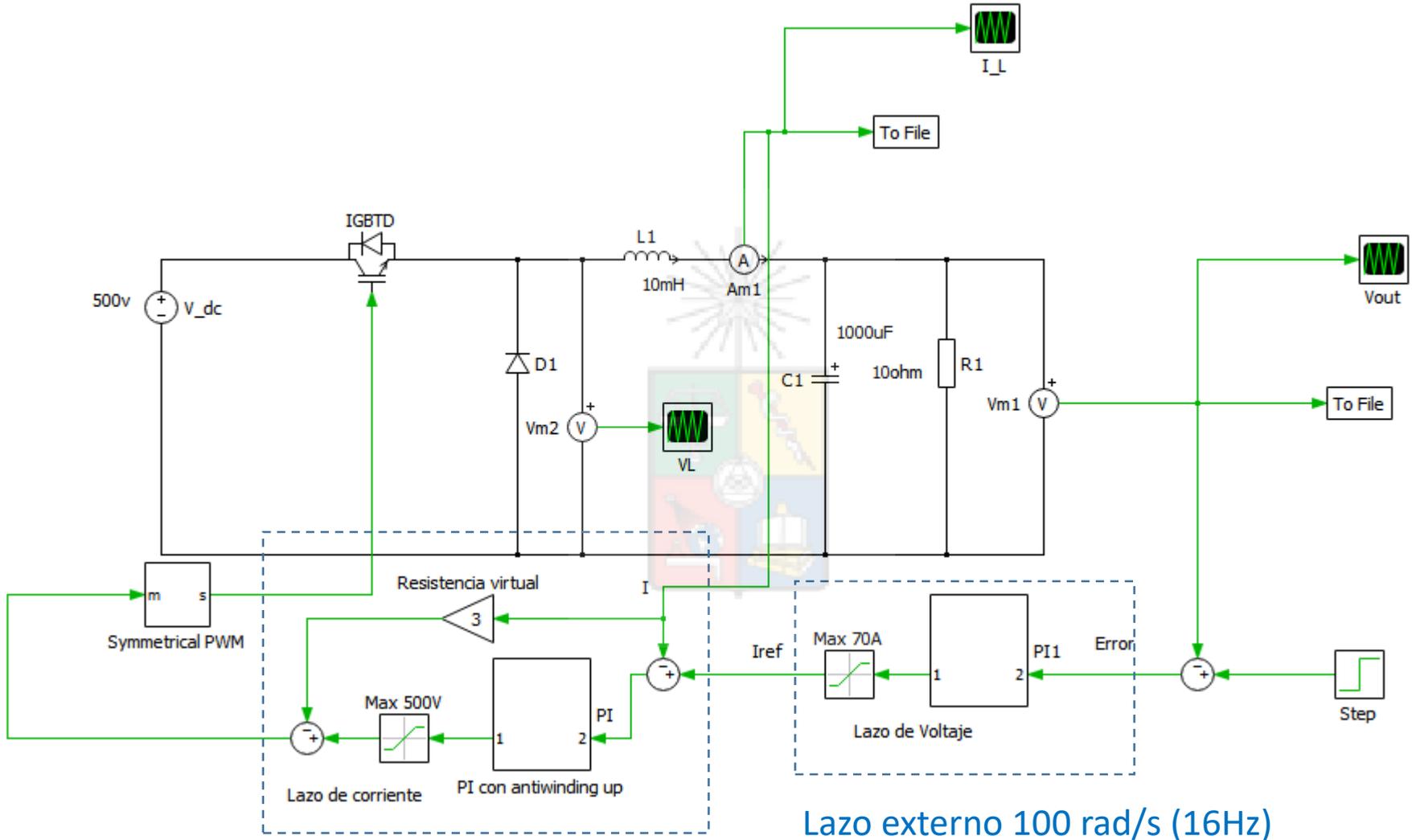


Diseño de los controladores

- Los parámetros son $L_1=10\text{mH}$, $R_1=10$ ohms $C_1=1000\mu\text{F}$. El parámetro R_v es una resistencia virtual (existe solo en el procesador) y en este caso se utilizará 2 ohms. Se asume que la máxima corriente en la bobina es de 70A.
- Controlador de corriente $G_{cI}(s) = 15 \frac{(s+800)}{s}$ (Root locus 1000rad/s, $\zeta=0.8$).
- Controlador de tensión $G_{cv}(s) = 0.06203 \frac{(s+164)}{s}$ (Root locus 100rad/s, $\zeta=0.8$).



Sistema de control



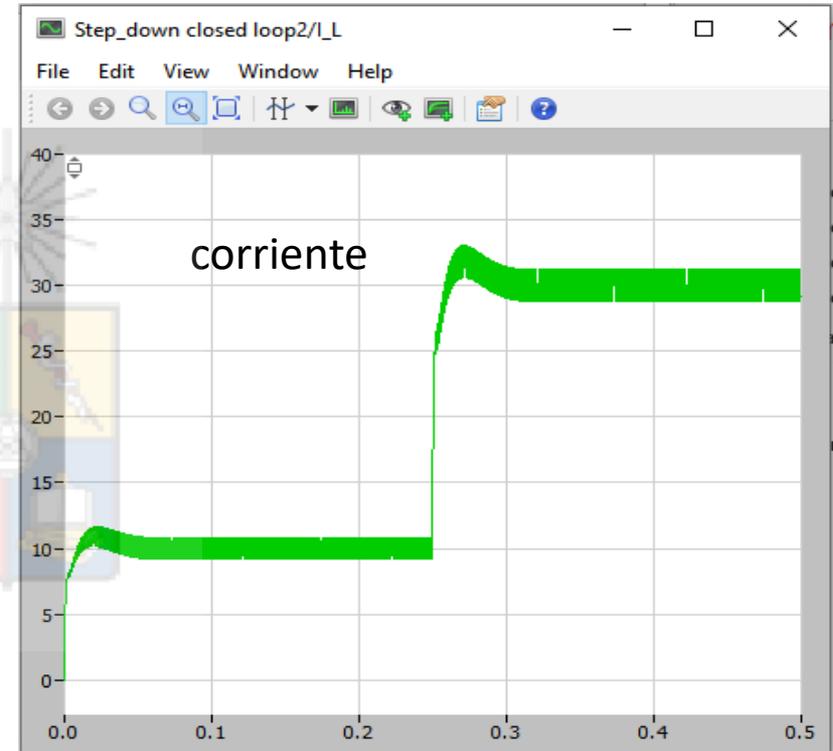
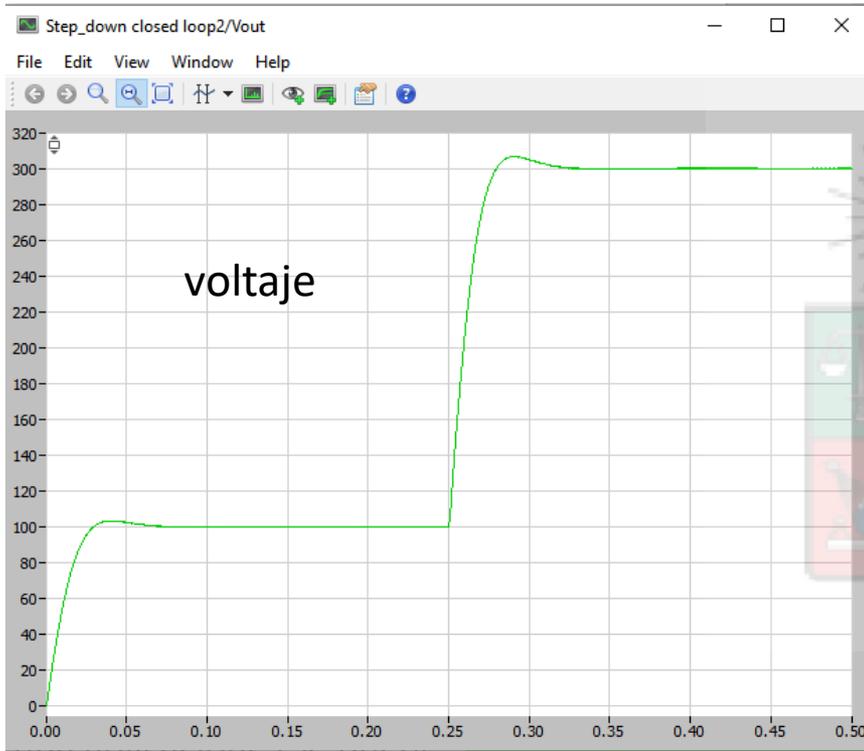
Lazo interno 1000 rad/s (160Hz)

Lazo externo 100 rad/s (16Hz)

Se incluye la resistencia virtual que en alguna aplicaciones se puede utilizar para mejorar el amortiguamiento del filtro LC (especialmente con baja carga)



Resultados



La calidad de la señal de voltaje es bastante más alta con prácticamente cero ripple. Sin embargo el tiempo de establecimiento es de aproximadamente 75ms.

