

# Curso de Sensores en Plataforma Arduino

## Sensores de Velocidad

© 2013 Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá

**D. Julio Pastor Mendoza** ([pastor@depeca.uah.es](mailto:pastor@depeca.uah.es))

**D. Pedro Revenga de Toro** ([revenga@depeca.uah.es](mailto:revenga@depeca.uah.es))

Profesores del Departamento de Electrónica (UAH)



Universidad  
de Alcalá



# Motor de Corriente Continua



## Motor DC

- Un motor es una máquina que transforma energía eléctrica en energía mecánica de rotación.
- El movimiento de un motor DC se consigue con una corriente continua.





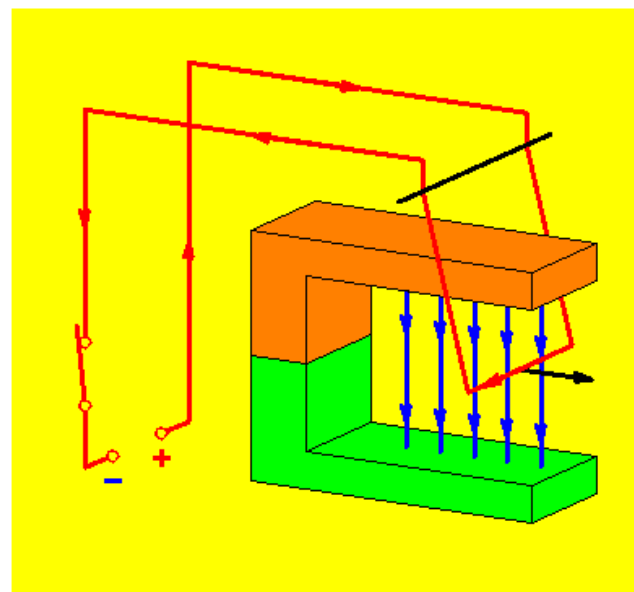
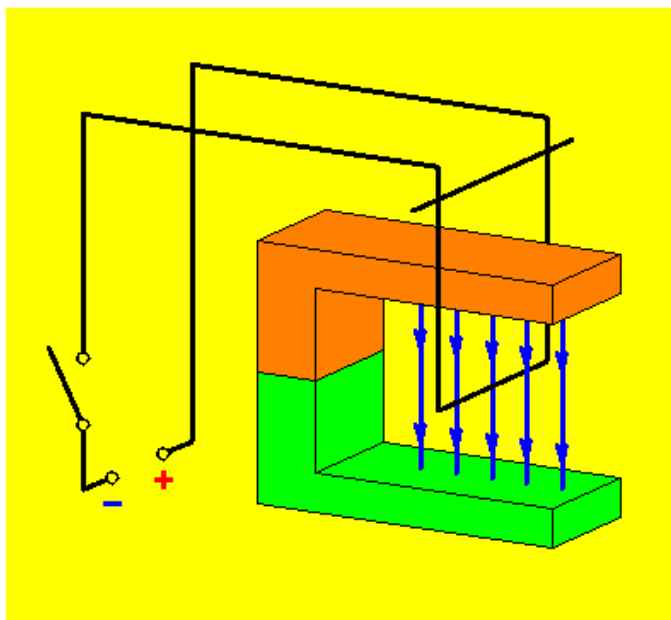
# Motor de Corriente Continua



## Principio de funcionamiento

- Fuerza de Lorentz
  - Cuando se introduce un conductor por el que circula una corriente en el seno de un campo magnético, aparece una fuerza (producto vectorial) que intenta sacar el conductor del campo magnético.

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$



[http://www.walter-fendt.de/ph14s/lorentzforce\\_s.htm](http://www.walter-fendt.de/ph14s/lorentzforce_s.htm)



# Motor de Corriente Continua

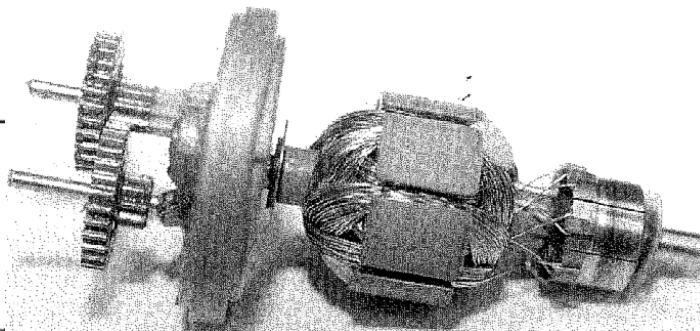
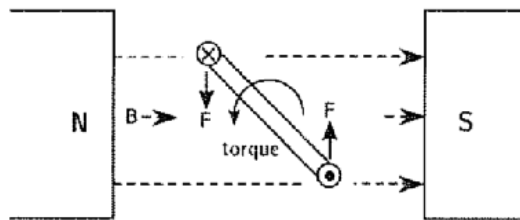
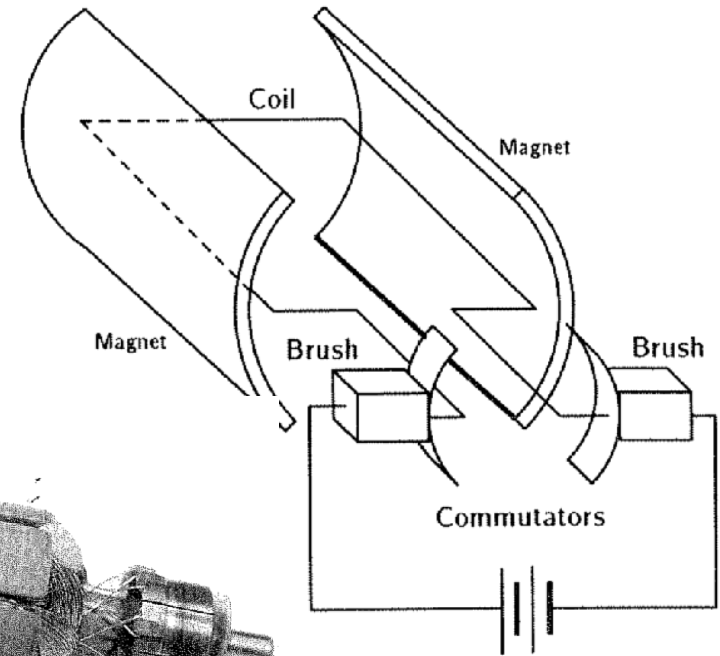
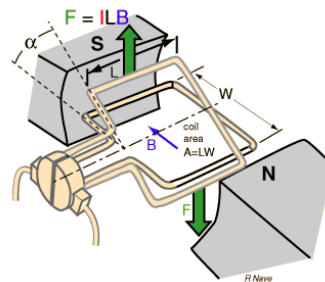
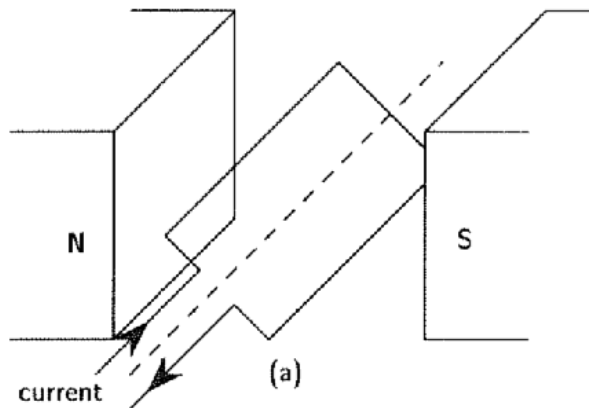


## Principio de funcionamiento

### – Fuerza de Lorentz

- Cuando se introduce un conductor por el que circula una corriente en el seno de un campo magnético, aparece una fuerza (producto vectorial) que intenta sacar el conductor del campo magnético.

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$





# Motor de Corriente Continua

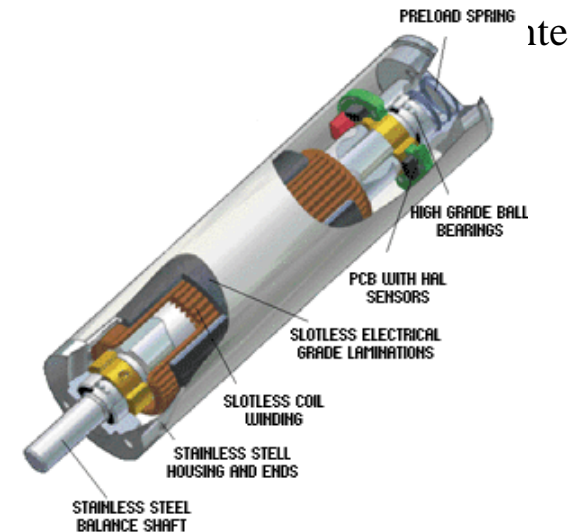


## Elementos de un motor

- Estator: la parte externa del motor que no gira
- Rotor: la parte móvil central del motor
- Escobillas: elemento que establece contacto eléctrico con el rotor (en las delgas)

## Tipos de Motores DC

- Motor DC de Imán Permanente
  - Se mantiene un campo magnético constante en el interior del motor
  - Se puede conseguir con imanes permanentes o con el de forma constante
  - El rotor es excitado con escobillas → rozamiento
- Motor DC sin escobillas (Brushless)
  - El rotor está formado por un imán permanente
  - El estator está formado por bobinas excitadas eléctricamente para hacer girar el imán central.
  - Son necesarios sensores para detectar la posición del rotor y activar el campo externo de forma adecuada.
  - Control mucho más complejo
  - Mejores prestaciones en eficiencia y en velocidad.





# Motor de Corriente Continua



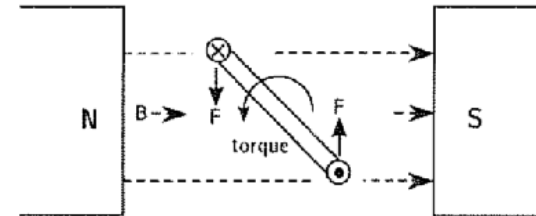
## Motor DC de Imán Permanente

- La fuerza de rotación (par) es proporcional a la corriente eléctrica que circula por el rotor
  - La fuerza sobre el conductor depende del campo magnético (constante) y de la corriente

$$T_m = k_m \cdot I_a$$



Constante de Par





# Motor de Corriente Continua



## Motor DC de Imán Permanente

- Ley de Faraday
  - La fuerza electromotriz de inducción (o inducida) en un circuito cerrado es igual a la variación del flujo de inducción  $\Phi$  del campo magnético que lo atraviesa en la unidad de tiempo

$$dE = -\frac{d\Phi}{dt}$$

- Ley de Lenz
  - El signo - indica que el sentido de la f.e.m. inducida es tal que se opone a dicha variación
- Fuerza contraelectromotriz inducida en el rotor
  - Al moverse la espira que forma el rotor del motor en un campo magnético constante se genera una tensión eléctrica proporcional a la velocidad de giro (que se opone a la tensión de alimentación de la espira).

$$V_{cem} = k_e \cdot \omega_n$$

↑

Constante de fuerza contraelectromotriz

$$\omega_m = k_n \cdot V_{cem}$$

↑

Constante de velocidad



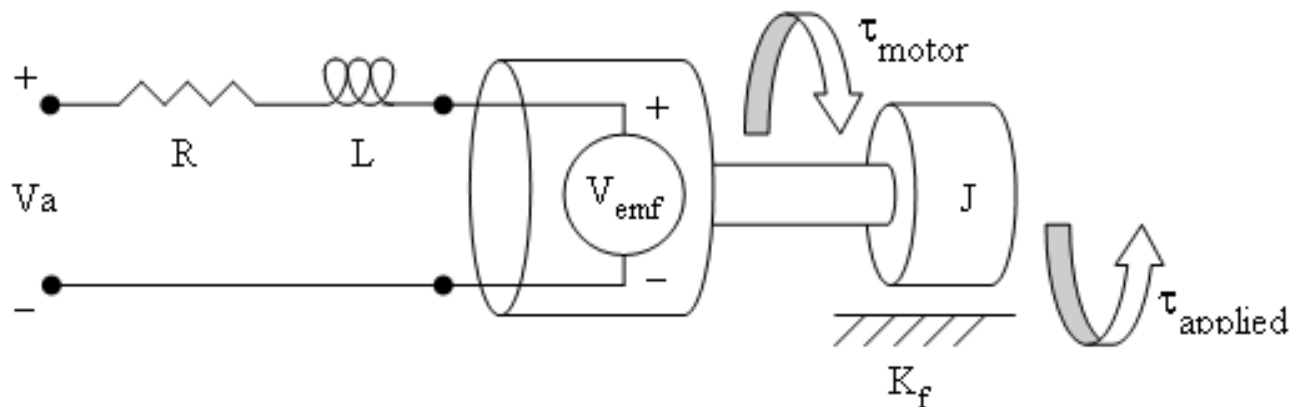
# Motor de Corriente Continua



## Motor DC de Imán Permanente

### – Modelo eléctrico del motor DC

- La fuerza electromotriz de inducción (o inducida) en un circuito cerrado es igual a la variación del flujo de inducción  $\Phi$  del campo magnético que lo atraviesa en la unidad de tiempo



$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + V_{cem}$$

Despreciando  $L_a$  y sustituyendo  $V_{cem}$

$$\omega_m = \frac{V_a}{k_e} - \frac{R_a T_m}{k_e k_m} = k_n \frac{V_a}{V_a} - \frac{k_n R_a T_m}{k_m} \rightarrow \text{Ec de una recta}$$





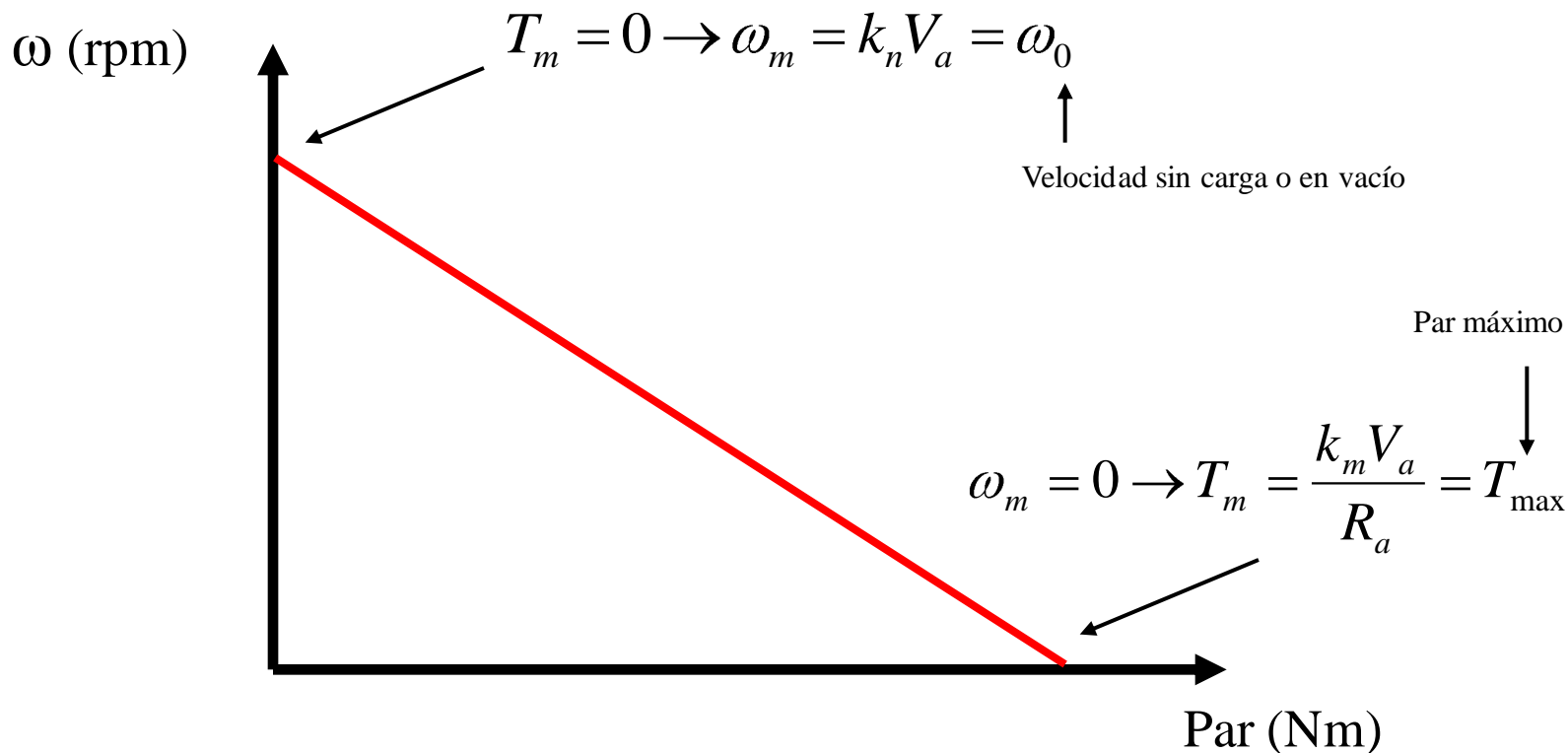
# Motor de Corriente Continua



## Motor DC de Imán Permanente

- Modelo eléctrico del motor DC

$$\omega_m = \frac{V_a}{k_e} - \frac{R_a T_m}{k_e k_m} = k_n V_a - \frac{k_n R_a T_m}{k_m} \longrightarrow \text{Ec de una recta}$$





# Motor de Corriente Continua



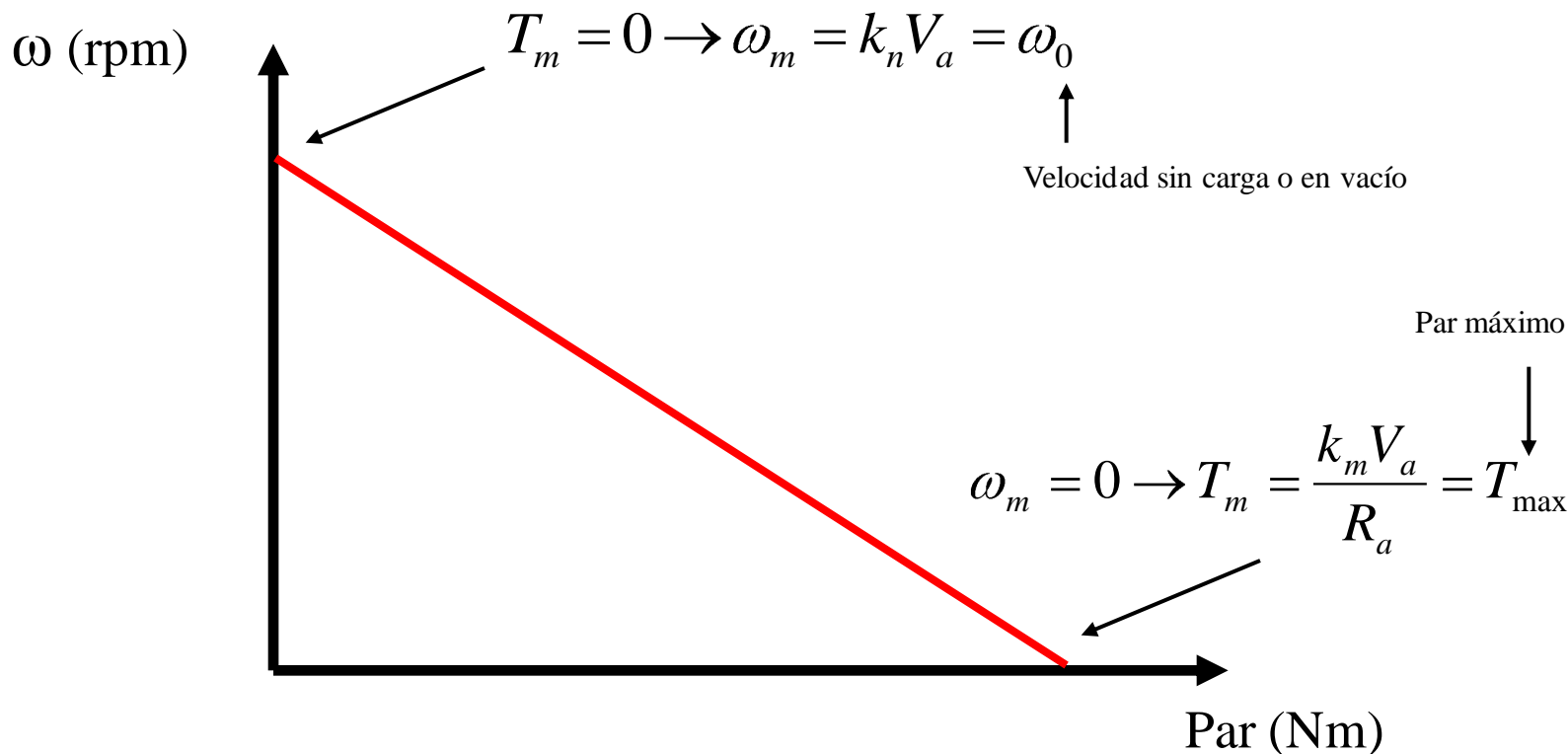
SEN  
SORES  
Y  
AR  
DUINO

## Motor DC de Imán Permanente

- Modelo eléctrico del motor DC

$$\omega_m = \omega_0 - \frac{\omega_0}{T_{\max}} T_m$$

$$\omega_m = \frac{V_a}{k_e} - \frac{R_a T_m}{k_e k_m} = k_n V_a - \frac{k_n R_a T_m}{k_m} \rightarrow \text{Ec de una recta}$$





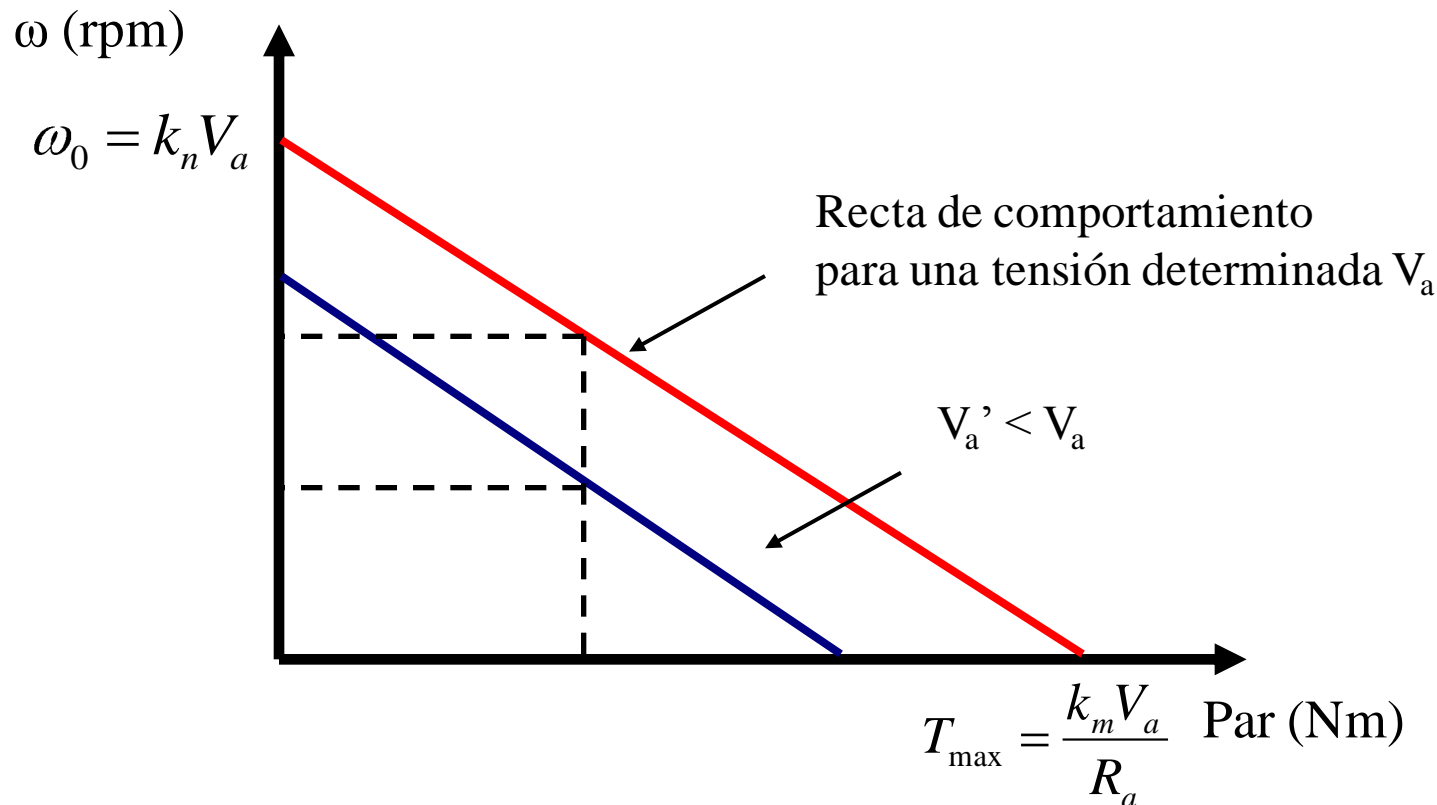
# Motor de Corriente Continua



## Motor DC de Imán Permanente

- Modelo eléctrico del motor DC

$$\omega_m = \omega_0 - \frac{k_n R_a}{k_m} \cdot T_m = \omega_0 - \frac{\omega_0}{T_{\max}} \cdot T_m$$



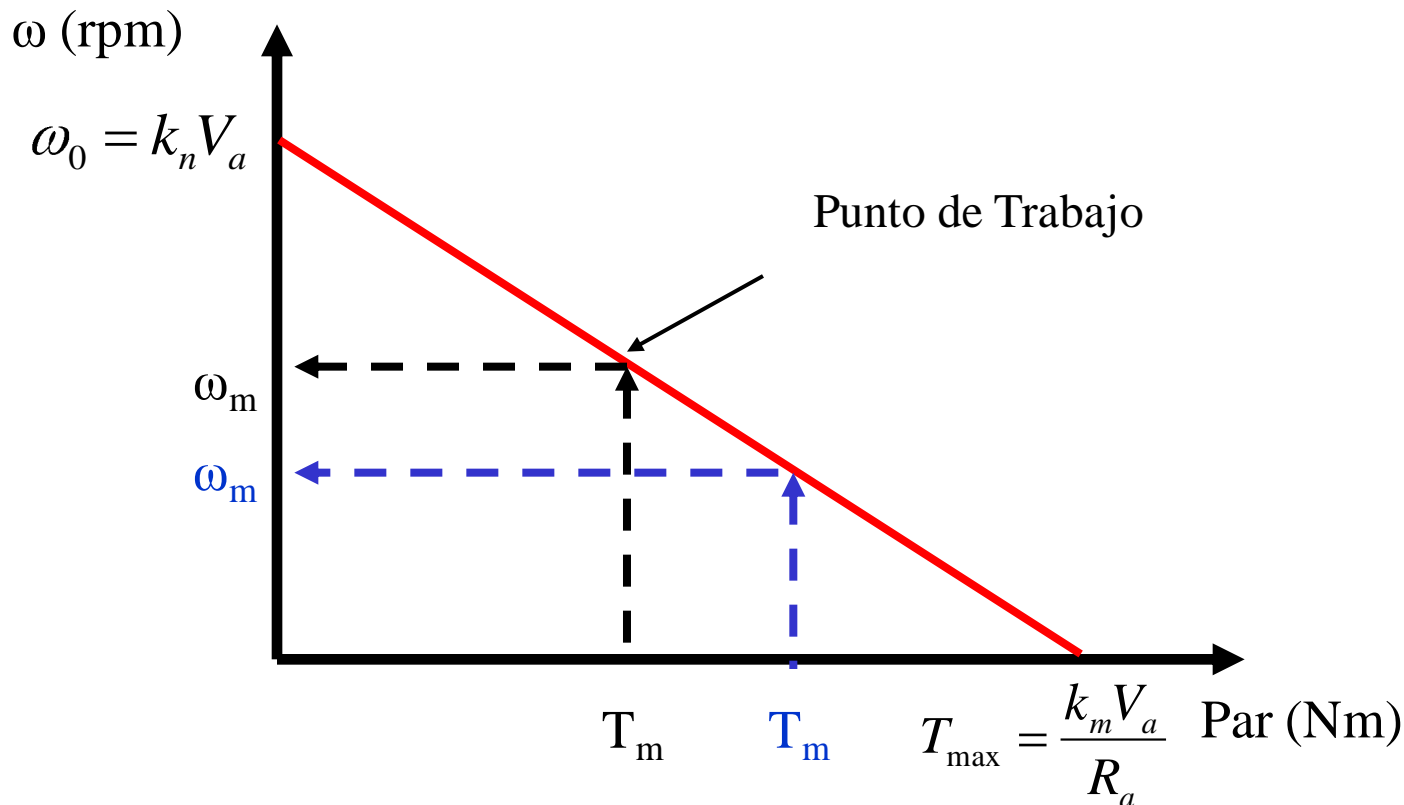


# Motor de Corriente Continua



## Motor DC de Imán Permanente

- Punto de trabajo
  - Para una tensión de alimentación y par resistente determinados





# Motor de Corriente Continua



SENSORES  
Y  
ARDUINO

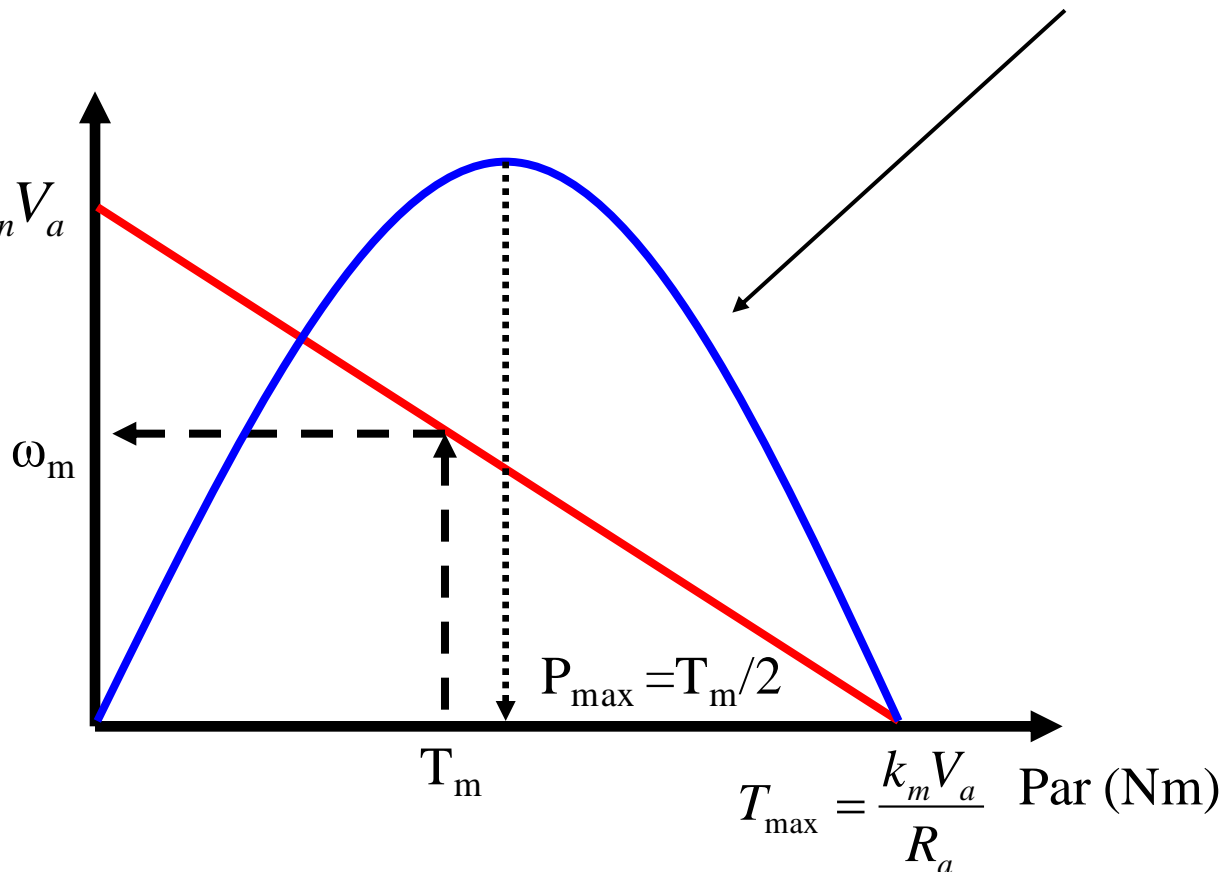
## Motor DC de Imán Permanente

– Potencia Mecánica

$$P_m = T_m \cdot \omega_m \longrightarrow P_m = T_m \cdot \omega_m = T_m \cdot \left( \omega_0 - \frac{\omega_0}{T_{\max}} \cdot T_m \right)$$

$P_m$  (W)  
 $\omega$  (rpm)

$$\omega_0 = k_n V_a$$





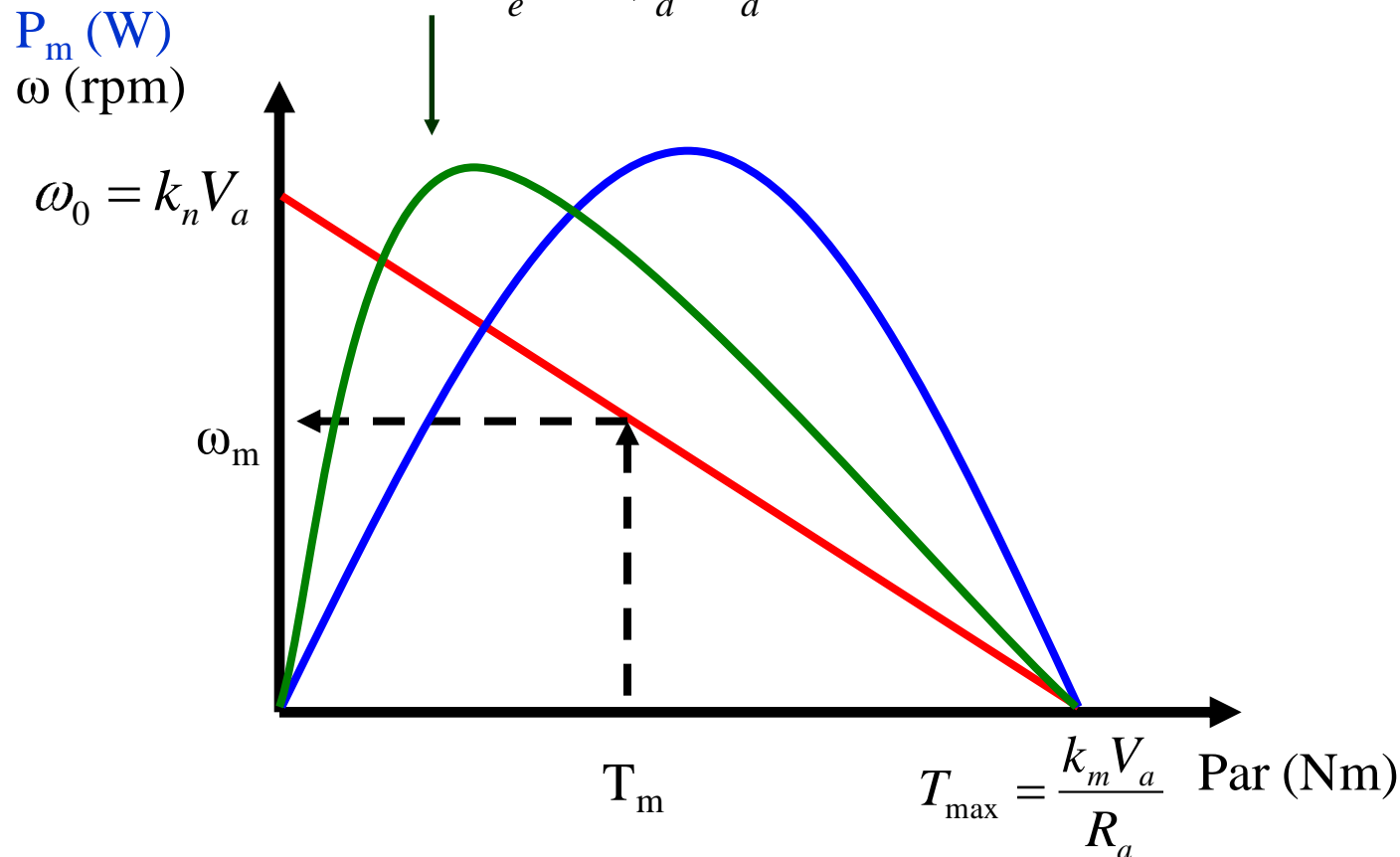
# Motor de Corriente Continua



## Motor DC de Imán Permanente

– Rendimiento

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{\omega_m \cdot T_m}{V_a \cdot I_a}$$





# Motor de Corriente Continua



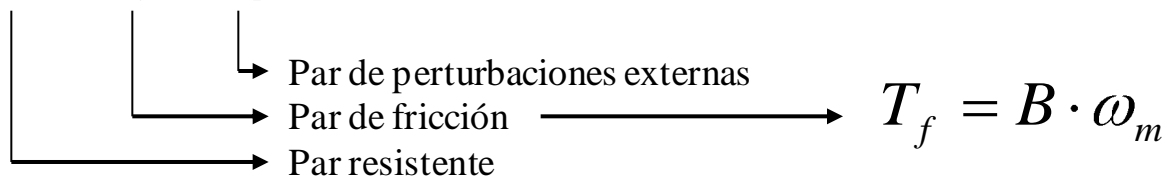
SENSORES  
Y  
ARDUINO

## Motor DC de Imán Permanente

– Comportamiento Dinámico del Motor

$$F - F_R = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} \qquad T_m - T_R = J_T \cdot \alpha = J_T \cdot \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$T_R = T_f + T_p$$



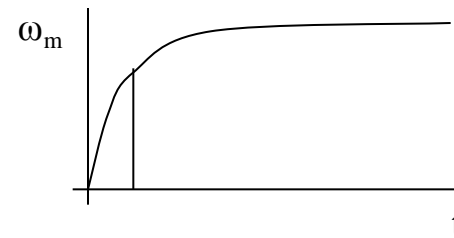
**Respuesta dinámica del motor** → Sistema de primer orden

$$J_T \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = k_n V_a - \omega_m \left( \frac{k_m}{k_n R_a} + B \right) - T_d$$

$$\tau_m = J_T \cdot \frac{k_n R_a}{k_m} = J_T \cdot \frac{\omega_0}{T_{\max}}$$

Cte. De tiempo: tiempo en alcanzar el 63% de la velocidad final

No depende de  $V_a$





# Motor de Corriente Continua



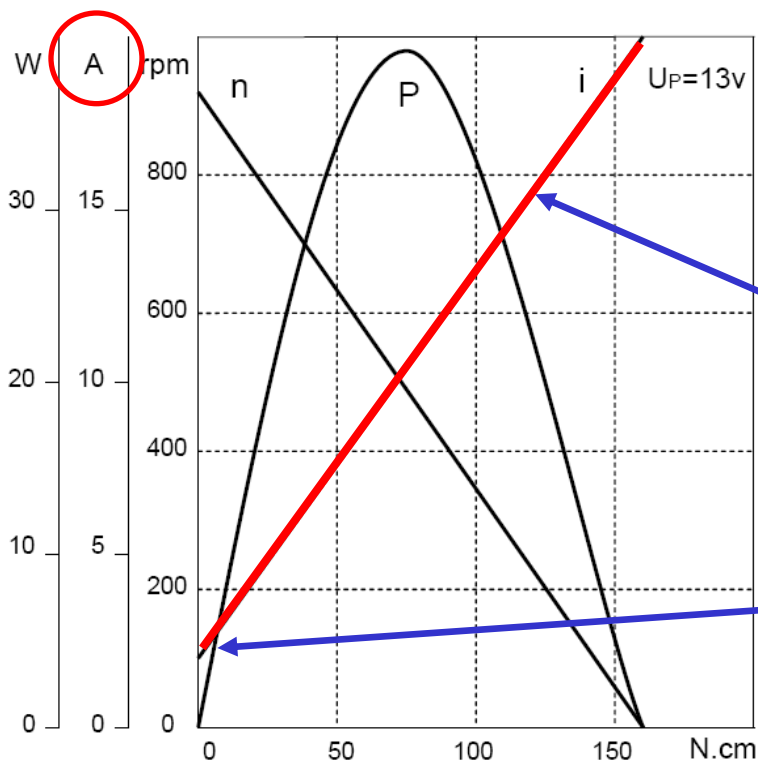
SENSORES  
Y  
ARDUINO

## Motor DC de Imán Permanente

– Datos de un Motor

Tensión nominal	$V_N$
Corriente nominal	$I_N$
Par nominal	$T_N$
Velocidad nominal	$\omega_N$
Potencia nominal	$P_N$

Máxima corriente permitida



$$T_m = k_m \cdot I_a$$

$I_S$  Corriente de Arranque  
Relacionada con el par resistente del rotor



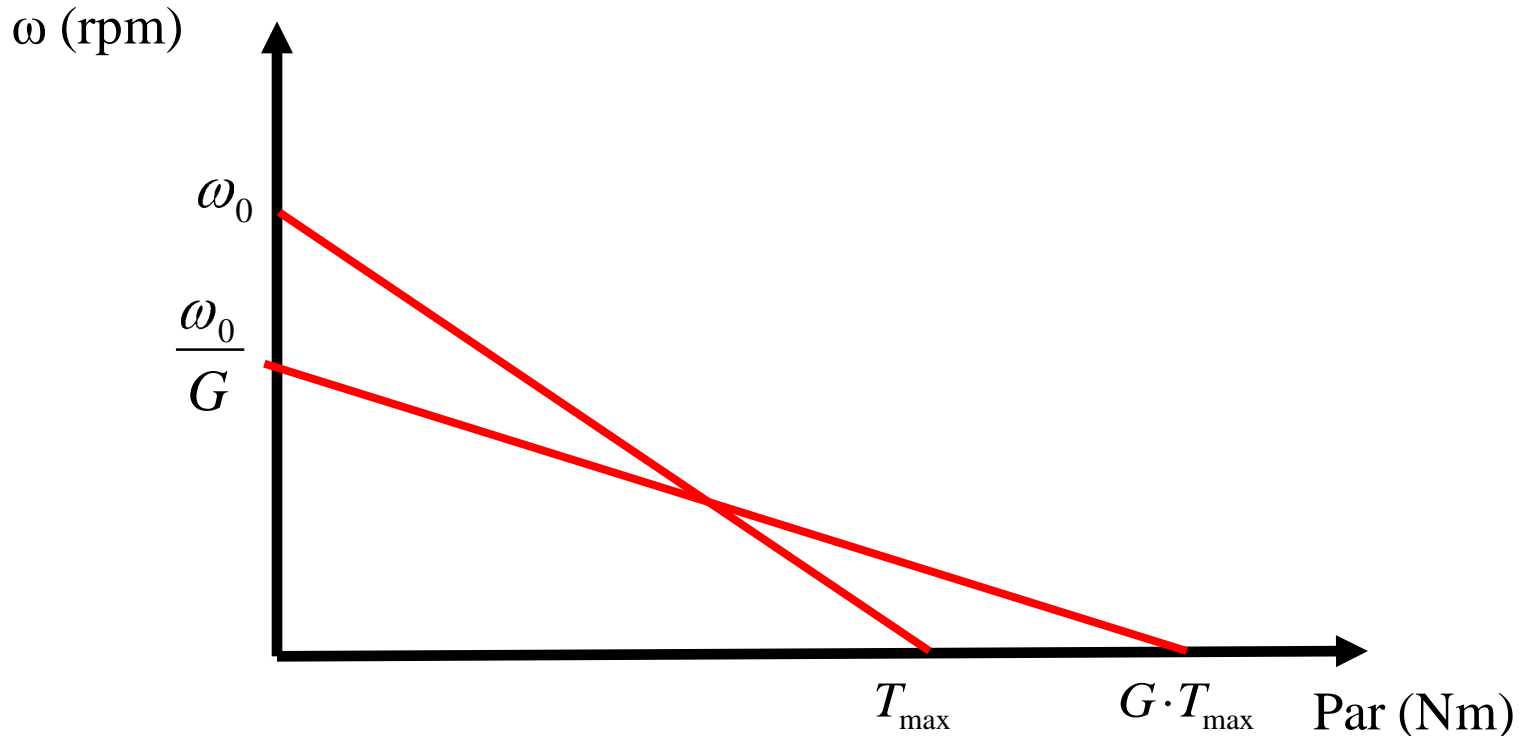


# Motor de Corriente Continua



## Motor DC de Imán Permanente

- Influencia de una Reductora
  - Una reductora da más fuerza pero baja la velocidad
  - Introduce pérdidas (rendimiento mecánico)





# Motor de Corriente Continua

SEN  
SOR  
ES  
Y  
AR  
DU  
INO

## Motor DC de Imán Permanente

– Dimensionado de los motores

### Prestaciones mecánicas del robot

Velocidad máxima  
Aceleración máxima  
Masa  
Fuerzas resistivas

Potencia Mecánica  
Constante de Tiempo  
Par

### Características Motor

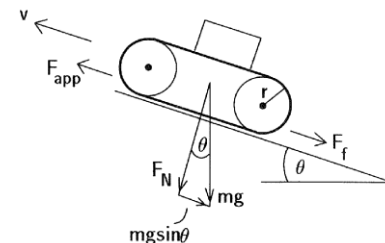
Rendimiento  
Cte. Par

### Características Eléctricas

Potencia Eléctrica  
I máxima

Dimensionamiento  
Electrónica Potencia

Se suelen sobredimensionar los motores para vencer a las fuerzas resistivas difíciles de calcular a priori





# Motor de Corriente Continua



## Motor con reductora y encoder acoplado

- Dimensionado de los motores



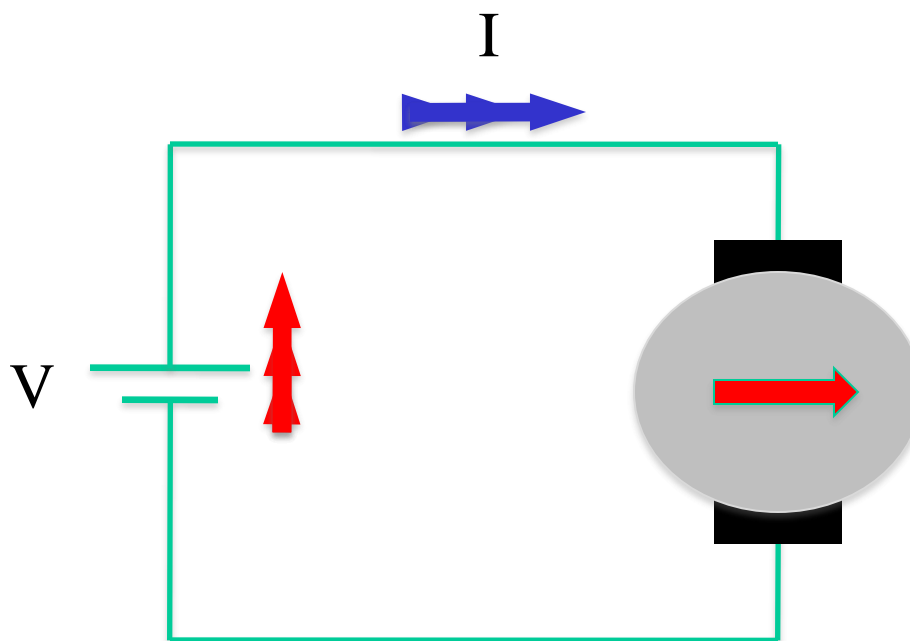
<http://www.maxommotor.com>



# Control de un Motor

## ¿Cómo se varía la velocidad de un motor DC?

- La velocidad de giro depende de la tensión.
- A más tensión, más velocidad de giro del motor





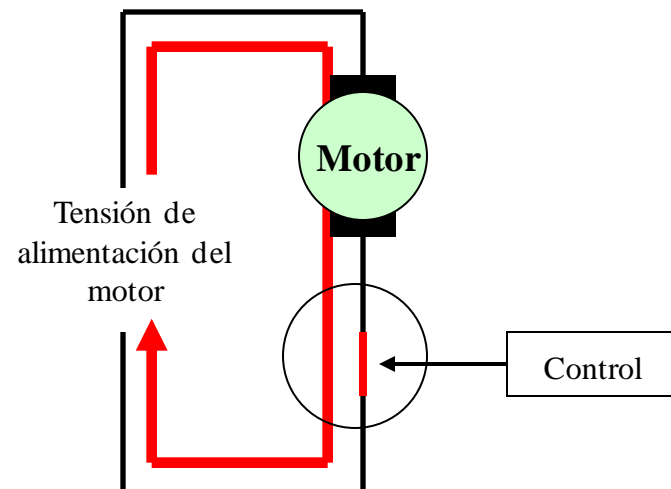
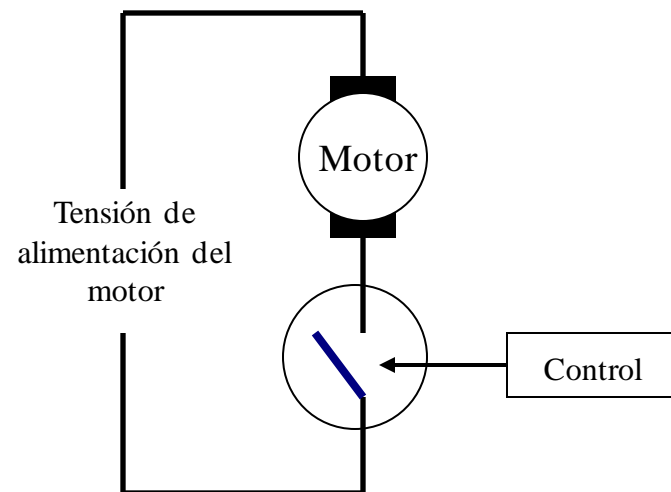
# Control de un Motor



## CONTROL DE MOTORES DC

### DRIVER DE POTENCIA

- Los circuitos digitales no tienen pueden generar la corriente que necesita un motor para funcionar
- Se utiliza un circuito de potencia adaptador
- El driver puede estar formado por componentes discretos o por un circuito integrado
- En control digital los drivers se comportan como interruptores



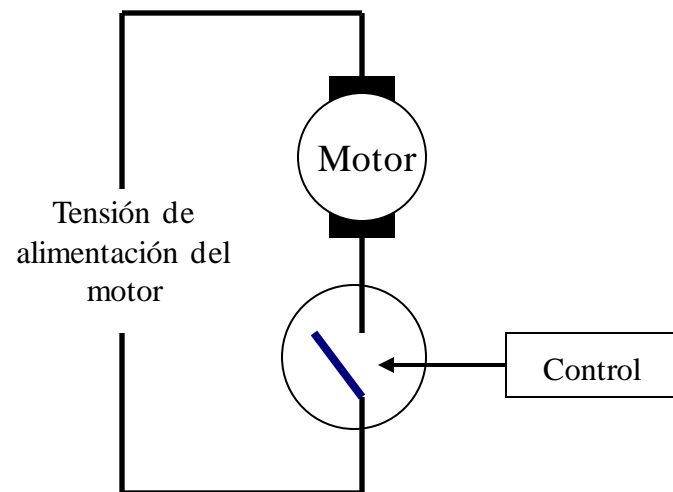
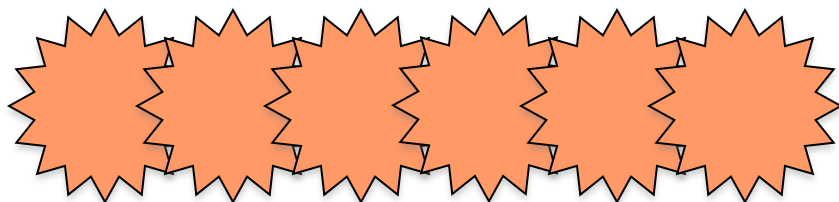


# Control de un Motor



SENSORES  
Y  
ARDUINO

## CONTROL DE MOTORES DC



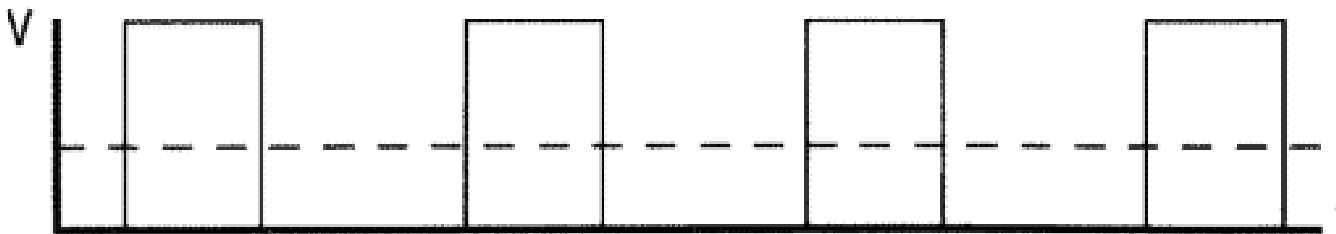
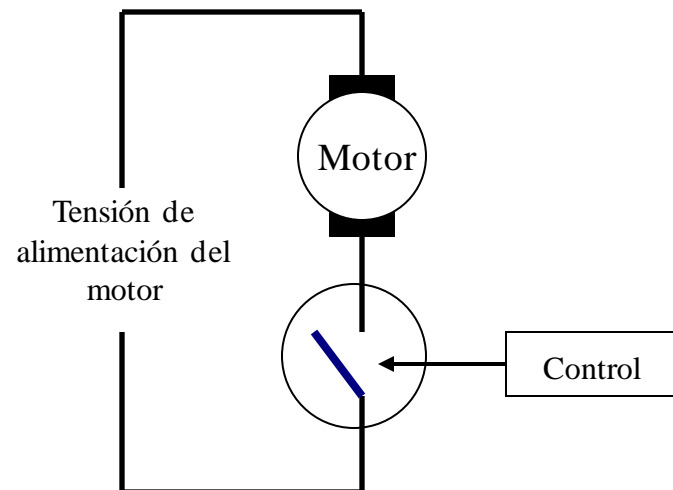
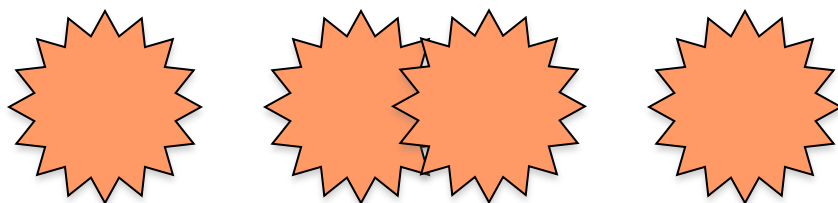


# Control de un Motor



SENSORES  
Y  
ARDUINO

## CONTROL DE MOTORES DC



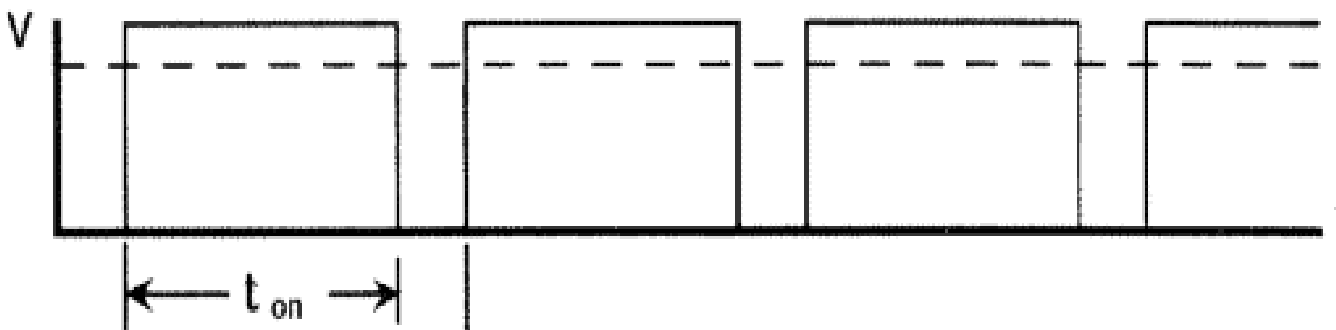
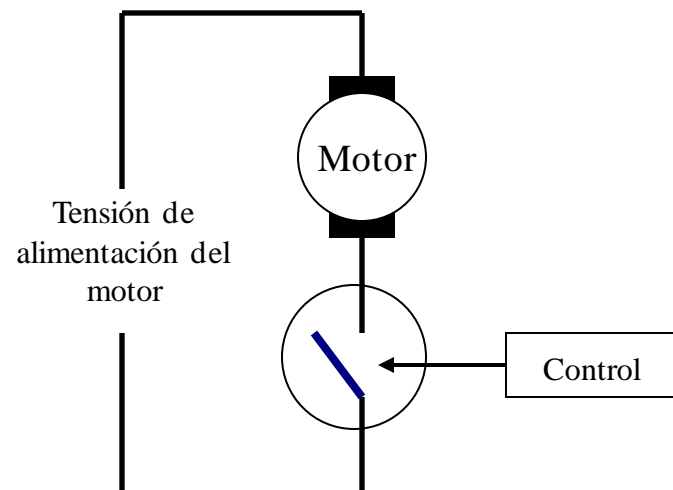
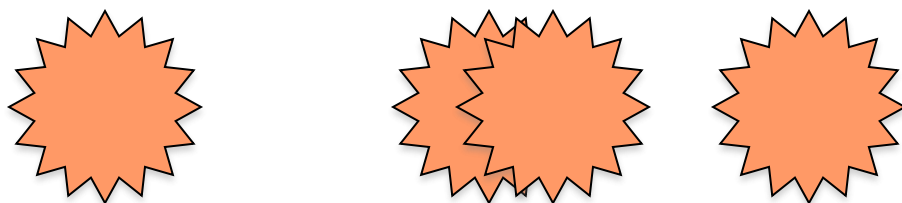


# Control de un Motor



SENSORES  
Y  
ARDUINO

## CONTROL DE MOTORES DC







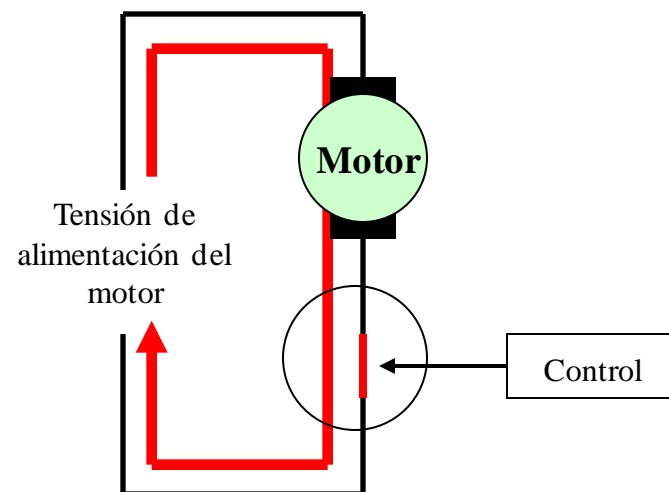
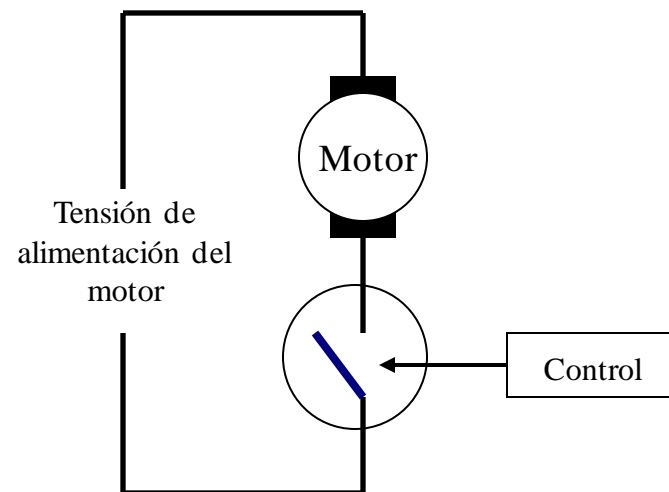
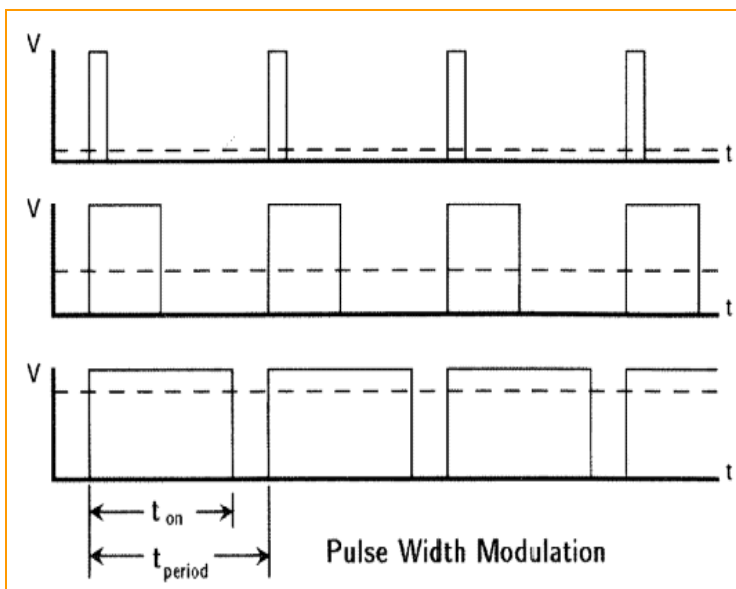
# Control de un Motor



## CONTROL DE MOTORES DC

### DRIVER DE POTENCIA

- Los circuitos digitales no tienen pueden generar la corriente que necesita un motor para funcionar
- Se utiliza un circuito de potencia adaptador
- El driver puede estar formado por componentes discretos o por un circuito integrado
- En control digital los drivers se comportan como interruptores



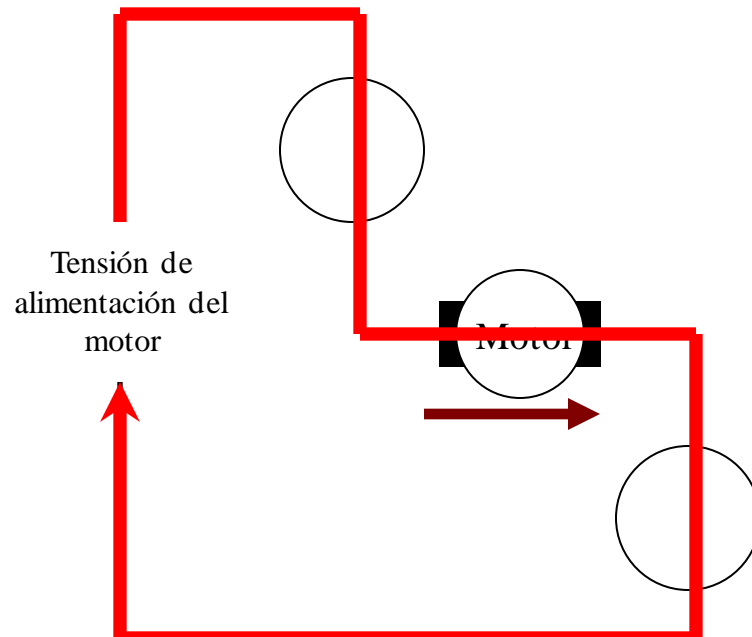
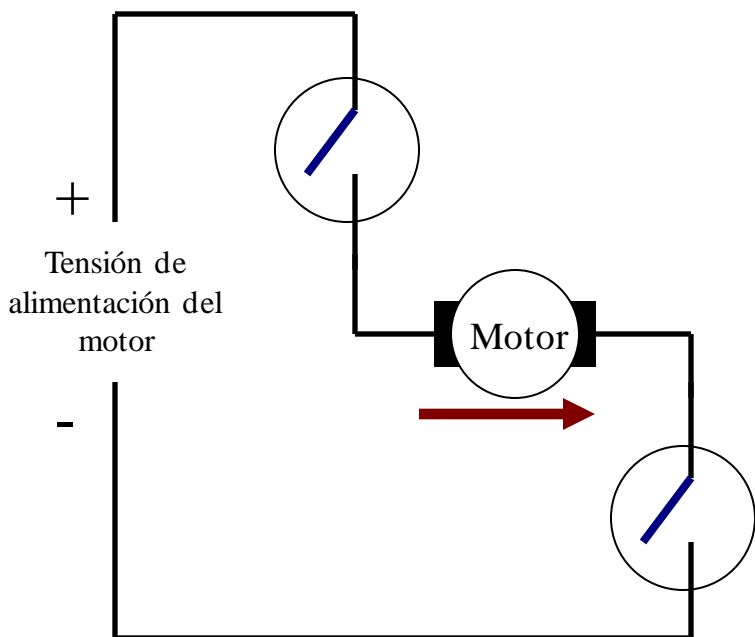


# Control de un Motor

## CONTROL DE MOTORES DC

### CONTROL DEL SENTIDO DE GIRO

- Se utiliza un Punte en H que implementa cuatro interruptores
- Los interruptores se van abriendo de dos en dos





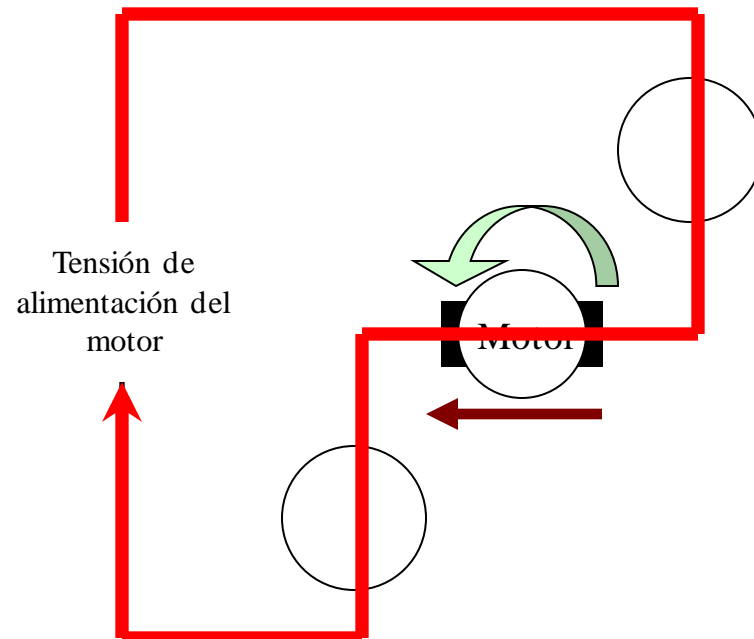
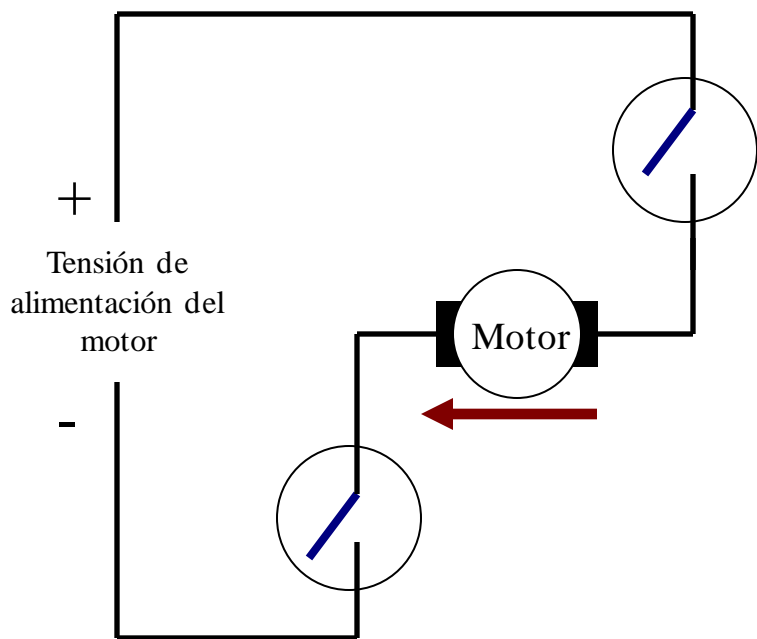
# Control de un Motor

SEN  
SOR  
ES  
Y  
AR  
DU  
INO

## CONTROL DE MOTORES DC

### CONTROL DEL SENTIDO DE GIRO

- Se utiliza un Punte en H que implementa cuatro interruptores
- Los interruptores se van abriendo de dos en dos



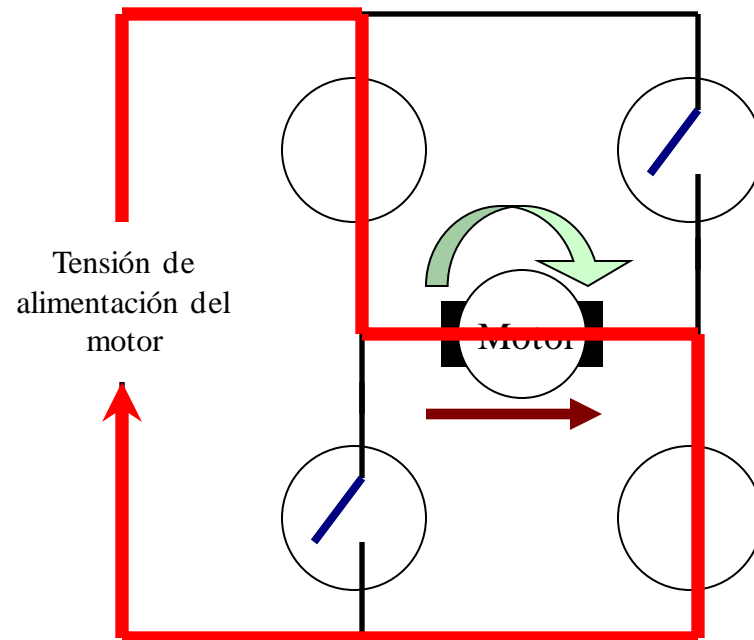
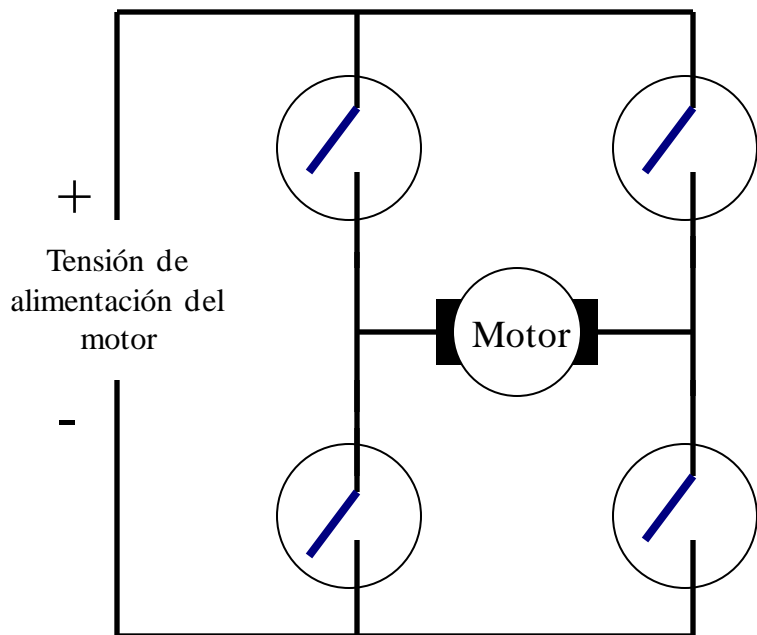


# Control de un Motor

## CONTROL DE MOTORES DC

### CONTROL DEL SENTIDO DE GIRO

- Se utiliza un Punte en H que implementa cuatro interruptores
- Los interruptores se van abriendo de dos en dos



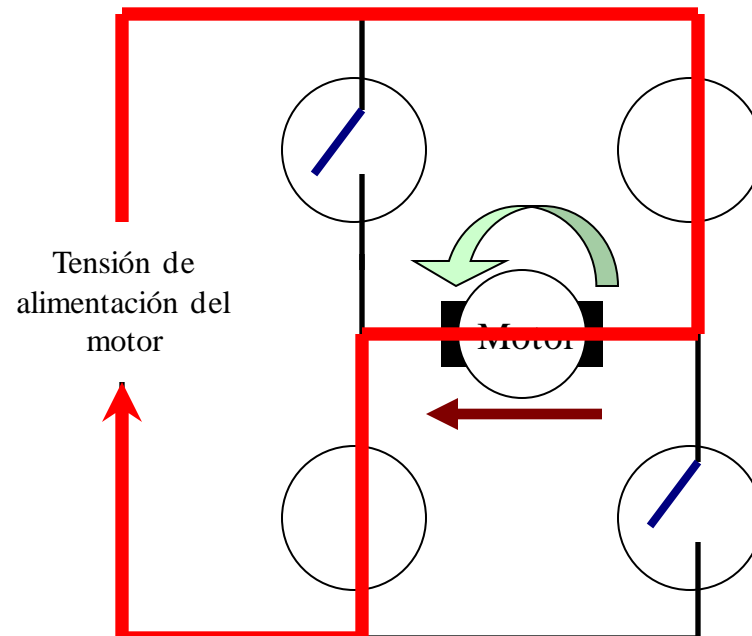
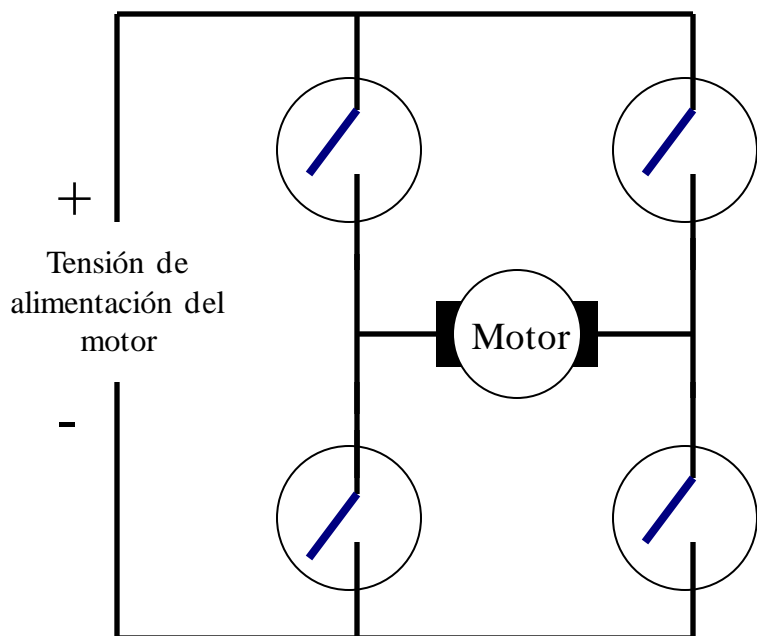


# Control de un Motor

## CONTROL DE MOTORES DC

### CONTROL DEL SENTIDO DE GIRO

- Se utiliza un Puesto en H que implementa cuatro interruptores
- Los interruptores se van abriendo de dos en dos

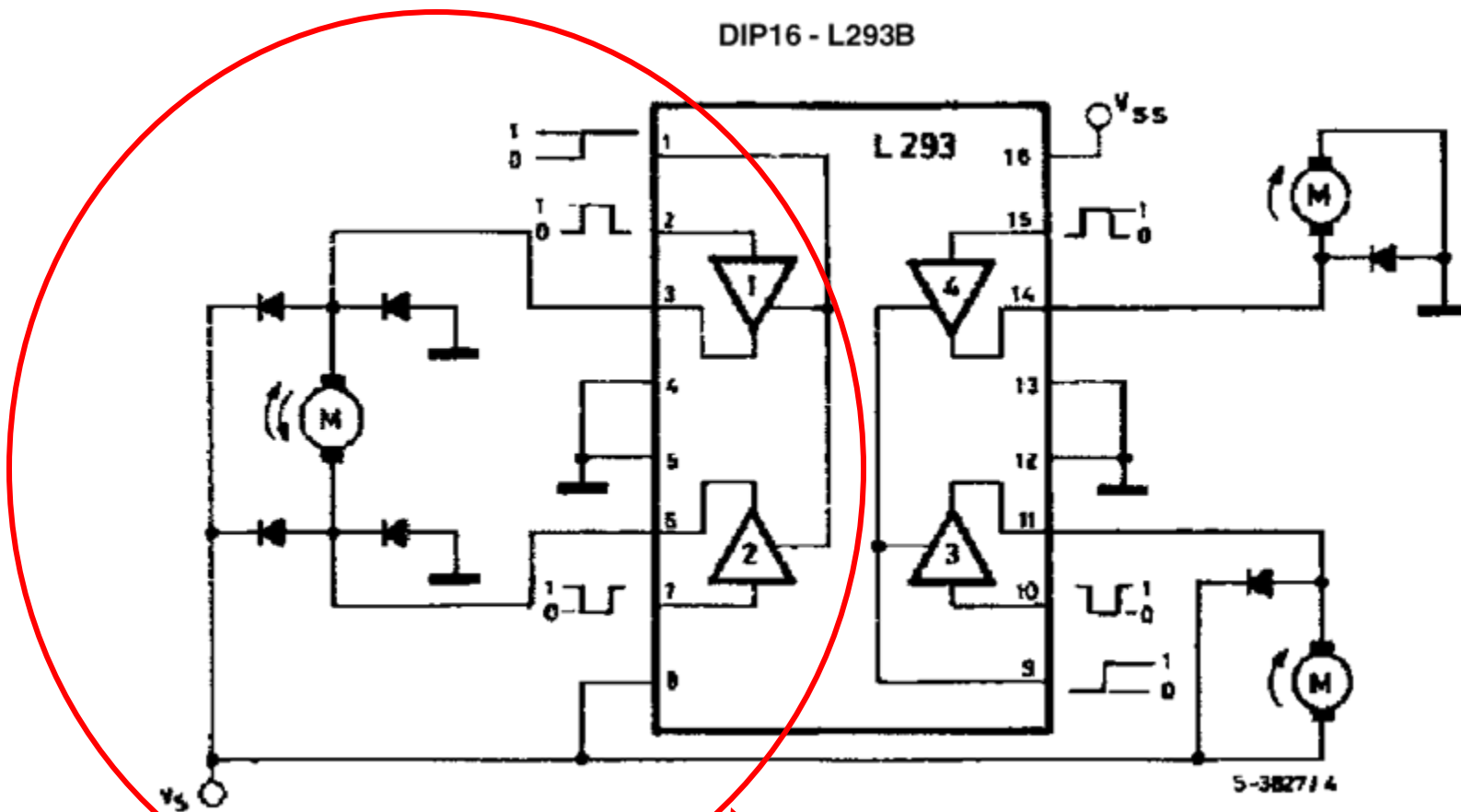




# Control de un Motor



## CONTROL DE MOTORES DC

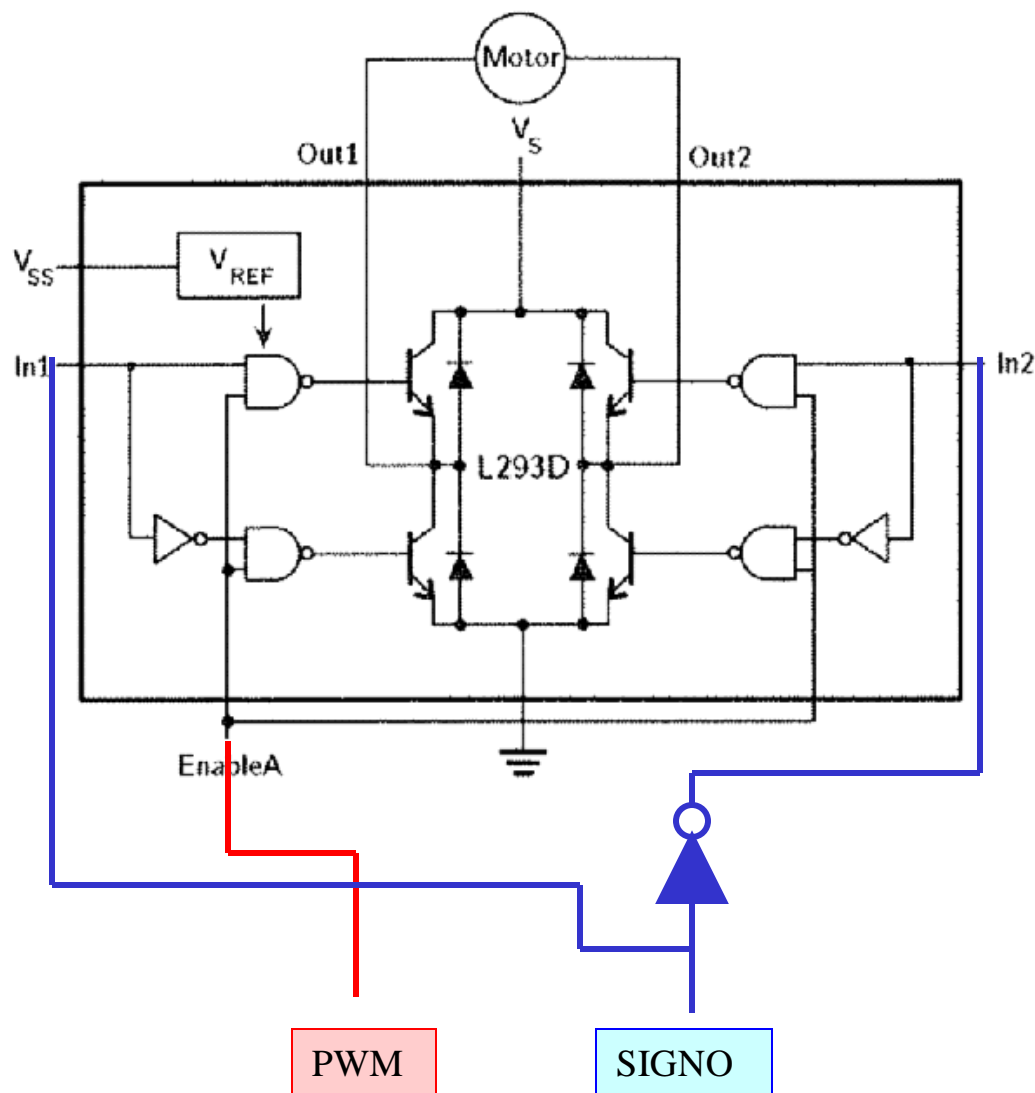


Puente completo (para un motor)

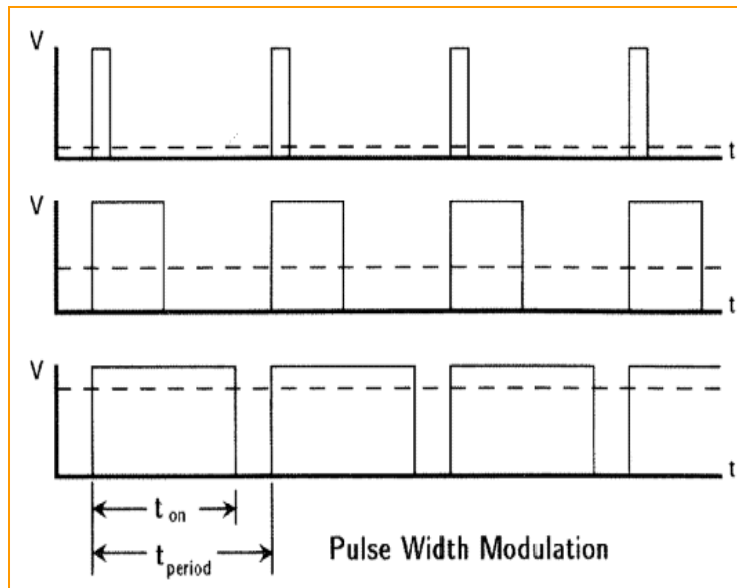
SENSORES  
Y  
ARDUINO



# Control de un Motor

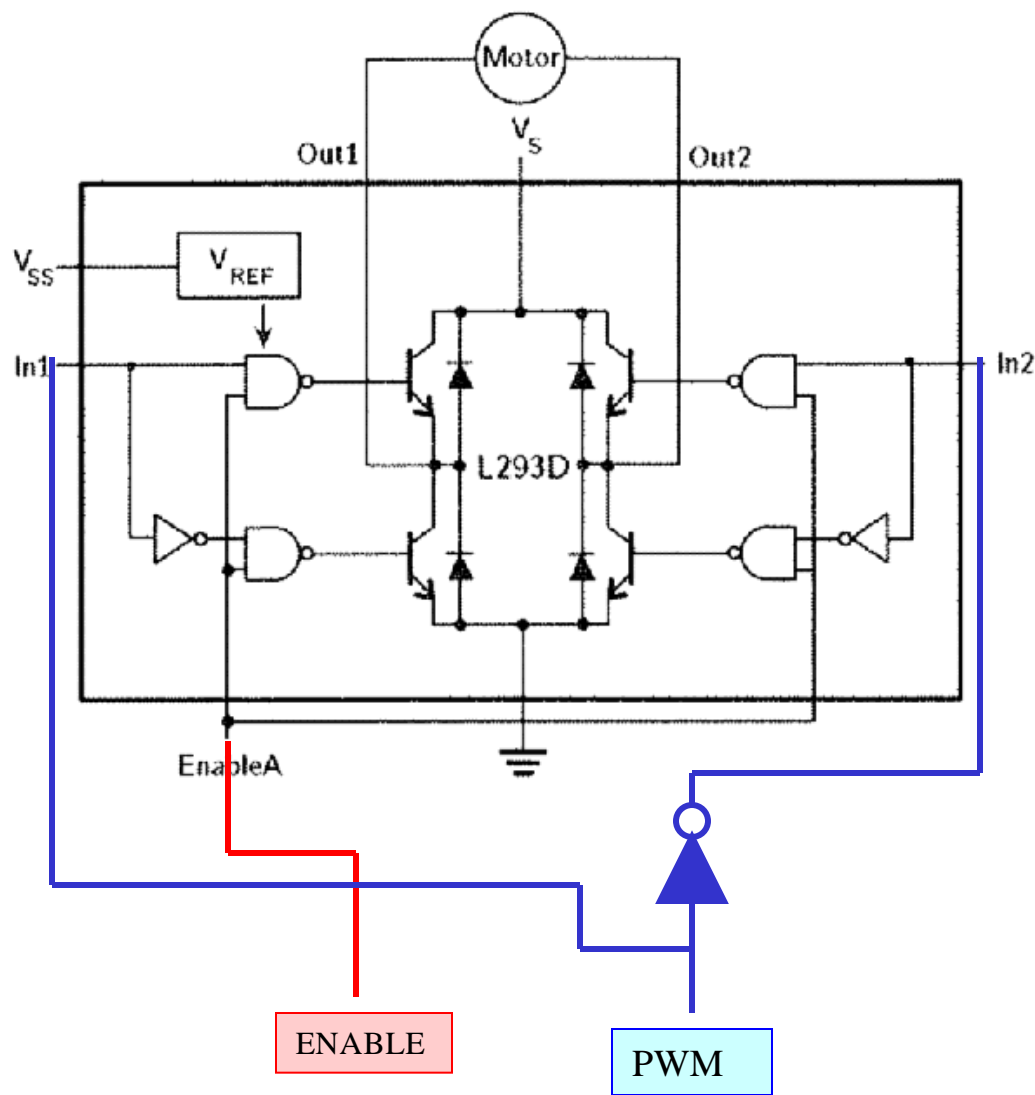


- Se selecciona el sentido de giro con la señal SIGNO
- Para cada sentido de giro la señal PWM puede variar con ciclos de trabajo  $0 < D < 1$

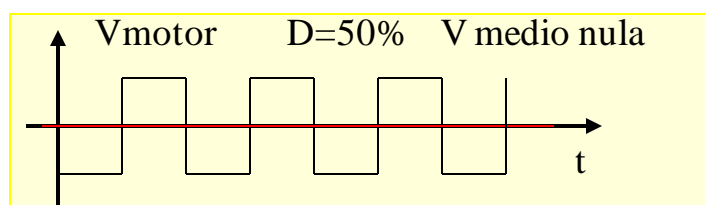
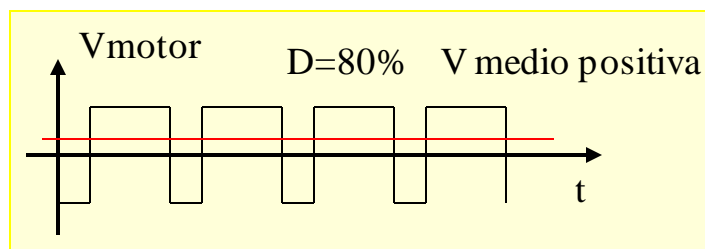
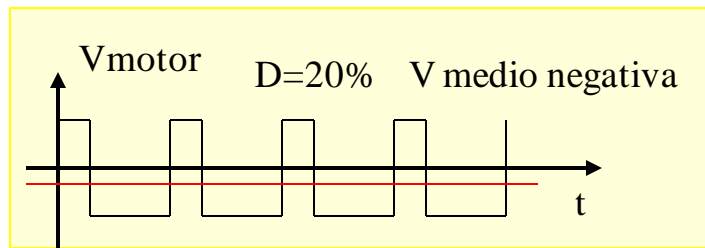




# Control de un Motor



- La señal de ENABLE bloquea el funcionamiento del puente
- El sentido de giro va implícito en la señal PWM:
  - $0 < D < 0,5$  un sentido
  - $0,5 < D < 1$  otro sentido
  - $D = 0,5$  motor parado







# Control de la velocidad de un motor

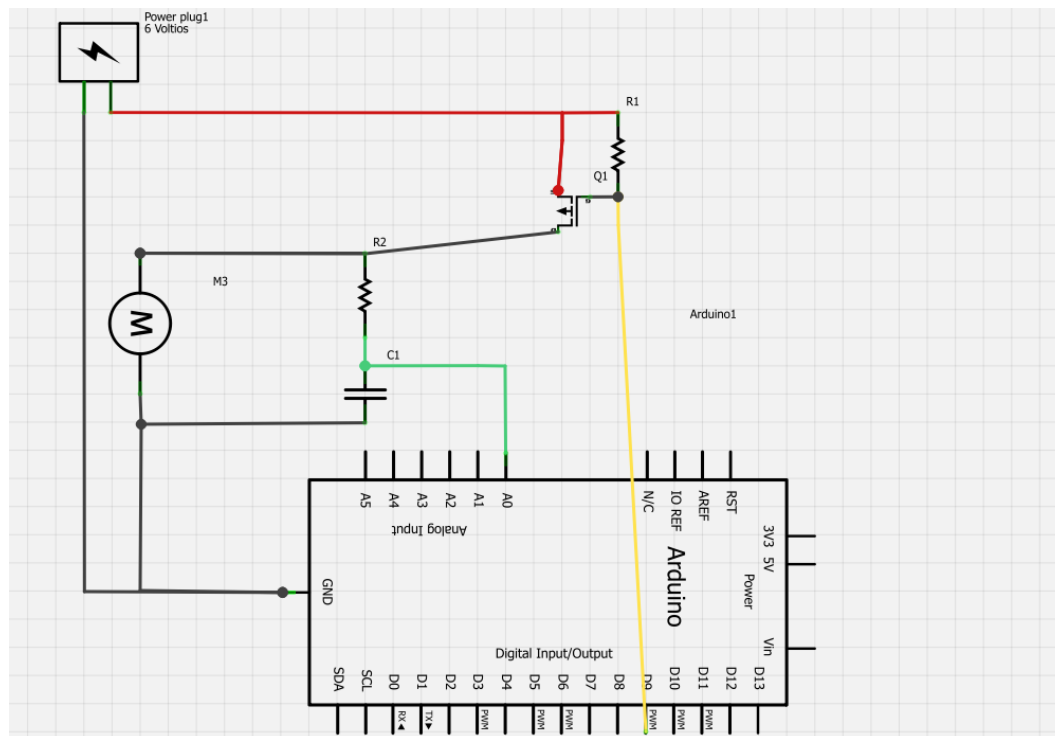


## Actividad 4.1: Control PWM de un Motor de Continua

### – Objetivo

- Tener la experiencia de controlar la velocidad de un motor de corriente continua desde Arduino mediante PWM (Modulación de anchura de pulso).

### – 1.- Conecta el circuito siguiente:



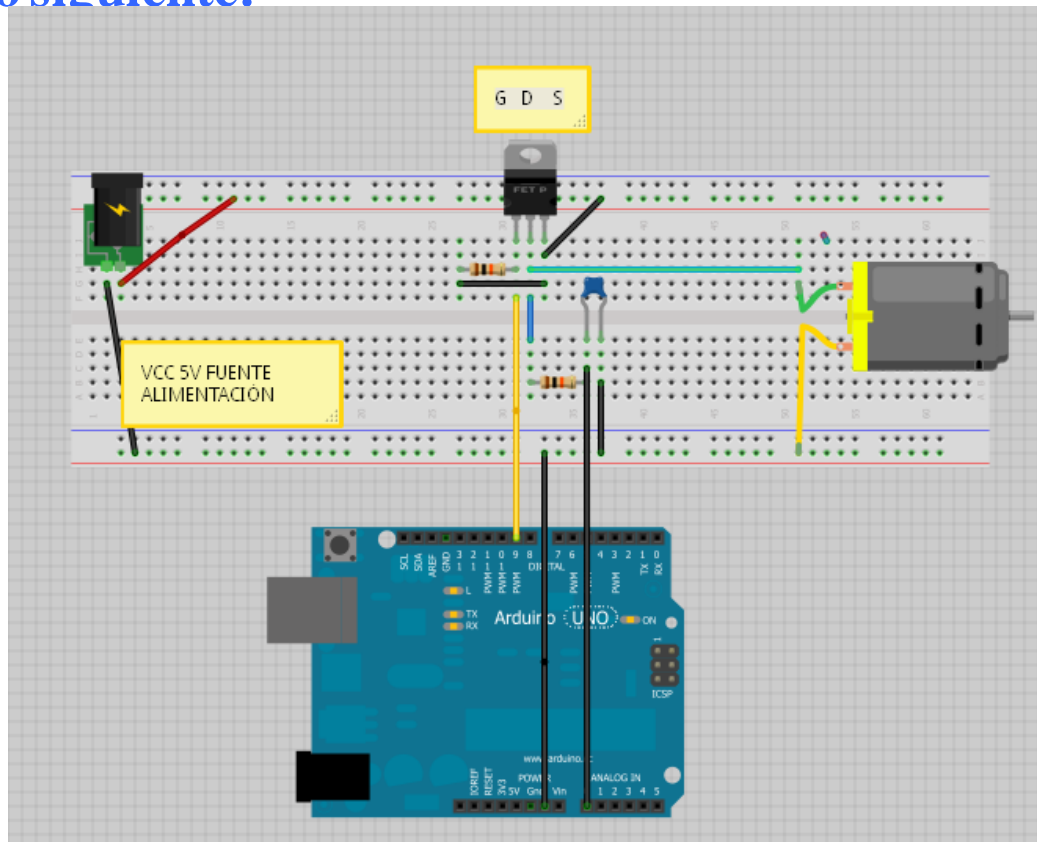


## Actividad 4.1: Control PWM de un Motor de Continua

### – Objetivo

- Tener la experiencia de controlar la velocidad de un motor de corriente continua desde Arduino mediante PWM (Modulación de anchura de pulso).

### – 1.- Conecta el circuito siguiente:





## Actividad 4.1: Control PWM de un Motor de Continua

```
int MotorPin = 9; // LED connected to digital pin 9
int analogPin = 3; // potentiometer connected to analog pin 3
int duty=100; //duty cicle en microsegundos
int period=1000; //microsegundos
int velocidad;
void setup(){ pinMode(MotorPin, OUTPUT); // sets the pin as output}
void loop()
{
  for(duty=200;duty<period;duty=duty+100){
    // read the input pin
    for(int i=0;i<10000;i++){ //repetir el PWM 10000 veces (1segundo)
      digitalWrite(MotorPin, HIGH); // turn the Motor OFF Transistor MOSP
      velocidad=analogRead(analogPin);
      delayMicroseconds(period-duty); // Esperar periodo
      digitalWrite(MotorPin, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
      delayMicroseconds(duty);
      // analogRead values go from 0 to 1023, analogWrite values from 0 to 255
    }
  }
}
```



## Actividad 4.3: Medida de la velocidad con fuerza contraelectromotriz

- **Objetivo**
  - Comprobar el funcionamiento de un motor como Tacogenerador.
- **Desarrollo**
- **Conecta el circuito anterior y modifica el programa para que cada segundo mande la velocidad leída por el puerto serie.**



## Actividad 4.4: Medida de la velocidad con encoder

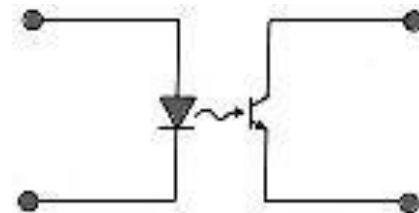
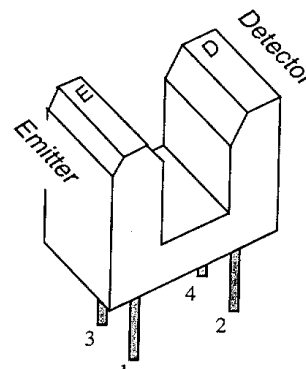
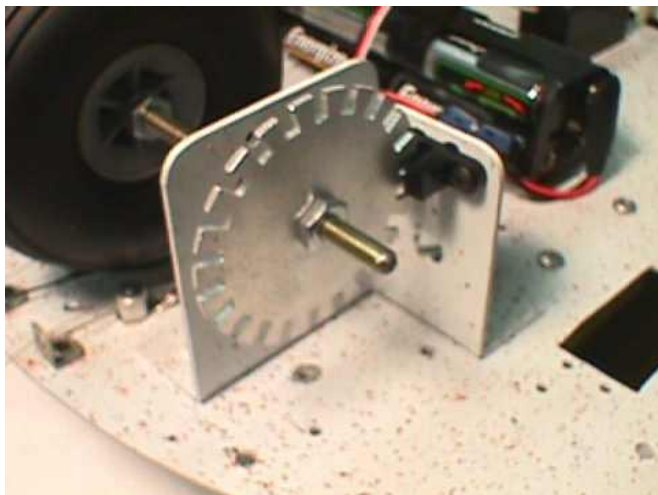
- **Objetivo**
  - Comprobar el funcionamiento de un encoder óptico
- **Desarrollo**
- **Conecta el circuito anterior y modifica el programa para mida la velocidad utilizando el diono cny 70 y un disco de medida.**



# Detección de Movimiento

SEN  
SORES  
Y  
AR  
DUINO

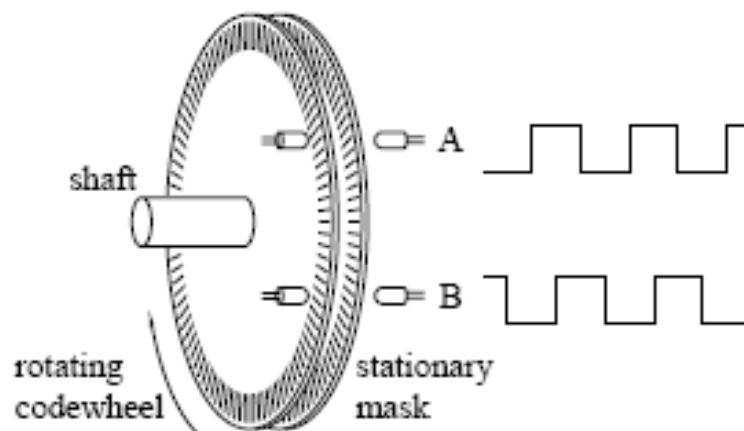
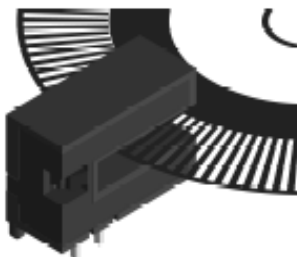
## Encoder óptico incremental



TCST1030



TCST5250



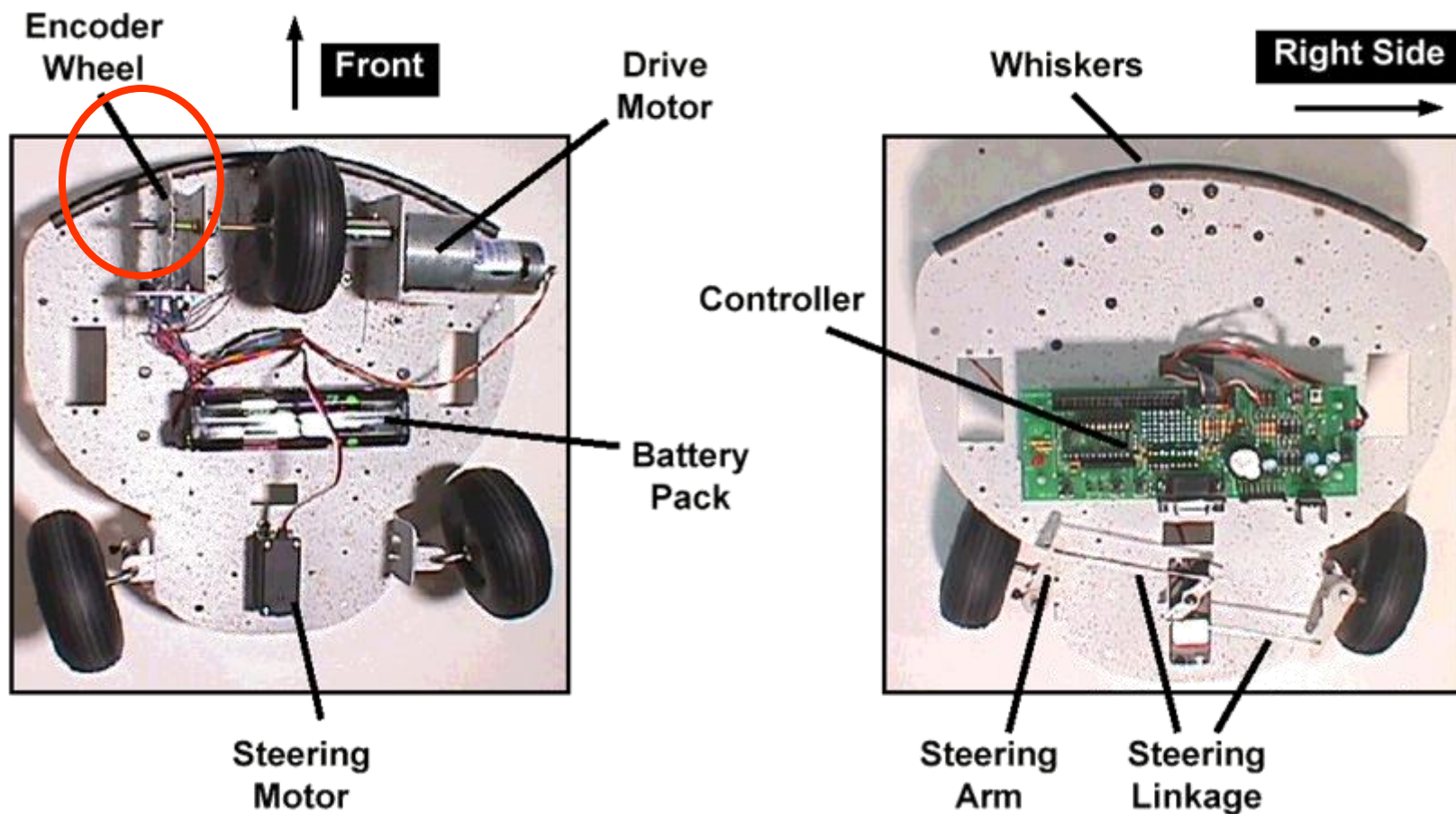


# Detección de Movimiento



SEN  
SORES  
Y  
ARDUINO

## Encoder óptico incremental



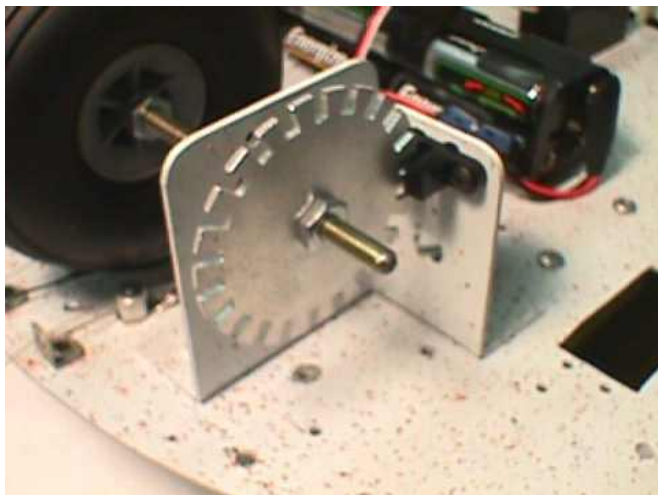


# Detección de Movimiento

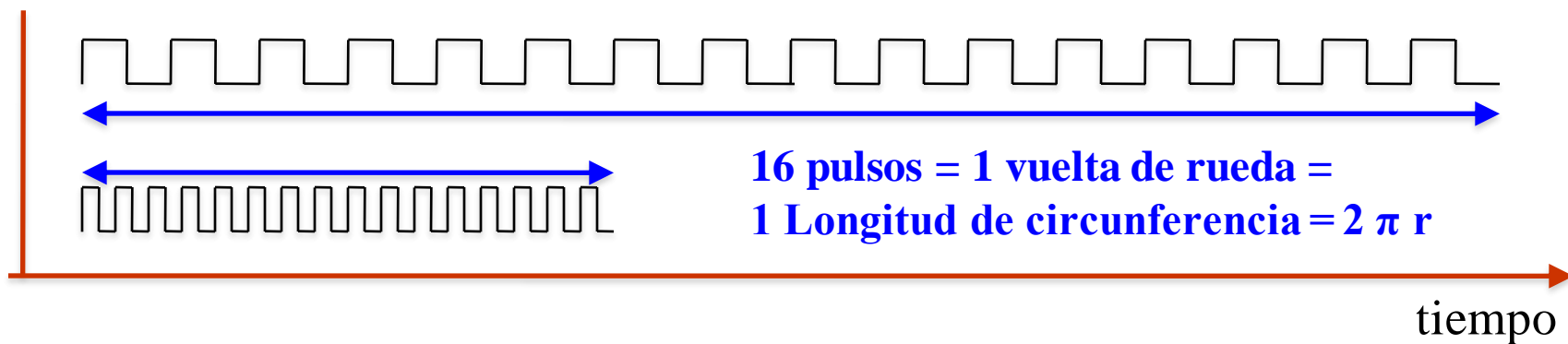
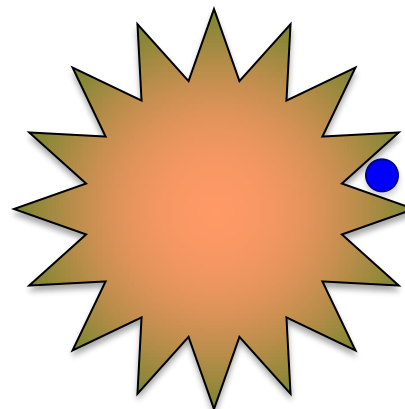


SEN  
SORES  
Y  
AR  
DUINO

## Encoder óptico incremental



Engranaje de 16 dientes



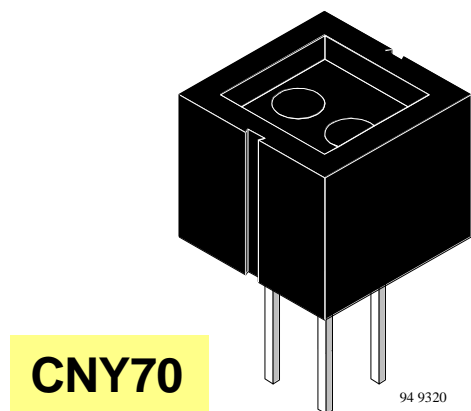
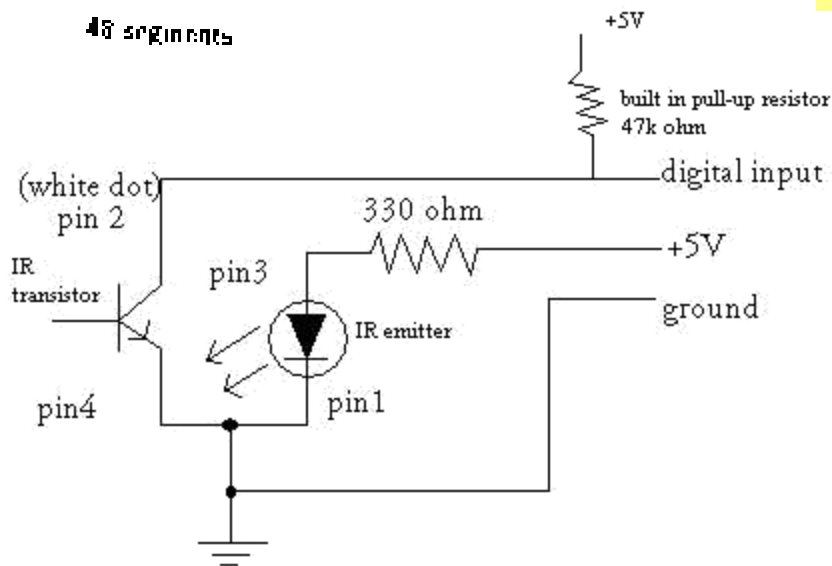
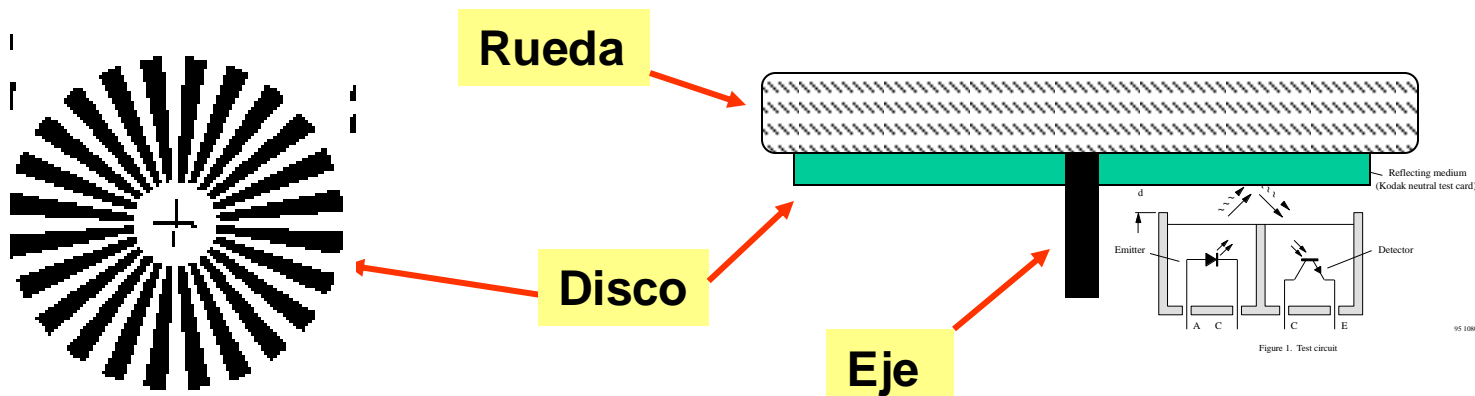




# Detección de Movimiento

SENSORES Y ARDUINO

## Encoder óptico incremental



The diagram shows how to connect the slotted optical switch to the Handy Board.

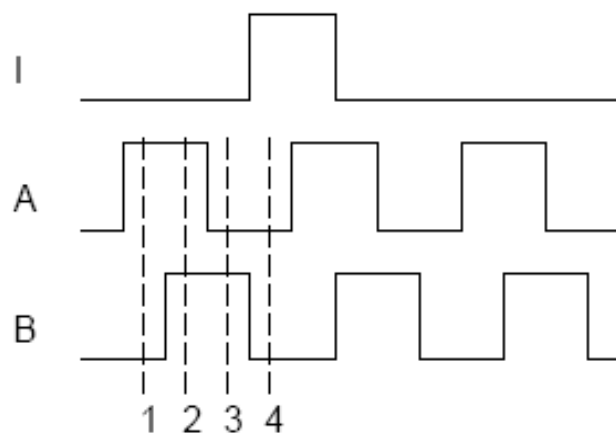
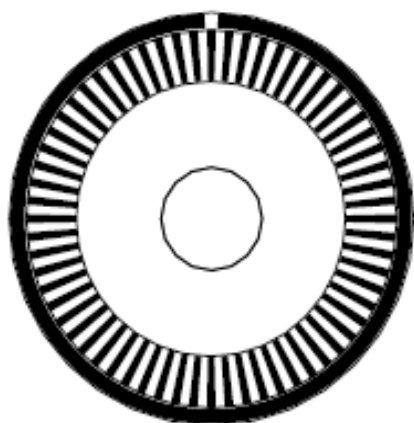


# DetECCIÓN DE MOVIMIENTO



## Encoder óptico incremental con salida en cuadratura

- Tiene dos canales de salida de pulsos.
- Al girar el motor se obtienen pulsos por cada uno de los dos canales
- El desfase entre los canales da idea del sentido de giro
- Se puede aumentar la resolución contando los estados por los que van pasando las dos señales.



State	Ch A	Ch B
S <sub>1</sub>	High	Low
S <sub>2</sub>	High	High
S <sub>3</sub>	Low	High
S <sub>4</sub>	Low	Low

Parámetro: número de pulsos por vuelta

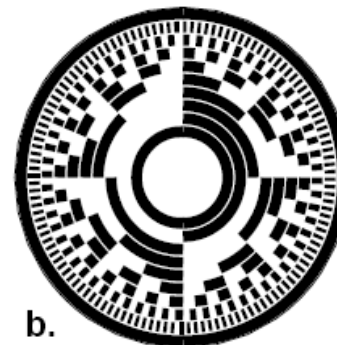
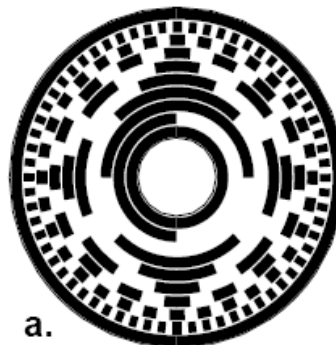
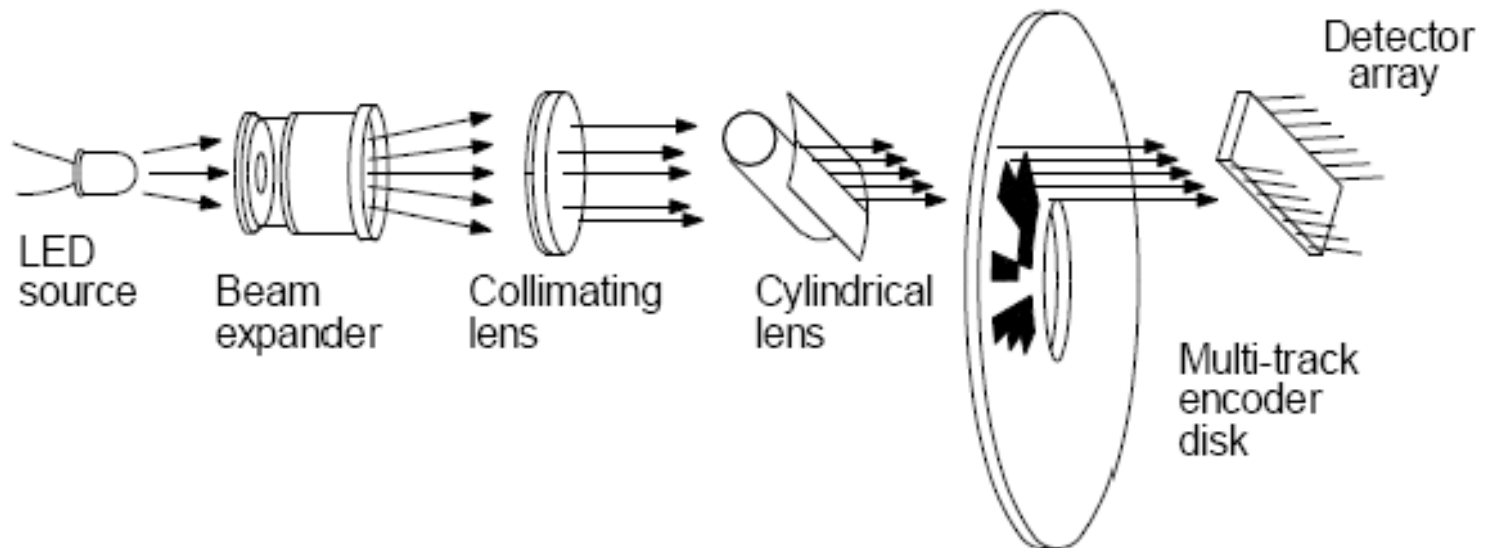


# Detección de Movimiento



## Encoder óptico absoluto

- Entrega la posición absoluta del eje.





## Actividad 4.3: Medida de velocidad con encoder

### – Objetivo

- Utilizar un sensor de distancia por infrarrojos
- Tener la experiencia de adaptación de la medida de un sensor no lineal

### – Desarrollo

1. Conecta el GP2D12 a la entrada A0 de Arduino UNO.
2. Ejecuta el ejemplo AnalogReadSerial realiza una tabla con diferentes medidas de distancia y el código recibido. Comprueba si coincide con la que proporciona el fabricante

La tabla se puede realizar en Excel y representar gráficamente en modo X-Y

3. Analizando la forma de la gráfica, realiza un programa que transmita por el puerto serie la distancia en cm



## Encoder óptico incremental: procesamiento de la señal

- **Entrega un pulso por cada intervalo de giro (resolución del encoder)**
  - PPP = Pulsos por vuelta
- **Medida del ángulo de giro**
  - $1/PPP = \%$  de vuelta por pulso
  - $360^\circ / PPP = \text{grados por pulso}$      $2\pi / PPP = \text{radianes por pulso}$
  - Contando N pulsos  $\rightarrow N * 360^\circ / PPP \rightarrow \text{Grados girados}$
- **Medida del espacio recorrido por una rueda de radio R**
  - $2 * \pi * R / PPP \rightarrow \text{metros recorridos por pulso}$
  - Contando N pulsos  $\rightarrow N * 2 * \pi * R / PPP \rightarrow \text{Distancia recorrida}$
- **Medida de velocidad de giro (o lineal)**
  - Número de pulsos por unidad de tiempo
  - Tiempo entre pulsos
- **Medida de aceleración (angular o lineal)**
  - Diferencia entre dos medidas de velocidad consecutivas