

## Sistema de control para posicionamiento angular en un motor a pasos

GUTIERREZ-GRANADOS, Cuitláhuac\*†, ESPINOSA-AHUMADA, Elías y HERNÁNDEZ-DIEGO, Pablo César

*Universidad Tecnológica de San Juan del Río, Mecatrónica, Av. La Palma No. 125, Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Querétaro 76800, México*

Recibido 3 de Enero, 2017; Aceptado 2 de Marzo, 2017

### Resumen

En la actualidad, trabajar con paneles solares es una realidad tanto para fines educativos, como profesionales. Sin embargo, la eficiencia de los mismos muchas veces se ve disminuida porque su posicionamiento no es el ideal para obtener la mayor recepción de luz o radiación solar. El objetivo del proyecto es desarrollar un sistema de control de posición angular que puede ser implementado a un conjunto de paneles solares, para así, conseguir una posición ideal con respecto a la ubicación geográfica, hora del día, incidencia de rayos solares, entre otros. El sistema permite que un usuario ingrese un valor deseado en grados, posterior a ello, el sistema calcula cual es el valor real de los grados alcanzados en función de la resolución del motor a pasos, envía señales para que, en primer lugar, el motor se dirija a la posición de 0°, y en segundo lugar se mueva a la posición deseada. Por último, el sistema le indica al usuario el valor real angular alcanzado por el motor a través de un display LCD.

**Sistema de control, posicionamiento angular, motor a pasos**

### Abstract

At present, working with solar panels is a reality for both educational and professional purposes. Nevertheless, their efficiency is often reduced because their positioning is not the ideal to get the highest receiving light or solar radiation. The objective of the project is to develop a control system of the angular position that can be implemented to a set of solar panels, to obtain an ideal position with respect to the geographical location, time of day, the incidence of solar rays, between others. The system allows a user to enter a desired value in degrees, after that, the system calculates which is the real value of reached degrees in function of the resolution of the stepper motor, it sends signals so that, in the first place, the motor goes to the 0 ° position, and secondly it moves to the desired position. Finally, the system indicates the user the real angular value reached by the motor through an LCD display.

**Control system, angular positioning, stepper motor**

**Citación:** GUTIERREZ-GRANADOS, Cuitláhuac, ESPINOSA-AHUMADA, Elías y HERNÁNDEZ-DIEGO, Pablo César. Sistema de control para posicionamiento angular en un motor a pasos. Revista de Ingeniería Tecnológica 2017. 1-1:11-19

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: cgutierrezg@utsjr.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

**Introducción**

Los motores a pasos son actuadores electromagnéticos rotatorios que convierten señales digitales en movimiento mecánico (Cortés, Monjaraz, & Soto, *Mecatrónica. Control y automatización.*, 2013). Existe una gran variedad de modelos de estos motores dependiendo del número de fases de su estator, de si la alimentación de estas es unipolar o bipolar, de su resolución de grados por paso y de si su rotor es de reluctancia variable, imanes permanentes o híbridos. (París, 2000)

Merece la pena mencionar que el motor paso a paso es una máquina eléctrica que requiere de electrónica de control para su operación.

En cuanto al control, existen tres modos de realizarlo; paso entero, medio paso y paso doble.

Por otra parte, el imperante uso de las energías renovables en la actualidad hace de la energía solar, una alternativa cada vez más aceptada (Sánchez, 2010) y, de hecho, conforme crezca la popularidad del uso de esta energía, el camino hacia un futuro autosustentable y ecológico se vuelve más realista.

Con respecto a los paneles solares, constantemente se busca obtener la mayor eficiencia posible de ellos, mediante la mejora de los mismos a fin de hacerlos menos costosos y con una eficiencia de conversión mayor. (Crisol, 2016)

Un factor de alta importancia para alcanzar esta eficiencia es el posicionamiento angular de los paneles con respecto a la radiación solar que reciben (Marcombo, 1986), ya que, con base en ello, aumenta o disminuye la generación de energía de manera considerable.

Partiendo de ambas ideas, es que este proyecto busca aprovechar un área de oportunidad para desarrollar un sistema de posicionamiento angular de una gran fiabilidad y precisión, gracias a los motores a pasos, mediante un controlador digital Arduino y una serie de componentes necesarios para el correcto control de los motores mencionados.

El proyecto tendrá, además, la característica de un precio reducido en comparación a otro tipo de sistemas que hacen uso de servomotores y una electrónica más complicada. El proyecto tiene la posibilidad de controlar a voluntad del usuario el ángulo en el que se posicionarán los paneles solares, con lo cual no se limita el desplazamiento de estos a un algoritmo previo.

**Metodología y materiales****Operación del prototipo**

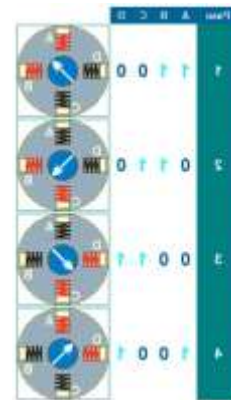
El sistema consiste, de manera general, en un par de motores a pasos, cuya posición angular será ingresada por medio de un teclado matricial tipo membrana. Por medio de un display LCD se podrán observar valores referentes a la posición del motor y con un optoacoplador tipo herradura se monitorea una posición específica ( $0^\circ$ ) en ambos motores. La identificación de la posición se realiza gracias a un disco graduado que está acoplado en el eje del motor.

Cabe resaltar que la investigación en cuestión es un sistema de lazo abierto, ya que no recibe retroalimentación de la posición angular del motor. (Bolton, Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica., 2012)

Un usuario ingresa un valor numérico (que sea un entero positivo o negativo) al sistema, mediante el teclado, posterior a ello y a través del mismo teclado, selecciona si quiere que el motor A o el motor B se desplace a la posición previamente ingresada. Una vez hecho esto, el motor seleccionado se mueve en primer lugar, a su posición 0, (la cual se precisa gracias al optoacoplador infrarrojo, ya que, en dicha posición, el disco graduado, tiene una perforación que permite el paso de la luz infrarroja del optoacoplador y con ello la obtención de un cambio en el estado lógico de la señal que determina una referencia absoluta) para después moverse a la posición angular deseada.

Una vez terminado este proceso, se debe borrar el dato ingresado para poder volver a realizar la secuencia descrita anteriormente.

En este proyecto se utilizaron motores a pasos con una resolución de  $1.8^\circ$  por paso, y con un control a paso doble, debido a que así trabaja la librería “Stepper” de Arduino (Artero Ó. T., 2016) y alimentados con 5.05 voltios.



**Figura 1** Secuencia de control de paso doble para un motor a pasos

*Fuente:* Página de internet. [1]

Para ingresar datos al sistema, se utilizó un teclado matricial tipo membrana de 4x4.



**Figura 2** Teclado matricial tipo membrana de cuatro filas y cuatro columnas

*Fuente:* Página de internet. [2]

Se utilizaron, además, circuitos integrados ULN2003, los cuales contienen siete pares Darlington del colector abierto con emisores comunes. Cada canal soporta una corriente de 500 mA y picos de 600 mA. Los sensores de referencia para identificar la posición  $0^\circ$  del motor a pasos, fueron optoacopladores tipo herradura H21A1.



**Figura 3** Optoacoplador tipo herradura

*Fuente:* Página de internet. [3]

Un disco graduado se acopló a la flecha del motor, el cual tiene un orificio que nos permite la detección de la posición angular 0° en conjunto con el detector óptico mencionado anteriormente.

Los datos de valor ingresado, valor real alcanzado y la selección del motor se muestran a través de un display LCD de 16x2. (Salas, 2013)

El controlador digital utilizado es un Arduino MEGA 2560, (Cortés & Cid Monjaraz, Arduino. Aplicaciones en Robótica, Mecatrónica e Ingenierías, 2015) cuyo número de entradas y salidas lo hacen óptimo para este proyecto.



**Figura 4** Arduino MEGA con microcontrolador ATmega2560

*Fuente:* Página de internet. [4]

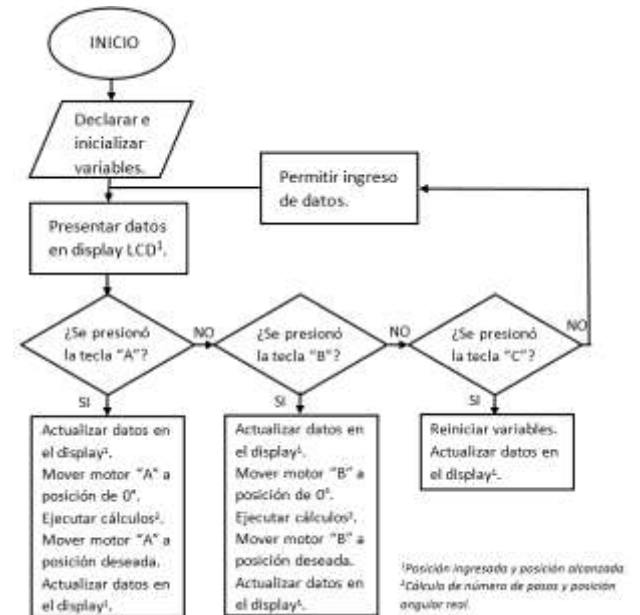
El programa se desarrolló en la plataforma IDE de Arduino.

**Resultados**

**Programación**

Se aprovechó el uso de algunas bibliotecas y funciones disponibles, para el control de los motores a pasos, el display LCD y el teclado matricial. (Calaza, 2015)

La estructura del programa está desarrollada de manera secuencial (Evans, 2007), la cual, continuamente se está ejecutando, sin embargo, el programa es susceptible de amplias mejoras debido a que el entorno de programación del sistema Arduino, así lo permite. (Artero O. T., 2013)



**Figura 5** Diagrama de flujo general del programa del proyecto

*Fuente:* Diagrama propio

Vale la pena comentar que el sistema puede acrecentar el número de motores a ser controlados, siempre y cuando, se considere el límite de terminales con las que se dispone en la tarjeta Arduino MEGA.

```

1 //Declarando las bibliotecas para: display, el motor NXP y el teclado.
2 //Declarando las variables a utilizar.
3 //Creando los objetos teclado, led y motores A/B.
4#void setup() { // Inicializando variables.
5#void loop() { // Inicio del proceso cíclico del programa.
6#  if (texto == 'A')// Al presionar la tecla A, se enciende motor A.
7#  if (texto == 'B')// Al presionar la tecla B, se enciende motor B.
8#  if (texto == 'C')// Al presionar la tecla C, se borran datos.
9#  else{ // En otro caso, aún se está ingresando un valor numérico.
10#void Calculos()//Subrutina que calcula pasos y grados reales del motor.
11#void Muestra dato()//Subrutina para imprimir los valores del motor.

```

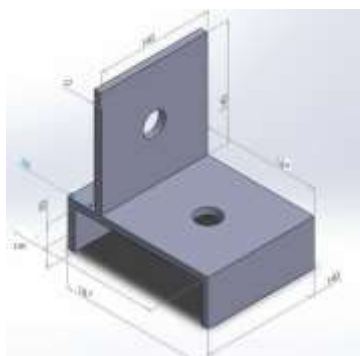
**Figura 6** Porción del código del programa del proyecto (con código plegado)

*Fuente:* Captura de pantalla propia.

**Diseño y elaboración de la estructura**

Tomando en cuenta las medidas de motores, componentes del sistema, diámetro de los discos graduados, etc., se definieron los valores óptimos para el desarrollo de este prototipo; se desarrolló un diseño en conjunto, para soportar y fijar los motores a pasos y elementos periféricos.

Una vez teniendo el diseño y medidas de las piezas, estas se elaboraron en un taller de corte CNC por láser, en material MDF.



**Figura 7** Diseño de la estructura que soportará los dos motores a pasos en el prototipo, realizado en Solid Works

*Fuente:* Diseño propio, realizado en Solid Works.

**Experimentación de campo**

Para el correcto dimensionamiento de la etapa de potencia (Cetinkunt, 2013), fue necesario realizar una medición del consumo de corriente máximo de cada motor.

Mediciones de corriente máxima	
MOTOR "A"	MOTOR "B"
120 mA	140 mA

**Tabla 1** Mediciones del consumo de corriente máxima demandada por cada motor sin carga mecánica acoplada

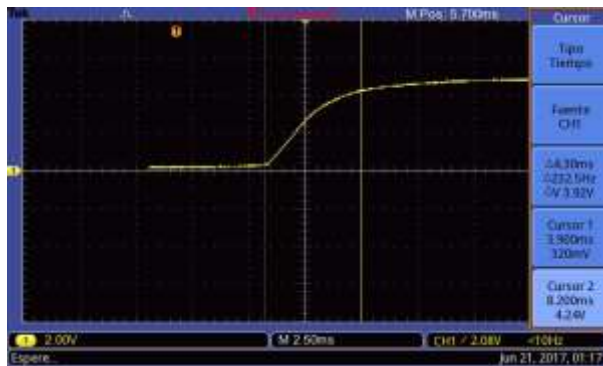
Las mediciones demostraron que el consumo de corriente promedio en ambos motores, no rebasa los 150 mA, por lo cual, es posible utilizar el circuito integrado ULN2003 como interface de potencia para los motores a pasos. Dicho circuito, puede soportar un máximo de 500 mA promedio en cada canal. Sin embargo, al llevar este proyecto a un entorno real, sería necesario tomar en cuenta la carga mecánica añadida, como lo sería uno o varios paneles solares.

Marca y Modelo	PP (W)	IMP (A)	VMP (V)	ISC (A)	VOC (V)	Dimensiones (MM)	Peso (KG)
SOL-6P-72-320-4BB	920	8,42	38	8,78	41,3	1960x992x46	23,3
SOL-6P-60-265-4BB	265	6,48	31,25	8,73	38,4	1653x992x46	18,5
SOLARTEC KS150T-12V	150	4,10	18,30	4,40	44,20	1478x543x36	10,80
SOLARTEC KS150T-24V	130	8,20	36,60	8,80	22,10	1478x543x36	10,80
SOLARTEC KS100T-24V	100	2,73	36,50	2,93	44,90	1028x543x36	7,75
SOLARTEC KS100T	100	5,46	18,30	5,86	22,10	1028x543x36	7,75
SOLARTEC KS75T	75	4,10	18,30	4,40	22,10	1478x543x36	6,40
SOLARTEC KS56TA	56	3,74	15,00	4,20	18,10	1328x343x36	5,46
SOLARTEC KS50T-24V	50	1,36	36,60	1,86	44,20	1028x543x36	4,50

**Tabla 2** Tabla comparativa de distintos paneles solares de la empresa Solartec<sup>5</sup>

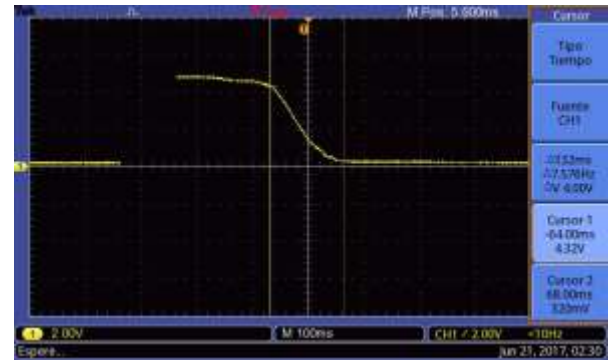
Para elegir los motores apropiados para acoplar al sistema deseado se debe realizar un análisis completo de los paneles disponibles en función de sus medidas geométricas y peso, los cuales son diversos (como vemos en la tabla 2).

Al tratarse de electrónica digital, es necesario verificar los estados lógicos de las entradas y salidas del sistema, (Kuo, 1992) y específicamente del optoacoplador. Por lo cual se realizó la conexión del mismo en protoboard y posteriormente se conectó a un osciloscopio para evaluar la señal de respuesta del optoacoplador en los casos de obstrucción y no obstrucción de la luz infrarroja.



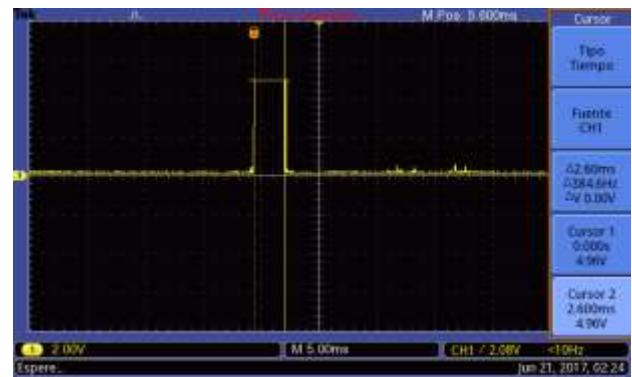
**Figura 8** Cambio del estado lógico de la señal del optoacoplador de bajo a alto (estado sin obstrucción de la luz infrarroja a estado con obstrucción de la luz infrarroja)

*Fuente:* Captura de pantalla propia, realizada en osciloscopio digital Tetkronix serie TBS1000



**Figura 9** Cambio del estado lógico de la señal del optoacoplador de alto a bajo (estado con obstrucción de la luz infrarroja a estado sin obstrucción de la luz infrarroja)

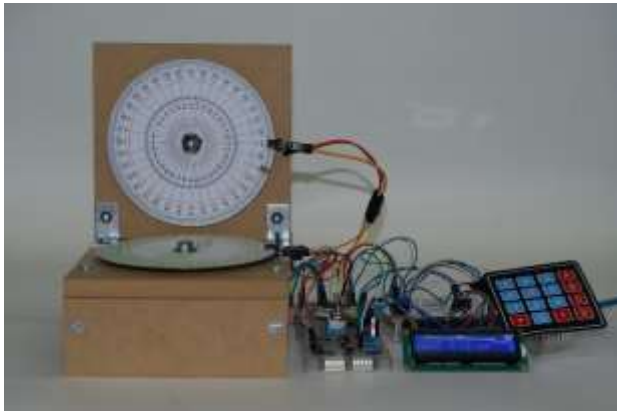
*Fuente:* Captura de pantalla realizada en osciloscopio digital Tetkronix serie TBS1000



**Figura 10** Cambio del estado lógico de la señal tipo ventana en el optoacoplador (motor girando de manera continua)

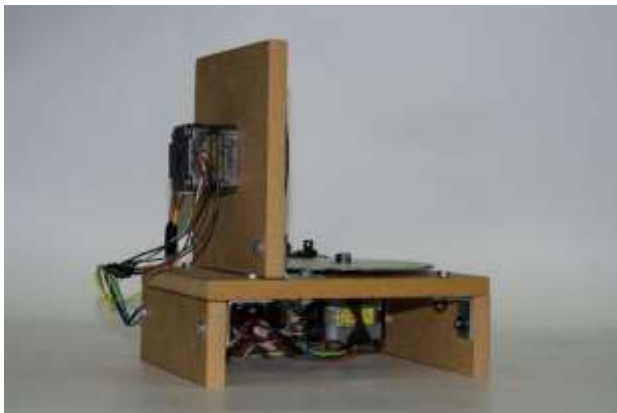
*Fuente:* Captura de pantalla realizada en osciloscopio digital Tetkronix serie TBS1000

Gracias a estas mediciones y gráficas, se demostró que el optoacoplador funciona de manera correcta y que no requiere de una etapa de acondicionamiento para la entrada digital del Arduino MEGA.



**Figura 11** Vista frontal del prototipo desarrollado

*Fuente: Fotografía por el alumno*



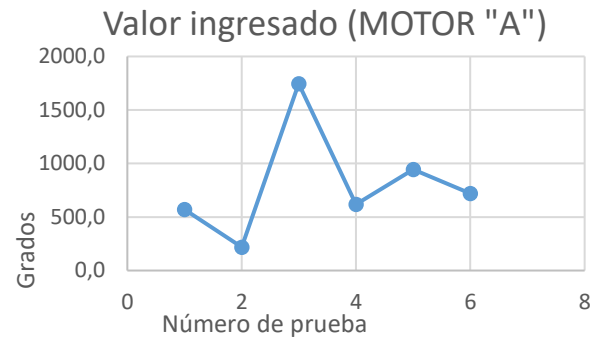
**Figura 12** Vista lateral del prototipo desarrollado

*Fuente: Fotografía por el alumno*

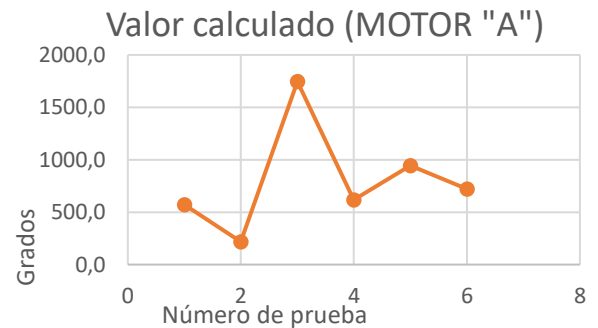
Cuando el prototipo estuvo terminado, fueron necesarias pruebas de posicionamiento angular con respecto del valor deseado y el valor real alcanzado, siendo comparados con los cálculos que realiza el programa cargado en el Arduino MEGA.

Mediciones de precisión de la posición angular del motor						
#	Motor A (Valores en grados)			Motor B (Valores en grados)		
	Ingresada	Calculada	Real	Ingresada	Calculada	Real
1	571.0	570.6	570.3	571.0	570.6	570.5
2	219.0	217.8	218.0	219.0	217.8	217.8
3	1746.0	1746.0	1745.8	1746.0	1746.0	1746.0
4	618.0	617.4	617.4	618.0	617.4	617.3
5	945.0	945.0	944.8	945.0	945.0	945.0
6	720.0	720.0	719.9	720.0	720.0	720.0

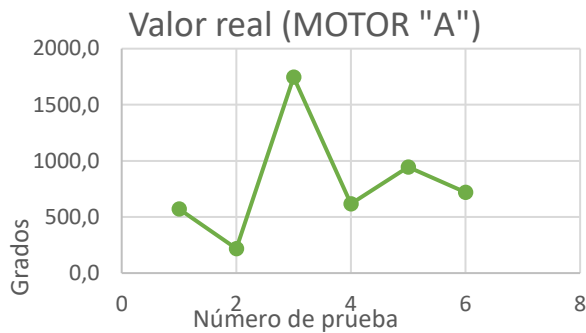
**Tabla 3** Mediciones de la posición angular en grados de los motores a pasos



**Gráfico 1** Gráfica continua de la posición angular ingresada en el motor a pasos "A"



**Gráfico 2** Gráfica continua de la posición angular calculada por el sistema para el motor a pasos "A"



**Gráfico 3** Gráfica continua de la posición angular real alcanzada por el prototipo, en el motor a pasos "A"

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas de posicionamiento angular, se determinó que el prototipo es eficiente y que responde de una manera sumamente cercana a los valores deseados con un error no mayor a  $1.8^\circ$ .

## Conclusiones

Este prototipo resulta excelente para ser utilizado en sistemas de posicionamiento angular, tales como los sistemas que aprovechan la energía del sol (paneles solares). Sin embargo, al extrapolar el sistema a un proyecto físico en un entorno real y con una carga mecánica añadida es necesario realizar un correcto dimensionamiento de motores, etapa de potencia en función de la demanda de corriente, etc.

Cabe mencionar que los datos que son ingresados al sistema de posicionamiento angular se definen por un usuario, y es él quien proporciona esta información con base en un análisis para determinar la posición de mayor eficiencia del panel solar -como ejemplo-, tomando en cuenta las características del mismo, así como la ubicación geográfica, ya que esta última se relaciona con la trayectoria del sol.

Además, se deberá tener cuidado de que el sistema en conjunto no sea afectado por la presencia de sombras, ya que, aunque pudiéramos ajustar su posición angular de la manera más óptima, dichas sombras reducen también la eficiencia, en este caso, de los paneles solares.

Por otra parte, en un sistema más grande, la carga mecánica supone una mayor inercia al serle aplicada una fuerza motriz, y si la velocidad fuese demasiado alta, dicha inercia dificultaría el frenado del motor, o incluso puede afectar en el correcto posicionamiento angular.

Para solucionar esto es posible diseñar e implementar un sistema de frenado, así como un programa con una rampa de aceleración y desaceleración durante el movimiento del motor.

Por último, existe la posibilidad de modificar algunas bibliotecas de Arduino (Ganzhapa, 2016) para, por ejemplo, la mejora en la resolución angular de los motores a pasos.

## Referencias

- Artero, O. T. (2013). *Arduino, curso práctico de formación*. Ciudad de México: Alfaomega Grupo Editor.
- Artero, Ó. T. (2016). *El mundo genuino Arduino*. Madrid: RC Libros.
- Bolton, W. (2012). *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- Calaza, G. T. (2015). *Taller de Arduino*. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- Cetinkunt, S. (2013). *Mecatrónica*. México, D.F.: Cosmudel.



Cortés, F. R., & Cid Monjaraz, J. (2015). *Arduino. Aplicaciones en Robótica, Mecatrónica e Ingenierías*. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor.

Cortés, F. R., Monjaraz, J. C., & Soto, E. V. (2013). *Mecatrónica. Control y automatización*. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor.

Crisol, L. (18 de Mayo de 2016). *Computer Hoy*. Obtenido de Computer Hoy: <http://computerhoy.com/noticias/life/ingenieros-crean-panel-solar-mas-eficiente-del-mundo-45170>

Evans, B. W. (2007). *Arduino Notebook: A Beginner's Reference Written*. San Francisco, California: Creative Commons. Obtenido de Robots Argentina.

Ganzhapa, B. O. (2016). *Arduino. Guía Práctica*. México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor.

Kuo, B. C. (1992). *Sistemas de control digital*. México, D.F.: Compañía Editorial Continental.  
Marcombo. (1986). *Energía Solar Fotovoltaica*. Barcelona, España: Printer Industria Gráfica.

París, A. P. (15 de Mayo de 2000). *Vivat academia*. Obtenido de Vivat academia: <http://www.vivatacademia.net/h/anteriores/quince/Num15/PDFs/MotoresPasoPaso.pdf>

Salas, J. (10 de Febrero de 2013). *Todoelectrodo*. Obtenido de Todoelectrodo: <http://todoelectrodo.blogspot.mx/2013/02/lcd-16x2.html>

Sánchez, M. Á. (2010). *Energía Solar Térmica*. México, D.F.: Editorial Limusa.

[1] <https://elmassolicitadopayan.wordpress.com/2014/04/11/motor-paso-a-paso/>

[2] <https://electrocrea.com/products/membrana-keypad-4x4>

[3] <http://sgsdistribuciones.com/optico-de-barrera/>

[4] <http://panamahitek.com/arduino-mega-caracteristicas-capacidades-y-donde-conseguirlo-en-panama/>

[5] <http://solartec.com.ar/productos.html>