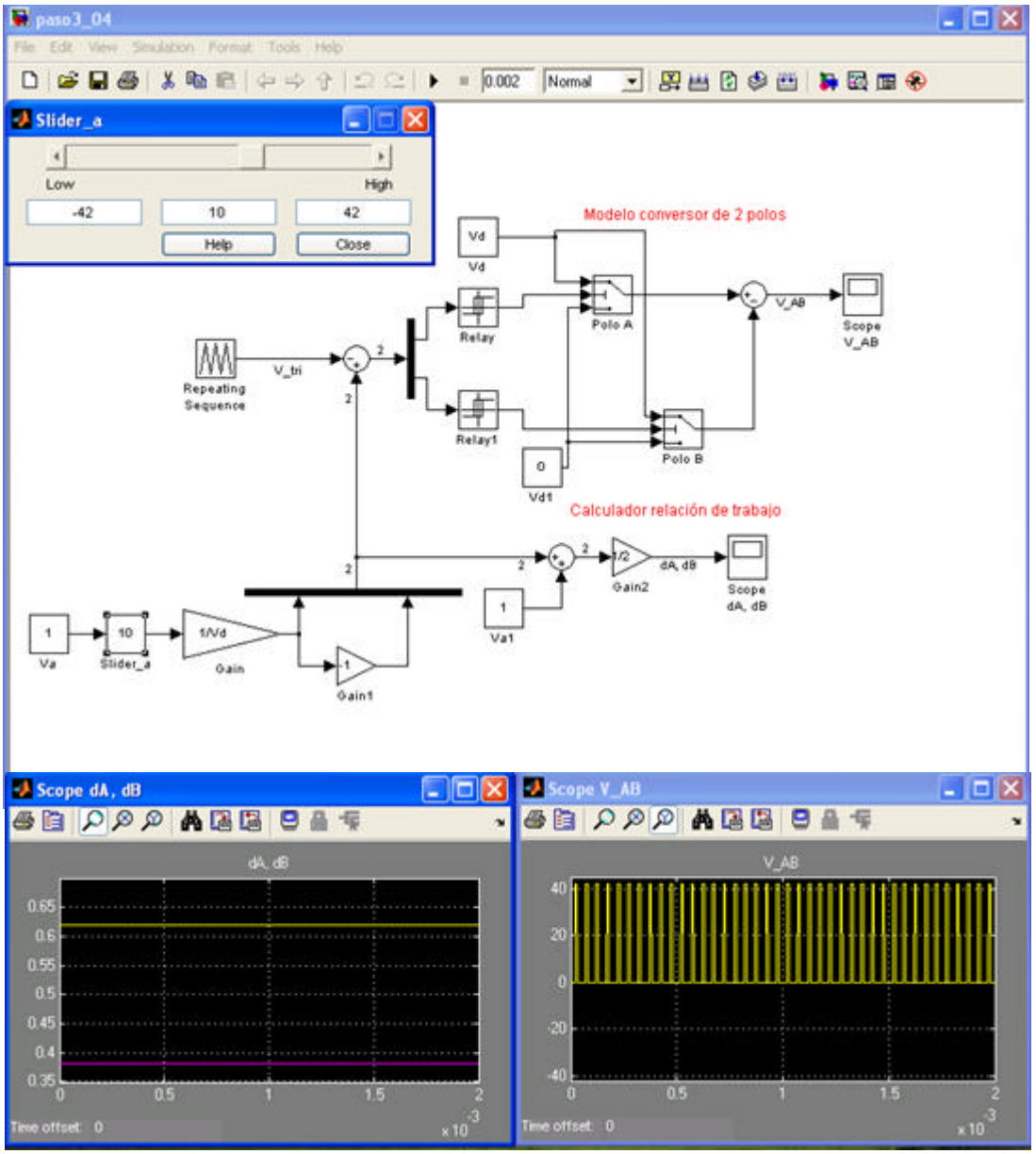


Figura 3.3: Modelo del conversor de conmutación de dos polos en Simulink

3.2.4 Resultados de la Simulación

Una vez que el sistema esté listo, para el conversor conmutado de 2 polos

- Función de conmutación q(t) para un inversor de polo simple.
- Resultados de la simulación del modelo del conversor conmutado de dos polos para dos valores diferentes de v_{AB}, uno positivo y otro negativo.

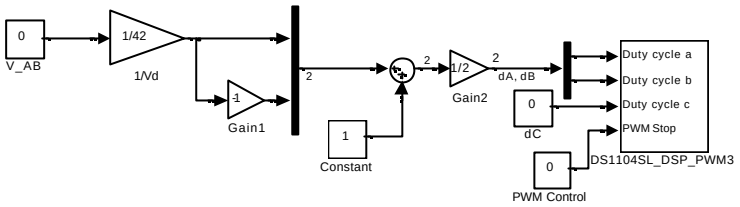


Figura 3.4: Modelo del conversor de conmutación de dos polos en Simulink

3.3 Implementación de un conversor DC de conmutación de dos polos en Simulink

El lado inferior del modelo se agrupa en un "***Duty Factor Calculator***". Debido a que en la implementación en tiempo real la parte superior está presente físicamente fuera del PC, el único cálculo requerido es la relación de trabajo *(Duty Ratio)* de cada polo del inversor.

dSPACE provee un bloque llamado **DS1104SL_DSP_PWM3** el cual, involucra el generador de onda triangular y el comparador para todos los polos del inversor. Así, cuando se construya un sistema en tiempo real, toda la parte superior del modelo se reemplaza con este bloque de dSPACE para generar la señal de PWM como se muestra en la figura 3.4. Las entradas en el **DS1104SL_DSP_PWM3** son las relaciones de trabajo *(Duty Ratios)* necesarios para el control del conversor.

3.3.1 Modelo en Simulink para implementación en tiempo real

- Cree un nuevo modelo en Simulink y sálvelo como Paso4_03.mdl.
- Arrastre y suelte el bloque DS1104SL_DSP_PWM3 de la librería dSPACE.
- Ajuste la frecuencia de conmutación en 10000 Hz y una "Banda muerta" de 0 haciendo doble click en el bloque.
- Corte y pegue el *Duty-ratio calculator* de Paso4_03.mdl.
- Conecte un bloque constante a las entradas que permanecen como se muestra en la figura 3.4.
- Ajuste el valor de los bloques de constante en "0".

3.3.2 Creación de la interfaz del usuario en Control Desk

- Conecte el osciloscopio del laboratorio a los terminales *Phase A1* y *Phase A2* de la tarjeta del puente trifásico.
- Abra los parámetros de simulación y cambie *fixed step* size a 0.0001
- Construya el modelo en Simulink
- Abra Control Desk y cree un nuevo experimento en el mismo directorio
- En un nuevo layout, arrastre y suelte una nueva ganancia deslizable y asígnele la variable V_AB
- Añada graficadores para visualizar las relaciones de trabajo. Su *layout* debe ser similar al mostrado en la figura 3.5
- Corra el experimento y después de energizar la fuente de potencia chequee las formas de onda de salida en el osciloscopio del laboratorio.

3.3.3 Resultados en tiempo real del conversor conmutado de DC

Una vez que la configuración esté lista seleccione la siguiente información:

- Grabe la forma de onda del voltaje de salida del osciloscopio para los valores de v_{AB} ajustados en la sección 3.2.4.
- Grabe la correspondiente relación de trabajo de las formas de onda para los valores dados arriba.
- Mida la frecuencia del voltaje de salida y comente el resultado obtenido

3.4 Control del motor de DC bajo condición de no carga en lazo abierto

Antes de que empecemos con la implementación del modelo para controlar un motor de DC en lazo abierto esté seguro de que usted ha conectado la armadura del motor de DC a la salida de los dos polos del conversor A y B. El puerto de medición de corriente IA1 de la tarjeta de los puentes trifásicos debe ser conectada al *Channel 5 A/D* del controlador de dSPACE. También, la salida del "encoder" se conecta al conector *INC1 9*-pins *DSUB* del controlador dSPACE.
La velocidad de un motor DC puede ser modificada variando su suministro de voltaje. El modelo del control del voltaje de salida para el conversor de conmutación DC fue discutido en la sección anterior y utilizaremos el mismo.

- Abra Simulink
- Abra un nuevo modelo de Simulink
- Ajuste los parámetros de simulación como se describió en la sección 3.2.1
- Copie el modelo Paso4_03.mdl. y sálvelo con un nuevo nombre: Paso5_04.mdl.
- Cambie el nombre del bloque de constantes de V_AB a V_motor, dado que esta será la entrada a nuestro sistema de comando del motor DC.

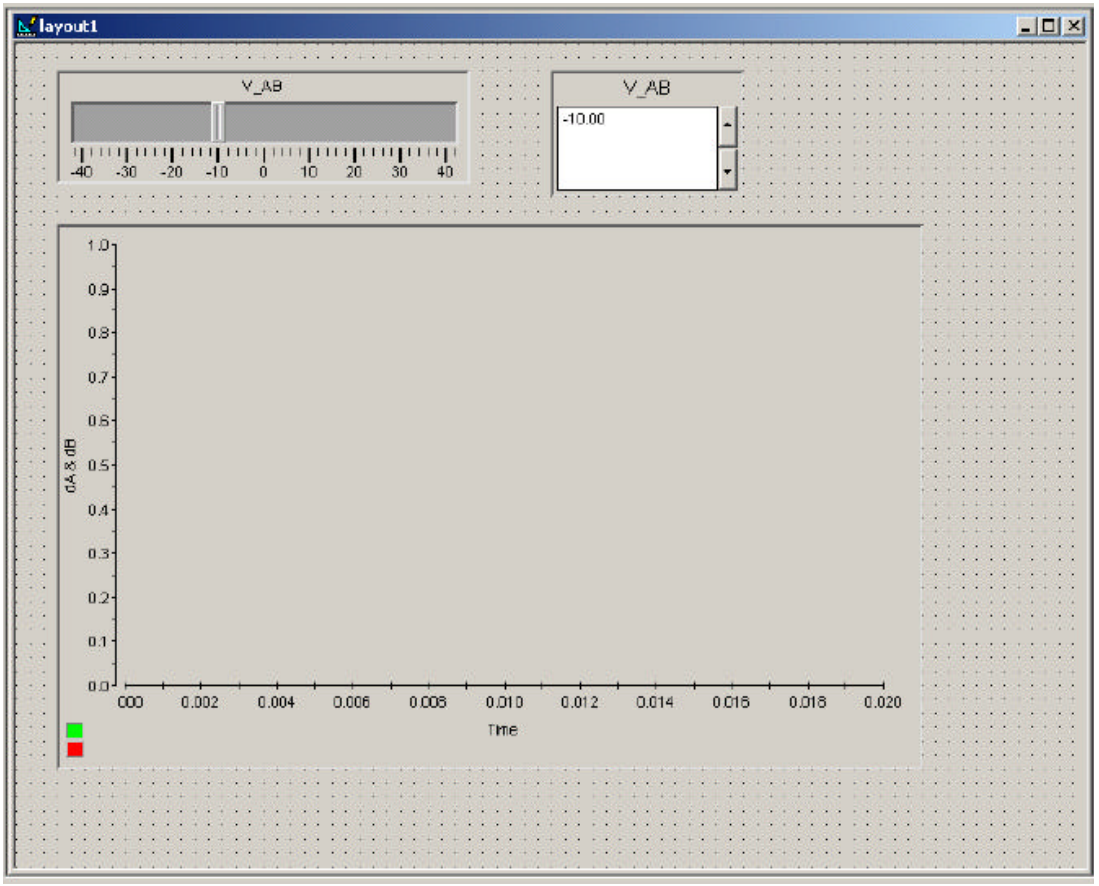


Figura 3.5 Layout de ControlDesk para el conversor de conmutaciónDC

Ahora tenemos un control en lazo abierto para el motor de DC bajo chequeo. Sin embargo no hay la posibilidad de monitorear la corriente y la velocidad mientras se controla el motor. Por lo tanto tendremos que añadir bloques de medida y de velocidad a nuestro modelo existente.

3.4.1 Medición de corriente

Para la medición de la corriente utilizamos el Canal 5 del conversor A/D. Del primer experimento recuerde que el dato debe ser "escalizado" por 10. Además, el sensor de corriente de la tarjeta que maneja el motor suministra 1V cuando hay una corriente de 2 amperios, de tal manera que necesita ser escalizado por 20.

- Arrastre y suelte el bloque **DS1104ADC_C5** de la librería dSPACE.
- Conecte un bloque de ganancia en la salida del canal 1 y ajuste su valor en 20.
- Conecte un *"Terminator"* en la salida del bloque de ganancia y etiquete la señal como I_a

3.4.2 Medición de la velocidad

Para medir la velocidad usaremos el bloque **DS1104ENC_C5** de la librería dSPACE. Este bloque suministra acceso real a la posición delta y la posición del primer canal de entrada de la interfaz del encoder. La posición delta representa la diferencia escalizada de dos valores sucesivos de posición de un canal. Para calcular el ángulo en radianes del encoder el resultado debe multiplicarse por:

$$\frac{2p}{líneas_encoder} = \frac{2p}{1000} \tag{3.8}$$

Donde líneas_encoder es 1000 para los encoders utilizados.
Debido a que necesitamos determinar la velocidad, la posición delta escalizada a ángulo en radianes debe ser dividida por el tiempo de muestreo así:

$$w = \frac{dq}{dt}\Big|digital = \frac{\Delta q}{t_{k+1} - t_k} = \frac{\Delta q}{T_s} \tag{3.9}$$

Arrastre y suelte el bloque **DS1104ENC_POS_C1** de la librería dSPACE. Además, el bloque del encoder, el bloque **DS1104ENC_SETUP** debe añadirse al modelo. Conecte un bloque **Terminator** a la posición Enc.
Conecte un bloque de ganancia en el canal 1 de salida (Enc posición delta) y ajuste su valor a $\frac{2p}{1000 * T_s}$ donde T_s es el ajuste del tiempo de muestreo en los parámetros de simulación en la caja *fixed – step*.
Ahora si usted trata de medir las velocidades bajas, usted verá oscilaciones entre los dos valores de las mismas. De este modo añadiremos un promedio para tener lecturas más precisas. Para preparar el bloque de promedio (**averaging block**),

- Seleccione el bloque **Unit Delay** de la librería **Discrete** y arrastre el número requerido a su modelo (10 para 11 puntos de promedio)
- Seleccione el puerto de entrada *In1* de la librería **Source** y arrástrelo a su modelo.
- Arrastre un bloque de suma haga doble clic en el y añada el número requerido de signos + en la lista de signos.

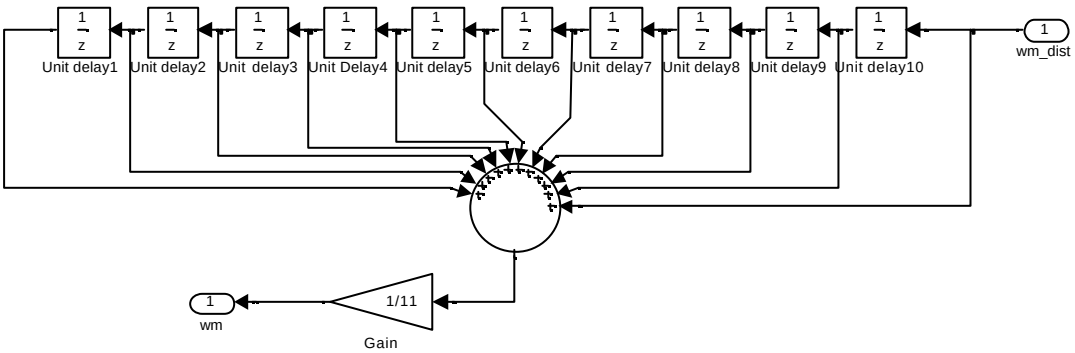


Figura 3.6 Modelo de promedio en Simulink

- Arrastre un bloque **Gain** y conectelo a la salida del bloque de suma. Ajuste el valor a 1/11 para 11 puntos de promedio.
- Seleccione el puerto de salida *Out1* de la librería *Sink* y arrástrelo a su modelo.
- Conecte todos los bloques como se muestra en la figura 3.6.
- Seleccione los bloques de retardo unitario, puerto de entrada, puerto de salida, ganancia y cree un subsistema con todos ellos.
- El sistema obtenido no es más que un sistema promedio de 11 puntos. Cambie el nombre del subsistema a promedio.
- Conecte un *Terminator* en la salida de este promedio de 11 puntos de la medida de la velocidad y etiquete la señal: wm.

El modelo obtenido debe ser como el mostrado en la figura 3.7. Antes de construir el modelo en tiempo real no olvide definir T_s y V_d como variables globales en Matlab.

3.4.3 Creación de un layout en Control Desk

- Construya el código DSP para el modelo Simulink salvado como **Paso5_03**
- Arranque Control Desk y cree el nuevo experimento en el mismo directorio de trabajo como el del archivo de Simulink.
- Cree un layout y arrastre un control de ganancia deslizante y dos graficadotes.
- Arrastre y suelte V_motor en el control ganancia deslizante.
- Asigne uno de los graficadores a Ia y otro para wm.
- Para tener los valores de corriente y velocidad añada 2 **DISPLAY** al *layout*. Arrastre y suelte Ia en uno de los DISPLAY y wm en el otro.

Ahora su experimento debe ser como el mostrado en la figura 3.8.

3.4.4 Resultados del motor de DC en condiciones de no carga

- Anote valores de corriente y velocidad de diferentes lecturas para los valores correspondientes de voltaje dados en la tabla 3.1
- Grafique la curva voltaje – velocidad.
- Encuentre la pendiente para la gráfica anterior.

Nota: Por favor guarde las lecturas obtenidas en la sección 3.4.4, se necesitarán en otro experimento.

3.5 Reporte de laboratorio

El reporte de laboratorio deberá contener los siguientes puntos:

- La función de conmutación con los resultados de la simulación del conversor de 2 polos.

- Resultados del conversor de 2 polos obtenidos en tiempo real para algunos valores positivos y negativos de V_{AB}.
- Mida la frecuencia de conmutación del voltaje de salida del conversor. Explique la importancia de ese valor.
- Los resultados del voltaje de salida del conversor de conmutación de 2 polos implementado en tiempo real junto con sus correspondientes formas de onda y sus relaciones de trabajo *(Duty Ratio).*
- Gráfica de voltaje-velocidad bajo condiciones de no carga para la máquina de DC.
- Especifique la pendiente de la curva obtenida.

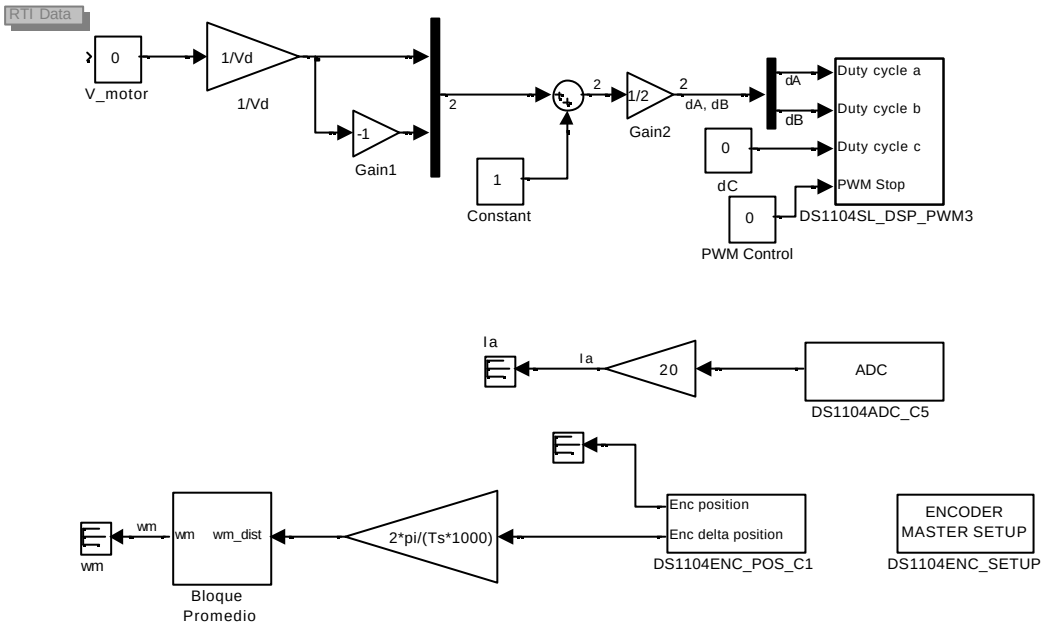


Figura 3.7 modelo en tiempo real para motor sin carga bajo prueba

Figura 3.8 Layout de Control Desk

Vmotor **Velocidad**	(V) (rad/s)	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0	15.0	21.0	30.0	42.0
Corriente	(A)									

Tabla 3.1 Medidas Sin Carga

Experimento 4

Caracterización de una máquina de DC

4.1 Introducción

En el experimento anterior se diseñó e implementó el control del modo de conmutación y las medidas de corriente y velocidad para una máquina de DC sin carga. En este experimento se encontrarán las características de una máquina de DC, que serán de utilidad en el diseño de un control en lazo cerrado del motor de DC.

Utilizaremos el modelo preparado en el ejercicio anterior y lo modificaremos para derivar la característica de la máquina de DC.

4.2 Control en lazo abierto de una máquina de DC con carga

Usaremos el mismo modelo del experimento anterior de la máquina de DC sin carga.

- Cree un nuevo fólder Expt 4.
- Inicie Matlab y cambie la ruta del directorio a Expt 4.
- Abra el modelo Simulink Paso5_03.mdl.

Una vez tengamos el modelo de control del motor, debemos añadir los bloques apropiados para controlar la carga.

4.2.1 Poniendo una carga de DC a la interfaz de potencia DC.

Para determinar las características de motor DC en estado estable, un segundo motor de DC se acoplará axialmente al motor en prueba. El segundo motor se controlará en lazo abierto tal como el motor en prueba.

- El voltaje de armadura de la carga debe ser conectado a los terminales de PHASE A2 y PHASE B2 de la tarjeta de potencia. Ajuste el voltaje DC Vd en 42 V.
- Asegure un buen acoplamiento mecánico entre los dos motores.
- Añada un segundo grupo de bloques de control de voltaje en el modelo Simulink y conecte los *Duty-Cycles* a las entradas 2 y 3 de **DS1104SL_DSP_PWM**.
- Ajuste la frecuencia de conmutación en 10000Hz.
- Haga doble click en el bloque **DS1104SL_DSP_PWM ,** vaya a **PWM Stop and Termination** deseleccione *"**Set all Ch**"* y haga clic en "Set all".
- Conecte el canal IA2 a ADCH6 del controlador.

- Involucre la corriente de carga en el modelo Simulink copiando la primera medida de corriente, y después haciendo doble clic en DS1104ADC_C5 y cambiándolo a canal 6.
- Salve el modelo como Paso1_04.mdl. Su modelo debe ser como el que aparece en la figura 4.1

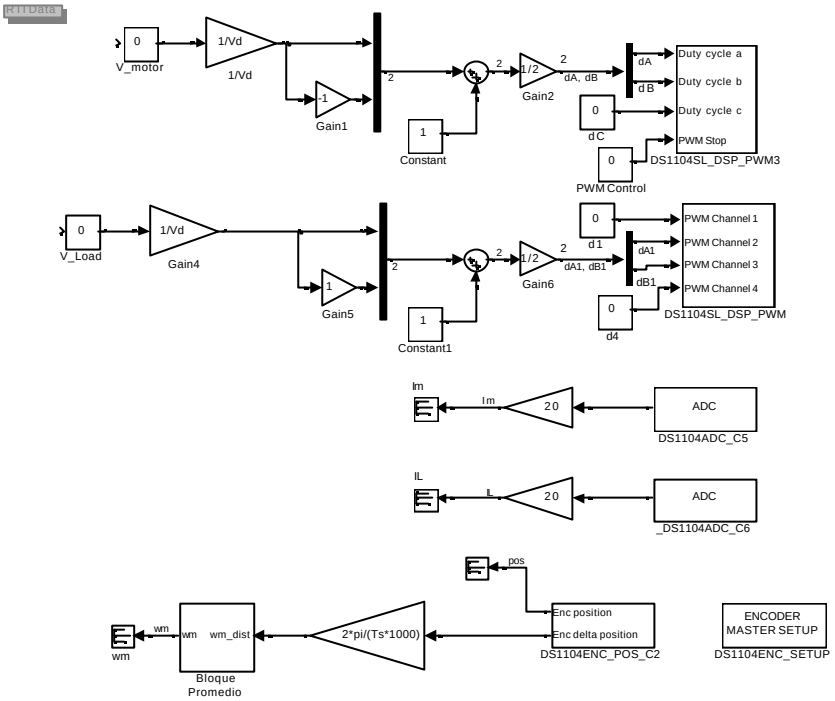


Figura 4.1 Modelo Simulink en tiempo real para motor y control de la carga

4.2.2 Creando la interfaz de Control Desk

- Primero construya el código DSP utilizando el mismo del modelo Simulink salvado como Paso1_04.mdl.
- Abra Control Desk y cree un nuevo experimento en la misma raíz de trabajo que el archivo de Simulink.
- Cree un nuevo layout y arrastre dos ganancias ajustables y dos graficadores.
- Arrastre y suelte las variables V_motor y V_carga a las ganancias ajustables.
- Asigne un graficador para visualizar las corrientes Ia e IL y un graficador para la velocidad wm.
- Para llevar un record de los valores numéricos de corrientes y velocidad añada a su *layout* tres controles tipo Display y asígnele a ellos etiquetas de variables de velocidad y corriente.

Su experimento debe ser como el que se muestra en la figura 4.2.

4.3 Características de estado estable de la interfaz de potencia de un motor de DC

En este experimento usted deducirá las características de un motor de DC, usando el segundo motor como carga. Para un voltaje constante V_motor la carga se modifica usando V_carga. La corriente del motor y la velocidad se consignan en una tabla.Un grupo de medidas se obtiene para diferentes voltajes de alimentación. Las características se dibujan utilizando Matlab.

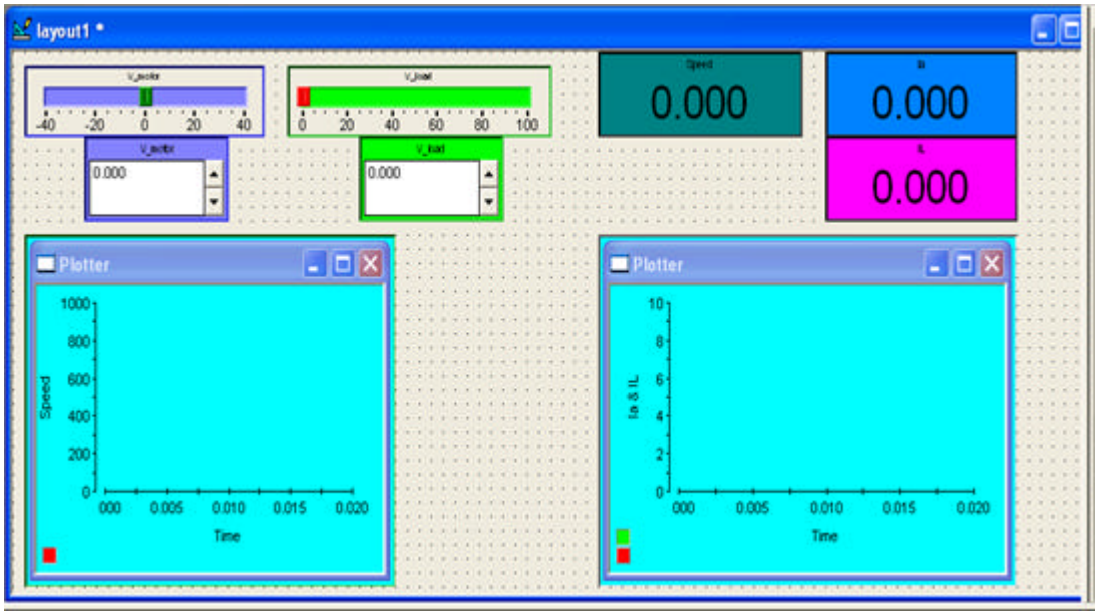


Figura 4.2 Layout de Control Desk

4.3.1 Fundamentos teóricos

Las características mecánicas de estado estable de cada máquina DC son la dependencia entre el torque Electromagnético (Nm) y la velocidad en radianes (rad/s). Debido a que la dependencia es lineal, las características serán líneas rectas con una pendiente constante para el rango completo de voltaje 0 - V_{rated} e independiente de la carga. Las ecuaciones del motor reflejan esta linealidad.

$$V_{motor} = R_a I_a + K_e w \tag{4.1}$$

$$T_e = K_t I_a \tag{4.2}$$

De la ecuación 4.1 se puede obtener la característica de estado estable del motor

$$w(I_a) = \frac{R_a}{K_e} I_a + \frac{V_{motor}}{K_e} = mI_a + n \qquad (4.3)$$

Donde

$$m = -\frac{R_a}{K_e} \quad \text{y} \quad n = -\frac{V_{motor}}{K_e}$$

El modelo de estado estable para la carga puede ser aproximado con un modelo tipo-fricción, donde el torque es proporcional a la velocidad y siempre está presente un torque de fricción constante:

$$T_{e=}T_L + Bw + T_{fricción} \qquad (4.4)$$

Donde todos los términos del miembro de la derecha están relacionados con la carga. Para nuestro caso, donde la carga es una máquina de DC controlada por voltaje, el torque de la carga T_L es, de hecho, el torque electromagnético desarrollado por el segundo motor de DC.
El proceso de determinación de parámetros para el modelo en estado estable usa las mediciones de corriente, voltaje y velocidad para obtener una aproximación lineal a las ecuaciones 4.3 y 4.4. Una vez que se encuentran la pendiente y los puntos de intersección, los parámetros se pueden encontrar fácilmente.

4.3.2 Determinación de los parámetros en estado estable

De acuerdo a la descripción teórica de la sección 4.3.1, los motores serán comandados en varios puntos de operación en estado estable, como sigue:

Estimación de $k_e \quad (= k_t)$:

- Al voltaje de armadura suministrado al MOTOR, la CARGA es controlada en la región activa, de tal modo, que la corriente del motor podría llegar a ser cero (Ia = 0) y se podría medir la velocidad.
  Sustituyendo el valor de Ia en la ecuación 4.1 tenemos:

$$k_e = \frac{V_{a_rated}}{w} \qquad (V_{a_rated} = 42\text{V}) \qquad (4.5)$$

- Incremente la ganancia de V_MOTOR y decremente la ganancia de V_CARGA hasta que V_MOTOR alcance 42 V. Note el incremento de velocidad hasta alrededor de 565 rad/s. Una vez que se obtiene el máximo voltaje decremente el voltaje de referencia

V_CARGA de tal modo que el torque activo hará decrecer la corriente del MOTOR hasta que llegue a cero.

- Registre los valores de velocidad cuando la corriente de MOTOR es cero y calcule k_e de acuerdo a la ecuación 4.5.

Dibujo de las características torque – velocidad:

- Mantenga el voltaje de MOTOR a niveles constantes {42; 21; 10; 3V}. Ajuste el voltaje de referencia de CARGA de tal modo que la corriente del MOTOR alcance los siguientes valores para cada voltaje: {0; 1.0; 2.0; 3.0; 4.0; 5.0A}.
- Registre la velocidad (w_m), la corriente de CARGA (I_{CARGA}) y el voltaje de carga (V_{CARGA}) requeridos para obtener las corrientes del MOTOR especificadas. Todas las mediciones de corriente deberán ser multiplicadas por k_e para obtener los correspondientes valores de torque (refiérase a la ecuación 4.2).
- Llene la tabla 4.1 con los datos medidos.
- Dibuje las características de MOTOR y CARGA.
- **Encuentre la pendiente m y el punto de intercepción n usando Matlab:**
  - ✓ La pendiente y la intercepción de la característica linealizada se pueden determinar con las siguientes instrucciones:

P = polyfit(ia_data, w_data, 1)

m = p(1)

n = p(2)

  - ✓ W_data es el arreglo de los datos de velocidad, mientras que ia_data es el arreglo de las corrientes correspondientes.
  - ✓ Para cada máquina DC (MOTOR y CARGA) se determinan dos tipos de parámetros (m, n).

V_Motor [V]	V_Load[V]	I_Motor[A] I_Load[A]	Velocidad[rad/s]
42		0.0	
42		1.0	
42		2.0	
42		3.0	
42		4.0	
42		5.0	
21		0.0	
21		1.0	
21		2.0	
21		3.0	
21		4.0	
21		5.0	
10		0.0	
10		1.0	
10		2.0	
10		3.0	
10		4.0	
10		5.0	
3		0.0	
3		1.0	
3		2.0	
3		3.0	
3		4.0	
3		5.0	

Tabla 4.1 Datos experimentales en estado estable

- Determine R_a y k_e utilizando los correspondientes n y m, los parámetros de la máquina pueden ser determinados utilizando las siguientes ecuaciones $k_{e_i} = \frac{V_{a_i}}{n}$

Donde i = 1…4, es el número de niveles de voltaje considerados previamente.

$$k_e = avg\{k_{e_i}\}$$

Donde k_e es una constante de la maquina; la mejor estimación se alcanza promediando los valores previos.

$$R_a = -k_e m$$

Llene la tabla 4.2 con los valores finales de R_a y k_e.

Voltaje[V]	m (Pendiente)	n (Intersección)	k_e [V/(rad/s)]	R_a [?]
42				
21				
10				
3				

Tabla 4.2 cálculo de los parámetros eléctricos de estado estable

- **Determine los parámetros del modelo de fricción**

Para determinar los parámetros de fricción usted tiene que hacer funcionar el motor sin carga tal como se hizo en el experimento anterior.
Dado que MOTOR tiene que vencer solamente la fricción ($T_L = 0$) el torque electromagnético ($T_e = k_e I_a$) seguirá el modelo lineal de fricción en estado estable (ver ecuación 4.4). Llene la tabla 4.3 utilizando los valores obtenidos en el experimento anterior.
Linealice la dependencia de $T_e(w)$ determinando los coeficientes (m, n) descritos en la ecuación 4.4 utilizando el mismo procedimiento que se utilizó para graficar las características torque – velocidad.

- **Determine B y** $T_{fricción}$: usando la ecuación 4.4 los parámetros de fricción serán :

B = m**,** $T_{fricción}$ = n
Llene la tabla 4.4

4.4 Comportamiento dinámico de una máquina DC

En esta sección trataremos de deducir las características dinámicas de máquinas DC. Las características dinámicas pueden ser divididas en eléctricas y mecánicas. Estudiando independientemente ambos transientes, se pueden determinar dos parámetros del motor: inductancia de la armadura L_a y momento de inercia **J.**

V_motor [V]	Velocidad [rad/s]	Corriente [A]	Torque [Nm]
1			
3			
5			
10			
15			
21			
30			
42			

Tabla 4.3 Características del modelo de fricción en estado estable

m (Pendiente)	n (Intersección)	B[Nm/(rad/s)]	$T_{fricción}$ [Nm]

Tabla 4.4 Cálculo de los parámetros mecánicos de estado estable

Para está sección usaremos el mismo modelo de Simulink y *layout* de dSPACE que en la sección anterior. Para analizar la dinámica de un motor de DC expondremos algunas bases teóricas y después utilizando los datos ya encontrados de estado estable continuaremos con el experimento.

Nuestro experimento consiste en dos motores de DC acoplados axialmente y alimentados por dos conversores en configuración de cuarto cuadrante. Un motor es controlado en corriente, de tal manera que actuará como carga pasiva o activa. Este motor será llamado CARGA. El segundo motor es controlado en lazo abierto con voltaje variable. Este motor se llamará MOTOR.

Para este experimento necesitamos determinar dos parámetros: L_a - inductancia de la armadura [H] y J – momento de inercia [kg.m²].

4.4.1 Características del modelo dinámico

Hay varios modos para determinar la inductancia y la inercia. Todos los métodos involucran el análisis dinámico de las máquinas antes de llegar al estado estable (Transiente). Las ecuaciones dinámicas de un motor DC son:

$$V_a = R_a I_a + k_e w + L_a \frac{di_a}{dt} \tag{4.6}$$

Y

$$T_e = T_L + T_{fricción} + Bw + J\frac{dw}{dt} \tag{4.7}$$

El sistema de dos ecuaciones diferenciales de primer orden muestra que un motor de DC es un sistema de segundo orden. Las dos variables de estado corriente de armadura (I_a) y velocidad angular (w) no son independientes. Por lo tanto, la inductancia (L_a) y el momento de inercia (J) contribuyen a la variación de cada una de las dos variables de estado.

Es conveniente "aislar" las variaciones descritas en 4.6 y 4.7, de esta manera solamente se tiene que resolver una ecuación diferencial de primer orden para cada variable. Dos experimentos se requieren entonces para determinar L_a y J mientras está la velocidad y respectivamente la corriente en un valor de cero.

Determinación de la inductancia

Para estimar la inductancia de la armadura el motor debe estar en reposo (w = 0). Bloquee el rotor con un freno mecánico y aplique un escalón de voltaje a los terminales de la armadura. La corriente crece exponencialmente en el tiempo y la ecuación 4.6 queda:

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{di_a}{dt} \tag{4.8}$$

Si solucionamos la ecuación 4.8 para la corriente, tendremos

$$I_a(t) = \frac{V_a}{R_a}(1 - e^{-\frac{t}{t_a}}) \tag{4.9}$$

Donde

$$t_a = \frac{L_a}{R_a}$$

La corriente crece exponencialmente hasta el valor final de $\frac{V_a}{R_a}$. La pendiente de esta curva exponencial medida en t = 0 depende del valor de la inductancia L_a como se muestra enseguida:

$$\left.\frac{di_a}{dt}\right|t=0=\frac{V_a}{R_a}\frac{R_a}{L_a}e^{-\frac{R_a}{L_a}.0}=\frac{V_a}{L_a} \tag{4.10}$$

Una determinación gráfica de la pendiente a un voltaje dado debería conducirnos a la determinación de la inductancia del motor (L_a).

Determinación de la inercia

Para hacer el efecto del torque eléctrico (T_e) igual a cero en la dinámica mecánica del motor (ecuación 4.7), se requiere un completo apagado de la fuente de alimentación del motor. El motor se lleva a una velocidad de no carga w_0 de tal modo que la corriente de armadura es cero y las pérdidas por fricción se compensan controlando la carga activa. En t = 0 todo el sistema es desenergizado esto implica que bs torques electromagnéticos tanto en el MOTOR (T_e) como en la CARGA (T_L) se hacen cero. La ecuación dinámica queda:

$$0=T_{fricción}+Bw+J\frac{dw}{dt} \tag{4.11}$$

La velocidad decrece exponencialmente en el tiempo:

$$w(t)=(w_0+\frac{T_{fricción}}{B})e^{-\frac{B}{J}t}-\frac{T_{fricción}}{B} \tag{4.12}$$

Nuestro modelo de fricción es aproximado. El torque "constante" de fricción es, de hecho, dependiente de la velocidad. Este se debería cancelar una vez que la velocidad llega a cero, de otro modo, sería un torque activo y llevaría el motor al cuarto cuadrante.
Reacomodando la ecuación 4.12:

$$(w(t)+\frac{T_{fricción}}{B})=(w_0+\frac{T_{fricción}}{B})e^{-\frac{B}{J}t}\Rightarrow\Omega(t)=\Omega_0 e^{-\frac{B}{J}t} \tag{4.13}$$

Si en la ecuación 4.13 hacemos una aproximación, la inercia depende solo de la pendiente de la curva en t=0

$$\frac{d\Omega}{dt}\Big|t=0=\left.\frac{dw}{dt}\right|t=0=-\Omega_0\frac{B}{J} \tag{4.14}$$

Conociendo w_0 y **B**, y determinando gráficamente la pendiente de la curva, se puede calcular la inercia equivalente del motor J.
Nota: La inercia es un escalar. El valor obtenido es la suma algebráica de la inercia de cada motor.

4.4.2 Modelo en Simulink para la determinación de los parámetros dinámicos

El modelo presentado en la sección 4.3 será utilizado en esta sección. Sin embargo, debemos insertar un bloque adicional de tal modo que sea posible hacer un comando con un escalón de voltaje.
Los parámetros dinámicos mecánicos y eléctricos requieren un cambio de voltaje en escalón en el voltaje de alimentación bien sea positivo, (de0 a V) o negativo (de V a 0).

La condición V = 0 implica también que los motores no tengan corriente de armadura, es decir, ellos no hacen el modo de frenado regenerativo con torque negativo. Para alcanzar la apertura del circuito de las armaduras de los motores, los inversores deben ser apagados y todos los interruptores abiertos cuando ocurra el comando V=0. Esta operación es posible utilizando la señal **SHUTDOWN** de la tarjeta de potencia. Las señales de **SHUTDOWN** son controladas por los canales digitales digital I/O 11 y 12.
Cuando **IO11/12** es cero (estado apagado), las señales de conmutación son bloqueadas y los interruptores abiertos. Cuando **IO11/12** es uno (estado de encendido), y **IO10** es reseteado se da la operación regular de los conversores. Los canales digitales IO10/11/12 se agregarán a nuestro modelo como *Slave bit out blocks* de la librería *Slave.* Además se deben agregar dos bloques de constante y dos bloques de conversión Booleana con **SD1** y **SD2** utilizando la misma señal. El modelo debe ser como el de la figura 4.3.

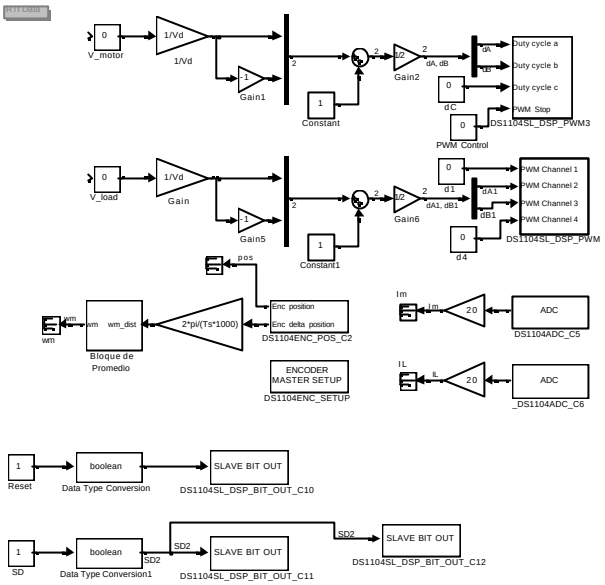


Figura 4.3: Modelo en Simulink para la caracterización de los parámetros dinámicos

4.4.3 Layout para la determinación del modelo dinámico

- Cree un nuevo experimento en el mismo directorio que contiene el archivo Step1_04.mdl
- Copie el Layout del experimento previo y déle otro nombre.
- Agregue dos botones de chequeo *Checkbuttons* al *Layout*.
- Enlace todas las variables del modelo con los controles como en la sección anterior.
- Enlace *Reset* y SD al control de botones *Checkbutton*.

El *layout* del experimento se muestra en la figura 4.4.

4.4.4 Determinación de los parámetros dinámicos

Determinación de la inductancia

- Bloquee los rotores firmemente mediante la utilización de algún sistema mecánico.
- Deseleccione y luego reseleccione el control SD. Este botón trabaja como un interruptor para conectar y desconectar las máquinas de la fuente de alimentación.
- Ajuste el valor de V_MOTOR a un valor bajo (alrededor de 3 voltios) y deseleccione Reset para hacer un escalón en voltaje y luego vuélvalo a seleccionar. La corriente debe crecer exponencialmente como se muestra en la figura 4.6 y alcanzar un valor constante de estado estable.

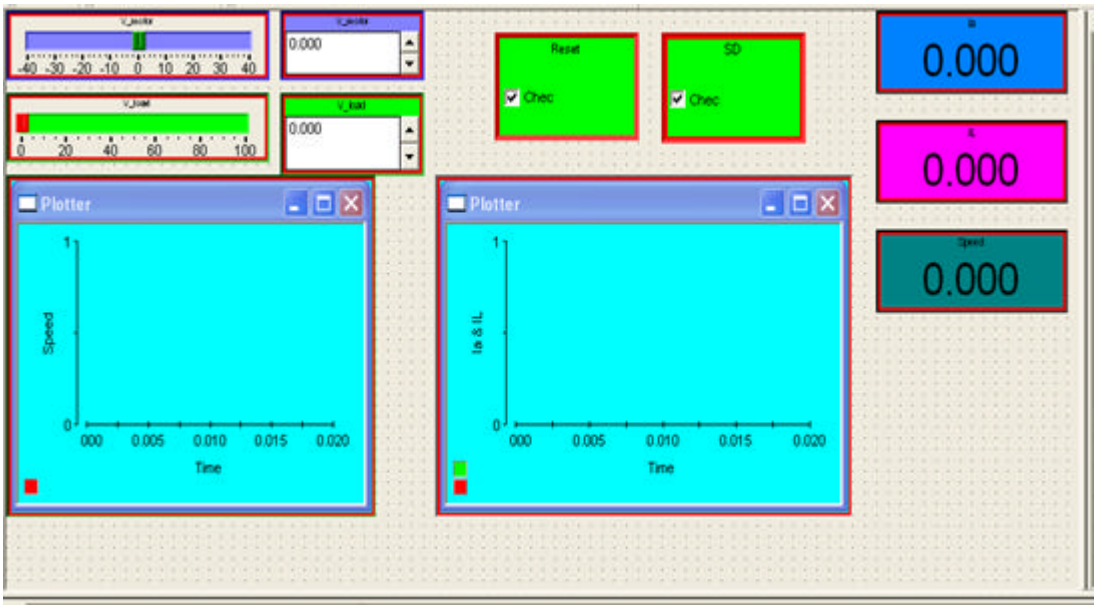


Figura 4.4: Layout de control Desk para la caracterización de los parámetros dinámicos

- Para salvar la respuesta en corriente, abra *View/Controlbars/Capture Settings Window*. Arrastre la señal P: *Reset* de la ventana de herramientas en la caja gris situada debajo de las cajas *Level-Delay set boxes*. Chequee la caja llamada ON/OFF. Chequee la *Edge Direction* y ajuste el valor del nivel (*Level Value*) en 0.5.
- Ahora usted observará que cada vez que des-selecciona el control *Reset* en su *Layout* el área de la gráfica visualizará la corriente y parará cuando alcance el máximo tiempo de medición. Ajuste *Length* a 0.2 (ver figura 4.5). Esto ajustará el dato del tiempo de captura en 0.2S, el cual, es lo suficientemente grande para observar todo el transiente de corriente.
- Seleccione y des-seleccione **SD** y **RESET** para hacer algunas mediciones. La forma de onda de corriente debe ser similar a la mostrada en al figura 4.6. Una vez que usted esté satisfecho con los datos visualizados, vaya a la ventana **Capture Settings Window** y presione el botón **SAVE.** La caja de diálogo le pedirá un nombre para el archivo .mat que contendrá todos los datos gráficos.
- Para extraer la información de la inductancia como en 4.9, esta ecuación será usada en un programa de Matlab para determinar la pendiente de la curva del transiente de corriente. Ejecute "Indet.m" en Matlab. Ver el listado del programa en el anexo 1.

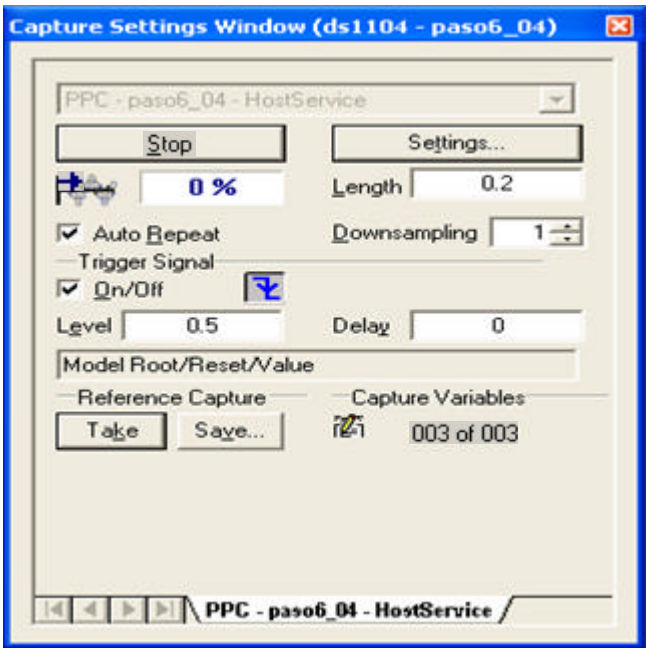


Figura 4.5: Forma de onda de la corriente

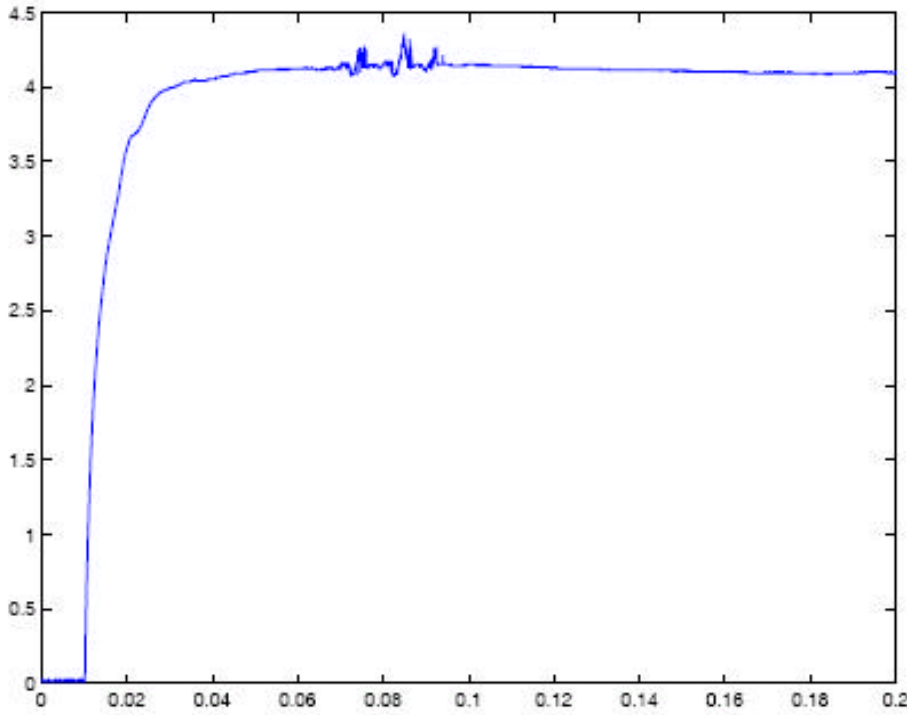


Figura 4.6: Forma de onda de la corriente

Determinación de la inercia

- En la ventana *Capture Settings Window* deben hacerse 2 modificaciones: Incrementar el tiempo de visualización a 2 segundos y cambiar la señal de disparo (*Trigger Signal*) a SD.
- Seleccione el control SD e incremente el voltaje del MOTOR a 42 voltios. Decremente el voltaje de CARGA a valores negativos, de tal manera que la corriente de MOTOR sea cero. Los visualizadores digitales nos permiten monitorear la operación.

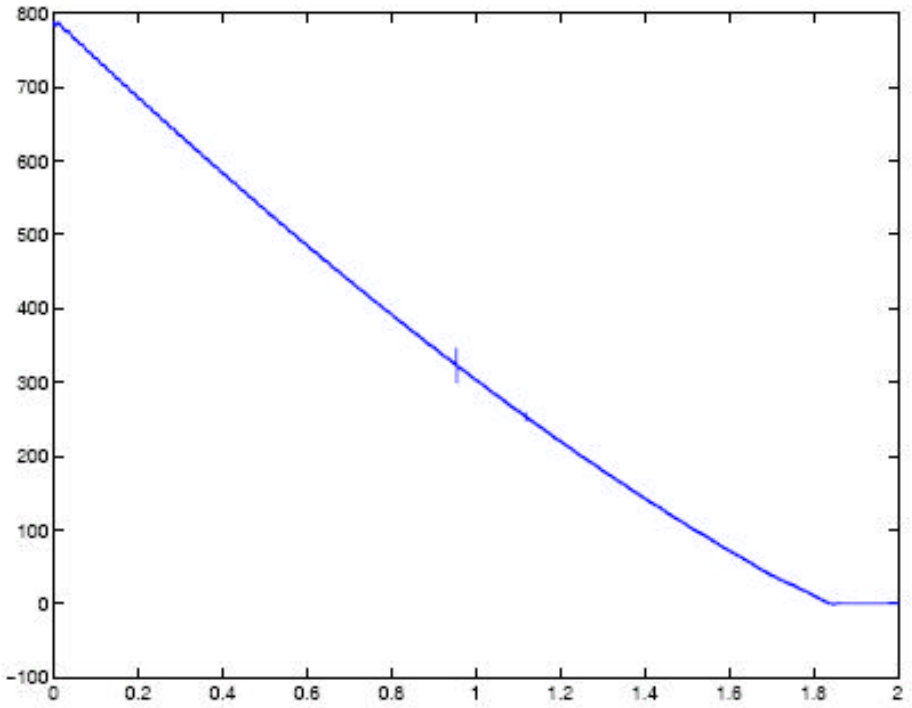


Figura 4.7: Forma de onda de la corriente

- Registre el valor de la velocidad en este punto de operación.
- Des-seleccione el botón *Shutdown*. Esto iniciará el proceso de visualización y después de dos segundos parará la gráfica de la velocidad y se obtendrá una curva exponencial decreciente. Ver figura 4.7.
- Presione nuevamente el botón SAVE en la ventana *Capture Settings Windows* y almacene los datos en otro archivo.mat . Ejecute *"Inerdet.m"* en Matlab y registre el resultado para el momento de inercia. La lista del programa está en el anexo 2.

4.5 Reporte de laboratorio

El reporte de laboratorio debe contener los siguientes detalles:

- Las tablas completas
- Todos los parámetros de la máquina.

- Todas las gráficas obtenidas

```
fitraz.m
Fitraz.m
```

```
function err = fitcur(lambda)
global plothandle t y y0;
A = zeros(lenght(t),lenght(lambda));
for j = 1:lenght(lambda)
    A(:,j) = exp(-lambda(j)*t)';
end
c = A\(y-y0)';
z = A*c;
set(plothandle,'ydata',z+y0);
drawnow;
err = norm(z-(y-y0)');
```

Inddet.m

```
inddet.m
%%%
```

```
%  computo de los parámetros del motor
%  el algoritmo retorna el mejor lambda=Ra/La
%  con la corriente de estado estable i0=y0 se calcula la resistencia %  de
armadura
V=3;
i0=y0
Ra=V/i0
La=Ra/lambda
```

inerdet.m

```
%%%
```

```
lam0 = [1];  % define una raíz inicial (n=1)
lambda = fminsearch('fitraz',lam0);  % arranca la repetición usando
% usando la raíz inicial
hold off;



% computo de los parámetros del motor
% el algoritmo retorna el mejor lambda=B/J
Wfin=y0
J=B/lambda
```

Experimento 5

Control de un motor de DC

5.1 Introducción

El propósito de este experimento es diseñar e implementar un control en cascada para un motor de DC. Usaremos el mismo motor para el cual fueron calculados los parámetros en un experimento anterior. Los controladores serán diseñados y probados en un modelo de simulación del motor de DC. Una vez que los parámetros están correctamente ajustados, el modelo será reemplazado por el motor real y el algoritmo de control será enviado a la tarjeta dSPACE.

5.2 Modelo en Simulink del motor de DC

Las ecuaciones escritas en transformada de Laplace para un motor de DC [1]. Si el voltaje y la corriente se asumen libres de componentes de la frecuencia de conmutación, el modelo del motor se puede escribir así:

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - E_a(s)}{R_a + sL_a} \; ; \qquad E_a(s) = k_E . w_m(s) \tag{5.1}$$

$$w_m(s) = \frac{T_{em}(s) - T_L(s)}{sJ_{eq}} ; \quad T_{em}(s) = k_T I_a(s) \; ; \; k_T = k_E \tag{5.2}$$

Las ecuaciones 5.1 y 5.2 pueden ser fácilmente implementadas en Simulink usando bloques Standard como se observa en la figura 5.1.

- Cree un nuevo modelo de Simulink y arrastre todos los bloques como se muestra en la figura 5.1.
- Haga las conexiones y defina los parámetros como se muestra en la figura 5.1.

La representación de la figura 5.1 usa integradores en lugar de funciones de transferencia. Esto permite ajustar las condiciones iniciales para las variables de estado Velocidad y Corriente. El modelo también incluye el coeficiente de fricción B. Sin embargo, durante la

simulación, B puede ser considerado cero y el modelo será similar al descrito en las ecuaciones 5.1 y 5.2. Note que el torque constante se reemplazó con la constante de voltaje en el bloque de ganancia en la parte superior de la figura.

- El modelo puede ser aún agrupado y enmascarado en Simulink, de tal manera que todos los parámetros pueden ser insertados en una caja de diálogo, seleccionando el sistema y creando un subsistema. Modifique el editor de máscara como se ve en la figura 5.2. Después de modificar la máscara, si hace doble click en el subsistema aparecerá una ventana donde se entran los parámetros del motor.

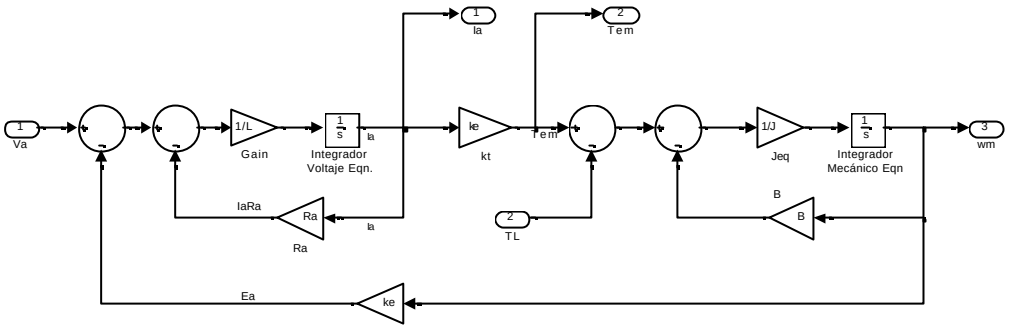
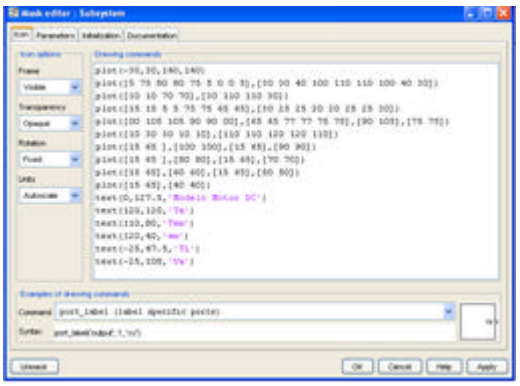
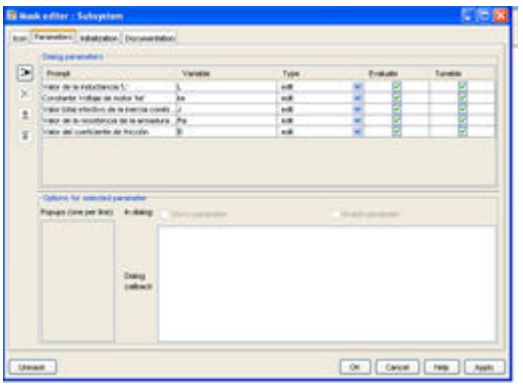


Figura 5.1 Modelo en Simulink para el motor DC



a)Icono del motor DC



b)Paráme tros del motor DC

Figura 5.2: Modelo enmascarado de un motor de DC y comandos gráficos para representación gráfica.

- Ahora entre los valores de los parámetros del motor DC que fueron evaluados en el experimento anterior.

5.3 Diseño del Controlador

Una vez que se construye el modelo del motor de DC los controladores se pueden añadir y sintonizar. Arranquemos con el lazo de corriente para el cual se requiere un controlador PI.

- Primero se crea el modelo para el controlador PI. (ver figura 5.3). Haga doble click en el bloque integrador y habilite la salida límite (*Limit output*). Ajuste los límites de saturación inferior y superior en +lim/-lim. El valor del límite debe ser ajustado a 1 mientras que el valor máximo del voltaje de control será ± 1, que es la entrada al bloque K_{pwm}. El máximo valor resultante aplicado al motor de DC será ± 42 que son los valores de placa del motor.

- La corriente de armadura se realimenta a la entrada del controlador.

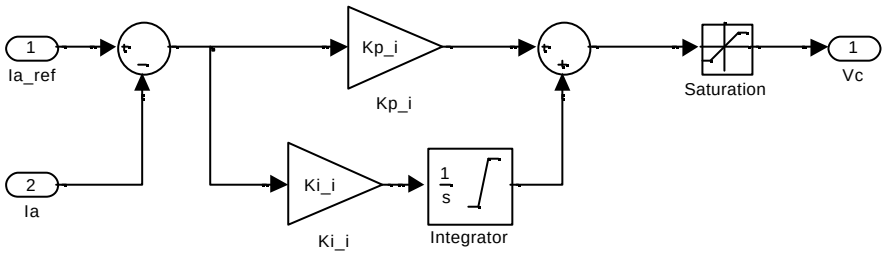


Figura 5.3 Modelo del controlador PI

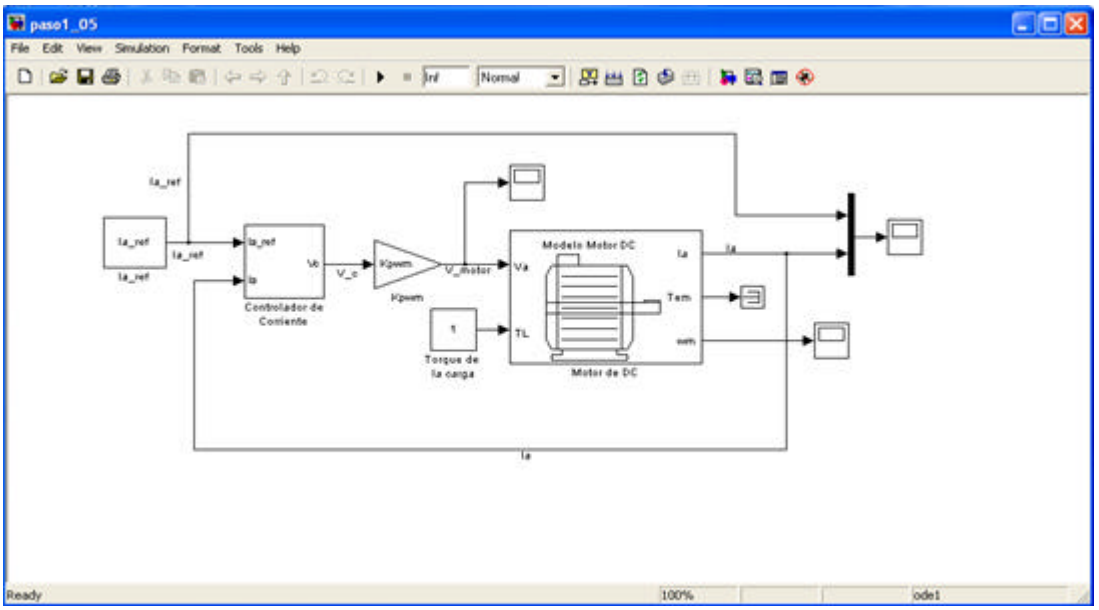
- Los parámetros del controlador PI (Esto es Kp_i y Ki_i) se calculan usando los parámetros del motor que fueron evaluados en un experimento anterior y el algoritmo correspondiente [1] para un ancho de banda de 500 Hz.

- El bloque de saturación ajusta los límites máximo y mínimo del control de voltaje, en nuestro caso ±1).

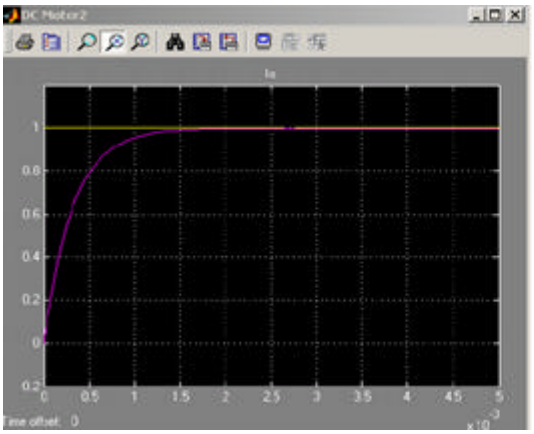
- Ajuste el valor de Kp_i y Ki_i en Matlab.

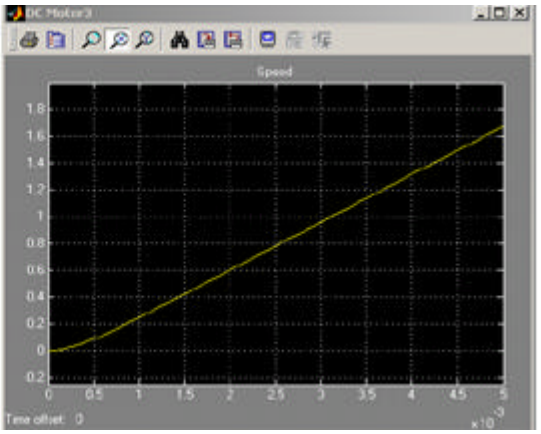
En vez de ajustar los valores de varias variables en Matlab, cree un archivo .m el cual contenga los valores de todas las variables. Ejecute el archivo .m antes de correr la simulación entonces se cargarán los valores de todas las variables.

- Al ejecutar el modelo de Simulink para el controlador con corriente de referencia de 1 A se obtienen resultados similares a los de las figuras 5.4b y 5.4c.



(a) modelo en Simulink para el lazo de control en corriente



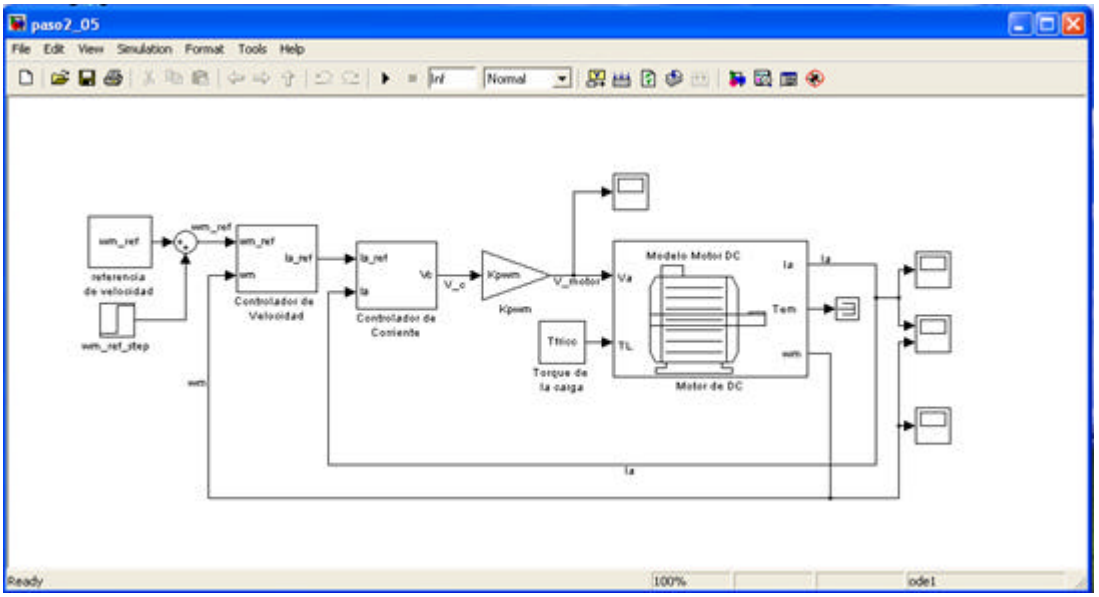


(b) Forma de onda de la corriente para una referencia de 1ª **c) Forma de onda de la velocidad para una referencia de 1ª**

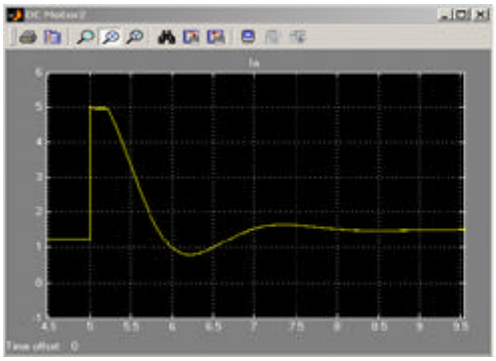
Figura 5.4 Modelo en Simulink y resultados para el lazo de control de corriente

- Una vez que la respuesta en corriente se considere optima (bajo pico de sobrepaso, bajo tiempo de subida, error de estado estable cero), el controlador de velocidad se puede diseñar.
- Un controlador similar PI para el lazo de velocidad se debe añadir al modelo en Simulink.
- Siga el algoritmo descrito en el parágrafo 8.7.2 del libro Electric Drives [1] para diseñar el lazo de control de velocidad para un hertz de ancho de banda, usando los parámetros del motor determinados en el experimento anterior.

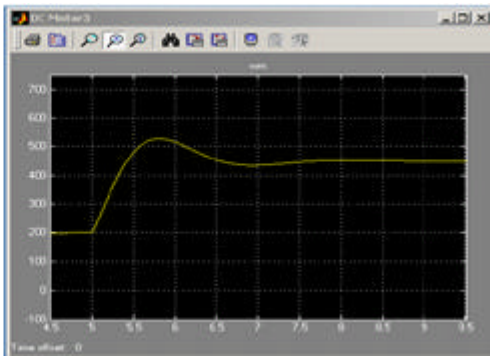
El modelo en Simulink para el control en cascada y las formas de onda para velocidad y corriente se muestran en la figura 5.5



(a) Modelo en Simulink para el control en cascada



(b) Forma de onda de corriente para un cambio en escalón en velocidad



b) Forma de onda de velocidad para un cambio en escalón en velocidad -

Figura 5.5 Modelo en Simulink y resultados del control en cascada

El control de velocidad PI tiene un límite en la salida de corriente de ± 5A, necesario para limitar la corriente durante los transientes (tanto en la simulación como en el sistema en tiempo real). Para probar el diseño del controlador hacemos un cambio en escalón en la velocidad de referencia. En el ejemplo de la figura 5.5, la velocidad es comandada por un cambio en escalón a 200 rad/s en t = 0 entonces en t = 5 segundos se cambia a 450 rad/s el comando anterior en la velocidad de referencia se implementa usando bloques de constante y escalón (*constant y step source blocks*). Los resultados del control en cascada se muestran en la figura 5.5.
Si los parámetros del controlador fueron sintonizados correctamente entonces vamos al siguiente paso e implementemos el algoritmo de control en un sistema en tiempo real.

5.4 Implementación en tiempo real del control realimentado

Para la implementación en dSPACE el modelo del motor de DC se implementará con el motor real y el bloque Kpwm se remplazará por el conversor de potencia con una fuente de alimentación de 42 V. El voltaje de control para la conversión del ciclo de trabajo (*duty cycle*) ya fue discutido e implementado en experimentos anteriores.

- Agregue el bloque de reset usado en el experimento anterior.
- Modifique el bloque de control de velocidad como se muestra en la figura 5.6. Cambie los parámetros del bloque integrador haciendo doble clic en el y cambiando su reset externo a *"either"*. Abra el controlador de corriente y cambie el reset del integrador como fue hecho en el control de velocidad. Conecte las entradas de reset del controlador de velocidad y del controlador de corriente como se muestra en la figura 5.7. estos cambios permiten a los integradores trabajar correctamente en tiempo real.

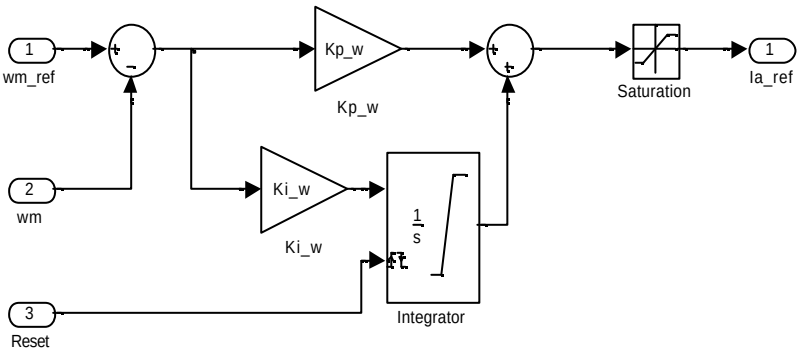


Figura 5.6 Modelo en Simulink para un control de velocidad en tiempo real de un motor DC.

- Quite el modelo de la mascara del motor DC y el bloque de ganancia Kpwm.

- Copie y pegue el calculador del ciclo de trabajo (duty-cycle) del modelo Simulink usado en experimentos anteriores. (ver figura siguiente)
- Se deben medir la corriente y la velocidad. Para las medidas, use los bloques ya diseñados en experimentos anteriores.
- Reemplace la referencia de velocidad, *wm_ref_step* y el bloque de suma con un bloque de constante para ajustar la referencia de la velocidad.

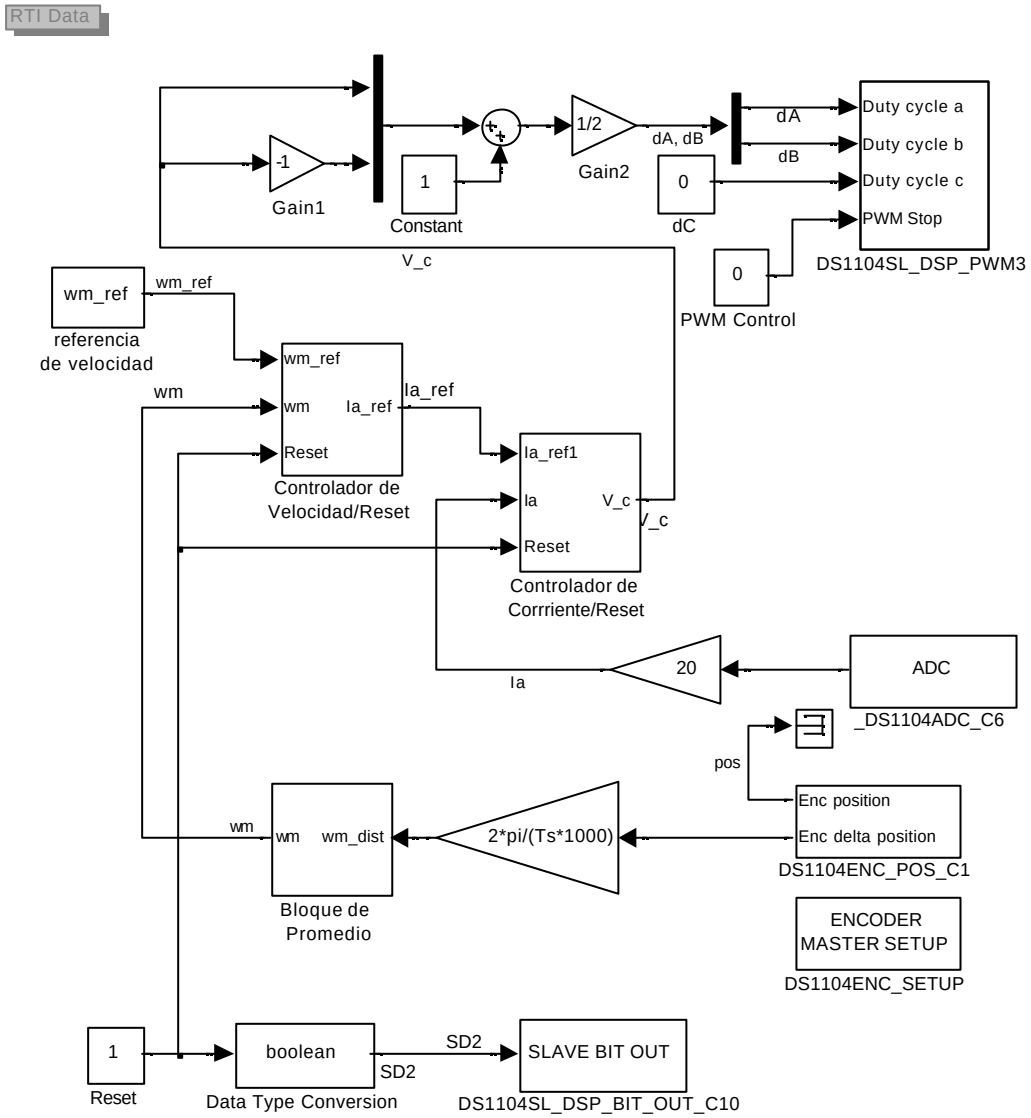


Figura 5.7 Modelo Simulink para implementación en tiempo real de un control de motor DC

- En la pantalla de Matlab, ajuste el tiempo de muestreo Ts = 0.0001 y el voltaje del bus dc en Vd = 42V.También ajuste el valor de las diversas variables que usted halla definido en el modelo.
- Cambie la frecuencia de conmutación en el DS1104L_DSP_PWM3 a 50000 Hz.
- Ajuste los parámetros de simulación con Ts como tiempo de muestreo e inf como el tiempo total de simulación. Ahora, el modelo se parece al de la figura 5.7.
- Construya (CTRL+B) el modelo y arranque Control Desk.
- Cree un nuevo experimento y active la misma raíz de trabajo como la de la ruta para el modelo de Simulink.
- Cree un nuevo *Layout* y adicione algunos controles como los mostrados en la figura 5.8.
- Corra el experimento y compare los resultados en tiempo real con las simulaciones.

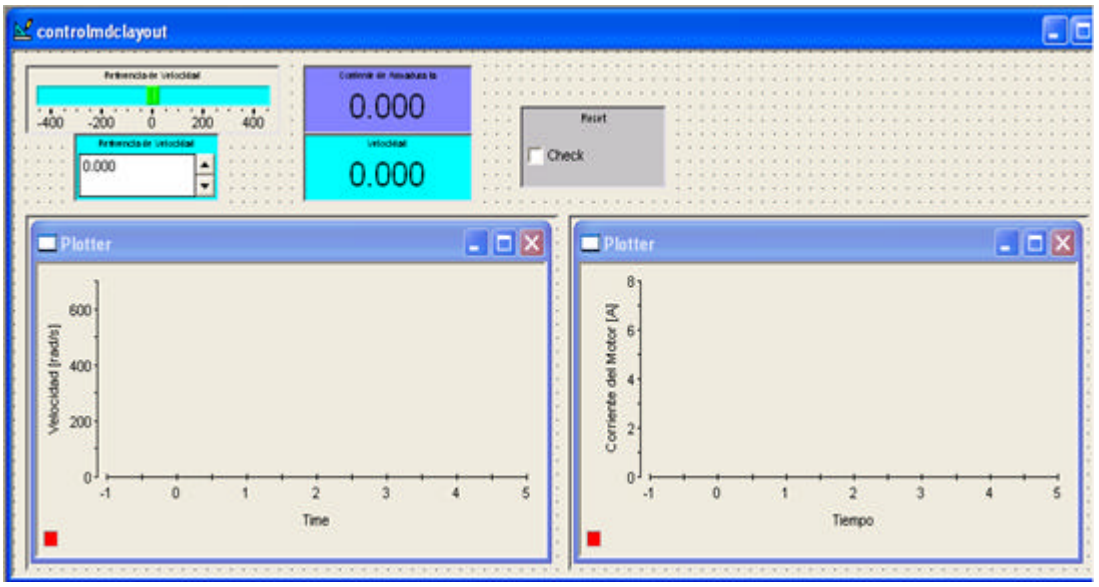


Figura 5.8: Interfaz de Control Desk para un control de motores DC (Cambio en escalón de 200 – 450 rad/s)

Experimento 6

Control de frecuencia de motores AC [17]

6.1 Introducción

El experimento propone diseñar e implementar un algoritmo de control V/F para un motor de inducción. Primero se implementa un algoritmo PWM sinusoidal en modo conmutado para un inversor tripolar en modo conmutado. Después se diseña la estrategia V/F y el experimento es descargado en la tarjeta de control de dSPACE para manejar un motor de inducción de 42 V.

6.2Modelo Simulink

Para manejar un motor de inducción, necesitamos alimentarlo con un voltaje sinusoidal variable en amplitud y frecuencia. En maquinaria eléctrica y otras aplicaciones electrónicas de potencia, tales como en rectificadores en modo conmutado, donde la idea es alimentar corrientes sinusoidales trifásicas. En el sistema de la figura 6.1 el neutro "n" es el nodo de conexión en estrella de los devanados del estator del motor de inducción. En frecuencias de conmutación relativamente altas comparadas con la frecuencia fundamental de síntesis, es posible representar el circuito de conmutación de la figura 1a por medio de transformadores ideales en términos de cantidades promedio de conmutación, como se muestra en la figura 6.2. Las variables promedio con una barra ("—") en la parte superior no presentan frecuencia de rizado en la conmutación.
La idea de alimentar con corrientes sinusoidales balanceadas a un motor ac balanceado implica que los voltajes línea a línea en los terminales del motor deben ser sinusoidales en estado estable. En un motor ac balanceado, puede ser demostrado que los voltajes de fase del motor $(v_{an}, v_{bn}, y \quad v_{cn})$ son también sinusoidales y así mismo las corrientes del motor, los voltajes trifásicos suman cero en una base instantánea.

$$v_{an}(t) + v_{bn}(t) + v_{cn}(t) = 0 \tag{6.1}$$

Por supuesto, la anterior ecuación es también válida en una base promedio:

$$\bar{v}_{an}(t) + \bar{v}_{bn}(t) + \bar{v}_{cn}(t) = 0 \tag{6.2}$$

Donde,

$$i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0 \tag{6.3}$$

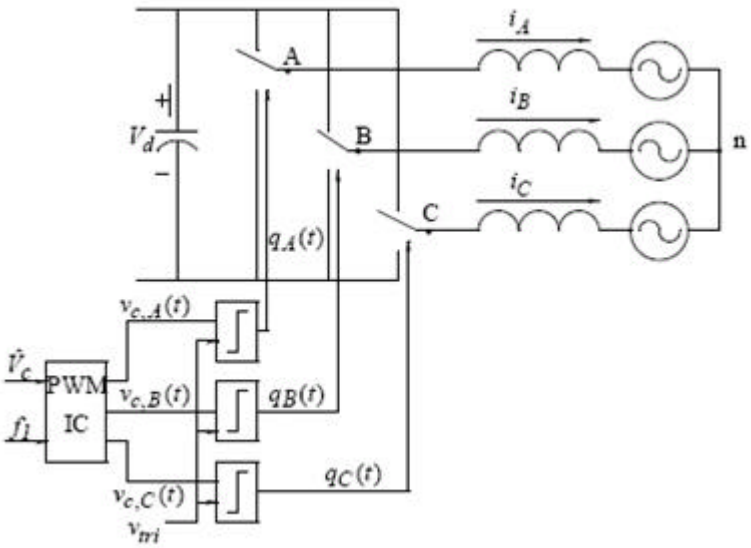


Figura 6.1 Inversor trifásico para motores de AC

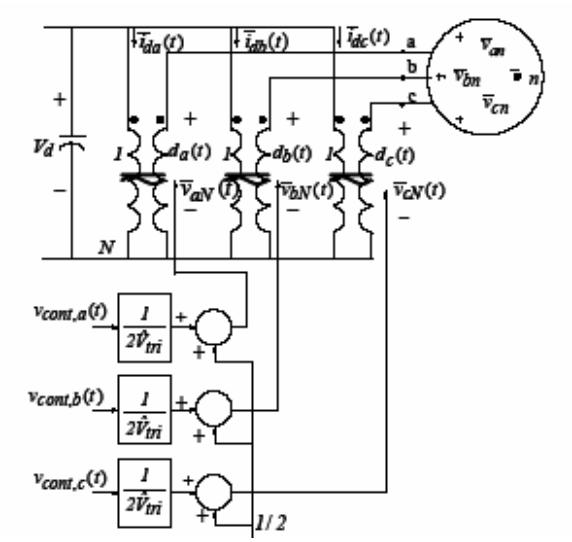


Figura 6.2 Representación promedio del inversor trifásico

6.2.1 Modulación de ancho de Pulso Sinusoidal

Una manera tradicional de hacer el PWM es la modulación de ancho de pulso sinusoidal, donde controles de voltaje sinusoidales se comparan con una señal portadora triangular para generar las funciones de conmutación $q_{a,b,c}$ en la figura 6.1. Los ciclos de trabajo resultantes (relación de transformación de los transformadores en la figura 6.2) están basados en la siguiente expresión:

$$d_a(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\frac{v_{cont,a}}{\hat{V}_{tri}} = \frac{1}{2} + \frac{\bar{v}_{an}}{V_d}(etc) \tag{6.4}$$

Donde $\bar{v}_{an} = d_a.V_d$, $\bar{v}_{bN} = d_b.V_d$, $\bar{v}_{cN} = d_c.V_d$ expresiones para $\bar{v}_{aN}$, $\bar{v}_{bN}$, $\bar{v}_{cN}$ pueden también ser escritas de manera similar usando 6.4:

$$\bar{v}_{aN} = \frac{V_d}{2} + \frac{1}{2}\left(\frac{V_d}{\hat{V}_{tri}}\right)v_{cont,a} \quad \text{(etc)} \tag{6.5}$$

Los voltajes de los terminales del inversor con respecto a la tierra DC contienen un *offset* de dc de $\frac{V_d}{2}$ el cual es de secuencia cero. Esta secuencia cero se cancela en los voltajes del motor $\bar{v}_{an}$, $\bar{v}_{bn}$, $\bar{v}_{cn}$.

6.2.2 Implementación en Simulink

Para implementar el algoritmo en Simulink, asumiremos primero que los tres voltajes trifásicos en los terminales del estator tienen las siguientes expresiones

$$\bar{v}_{an}(t) = V_m \cos(2pf.t)$$

$$\bar{v}_{bn}(t) = V_m \cos\left(2pf.t - \frac{2p}{3}\right) \tag{6.6}$$

$$\bar{v}_{cn}(t) = V_m \cos\left(2pf.t - \frac{4p}{3}\right)$$

La frecuencia f y la amplitud V_m son variables el algoritmo de control V/f implica que existe una relación entre la amplitud del voltaje y la frecuencia, por ejemplo la relación entre las dos cantidades es constante

$$K = \frac{V_m}{f} \tag{6.7}$$

Ahora asumiendo la frecuencia y conociendo la constante K se puede deducir fácilmente la amplitud del voltaje utilizando (6.7).
Las expresiones para los voltajes del estator están escritas en el dominio continuo, donde el tiempo es una variable continua. Para un sistema digital el tiempo es una variable discreta dependiendo del tiempo de muestreo. Dado que cada Ts segundos se calcula un nuevo valor del voltaje, el tiempo tiene que ser actualizado añadiendo el tiempo de muestreo al tiempo precedente:

$$t_k = T_s + t_{k-1} \tag{6.8}$$

- Esto se realiza fácilmente utilizando un bloque de memoria en Simulink, como se muestra en la figura 6.3. En el modelo el tiempo se ha multiplicado por $2pf$ para dar la variable wt.

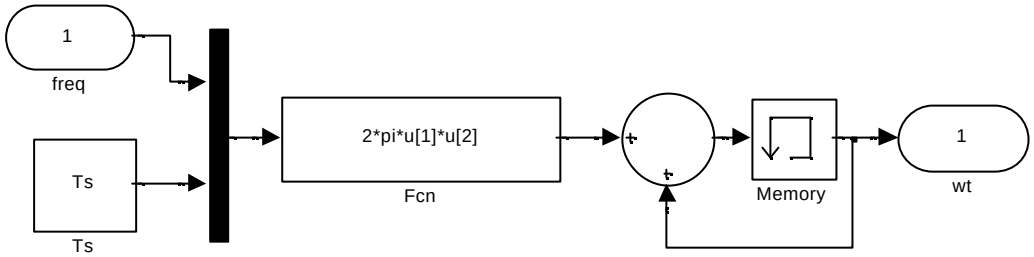


Figura 6.3 Modelo en Simulink para el calculo del argumento del voltaje

- Enmascare este modelo y no olvide ajustar el parámetro en el bloque de memoria a Ts. Esto asegura que el retardo llevado a cabo en el cálculo del tiempo será exactamente un tiempo de muestreo.
- Use tres bloques de funciones para implementar las relaciones de 6.6 y 6.4 el modelo queda como en la figura 6.4
- Después de enmascarar los bloques en la figura 6.4 el modelo Simulink puede completarse con el valor del comando de la frecuencia, la constante K = V/f y el bloque DS1104SL_DSP_PWM3.
- Un bloque limitador de relación se inserta en la ruta de la frecuencia de referencia para asumir los tiempos de aceleración y desaceleración. Se hace necesario limitar estos dos transientes para limitar las corrientes del estator durante el arranque o el frenado.

El bloque del PWM sinusoidal contiene el modelo enmascarado de la figura 6.4, por supuesto en nuestro experimento nos interesa monitorear la velocidad y al menos una corriente del estator. Complete su modelo de la siguiente manera:

- Se debe agregar un limitador del ciclo de trabajo, con los límites ajustados en 0,1 y 0,9 para asegurar que la tarjeta de los inversores trabaje adecuadamente.