

# Introducción a la Robótica Móvil

Primer cuatrimestre de 2018

Departamento de Computación - FCEyN - UBA

Actuación - clase 4

Control de un motor de CC

# Formas de actuación

Los actuadores pueden dividirse por el tipo de energía que usan:

- Eléctricos
- Hidráulicos
- Neumáticos



Actuador eléctrico



Actuador neumático



Actuador hidráulico

En robótica se pueden utilizar distintos tipos de actuadores, pero mayoritariamente usamos motores eléctricos.

# Algunos tipos de motores eléctricos



Servomotor



Motor de corriente continua

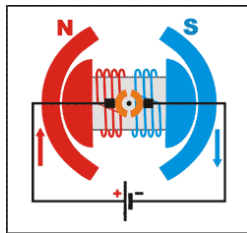


Motor paso a paso

- Motor de corriente continua (CC): a su vez se dividen en con o sin escobillas. Se controlan por velocidad. Giran libremente cuando se los alimenta con corriente. Alcanzan mayor velocidad que los PP. Se controlan por lazo cerrado. Los puedo emplear en ambientes no controlados.
- Motor paso a paso (PP): no giran libremente sino que avanzan por pequeños pasos que son los que caracterizan al motor. Suelen entregar mayor potencia que los CC a baja velocidad y viceversa a alta velocidad. Se suelen controlar por lazo abierto, por lo tanto tengo que asumir que las condiciones no van a cambiar, i.e. ambientes controlados.
- Servomotor: está conformado por un motor de corriente continua, una caja reductora y un circuito de control. Puede ser controlado tanto en velocidad como en posición. Tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición.

# Funcionamiento de un motor de CC con escobillas

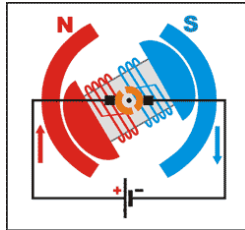
Se compone de: 1) un rotor con un bobinado, 2) un imán dividido en dos partes fijas, 3) un colector (conector rotativo) dividido en dos segmentos y 4) dos escobillas.



- Cuando pasa corriente por la bobina ésta se transforma en un electroimán.
- El electroimán comienza a girar debido al torque magnético que se produce.
- Cuando el electroimán alcanza la posición vertical los segmentos del colector dejan de hacer contacto con las escobillas y el campo electromagnético desaparece.
- La fuerza de inercia permite que continúe girando, los segmentos del colector pasan a ocupar la posición opuesta y cambian la polaridad de la bobina.
- El cambio constante de polaridad permite que los polos del electroimán siempre sea los mismos en cada lado del eje del motor y mantienen girando al rotor.

# Funcionamiento de un motor de CC con escobillas

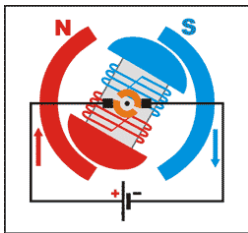
Se compone de: 1) un rotor con un bobinado, 2) un imán dividido en dos partes fijas, 3) un colector (conector rotativo) dividido en dos segmentos y 4) dos escobillas.



- Cuando pasa corriente por la bobina ésta se transforma en un electroimán.
- El electroimán comienza a girar debido al torque magnético que se produce.
- Cuando el electroimán alcanza la posición vertical los segmentos del colector dejan de hacer contacto con las escobillas y el campo electromagnético desaparece.
- La fuerza de inercia permite que continúe girando, los segmentos del colector pasan a ocupar la posición opuesta y cambian la polaridad de la bobina.
- El cambio constante de polaridad permite que los polos del electroimán siempre sea los mismos en cada lado del eje del motor y mantienen girando al rotor.

# Funcionamiento de un motor de CC con escobillas

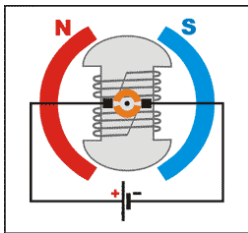
Se compone de: 1) un rotor con un bobinado, 2) un imán dividido en dos partes fijas, 3) un colector (conector rotativo) dividido en dos segmentos y 4) dos escobillas.



- Cuando pasa corriente por la bobina ésta se transforma en un electroimán.
- El electroimán comienza a girar debido al torque magnético que se produce.
- Cuando el electroimán alcanza la posición vertical los segmentos del colector dejan de hacer contacto con las escobillas y el campo electromagnético desaparece.
- La fuerza de inercia permite que continúe girando, los segmentos del colector pasan a ocupar la posición opuesta y cambian la polaridad de la bobina.
- El cambio constante de polaridad permite que los polos del electroimán siempre sea los mismos en cada lado del eje del motor y mantienen girando al rotor.

# Funcionamiento de un motor de CC con escobillas

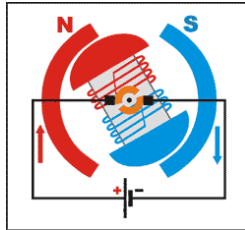
Se compone de: 1) un rotor con un bobinado, 2) un imán dividido en dos partes fijas, 3) un colector (conector rotativo) dividido en dos segmentos y 4) dos escobillas.



- Cuando pasa corriente por la bobina ésta se transforma en un electroimán.
- El electroimán comienza a girar debido al torque magnético que se produce.
- Cuando el electroimán alcanza la posición vertical los segmentos del colector dejan de hacer contacto con las escobillas y el campo electromagnético desaparece.
- La fuerza de inercia permite que continúe girando, los segmentos del colector pasan a ocupar la posición opuesta y cambian la polaridad de la bobina.
- El cambio constante de polaridad permite que los polos del electroimán siempre sea los mismos en cada lado del eje del motor y mantienen girando al rotor.

# Funcionamiento de un motor de CC con escobillas

Se compone de: 1) un rotor con un bobinado, 2) un imán dividido en dos partes fijas, 3) un colector (conector rotativo) dividido en dos segmentos y 4) dos escobillas.

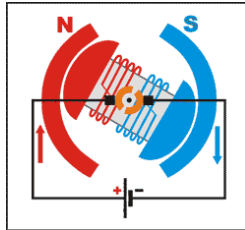


- Cuando pasa corriente por la bobina ésta se transforma en un electroimán.
- El electroimán comienza a girar debido al torque magnético que se produce.
- Cuando el electroimán alcanza la posición vertical los segmentos del colector dejan de hacer contacto con las escobillas y el campo electromagnético desaparece.
- La fuerza de inercia permite que continúe girando, los segmentos del colector pasan a ocupar la posición opuesta y cambian la polaridad de la bobina.
- El cambio constante de polaridad permite que los polos del electroimán siempre sea los mismos en cada lado del eje del motor y mantienen girando al rotor.



# Funcionamiento de un motor de CC con escobillas

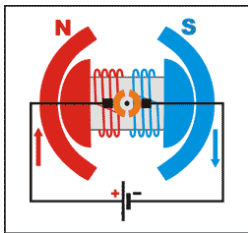
Se compone de: 1) un rotor con un bobinado, 2) un imán dividido en dos partes fijas, 3) un colector (conector rotativo) dividido en dos segmentos y 4) dos escobillas.



- Cuando pasa corriente por la bobina ésta se transforma en un electroimán.
- El electroimán comienza a girar debido al torque magnético que se produce.
- Cuando el electroimán alcanza la posición vertical los segmentos del colector dejan de hacer contacto con las escobillas y el campo electromagnético desaparece.
- La fuerza de inercia permite que continúe girando, los segmentos del colector pasan a ocupar la posición opuesta y cambian la polaridad de la bobina.
- El cambio constante de polaridad permite que los polos del electroimán siempre sea los mismos en cada lado del eje del motor y mantienen girando al rotor.

# Funcionamiento de un motor de CC con escobillas

Se compone de: 1) un rotor con un bobinado, 2) un imán dividido en dos partes fijas, 3) un colector (conector rotativo) dividido en dos segmentos y 4) dos escobillas.



- Cuando pasa corriente por la bobina ésta se transforma en un electroimán.
- El electroimán comienza a girar debido al torque magnético que se produce.
- Cuando el electroimán alcanza la posición vertical los segmentos del colector dejan de hacer contacto con las escobillas y el campo electromagnético desaparece.
- La fuerza de inercia permite que continúe girando, los segmentos del colector pasan a ocupar la posición opuesta y cambian la polaridad de la bobina.
- El cambio constante de polaridad permite que los polos del electroimán siempre sea los mismos en cada lado del eje del motor y mantienen girando al rotor.

# ¿Cómo hacemos para prender y apagar el motor?

Los motores de CC suelen trabajar a tensiones y corrientes superiores a las de los microcontroladores. Si intentamos alimentar el motor desde el pin del microcontrolador probablemente se queme.

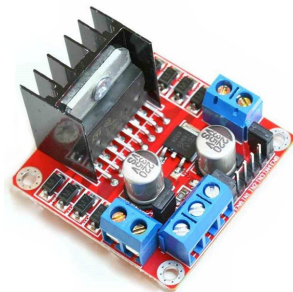
¿Cómo controlamos la alimentación del motor?

# Drivers

- Los driver permite manejar corrientes y tensiones mayores a la de la lógica digital.
- Abstraen la interfaz de control del motor a una lógica de control digital.
- Tienen la capacidad de switchear a alta frecuencia.
- Sirven como una aislación de las corrientes y tensiones del “mundo analógico” al “mundo digital”.

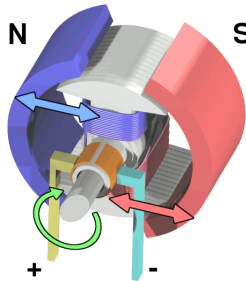
En la práctica vamos a usar el driver L298:

- Puede controlar dos motores CC o un PP.
- $V_{in} = 5V$  (lógica) y 6V a 12V (motores).
- Corriente por canal de salida de hasta 2A



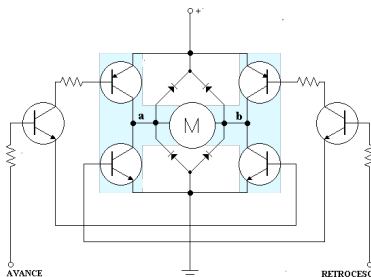
# ¿Cómo hacemos que el motor gire en un sentido u otro?

Según la polaridad de los cables que alimentan el colector del motor, el rotor gira en sentido horario o antihorario.



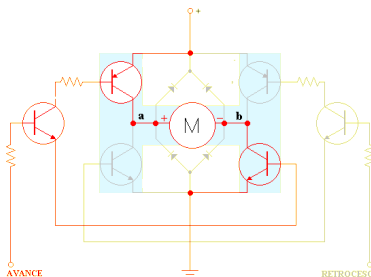
¿Cómo cambiamos la polaridad de los cables que se conectan al motor?

# Puente H de transistores para motores de CC



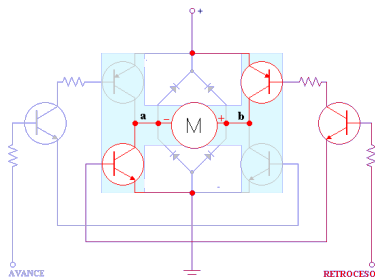
- Es una de las soluciones más utilizadas en el control de motores de CC, cuando es necesario que se pueda invertir el sentido de giro.
- El nombre proviene de la posición en que quedan los transistores en el diagrama del circuito.
- Las señales de AVANCE y RETROCESO jamás deben coincidir, sino los transistores se podrían quemar.
- Para que la corriente circule en el sentido que quiero cada vez que se conmute la tensión, se colocan diodos.
- Este circuito ya viene implementado en el driver que vimos antes.

# Puente H de transistores para motores de CC



- Es una de las soluciones más utilizadas en el control de motores de CC, cuando es necesario que se pueda invertir el sentido de giro.
- El nombre proviene de la posición en que quedan los transistores en el diagrama del circuito.
- Las señales de AVANCE y RETROCESO jamás deben coincidir, sino los transistores se podrían quemar.
- Para que la corriente circule en el sentido que quiero cada vez que se conmute la tensión, se colocan diodos.
- Este circuito ya viene implementado en el driver que vimos antes.

# Puente H de transistores para motores de CC



- Es una de las soluciones más utilizadas en el control de motores de CC, cuando es necesario que se pueda invertir el sentido de giro.
- El nombre proviene de la posición en que quedan los transistores en el diagrama del circuito.
- Las señales de AVANCE y RETROCESO jamás deben coincidir, sino los transistores se podrían quemar.
- Para que la corriente circule en el sentido que quiero cada vez que se conmute la tensión, se colocan diodos.
- Este circuito ya viene implementado en el driver que vimos antes.



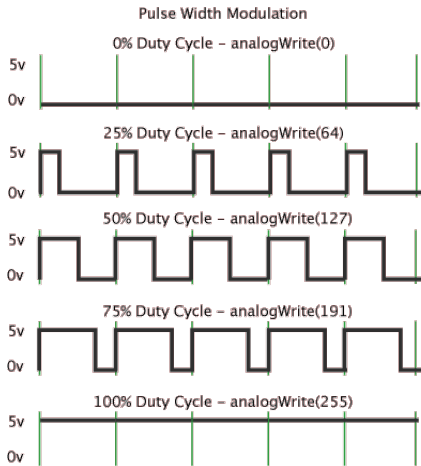
# ¿Cómo controlamos la velocidad de giro del motor?

Cada vez que alimentamos al motor empieza a girar a su máxima velocidad

¿Cómo podemos cambiar la velocidad de giro del motor?

Podría regular la tensión que le entrego. No es recomendable, el motor está preparado para entregar determinada potencia a la tensión preestablecida, perdería fuerza (torque para ser precisos).

# Modulación por Ancho de Pulso (PWM)



- Se enciende y apaga el motor muchas veces por segundo (varios KHz), siempre a máxima tensión.
- El motor nunca deja de girar por la inercia.
- Se basa en que la energía que recibe el motor disminuye de manera proporcional a la relación entre la parte alta y baja del ciclo de la onda cuadrada.
- La velocidad resulta de integrar en el tiempo la onda cuadrada.
- En Arduino usamos la función `analogWrite()` en determinados pines (senalados con el símbolo ~).

# ¿Cómo genero la señal de PWM?

Para controlar la velocidad de un motor de CC tenemos que variar el ancho del pulso (*duty*) del PWM.

¿Cómo podemos generar un PWM?

Podría generar el PWM como salida de un pin digital del microcontrolador, pero estaría usandolo todo el tiempo para esto.

Por eso los microcontroladores traen módulos de PWM (hardware) donde podemos setear la frecuencia del ciclo y el ancho del pulso (*duty*).

Además, ¿cómo vamos a resolver que un switch prenda y apague el motor a la frecuencia del ciclo de control del motor?

Para eso también está el driver, recordemos que tiene la capacidad de switchear a una muy alta frecuencia.

# ¿Cómo mantengo la velocidad deseada?

¿Cómo se a qué velocidad gira el motor? ¿Por la frecuencia del PWM que le doy? ¿Y si cambia el entorno se mantiene la velocidad?

¿Se puede controlar la velocidad del motor para que sea constante por más que cambie las condiciones de entorno?

Lo que hicimos hasta ahora fue controlar el motor a lazo abierto, para poder contestar esta pregunta necesitamos un control a lazo cerrado, y para eso un retorno (*feedback*) de la actuación.

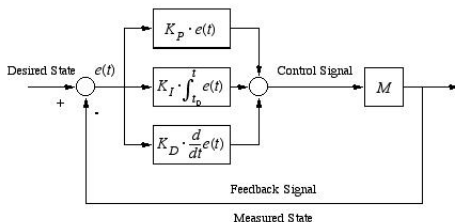
# Control a lazo cerrado por PID

El controlador Proporcional, Integrativo, Derivativo tiene tres términos que utilizan el error entre la velocidad deseada (consigna) y la velocidad real (medida por los encoders).

Si definimos  $u(t)$  como la señal del control y  $e(t)$  como el error, la ecuación formal del controlador PID es:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

donde los coeficientes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  definen las ganancias proporcional, integral y derivativa respectivamente.



¿Para qué sirve cada término de la ecuación?

- El **término proporcional** consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional para lograr que el error en estado estacionario se aproxime a cero.
- El **término integral** tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, integrando este error en el tiempo y sumándola a la acción proporcional.
- El **término derivativo** actúa cuando hay un cambio en el valor absoluto del error (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral). Tiende el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce.

¿Qué cosas se pueden controlar con un PID?

- caldera
- aire acondicionado
- posición de una válvula
- nivel de agua de un tanque

¿Qué es lo primero que tenemos que controlar en un robot?

- los motores del robot

# Control a lazo cerrado por PID

Para la implementación del controlador PID en un microcontrolador necesitamos discretizar los términos de la ecuación anterior.

Considerando un tiempo de muestreo  $\Delta t$  podemos aproximar el término integrativo:

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx \sum_{\tau=1}^t e(\tau) \Delta t$$

y el término derivativo:

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(t) - e(t-1)}{\Delta t}$$

Si la señal de control del PID se computa en cada ciclo de control, entonces  $\Delta t = 1$ . Luego la ecuación queda:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{\tau=1}^t e(\tau) + K_d (e(t) - e(t-1))$$



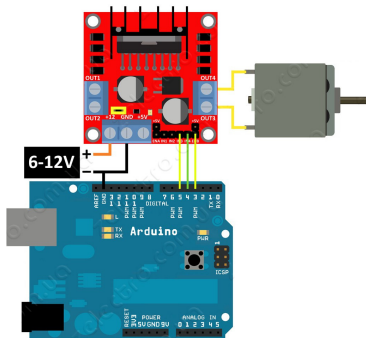
# Control de un motor de CC mediante PID

Componentes:

- Microcontrolador (Arduino).
- Motor de CC (controlado por PWM).
- Driver

¿Cómo se controla?

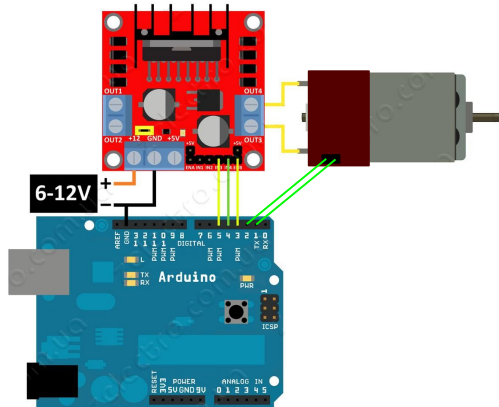
- Un pin para *enable*
- Dos pines para el PWM
- Adelante:  $0 < pwm_1 \leq 255$  y  $pwm_2 = 0$
- Atrás:  $pwm_1 = 0$  y  $0 < pwm_2 \leq 255$
- Frenado:  $pwm_1 = 0$  y  $pwm_2 = 0$



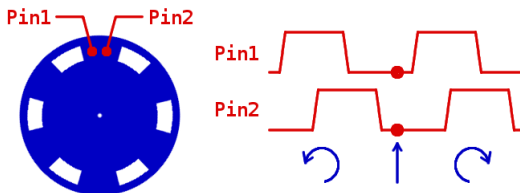
¿Falta algo?

¿Podemos cerrar el lazo?

!!!Falta el encoder!!!



¿Cómo funcionaba?



Funciones:

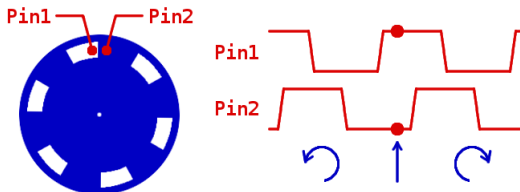
`#include <Encoder.h>`: incluye la librería Encoder.

`Encoder myEnc(pin1, pin2)`: crea una instancia usando 2 *pins* (mejor *performance* si son pines de interrupciones, ¿por qué?)

`myEnc.read()`: Devuelve la posición acumulada, puede ser positiva o negativa.

`myEnc.write(newPosition)`: Cambia el valor de la posición acumulada (reset) al valor `newPosition`.

¿Cómo funcionaba?



Funciones:

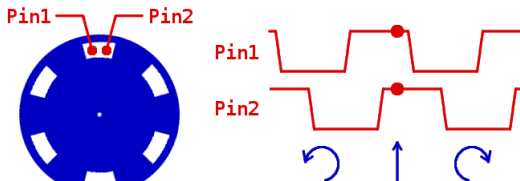
`#include <Encoder.h>`: incluye la librería Encoder.

`Encoder myEnc(pin1, pin2)`: crea una instancia usando 2 *pins* (mejor *performance* si son pines de interrupciones, ¿por qué?)

`myEnc.read()`: Devuelve la posición acumulada, puede ser positiva o negativa.

`myEnc.write(newPosition)`: Cambia el valor de la posición acumulada (reset) al valor `newPosition`.

¿Cómo funcionaba?



Funciones:

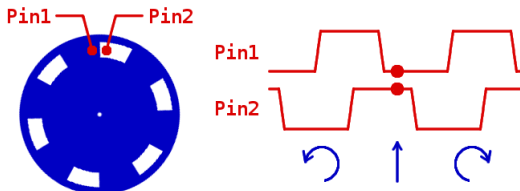
`#include <Encoder.h>`: incluye la librería Encoder.

`Encoder myEnc(pin1, pin2)`: crea una instancia usando 2 *pins* (mejor *performance* si son pines de interrupciones, ¿por qué?)

`myEnc.read()`: Devuelve la posición acumulada, puede ser positiva o negativa.

`myEnc.write(newPosition)`: Cambia el valor de la posición acumulada (reset) al valor `newPosition`.

¿Cómo funcionaba?



Funciones:

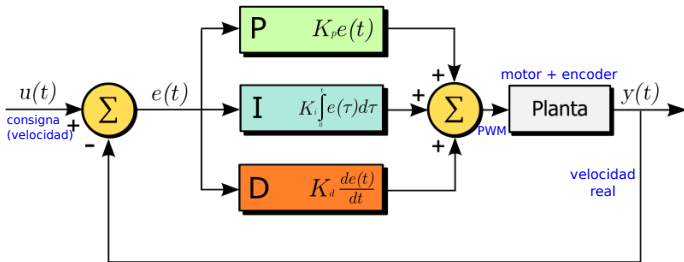
`#include <Encoder.h>`: incluye la librería Encoder.

`Encoder myEnc(pin1, pin2)`: crea una instancia usando 2 *pins* (mejor *performance* si son pines de interrupciones, ¿por qué?)

`myEnc.read()`: Devuelve la posición acumulada, puede ser positiva o negativa.

`myEnc.write(newPosition)`: Cambia el valor de la posición acumulada (reset) al valor `newPosition`.

# Recapitulando

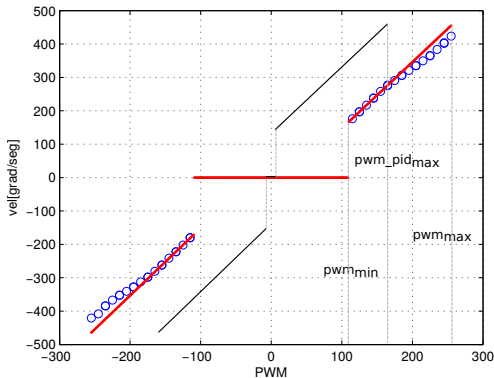


Pasos a seguir:

- 1 Calculo el error actual  $e(t) = y(t) - u(t)$  para el término  $P$ .
- 2 Acumulo el error  $I += e(t)$  para calcular el término  $I$  (¿satura?)
- 3 Calculo la diferencia entre el error actual y el error anterior para hallar el término  $D$ . Tip:  $e(t) - e(t-1) = (y(t) - u(t)) - (y(t-1) - u(t)) = y(t) - y(t-1)$ .
- 4 Calculo el nuevo valor de PWM sumando estos valores multiplicados por sus constantes respectivamente.

¿Esto cada cuanto corre?

# Funcionamiento de un motor de CC real



- Los motores tienen una “zona muerta”.
- ¿Afecta esto el control del motor con un PID? ¿Por qué?
- ¿Cómo lo solucionamos?
- $pwm\_pid_{max} = pwm_{max} - pwm_{min}$
- $pwm_{out} = pwm\_pid_{out} + sig(pwm\_pid_{out}) \times pwm_{min}$



## ¿Cómo hayamos los valores $K_p$ , $K_i$ y $K_d$ ?

- Hallar los coeficientes del controlador PID suele ser un problema difícil porque tienen que servir para cualquier consigna.
- No tenemos conocimiento *a priori* del modelo del proceso (motor y encoders). Existen muchos trabajos sobre esto!

---

### Pseudocódigo de la heurística de Ziegler-Nichols

---

- 1:  $K_p = K_i = K_d = 0$
  - 2: Incrementar  $K_p$  hasta que obtenemos  $K_u$  donde el controlador oscila con una amplitud constante y un período  $P_u$
  - 3:  $K_p = \frac{3}{5} K_u$
  - 4:  $K_i = \frac{2K_p}{P_u}$
  - 5:  $K_d = \frac{K_p P_u}{8}$
-

# Taller 3: basta de clase, quiero controlar un motor!

Hoy vamos a programar un Arduino de verdad!  
Bajar consigna desde la página de la materia!