

Informe de Laboratorio

Control Feed-Forward (FF), Medición y Gráfico de RPM

Curso: Sistemas Embebidos

Integrantes: Daniel Benavides – Paolo Gómez - David Gonzales

1. Objetivo

Implementar en un microcontrolador STM32 un control de velocidad con estrategia Feed-Forward (FF) para un motor DC con encoder, realizando medición de velocidad en RPM, rad/s y mm/s; controlar la potencia mediante PWM; adquirir y visualizar los datos en una aplicación de PC (Qt); aplicar filtrado digital; y caracterizar la relación velocidad-voltaje para habilitar una función de referencia en mm/s.

2. Materiales

- STM32 con interfaz USB
- Motor DC con encoder de cuadratura
- Etapa de potencia (puente H / transistores)
- Fuente de alimentación (límite típico: 7.5 V, 1 A)
- PC con aplicación Qt para registro y visualización

3. Metodología

- a) Configuración del encoder: uso de un temporizador (TIM) en modo ENCODER con dos canales. Se determinó el número de pulsos por vuelta (PPV) para obtener RPM.
- b) Conversión de unidades: con PPV se obtuvo velocidad en rad/s y, asumiendo una rueda de 33.8 mm de diámetro, se calculó mm/s.
- c) Adquisición y visualización: los datos (tiempo, RPM y mm/s) se enviaron por USB a la PC, donde Qt graficó en tiempo real y generó un LOG para exportar a Excel.
- d) Filtrado digital: se aplicó un filtro FIR para suavizar la señal de velocidad y se comparó contra la señal sin filtrar.
- e) Barrido de voltajes: con un voltaje máximo fijo y seguro, se registró la curva de respuesta para valores de 1 V hasta el máximo en pasos de 1 V, obteniendo curvas velocidad-tiempo.
- f) Modelo lineal: con los datos, se construyó la gráfica RPM vs Voltios y se ajustó una recta para obtener la ecuación $\text{velocidad} = a \cdot V + b$.
- g) Funciones de control: se implementó una función que, dado un voltaje (float), regresara el CCR/PWM (int16_t) correspondiente, y otra que, dada una referencia de velocidad en mm/s, calculase el voltaje objetivo usando el modelo lineal.
- h) Sentido de giro: valores negativos de velocidad indican inversión del giro.
- i) Ajuste fino: se ajustaron constantes y escalas para minimizar error en régimen.
- j) Tiempo de respuesta: se midió el tiempo de establecimiento desde el escalón de referencia.
- k) Estabilidad: se verificó que el sistema trabajara de forma estable sin reinicios.

4. Desarrollo y detalles de implementación

Lectura de velocidad: a partir del conteo de pulsos del encoder cada Δt , se calculó $RPM = (\text{pulsos/PPV}) \cdot 60/\Delta t$. Para rad/s se usó $\omega = 2\pi \cdot RPM/60$. Para mm/s se empleó la circunferencia de la rueda ($\pi \cdot D$) con $D = 33.8 \text{ mm}$.

Conversión Voltaje→PWM (CCR): se creó una función que, recibiendo V_CMD , devuelve el CCR clamped dentro de $[0, CCR_MAX]$. Esta función se calibró midiendo la tensión real en el motor mediante divisor de voltaje y ADC, corrigiendo offset/ganancia.

Función mm/s→Voltaje: usando la recta ajustada ($\text{mm/s} = a \cdot V + b$), se calculó $V = (\text{mm/s} - b) / a$. Para referencia negativa, se conmuta el sentido del puente H.

Filtrado FIR: se aplicó un filtro de media móvil/ventana definida (orden N) para reducir ruido. Se compararon métricas (rizado en régimen, sobre impulso aparente) entre señales filtrada y no filtrada.

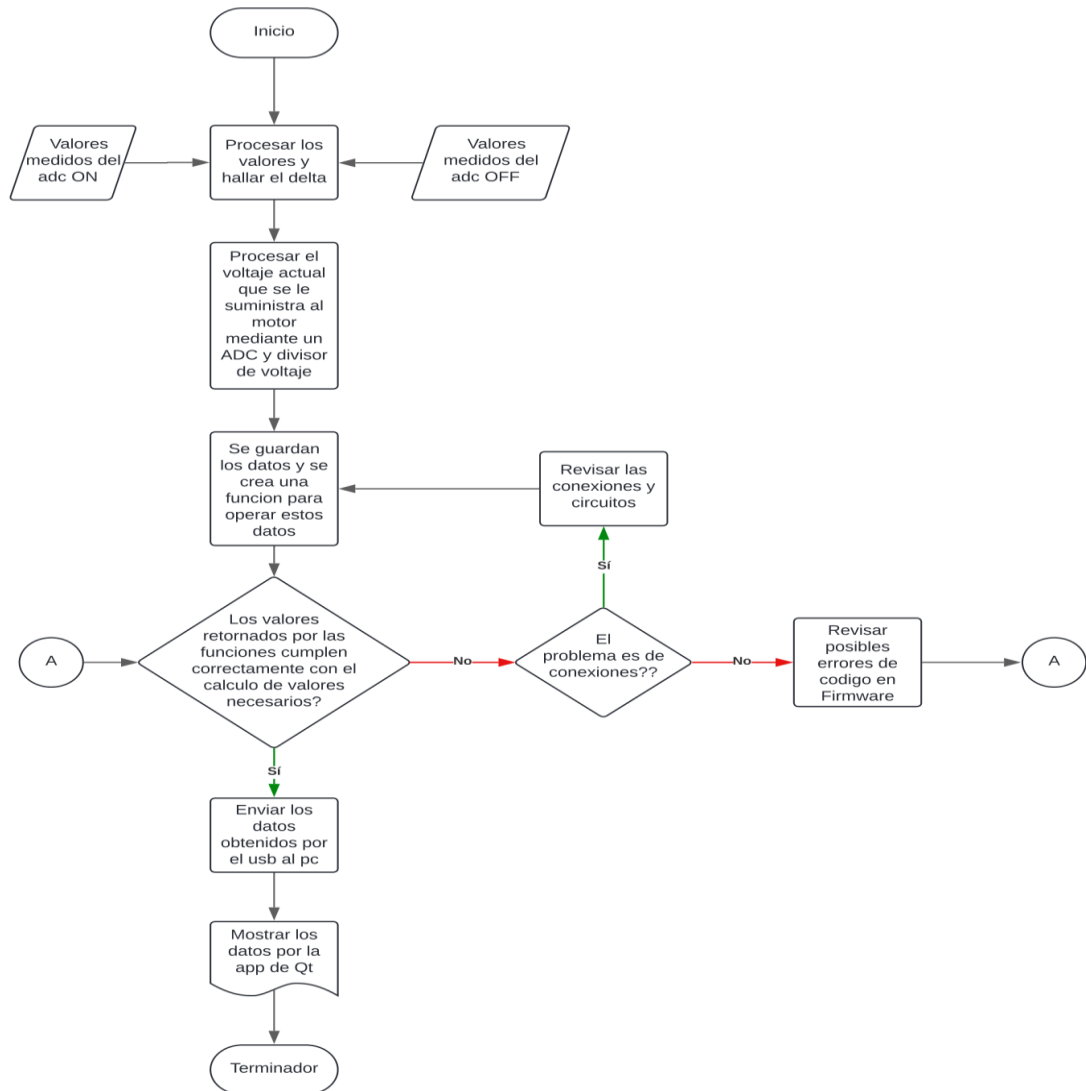
Interfaz Qt: se implementaron controles de arranque/detener, entrada de consigna en mm/s y gráficos de RPM y mm/s vs. tiempo. Se agregó salida de LOG (tiempo, velocidad) para análisis en Excel.

5. Resultados y validaciones

- Curvas velocidad–tiempo: para cada voltaje del barrido se obtuvo la respuesta típica de primer orden, con pendiente inicial alta y acercamiento asintótico al valor final.
- Gráfica RPM vs Voltios: mostró comportamiento aproximadamente lineal en el rango operativo, lo que permitió ajustar la recta y usarla para la función $\text{mm/s} \rightarrow V$.
- Tiempo de establecimiento: se estimó como el instante en que la velocidad permanece dentro de $\pm 5\%$ del valor final.
- Estabilidad: tras el ajuste de constantes y el uso de filtrado, el sistema operó sin reinicios ni oscilaciones sostenidas.

6. Diagrama de flujo del proceso

El siguiente diagrama resume la adquisición de datos, validación y envío a PC (Qt):



7. Conclusiones

1) El control FF combinado con caracterización velocidad-voltaje permite alcanzar rápidamente la consigna.

- 2) La relación casi lineal entre voltaje y RPM simplifica la conversión de mm/s a tensión de mando.
- 3) El filtrado FIR reduce el ruido de medición y mejora la legibilidad de las gráficas sin introducir retardos críticos para la tarea.
- 4) La interfaz Qt facilita el registro, visualización y exportación de datos para análisis posterior.
- 5) Una verificación sistemática de conexiones y firmware agiliza el diagnóstico de fallas.

8. Inconvenientes y soluciones

- Lecturas inestables del ADC → se recalibró el divisor de voltaje y se promedió en firmware.
- Desfase entre consigna y velocidad → se ajustó la ganancia del modelo lineal y el mapeo Voltaje→PWM.
- Ruido en el encoder a bajas RPM → se aumentó la ventana del filtro FIR y se validó el cableado.
- Comunicaciones USB saturadas → se redujo la tasa de transmisión y se aplicó empaquetado de datos.