



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

**INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**Diseño y desarrollo de un  
goniómetro para la  
realización de medidas de  
caracterización de  
estructuras fotónicas de  
sensado**

**AUTOR: Daniel Collado Bertomeu**

**TUTOR: Salvador Ponce Alcántara**

**Jaime García Rupérez**

**DEPARTAMENTO: Ingeniería electrónica**

**FECHA: Septiembre 2017**

## AGRADECIMIENTOS

---

*Quisiera agradecer el apoyo a mi familia,  
que siempre ha estado ahí cuando la he necesitado.*

*Así mismo mi agradecimiento a mi tutor Salvador  
Ponce Alcántara por su dedicación, ayuda y disponibilidad.*

## RESUMEN

---

Este proyecto tiene como finalidad el diseño y desarrollo de un sistema de medida angular (goniómetro) para la realización de la caracterización de estructuras fotónicas de sensado basadas en sustratos porosos en general, y en capas de silicio poroso en particular. El proyecto se llevará a cabo haciendo uso de dos motores paso a paso, destinados uno para la fuente de luz y otro para el receptor, pudiendo controlar la posición de cada uno de forma independiente desde una aplicación realizada en LabVIEW.

Tanto de forma teórica como experimental, se ha comprobado que los sensores fotónicos más efectivos son los basados en la medida de la reflectividad de estructuras interferométricas. En dichas estructuras se cumple que las longitudes de onda para las que se encuentran los máximos y mínimos de la reflectividad se relacionan de forma directa con los espesores y con los índices de refracción de las capas que las forman.

Los sistemas de sensado fotónicos se basan en la caracterización del desplazamiento del espectro del sensor en presencia del analito (virus, bacterias...) que se desea detectar. Dicho desplazamiento se debe a variaciones en el índice de refracción efectivo del sensor en presencia del comentado analito. Y es proporcional a la concentración de la sustancia a detectar. Para cuantificar dicho desplazamiento del espectro, se toma como referencia la posición de un máximo o mínimo de reflectividad en ausencia del analito a detectar.

Experimentalmente se cumple que las posiciones de dichos máximos y mínimos de reflectividad suelen estar desplazadas con respecto a los cálculos realizados teóricamente. Dichos desplazamientos se deben a desviaciones en el índice de refracción y en el espesor de las capas porosas presentes durante su proceso de fabricación.

Por otro lado, el espectrómetro utilizado para realizar la caracterización posee una alta sensibilidad en un intervalo muy restringido del espectro. Por lo tanto, resulta de interés disponer de la posibilidad de realizar desplazamientos espectrales en la señal reflejada por el sensor de forma controlada, trasladando de este modo un máximo o mínimo del espectro a la región que puede ser analizada por el espectrómetro. Esto puede conseguirse a partir de la variación del espesor de las comentadas capas porosas. Para ello, la vía que se estudiará en el presente Trabajo de Fin de Grado pasa por realizar la medida de caracterización incidiendo la luz sobre el sensor y recogiendo la señal reflejada con cierto ángulo.

Tanto por precio como por características, para la realización del sistema de control se utilizará una placa de desarrollo Arduino Uno. Ésta permite al usuario interactuar con el control de los motores paso a paso a través de una aplicación creada a partir del programa LabVIEW.

## ABSTRACT

---

This project aims at the design and development of an angular measurement system (goniometer) for the realization of the structure of photonic structures of sensors based on porous substrates in general, and in layers of porous silicon in particular. The project uses two stepper motors, one destination for the light source and another for the receiver, being able to control the position of each one independently from an application made in LabVIEW.

Both theoretically and experimentally, it has been proven that the most effective photonic sensors are those based on the measurement of the reflection of interferometric structures. That is, structures that are satisfied that the wavelengths for which they have the maxima and the minimums of reflection are directly related to the thicknesses and to the refractive indexes of the layers they form.

Photonic sensing systems are based on the characterization of the sensor spectrum shift in the presence of the analyte (viruses, bacteria ...) to be detected. Such displacement is due to variations in the effective refractive index of the sensor in presence of the said analyte.  $\Delta\lambda$  is proportional to the concentration of the substance to be detected. To quantify such shift of the spectrum, the position of a maximum or minimum of reflectivity in the absence of the analyte to be detected is taken as a reference.

Experimentally it is observed that the positions of the maximum and minimum studies of reflection are usually displaced with respect to the calculations realized theoretically. Such displacements are found to be deviations in the refractive index and in the thickness of the porous layers during their manufacturing process.

On the other hand, the spectrometer used to perform the characterization has a high sensitivity in a very narrow spectrum range. Therefore, it is of interest to provide the possibility of performing spectral shifts in the signal reflected by the sensor in a controlled manner, thus transferring a maximum or minimum of the spectrum to the region that can be analyzed by the spectrometer. This can be achieved by varying the thickness of the commented porous layers. In order to do this, the path studied in the present final grade work passes by to realize the measurement of the characterization that ignited the light on the sensor and that picked up the signal reflected with certain angle.

Both by price and features, for the realization of the control system an Arduino Uno development board is used. This allows the user to interact with the control of the motors step by step through an application created from the LabVIEW program.

# INDICE

---

1. INTRODUCCIÓN .....	6
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	9
3. DISEÑO Y DESARROLLO DEL GONIÓMETRO .....	10
3.1. Componentes para el diseño y desarrollo.....	10
3.1.1. Microcontrolador .....	10
3.1.2. LabVIEW .....	10
3.1.3. Motores paso a paso .....	11
3.1.4. Sensor de infrarrojos .....	16
3.1.5. Alimentación del proyecto .....	17
3.2. Cálculos y configuración previos .....	17
3.3. Montaje .....	19
3.4. Antes de la programación .....	20
3.5. Programación .....	21
3.5.1. Inicialización .....	21
3.5.2. Programa principal .....	22
4. MANUAL DE USUARIO.....	24
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	26
6. CONCLUSIÓN .....	30
7. POSIBLES MEJORAS .....	31
8. PLIEGO DE CONDICIONES .....	32
8.1. Motor paso a paso.....	32
8.2. Microcontrolador .....	32
8.3. Alimentación del sistema .....	32
8.4. Driver del motor. ....	32
8.5. Precauciones a la hora de manipular. ....	33
8.6. Normativa.....	33
9. PRESUPUESTO .....	34
9.1. Materiales para el diseño y desarrollo del goniómetro .....	34
9.2. Mano de obra.....	34
9.3. Presupuesto final.....	35
10. ANEXO- HOJAS DE CARACTERISTICAS .....	36

# 1. INTRODUCCIÓN

---

La principal aplicación de este proyecto se basa en la utilización de un sistema robotizado con dos motores paso a paso para poder ajustar el espesor óptico de estructuras fotónicas de sensado con una gran precisión angular. Dicho espesor óptico se define como el producto del espesor de la capa asociada al sensor por su índice de refracción. La manipulación se llevará a cabo a través de un programa sencillo de ordenador.

Los motores paso a paso serán encargados de ajustar la posición de la fuente de luz y del receptor de la señal reflejada en el sensor, con respecto a la línea imaginaria que cruza al sensor de forma perpendicular:

- Fuente de luz blanca: Está formado por una lámpara halógena de alto rendimiento. La luz es dirigida a través de una fibra óptica, que permite reducir así el calor generado y concentrar el haz de luz generado en el punto deseado. De esta forma se tiene una luz con una alta claridad, indispensable para realizar una medición con gran precisión con el espectrofotómetro.
- Espectrómetro: Es un instrumento óptico usado para la medición de las propiedades de la luz en un intervalo específico del espectro electromagnético. Con él se obtiene una representación de la amplitud de la señal reflejada sobre una superficie, en función de la longitud de onda. La eficiencia, resolución, sensibilidad y rango espectral, dependerán de las variables de diseño y los componentes ópticos con los que está fabricado. El rango espectral es el rango de espectro que puede llegar a medir el instrumento. Esta característica es muy importante para la selección de un tipo de espectrómetro. Ya que dependiendo del uso que le vayas a dar al equipo, se tendrá que elegir un rango específico. Pero la característica más importante en nuestro caso es su sensibilidad. Y es que durante las pruebas de sensado se estudiarán desplazamientos espectrales en ocasiones del orden de decenas de picómetros.

Los espectrómetros presentes en la mayoría de laboratorios poseen una alta sensibilidad a costa de analizar un rango espectral reducido.

En la actualidad, el grupo de Biofotónica del Centro de Tecnología Nanofotónica de Valencia está trabajando con sensores basados en capas de silicio poroso. Con respecto a los sensores tradicionales, tienen la ventaja de disponer de una alta proporción superficie – volumen. Lo que repercute en una mejora de la sensibilidad con respecto a un sensor tradicional. Las capas de silicio poroso se diseñan para disponer de un mínimo de reflectividad en una región del espectro determinada.

Por otro lado, estos sensores adolecen de tolerancias asociadas a su proceso de fabricación. Así, los índices de refracción y/o los espesores de las capas porosas varían con respecto a los estimados teóricamente. Estas variaciones son responsables de que el comentado mínimo de

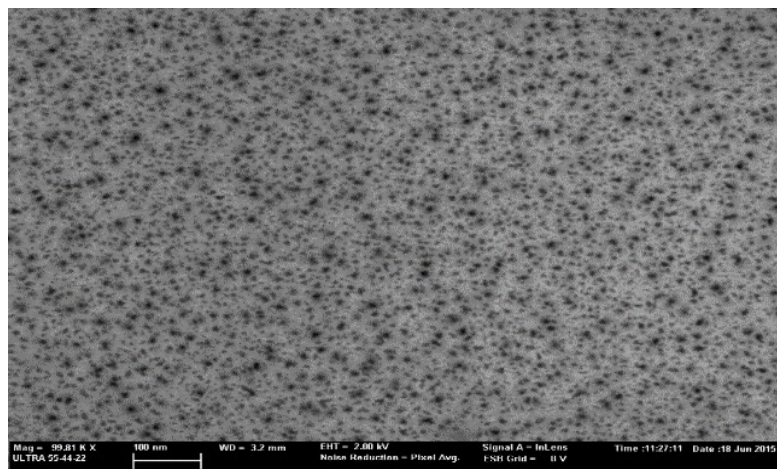
reflectividad se sitúe fuera de la región del espectro de interés. En este caso, el sensor no será útil para el fin con el que fue realizado.

Tratando de compensar este efecto, cabe la posibilidad de realizar la incidencia de la luz y el posterior análisis de la señal reflejada con cierto ángulo. Con respecto a una iluminación perpendicular a la superficie del sensor, al aumentar el ángulo de incidencia de la luz también lo hará el camino óptico que recorre ésta dentro del sensor. Y por lo tanto, se tendrá un desplazamiento del espectro hacia el rango infrarrojo. Dicho desplazamiento permitirá situar el mínimo de la reflectividad dentro del rango de medida del espectrómetro.

El silicio poroso está formado por un ataque electroquímico de Silicio (Si) en una solución de ácido fluorhídrico (HF). La estructura porosa dependerá de las condiciones asociadas al proceso de ataque (concentración de HF, temperatura), del dopado de la oblea de silicio, de la densidad de corriente y del voltaje. Por lo que dependiendo de estos factores, se obtendrán capas porosas con distintas características. Según el tamaño de los poros, se tendrán propiedades morfológicas, electrónicas y ópticas singulares.

Su gran superficie específica le proporciona una gran reactividad química. Además, su proceso de fabricación es sencillo. En este sentido, es posible realizar modificaciones en el tamaño y densidad de los poros, así como en los espesores de las capas. Por su biocompatibilidad, hacen de este substrato pueda emplearse en una gran cantidad de aplicaciones como: sensores de gas, biosensores para diagnosis médicos basados en las propiedades ópticas y de transporte, cristales fotónicos, células solares, filtros, microcavidades ópticas, redes de difracción, biocápsulas, implantes de hueso, retinas sintéticas, generación acústica térmicamente estimulada, microceldas de combustibles, MEMs, MOEMs, NEMs, reflector de Bragg y detonadores.

Como se puede apreciar en esta imagen superficial del silicio poroso obtenida por un microscopio electrónico (Fig.1) la uniformidad de los poros es mejorable. De ahí la necesidad de utilizar el goniómetro. Para tratar de compensar errores de fabricación.

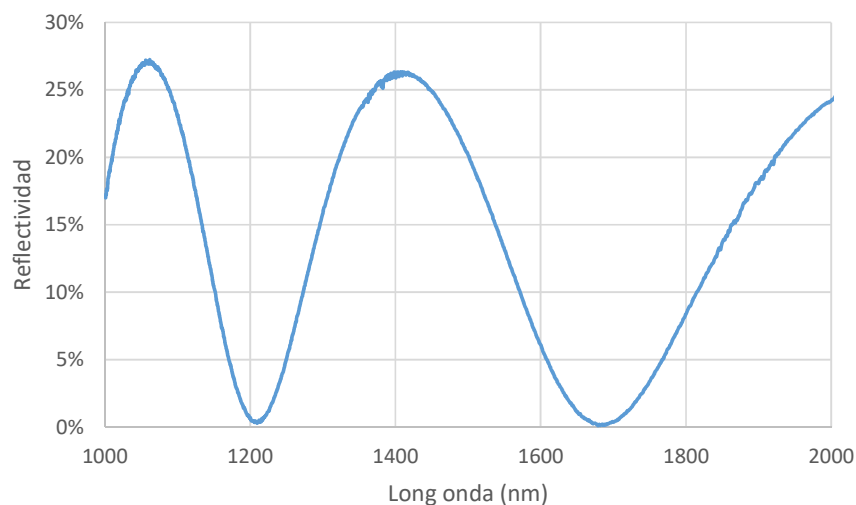


**Fig.1: Imagen superficial de una capa de silicio poroso, obtenida mediante microscopía electrónica de barrido.**

Por tanto, mediante el uso de dos motores paso a paso, se realizará una medida de la reflectividad de estas estructuras interferométricas. En estas estructuras formadas en el silicio poroso se cumple que existe una relación de forma directa entre las longitudes de onda, para las que se tienen máximos y mínimos de la reflectividad, y los espesores e índices de refracción de las capas que los forman (Fig.2). Experimentalmente las posiciones de los máximos y los mínimos de reflectividad se encuentran desplazadas respecto a los cálculos teóricos. Estos desplazamientos se deben desviaciones en el índice de refracción y en el espesor de las capas porosas producidas durante el proceso de fabricación.

Para la medición de este tipo de sensores se utilizara un espectrómetro. Éste posee una alta sensibilidad pero solo para un rango del espectro muy definido. Por lo tanto, resulta de interés disponer de la posibilidad de realizar desplazamientos espectrales en la señal reflejada por el sensor de forma controlada. Este objetivo puede llegar a conseguirse variando el espesor de la capa del silicio poroso. Mediante la incidencia angular, podremos variar el espesor óptico del sensor y ajustarla para que al menos uno de los mínimos de reflectividad se encuentren en el rango de medición del espectrómetro.

Esta aplicación se realizará con el programa de ordenador LabVIEW, con el cual se controlará los motores paso a paso a través de una placa de Arduino UNO.



**Fig. 2:** Reflectividad de un interferómetro realizado con una capa de silicio poroso.



## 2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

---

El objetivo principal del proyecto es el diseño de un programa de LabVIEW capaz de desplazar angularmente la fibra óptica asociada al espectrómetro y la presente en la fuente de luz, a la posición introducida en la aplicación. También se realizara su diseño electrónico exterior con el cual se comunicara con el ordenador a través de un conector USB presente en la placa Arduino UNO. Una vez diseñado todo, posteriormente se construirá para posteriormente darle un uso científico.

Objetivos del proyecto:

1. **Diseño** de un programa sencillo, capaz de ser manejado sin necesidad de conocimientos del sistema en sí.
2. **Electrónica y motores paso a paso.** Selección de los instrumentos más óptimos para la realización de la aplicación de forma correcta.
3. **Precisión angular.** Diseño del programa y de la electrónica con tal de conseguir una resolución angular inferior a  $0.2^\circ$ .
4. **Comprobación y seguridad.** Realizar las suficientes comprobaciones en el programa al iniciar para garantizar la precisión del goniómetro y hacer una evaluación real por tal de comprobar el correcto funcionamiento del mismo.

## 3. DISEÑO Y DESARROLLO DEL GONIÓMETRO

---

### 3.1. Componentes para el diseño y desarrollo

#### 3.1.1. Microcontrolador

La primera necesidad en el proyecto es un microcontrolador con el cual seamos capaces de realizar un control desde del ordenador de los dos motores paso a paso mediante una comunicación USB normalizada. Y con el cual podamos conectar las distintas entradas y salidas que vamos a utilizar, y se detallan a continuación.

El microcontrolador que se va a utilizar es Arduino UNO. Arduino UNO es el microcontrolador de placa simple más vendido en el mundo por su precio económico y por las prestaciones que proporciona. Arduino posee un lenguaje de programación propio, basado en el lenguaje de programación de alto nivel Processing que es muy similar a C++, y utiliza un entorno de desarrollo integrado libre que se puede descargar completamente gratis en la web de la empresa. Al ser una herramienta muy utilizada, hay una gran variedad de formas de autoaprendizaje online, así como tutoriales, guías, etc. Además, existen toolkits con los cuales podemos enlazar LabVIEW y Arduino haciendo que la placa nos sirva como tabla de adquisición de datos y una forma de control por pasos del motor. Y de esta manera hacer más sencilla la tarea de programación de la interfaz gráfica.

Arduino UNO dispone de 14 pines que pueden configurarse como entrada o salida y a los que puede conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales digitales de 0 y 5 V.

También dispone de entradas y salidas analógicas. Mediante las entradas analógicas podemos obtener datos de sensores en forma de variaciones continuas de un voltaje. Las salidas analógicas suelen utilizarse para enviar señales de control en forma de señales PWM.

#### 3.1.2. LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas de pruebas control y medidas. Lo que hace distinto a LabVIEW de otros programas es su entorno de programación totalmente gráfico llamado lenguaje G. Este lenguaje se basa en la utilización de iconos, terminales y cables en lugar de texto para ayudar a programar de una manera fácil y sencilla. En resumen, el código se basa en la interconexión de bloques funcionales similar a un diagrama de flujo.

Los programas de LabVIEW son llamados instrumentos virtuales o VIs ya que su apariencia y operación imitan a los instrumentos físicos, como osciloscopios y multímetros. LabVIEW

contiene una extensa variedad de herramientas para adquirir, analizar, visualizar y almacenar datos, así como herramientas para ayudarle a solucionar problemas en el código que escriba.

Cuando crea un nuevo VI, ve dos ventanas: la ventana del panel frontal y el diagrama de bloques.

El panel frontal es la interfaz la cual el usuario podrá manejar una vez el programa está en ejecución. Este panel se configura a través de indicadores y controles, donde los primeros serán salidas de la interfaz y los segundos serán las entradas. En esta interfaz se podrán observar los datos actualizados a tiempo real.

El diagrama de bloques es el código fuente de la VI. Es donde se realiza el programa del VI que permite controlar o realizar cualquier función con las entradas y salidas que se crearon en el panel frontal. Este programa es creado a partir del lenguaje G, unos bloques que incluyen las funciones y las estructuras que se encuentran dentro de las librerías de LabVIEW. Al crear un control o un indicador en el panel frontal se crea simultáneamente un terminal en el diagrama de bloques que servirá para intercambiar información entre el panel frontal y diagrama de bloques. Por otro lado se encuentran las subVIs, son VIs dentro de la VI que estas programando. Los terminales, subVIs, funciones, constantes y estructuras se comunicaran entre sí con la conexión a través de cables.

### 3.1.3. Motores paso a paso

La parte principal del proyecto no se podría hacer sin la utilización de motores paso a paso. Los motores paso a paso son los motores con los cuales se puede saber en que posición se encuentra exactamente con más facilidad. Ya que con los motores de corriente continua resulta complicado saber cuánta distancia se ha movido porque no tiene ningún tipo de realimentación que lo verifique. La única opción sería con sensores en forma de control ya sea un sensor de efecto Hall y un imán en la estructura fotónica, o realizar una especie de encoder, pero estas opciones resultarían más caras y más difíciles de implementar correctamente.

Los motores paso a paso son unos dispositivos electromecánicos que a través de pulsos eléctricos se desplaza el rotor cierta distancia angular. Son ideales para movimientos angulares en los cuales se necesita de gran precisión. Lo bueno de este motor para el proyecto es que se puede controlar fácilmente realizando los pulsos eléctricos desde Arduino.

Este tipo de motores presentan una gran cantidad de ventajas y algunos inconvenientes.

Como ventajas tenemos:

- Control de la velocidad y la posición. Desde la placa Arduino podemos controlar donde debe moverse el motor y a qué velocidad se desea que se realice el movimiento. Con el programa realizado se podrá controlar a la posición exacta a la que quieres estar.

Además, se puede controlar la aceleración y la frenada del motor y controlar su inercia para que movimientos sean suaves.

- Se mantienen fijos al estar parados. Mientras permanezca con corriente en las bobinas el motor mantendrá su posición, por tanto, mantendrá las estructuras fotónicas en la posición introducida por el usuario en el programa.
- Máxima torque cuando arranca. Cuando el motor pasa de estado de reposo a movimiento es en el momento en el que posee mayor fuerza.

Y como desventajas están:

- Poca eficiencia energética. Al igual que los motores de continua, están formados por dos partes: estator que es la parte fija del motor y el rotor la parte móvil. Dependiendo del tipo de motor se comportan de distinta manera.
- Lentitud. La velocidad del motor es limitada ya tienes que configurar el tiempo por paso para que no llega a saltarse ninguno y perdamos la precisión que es lo que en verdad queremos en el sistema. Cuanto más paso por vuelta tenga el motor más tiempo necesitara para dar una vuelta completa por tanto cuanto mayor precisión mayor lentitud.
- Pierde fuerza a altas velocidades. Al contrario que con la ventaja presentada antes, cuanto más rápido vaya el motor menos fuerza poseerá.
- Feedback. El motor no posee ningún tipo de retroalimentación en la cual informe de la posición que tiene en cada momento solo puede comprobarse mediante una serie de inicialización del programa en la cual se moverá el motor a una posición conocida.

Existen tres tipos de motores paso a paso:

- Motor paso a paso de reluctancia variable. Posee un rotor multipolar de hierro dulce y un estator devanado. El movimiento de este motor se produce cuando el rotor es atraído a los dientes del estator por sus bobinas cargadas eléctricamente. Este motor tiene una respuesta rápida y una inercia de carga pequeña, además cuando los devanados no poseen ninguna carga eléctrica el par estático del motor es cero. Los pasos de este tipo de motor son muy grandes, de la orden de 15º, por tanto ninguna de sus características principales son las más convenientes para este proyecto.
- Motor paso a paso de rotor de imán permanente. Este tipo de motor como el nombre indica el rotor está formado por un imán permanente y el estator por una serie de bobinas enrolladas alrededor de un núcleo. Como características distintivas del motor de reluctancia variable es que posee par estático distinto de cero y que alcanza velocidades más pequeñas, y además, se puede alcanzar resoluciones del orden 7.5º.
- Motor paso a paso híbrido. Son los más usados y es una combinación de los dos motores anteriormente mencionados, constituido por un rotor hecho de anillos de acero dulce dentado en un número distinto al del estator y estos anillos se encuentran encima de un imán permanente colocado axialmente. Estos motores son característicos por su gran precisión y gran par de fuerza.

Después se diferencian en otros dos tipos según la disposición de las bobinas y el número de ellas en el estator:

- Unipolares. Depende de la conexión interna puede tener 5, 6 o 8 cables de salida. Dentro tienen dos pares de bobinas en el estator. Y de cada par una bobina se magnetizara hacia el polo norte, y otra hacia el polo sur. Este tipo de motor son los más sencillos de programar, más baratos, menos potentes y los que poseen los drivers para manejarlos más sencillos y, por lo tanto, más baratos.
- Bipolares. Estos tipos de motores tienen siempre 4 cables de salida y en el estator poseen tan solo dos bobinas. El funcionamiento se basa en la polarización de las bobinas para crear un campo magnético de forma que cuando vaya en una dirección en concreto tendrá un campo magnético norte-sur y al invertir la corriente, el campo magnético cambiara a sur-norte. Debido a este cambio de polaridad los drivers resultan más complejos de realizar. Existen una gran variedad de drivers para este tipo de motores y, además, algunos tienen la función de realizar microstepping en el motor paso a paso.

Microstepping es una técnica utilizada para conseguir mayor precisión con un motor paso a paso. Esta técnica se basa en no dar el 100% de la corriente necesaria para dar un paso y dar un micropasos que pueden ser de 1/2 hasta de 1/32. Es decir, dividir esta corriente completa en impulsos parciales u ondas escalonadas tales que puedan dividir los pasos. Los únicos motores en los cuales se puede llegar a utilizar esta técnica son los motores de imán permanente e híbridos y tan solo los bipolares. En caso de ser un motor de 1.8° de resolución podría cambiarse a una de 0.05625° si se utiliza un microstepping de 1/32.

Por tanto, a la hora de elegir un motor paso a paso se recoge prioritariamente un motor híbrido. Estos son los que poseen mejor par y sobretodo, el aspecto más importante, mayor precisión. Otro aspecto considerado en la elección es que este tipo de motores tienen un par estático distinto de cero por lo que podremos mantener la carga en la posición que deseemos durante la ejecución del programa.

Dentro del tipo de motor según las bobinas del estator elegiremos un motor bipolar con el que podremos hacer uso de los drivers que permiten realizar microstepping y llegar a tener mayor precisión en el proyecto.

Los aspectos generales a considerar a la hora de elección de dos motores convenientes para la realización del goniómetro:

1. Número de pasos por vuelta. Los pasos por vuelta son el número de pasos necesarios para completar una vuelta completa. La precisión es el aspecto de mayor importancia en nuestro proyecto debido a esto buscamos es un paso menor a 0.2°. Normalmente, suelen tener 200 pasos por vuelta por lo cual tiene un paso de 1.8° el motor ya que 200 pasos que tardas en dar una vuelta dividido entre 360° que son los grados necesarios para dar una vuelta completa nos da este ángulo por paso.

2. Holding torque o par motor. Es la fuerza que el motor ejerce para mantenerse en un paso. Se mide en  $N \cdot m$  o  $N \cdot cm$ . Nuestro proyecto, al tener el emisor y el receptor de luz asociados a dos fibras ópticas, no necesitara de un gran par motor para realizar las operaciones. Por tanto, con un par motor de  $9.8 N \cdot cm$  se tendrá suficiente fuerza para realizar el proyecto.
3. Voltaje. Seleccionar un motor el cual podamos alimentar en el rango de alimentación del driver elegido, ya que cada driver tiene un rango en el cual se puede conectar la alimentación, y el cual tengamos más facilidades de proporcionar la alimentación al motor. La potencia del motor se calibrara con un potenciador que dispone el driver.
4. Microstepping. Debemos elegir un motor que se pueda adaptar al uso de drivers que puedan usar microstepping. También hay que tener en cuenta que cuando utilizas este tipo de técnicas se pierde torque y fuerza a cambio de precisión. Con los siguientes drivers configurados a máxima resolución obtendríamos con el A4988 16 micropasos y con el DRV8825 32 micropasos.
5. Tamaño del motor (NEMA). NEMA es el acrónimo de National Electrical Manufacturers Association. Los motores se clasifican por tamaño y se indica colocando un número después de la palabra NEMA, por ejemplo, NEMA17 indica que el motor mide  $1.7 \times 1.7$  pulgadas. En general, más tamaño significa más torque pero no tiene que ser así siempre. En este proyecto el tamaño del motor no tiene mayor importancia ya que el motor va a permanecer inmóvil en un sitio fijo. El único aspecto que podría ser importante del tamaño es el calor ya que al ser de mayor tamaño el calor se disipara de mejor manera y se calentara menos.
6. Resistencia. Todos los motores paso a paso tienen una resistencia interna y dependiendo de ella el motor puede que no le llegue la suficiente corriente para su movimiento y, además, cuanto mayor sea la resistencia mayor será el calor en el motor.
7. Corriente. Es importante que la corriente no sea muy alta debido al uso excesivo de energía innecesaria ya que los motores paso a paso consumen la misma corriente cuando están en movimiento que cuando están en reposo.

Primero tendremos que elegir el driver para posteriormente elegir el motor. La introducción de un driver a cada motor en este proyecto es muy importante, ya que el Arduino no es capaz de suministrar la tensión ni la corriente necesaria a los motores. Por tanto, se utilizará estos drivers con el fin de actuar como válvula de corriente entre el motor y el Arduino. El driver que se ha elegido es el driver A4988, que permite realizar 16 micropasos en el motor bipolar, debido que aunque el driver DRV8825 nos permita realizar el doble de micropasos la empresa no lo tenía existencias de este producto en stock. Por tanto por la tardanza hasta el envío del producto se eligió el drive A4988.

El driver A4988 es el más popular del mercado de drivers debido a la sencillez de utilización. Es una placa pequeña que tiene a cada lado 8 pines, en un lado la parte digital y en otro lado

la alimentación del motor y del driver. Además, contiene un potenciómetro con el cual se regula la corriente máxima que puede circular por las bobinas del motor.

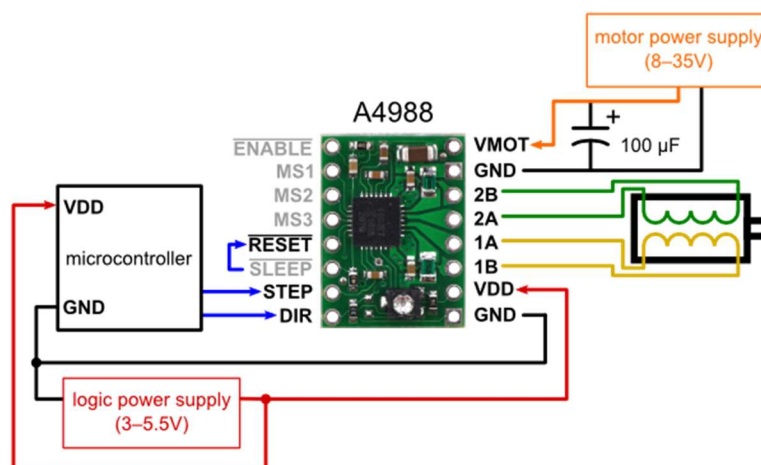
Este driver tiene un voltaje de operación de rango entre 8 V y 35 V, con esta alimentación se suministrara la corriente a las bobinas del motor. Tiene una corriente máxima de salida por bobina de 2 A por lo tanto el motor tiene que tener un valor de corriente del mismo para que funcione el driver. Además, el driver posee una protección contra cortocircuito, una protección contra exceso de corriente en las bobinas del motor para que no sobrepase de 2.1 A y un autoapagado para cuando la temperatura del sistema es mayor a 165 °C.

En la parte digital (Fig.3) nos encontramos con los siguientes pines:

- ENABLE: Para permitir el paso o no de corriente a las bobinas del motor.
- MS1, MS2 y MS3: Configuración de los micropasos.
- RESET: Conectar a SLEEP para que funcione.
- SLEEP: Conectar a RESET para que funcione.
- STEP: Por cada pulso recibido el motor dará un paso.
- DIR: Configura la dirección a la cual se mueve el motor.

En la parte de alimentación del motor y del driver (Fig.3) se encuentran los siguientes pines:

- VMOT: Alimentación de los motores (Rango entre 8V y 35V).
- GND: Conexión a tierra de los motores.
- 2A y 2B: Bobina 2.
- 1A y 1B: Bobina 1.
- VDD: Alimentación de la parte digital (5V).
- GND: Conexión a tierra de la parte digital.



**Fig.3: Diagrama de conexiones entre el microcontrolador y el driver A4988**

Como vemos en la tabla (Fig.4) dependiente de como alimentemos los pines digitales de MS1, MS2 y MS3 tendremos un tipo diferente de micropasos que pueden ser de pasos completos, de medio paso, de un cuarto de paso, de un octavo de paso y de un dieciseisavo de paso.

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	Quarter step
High	High	Low	Eighth step
High	High	High	Sixteenth step

**Fig.4: Relación entre los pines digitales MS1, MS2 y MS3 y el microstepping.**

Por tanto, como motor paso a paso escogeremos un motor bipolar e híbrido con un holding torque mayor a 9.8 N\*cm. Generalmente, casi todos los motores paso a paso, a no ser que le incorpores una reductora, tienen 1.8º de paso.

El motor que se ha escogido es el motor bipolar e híbrido de la marca Sparkfun modelo SM-42BYG011-25, el cual tiene como holding torque 0.23 N.M que tendrá fuerza de sobra para ejecutar todas las acciones del proyecto, incluso cuando se está realizando microstepping que se pierde un poco de este par motor. Como resistencia interna tendremos una de 34 Ω por lo que el motor no tendría que calentarse mucho al estar en funcionamiento. De voltaje de alimentación tendría 12 V y de corriente 0.33 A por lo que entra dentro del rango que el driver puede manejar. Este motor posee un ángulo por paso de 1.8º pero debido a los micropasos se dividirán por 16 llegando a tener un ángulo por paso de 0.1125º con el cual llegaremos a las especificaciones del proyecto.

#### 3.1.4. Sensor de infrarrojos

El goniómetro, al tener que utilizar motores paso a paso, necesita de un sistema de sensores que identifiquen inicialmente el ángulo del motor sin perturbar su movimiento. Por tanto la mejor opción es un sencillo sensor de infrarrojos utilizado de forma digital. O sea, mediante la inclusión de este tipo de sensores se enviara a placa de Arduino un valor digital alto cuando detecte la refracción del haz de luz en las estructuras fotónicas.

El sensor de infrarrojos a utilizar es el dispositivo CNY70. CNY70 es un sensor óptico infrarrojo, de corto alcance (< 5cm) con el cual se puede detectar colores de objetos y superficies. Su funcionamiento es sencillo, está formado por un fotodiodo que emite radiación infrarroja y un fototransistor que actúa como receptor. El fotodiodo emite un haz de radiación infrarroja y el fototransistor recibe ese haz una vez se ha reflejado en el objeto.



La aplicación de este sensor en el proyecto será en la inicialización, donde los motores se moverán hasta que el sensor los detecte. La posición de estos sensores serán cuidadosamente colocados en el ángulo de 90°, de forma que cuando detecte el Arduino un valor alto en palabra digital en este sensor, el programa ya sepa un ángulo conocido donde se encuentra el motor.

### 3.1.5. Alimentación del proyecto

La alimentación de los motores se lleva a cabo a través de una fuente de alimentación DC de 12V y 1.5 A. La corriente de 1.5 A se debe que a la hora de la prueba de los motores se comprobó que el consumo no es el especificado por el fabricante sino superior. El consumo máximo de cada motor es de 0.6 A y el que incluye el fabricante en la hoja de características es de 0.33 A. Debido a esto se selecciona una fuente de alimentación de 1.5 A ya que, aunque se podría escoger una con un poco menor valor de corriente como de 1.2 A, se considera una tolerancia de un 20% asociado a posibles picos de corriente.

Además, también se tiene que alimentar todos los sensores de infrarrojos que utilizan un voltaje de 5 V. Por tanto, mediante el uso de un regulador 7805, se conseguirá tener a partir de la fuente de alimentación de 12 V, un voltaje de 5 V con una corriente máxima de 1 A. A través de este regulador se podrán alimentar todos los sensores, que consume cada uno una corriente máxima de 50 mA.

Respecto a la alimentación del Arduino UNO se llevara a cabo a través de la misma conexión USB del PC, de modo que, no hay necesidad de otro tipo de alimentación.

## 3.2. Cálculos y configuración previos

Una forma de maximizar el rendimiento del motor paso a paso es utilizar la tensión más alta posible para su aplicación. En particular, el aumento de la tensión en general, permite velocidades de paso más altas y par motor ya que la corriente puede cambiar más rápidamente en las bobinas después de cada paso. Sin embargo, con el fin de utilizar con seguridad tensiones superiores a la tensión nominal de nuestro motor paso a paso, que en nuestro caso el motor paso a paso es de 12 V, la corriente de la bobina debe estar limitada de forma activa para que no se exceda la corriente nominal del motor.

El driver A4988 es compatible con este tipo de corriente limitante, y el potenciómetro de ajuste en la placa se puede utilizar para establecer el límite de corriente. Una forma de establecer el límite de corriente es poner el controlador en el modo de paso completo y medir la ejecución actual a través de una sola bobina del motor mientras se ajusta el potenciómetro límite de corriente. Esto debe hacerse con el motor que sostiene una posición fija (es decir, sin clocking en la entrada STEP). Teniendo en cuenta que la corriente que se está midiendo es

solamente el 70% del ajuste del límite de corriente real, ya que ambas bobinas están siempre encendidas y limitadas a este valor en el modo de paso completo, por lo que si se habilita posteriormente modos microstepping, la corriente a través de las bobinas habrá capaz de superar esta corriente-paso completo medido por 40% (1 / 0,7) en ciertos pasos.

Otra forma de ajustar el límite de corriente, que es la forma que vamos a utilizar, es calcular el voltaje de referencia que corresponde al límite de corriente deseado y luego ajustar el potenciómetro de límite de corriente hasta medir ese voltaje en el pin VREF. El voltaje de la clavija VREF es accesible en una vía que está rodeada en la serigrafía inferior de la placa de circuito. El límite de corriente,  $I_{max}$ , se refiere al voltaje de referencia como sigue:

$$I_{max} = \frac{V_{REF}}{8 \times R_{CS}}$$

$$V_{REF} = 8 \times I_{max} \times R_{CS}$$

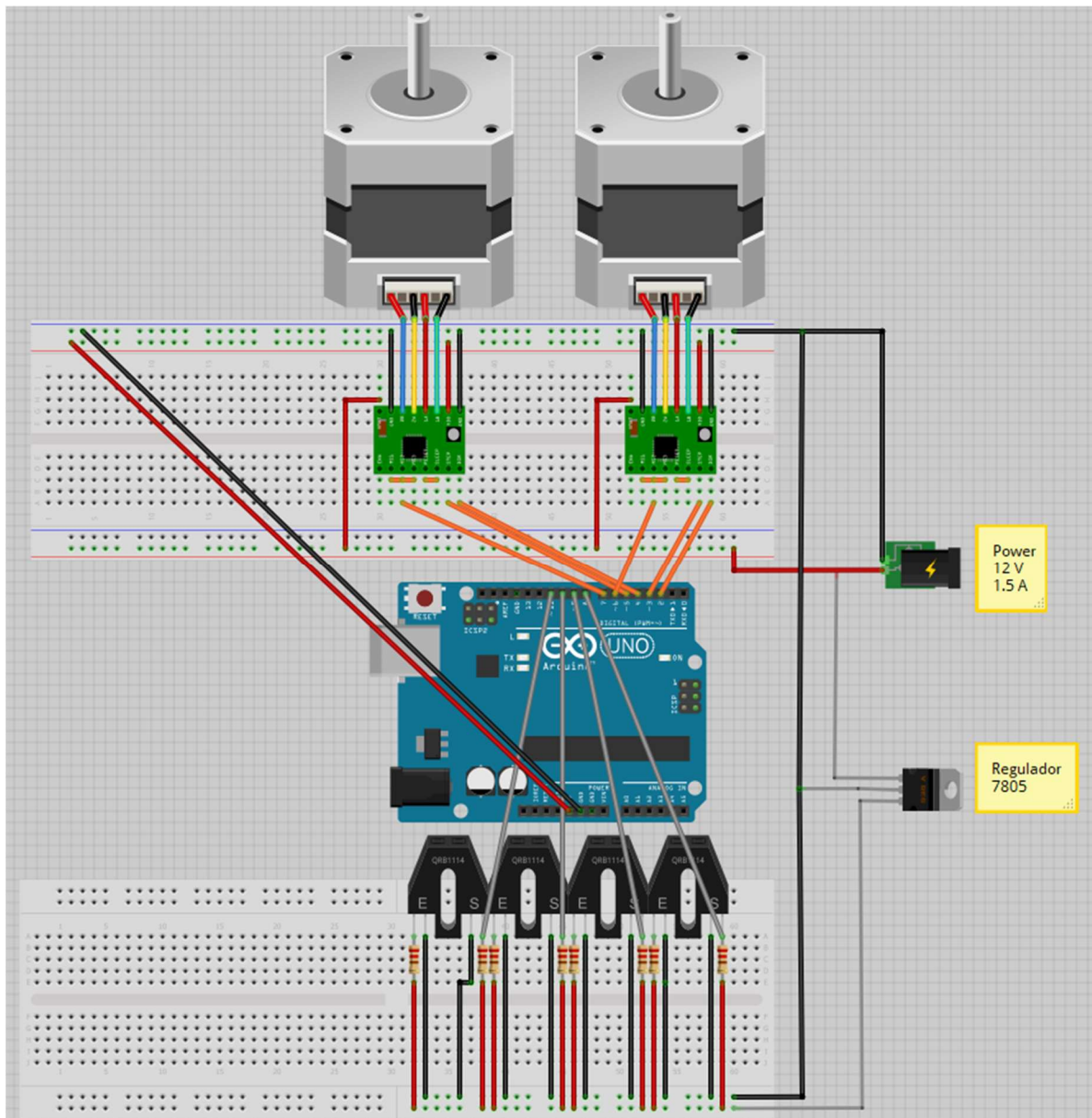
El valor de  $R_{CS}$  se viene dado por el fabricante y según el modelo varía. En este caso  $R_{CS}$  es  $0.05\Omega$ . La corriente necesaria para mover el motor es de 0.33 A. Por tanto,  $I_{max}$  es 0.33 A.

Por lo tanto, habrá que configurar la tensión de referencia del motor mediante el potenciómetro (Fig.3) a:

$$V_{REF} = 8 \times 0.33 \times 0.05 = 0.132 V$$

### 3.3. Montaje

El montaje del goniómetro y sus distintas partes será el mostrado en la siguiente imagen (Fig.5).



**Fig.5: Montaje del goniómetro con todas sus partes.**

Primero se conectarán todos los pines del Arduino en la parte digital (Fig.5) en cada pin se conectará:

- Pin 2: Dirección del motor de la fuente de luz blanca. Puerto DIR del driver.
- Pin 3: Paso del motor de la fuente de luz blanca. Puerto STEP del driver.
- Pin 4: Dirección del motor del espectrómetro. Puerto DIR del driver.

- Pin 5: Paso del motor del espectrómetro. Puerto STEP del driver.
- Pin 6: Cambio entre micropasos y pasos normales en el motor de la fuente de luz blanca. Puerto MS1, MS2 y MS3 los cuales están conectados entre si.
- Pin 7: Cambio entre micropasos y pasos normales en el motor del espectrómetro. Puerto MS1, MS2 y MS3 los cuales están conectados entre si.
- Pin 8, 9, 10 y 11: CNY70 sensor infrarrojo. Conectado en el emisor del fototransistor.

Los cables naranjas (Fig.5) representan las conexiones digitales de los drivers y las conexiones grises representan las conexiones con los sensores infrarrojos. La conexión entre los puertos del driver se debe a que se alternara el modo 16 micropasos con el modo paso completo dependiendo de las necesidades del programa.

En la conexión de la parte alimentación del motor y del driver (Fig.5) tenemos:

- Puerto VMOT: Donde se conectara la fuente de alimentación de 12 V y 1.5 A.
- Puertos GND: Conectados a tierra (ground).
- Puerto VDD: Conectado con la tensión del Arduino.
- Puertos 1A y 1B: Donde irán conectados los dos bornes de la primera bobina del motor. En el circuito se representan con los colores rojo y verde, respectivamente.
- Puertos 2A y 2B: Donde irán conectados los dos bornes de la segunda bobina del motor. En el circuito se representan con los colores amarillo y azul, respectivamente.

En el circuito de cada sensor infrarrojo (Fig.5) se conectara dos resistencias de modo que actue como un sensor digital. El sensor enviara un valor alto al Arduino, cuando detecte el paso del motor por el ángulo especificado, y enviara un valor bajo cuando no detecte nada. Estas resistencias serán de  $330\Omega$ , que estará conectada al ánodo del fotodiodo, y de  $47k\Omega$ , conectada en el colector del fototransistor. Todos estos sensores estarán conectados a un regulador 7805 que le proporcionara un voltaje de 5 V necesario para su alimentación. Este regulador a la vez estará conectado con la fuente de alimentación de 12 V y 1.5 A.

Por último, se colocaran unos soportes de 5 mm de diámetro en los ejes del motor. En estos soportes se colocaran de forma precisa las fibras ópticas del espectrómetro y la fuente de luz blanca.

### 3.4. Antes de la programación

Antes de empezar con la programación hay que instalar en el programa de LabVIEW el toolkit llamado LabVIEW Interface For Arduino (LIFA). Éste nos permitirá realizar una programación mucho más sencilla y el cual convertirá cualquier acción realizada en el programa en una orden para realizar en el Arduino sin necesidad de realizar un programa en el mismo. Tan solo con un archivo de programación que viene en la propia carpeta del toolkit llamado LIFA\_BASE hay que compilar y subirlo a la placa de Arduino UNO. También, es necesaria la instalación del driver de National Instruments llamado Virtual Instrument Software Architecture (VISA) con

el cual permitirá el ordenador a LabVIEW tener una conexión con Arduino e intercambiar información a través del USB. Ya que VISA es un API de alto nivel utilizado para comunicarse con buses de instrumentación.

## 3.5. Programación

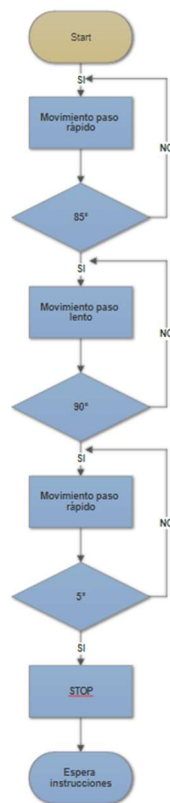
### 3.5.1. Inicialización

A continuación se va a explicar el planteamiento que se ha llevado a cabo para llegar a realizar la programación en LabVIEW del goniómetro. En este sentido, la figura 5 muestra el flujograma asociado a la rutina de iniciación.

Como se puede ver en este flujograma (Fig.6), que indica la inicialización del programa antes de entrar al bucle principal donde el usuario introducirá el ángulo al que las estructuras fotónicas se muevan.

El primer paso se realizara en la inicialización será un movimiento utilizando pasos completos ( $1.8^\circ$ ), poniendo a valor bajo los puertos MS1, MS2 y MS3 del driver. Los motores no pararan de dar pasos completos hasta encontrarse con un fotodiodo que estará colocado en  $85^\circ$ . Una vez llegado a  $85^\circ$  se los motores pasaran a moverse con micropasos ( $0.1125^\circ$ ), activando en valor alto los puertos MS1, MS2 y MS3 del driver. Esta vez los motores se pararan cuando lleguen al fotodiodo colocado de modo muy preciso en  $90^\circ$ . Este parte del programa es muy importante debido a que sirve al programa para tener conocimiento de la posición del motor, y así poder luego moverlo a la posición que desee el usuario.

Después, los motores darán pasos completos hasta llegar a  $5.4^\circ$ . Este movimiento se realiza con el objetivo de acercar a un ángulo cercano donde suele operar este tipo de estructuras fotónicas.



**Fig.6: Flujograma de la inicialización del programa**

### 3.5.2. Programa principal

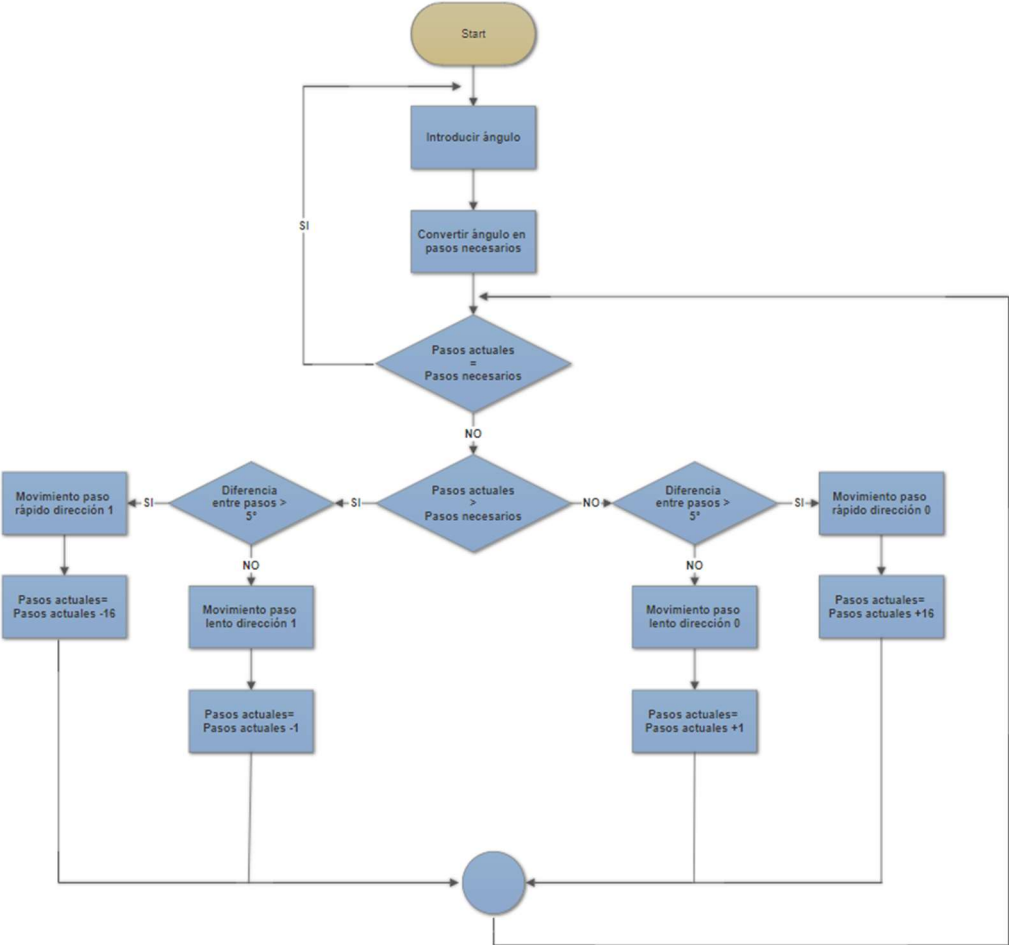
Una vez finalizado el proceso de inicialización el programa estará a la espera de las instrucciones que el usuario indique en la interfaz de usuario.

Ahora entra a en la parte principal del programa (Fig.7), el bucle infinito. En esta parte el usuario introducirá el ángulo que quiere que el motor se dirija y una vez introducido se convertirá este ángulo en pasos. La conversión es la división del ángulo por el mínimo paso que puede realizar el motor,  $0.1125^\circ$  en este caso.

Después, se compara los si los pasos adquiridos por el usuario son iguales con los pasos donde se encuentra actualmente el motor en caso de que sean volverá a la lo posición inicial a la espera de introducir otro ángulo. Pero si son diferentes se volverán a comparar para ver cual se encuentra en una mayor posición. Este paso se realiza para saber la dirección a la que hay que configurar el motor paso a paso.

Finalmente, se comprobara si la diferencia de pasos es mayor a  $5^\circ$ . Si es mayor el motor realizara un paso completo ( $1.8^\circ$ ), desactivando el pin de micropasos. Y si es menor el motor realizara tan solo un micropasos ( $0.1125^\circ$ ), activando el pin de micropasos. Dependiendo del uso de los micropasos o no se realizara una actualización de los pasos actuales en el que se encuentra el motor actualmente. Se sumara o restara dependiendo de la dirección y será 16 en caso de paso completo y 1 si es utilizando micropasos.

Por último, se volverá a comparar si los pasos actuales del motor y los pasos introducidos por el usuario y, así, comenzara de nuevo el ciclo.



**Fig.7: Flujograma del programa principal.**

## 4. MANUAL DE USUARIO

---

Como se puede ver (Fig.8) es una interfaz de usuario sencilla con la cual controlaremos los dos motores, el encargado para mover la fuente de luz blanca y el encargado de mover el espectrofotómetro.

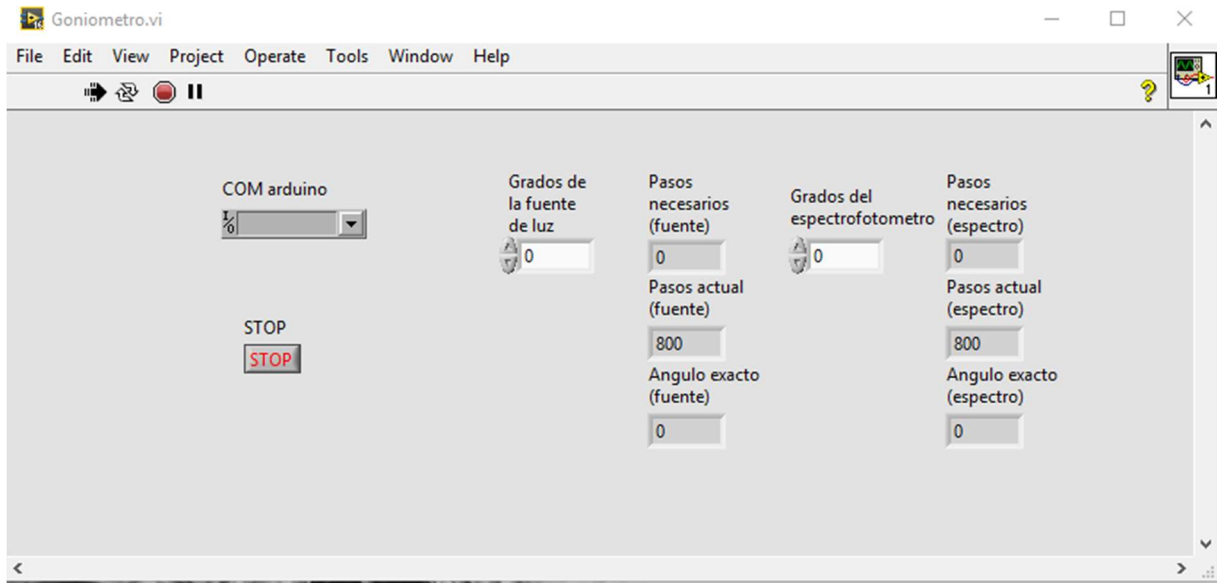
Como primer paso antes de realizar ninguna acción, el usuario deberá seleccionar el puerto COM donde se encuentra conectado la placa Arduino mediante USB. De forma que al introducir el puerto se inicializara el programa realizando la parte de inicialización, en la cual realizara los movimientos de los fotodiodos hasta una posición conocida para el programa mediante la utilización de los fotodiodos. Posteriormente, se moverá a una posición cercana a donde suele operar estos tipos de equipos de medición.

Una vez terminada la inicialización se podrá introducir el ángulo que deseas que se coloque la fuente o el espectrómetro. Estos ángulos se introducirán en los controladores llamados “Grados de la fuente de luz” y “Grados del espectrofotómetro”, respectivamente. Cuando empiece a moverse los motores al ángulo que has seleccionado se mostraran en los paneles de la derecha la siguiente información:

- Pasos necesarios: Posición, contada por pasos de  $0.1125^\circ$ , la cual el motor se tiene que mover para llegar al ángulo elegido por el usuario.
- Pasos actual: Posición, contada por pasos de  $0.1125^\circ$ , la cual se encuentra el motor actualmente.
- Ángulo exacto: Ángulo exacto al que se va mover el motor. Debido a que el sistema tiene un paso mínimo de  $0.01125^\circ$  no puede moverse a un ángulo introducido a no ser que sea un múltiplo de este paso mismo. Por tanto, aproxima el ángulo del motor a una posición que pueda alcanzar.

Después, como último, encontraremos el botón STOP con el cual pararemos el sistema de inmediato, en caso de querer realizar un paro inminente a causa de algún problema en el sistema.





**Fig.8: Interfaz de usuario del goniómetro.**

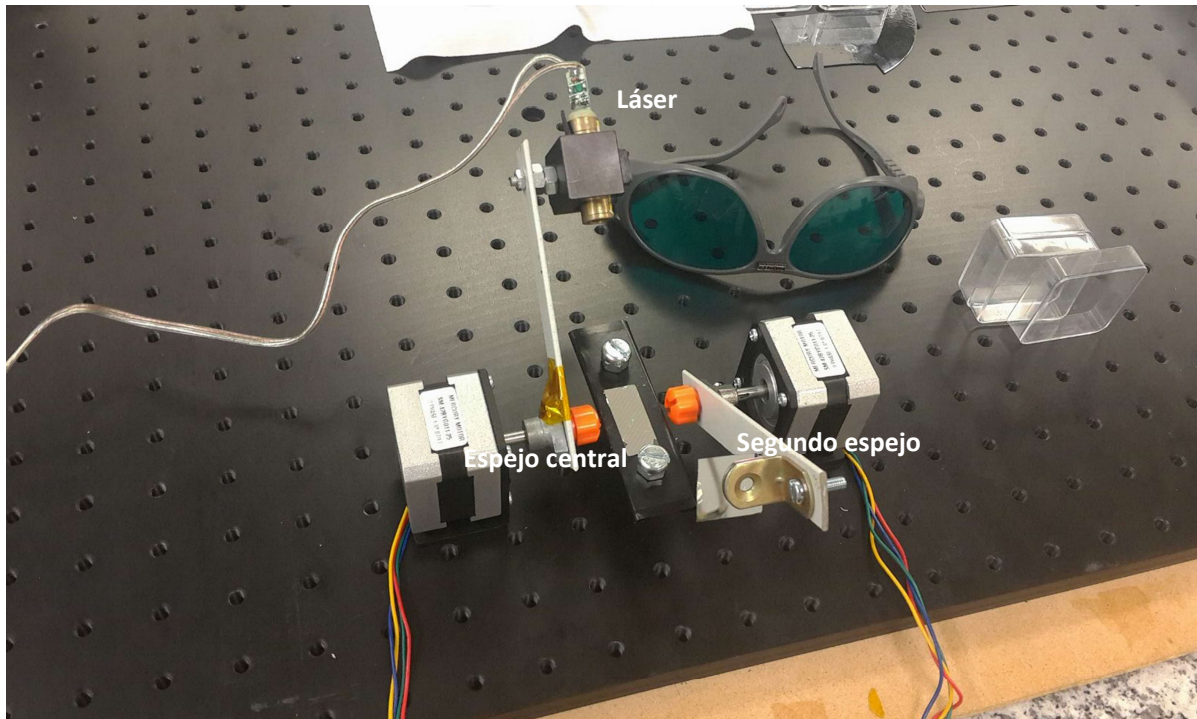
## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

---

Se ha realizado un ensayo a modo de prueba de la repetitividad y la precisión, que son los factores de mayor importancia en el goniómetro. Para ello, se ha situado un láser verde en el mástil asociado a un motor paso a paso, y un espejo en el otro. En el centro del espacio entre los dos motores, los cuales están enfrentados, se colocara otro espejo de manera que se refleje el láser desde cualquier ángulo que se encuentre (Fig. 9). De este modo si el láser incide con un ángulo en el espejo central, se reflejara con el mismo ángulo hacia la dirección donde está situado el segundo espejo. Para ello, el espejo central se ha situado en línea con el centro del eje de ambos motores.

Para medir la repetitividad y la precisión del sistema, se ha colocado mediante el programa de LabVIEW el láser y el segundo espejo a un ángulo concreto. Y en el caso de que coincidan en el espejo central la incidencia del láser y el haz reflejado en el segundo espejo, significará que la alineación y la precisión del sistema son óptimas. Al comprobarlo, el láser del espejo central quedaba desplazado aproximadamente un milímetro con el su reflexión en el espejo del motor paso a paso, como se puede comprobar en la fotografía (Fig.9). Si bien, ambos puntos quedaban paralelos. Por lo tanto, el sistema aún requiere de un mínimo ajuste de alineamiento.

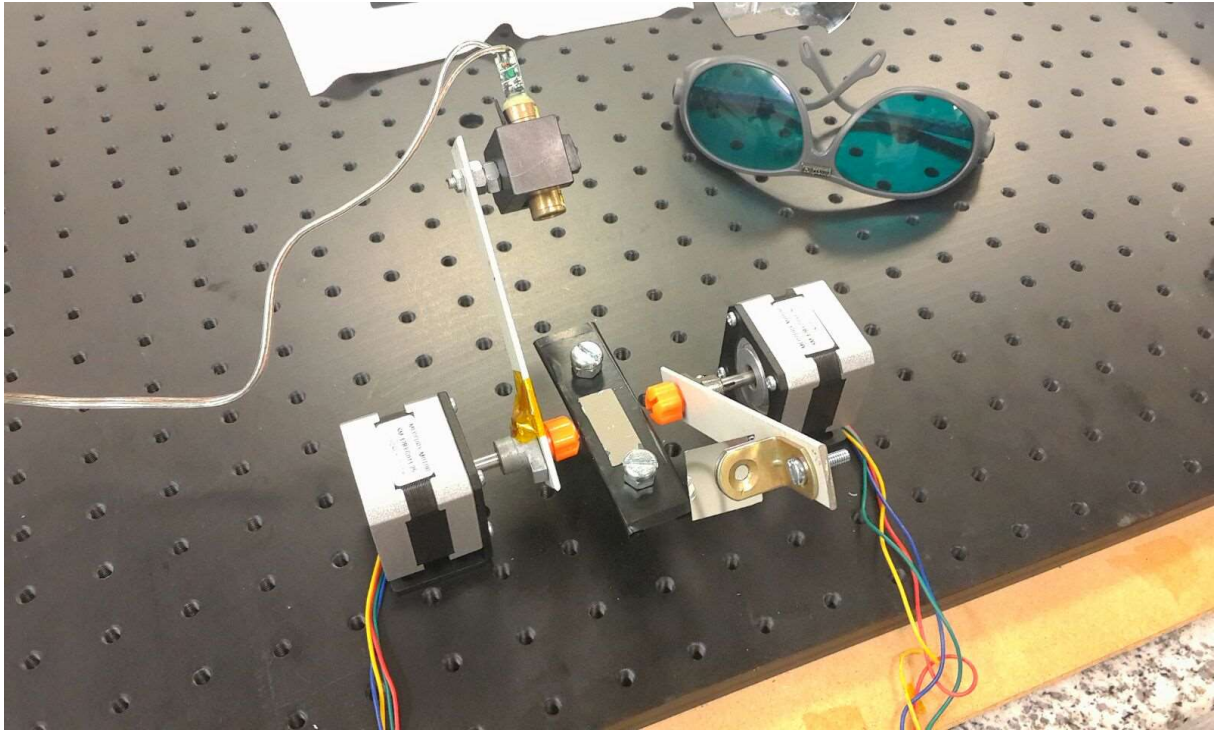
Una vez comprobada la precisión, se estudiará la repetitividad. Para ello se moverá el motor del láser a un ángulo concreto y, posteriormente, se moverá el motor del espejo hasta que el haz del láser coincida en el espejo central con en el reflejado por el segundo espejo. Cuando coincida, se analizará si el ángulo girado por cada motor ha sido el mismo, y se corregirá ese error de precisión que presenta el sistema. A continuación se moverá a un nuevo ángulo. Y se estudiará si nuevamente coincide el ángulo girado por cada motor.



**Fig.9: Fotografía de los resultados experimentales con un error de precisión**

Se comprueba que hay error de precisión y de repetitividad en el sistema cuando se utiliza el modo que intercambia de micropasos ( $0.1125^\circ$ ) a pasos completos ( $1.8^\circ$ ). Para corregir este error, se comprobó que cuando se realizan micropasos, el sistema se comporta perfectamente. En cambio, no sucede así cuando se emplean pasos completos en el posicionamiento de los motores.

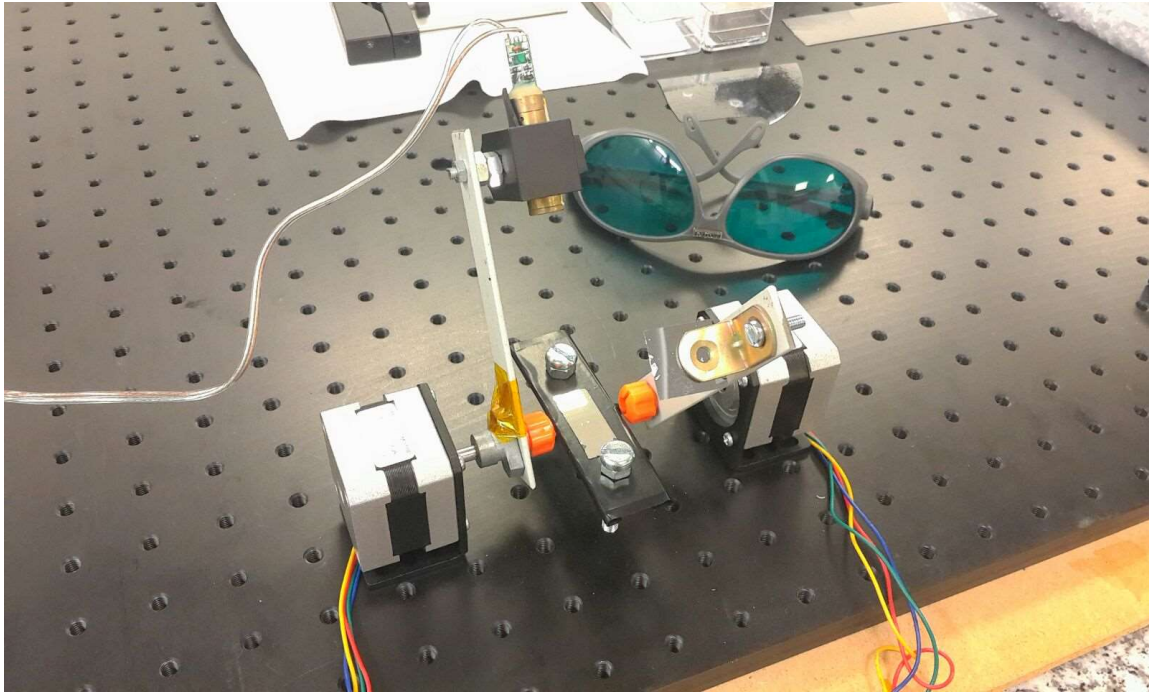
Entonces al realizar las mismas pruebas realizadas anteriormente, utilizando únicamente micropasos, se obtuvo que no tiene ningún error de repetitividad. Este error es nulo como se puede observar en la fotografía (Fig. 10).



***Fig.10: Fotografía de los resultados experimentales con la utilización exclusiva de micropasos.***

Aunque se sacrifique la velocidad que se intentaba conseguir mediante el intercambio de pasos completos y micropasos se consigue lo más importante en la implementación de este proyecto que es la precisión y repetitividad del goniómetro.

Tal y como se muestra en la fig. 11, esta prueba se repitió utilizando distintos ángulos de incidencia y reflexión del haz láser sobre el espejo central. La repetitividad conseguida ha sido correcta.



***Fig.10: Fotografía de los resultados experimentales con la utilización exclusiva de micropasos en distinto ángulo.***

## 6. CONCLUSIÓN

---

El silicio poroso es un material que puede aportar un gran avance en el campo de la nanociencia, permitiendo a los científicos desarrollar sensores capaces de detectar de forma rápida una gran variedad de agentes biológicos y químicos.

El goniómetro (sistema de medida angular) facilitará ese gran avance, ya que permite la variación de espesor óptico de las capas porosas mediante la incidencia angular de la luz sobre el sensor. De este modo se podrán producir desplazamientos en el espectro de reflexión del sensor, posibilitando que longitudes de onda para las que se tiene un máximo o mínimo de reflectividad puedan ser analizadas en un espectrómetro. Éste posee una gran sensibilidad, pero en un rango muy definido del espectro.

El goniómetro se controla a través de una interfaz de usuario que permite colocar de una manera sencilla y rápida el ángulo deseado tanto en la fuente de luz blanca como en el espectrómetro. Además, el programa realizara una inicialización con la cual se asegurara en todo momento de que la posición a la cual se coloca el motor es la idónea.

Respecto al motor y el driver cumplen con los objetivos del proyecto. Ya que tiene un ángulo por paso de  $0.1125^\circ$  mediante el uso de la tecnología de los micropasos. Esta precisión permitirá la elección de un ángulo de incidencia de la luz sobre el sensor, posibilitando de este modo que se pueda cambiar el espesor óptico de las capas porosas.

Al realizar las medidas experimentales, se comprueba que a la hora de hacer intercambio entre pasos completos y micropasos da lugar a errores de precisión y repetividad. Como solución a este problema se corrige reprogramando el LabVIEW para que solo se utilice micropasos, aunque se sacrifique la velocidad conseguida en el posicionamiento.

## 7. POSIBLES MEJORAS

---

El proyecto ha cumplido con los objetivos fijados. Pero se podrían haber añadido algunas mejoras con el fin de optimizar el funcionamiento del mismo.

Una de estas posibles mejoras es la inclusión de una reductora en el motor. La reductora es un sistema de engranajes que dependiendo de la relación de la transmisión puede aumentar la precisión y el par motor sacrificando velocidad, si es mayor esa relación, o puede aumentar la velocidad sacrificando precisión y par motor, si es menor.

En este proyecto, lo más importante es la precisión en el goniómetro para realizar una medida con el espectrómetro lo más exactas posibles. Por tanto, una mejora posible es la incorporación de una reductora con una relación de engranajes de 64:1 con la cual cuando el motor de un micropaso de  $0.1125^\circ$  este pasara a ser de  $0.0017578125^\circ$  en el goniómetro.

Otro mejora respecto a la precisión es el cambio del driver A4988 que se ha utilizado, que permite 16 micropasos, al driver DRV8825 que permite realizar de forma automática hasta 32 micropasos. Con este driver llegaríamos a tener una precisión de  $0.05625^\circ$  por cada paso por lo cual se doblaría la precisión del sistema.

El consumo de corriente de los motores puede llegar a ser abusivo, ya que los motores paso a paso consumen la misma corriente cuando están en reposo que cuando están en movimiento. Por tanto, se podría buscar un motor el cual consuma menos corriente, pero siempre cumpliendo con los objetivos del proyecto. Y es que el motor utilizado actualmente prácticamente consume 0.5 A de corriente, a pesar que el fabricante en su hoja de especificaciones especifica 0.33 A.

Como última mejora que podría incorporarse es la colocación de otro sensor infrarrojo CNY70, de modo que detenga los motores si detecta que ambos brazos están muy próximos.

## 8. PLIEGO DE CONDICIONES

---

Este documento tiene como objetivo establecer unas condiciones y garantías que deben cumplir los materiales y las personas para poder alcanzar los objetivos del proyecto.

### 8.1. Motor paso a paso

Como parte principal del proyecto, el motor paso a paso tiene que cumplir con una serie de condiciones a la hora de su elección que son las siguientes:

- Tiene que tener un holding torque o par motor mayor de 9.8 N·cm para poseer la suficiente fuerza para mover y aguantar el peso de las estructuras fotónicas.
- La precisión como aspecto más importante del proyecto tiene que ser de un ángulo por paso menor a  $0.2^\circ$ , ya sea mediante la utilización de drivers o de reductoras.
- Consumo de corriente no muy excesivo del orden de 0.4 A o menor.
- Motor bipolar e híbrido ya que son los que permiten mayor precisión.

### 8.2. Microcontrolador

Respecto al microcontrolador se debe cumplir unas especificaciones técnicas muy específicas que son las siguientes:

- Poseer al menos 4 entradas digitales y 6 salidas digitales.
- Generación de interrupciones.
- Memoria de programa con posibilidad de reprogramación.
- Memoria de programa mayor o igual a 32 KB.
- Módulo de comunicaciones UART para transmitir y recibir datos en serie.
- Reloj del sistema que pueda generar de una frecuencia de 8 MHz.
- Corriente DC de los pines digitales de al menos 40 mA.
- Tensión de funcionamiento 5V.
- Conexión USB para poder conectarlo con el PC.

### 8.3. Alimentación del sistema

La alimentación del sistema se llevara a cabo a través de una fuente de alimentación de 12V y 1.5 A. Los sensores se alimentaran a través del uso del regulador 7805 para suministrarles 5V. El microcontrolador se alimentara con los 5 V proporcionados por su conexión USB con el PC.

### 8.4. Driver del motor.

El driver del motor debe ser compatible con el motor elegido tanto el tensión de alimentación como en corriente suministrada.

Además, tiene que tener las siguientes características:



- Permitir realizar micropasos.
- Permitir control mediante microcontrolador a través de entradas digitales.
- Protección de cortocircuito y cortocircuito.
- Desconexión térmica por sobretemperatura, bloqueo por bajo voltaje y protección de corriente crossover.

### 8.5. Precauciones a la hora de manipular.

No se debe conectar ni desconectar ningún elemento del circuito hasta que no se haya desconectado la fuente de alimentación. Para la manipulación el técnico debe quitarse de las manos y muñecas todos objetos personales metálicos.

### 8.6. Normativa

Se ha cumplido la siguiente normativa a la hora de realizar el proyecto:

- ITC-BT-24: Protección contra contactos directos e indirectos.
- UNE-EN 61204: Fuentes de alimentación de baja tensión con salida en corriente continua.
- UNE-EN 61800: Accionamientos eléctricos de potencia de velocidad variable.
- CEM, 2004/108/CE: Compatibilidad Electromagnética.
- LVD, 2006/95/CEE: Circuitos de baja tensión.

## 9. PRESUPUESTO

### 9.1. Materiales para el diseño y desarrollo del goniómetro

En este apartado se mostrara en forma de tabla los costes asociados al material utilizado para la elaboración del goniómetro.

<b>Materiales para el diseño y desarrollo del goniómetro</b>	<b>Unidades utilizadas</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
Motor paso a paso SM-42BYG011-25	2 u.	13.87 €/u.	27.74 €
Arduino UNO R3 ATmega328	1 u.	19.79 €/u.	19.79 €
Driver Pololu A4988	2 u.	5.43 €/u.	10.86 €
Sensor infrarrojo CNY70	4 u.	1.07 €/u.	4.28 €
Resistencia 47kΩ	4 u.	0.03 €/u.	0.12 €
Resistencia 330Ω	4 u.	0.03 €/u.	0.12 €
Macho-hembra pack cables 40pcs. 20cm.	1 u.	2.83 €/u.	2.83 €
Fuente de alimentación 12 V 1.5 A	1 u.	5.95 €/u.	5.95 €
Regulador 7805	1 u.	1.06 €/u.	1.06 €
Tornillería	1 u.	3.43 €/u.	3.43€
Soporte Aluminio para Motor Paso a Paso NEMA 17	2 u.	6.36€/u.	12.72€
Soporte de eje 5mm	2 u.	3.45€/u.	6,90 €
<b>Subtotal sin IVA</b>			<b>95.8 €</b>
<b>Subtotal con IVA (21%)</b>			<b>115.92 €</b>

*Tabla 1: Presupuesto materiales.*

### 9.2. Mano de obra

A continuación, se muestra en una tabla la mano de obra utilizada para realizar el proyecto que se divide en ingenieril y técnica. Al ingeniero le corresponde la tarea de diseño y desarrollo del goniómetro, y al técnico la elaboración del goniómetro siguiendo las órdenes del ingeniero.

<b>Tipo de mano de obra</b>	<b>Horas</b>	<b>Coste unitario</b>	<b>Coste total</b>
Ingenieril	180	35 €/h.	6475€
Técnica	20	20 €/h.	400 €
<b>Subtotal</b>			<b>6875 €</b>

**Tabla 2: Presupuesto mano de obra.**

### 9.3. Presupuesto final

Como presupuesto final será la suma del coste de la mano de obra total y el coste con IVA de todos los materiales utilizados para el diseño y desarrollo del goniómetro total.

<b>Tipo de coste</b>	<b>Coste total</b>
Mano de obra	6875 €
Materiales para el diseño y desarrollo del goniómetro	115.92 €
<b>Precio total</b>	<b>6990.92 €</b>

**Tabla 3: Presupuesto total.**

## 10. ANEXO- HOJAS DE CARACTERISTICAS

- Sensor infrarrojos CNY70:

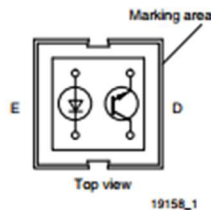


www.vishay.com

**CNY70**

Vishay Semiconductors

### Reflective Optical Sensor with Transistor Output



#### FEATURES

- Package type: leaded
- Detector type: phototransistor
- Dimensions (L x W x H in mm): 7 x 7 x 6
- Peak operating distance: < 0.5 mm
- Operating range within > 20 % relative collector current: 0 mm to 5 mm
- Typical output current under test:  $I_C = 1$  mA
- Emitter wavelength: 950 nm
- Daylight blocking filter
- Lead (Pb)-free soldering released
- Material categorization: For definitions of compliance please see [www.vishay.com/doc?99912](http://www.vishay.com/doc?99912)



RoHS COMPLIANT

#### DESCRIPTION

The CNY70 is a reflective sensor that includes an infrared emitter and phototransistor in a leaded package which blocks visible light.

#### APPLICATIONS

- Optoelectronic scanning and switching devices i.e., index sensing, coded disk scanning etc. (optoelectronic encoder assemblies).

PRODUCT SUMMARY				
PART NUMBER	DISTANCE FOR MAXIMUM CTR <sub>rel</sub> <sup>(1)</sup> (mm)	DISTANCE RANGE FOR RELATIVE $I_{out} > 20\%$ (mm)	TYPICAL OUTPUT CURRENT UNDER TEST <sup>(2)</sup> (mA)	DAYLIGHT BLOCKING FILTER INTEGRATED
CNY70	0	0 to 5	1	Yes

#### Notes

<sup>(1)</sup> CTR: current transference ratio,  $I_{out}/I_{in}$

<sup>(2)</sup> Conditions like in table basic characteristics/sensors

ORDERING INFORMATION			
ORDERING CODE	PACKAGING	VOLUME <sup>(1)</sup>	REMARKS
CNY70	Tube	MOQ: 4000 pcs, 80 pcs/tube	-

#### Note

<sup>(1)</sup> MOQ: minimum order quantity

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_{amb} = 25$ °C, unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
<b>COUPLER</b>				
Total power dissipation	$T_{amb} \leq 25$ °C	$P_{tot}$	200	mW
Ambient temperature range		$T_{amb}$	- 40 to + 85	°C
Storage temperature range		$T_{stg}$	- 40 to + 100	°C
Soldering temperature	Distance to case 2 mm, $t \leq 5$ s	$T_{sd}$	260	°C
<b>INPUT (EMITTER)</b>				
Reverse voltage		$V_R$	5	V
Forward current		$I_F$	50	mA
Forward surge current	$t_p \leq 10$ $\mu$ s	$I_{FSM}$	3	A
Power dissipation	$T_{amb} \leq 25$ °C	$P_V$	100	mW
Junction temperature		$T_j$	100	°C

Rev. 1.8, 30-Jul-12

1

Document Number: 83751

For technical questions, contact: [sensortechsupport@vishay.com](mailto:sensortechsupport@vishay.com)

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT [www.vishay.com/doc?91000](http://www.vishay.com/doc?91000)



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
<b>OUTPUT (DETECTOR)</b>				
Collector emitter voltage		$V_{CEO}$	32	V
Emitter collector voltage		$V_{ECO}$	7	V
Collector current		$I_C$	50	mA
Power dissipation	$T_{amb} \leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$P_V$	100	mW
Junction temperature		$T_J$	100	$^{\circ}\text{C}$

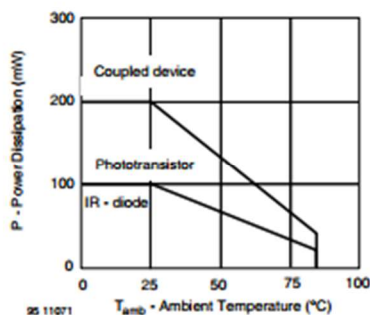
**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Fig. 1 - Power Dissipation vs. Ambient Temperature

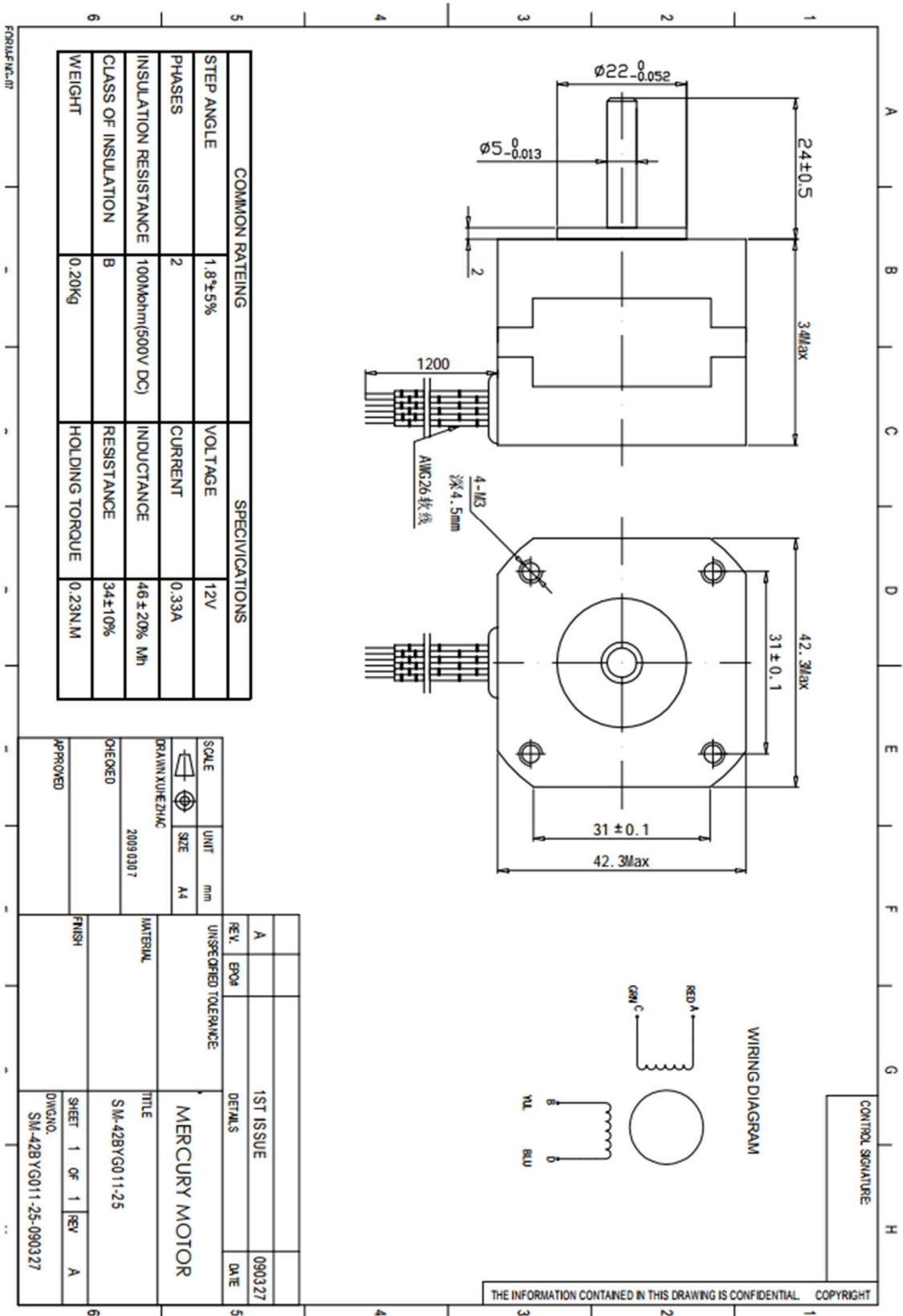
BASIC CHARACTERISTICS ( $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified)						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
<b>COUPLER</b>						
Collector current	$V_{CE} = 5\text{ V}$ , $I_F = 20\text{ mA}$ , $d = 0.3\text{ mm}$ (figure 1)	$I_C$ (1)	0.3	1.0		mA
Cross talk current	$V_{CE} = 5\text{ V}$ , $I_F = 20\text{ mA}$ , (figure 2)	$I_{CX}$ (2)			600	nA
Collector emitter saturation voltage	$I_F = 20\text{ mA}$ , $I_C = 0.1\text{ mA}$ , $d = 0.3\text{ mm}$ (figure 1)	$V_{CEsat}$ (2)			0.3	V
<b>INPUT (EMITTER)</b>						
Forward voltage	$I_F = 50\text{ mA}$	$V_F$		1.25	1.6	V
Radiant intensity	$I_F = 50\text{ mA}$ , $t_p = 20\text{ ms}$	$I_e$			7.5	mW/sr
Peak wavelength	$I_F = 100\text{ mA}$	$\lambda_p$	940			nm
Virtual source diameter	Method: 63 % encircled energy	$d$		1.2		mm
<b>OUTPUT (DETECTOR)</b>						
Collector emitter voltage	$I_C = 1\text{ mA}$	$V_{CEO}$	32			V
Emitter collector voltage	$I_E = 100\text{ }\mu\text{A}$	$V_{ECO}$	5			V
Collector dark current	$V_{CE} = 20\text{ V}$ , $I_F = 0\text{ A}$ , $E = 0\text{ lx}$	$I_{CEO}$			200	nA

**Notes**

(1) Measured with the "Kodak neutral test card", white side with 90 % diffuse reflectance

(2) Measured without reflecting medium

- Motor paso a paso sm42byg011-25:



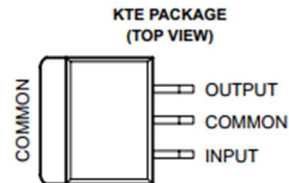
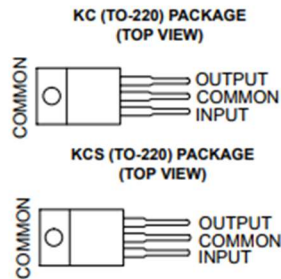
- Regulator 7805

## μA7800 SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS

SLVS056J – MAY 1976 – REVISED MAY 2003

- 3-Terminal Regulators
- Output Current up to 1.5 A
- Internal Thermal-Overload Protection

- High Power-Dissipation Capability
- Internal Short-Circuit Current Limiting
- Output Transistor Safe-Area Compensation



### description/ordering information

This series of fixed-voltage integrated-circuit voltage regulators is designed for a wide range of applications. These applications include on-card regulation for elimination of noise and distribution problems associated with single-point regulation. Each of these regulators can deliver up to 1.5 A of output current. The internal current-limiting and thermal-shutdown features of these regulators essentially make them immune to overload. In addition to use as fixed-voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable output voltages and currents, and also can be used as the power-pass element in precision regulators.

### ORDERING INFORMATION

T <sub>J</sub>	V <sub>O(NOM)</sub> (V)	PACKAGE†		ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING
0°C to 125°C	5	POWER-FLEX (KTE)	Reel of 2000	μA7805CKTER	μA7805C
		TO-220 (KC)	Tube of 50	μA7805CKC	μA7805C
		TO-220, short shoulder (KCS)	Tube of 20	μA7805CKCS	
	8	POWER-FLEX (KTE)	Reel of 2000	μA7808CKTER	μA7808C
		TO-220 (KC)	Tube of 50	μA7808CKC	μA7808C
		TO-220, short shoulder (KCS)	Tube of 20	μA7808CKCS	
	10	POWER-FLEX (KTE)	Reel of 2000	μA7810CKTER	μA7810C
		TO-220 (KC)	Tube of 50	μA7810CKC	μA7810C
	12	POWER-FLEX (KTE)	Reel of 2000	μA7812CKTER	μA7812C
		TO-220 (KC)	Tube of 50	μA7812CKC	μA7812C
		TO-220, short shoulder (KCS)	Tube of 20	μA7812CKCS	
	15	POWER-FLEX (KTE)	Reel of 2000	μA7815CKTER	μA7815C
TO-220 (KC)		Tube of 50	μA7815CKC	μA7815C	
TO-220, short shoulder (KCS)		Tube of 20	μA7815CKCS		
24	POWER-FLEX (KTE)	Reel of 2000	μA7824CKTER	μA7824C	
	TO-220 (KC)	Tube of 50	μA7824CKC	μA7824C	

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at [www.ti.com/sc/package](http://www.ti.com/sc/package).



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS  
INSTRUMENTS**  
POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

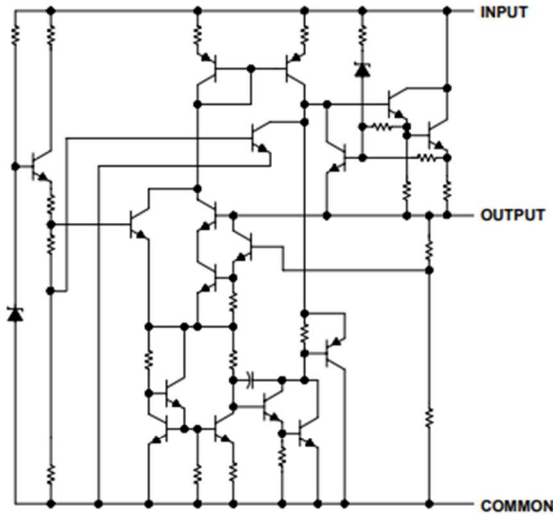
Copyright © 2003, Texas Instruments Incorporated

1

# μA7800 SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS

SLVS056J – MAY 1976 – REVISED MAY 2003

## schematic



### absolute maximum ratings over virtual junction temperature range (unless otherwise noted)†

Input voltage, $V_I$ : μA7824C .....	40 V
All others .....	35 V
Operating virtual junction temperature, $T_J$ .....	150°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds .....	260°C
Storage temperature range, $T_{stg}$ .....	-65°C to 150°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

### package thermal data (see Note 1)

PACKAGE	BOARD	$\theta_{JC}$	$\theta_{JA}$
POWER-FLEX (KTE)	High K, JESD 51-5	3°C/W	23°C/W
TO-220 (KC/KCS)	High K, JESD 51-5	3°C/W	19°C/W

NOTE 1: Maximum power dissipation is a function of  $T_J(\text{max})$ ,  $\theta_{JA}$ , and  $T_A$ . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is  $P_D = (T_J(\text{max}) - T_A)/\theta_{JA}$ . Operating at the absolute maximum  $T_J$  of 150°C can affect reliability.



**μA7800 SERIES  
POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS**

SLVS056J – MAY 1976 – REVISED MAY 2003

**recommended operating conditions**

		MIN	MAX	UNIT
$V_I$ Input voltage	μA7805C	7	25	V
	μA7808C	10.5	25	
	μA7810C	12.5	28	
	μA7812C	14.5	30	
	μA7815C	17.5	30	
	μA7824C	27	38	
$I_O$ Output current		1.5		A
$T_J$ Operating virtual junction temperature	μA7800C series	0	125	°C

**electrical characteristics at specified virtual junction temperature,  $V_I = 10$  V,  $I_O = 500$  mA (unless otherwise noted)**

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_J$ †	μA7805C			UNIT
			MIN	TYP	MAX	
Output voltage	$I_O = 5$ mA to 1 A, $P_D \leq 15$ W, $V_I = 7$ V to 20 V,	25°C	4.8	5	5.2	V
		0°C to 125°C	4.75		5.25	
Input voltage regulation	$V_I = 7$ V to 25 V	25°C	3			mV
	$V_I = 8$ V to 12 V		1			
Ripple rejection	$V_I = 8$ V to 18 V, $f = 120$ Hz	0°C to 125°C	62	78		dB
Output voltage regulation	$I_O = 5$ mA to 1.5 A	25°C	15			mV
	$I_O = 250$ mA to 750 mA		5			
Output resistance	$f = 1$ kHz	0°C to 125°C	0.017			Ω
Temperature coefficient of output voltage	$I_O = 5$ mA	0°C to 125°C	-1.1			mV/°C
Output noise voltage	$f = 10$ Hz to 100 kHz	25°C	40			μV
Dropout voltage	$I_O = 1$ A	25°C	2			V
Bias current		25°C	4.2			8 mA
Bias current change	$V_I = 7$ V to 25 V	0°C to 125°C	1.3			mA
	$I_O = 5$ mA to 1 A		0.5			
Short-circuit output current		25°C	750			mA
Peak output current		25°C	2.2			A

† Pulse-testing techniques maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible. Thermal effects must be taken into account separately. All characteristics are measured with a 0.33-μF capacitor across the input and a 0.1-μF capacitor across the output.



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

3

## μA7800 SERIES POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS

SLVS056J – MAY 1976 – REVISED MAY 2003

electrical characteristics at specified virtual junction temperature,  $V_I = 14\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_J$ †	μA7808C			UNIT
			MIN	TYP	MAX	
Output voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ , $P_D \leq 15\text{ W}$ , $V_I = 10.5\text{ V to }23\text{ V}$	25°C	7.7	8	8.3	V
		0°C to 125°C	7.6		8.4	
Input voltage regulation	$V_I = 10.5\text{ V to }25\text{ V}$	25°C		6	160	mV
	$V_I = 11\text{ V to }17\text{ V}$			2	80	
Ripple rejection	$V_I = 11.5\text{ V to }21.5\text{ V}$ , $f = 120\text{ Hz}$	0°C to 125°C	55	72		dB
Output voltage regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$	25°C		12	160	mV
	$I_O = 250\text{ mA to }750\text{ mA}$			4	80	
Output resistance	$f = 1\text{ kHz}$	0°C to 125°C	0.016			Ω
Temperature coefficient of output voltage	$I_O = 5\text{ mA}$	0°C to 125°C	-0.8			mV/°C
Output noise voltage	$f = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$	25°C		52		μV
Dropout voltage	$I_O = 1\text{ A}$	25°C		2		V
Bias current		25°C		4.3	8	mA
Bias current change	$V_I = 10.5\text{ V to }25\text{ V}$	0°C to 125°C			1	mA
	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$				0.5	
Short-circuit output current		25°C		450		mA
Peak output current		25°C		2.2		A

† Pulse-testing techniques maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible. Thermal effects must be taken into account separately. All characteristics are measured with a 0.33-μF capacitor across the input and a 0.1-μF capacitor across the output.

electrical characteristics at specified virtual junction temperature,  $V_I = 17\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_J$ †	μA7810C			UNIT
			MIN	TYP	MAX	
Output voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ , $P_D \leq 15\text{ W}$ , $V_I = 12.5\text{ V to }25\text{ V}$	25°C	9.6	10	10.4	V
		0°C to 125°C	9.5	10	10.5	
Input voltage regulation	$V_I = 12.5\text{ V to }28\text{ V}$	25°C		7	200	mV
	$V_I = 14\text{ V to }20\text{ V}$			2	100	
Ripple rejection	$V_I = 13\text{ V to }23\text{ V}$ , $f = 120\text{ Hz}$	0°C to 125°C	55	71		dB
Output voltage regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$	25°C		12	200	mV
	$I_O = 250\text{ mA to }750\text{ mA}$			4	100	
Output resistance	$f = 1\text{ kHz}$	0°C to 125°C	0.018			Ω
Temperature coefficient of output voltage	$I_O = 5\text{ mA}$	0°C to 125°C	-1			mV/°C
Output noise voltage	$f = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$	25°C		70		μV
Dropout voltage	$I_O = 1\text{ A}$	25°C		2		V
Bias current		25°C		4.3	8	mA
Bias current change	$V_I = 12.5\text{ V to }28\text{ V}$	0°C to 125°C			1	mA
	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$				0.5	
Short-circuit output current		25°C		400		mA
Peak output current		25°C		2.2		A

† Pulse-testing techniques maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible. Thermal effects must be taken into account separately. All characteristics are measured with a 0.33-μF capacitor across the input and a 0.1-μF capacitor across the output.

**μA7800 SERIES**  
**POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS**

SLVS056J – MAY 1976 – REVISED MAY 2003

**electrical characteristics at specified virtual junction temperature,  $V_I = 19\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$  (unless otherwise noted)**

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_J$ †	μA7812C			UNIT
			MIN	TYP	MAX	
Output voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ , $P_D \leq 15\text{ W}$	$V_I = 14.5\text{ V to }27\text{ V}$ , 25°C	11.5	12	12.5	V
		0°C to 125°C	11.4		12.6	
Input voltage regulation	$V_I = 14.5\text{ V to }30\text{ V}$	25°C	10			mV
	$V_I = 16\text{ V to }22\text{ V}$		3			
Ripple rejection	$V_I = 15\text{ V to }25\text{ V}$ , $f = 120\text{ Hz}$	0°C to 125°C	55	71		dB
Output voltage regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$	25°C	12			mV
	$I_O = 250\text{ mA to }750\text{ mA}$		4			
Output resistance	$f = 1\text{ kHz}$	0°C to 125°C	0.018			Ω
Temperature coefficient of output voltage	$I_O = 5\text{ mA}$	0°C to 125°C	-1			mV/°C
Output noise voltage	$f = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$	25°C	75			μV
Dropout voltage	$I_O = 1\text{ A}$	25°C	2			V
Bias current		25°C	4.3			8 mA
Bias current change	$V_I = 14.5\text{ V to }30\text{ V}$	0°C to 125°C	1			mA
	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$		0.5			
Short-circuit output current		25°C	350			mA
Peak output current		25°C	2.2			A

† Pulse-testing techniques maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible. Thermal effects must be taken into account separately. All characteristics are measured with a 0.33-μF capacitor across the input and a 0.1-μF capacitor across the output.

**electrical characteristics at specified virtual junction temperature,  $V_I = 23\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$  (unless otherwise noted)**

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_J$ †	μA7815C			UNIT
			MIN	TYP	MAX	
Output voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ , $P_D \leq 15\text{ W}$	$V_I = 17.5\text{ V to }30\text{ V}$ , 25°C	14.4	15	15.6	V
		0°C to 125°C	14.25		15.75	
Input voltage regulation	$V_I = 17.5\text{ V to }30\text{ V}$	25°C	11			mV
	$V_I = 20\text{ V to }26\text{ V}$		3			
Ripple rejection	$V_I = 18.5\text{ V to }28.5\text{ V}$ , $f = 120\text{ Hz}$	0°C to 125°C	54	70		dB
Output voltage regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$	25°C	12			mV
	$I_O = 250\text{ mA to }750\text{ mA}$		4			
Output resistance	$f = 1\text{ kHz}$	0°C to 125°C	0.019			Ω
Temperature coefficient of output voltage	$I_O = 5\text{ mA}$	0°C to 125°C	-1			mV/°C
Output noise voltage	$f = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$	25°C	90			μV
Dropout voltage	$I_O = 1\text{ A}$	25°C	2			V
Bias current		25°C	4.4			8 mA
Bias current change	$V_I = 17.5\text{ V to }30\text{ V}$	0°C to 125°C	1			mA
	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$		0.5			
Short-circuit output current		25°C	230			mA
Peak output current		25°C	2.1			A

† Pulse-testing techniques maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible. Thermal effects must be taken into account separately. All characteristics are measured with a 0.33-μF capacitor across the input and a 0.1-μF capacitor across the output.

**μA7800 SERIES  
POSITIVE-VOLTAGE REGULATORS**

SLVS056J – MAY 1976 – REVISED MAY 2003

**electrical characteristics at specified virtual junction temperature,  $V_I = 33\text{ V}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$  (unless otherwise noted)**

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_J$ †	μA7824C			UNIT
			MIN	TYP	MAX	
Output voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ , $P_D \leq 15\text{ W}$	25°C	23	24	25	V
		0°C to 125°C	22.8		25.2	
Input voltage regulation	$V_I = 27\text{ V to }38\text{ V}$	25°C		18	480	mV
	$V_I = 30\text{ V to }36\text{ V}$			6	240	
Ripple rejection	$V_I = 28\text{ V to }38\text{ V}$ , $f = 120\text{ Hz}$	0°C to 125°C	50	66		dB
Output voltage regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$	25°C		12	480	mV
	$I_O = 250\text{ mA to }750\text{ mA}$			4	240	
Output resistance	$f = 1\text{ kHz}$	0°C to 125°C	0.028			Ω
Temperature coefficient of output voltage	$I_O = 5\text{ mA}$	0°C to 125°C	-1.5			mV/°C
Output noise voltage	$f = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$	25°C	170			μV
Dropout voltage	$I_O = 1\text{ A}$	25°C	2			V
Bias current		25°C	4.6	8		mA
Bias current change	$V_I = 27\text{ V to }38\text{ V}$	0°C to 125°C		1		mA
	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$			0.5		
Short-circuit output current		25°C	150			mA
Peak output current		25°C	2.1			A

† Pulse-testing techniques maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible. Thermal effects must be taken into account separately. All characteristics are measured with a 0.33-μF capacitor across the input and a 0.1-μF capacitor across the output.



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265