

Asignatura: **SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

Depto. De Ing. Electrónica y Computación – Facultad de Ingeniería – U.Na.M. – 2025

LABORATORIO N°2a

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES DIGITALES

UTILIZANDO UN CONTROLADOR DIGITAL DE SEÑAL (DSC):

CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CC

1. Objetivo general de la práctica de laboratorio

Llevar a la práctica de laboratorio, la puesta en funcionamiento de un controlador digital implementado en un DSC con tamaño de palabra de 16 bits y aritmética de punto fijo. Las técnicas de control a ser utilizadas se diseñarán en base al modelo de la planta de cada motor CC. Diseñado el controlador, se verificará y analizará el desempeño del motor, tanto en régimen permanente como transitorio, mediante la respuesta de la velocidad a variaciones de referencia y a presencia de perturbaciones. Los resultados experimentales obtenidos, deberán contrastarse con los resultados de la simulación matemática realizada luego de efectuado el diseño del controlador.

2. Objetivos específicos de la práctica de laboratorio

- Verificar el modelo del motor CC.
- Seleccionar el controlador en función del tipo de proceso.
- A partir de las especificaciones de desempeño, efectuar el diseño de las ganancias del controlador en base a la función de transferencia del proceso, utilizando las propiedades del lugar de las raíces.
- Realizar una simulación digital en Matlab para verificar el proyecto realizado en el punto anterior. Si es necesario, verificar el diseño mediante una simulación en PSIM.
- Efectuar la programación digital del controlador seleccionado y diseñado anteriormente, en el DSC dsPIC30F4011 que proporciona la cátedra. La programación y depuración (*debugging*) se realizará en el entorno de desarrollo MPLAB de la empresa Microchip.
- Obtener los resultados experimentales. Ver detalles en la sección 5 de esta guía.

Asignatura: SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

Depto. De Ing. Electrónica y Computación – Facultad de Ingeniería – U.Na.M. – 2025

3. Equipamiento utilizado y esquemas de conexión

Para realizar los ensayos de este laboratorio se utilizará el siguiente equipamiento:

- Placa con DSC dsPIC30F4011.
- Módulos con motor CC de electroventilador:
 - Omer EV-703.
 - Remssi SR42-12200.
 - Elettronica Venetta TY36A/EV
 - Remssi 59L2401
 - Alecop MV-541
- Fuente de alimentación BAW HY3005D.
- Fuentes de alimentación Maeni SW-12-10, Maeni SW-12-20 y SW S-240-12.
- Osciloscopios de almacenamiento digital de 2 canales.
- Herramientas de desarrollo PICKit 2.
- Software integrado para programación y depuración MPLAB V8.0 o superior con compilador de lenguaje “C” MPLAB C30.

Los esquemas de conexión de los motores a utilizar y el detalle de la placa de control con el DSC, están presentados en la Figura 1.

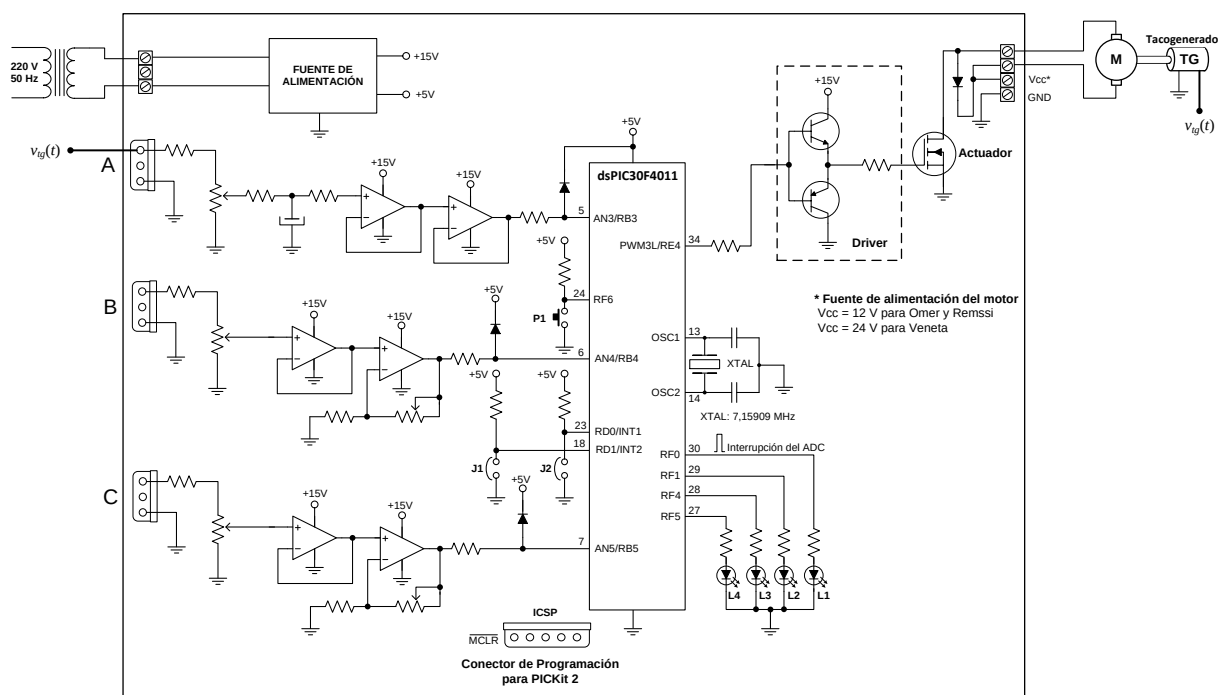


Figura 1: Detalle de la placa de control con dsPIC30F4011 y esquema básico de conexión para el control en lazo cerrado de los motores.

Asignatura: **SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

Depto. De Ing. Electrónica y Computación – Facultad de Ingeniería – U.Na.M. – 2025

Se propone diseñar e implementar:

1. Un compensador proporcional-integral (PI) para eliminar el error en régimen permanente y disminuir el tiempo de asentamiento, permitiendo la existencia de un porcentaje de sobrepaso.
2. Un compensador (PI-D) proporcional-integral menos una acción derivativa a partir de la señal controlada. A la acción PI agregar una acción PD en serie y obtener finalmente el PI-D resultante.

4. Especificaciones de Proyecto

Para los motores, las especificaciones de desempeño para diseñar el compensador PI son las siguientes: Sobrepaso $M_p = 5\%$ y tiempo de asentamiento $t_s = 0,45$ s.

Sabiendo que un controlador PID puede obtenerse mediante un controlador PI en serie con un PD y utilizando el PI del punto anterior, diseñar a través del método del LGR, el PD para que el PID disminuya el sobrepaso M_p a 2% y t_s sea similar al obtenido anteriormente. A la hora de implementar en el DSC utilizar la configuración PI-D.

Nota: En ambos casos, para efectuar el diseño del controlador, debe tenerse en cuenta en la función de transferencia muestreada de la planta, un atraso de una muestra, lo cual representa el tiempo T_d asociado a la adquisición/conversión de la variable controlada (velocidad) y el cálculo de la acción de control y la actualización de esta última. Cada grupo deberá generar un algoritmo de Matlab en el cual deberá realizar el diseño de los controladores, según el motor a utilizar. Por otro lado, se suministran los algoritmos del DSC, en los cuales debe configurarse la frecuencia de muestreo obtenida para cada caso. Esto se realiza escribiendo un número entero en la definición N_{Tpwm} , resultado de la relación entre el periodo de muestreo de diseño y el periodo de conmutación del actuador, siendo este último de 1 milisegundo.

5. Procedimiento.

1. Para el diseño del controlador, deberán utilizar la función de transferencia del motor, que vincula a la velocidad angular (rad/s) con la tensión de armadura $G_M(s) = \Omega(s)/V_a(s)$, **obtenida en el desarrollo del laboratorio N°1** (seleccionar a su criterio el modelo

Asignatura: SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

Depto. De Ing. Electrónica y Computación – Facultad de Ingeniería – U.Na.M. – 2025

de primer orden que mejor represente la planta real). Incluir a la FT anterior la dinámica del actuador definida por: $V_a(s) = V_{cc}D(s)$ junto a la ganancia del sensor $V_s(s) = K_s\Omega(s)$; además, considerar el valor de normalización dentro del dsPIC de $K_N = 1/4$; a los efectos de obtener la función de transferencia: $G_N(s) = V_N(s)/D(s) = K_sK_NV_{cc} G_M(s)$. (D : ciclo útil). En el siguiente diagrama de bloques se presenta un esquema del sistema de control de velocidad.

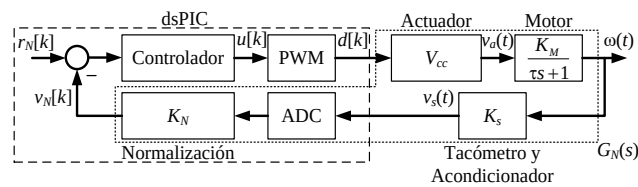


Figura 2: Diagrama de bloques del sistema de control de velocidad.

A continuación, se presenta un detalle de la conversión analógico digital (ADC) realizada en el dsPIC junto a la normalización de la variable velocidad, la cual es representada en formato Q_{12} .

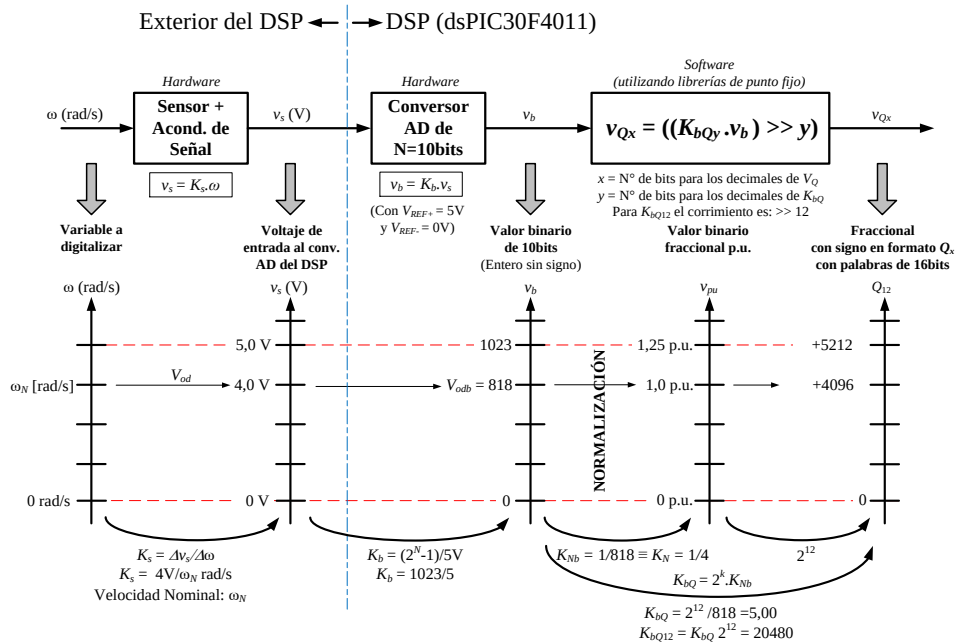


Figura 3: Detalle de la conversión ADC y la normalización de la velocidad del motor.

En la Figura 3 se puede apreciar que la variable a digitalizar es la velocidad del motor ω [rad/s], la cual pasa por un acondicionador primeramente v_s [V]; dicho valor debe estar

Asignatura: SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

Depto. De Ing. Electrónica y Computación – Facultad de Ingeniería – U.Na.M. – 2025

comprendido en el rango de tensión admisible por el dsPIC (de 0 a 5 V). Al realizar la conversión analógica digital se obtiene un valor binario de 10 bits, el cual es normalizado con respecto a un valor base (4 V) y luego se representa a ese valor en un formato Q₁₂. Dentro del dsPIC se emplea el valor K_{bQ12} para normalizar y transformar el valor binario del ADC a Q₁₂. La ganancia total que agrega esta etapa al sistema de control, y que se debe tener en cuenta a la hora de diseñar el controlador, es de $K_s K_N$.

Por otro lado, en la siguiente figura se presenta un detalle del módulo PWM empleado en este caso junto al actuador. En dicho esquema se presentan las operaciones realizadas desde que se posee una acción de control $u[k]$ en formato Q₁₂ hasta obtener el valor de la tensión aplicada sobre el motor $v_a(t)$.

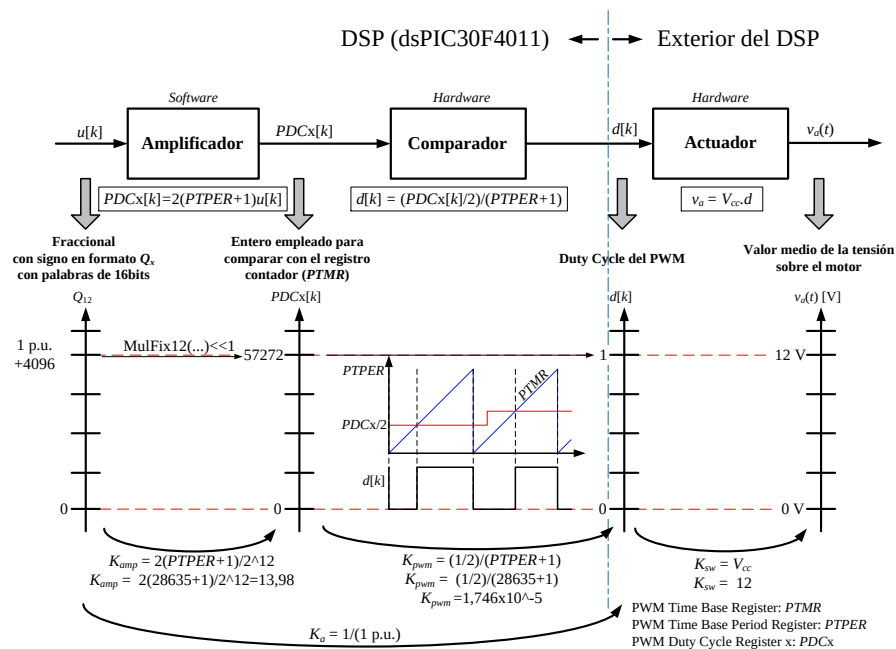


Figura 4: Detalle del módulo PWM y del actuador empleado en el control del motor

Observando los cálculos realizados vemos que el PWM agrega una ganancia unitaria al LC del sistema, debido a que el amplificador y el comparador generan ganancias que se cancelan mutuamente. Mientras que la etapa del actuador agrega una ganancia de V_{cc} .

2. Obtener a continuación, la función de transferencia muestreada de la planta, que permitirá realizar el diseño de los parámetros del controlador en tiempo discreto. El

Asignatura: **SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

Depto. De Ing. Electrónica y Computación – Facultad de Ingeniería – U.Na.M. – 2025

periodo de muestreo debe ser obtenido de las características de la respuesta al escalón. Se utilizará el **tiempo de subida de la respuesta al escalón de lazo cerrado** con un número de muestras entre 4 y 10. Una vez determinado el periodo de muestreo, utilizar el valor entero próximo, que sea múltiplo de la frecuencia de conmutación o frecuencia de actuación PWM f_{pwm} de 1 kHz. Es decir, el periodo de muestreo será $T_s = N_{Tpwm} \times T_{pwm}$ Esto significa que la frecuencia de muestreo a utilizar será un número entero $\times$ veces menor que la frecuencia de actuación.

3. Utilizando las propiedades de fase y de módulo del lugar de las raíces y el periodo de muestreo seleccionado en el punto 2, diseñar los parámetros para el controlador digital PI. Esto es, la posición del cero y el valor de la ganancia para la siguiente función de transferencia $G_{cd}(z) = K_{pi} \frac{(z-a)}{(z-1)}$. Incorporar en la función de transferencia de la planta muestreada, el atraso de 1 (un) periodo de muestreo para modelar el atraso de implementación digital.

4. Simular este sistema de control con Matlab y luego contrastar estos resultados con la implementación en el DSC, utilizar la referencia de la Figura 5. Incluir la respuesta de la salida y la acción de control.

5. Agregar al PI diseñado, una acción PD en serie para conformar un controlador PID que cumpla con las especificaciones mencionadas anteriormente. Para la simulación emplear su variante PI-D que toma la acción derivativa a partir de la señal controlada.

6. Resultados experimentales y adquisición de datos:

1. Visualizar y adquirir en el osciloscopio, la **señal PWM en el pin 34-RE4 del DSC y en el pin 30-RF0, la señal de interrupción del ADC**. Esta señal indica el intervalo de tiempo de la implementación digital y la frecuencia de muestreo seleccionada en el diseño. Medir y anotar dicho intervalo de tiempo, adquiriendo el pulso mostrado en el osciloscopio en un canal y la señal PWM en otro canal para mostrar en qué instante se realiza el muestreo.

2. Adquirir en cada caso los resultados de las **variables internas** almacenadas en la memoria RAM del DSC. Estas variables deberán ser adquiridas de a una según: **(1)**

Asignatura: **SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

Depto. De Ing. Electrónica y Computación – Facultad de Ingeniería – U.Na.M. – 2025

referencia, (2) velocidad, (3) error y (4) acción de control. En el caso del PI-D, se deben adquirir también el **par de señales de la acción de control PI y la acción D.**

3. Para el arranque y observación del desempeño del sistema de control en cada uno de los casos, se propone realizar un perfil de variación de la referencia como el mostrado en la figura 5. Los instantes de cambio del mismo están especificados en el algoritmo del DSC. Con este perfil, deben registrarse los conjuntos de variables indicados en el punto 2 y además visualizar y registrar en el osciloscopio digital (en modo “roll”) el desempeño transitorio y de régimen permanente durante las variaciones en rampa y en escalón de la velocidad angular.

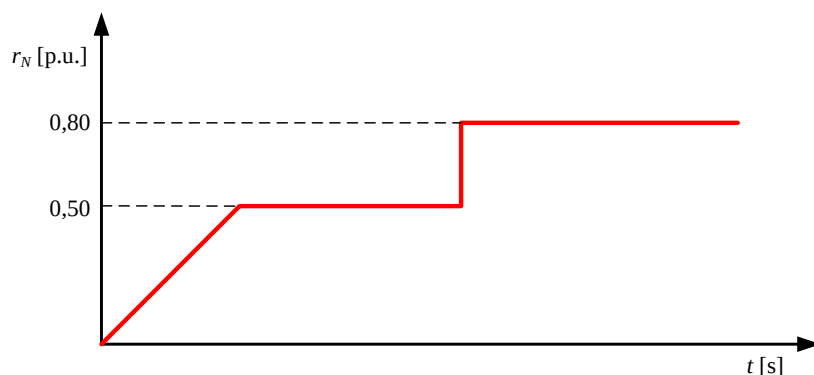


Figura 5: Perfil de variación de la referencia.

4. Con la referencia en su valor final de regulación, **provocar una perturbación de carga (variación de torque en el eje aplicando un freno)** con el fin de visualizar la capacidad del sistema de control para rechazar perturbaciones. Para esto, en el ensayo de cada uno de los controladores diseñados, visualizar y adquirir con el osciloscopio la velocidad del eje del motor para observar la variación de esta variable cuando se aplica la perturbación en el eje. En el gráfico adquirido, medir el sobrepaso y el tiempo de asentamiento de la señal controlada al aplicar el disturbio.

7. Informes

Los alumnos deben presentar un informe conteniendo lo siguiente:

- Carátula con el nombre de la cátedra, título del laboratorio, año, nombres de los alumnos integrantes del grupo y nombres de los profesores que integran la cátedra.

Asignatura: **SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

Depto. De Ing. Electrónica y Computación – Facultad de Ingeniería – U.Na.M. – 2025

- Introducción.
- Metodología del ensayo.
- Desarrollo del informe, detallando todos los pasos realizados según se indica en los objetivos específicos y el procedimiento de esta guía.
- Para cada controlador implementado, colocar los **resultados de la simulación y los experimentales empleando la referencia especificada**, además **incluir la acción de control de las simulaciones y de los ensayos experimentales**.
- Conclusiones del ensayo.
- **Nota:** Guardar especial cuidado en el contenido conceptual de la redacción.
- **Contrastar los resultados experimentales con la simulación.**