



UNIÓN DE ASOCIACIONES  
DE INGENIEROS TÉCNICOS  
INDUSTRIALES Y GRADUADOS  
EN LA INGENIERÍA DE LA  
RAMA INDUSTRIAL DE ESPAÑA

# **UNIÓN DE ASOCIACIONES DE INGENIEROS TÉCNICOS INDUSTRIALES Y GRADUADOS EN INGENIERÍA DE LA RAMA INDUSTRIAL DE ESPAÑA (UAITIE)**

**“CONVOCATORIA 2020”**

**V PREMIO NACIONAL DE INICIACIÓN A LA INVESTIGACIÓN  
TECNOLÓGICA**

**Robot Dibujante**

**AUTOR/ES:**  
Javier Martínez  
Juan José Carratalá

**BLOQUE TEMÁTICO:**  
Diseño industrial

**NIVEL EDUCATIVO:**  
2º Bachillerato

**COORDINADOR:**  
Ginés Guerrero

**Marzo de 2020**



# Resumen

Hemos construido un robot capaz de escribir o dibujar sobre un formato de papel DIN A4. Con este robot, el alumnado aprenderá algunos aspectos básicos sobre programación de microcontroladores con lenguaje C, control de servo motores, control de motores paso a paso y código G.

La estructura del robot es una lámina de madera contrachapada, que sirve también como soporte para el papel. A esta se unen cuatro perfiles de acero redondos sobre los que se mueve la estructura que soporta el bolígrafo. Los actuadores son dos motores paso a paso y un servo motor. El control del robot se delega a una placa Arduino y a sendos puentes H para los motores paso a paso. Finalmente, la fuente de alimentación es la de un ordenador viejo.

El movimiento del bolígrafo sobre el plano horizontal, sobre los ejes X e Y, lo habilitan dos motores paso a paso dispuestos en estructura core XY. Se trata de una técnica de control de movimiento en dos dimensiones usando una sola correa dentada para los dos ejes del plano. El movimiento del bolígrafo sobre el eje Z corre a cargo de un servo motor.

El robot tiene un funcionamiento muy sencillo. Su placa Arduino espera la recepción de comandos en código G a través del puerto serie y los ejecuta de forma secuencial. Pero, ¿quién envía los comandos en código G? Un ordenador, en el que ejecutaremos nuestra aplicación programada en lenguaje Java con Processing.

## Palabras Clave

Código G, Core XY, Motor paso a paso, Lenguaje C

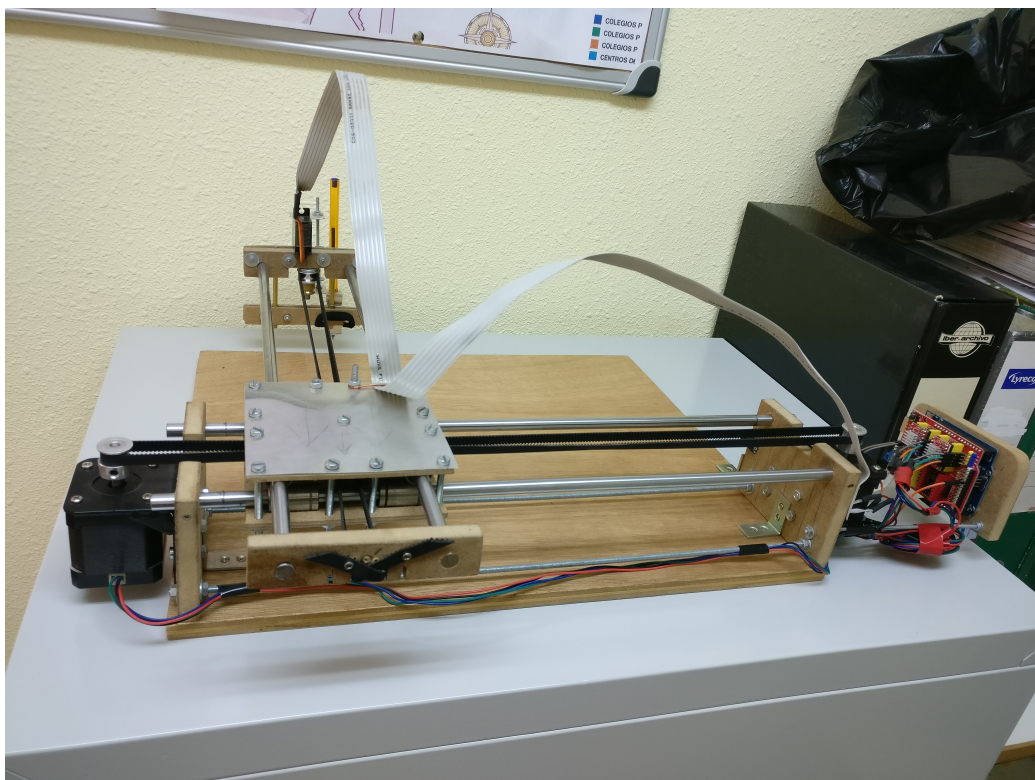
# Índice

1. Introducción	4
2. Objetivos	5
3. Metodología	6
3.1. Core XY	6
3.2. Motor paso a paso	7
3.3. Momento mecánico	10
3.4. Máquinas eléctricas	12
3.5. Microcontrolador	16
3.6. Código G	18
4. Resultados	19
5. Conclusiones	20
6. Referencias	20

## 1. Introducción

La reciente fama de las impresoras 3D ha popularizado el código G. El código G es un lenguaje de programación estandarizado en la industria dentro de las máquinas de control numérico.

Nuestro Robot Dibujante también se puede considerar una máquina de control numérico. Nuestro Robot, controlado por una placa Arduino, ejecuta secuencialmente los comandos en código G enviados desde un ordenador través del puerto USB.



*Ilustración 1: Robot Dibujante*

En el ordenador tenemos que ejecutar una aplicación escrita en lenguaje Java con el compilador Processing. Los comandos en código G enviados al Robot se pueden introducir manualmente uno a uno o podemos enviar un archivo de texto con cientos de comandos en código G.

El archivo de texto con cientos de comandos en código G, que representan el dibujo que trazará el Robot, lo podemos obtener con algún programa de dibujo vectorial como Inkscape.





## 2. Objetivos

El objetivo de este proyecto es que el alumnado adquiera cierto grado de comprensión en los siguientes contenidos. Que podemos dividir en tres grupos.

Fundamentos electromagnéticos implicados en el funcionamiento de los motores eléctricos:

- **Ley de Ampere** para obtener la fuerza magnetomotriz del inductor.
- **Ley de Ohm** para el campo magnético para calcular el flujo del inductor.
- **Ley de Faraday** para el cálculo del voltaje inducido.
- **Ley de Lorentz** para obtener la fuerza experimentada por el inducido.
- **Leyes de Kirchhoff** para calcular potencia interna de los motores de corriente continua.

Principios físicos implicados en la cinemática inversa y en la dinámica del robot:

- **CoreXY.** Es una técnica de control de movimiento en dos dimensiones usando una sola correa dentada para los dos ejes del plano.
- **Momento mecánico.** La intensidad consumida por el inducido de los motores de corriente continua con el inductor conectado en paralelo, o con imanes permanentes, es proporcional al momento mecánico ejercido por el rotor.
- **Inercia de masas en movimiento.** Estas tienen que ser tenidas en cuenta al inicio y al final de la trayectoria del bolígrafo. El inicio y el final de la trayectoria son los instantes de máxima aceleración de las masas en movimiento. En caso contrario la calidad del dibujo baja

En el microcontrolador, también tenemos que conocer algunos aspectos:

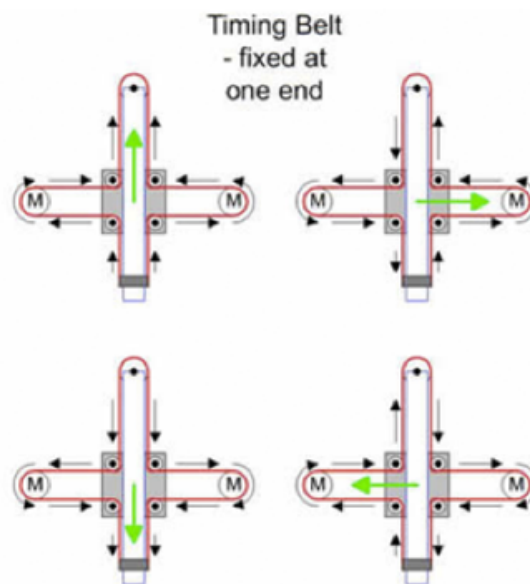
- **Secuencia del programa.** Control básico del flujo del programa ejecutado por Arduino.
- **Comunicaciones serie** entre el microcontrolador y el exterior.
- **Variables en lenguaje C.** Usaremos los tipos básicos de variables soportadas por Arduino.

### 3. Metodología

Para el buen término del proyecto, nuestros alumnos han ido alternando las clases teóricas con las prácticas en el taller. Las habilidades y los contenidos que han ido adquiriendo a lo largo del proyecto son los indicados a continuación.

#### 3.1. Core XY

El movimiento del bolígrafo del Robot sobre el plano horizontal, sobre los ejes X e Y, lo habilitan dos motores paso a paso dispuestos en estructura core XY. Se trata de una técnica de control de movimiento en dos dimensiones usando una sola correa dentada para los dos ejes del plano. Su cinemática es muy sencilla.



*Ilustración 2: Estructura Core XY*

La correa dentada está dispuesta en cruz y se apoya en siete poleas. En el extremo inferior de la cruz tenemos el principio y el final de la correa clavados a la estructura. En el extremo superior de la cruz, encontramos una polea de giro libre. En los extremos izquierdo y derecho de la cruz se sitúan las dos poleas de los motores paso a paso. Finalmente, en el centro encontramos cuatro poleas libres. El bolígrafo, situado en el extremo superior de la cruz, solamente puede moverse en direcciones paralelas a los ejes X e Y. Los movimientos oblicuos no están permitidos. Para mover el bolígrafo hacia la derecha nos tenemos que desplazar sobre el eje X en sentido positivo.

Los dos motores tienen que girar un mismo número de grados y además hacerlo de forma simultánea. En caso contrario, la correa dentada se partiría. Consideraremos positivo el sentido de giro de los motores contrario a las agujas del reloj. El desplazamiento del bolígrafo a lo largo del eje X se consigue girando los dos motores en el mismo sentido y se calcula con la siguiente fórmula.

$$\Delta X = 1/2 R_p \alpha$$

donde:

$\Delta X$  = desplazamiento del bolígrafo sobre el eje X [metros]

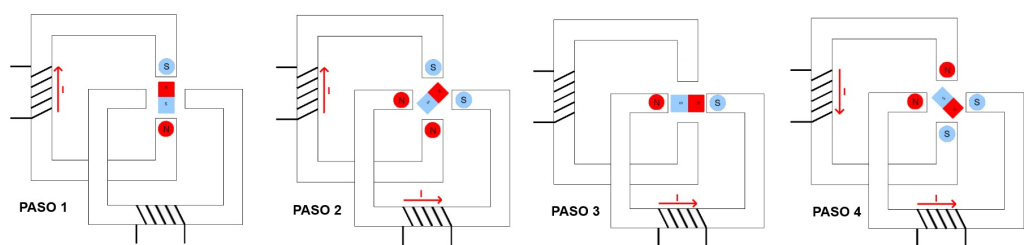
$R_p$  = radio de las poleas de los motores [metros]

$\alpha$  = ángulo girado por el motor derecho [radianes]

Por contra, el movimiento sobre el eje Y se habilita girando los dos motores en sentido contrario. Aunque la fórmula sigue siendo la misma, tenemos que tener en cuenta que el motor izquierdo se mueve en sentido contrario.

### 3.2. Motor paso a paso

El funcionamiento de estos motores es extremadamente sencillo. El rotor está formado por un imán permanente y en el estátor encontramos dos bobinas decaladas 90°, la bobina A y la bobina B.



MOTOR PASO A PASO DE 45° DE PASO ANGULAR

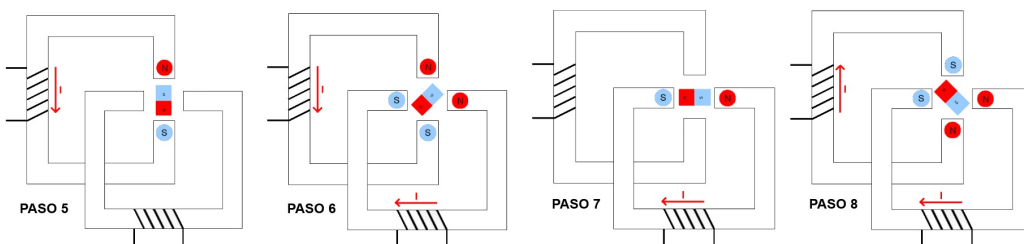
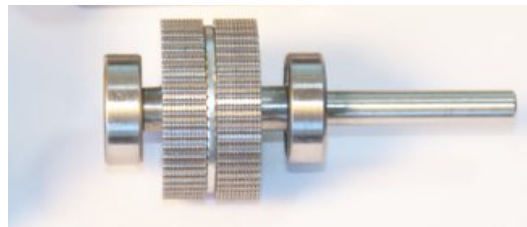


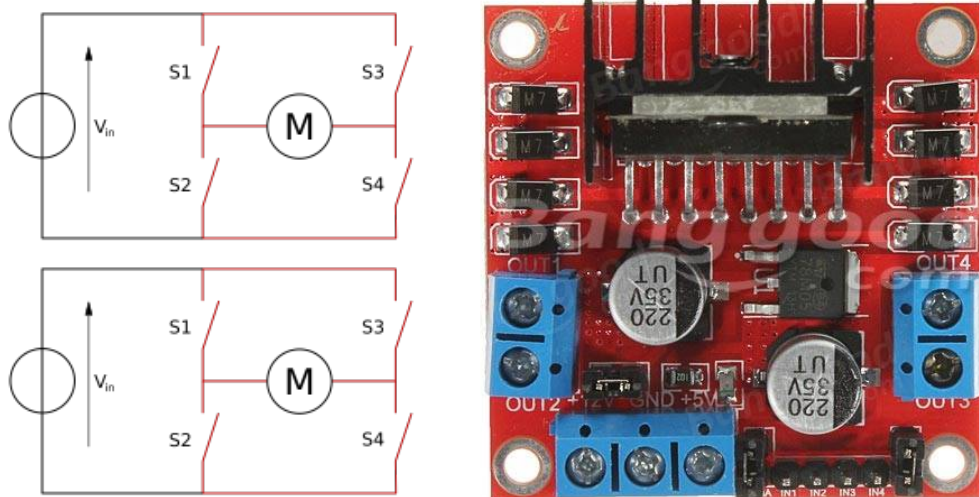
Ilustración 3: Ocho pasos

En el paso 1, alimentamos la bobina B con un voltaje positivo y el rotor se orienta verticalmente. Los polos magnéticos de distinto signo se atraen. El rotor permanecerá en esta posición hasta que cambie la alimentación de las bobinas. En el paso 2, se alimentan las dos bobinas del estátor con voltajes positivos y el rotor gira  $45^\circ$ . En el paso 3 solamente se alimenta la bobina A y el rotor gira  $90^\circ$ . Hacen falta ocho pasos para que el rotor de una vuelta completa como se puede ver en la imagen. Al ángulo más pequeño que puede girar el rotor se le llama paso. El motor que usamos nosotros es de la firma Quimat modelo Nema 17. Este tiene un paso de  $0,9^\circ$ . Es decir, hacen falta 400 pasos por vuelta en lugar de ocho. Fabricar un motor con paso de  $45^\circ$  es fácil como se puede comprobar en la imagen superior. Pero, ¿cómo se construye el rotor de un motor con paso de  $0,9^\circ$ ? El rotor se obtiene con dos coronas estriadas. La superior unida al polo norte del imán que hay en su núcleo y la inferior unida al polo sur.



*Ilustración 4: Rotor*

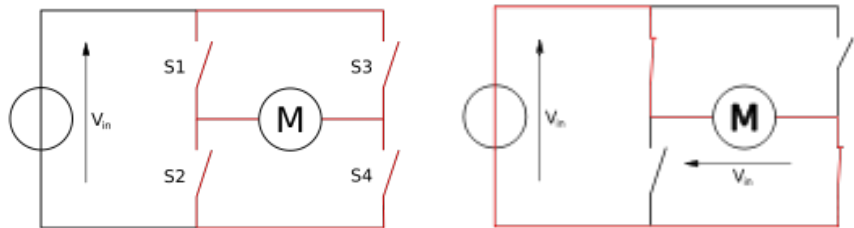
Las dos bobinas del estátor están alimentadas con sendos puentes H, el puente A y el puente B. Ambos incluidos en la placa L298N.



*Ilustración 5: L298N*

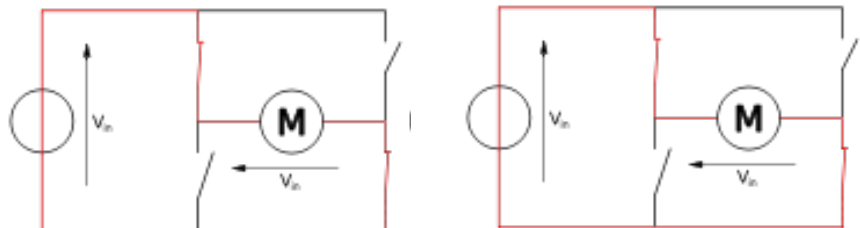


En el paso uno del motor paso a paso, la única bobina que tiene corriente es la B. La bobina estática A no recibe corriente alguna. Por tanto, la disposición de los dos puentes H de la placa L298N será la mostrada debajo. El puente A, a la izquierda y el B, a la derecha.



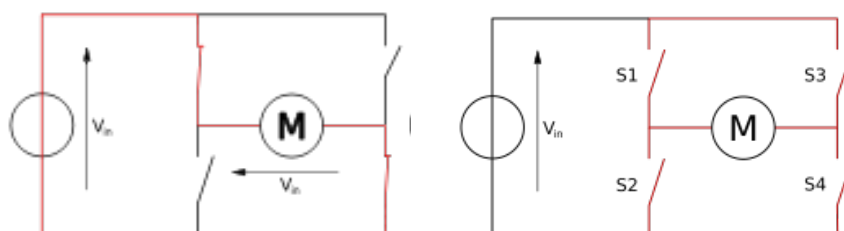
*Ilustración 6: Paso uno*

En el paso dos del motor paso a paso, tanto el puente A como el B alimentan las bobinas estáticas con corrientes circulando hacia la derecha.



*Ilustración 7: Paso dos*

En el paso tres del motor, la disposición de los puentes será la siguiente. En esta ocasión, la bobina B no recibe corriente.



*Ilustración 8: Paso tres*

### 3.3. Momento mecánico

El momento mecánico experimentado por los ejes de los motores se calcula con la fórmula mostrada debajo. En la que nos olvidaremos de su carácter vectorial. Por ello, supondremos que la fuerza es tangencial a la trayectoria circular de los ejes.

$$M = F \cdot R$$

donde:

M = momento mecánico [Nm]

F = fuerza tangencial ejercida por los ejes [N]

R = distancia entre la fuerza y el eje de giro [m]

Por otro lado, la fuerza ejercida por los ejes es proporcional a la aceleración de las masas en movimiento.

$$F = m \cdot a$$

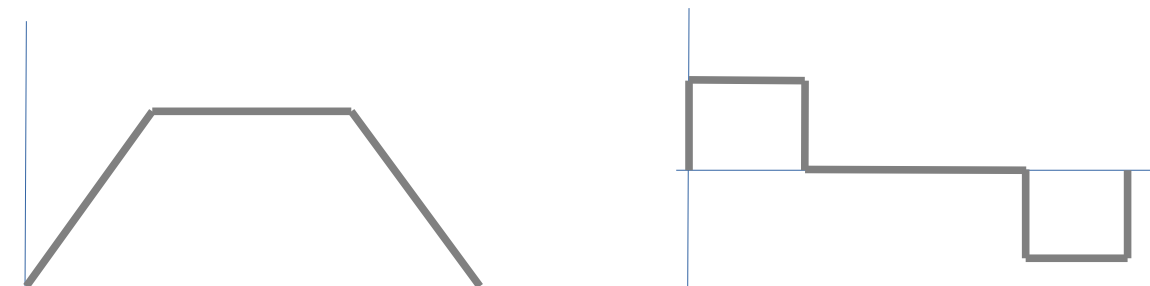
donde:

F = fuerza tangencial ejercida por los ejes [N]

m = masa en movimiento [Kg]

a = aceleración de la masa en movimiento [m/s<sup>2</sup>]

Si representamos en un diagrama de coordenadas cartesianas la velocidad y la aceleración experimentada por las masas en movimiento del robot, cuando mueve el bolígrafo desde un punto a otro, frente al tiempo, tenemos.

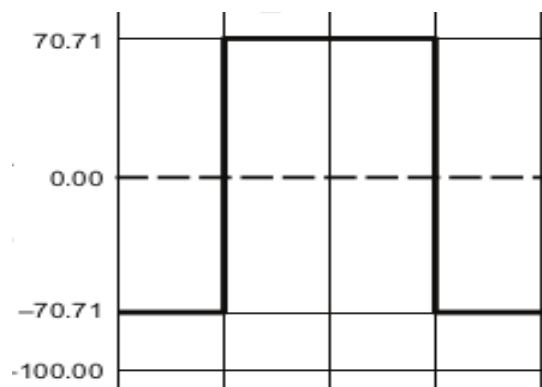


*Ilustración 9: Velocidad y aceleración del bolígrafo*

Donde se puede observar que la velocidad solamente varía al inicio y al final del recorrido. Las aceleraciones son proporcionales a los cambios de velocidad.

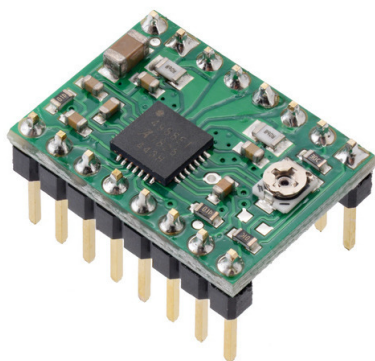
Las aceleraciones son máximas al inicio y al final del recorrido del bolígrafo. En consecuencia, las inercias de las masas en movimiento y los momentos ejercidos por los motores son máximos al inicio y al final del movimiento del bolígrafo. Estas inercias desajustan la precisión del bolígrafo y afean el dibujo trazado por el robot. Tenemos que reducir las aceleraciones para minimizar las inercias de las masas en movimiento que se oponen al par ejercido por los motores.

Los transistores de la placa L298N son como grifos de agua, están abiertos o cerrados. La corriente suministrada por la placa L298N es la que recorre las bobinas estáticas del motor paso a paso.

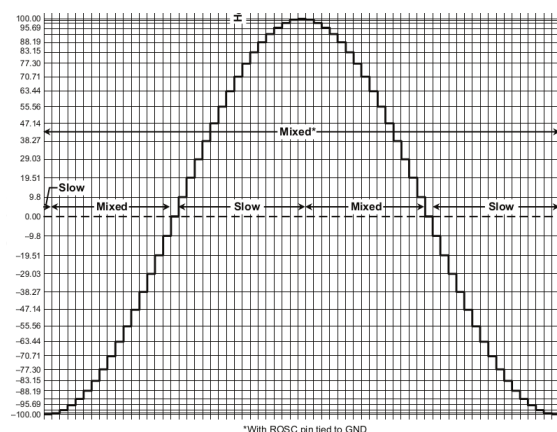


*Ilustración 10: Intensidad de las bobinas estáticas*

Los cambios bruscos de intensidad bajan la calidad del dibujo. Para evitar este hecho indeseable sustituiremos los puentes L298N por otros más sofisticados, los A4988. Ahora, la variación de intensidad de las bobinas estáticas es más paulatina, es menos brusca.



*Ilustración 11: A4988*



*Ilustración 12: Intensidad de las bobinas*

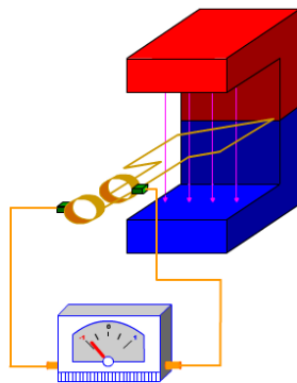


Así se reducen las aceleraciones al inicio y al final de la trayectoria del bolígrafo. Reduciendo también las inercias de las masas en movimiento hasta una magnitud despreciablemente pequeña. Las inercias ahora son tan pequeñas que no alteran la trayectoria teórica y deseada del bolígrafo. Las inercias ahora son tan pequeñas que no tienen fuerza para oponerse al par ejercido por los motores. Con la placa A4988, la calidad del dibujo trazado por el robot es bastante buena.

### 3.4. Máquinas eléctricas

Las máquinas eléctricas funcionan gracias a la interacción entre una corriente eléctrica y un campo magnético. En una máquina eléctrica siempre encontramos estos dos elementos, la corriente eléctrica del inducido y el campo magnético del inductor.

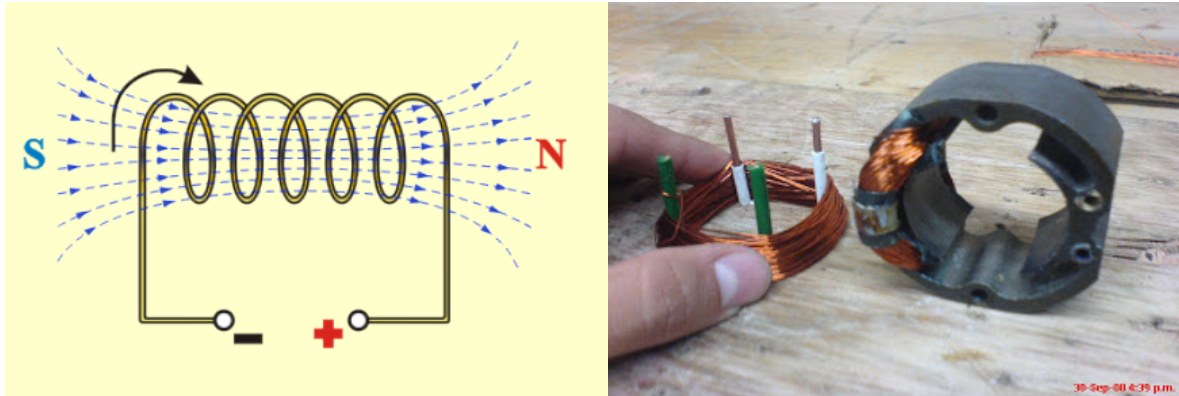
El inducido son unos hilos de cobre, un devanado, por los que puede circular una corriente eléctrica. Esta corriente de electrones se obtiene fácilmente con una fuente de alimentación. Los electrones saldrán del polo positivo de la pila, recorrerán el devanado inducido y volverán al polo negativo de la pila cerrando el circuito.



*Ilustración 13: Inducido*

El inductor se construye entorno a unas chapas de hierro por las que puede cerrarse un flujo magnético. El concepto de flujo magnético es nuevo para nosotros. Pero se entiende muy bien si se compara con un conjunto de flechas, como las usadas en la prehistoria para cazar, dispuestas en un circuito cerrado. Las flechas

salen del polo norte del inductor, recorren el circuito de chapas de hierro y vuelven al inductor por el polo sur para cerrar el circuito.



*Ilustración 14: Inductor*

El fabricante de flechas, el inductor, puede ser un imán permanente o un devanado de cobre. En la imagen vemos un devanado bobinado. En concreto, la magnitud física del inductor que fabrica las flechas es la fuerza magnetomotriz definida por la ley de Ampere.

$$F_{mm} = N \cdot I$$

donde:

$F_{mm}$  = fuerza magnetomotriz del inductor [Av]

$N$  = número de espiras del inductor

$I$  = intensidad eléctrica del inductor [A]

La cantidad de flechas que recorren el circuito magnético de chapas de hierro depende del fabricante de flechas y de la reluctancia del circuito por el que tienen que pasar estas flechas. A la cantidad de flechas se le llama flujo magnético y se calcula con la ley de Ohm para el campo magnético.

$$\Phi = \frac{F_{mm}}{R}$$

donde:

$\Phi$  = flujo magnético de las chapas de hierro [Wb]

$F_{mm}$  = fuerza magnetomotriz del inductor [Av]

$R$  = reluctancia de las chapas de hierro [Av/Wb]

Ya tenemos la corriente eléctrica del inducido y el flujo magnético del inductor en nuestra máquina eléctrica. Pero, ¿qué puede hacer la máquina eléctrica con estos dos elementos? Casi todas las máquinas eléctricas pueden funcionar como generadores eléctricos o como motores sin ningún cambio estructural. Para entender el funcionamiento de los generadores eléctricos usaremos la ley de Faraday. El voltaje generado en el inducido es proporcional a su variación de flujo magnético. El signo menos del segundo miembro significa que la corriente eléctrica generada por el voltaje crea un segundo flujo magnético en el inducido que se opone a la variación de flujo del inductor.

$$V = - N \frac{d\Phi}{dt} = - N \frac{d(\vec{B} \cdot \vec{S})}{dt}$$

donde:

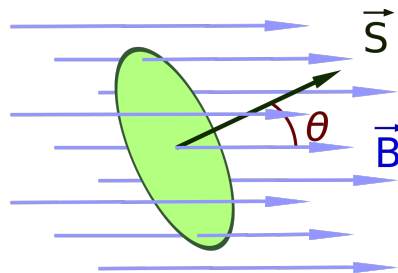
V = voltaje del inducido [V]

N = número de espiras del inducido

$\Phi$  = flujo magnético que atraviesa el inducido [Wb]

S = superficie de la espira [m<sup>2</sup>]

B = inducción magnética del inducido [Wb/m<sup>2</sup>]



*Ilustración 15: Espira del inducido*

Cuando las máquinas eléctricas funcionan como motores, tenemos que usar la ley de Lorentz para calcular su fuerza. El producto vectorial de dos vectores es otro vector perpendicular a ambos. El sentido del vector fuerza se determina con la regla del sacacorchos.

$$\vec{F} = I \times \vec{L} \times \vec{B}$$

donde:

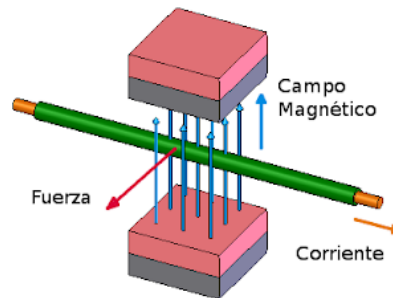
F = fuerza del inducido [N]

I = intensidad del inducido [A]



$L$  = longitud del inducido [m]

$B$  = inducción magnética del inducido [ $\text{Wb/m}^2$ ]



*Ilustración 16: Cable del inducido*

El arranque es un momento delicado en los motores eléctricos. Porque en ese instante el consumo de corriente es varias veces mayor que el nominal. Para entender este incremento de corriente, aplicaremos la segunda Ley de Kirchhoff sobre la malla de un motor de corriente continua con imanes permanentes en el inductor.



*Ilustración 17: Malla de un motor de c.c.*

La segunda Ley Kirchhoff dice que, en una malla, la suma de los voltajes de las fuentes es igual a la suma de los voltajes de los elementos alimentados por las fuentes.

$$U - \text{fem} = R_i \cdot I$$

donde:

$U$  = voltaje de la pila [V]

$\text{fem}$  = voltaje del inducido [V]

$R_i$  = resistencia del inducido [ $\Omega$ ]

$I$  = intensidad del inducido [A]



El voltaje del inducido es negativo porque la intensidad lo atraviesa en sentido contrario. Despejando la intensidad del inducido nos queda.

$$I = \frac{U - \text{fem}}{R_i}$$

Pero en el instante inicial, la velocidad del motor es cero, la variación de flujo en el inducido vale cero y su voltaje también. Por lo tanto, en el instante inicial la intensidad del inducido es mayor que la nominal. Para evitar este incremento de consumo inicial se suele instalar en serie una resistencia de arranque. Esta se retira cuando el motor alcanza cierta velocidad.



*Ilustración 18: Malla de un motor de c.c. con resistencia de arranque*

Con la resistencia de arranque, la intensidad inicial del motor se reduce a valores aceptables.

$$I = \frac{U - \text{fem}}{R_i + R_a}$$

### 3.5. Microcontrolador

El microcontrolador ATmega328P de la placa Arduino se puede programar en lenguaje C++. La secuencia de ejecución del programa se controla con diversas estructuras. Una de las más usadas es el condicional if. Si se cumple la condición se ejecutan las sentencias indicadas entre llaves.

```
if (condición) {  
    función( );  
}
```



Otra estructura muy usada es el bucle for. Mientras se cumpla la condición con la variable, actualizada el final del bucle, se ejecutarán las sentencias indicadas entre llaves.

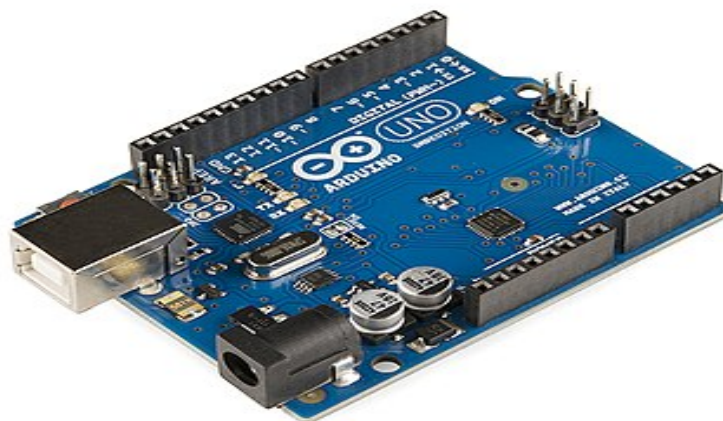
```
for (inicio; condición; incremento) {  
    función( );  
}
```

Con el compilador de Arduino podemos usar multitud de variables. Pero nosotros nos centraremos en las más importantes. Las variables int pueden alojar números enteros y las variables char, caracteres.

```
int x = 5;  
char x = 'a';
```

La comunicación con el puerto serie de la placa Arduino la podemos habilitar con tres funciones.

```
Serial.begin(9600);  
char x = Serial.read();  
Serial.write('a');
```

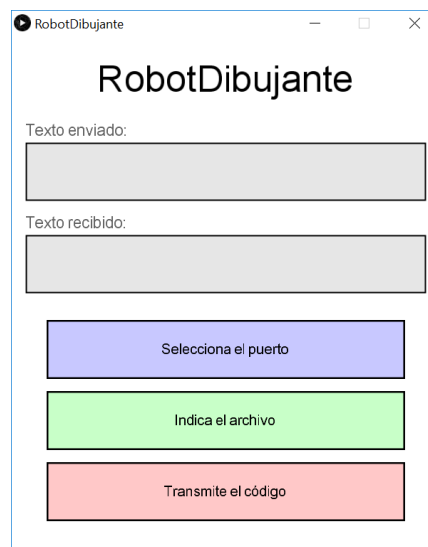


*Ilustración 19: Placa Arduino*

### 3.6. Código G

El código G es un lenguaje de programación estandarizado en la industria. A las máquinas que lo utilizan se les suele llamar máquinas de control numérico. También son conocidas como máquinas CNC (control numérico computarizado). Como ejemplos de máquinas CNC podemos citar a los tornos de un taller de mecanizado, a las fresadoras usadas para grabar un bajo relieve, a los robots de una cadena de montaje, o a las impresoras 3D.

Nuestro programa Java, ejecutado por un ordenador, es el encargado de enviar los comandos en código G al Robot Dibujante para que este los ejecute. El programa Java tiene dos campos de texto y tres botones. Los tres botones sirven respectivamente para seleccionar el puerto USB en el que está conectado el Robot Dibujante, para indicar el archivo que contiene el código G, y para enviar el código G al Robot Dibujante.



*Ilustración 20: Programa Java del ordenador*

Existen multitud de comandos en código G pero nuestra máquina solamente interpreta los cuatro más usados. Que además, fueron los primeros comandos estandarizados dentro de la industria.

<b>Línea recta:</b>	G00 Xx Yx Zx
<b>Línea recta:</b>	G01 Xx Yx Zx
<b>Arco en sentido horario (negativo):</b>	G02 Xx Yx Ix Jx Zx
<b>Arco en sentido antihorario (positivo):</b>	G03 Xx Yx Ix Jx Zx



## 4. Resultados

La sustitución de los puentes H L298N por otros más sofisticados, los A4988, a supuesto una mejora considerable en la calidad del dibujo trazado por el robot. Sirvan un par de ejemplos.



*Ilustración 21: Dibujos trazados por el Robot Dibujante.*



## 5. Conclusiones

La primera conclusión que podemos sacar es la ingente cantidad de horas que hacen falta para que el robot funcione correctamente. Aunque por otro lado, el robot es un factor motivante de primer orden para el alumnado. Con esta práctica, los conocimientos adquiridos por el alumnado son más significativos al comprobar estos la aplicación práctica de los mismos.

El código G utilizado por el robot es el mismo código que usan las impresoras 3D, tan de moda actualmente. Gracias a esta práctica nuestro alumnado podrá acercarse un poco más al funcionamiento de las impresoras 3D.

## 6. Referencias

Las fuentes de información más importantes han sido, entre otras muchas, las siguientes:

[www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

[www.processing.org](http://www.processing.org)

[www.axidraw.com](http://www.axidraw.com)

[www.instructables.com/id/4xiDraw](http://www.instructables.com/id/4xiDraw)

[diymakers.es/mover-motores-paso-paso-con-arduino](http://diymakers.es/mover-motores-paso-paso-con-arduino)

[www.pololu.com/product/1182](http://www.pololu.com/product/1182)