

## 1. Modulación PWM y realimentación

### 1.1. Amplificador de error

#### a) Valores de $R_2$ y $R_3$ si $V_o = 25VDC$

Como  $V_{FB}$  es el divisor de tensión de  $V_o$  y se busca cumplir  $V_{FB} = V_{REF}$ , se obtiene:

$$V_{FB} = V_{REF} = V_o \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad (1)$$

Depejando de la ecuación (1) y suponiendo que  $R_3 = 10k\Omega$ , obtenemos:

$$R_2 = R_3 \cdot \left( \frac{V_o}{V_{REF}} - 1 \right) = 90k\Omega \quad (2)$$

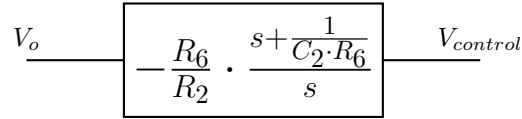
#### b) Transferencia $\frac{\tilde{v}_c(s)}{\tilde{v}_o(s)}$ para pequeñas variaciones

La transferencia a pequeñas variaciones del amplificador de error se obtiene analizando el inversor con  $Z_1 = R_2$  y  $Z_2 = R_6 + \frac{1}{sC}$ . Esto se debe a que a pequeñas variaciones, tanto la fuente de tensión  $V_2$  como la fuente de corriente  $I_1$  se pasivan.

$$\frac{\tilde{v}_c(s)}{\tilde{v}_o(s)} = - \frac{R_6 + \frac{1}{sC_2}}{R_2} \quad (3)$$

#### c) Amplificador de error como bloque de un sistema LTI. Ganancia, Polos y Ceros

Reacomodando la ecuación (3), el diagrama en bloque resulta:



El amplificador de error cuenta con una ganancia  $G_{amp} = \frac{R_6}{R_2} = \frac{1}{9}$ , un polo en  $f_p = \frac{1}{2\pi \cdot C_2 \cdot R_6} = 159.15Hz$  y un cero en el origen.

#### d) Conjunto fuente de corriente $I_1$ y $R_7$

La fuente de corriente  $I_1$  genera sobre la resistencia  $R_7$  una caída de tensión que marca el punto de operación con que queremos trabajar. En el caso del circuito que estamos analizando, esa tensión es  $V_{control} = 12V$ .

Cuando se compara  $V_{FB}$  con  $V_{REF}$  a la entrada del amplificador de error, se obtiene una diferencia. Dicha diferencia es la que nos determina cuánto nos movemos del punto de operación antes mencionado. Se trabaja alrededor de ese punto porque es el que nos determina el duty requerido a la salida.

### 1.2. Modulación PWM

#### a) Características de la señal triangular

Como podemos observar, la señal triangular que se le inserta en el terminal negativo al amplificador U1 es una señal triangular con un período de  $20 \mu s$  (50kHz) y una tensión pico  $V_p = 19V$ . Posee un tiempo de rise  $t_r = 19\mu s$  y un tiempo de caída  $t_f = 500ns$ . Con estos valores, podemos establecer que tiene un duty cycle de:  $d_t = \frac{t_r}{T} = 0.95$ .

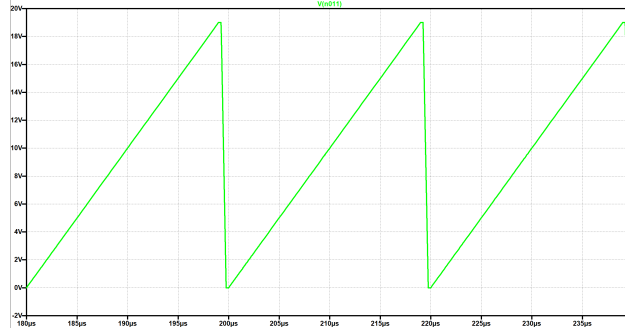


Figura 1: Señal triangular.

### b) Duty cycle máximo

Para obtener el duty cycle máximo que puede obtener CompOut, debemos primero calcular la tensión de la señal triangular en el tiempo. Dicha tensión se puede expresar de la siguiente manera:

$$V_{Triang}(t) = \frac{V_{maxTriang}}{T_s} \cdot t \quad (4)$$

Sabiendo que el duty cycle es  $d = \frac{t}{T_s}$ , y que el máximo duty se da cuando la tensión de la señal triangular es igual a la tensión de saturación del amplificador, por lo que la ecuación queda de la siguiente manera:

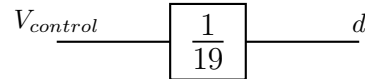
$$V_{satOpamp} = d \cdot V_{maxtriang} \Rightarrow d = \frac{V_{satOpamp}}{V_{maxTriang}} = \frac{15V}{19V} = 0.79 \quad (5)$$

### c) Modulador PWM como bloque de un sistema LTI.

Para modelar el PWM como un bloque de un sistema LTI, primero debemos hallar su transferencia  $\frac{d}{V_{ComOut}}$ . Partiendo de la ecuación previa de la diente de sierra, podemos despejar el tiempo y, dividiendo por el período de la señal, encontramos la siguiente transferencia:

$$\frac{d}{V_{control}} = \frac{1}{V_{maxTriang}} = \frac{1}{19} \quad (6)$$

De esta forma, el bloque queda conformado de la siguiente forma:



## 1.3. Convertidor DC/DC

### a) Función transferencia del convertidor

Considerando el diodo y el MOS como ideales, comenzamos analizando el espacio de estados. Durante el tiempo que la llave se encuentra cerrada (SW=ON) obtenemos:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{i}_{L_1} \\ \dot{V}_{C_1} \end{bmatrix}}_{\dot{X}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_L \cdot C_1} \end{bmatrix}}_{A_{on}} \underbrace{\begin{bmatrix} i_{L_1} \\ V_{C_1} \end{bmatrix}}_X + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_{on}} V_1 \quad (7)$$

$$V_o = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}}_{C_{on}} \begin{bmatrix} i_{L_1} \\ V_{C_1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Por otro lado, durante el tiempo que la llave se encuentra abierta (SW=OFF), se obtiene que:

$$A_{off} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_L \cdot C_1} \end{bmatrix} \quad B_{off} = B_{on} \quad C_{off} = C_{on} \quad (9)$$

A continuación se calcula el promedio ponderado de las matrices de estado:

$$\bar{A} = A_{on} \cdot d + A_{off} \cdot (1 - d) \quad \bar{B} = B_{on} = B_{off} \quad \bar{C} = C_{on} = C_{off} \quad (10)$$

Finalmente, utilizando la ecuación provista por la cátedra en la clase de Transferencias y reemplazando los valores obtenidos anteriormente obtenemos la transferencia deseada.

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{d}(s)} = \bar{C} \cdot (s \cdot I - \bar{A})^{-1} [(A_{on} - A_{off})X(s) + (B_{on} - B_{off})V_1] + (C_{on} - C_{off})X(s) \quad (11)$$

Donde  $X(s)$  es el vector en estado estacionario:

$$X(s) = \begin{bmatrix} i_{L1} \\ V_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I_o}{1-d} \\ \frac{V_1}{1-d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_1}{R_L(1-d)^2} \\ \frac{V_1}{1-d} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{V_1}{(d-1)^2} \cdot \frac{\frac{(d-1)^2}{L_1 \cdot C_1} - s}{s^2 + \frac{1}{R_L \cdot C_1}s + \frac{(d-1)^2}{L_1 \cdot C_1}} \quad (13)$$

El sistema cuenta con dos polos complejos conjugados en el semi-plano izquierdo y un cero real en el semi-plano derecho.

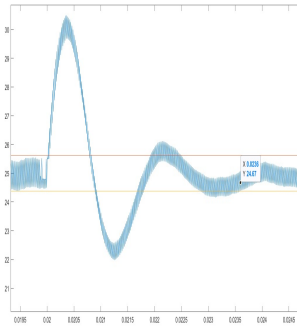
### b) Valor real del Duty cycle

El valor real de duty cycle es  $d_{real} = 0.56$  mientras que el ideal es  $d_{ideal} = \frac{V_o - V_1}{V_o} = 0.6$ .

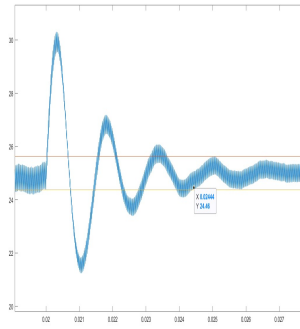
El duty real no coincide con el ideal por el efecto de los componentes reales. Cuando aumentamos la carga, aumenta el valor medio de la corriente de la inductancia, por lo que la caída de tensión en el diodo es mayor. Del mismo modo, la caída de tensión en la inductancia también aumenta. Sumado a lo anterior, tenemos los efectos de la  $ESR_L$ . Todo esto contribuye a que la tensión de salida  $V_o$  se aleje del valor deseado y el duty teórico no sea el requerido en la práctica.

hay algo que  
no me cierra  
aca

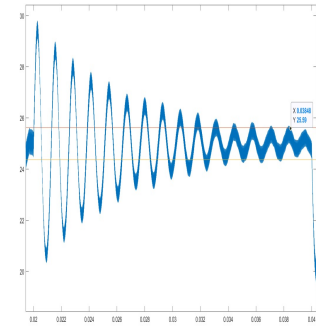
### c) Tiempos de establecimiento ante los cambios de carga



(a) Con  $R_6 = 1k\Omega$



(b) Con  $R_6 = 10k\Omega$



(c) Con  $R_6 = 22k\Omega$

Figura 2: Tiempos de establecimiento ante los cambios de carga

Los tiempos de establecimiento resultantes son:

$$t_e(R_6 = 1k\Omega) = 3.6mseg \quad t_e(R_6 = 10k\Omega) = 4.44mseg \quad t_e(R_6 = 22k\Omega) = 18.48mseg \quad (14)$$

A medida que el cero del amplificador de error se acerca al origen, el tiempo de establecimiento aumenta.

### d) Diagramas de Bode