



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL DE CÓRDOBA

**Trabajo Práctico De Laboratorio N°8**  
**Driver de motor de DC**

Alassia, Francisco	60861
Amaya, Matías	68284
Lamas, Matías	65536
Navarro, Facundo	63809
Veron, Misael	62628

Curso: 5r2  
Grupo N°11

**Electrónica de Potencia**

Docentes:  
Ing. Oros, Ramón  
Ing. Avramovich, Javier

5 de marzo de 2020

## 1. Marco Teórico

Las máquinas de corriente continua son bastante usadas en sistemas de control en lazo cerrado, en particular para el control de velocidad y torque. Existen máquinas de diversos tamaños, comenzando a partir de unos cuantos Watts accionados por amplificadores electrónicos, a varios cientos de kilovatios accionados por generadores Ward-Leonard. Los servomotores de bajo consumo de potencia se usan a menudo en instrumentación, particularmente en sistemas de control de aviones, donde limitaciones de peso y espacio requieren de motores que provean el máximo de potencia por unidad de volumen. Un cuerpo conductor que transporta corriente, cuando es inmerso en un campo magnético, experimenta una fuerza proporcional a la magnitud del flujo, la corriente, la longitud del conductor y el ángulo entre el conductor y la dirección del flujo. Cuando el conductor se localiza a una distancia fija de un eje, con respecto al cual puede rotar, se genera un torque proporcional al producto de la fuerza y el radio. En un motor, el torque resultante es la suma de torques producidos por conductores individualmente. Para un rotor dado las únicas dos cantidades que se pueden manipular son la corriente de armadura y el flujo. Luego, existen dos modos de operación de un motor DC:

- Modo por armadura controlada
- Modo por campo controlado

### 1.1. Modelo equivalente del Motor CC

La Fig. 2 muestra el circuito equivalente de un motor de corriente continua de excitación independiente en lazo abierto.

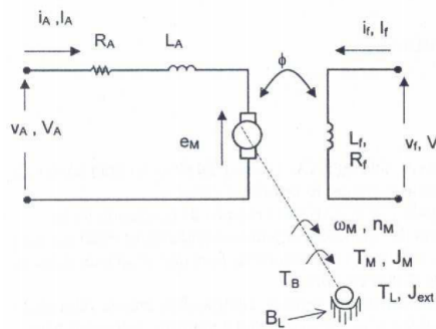


Figura 2: Circuito equivalente de un motor DC

Donde:

- $V_a$ = Tensión aplicada al inducido [V]
- $i_a$ = Corriente en el inducido [A]
- $i_f$ = Corriente en el devanado del campo [A]
- $e_m$ = Tensión Contraelectromotriz Inducida [V]
- $\omega$ = Velocidad Angular del Motor [rad/s]
- $\phi_f$ = Flujo de campo [Nm/a]
- $R_a$ = Resistencia Total del Inducido [ $\Omega$ ]
- $L_a$ = Autoinductancia Total del Inducido [H]
- $L_f$ = Autoinductancia total del campo rotante [H]
- $L_{af}$ = Inductancia Mutua entre el Campo y el Devanado de la Armadura Rotante [H]
- $T_M$ = Torque desarrollado por el Motor [Nm]



- $T_L$  = Torque de la Carga Reflejada al Eje del Motor [Nm]
- $T_B$  = Torque de Aceleración [Nm]
- $J_M$  = Momento de Inercia del Motor [ $Kg * m^2$ ]
- $J_{ext}$  = Momento de Inercia Externo Reflejado al Eje del Motor [ $Kg * m^2$ ]
- $B$  = Coeficiente de Rozamiento Viscoso [ $\frac{Nm}{rad/s}$ ]
- $c_M$  = Constante del Motor [Nm/A]

El momento de inercia total reflejado al eje del motor es:

$$J_T = J_M + J_{ext} \quad (1)$$

El torque depende de la corriente en la armadura y el flujo de campo ( $T_M \propto I_a \varphi_f$ ).

## 1.2. Modos de Operación de Motor CC

Se define el cuadrante de operación del motor, el plano cuyo eje de abscisa es el torque o el valor medio de la corriente de la armadura del motor, y el eje de ordenada es la velocidad del motor o  $e_M$  si opera por control de armadura con campo constante.

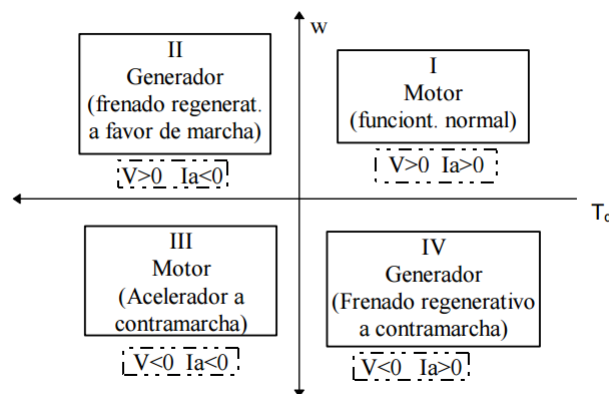


Figura 3: Cuadrantes de Operación

Cuadrante	Torque $T_M$ o $I_a$	Velocidad o $e_M$	Sentido de rotación	Aceleración
<i>I</i>	$> 0$	$> 0$	Positivo	Positiva
<i>II</i>	$< 0$	$> 0$	Positivo	Negativa
<i>III</i>	$< 0$	$< 0$	Negativo	Positiva
<i>IV</i>	$> 0$	$< 0$	Negativo	Negativa

Cuadro 1: Modos de Operación del Motor

### 1.2.1. Operación en un solo cuadrante

La Figura 4 muestra un circuito para operar en un solo cuadrante (también llamado Clase A), y cuenta con un transistor y un diodo. En este caso, el diodo de corrida libre D tiene una función importante, como en todo convertidor BUCK.

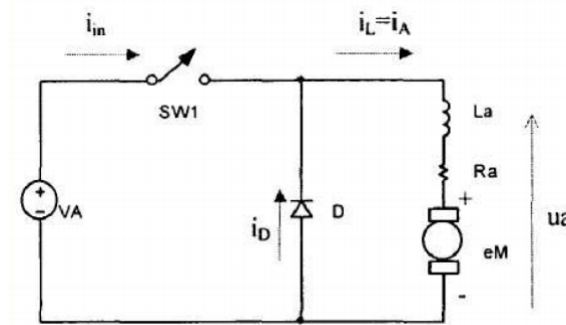


Figura 4: Convertidor Clase A

Cuando se cierra el interruptor, se aplica la tensión de la fuente hacia la carga en modo de transferencia directa, y el diodo D queda polarizado en sentido inverso. En este intervalo de tiempo, la corriente crece en forma de rampa a través de  $R_a$ ,  $L_a$  y  $e_M$ .

Cuando el interruptor se abre, la  $e_M$  se aplica en  $R_a$  y  $L_a$  debido a que el diodo D se polariza en forma directa y evita la discontinuidad de corriente. Si la resistencia de la armadura es significativa y la frecuencia de conmutación es baja, la corriente tendrá una forma exponencial. En esta topología se pueden distinguir dos modos de operación:

- Régimen de conducción continua del inductor CCM.
- Régimen de conducción discontinua del inductor DCM.

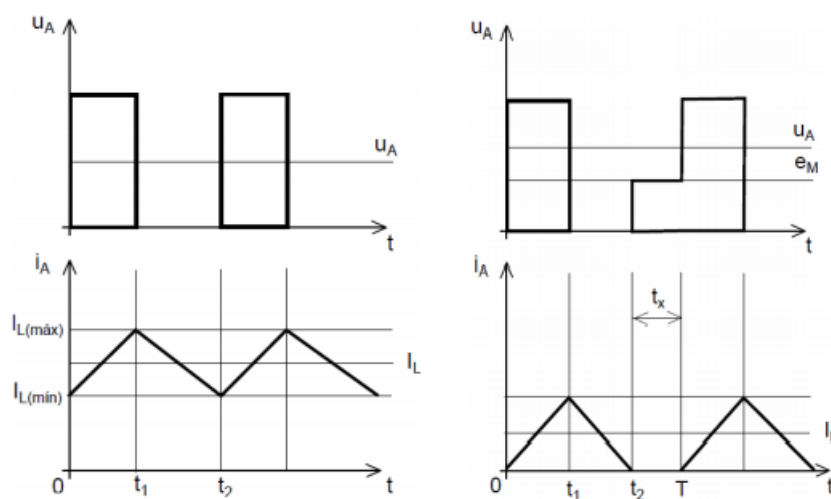


Figura 5: Régimen de Conducción Continuo y Dicontinuo

## 2. Enunciado

En el presente práctico se realiza la simulación de un driver de motor de corriente continua. El análisis se realiza mediante el entorno de programación Simulink. Para poder realizar el control del motor, se utiliza el circuito de la Fig. 6.

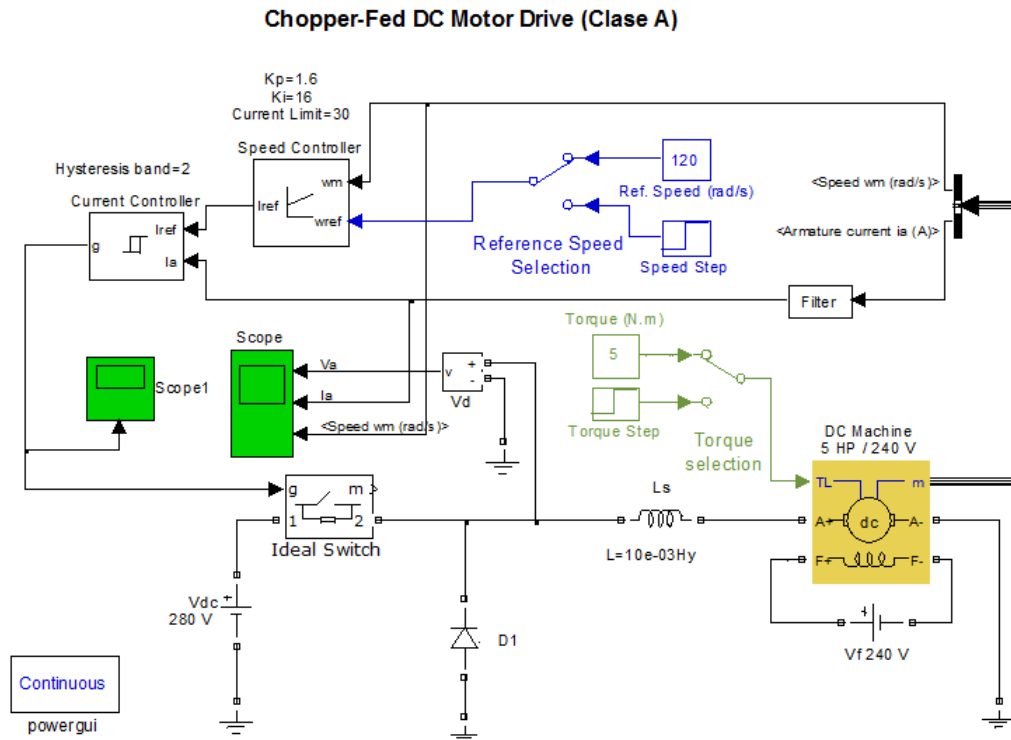


Figura 6: Circuito de Simulación

El motor de DC está alimentado por un chopper de DC con MOSFET operando en clase A. La carga mecánica esta caracterizada por un escalón de carga TL; o un valor fijo.

El controlador de corriente de histéresis compara la corriente sensada con una referencia y genera la señal de compuerta del interruptor ideal forzando al motor a seguir la corriente de referencia.

El circuito es de lazo cerrado. El lazo de velocidad utiliza un controlador PI que produce la referencia para el lazo de corriente (par).

El bloque de Voltage Measurement provee señal para los propósitos de visualización.

## 3. Simulación

En un principio se establece que la velocidad del motor sea de 120 [rad=s] y que el Torque de carga sea de 5 [Nm]. Una vez estabilizado el sistema, en un instante de tiempo igual a un segundo, se varía la velocidad del motor a 160[rad=s] mediante el bloque de control "Speed Step". Por último se cambia el par a un valor de 25[Nm] en un instante de tiempo igual a  $t = 1;5[\text{Seg}]$ . Estas pruebas se realizan para conocer como es la respuesta del motor en función de distintas variables.

### 3.1. Tensión del Motor [V]

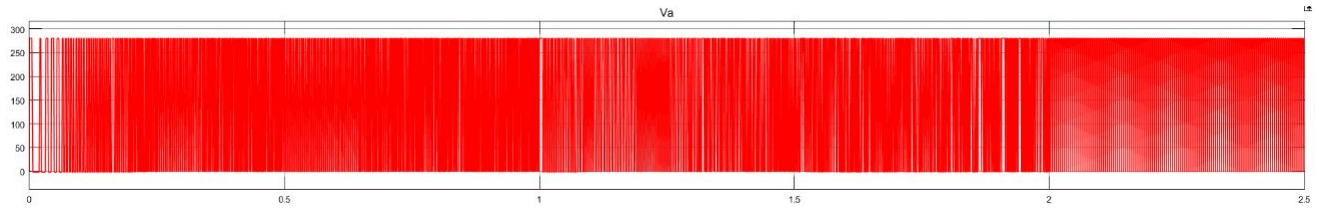


Figura 7: Tensión  $V_a$

### 3.2. Corriente del Motor [I]

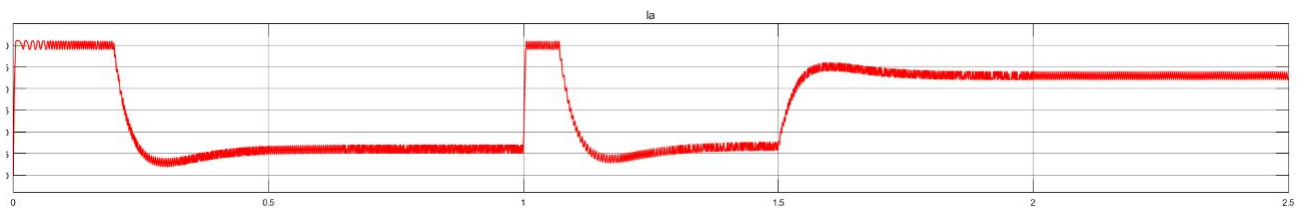


Figura 8: Corriente  $I_a$

### 3.3. Velocidad del Motor [rad/s]



Figura 9:  $\Omega_m$  [rad/s]

### 3.4. Medición de la Constante de Tiempo Eléctrica $T_e$

Es muy importante comprender el significado de las constantes de tiempo del motor. La constante de tiempo eléctrica  $\tau_e$  determina la rapidez en llegar a su valor estacionario la corriente de la armadura en respuesta a un cambio de la tensión de armadura, donde la velocidad del motor se considera aproximadamente constante.

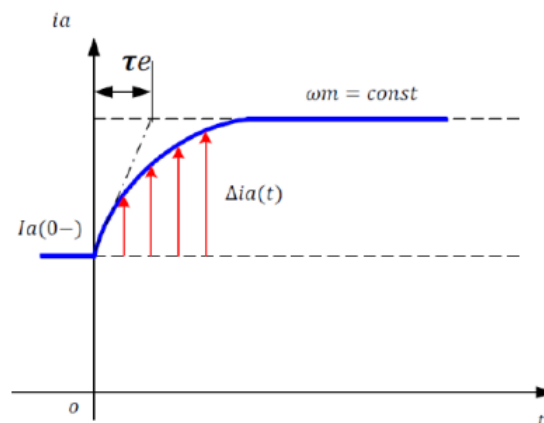


Figura 10: Constante de tiempo Eléctrica  $\tau_e$  (Asumiendo Velocidad Constante)

$\tau_e$  se calcula como induce la Ecuación 2:

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} = \frac{10mH}{0,5\Omega} = 20[mS] \quad (2)$$

Para la medición de la constante de tiempo, se parte de la función de transferencia del motor controlado por armadura:

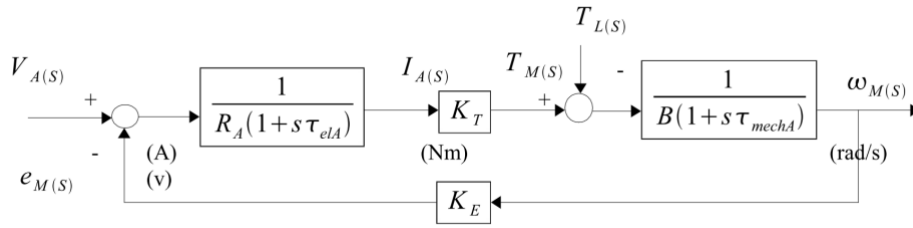


Figura 11: Diagrama en Bloque de un Motor controlado por Armadura

Para medir la constante  $\tau_e$  es necesario reordenar el sistema como puede verse en la Figura 12, considerando que no existe un torque de carga y que la función de transferencia total relaciona la corriente de armadura con la tensión de armadura aplicada. La ganancia de paso directo corresponde a un sistema de primer orden, por lo tanto si se anula el efecto de realimentación, se puede medir la constante de tiempo eléctrica del sistema a partir del análisis de la respuesta transitoria de la corriente de armadura al aplicar un escalón de tensión de armadura de entrada.

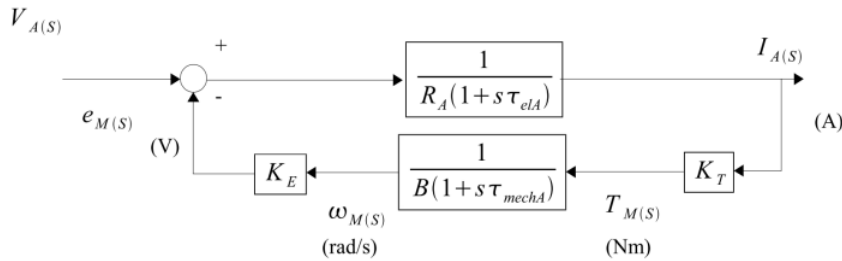


Figura 12: Diagrama de bloques del Motor para obtener  $\tau_e$

Para obtener la constante  $\tau_e$  a través de la simulación, se utiliza el circuito de la Figura 13 y se tienen en cuenta las siguientes condiciones:

- El par de carga  $T_L$  se hace igual a cero.
- Se aumenta el coeficiente de rozamiento viscoso hasta un valor igual a 2000 [N.m.s].
- Se mide la constante de tiempo eléctrica cuando la corriente de la armadura, llega a valor de  $0.603 i_A$ .

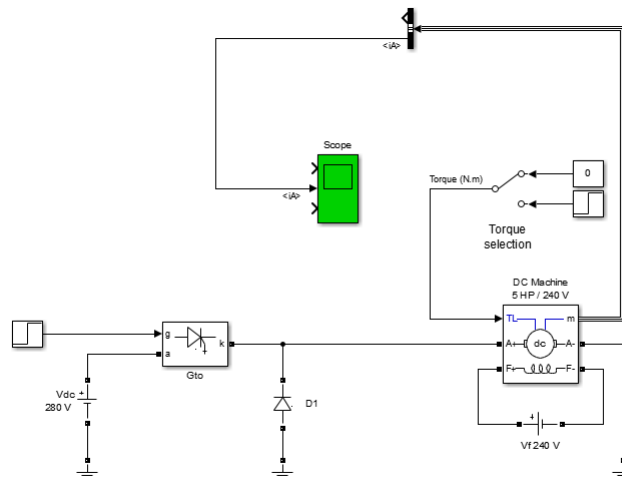


Figura 13: Circuito utilizado

En la siguiente figura se puede observar cómo es la respuesta temporal de la corriente de armadura:

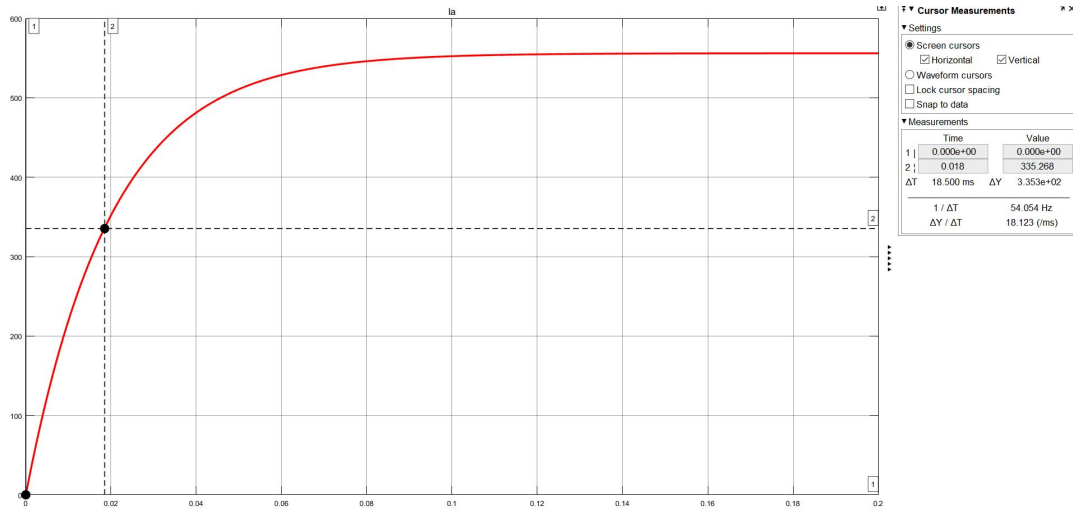


Figura 14: Simulación obtenida

La constante de tiempo eléctrica obtenida mediante simulación fue de 18.5 [mS], de valor aproximado al obtenido en la Ecuación 2.

### 3.5. Medición de la Constante de Tiempo Mecánica $\tau_M$

La constante de tiempo mecánica determina que tan rápido llega la velocidad  $\omega_m$  a su valor estacionario, en respuesta a un cambio de la tensión de armadura.

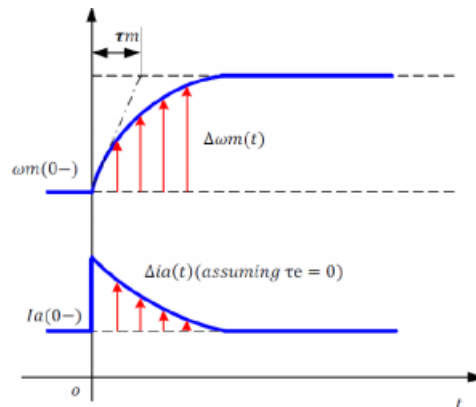


Figura 15: Constante de Tiempo Mecánica (Asumiendo Torque Constante)

Utilizando la Ecuación 3 es posible determinar analíticamente la constante de tiempo  $\tau_M$ :

$$\tau_M = \frac{J_T}{B} = \frac{0,05}{0,02} = 2,5[s] \quad (3)$$

Para realizar la medición de la constante de tiempo mecánica, se reordena el sistema como se muestra en la Figura 16 considerando que no existe la tensión de armadura de entrada  $V_a$  y que la función de transferencia relaciona la velocidad angular con el torque aplicado en el eje.



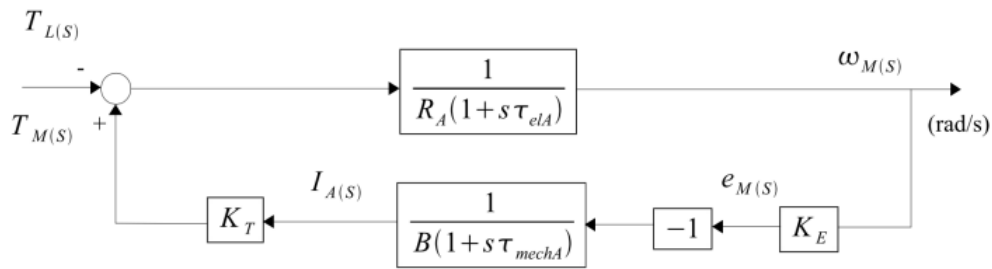


Figura 16: Diagrama en bloques del Motor para obtener  $\tau_M$

Se puede observar que la ganancia de paso directo corresponde a una ecuación de primer orden. Además se coloca en serie con el circuito de la armadura una resistencia de elevado valor. Esto equivale a dejar el circuito abierto mientras se aplica un torque constante al motor y se observa el comportamiento de la velocidad.

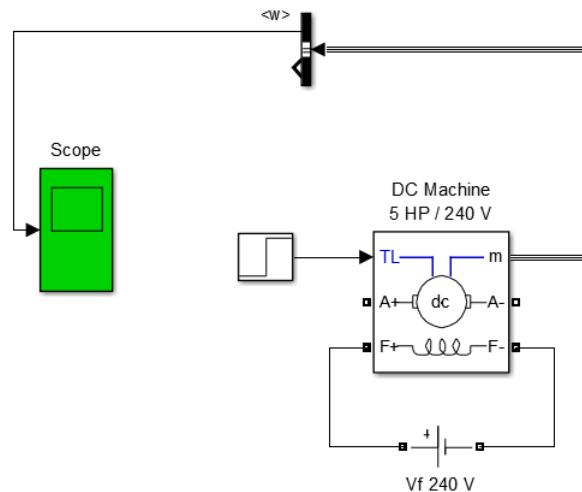


Figura 17: Circuito utilizado

El resultado de la simulación se observa en la Figura 18.

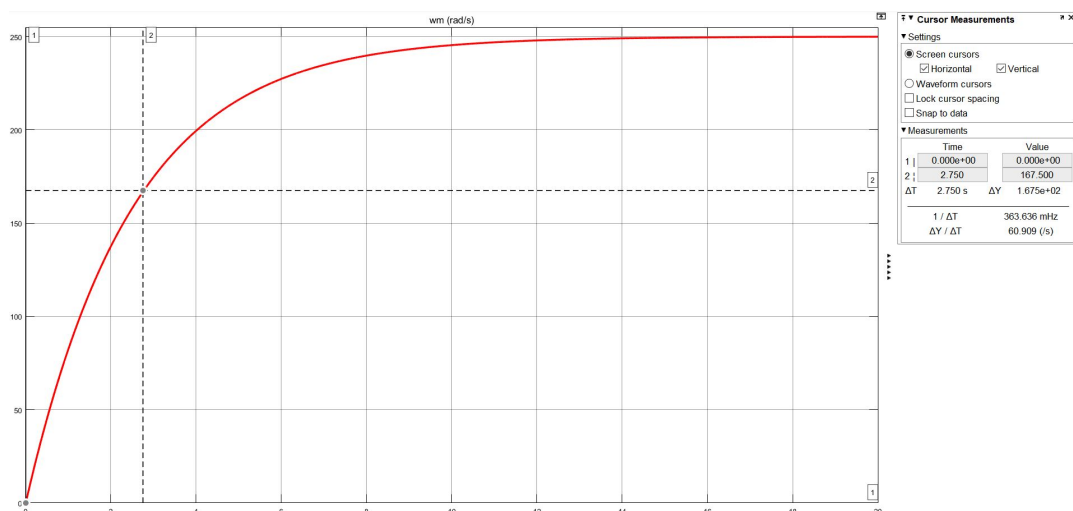


Figura 18: Simulación obtenida

La constante de tiempo mecánica obtenida mediante simulación fue de 2.75 [S], de valor aproximado al obtenido en la Ecuación 3.

### 3.6. Cambio en el límite de Corriente

En este caso lo que hacemos es cambiar el límite de corriente en el controlador, de su valor original (30A) a un valor de (50A). El efecto obtenido es un aumento en la velocidad de respuesta mecánica del sistema por que al consumir más corriente, se incrementará el toque y el rotor tendrá mayor velocidad. Al aumentar la velocidad la constante de tiempo mecánica disminuirá mientras que la eléctrica será la misma. Esta variación se puede observar en la Figura 20 donde la pendiente de la velocidad es más abrupta que para la Figura 19, donde se corresponde a 30A máximo.

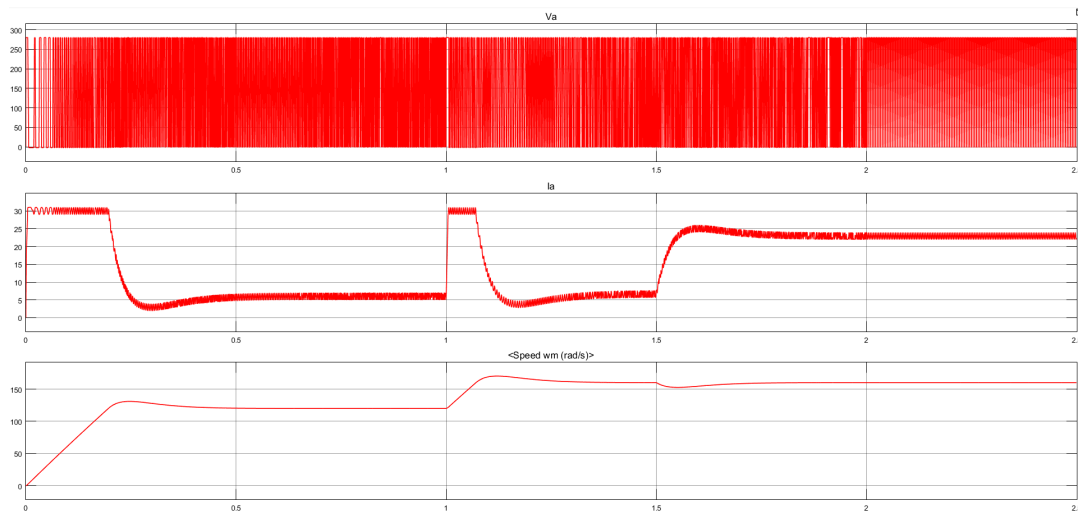


Figura 19: Límite de corriente del controlador = 30A.

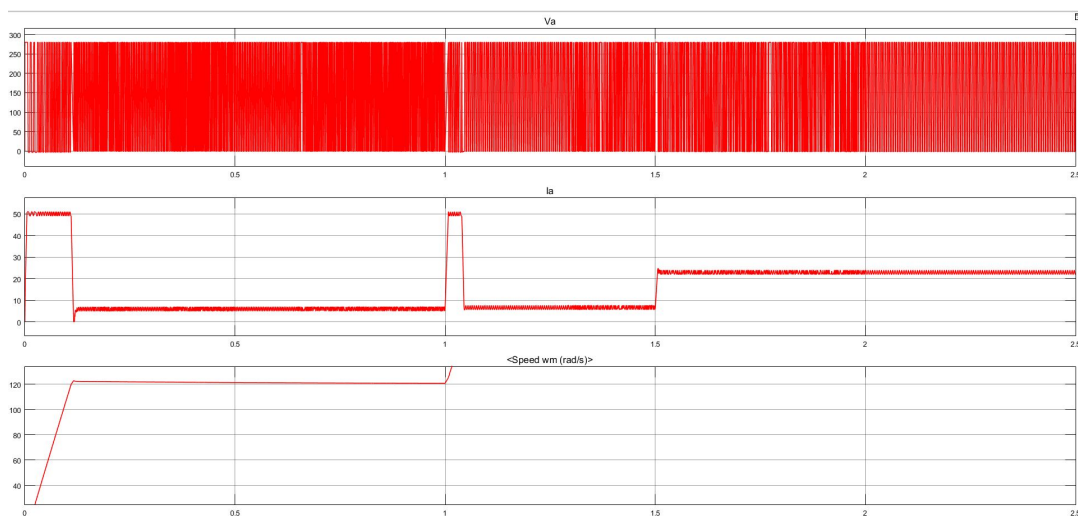


Figura 20: Límite de corriente del controlador = 50A.

### 3.7. Sintonización del controlador

Con el fin de obtener la sintonización más óptima del motor se modifica la ganancia proporcional  $K_p$  y la ganancia integral  $K_i$ . Luego de realizar varias pruebas, la mejor sintonización lograda se da con los siguientes valores:

- $K_p=20$
- $K_i=50$

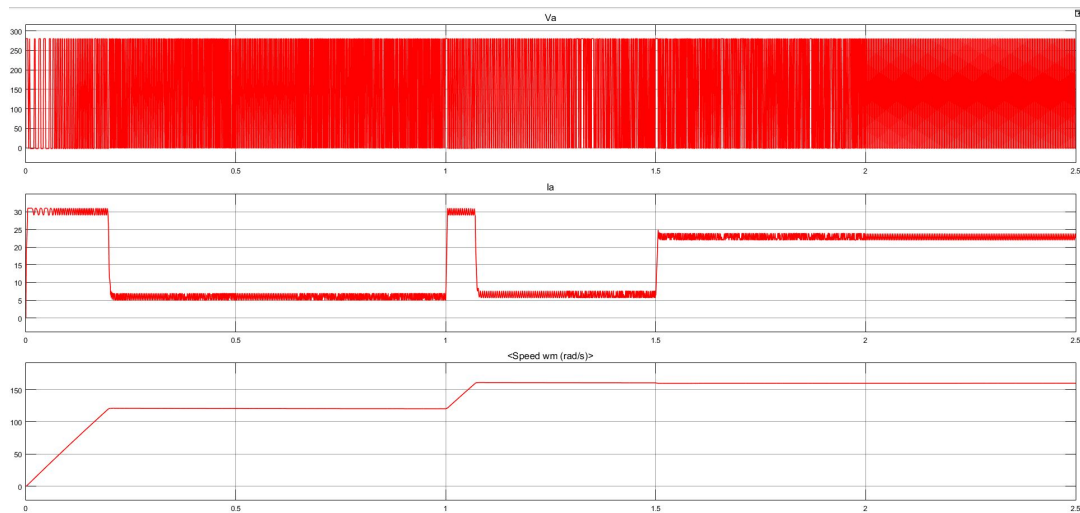


Figura 21: Resultado de Simulación con Controlador PI ajustado

## 4. Conclusión

En el presente práctico se realizó un análisis de un driver clase A para un motor de corriente continua. Según las mediciones realizadas, las constantes de tiempo eléctrica y mecánica se aproximan a los valores analíticos calculados en la sección 3.4 y 3.5. Un aspecto importante a destacar es que la constante de tiempo eléctrica depende del driver y de las características eléctricas del motor, mientras que la constante de tiempo mecánica se ve influenciada por parámetros como el momento de inercia y la fricción propia del motor.

Partiendo de la ecuación general de Torque de un motor, se puede deducir que el motor comienza a girar cuando el par del motor supera al par de carga. También se puede observar que cuando la velocidad de giro del motor se estabiliza ( $\frac{d\omega_m}{dt} = 0$ ), el par del motor se iguala al par de carga.

$$T_M = T_L + J_T \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4)$$

Donde  $T_M$  es el torque del motor,  $T_L$  el par de carga,  $J_T$  es el momento de inercia y  $\omega_m$  la velocidad angular. En los sistemas de control de motores de corriente continua, se utiliza generalmente un compensador proporcional-integrador PI, donde la correcta elección de sus ganancias  $K_p$  y  $K_i$  mejoran la respuesta del sistema. Con estos valores de ganancia obtenidos en la sección 3.6, se obtiene un menor sobreimpulso y un menor tiempo de establecimiento en cuanto a la velocidad  $\omega_m$ .