



Informe Técnico

Sistema de agitación para fluidos de baja viscosidad

Juan Ricardo Damián Zamacona

María Soledad Córdova Aguilar

Sergio Quintana Thierry

julio de 2024

Proyecto financiado internamente

Institución Patrocinadora: ICAT

Financiamiento: Interno

Sistema de agitación para fluidos de baja viscosidad

Juan Ricardo Damián Zamacona

María Soledad Córdova Aguilar

Sergio Quintana Thierry

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Circuito Exterior S/N, C.P. 04510, A.P.70-186, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México.

Resumen

En este trabajo, se presenta el diseño y construcción de un prototipo, de un sistema utilizado para realizar la agitación de fluidos de baja viscosidad mediante métodos electromecánicos. El prototipo está integrado en primera instancia, por un mecanismo conformado básicamente por un pedestal, el cual soporta principalmente, un motor a pasos y un motor de corriente directa. El motor a pasos, auxiliado por un tornillo sin fin, se encarga de subir y bajar un mecanismo, el cual soporta al motor de corriente directa y su hélice de agitación. Por su parte, el motor de corriente directa montado sobre el mecanismo mencionado, mueve la hélice para realizar la agitación del fluido al girar sobre su propio eje. El control de los motores se realiza mediante la manipulación de un pequeño teclado, el cual está conectado a la electrónica principal de control. La electrónica se basa en un microcontrolador, embebido en una tarjeta de desarrollo. A esta electrónica, también se le conectan algunos sensores para limitar el movimiento del motor a pasos y mantener la elevación en un intervalo aceptable. Como ya se mencionó, el motor a pasos mueve un tornillo sin fin, el cual sube y baja la hélice junto con su motor. Al llegar a un límite superior se activa un sensor de límite, deteniendo el avance hacia arriba. Por otro lado, también se activa otro sensor que limita el

movimiento, al bajar la hélice y sumergirla en el fluido. El prototipo desarrollado, está patrocinado por el laboratorio de Ingeniería de proceso del ICAT, dado que una de sus líneas de investigación así lo requiere, por lo mismo, su aplicación es específica para sus necesidades, tales como el procesamiento de ciertos alimentos.

ÍNDICE

Nomenclatura

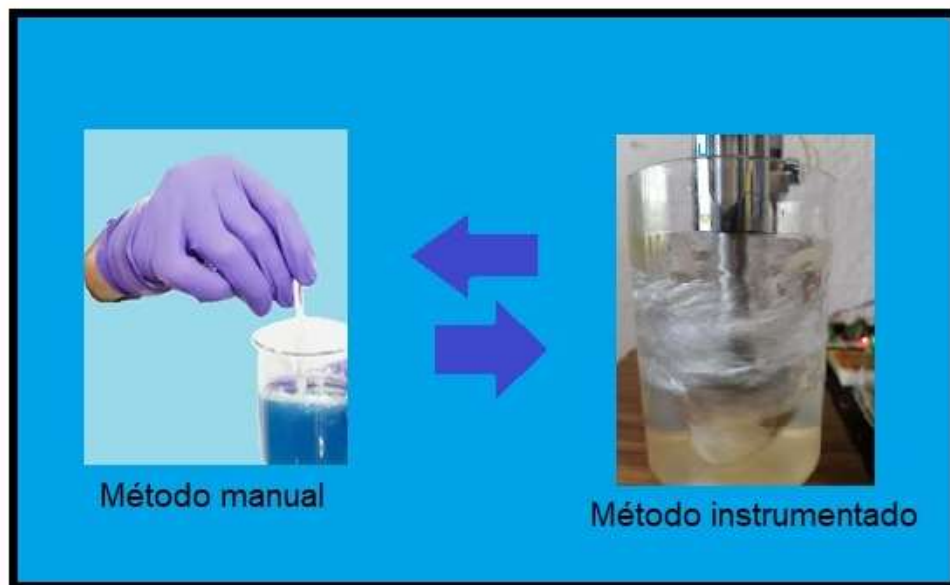
Introducción	5
1. Sistema mecánico	6
2. Sistema electrónico	8
2.1. Microcontrolador	9
2.2. Motor a pasos	11
2.3. Drive A4988	16
2.3.1. Conexiones de terminales de control	18
2.3.2. Ajuste de corriente máxima	19
2.4 Motor de corriente directa (CD)	21
2.5 Control de velocidad y posición	22
3. Resultados	25
Conclusiones	28
Agradecimientos	28
Referencias y bibliografía	29
Apéndice A	30
Apéndice B	37
Apéndice C	43
Apéndice D	49

Nomenclatura

Símbolo	Significado
CD	<i>Corriente directa</i>
CA	<i>Corriente alterna</i>
SET POINT	<i>Valor del Punto de ajuste</i>
SWITCH	<i>Interruptor</i>
DRIVE	<i>Controlador</i>
LCD	<i>Pantalla de cristal líquido</i>
PD	<i>Potencia disipada</i>
SPI	<i>Interface periférica serial</i>
USART	<i>Receptor-transmisor síncrono y asíncrono universal</i>
SRAM	<i>Memoria estática de acceso aleatorio</i>
A/D	<i>Analógico-digital</i>
V	<i>Volts</i>
VCD	<i>Voltaje de corriente directa</i>
VCA	<i>Voltaje de corriente alterna</i>
MILI	<i>Unidad submúltiplo</i>
RST	<i>Restablecer</i>
CW	<i>Sentido de las manecillas del reloj</i>
CCW	<i>Sentido contrario a las manecillas del reloj</i>
IP	<i>Protección internacional contra polvo y humedad</i>
PWM	<i>Modulación por ancho de pulso</i>
RISC	<i>Computadora con conjunto de instrucciones reducido</i>
SW	<i>Interruptor</i>
W	<i>Watts</i>
PCB	<i>Circuito Impreso</i>

Introducción

Para la realización del mezclado y/o la resuspensión de polvos en fluidos de baja viscosidad, tales como agua, leche o bebidas vegetales, se puede realizar básicamente mediante dos métodos: Métodos manuales y métodos automatizados. Los primeros métodos, son muy simples de realizar, con estos, se pueden dispersar los polvos o mezclar los líquidos, para ello se utiliza básicamente la generación de turbulencias mediante diversos instrumentos tales como cucharas o varillas, para la agitación se mueven estos dispositivos de diversas formas. Sin embargo, estos métodos son poco reproducibles y por lo mismo poco confiables, ya que no siempre se logra una mezcla homogénea de acuerdo a los requerimientos del proceso. Es por lo anterior, que en muchas ocasiones se recomienda el uso de los métodos instrumentados, o agitadores mecánicos automatizados. Con este tipo de agitadores [Damián, Córdova, 2023] se puede controlar el tiempo y la velocidad de agitación, de manera controlada y reproducible, adicionalmente, se facilita la dispersión y mezcla en un tiempo más corto y con menos esfuerzo, comparado con una agitación realizada manualmente. Otra ventaja es que se genera una mayor fuerza de corte y turbulencia en el fluido, lo cual es muy importante dado que se asegura que toda la muestra tenga la misma composición y concentración. En la figura 1 se muestran ejemplos de ambos métodos de mezclado.



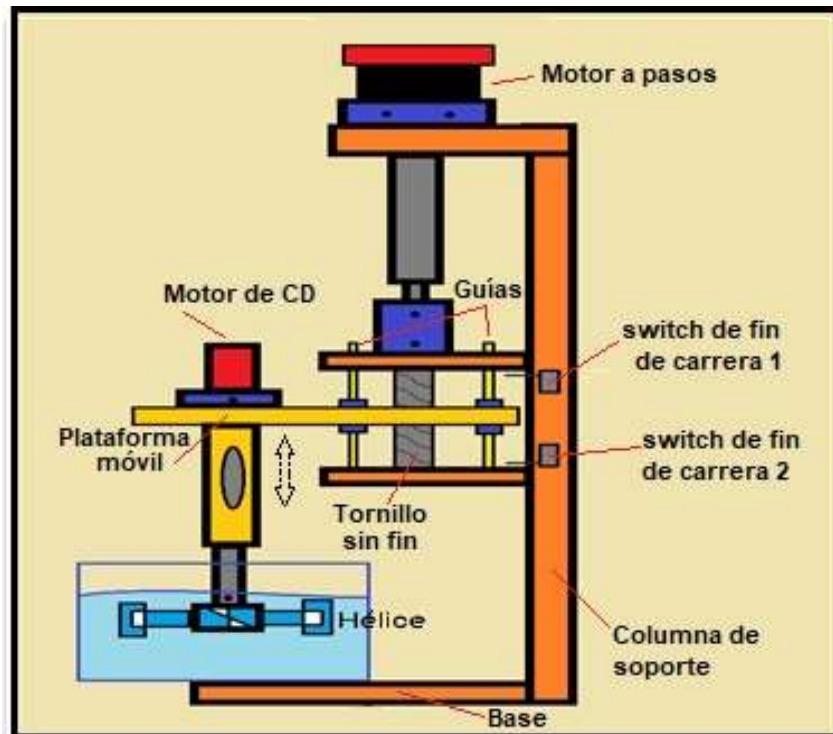
Fuente: elaboración propia

Figura 1. Método de mezclado manual y método instrumentado.

1 Sistema mecánico

El agitador de fluidos de baja viscosidad diseñado y construido, será empleado en el Laboratorio de Ingeniería de Proceso del ICAT. Para su diseño se utilizó un mecanismo construido en acero inoxidable dotado con una paleta agitadora (hélice), la cual se hace girar mediante un pequeño motor de corriente directa de 12 volts nominal, para realizar la mezcla del fluido en estudio. A su vez, este motor, junto con la hélice o paleta de agitación, puede elevar o bajar su posición, desplazándose sobre dos ejes corredizos y en función del giro de un tornillo sin fin, el cual proporciona la elevación de la paleta respecto a la base del sistema. El tornillo sin fin es manejado por medio de un motor a pasos bipolar, el cual finalmente, sube o baja la hélice de agitación, introduciéndola en mayor o menor medida en el fluido en estudio y de acuerdo a la forma de agitación que se requiera, ya sea rápida, lenta, con vórtices, etcétera.

La electrónica involucrada, comanda estos dos motores, en función del tipo de agitación requerida por el usuario. En la figura 2 se muestra el sistema mecánico y las partes electro-mecánicas involucradas para llevar a cabo el control del sistema.



Fuente: elaboración propia

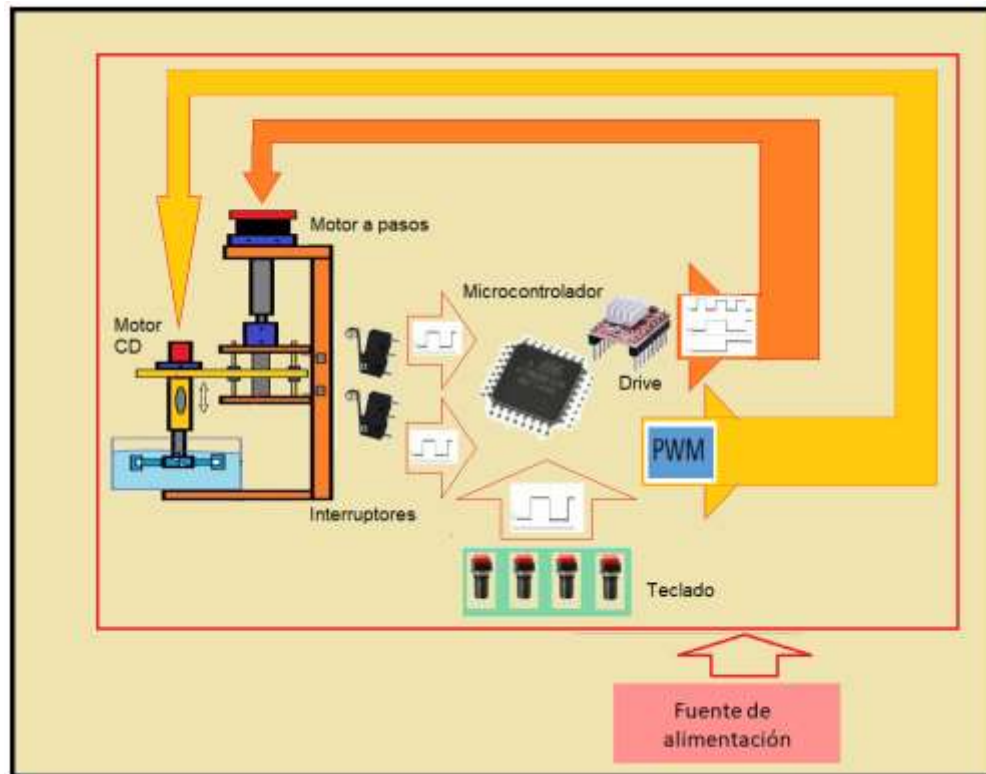
Figura 2. Sistema mecánico del agitador.

La plataforma móvil tiene un límite de movimiento, por lo cual solamente se puede desplazar de una altura máxima de 20 centímetros a una altura mínima de 10 centímetros. Esto, con la finalidad de evitar que el tornillo sin fin siga girando, cuando se ha llegado a uno de estos dos límites, lo cual puede ocasionar algún daño al motor de pasos o al mismo mecanismo. Para ello, se instalaron los dos sensores de límite, los cuales previenen de algún problema de este tipo. En la figura 2, estos elementos se indican como interruptor (switch) de fin de carrera 1 y 2. La plataforma móvil se desplaza hacia arriba y hacia abajo deslizándose sobre dos guías fijas y 2 bujes de

corrimiento. Por su parte, el motor de corriente directa y el motor a pasos, transmiten su movimiento al mecanismo correspondiente, integrado por la hélice y el tornillo sin fin, mediante dos ejes rectos contruidos en aluminio.

2 Sistema Electrónico

En la figura 3 se muestra un diagrama a bloques de todos los elementos involucrados en el diseño del agitador de fluidos de baja viscosidad. Se puede ver la forma en la que se interconectan los motores con la parte electrónica de control, así como los sensores de límite del mecanismo. Como se puede ver en la figura 3, el elemento principal del sistema, es un microcontrolador, es el encargado de recibir la información, procesarla y enviar señales de control correspondientes a los motores. Se puede apreciar que también se requiere de una fuente de alimentación para que el sistema opere adecuadamente, además de un teclado, para introducir datos y un módulo de potencia (drive), para el manejo del motor a pasos.



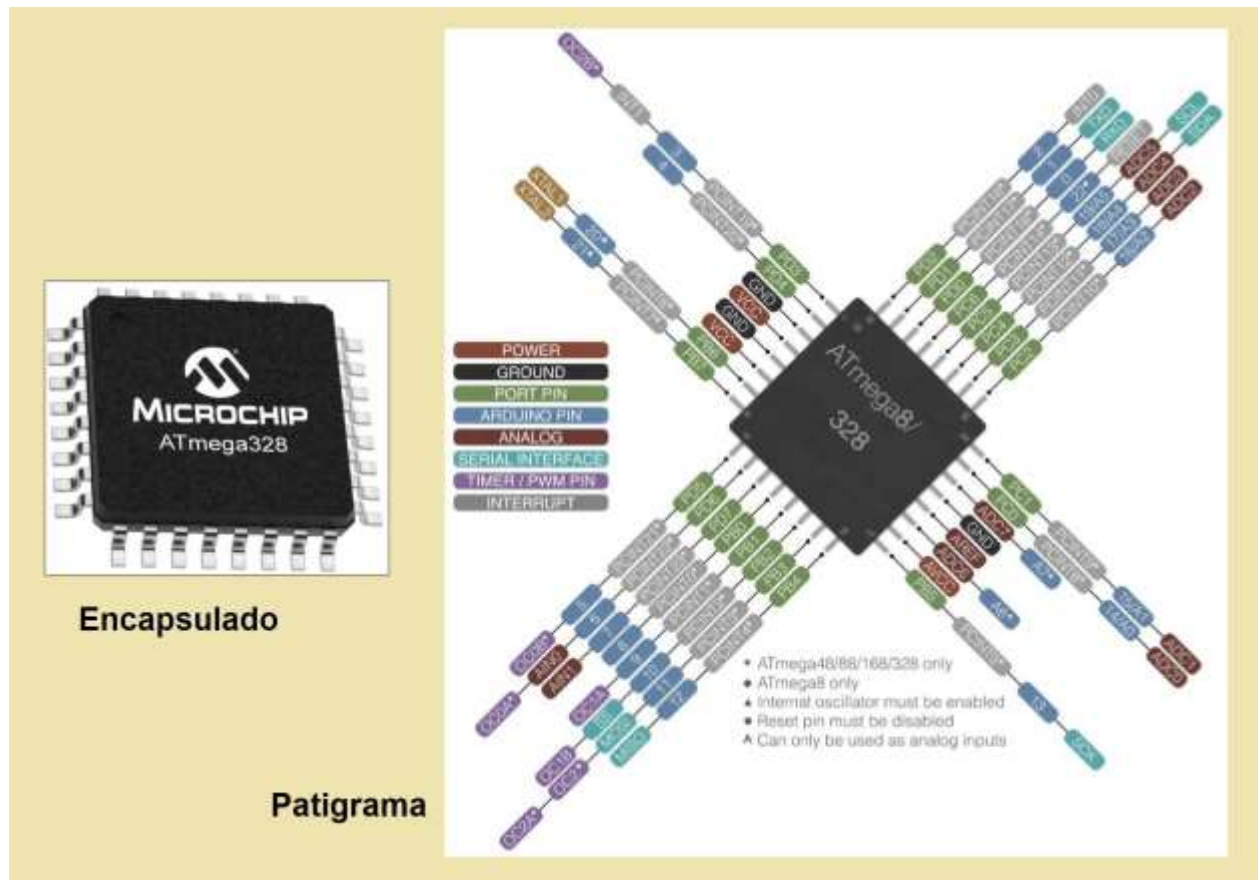
Fuente: elaboración propia

Figura 3. Diagrama a bloques del sistema de agitación

2.1 Microcontrolador

La parte central del circuito electrónico que controla los movimientos del agitador, es básicamente un circuito microcontrolador del tipo ATmega328 [Microchip, 2023], este circuito es el encargado de realizar las funciones seleccionadas por el usuario a través de un pequeño teclado, tal como subir y bajar la plataforma de elevación sobre la que está montada la hélice, para ello, envía las señales necesarias para realizar el control de giro del motor a pasos. Cuando es requerido, el microcontrolador envía señales para que el motor a pasos gire en sentido de las manecillas del reloj (CW) y en otro momento envía las señales para que gire en sentido contrario (CCW) y así ajustar la altura de la hélice en una posición adecuada. El microcontrolador también se encarga de ajustar la

velocidad del motor que mueve las aspas a un valor determinado y dependiendo del tipo de fluido que se tenga en prueba. Este microcontrolador, es fabricado por Microchip Technology, es un circuito integrado de arquitectura AVR RISC. En la figura 4, se muestra el microcontrolador y sus terminales de salida. Las características básicas de este circuito son: Puede operar con un voltaje comprendido entre 1.8 y 5.5 volts, tiene 6 puertos PWM, un puerto tipo serial USART, 8 convertidores A/D de 10 bits, 1 puerto síncrono SPI, cuenta con una memoria de programa de 32 Kbyte, memoria SRAM de 2 Kbyte, una memoria EEPROM de 1Kbyte. Adicionalmente tiene 1 contador de 16 bits y 2 de 8 bits, también cuenta con 23 terminales de entrada y salida digitales, de las cuales 6 son PWM. Las terminales de salida soportan una corriente máxima de 40 mili amperios. Lo cual obliga a utilizar electrónica adicional para el manejo de los diferentes componentes electromecánicos necesarios para el sistema.



Fuente: Microchip

Figura 4. Microcontrolador del sistema y distribución de sus terminales

2.2 Motor a pasos

El motor a pasos que se empleó para mover el tornillo sin fin, y así poder desplazar la hélice de agitación para arriba y para abajo, mediante la platina de soporte, es un motor tipo bipolar Nema 17, modelo KS42STH34-1504A [FSelectronics, 2023], cuenta con 4 hilos de conexión, de diferentes colores, rojo, negro, azul y verde, lo cual sirve para poder identificar las fases del motor y de esta manera poder conectarlo a la electrónica

que lo mueve. El motor es comandado mediante un drive, para de esta forma no conectarlo directamente al microcontrolador y evitar dañarlo. El motor utilizado se muestra en la figura 4.



Fuente: elaboración propia

Figura 4. Motor a pasos utilizado en el sistema

Las características más importantes de este motor, como se puede ver de la tabla 1 son: Su corriente por fase de 1.5 amperes, resistencia por fase de 1.5 ohm, inductancia por fase de 2.8 milihenrios, torque de 3.2 Kilogramos-centímetros y ángulo de movimiento de 1.8 grados. Para realizar el acoplamiento mecánico del eje del motor con el tornillo sin fin del sistema, se utilizó un acoplamiento tipo rígido (manguito), a base de un eje de 8 centímetros de largo, construido en aluminio y sujeto con tornillos de presión al motor y al tornillo sin fin. El giro del motor a pasos, es transmitido al tornillo

sin fin, el cual sube y baja la plataforma móvil (platina) en la que se encuentra montado el motor de corriente directa.

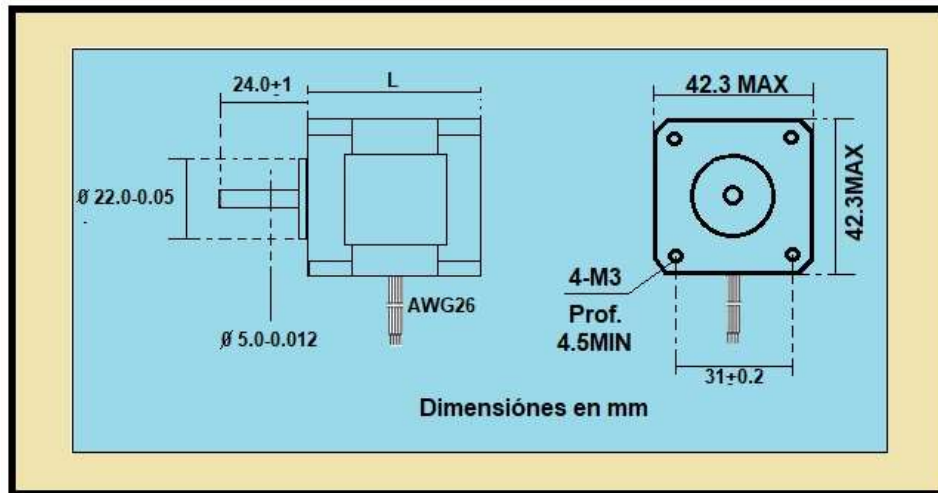
Tabla 1. Datos técnicos motor Nema 17 (KS42STH34-1504A)

Característica Eléctricas	
Fases	2 bipolar
Voltaje	12 VCD
Corriente	1.5 A
Inductancia	2.8mH/Fase
Resistencia	1.5 ohm /Fase
Características mecánicas	
Ángulo de paso	1.8°
Torque	3.2 Kg-cm
Dimensiones	42mmx42mmx34mm (LxWxW)
Diámetro del eje	5mm
Longitud del eje	22mm
Longitud de cable	300mm
Peso	0.22Kg

Fuente: elaboración propia

La clasificación NEMA se refiere a un código estándar similar a los códigos IP, solo que estos códigos NEMA los regula la Asociación de fabricantes estadounidenses de equipo eléctrico (NEMA), esta asociación define una serie de normas de construcción para Estados Unidos y Canadá y se encarga de regular y supervisar los estándares industriales en el campo de la electricidad, solamente que principalmente en lo referente a encapsulados. Es así que, el código NEMA 17 se refiere a motores a pasos de 1.7 por 1.7 pulgadas de área transversal en su carcasa, tal como se muestra en la figura 5. Otro punto importante a considerar, es que la mayoría de los motores que

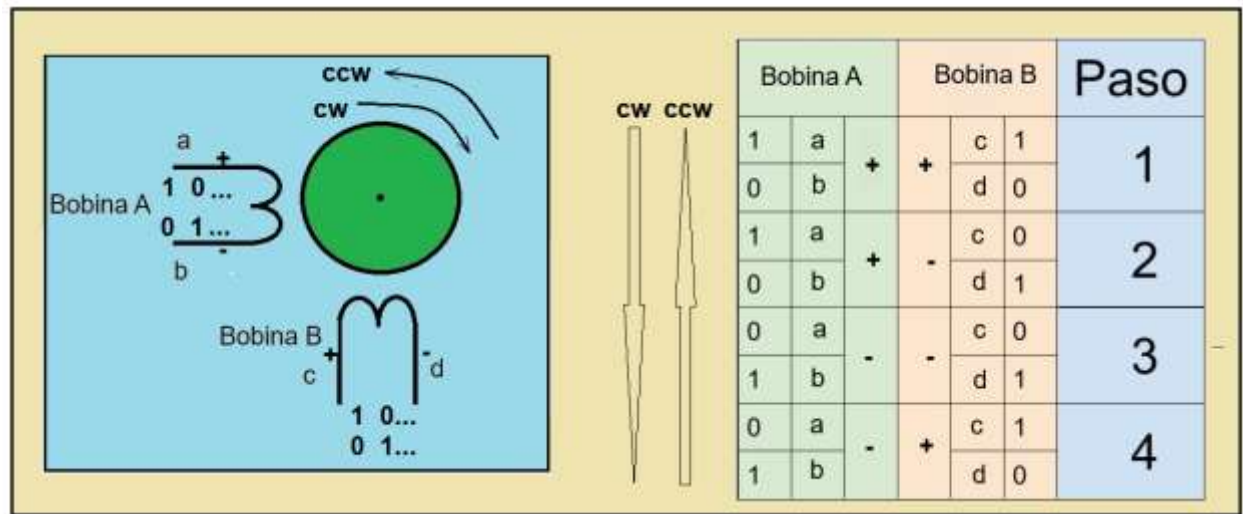
entran en esta clasificación (NEMA 17), presentan características eléctricas muy similares entre sí.



Fuente: elaboración propia

Figura 5. Dimensiones de un motor a pasos NEMA 17

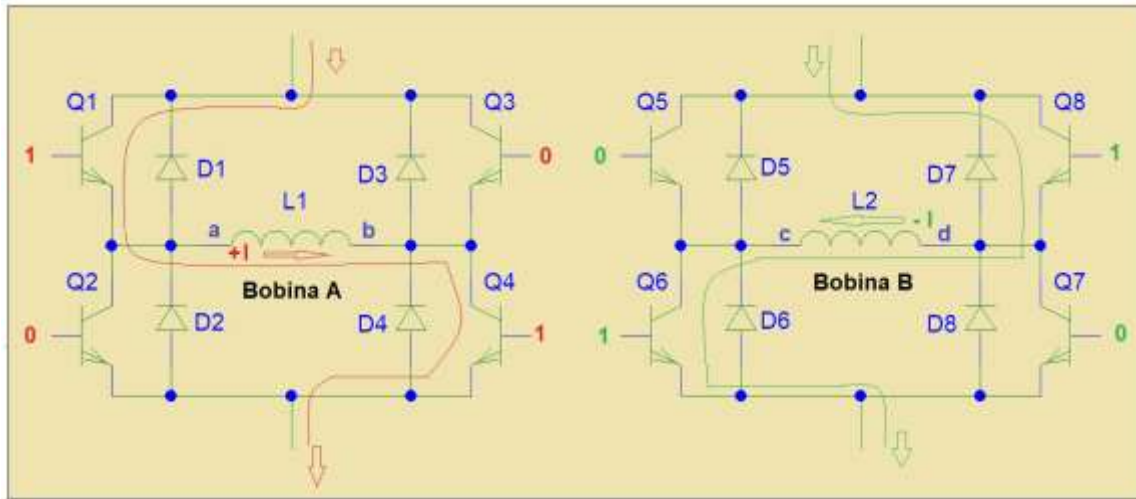
Como ya se mencionó previamente, el motor empleado es un motor bipolar, el cual tiene disponibles cuatro cables (hilos) para su conexión, los cuales corresponden a dos bobinas (fases) necesarias para que opere adecuadamente. En la figura 6 se muestra la disposición de estas bobinas y una forma de identificar sus terminales de conexión. En la misma figura 6, se muestra la secuencia que se debe seguir al polarizar cada una de las bobinas, para poder llevar a cabo el giro del motor en sentido horario (CW) y en sentido anti horario (CCW).



Fuente: elaboración propia

Figura 6. Disposición de bobinas en un motor bipolar y secuencia necesaria para giro horario y anti horario.

Como se puede ver en la figura 6, es necesario invertir el sentido de la corriente en cada una de las bobinas involucradas para lograr el movimiento del rotor del motor a pasos utilizado, es por ello que se requiere el uso de dos puentes H para lograr esta función, tal como se muestra en la figura 7. Los cables rojo y azul, podrían corresponder a los cables marcado como a y b respectivamente, en el esquema de la figura 6, mientras que los cables verde y negro podrían ser los cables c y d, respectivamente. Los puentes H necesarios para realizar el movimiento del motor, bien podrían estar incluidos en un circuito drive comercial, tal como el A4988 [diarioelectronicohoy, 2023].



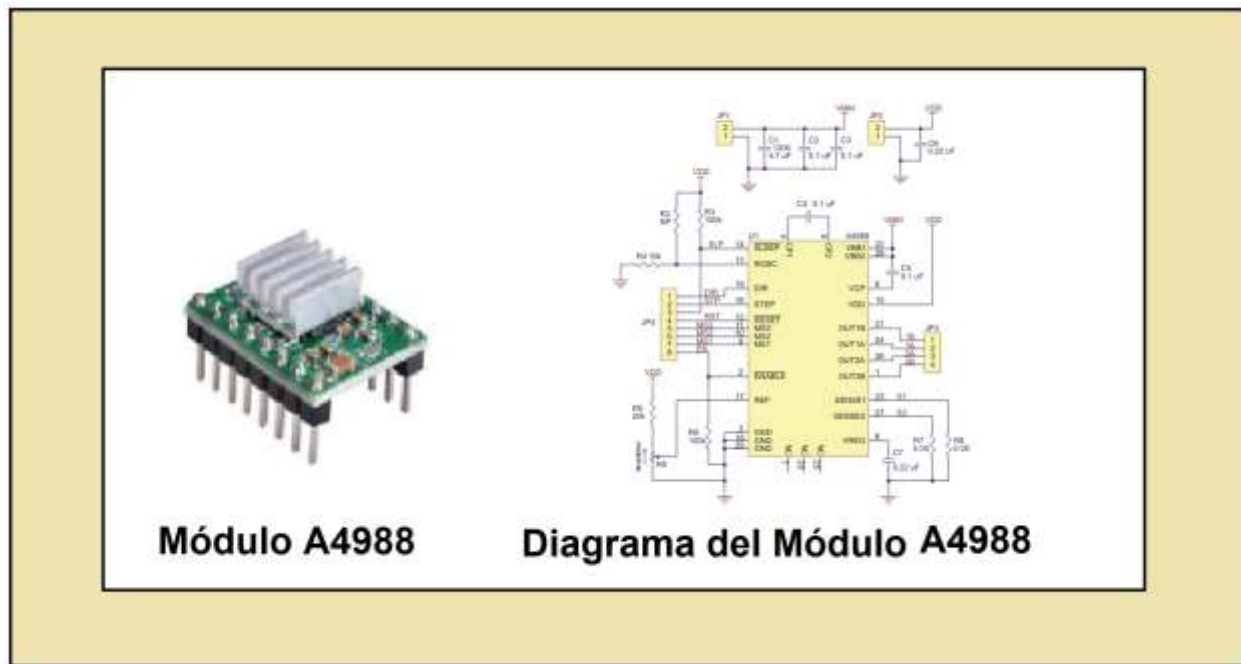
Fuente: elaboración propia

Figura 7. Sentido de las corrientes en un Puentes H, para manejo de motor a pasos bipolar

2.3 Drive A4988

El circuito integrado drive A4988, puede estar disponible en un módulo dip, de 16 terminales como el mostrado en la figura 8, cuenta con un disipador de calor que se puede colocar por separado mediante un pegamento especial, contenido en el mismo elemento de disipación. Con este pequeño elemento de disipación, se puede trabajar a su especificación máxima de corriente, sin dañarlo por calentamiento. Las fases del motor a pasos, se conectan en las terminales del módulo marcadas como out 1A, out 1B, out 2A y out 2B del conector JP3. Por su parte, las entradas de control del módulo, se conectan en el conector marcado como JP4. El drive cuenta con otras terminales, entre ellas, están algunas terminales de configuración (MS1, MS2, MS3) las cuales permiten configurar el tipo de pasos que se desea tener en el motor, estos pueden ser pasos completos, 1/2-paso, 1/4-paso, 1/8-paso, 1/16-paso y 1/32-paso, ver tabla 2. El módulo también cuenta con un potenciómetro marcado como R9, el cual se emplea para ajustar la corriente máxima que entregará el drive al motor seleccionado, esto con

la finalidad de no dañar al motor y a su vez no sobrecargar al módulo. Esta corriente puede ser de 1 ampere por bobina, pudiendo llegar a ser de 2 amperes como máximo y usando ventilación forzada.



Fuente: core electronics

Figura 8. Módulo A4988 y diagrama

Tabla 2. Configuración de resolución de pasos

Tabla de verdad para resolución de micro-pasos			
MS1	MS2	MS3	RESOLUCIÓN
L	L	L	COMPLETO
H	L	L	1/2 PASO
L	H	L	1/4 DE PASO
H	H	L	1/8 DE PASO
H	H	H	1/16 DE PASO

Fuente: elaboración propia

Entre otras características, también se puede mencionar que tiene protección contra sobre corriente y contra sobre temperatura, cuenta con un circuito interno de bloqueo de bajo voltaje y protección contra corto circuito. En el sistema de agitación diseñado, las terminales de configuración, referentes al tipo de paso del motor, se dejaron sin conectar, para lograr pasos completos, es decir, los tres terminales están a un valor lógico bajo, dado que estas terminales cuentan con resistencias internas (Pull-down). El módulo, cuenta además con una terminal especial de alimentación para el motor (V_{MM}) que puede ajustarse entre 8 y 35 volts, y otra terminal de alimentación separada para la lógica interna (V_{DD}) que puede ajustarse entre 3 y 5.5 volts. Dado que el motor empleado es de 4 hilos, se conectó directamente al drive, respetando el arreglo de las fases. Adicionalmente, el drive cuenta con terminales para el control de dirección y avance del motor, designadas como DIR y STEP, las cuales se conectan directamente al microcontrolador. Por otro lado, para el manejo de energía, cuenta con las terminales SLEEP, RESET y ENABLE.

2.3.1 Conexiones de terminales de control

Los niveles de voltaje de las terminales de control se deben ajustar a un valor alto o bajo según se requiera. En particular, para esta aplicación, y dado que la terminal SLEEP tiene una resistencia de pull-up que la mantiene en un valor alto (se activa con un valor bajo) se deja sin conexión y solamente se interconecta (puentea) con la terminal de RESET. La terminal RESET, al estar puenteada con la terminal SLEEP, permanecer en un valor alto, de tal forma que no se activa su función, dado que esta terminal no cuenta con resistencia de salida, que la preseleccione en un determinado valor. La terminal ENABLE por su parte, si tiene una resistencia pull-down por lo que no es necesario conectarla para que realice su función (se activa baja), ver diagrama del módulo de la figura 8. Las terminales DIR y STEP son manejadas directamente por el

microcontrolador, el cual mediante pulsos altos y bajos cambia el sentido de giro del motor, además de la frecuencia de pasos, de acuerdo a un programa preestablecido.

2.3.2 Ajuste de Corriente Máxima

El potenciómetro (R9) que está contenido en el módulo A4988 y que es mostrado en la figura 9, se ajusta para limitar la corriente máxima que el drive suministrará al motor en operación. Esto es muy importante, porque si no se realiza un cálculo correcto, la corriente que se entrega al motor puede ser muy baja y esto puede ocasionar que se pierdan pasos en el motor, por otro lado, si la corriente calculada es muy alta, se puede calentar en exceso el motor y el drive, de tal forma que se pueden dañar ambos elementos. Para realizar el ajuste, se hace uso de la fórmula proporcionada por el fabricante y mostrada en la ecuación 1.

$$I_{MAX} = \frac{V_{Ref.}}{(8)(R_s)} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

V_{Ref} = Voltaje de referencia, ajustable de acuerdo a la corriente seleccionada máxima.

I_{MAX} = Corriente máxima que se proporciona al motor y seleccionada por el diseñador.

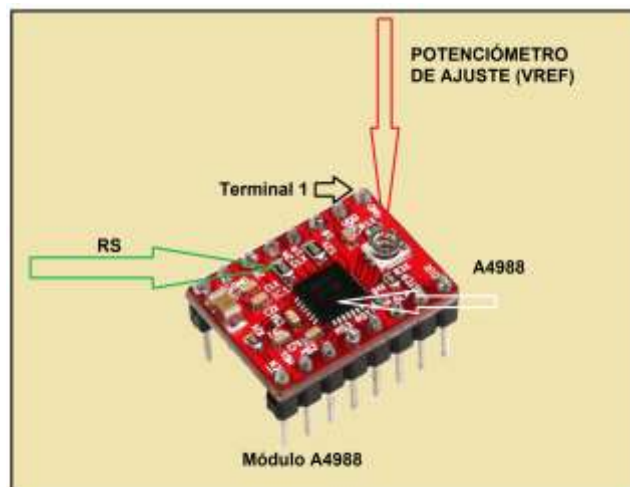
R_s = Valor de la resistencia R_s del módulo ($R_{100}=0.1$ ohm típicamente).

El voltaje de referencia (V_{Ref}), se suministra en la terminal 17 del circuito integrado A4988, que integra el módulo del mismo nombre, este voltaje se puede medir directamente en el cursor del potenciómetro R9, como se muestra en la figura 9. De esta manera, si se selecciona una corriente máxima para entregar al motor de 900 mili

amperios, considerando que la corriente por fase nominal del motor a pasos es de 1.68 amperes. Es por ello que, despejando de la fórmula 1, se tendrá un voltaje de referencia de 0.72 volts, el cual debe ajustarse con un medidor de voltaje.

Para realizar el ajuste, se utiliza un multímetro y se gira el potenciómetro hasta lograr el voltaje deseado en el cursor del potenciómetro. Para ello, se toma un pequeño desarmador conductor con un caimán, unido a la punta positiva del multímetro. Posteriormente se gira el potenciómetro con el desarmador, este punto de contacto, entre el desarmador y el potenciómetro, corresponde al cursor del mismo. Girando el tornillo, y por lo mismo el cursor del potenciómetro, se ajusta el valor de lectura del multímetro al valor calculado previamente.

Para realizar el procedimiento del ajuste antes mencionado, solamente se debe alimentar la sección lógica del módulo A4988 correspondiente a 5Volts (V_{DD}), sin conectar el motor de pasos y su alimentación (V_{MM}). En la figura 9, se muestra la ubicación del potenciómetro de ajuste en el módulo A4988, de la resistencia R_S que es la resistencia de sensado de la corriente que se entrega al motor, el circuito integrado A4988 y la terminal uno del módulo.

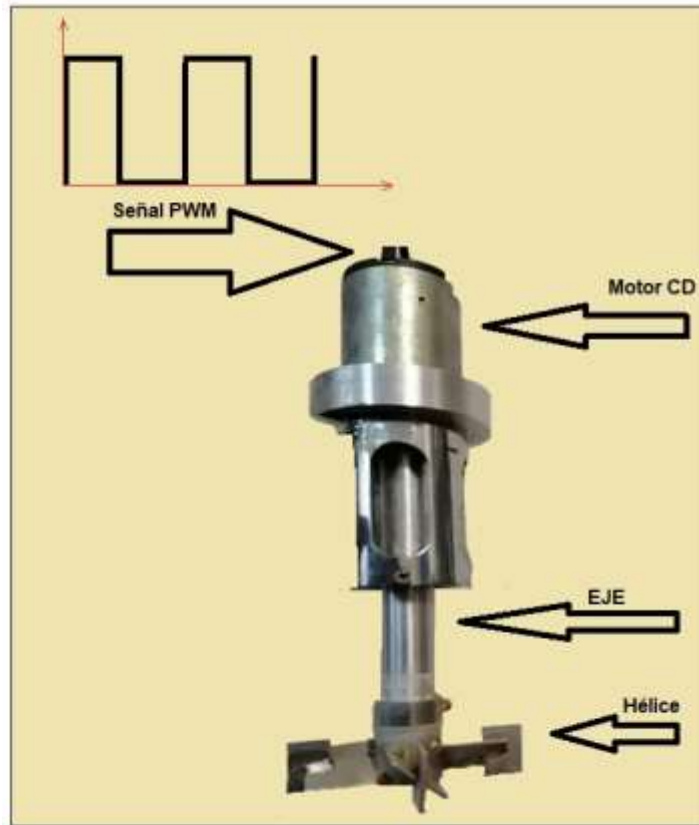


Fuente: elaboración propia

Figura 9. Potenciómetro de ajuste de corriente del A4988.

2.4 Motor de Corriente Directa (CD)

El motor de corriente directa utilizado para realizar el giro de la hélice, y realizar la agitación, tiene un voltaje nominal de 12 volt, es un motor con escobillas, presenta un consumo de corriente de 250 miliamperios, operando a su voltaje nominal y sin carga. La velocidad de giro de este motor, también es controlada por el microcontrolador principal. El giro del motor de corriente directa junto con el aspa, y la profundidad de ajuste de esta sobre el fluido, son los factores que intervienen en el tipo de agitación que se realizará sobre el fluido en estudio. Mediante la técnica PWM (Modulación por ancho de pulsos), la velocidad de giro del motor, junto con su paleta de agitación (hélice) se controla de acuerdo a un valor seleccionado, esta velocidad, dependerá de la selección que haga el usuario a través de un pequeño teclado. La señal PWM es generada por el microcontrolador, para enviarla al motor. Para evitar que se dañe el puerto PWM de este circuito integrado, se utiliza una etapa de potencia, conformada por un arreglo a base de un transistor MosFET de tipo IRF540 y algunas resistencias. El transistor de potencia, realiza la conmutación del voltaje de polarización del motor, que es de 12 volts, para controlar la velocidad. En la figura 10 se muestra el motor empleado en el sistema.



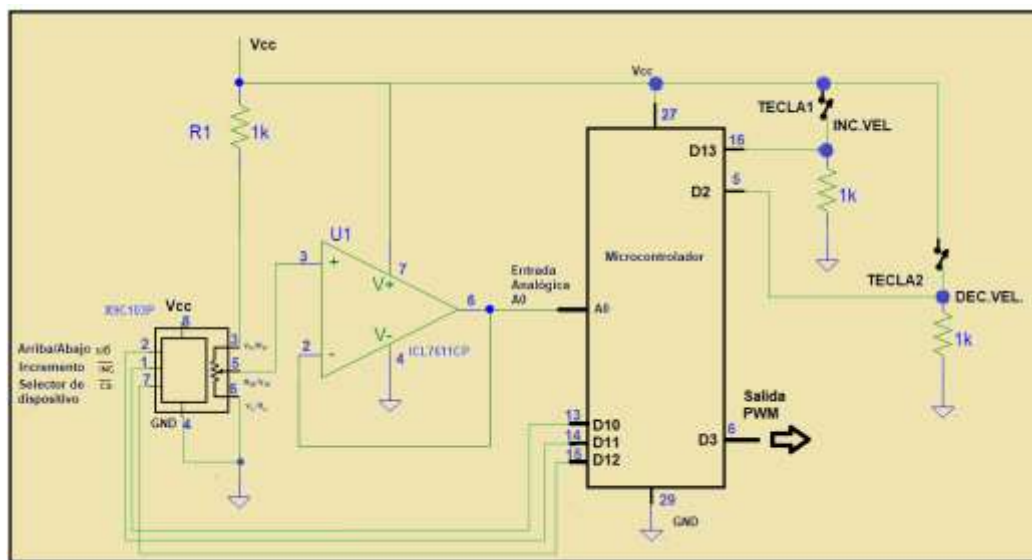
Fuente: elaboración propia

Figura 10. Conjunto motor de corriente directa-hélice

2.5 Control de velocidad y posición

El sistema de agitación cuenta con un pequeño teclado mediante el cual se puede subir y bajar el mecanismo, además de subir y bajar la velocidad de agitación. Esta última, como ya se mencionó, se controla por la técnica PWM, la señal de ancho de pulso es generada por el microcontrolador, el cual requiere un voltaje de referencia para poder generar esta señal de control. Para ello, se utiliza un potenciómetro digital, del tipo X9C103P, el cual se combina con un circuito a base de un amplificador operacional, en configuración seguidor, para de esta forma poder suministrar la corriente necesaria al puerto del microcontrolador sin afectar la operación del potenciómetro digital. De esta

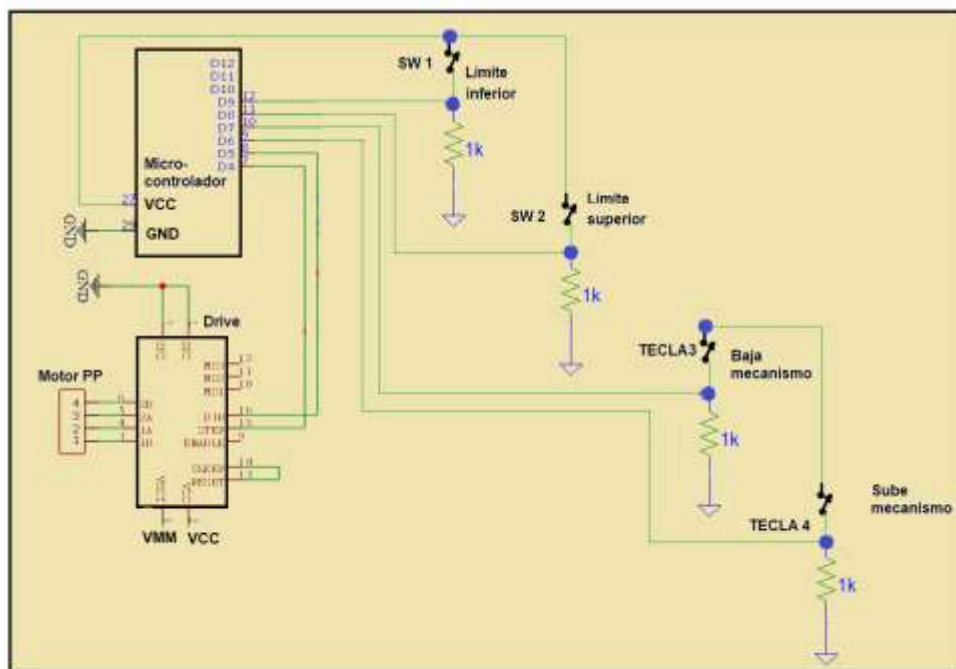
forma, se puede variar el valor del voltaje de referencia mencionado, mediante el teclado. En la figura 11, se muestra el arreglo utilizado para el ajuste del voltaje de referencia. Como se puede ver, por medio de un divisor de voltaje, formado por una resistencia de 1 kilo ohm y el potenciómetro digital, se forma el divisor de voltaje. Este voltaje es enviado a la terminal no inversora de un seguidor de voltaje, conformado por el ICL7611CP. El OPAM, envía la señal de voltaje seleccionado por el teclado hacia el puerto analógico A0 del microcontrolador. El incremento y decremento de la velocidad deseada, se realiza presionando las teclas INC Y DEC, conectadas a las terminales D2 y D13 del puerto digital. A su vez, las señales de control, para el potenciómetro digital, se envían a este elemento mediante las terminales D10, D11 y D12 del circuito microcontrolador, tal como se muestra en la figura 11. Finalmente, la señal PWM generada en función del voltaje de referencia, es enviada desde la terminal D3 del puerto digital, a la etapa de potencia, conformada por un transistor IRF540.



Fuente: elaboración propia

Figura 11. Potenciómetro digital y OPAM

En lo referente al sistema de control de posición de la hélice, para evitar algún daño al sistema mecánico, dado que esta podría subir o bajar excesivamente y por lo mismo podría dañarse o romper el recipiente y dañarse la muestra, se instalaron dos detectores de límite. Con estos elementos, se garantiza que el mecanismo no se desplace más allá de los límites permitidos, y así evitar algún daño al sistema. En la figura 12, se muestran estos interruptores, marcados como SW1 y SW2. Cuando no están activados estos sensores, normalmente se envía un valor bajo a las terminales 11 y 12 del microcontrolador. Una vez que se activa uno de los interruptores, se envía un valor alto, lo cual, en función del programa diseñado, el motor a pasos detiene su marcha. Para subir o bajar el mecanismo, se emplean las teclas marcadas con el número 3 y 4 en la figura 12. Se puede ver, que las teclas de posición, se conectan a las terminales 10 y 12 del microcontrolador.

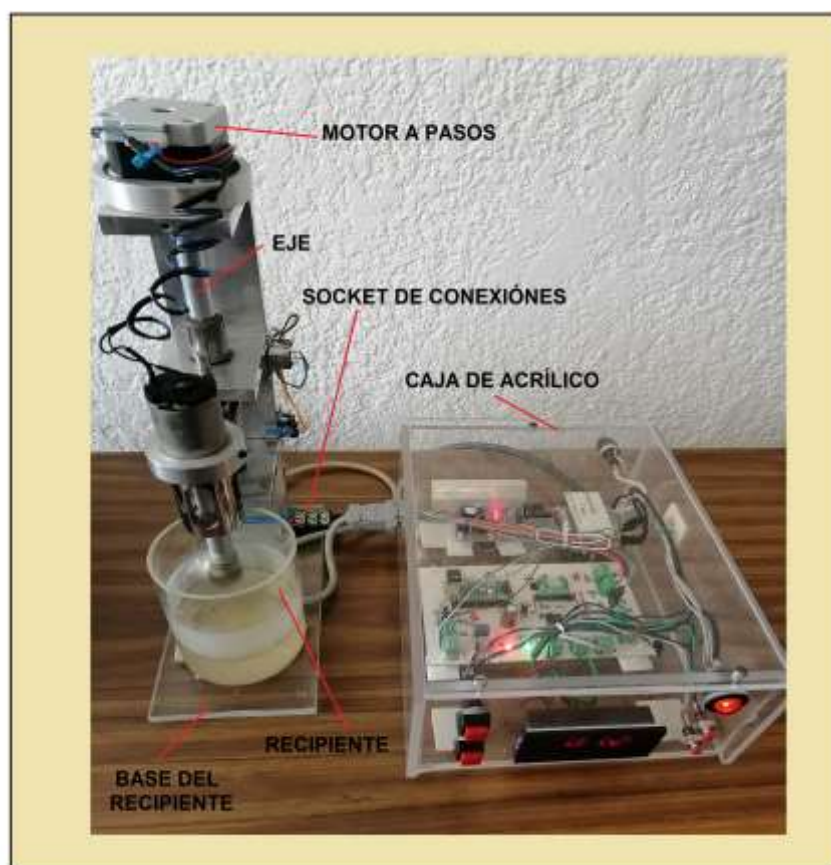


Fuente: elaboración propia

Figura 12. Sensores de límite y teclas de control de posición

3 Resultados

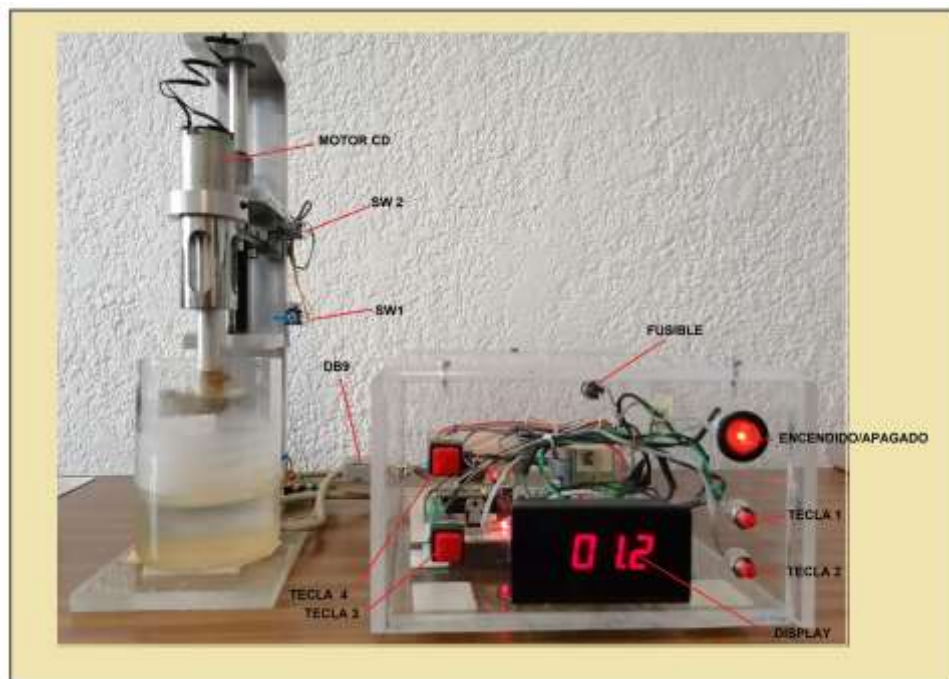
Como resultados de este diseño, se presentan en este apartado, algunas imágenes del prototipo logrado, además de los diagramas generales de la electrónica de control, así como de la fuente de alimentación utilizada para alimentar el sistema completo. También se presentan algunas imágenes del prototipo en funcionamiento. Por otro lado, en los anexos correspondientes, se recopila la lista de partes de las diferentes etapas del prototipo, así como los circuitos impresos diseñados y el programa grabado en la memoria del microcontrolador.



Fuente: elaboración propia

Figura 12. Prototipo del agitador

La estructura mecánica del prototipo, se montó sobre una base acrílica, de tal forma que se tuviera un área más amplia de soporte, para alojar el recipiente contenedor del fluido, ver figura 12. Por su lado, la electrónica de control se alojó en un gabinete acrílico, para su protección. Este gabinete también se utilizó de soporte para el teclado de control y de las conexiones hacia la parte mecánica. La conexión eléctrica desde el gabinete de control hacia el sistema mecánico, se llevó a cabo utilizando un conector tipo DB9, mientras que en el otro extremo, se empleó un socket de conexiones a base de tornillos.



Fuente: elaboración propia

Figura 13. Gabinete y botonera

En la figura 13, se muestra la disposición de los controles del agitador, así como algunos otros elementos del sistema, tales como motor de CD, interruptores de límite, encendido del sistema, protección contra corto circuito y conector DB9. El display LCD

mostrado en la figura, se agregó para monitoreo del voltaje de referencia que necesita el microcontrolador como referencia para generar la señal PWM, de tal manera que se tuviera un parámetro de comparación.



Fuente: elaboración propia

Figura 14. Distribución de elementos eléctricos del sistema

En la figura 14, se muestra como se distribuyeron los componentes eléctricos del sistema, tales como la tarjeta de control, la fuente de alimentación, el teclado, los interruptores de límite, los motores, los conectores y la protección contra corto circuito. En la figura 15 se muestra el sistema agitando un fluido a dos diferentes velocidades. Se puede apreciar que la altura de los meniscos que se forman, es diferente al seleccionar dos velocidades diferentes.



Fuente: elaboración propia

Figura 15. Agitación de un fluido de prueba a dos velocidades diferentes

Conclusiones

Los objetivos planteados en un principio, se lograron obtener, dado que la agitación de algunos fluidos de prueba, se llevó a cabo de una manera adecuada. Los resultados obtenidos, fue lo esperado por el usuario al realizar algunas pruebas iniciales. El sistema sube y baja la hélice de forma esperada, de esta manera se puede colocar y retirar el recipiente de forma fácil. Por su parte, la velocidad se pudo ajustar con los botones correspondientes, de forma correcta.

Agradecimientos

Se agradece al Mtro. Salvador Rodríguez Lozano y a la Mtra. Iliana Rodríguez Lozano por su invaluable apoyo en la elaboración y ensamble de los circuitos impresos que se diseñaron durante este desarrollo.

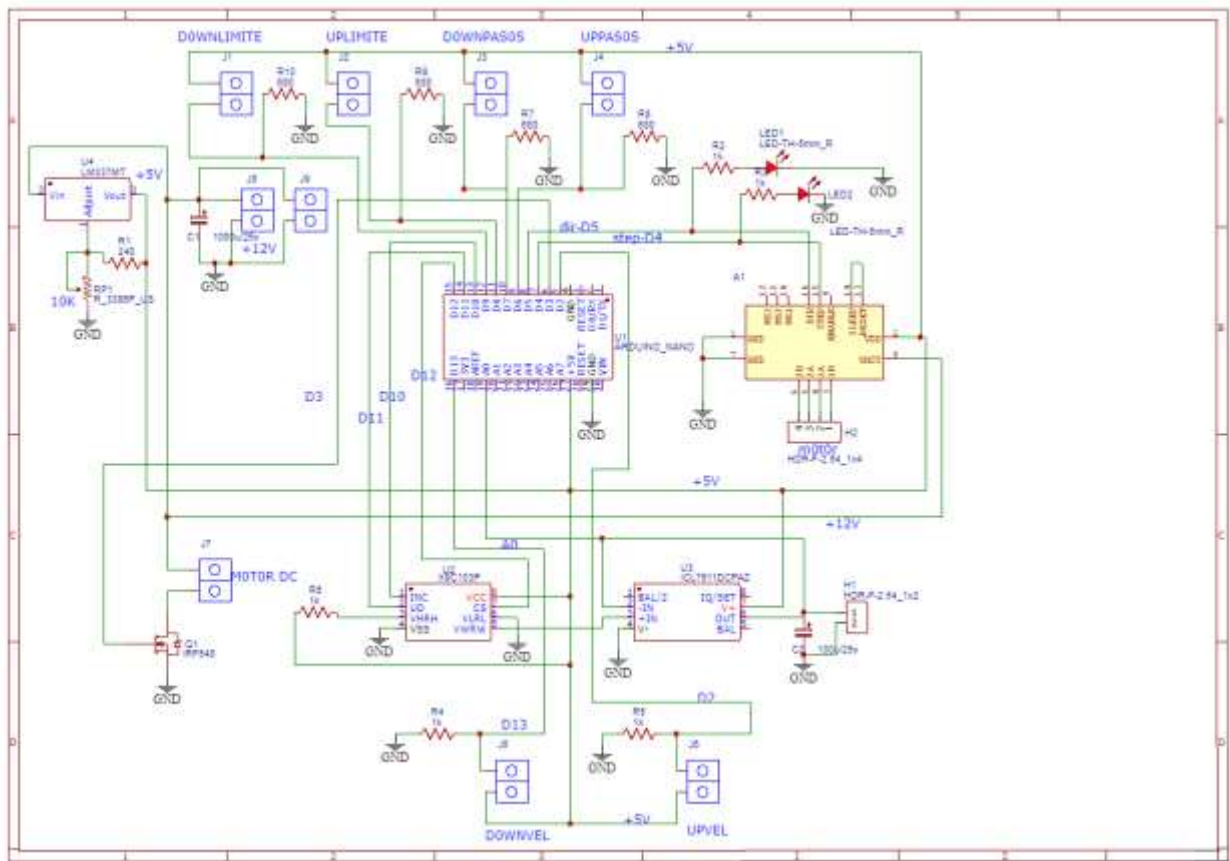
Referencias y Bibliografía

- [1]Damián J.R., Córdova M.S., SOMI37, Sistema para agitación de fluidos de baja viscosidad, 2023.
- [2]Electrónica práctica aplicada, Descripción del drive A4988, disponible en: <https://diarioelectronicohoy.com>, consultado (marzo, 2023).
- [3]Franco, S. (2015) Design with operational amplifiers and Analog Integrated circuits, 4th edition, USA, McGraw Hill Companies, Inc.
- [4]FSelectronics, Motor paso a paso Nema 17, disponible en: <http://fselectronics/products/motor-paso-a-paso-nema-17-17hs4401>, consultado (marzo, 2023).
- [5]Microchip, ATmega 328, disponible en: <http://microchip.co/en-us/product/atmega328>, consultado (febrero, 2023).

Apéndice A

Diagramas y circuitos impresos

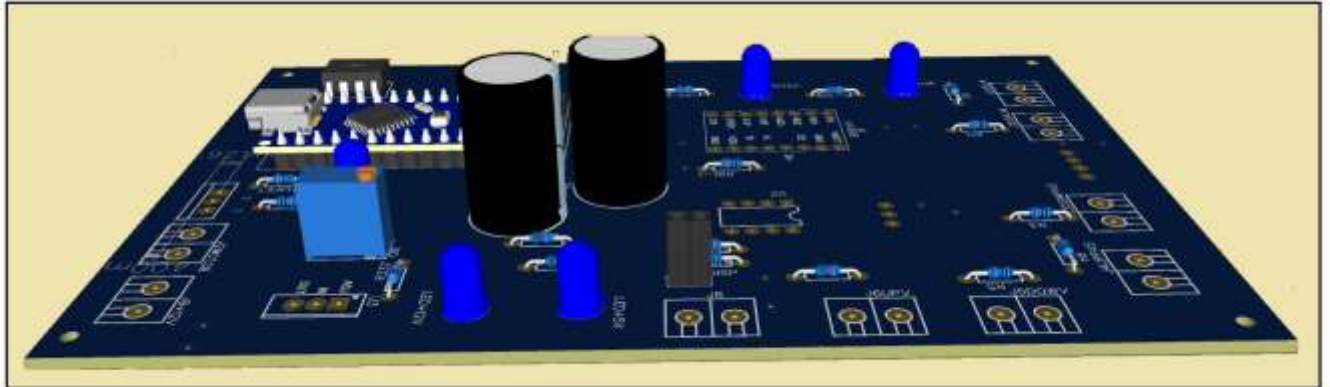
Circuito de control



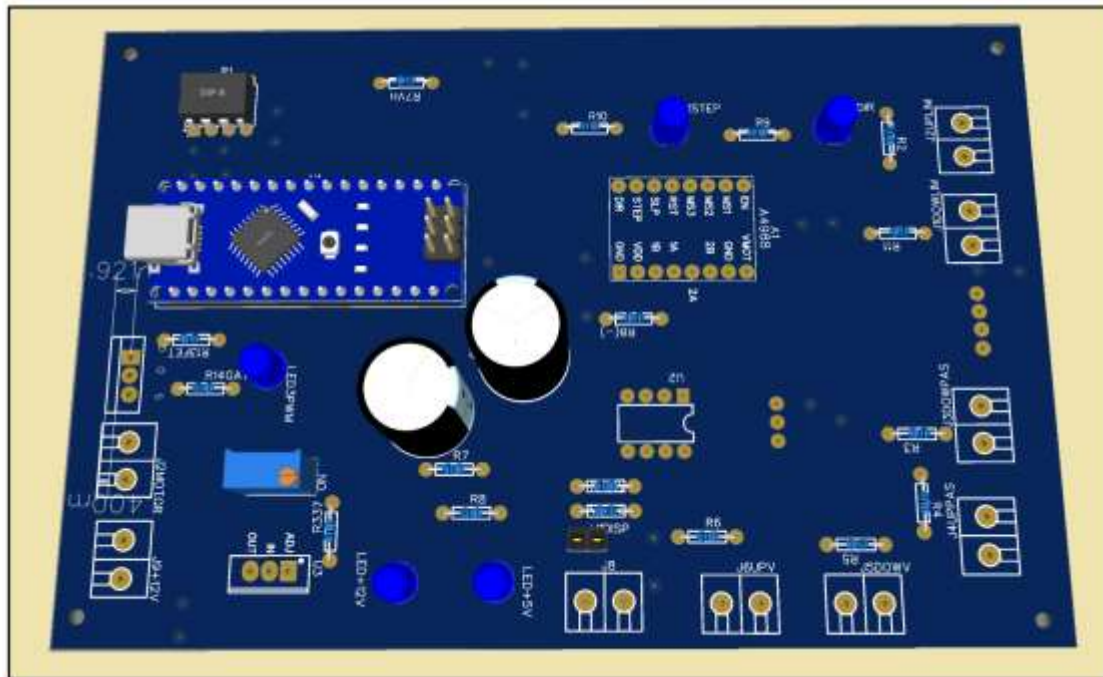
Fuente: elaboración propia

31

Vista 3D de la tarjeta de control

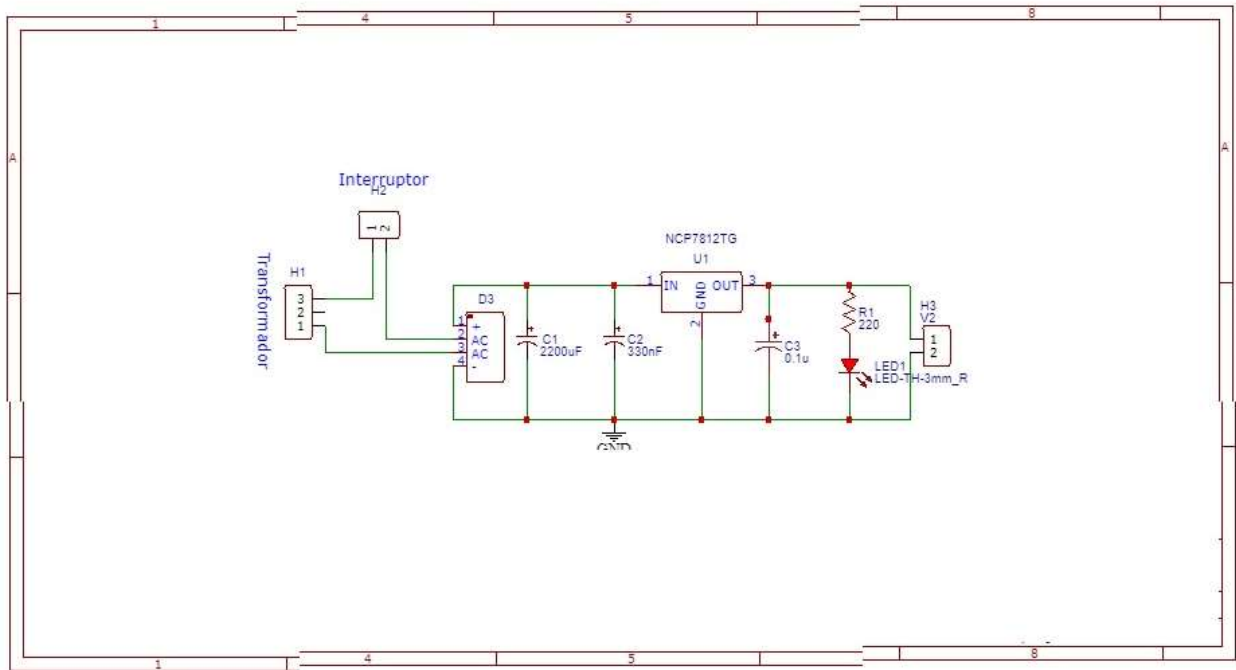


Fuente: elaboración propia



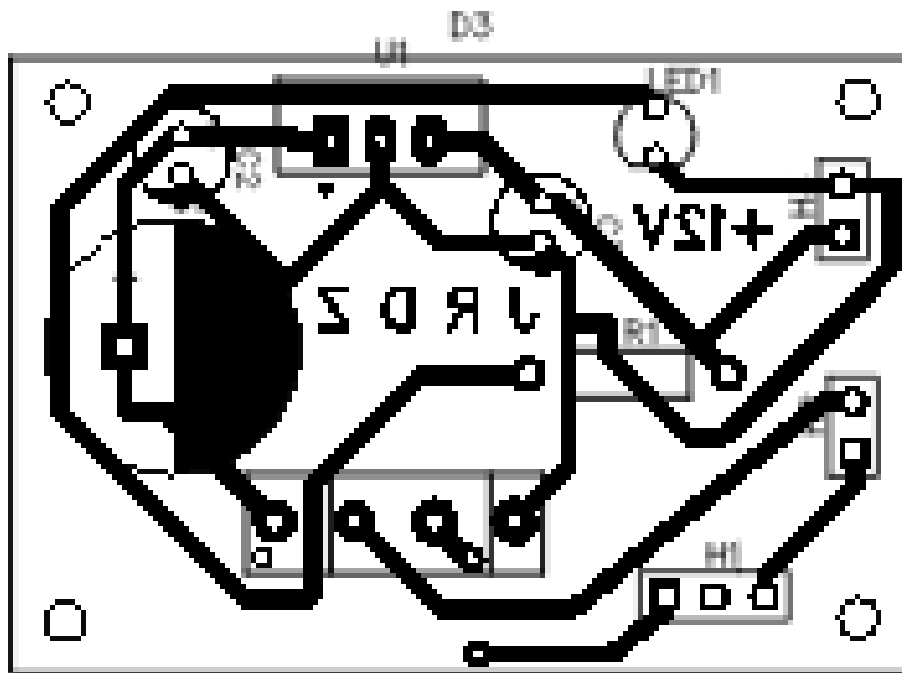
Fuente: elaboración propia

Circuito de fuente de alimentación



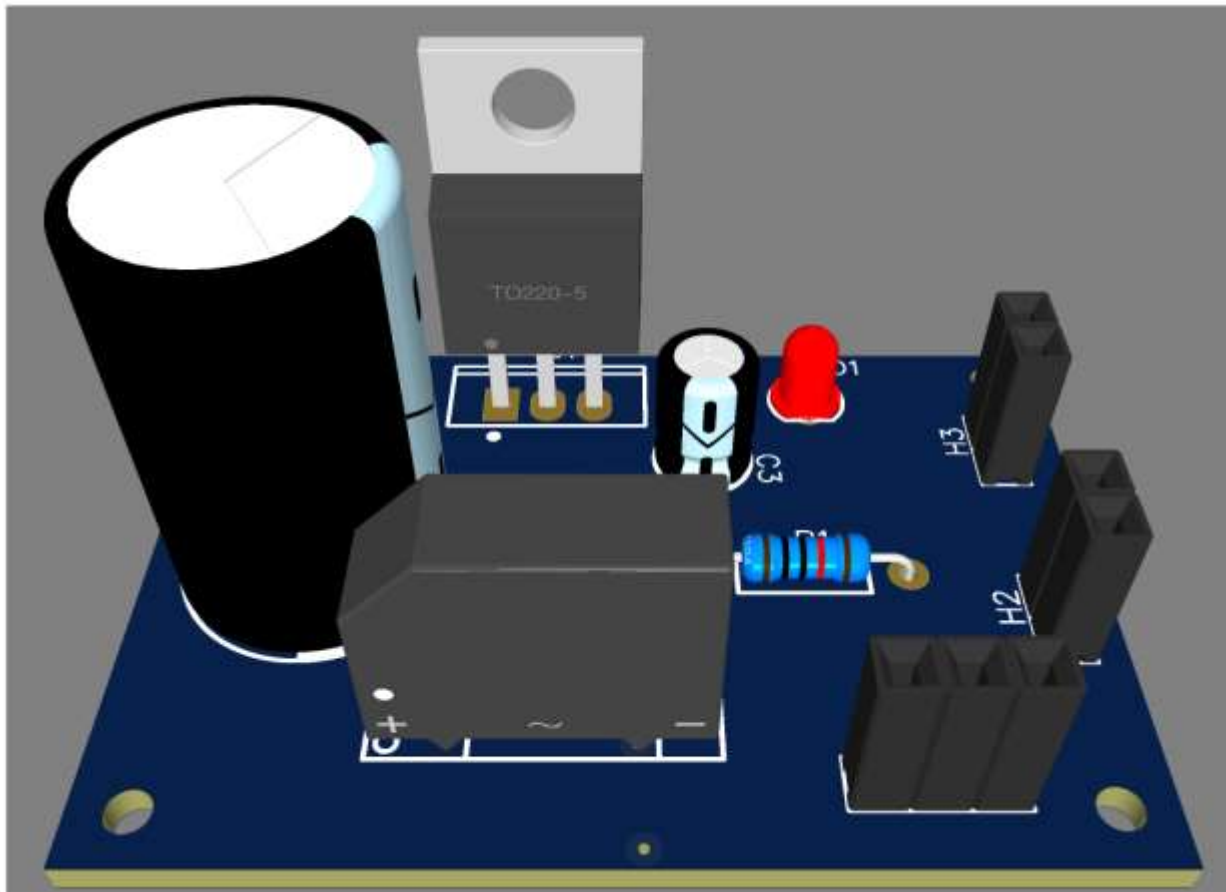
Fuente: elaboración propia

PCB de fuente de alimentación



Fuente: elaboración propia

Vista 3D de fuente de alimentación



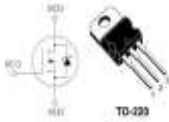
Fuente: elaboración propia

Apéndice B
Lista de material

Fuente de alimentación				
Cantidad	Componente	Características	Figura	Ubicación
1	Toma Corriente	Clavija toma corriente con cable		externo
1	Puente de diodos	Puente rectificador 200V, 2A		PCB fuente
1	Transformador	127VCA/24VCA, 3A		PCB fuente
1	Porta fusible	Tipo europeo de cartucho		Panel trasero gabinete de control
1	Fusible	Tipo europeo, 1A		Gabinete de control, panel trasero
1	Circuito Integrado	LM7812		PCB fuente
1	Capacitor	Capacitor electrolítico 2200 μ F/50V		PCB fuente
1	Capacitor	Capacitor poliéster 330nF/200V		PCB fuente
1	Capacitor	Capacitor poliéster 0.1 μ F/200V		PCB fuente

1	Resistencia	Resistencias 220Ω/1/2W		PCB fuente
1	Led	Leds 5mm		PCB fuente
1	interruptor	Interruptor con luz led, 10A,127VAC		Gabinete de control, panel frontal
1	terminales	Conector jst kf2510, 2.54mm 3 pines recto tipo molex, macho/hembra		PCB fuente
3	terminales	Conector jst kf2510, 2.54mm 2 pines recto tipo molex, macho/hembra		PCB fuente
1	Tablilla fenólica	(10x10cm)		PCB fuente
1	Disipador	Disipador aluminio 5cm		PCB fuente

Fuente: elaboración propia

Tarjeta de control				
Cantidad	Componente	Características	Figura	Ubicación
1	Tarjeta A. Nano	Tarjeta Nano(ATmega328)		PCB control
1	Potenciómetro digital	Pot. Digital 100Kohms		PCB control
1	Drive	Drive A4988		PCB control
9	Terminales (clemas)	Terminal con 2 tornillos,8Amperes,300VCA, 125grados máximo		PCB control
1	Transistor	IRF540		PCB control
1	Circuito Integrado	LM317		PCB control
1	Circuito Integrado	ICL7611		PCB control
1	Motor paso a paso	Motor bipolar NEMA 17		Soporte mecánico
1	Motor CD	Motor con escobillas de CD a 12V		Soporte mecánico

2	switch	Sensores de límite		Soporte mecánico
1	switch	Switch normalmente abierto cuadrado(push button)		Panel frontal, gabinete de control
1	switch	Switch normalmente abierto redondo(push button)		Panel frontal, gabinete de control
2	Capacitor	Capacitor electrolítico 1000 μ F/25V		PCB fuente
5	Resistencia	Resistencias 1k Ω /1/2W		PCB fuente
4	Resistencia	Resistencias 680k Ω /1/2W		PCB control
1	Resistencia	Resistencias 240 Ω /1/2W		PCB control
1	Potenciómetro	Trimpot 10vueltas 100K Ω		PCB control
2	Led	Leds 5mm		PCB fuente
1	Tablilla fenólica	(15x10cm)		PCB fuente

Fuente: elaboración propia

Alambrado (material para el alambrado) y adicionales				
Cantidad	Componente	Características	Figura	Ubicación
1	Conector	Culca de conexión(9 conectores)		Base mecanismo
1	Cable DB9 Hembra	1m, cable 9hilos con conector DB9 Hembra		Conexión
1	Conector DB9 Macho	Conector DB9 Macho		Gabinete de Control panel lateral
1	Cable colores	Cable unipolar, Calibre 22 AWG (1m)rojo, negro		
1	Cable señal	Cable 3 hilos blindado calibre 26AWG(1 m)		
1	Thermofit	Tubo termoretráctil 3/32(1m)		
1	Termofit	Tubo termoretráctil 3/8(1m)		
1	Soldadura	Soldadura de estaño 40/60 (1 m)		

1	Pasta	Pasta para soldadura (1 lata)		
1	Acrílico	Lámina de acrílico de 50x50 cm/0.6cm		
1	Pegamento	100ml AD CRYL		
8	Soportes	Soportes plásticos para PCB auto adhesivos(6)		

Fuente: elaboración propia

Apéndice C

Hojas de datos

A4988

DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

Features and Benefits

- Low $R_{DS(ON)}$ outputs
- Automatic current decay mode detection/selection
- Mixed and Slow current decay modes
- Synchronous rectification for low power dissipation
- Internal UVLO
- Crossover-current protection
- 3.3 and 5 V compatible logic supply
- Thermal shutdown circuitry
- Short-to-ground protection
- Shorted load protection
- Five selectable step modes: full, $1/2$, $1/4$, $1/8$, and $1/16$

Package:

28-contact QFN
with exposed thermal pad
5 mm × 5 mm × 0.90 mm
(ET package)



Approximate size

Description

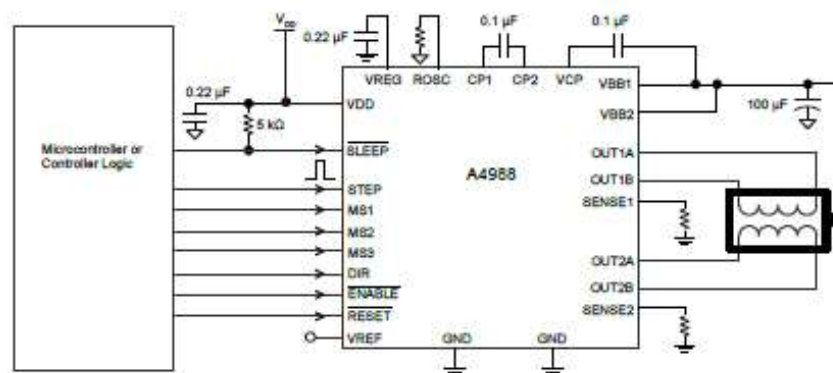
The A4988 is a complete microstepping motor driver with built-in translator for easy operation. It is designed to operate bipolar stepper motors in full-, half-, quarter-, eighth-, and sixteenth-step modes, with an output drive capacity of up to 35 V and ≈2 A. The A4988 includes a fixed off-time current regulator which has the ability to operate in Slow or Mixed decay modes.

The translator is the key to the easy implementation of the A4988. Simply inputting one pulse on the STEP input drives the motor one microstep. There are no phase sequence tables, high frequency control lines, or complex interfaces to program. The A4988 interface is an ideal fit for applications where a complex microprocessor is unavailable or is overburdened.

During stepping operation, the chopping control in the A4988 automatically selects the current decay mode, Slow or Mixed. In Mixed decay mode, the device is set initially to a fast decay for a proportion of the fixed off-time, then to a slow decay for the remainder of the off-time. Mixed decay current control results in reduced audible motor noise, increased step accuracy, and reduced power dissipation.

Continued on the next page...

Typical Application Diagram



4988-DS, Rev. 5



ATmega328P

8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System
Programmable Flash

DATASHEET

Features

- High performance, low power AVR® 8-bit microcontroller
- Advanced RISC architecture
 - 131 powerful instructions – most single clock cycle execution
 - 32 × 8 general purpose working registers
 - Fully static operation
 - Up to 16MIPS throughput at 16MHz
 - On-chip 2-cycle multiplier
- High endurance non-volatile memory segments
 - 32K bytes of in-system self-programmable flash program memory
 - 1Kbytes EEPROM
 - 2Kbytes internal SRAM
 - Write/erase cycles: 10,000 flash/100,000 EEPROM
 - Optional boot code section with independent lock bits
 - In-system programming by on-chip boot program
 - True read-while-write operation
 - Programming lock for software security
- Peripheral features
 - Two 8-bit Timer/Counters with separate prescaler and compare mode
 - One 16-bit Timer/Counter with separate prescaler, compare mode, and capture mode
 - Real time counter with separate oscillator
 - Six PWM channels
 - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
 - Temperature measurement
 - Programmable serial USART
 - Master/slave SPI serial interface
 - Byte-oriented 2-wire serial interface (Philips I²C compatible)
 - Programmable watchdog timer with separate on-chip oscillator
 - On-chip analog comparator
 - Interrupt and wake-up on pin change
- Special microcontroller features
 - Power-on reset and programmable brown-out detection
 - Internal calibrated oscillator
 - External and internal interrupt sources
 - Six sleep modes: Idle, ADC noise reduction, power-save, power-down, standby, and extended standby

APPLICATION NOTES
AVAILABLE
AN42 • AN44-48 • AN50 • AN52 • AN53 • AN71 • AN73



Terminal Voltage $\pm 5V$, 100 Taps

X9C102/103/104/503

E²POT™ Nonvolatile Digital Potentiometer

FEATURES

- Compatible with X9C102/103/104/503
- Low Power CMOS
 - $V_{CC} = 5V$
 - Active Current, 3mA Max
 - Standby Current, 500 μA Max
- 99 Resistive Elements
 - Temperature Compensated
 - $\pm 20\%$ End to End Resistance Range
- 100 Wiper Tap Points
 - Wiper Positioned via Three-Wire Interface
 - Similar to TTL Up/Down Counter
 - Wiper Position Stored in Nonvolatile Memory and Recalled on Power-Up
- 100 Year Wiper Position Data Retention
- X9C102 = 1K Ω
- X9C103 = 10K Ω
- X9C503 = 50K Ω
- X9C104 = 100K Ω

DESCRIPTION

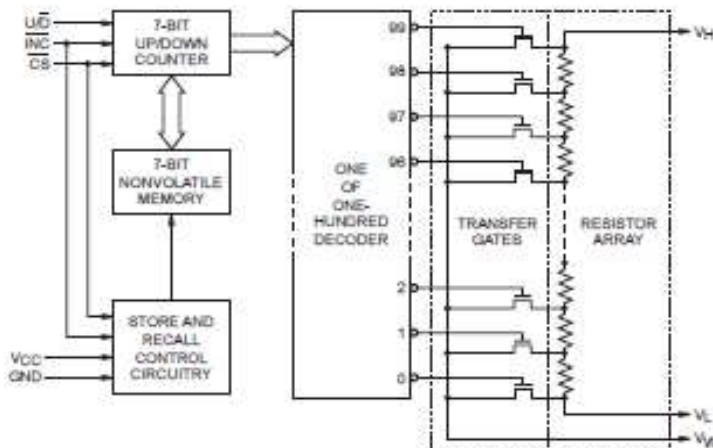
The Xicor X9C102/103/104/503 is a solid state nonvolatile potentiometer and is ideal for digitally controlled resistance trimming.

The X9C102/103/104/503 is a resistor array composed of 99 resistive elements. Between each element and at either end are tap points accessible to the wiper element. The position of the wiper element is controlled by the CS, U/D, and INC inputs. The position of the wiper can be stored in nonvolatile memory and then be recalled upon a subsequent power-up operation.

The resolution of the X9C102/103/104/503 is equal to the maximum resistance value divided by 99. As an example, for the X9C503 (50K Ω) each tap point represents 505 Ω .

All Xicor nonvolatile memories are designed and tested for applications requiring extended endurance and data retention.

FUNCTIONAL DIAGRAM

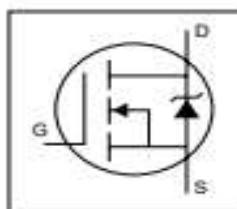


E²POT™ is a trademark of Xicor, Inc.
 ©Xicor, Inc. 1994, 1995 Patents Pending
 2883-2-4 9/18/96 T2/03250 SH

IRF540N

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



$$V_{DS} = 100V$$

$$R_{DS(on)} = 44m\Omega$$

$$I_D = 33A$$

Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



TO-220AB

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	33	A
I_D @ $T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	23	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	110	
P_D @ $T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	130	W
	Linear Derating Factor	0.87	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AS}	Avalanche Current ②	16	A
E_{AS}	Repetitive Avalanche Energy ③	13	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ④	7.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to +175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lb-in (1.1N-m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.15	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

www.irf.com

1

03/13/01

LM117/LM317A/LM317 3-Terminal Adjustable Regulator

General Description

The LM117 series of adjustable 3-terminal positive voltage regulators is capable of supplying in excess of 1.5A over a 1.2V to 37V output range. They are exceptionally easy to use and require only two external resistors to set the output voltage. Further, both line and load regulation are better than standard fixed regulators. Also, the LM117 is packaged in standard transistor packages which are easily mounted and handled.

In addition to higher performance than fixed regulators, the LM117 series offers full overload protection available only in IC's. Included on the chip are current limit, thermal overload protection and safe area protection. All overload protection circuitry remains fully functional even if the adjustment terminal is disconnected.

Normally, no capacitors are needed unless the device is situated more than 6 inches from the input filter capacitors in which case an input bypass is needed. An optional output capacitor can be added to improve transient response. The adjustment terminal can be bypassed to achieve very high ripple rejection ratios which are difficult to achieve with standard 3-terminal regulators.

Besides replacing fixed regulators, the LM117 is useful in a wide variety of other applications. Since the regulator is "floating" and sees only the input-to-output differential voltage, supplies of several hundred volts can be regulated as long as the maximum input to output differential is not exceeded, i.e., avoid short-circuiting the output.

Also, it makes an especially simple adjustable switching regulator, a programmable output regulator, or by connecting a fixed resistor between the adjustment pin and output, the LM117 can be used as a precision current regulator. Supplies with electronic shutdown can be achieved by clamping

the adjustment terminal to ground which programs the output to 1.2V where most loads draw little current.

For applications requiring greater output current, see LM150 series (3A) and LM138 series (5A) data sheets. For the negative complement, see LM137 series data sheet.

LM117 Series Packages and Power Capability

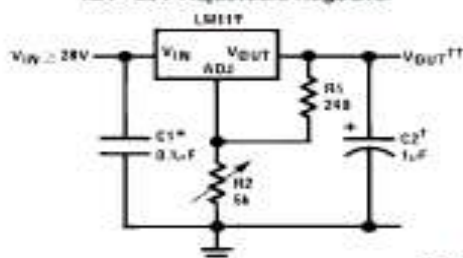
Part Number Suffix	Package	Rated Power Dissipation	Design Load Current
K	TO-3	20W	1.5A
H	TO-39	2W	0.5A
T	TO-220	20W	1.5A
E	LOC	2W	0.5A
S	TO-263	4W	1.5A

Features

- Guaranteed 1% output voltage tolerance (LM317A)
- Guaranteed max. 0.01%/V line regulation (LM317A)
- Guaranteed max. 0.3% load regulation (LM117)
- Guaranteed 1.5A output current
- Adjustable output down to 1.2V*
- Current limit constant with temperature
- P+ Product Enhancement tested
- 80 dB ripple rejection
- Output is short-circuit protected

Typical Applications

1.2V–25V Adjustable Regulator



TL7149003-1

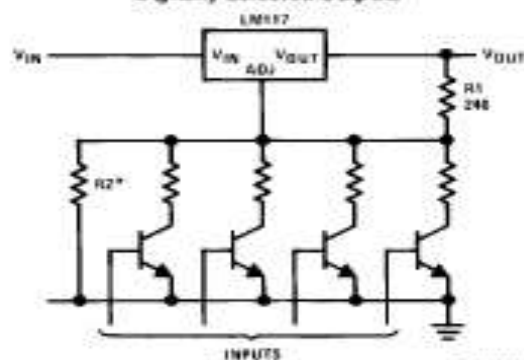
Full output current not available at high input-output voltages.

*Needed if device is more than 6 inches from filter capacitors.

†Optional—improves transient response. Output capacitors in the range of 1μF to 1000μF of aluminum or tantalum electrolytic are commonly used to provide improved output impedance and rejection of transients.

$$1.1V_{OUT} = 1.25V \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) + I_{ADJ}(R2)$$

Digitally Selected Outputs



TL7149000-2

*Sets maximum V_OUT

LM140A/LM140/LM340A/LM340/LM7800C Series 3-Terminal Positive Regulators

General Description

The LM140A/LM140/LM340A/LM340/LM7800C monolithic 3-terminal positive voltage regulators employ internal current-limiting, thermal shutdown and safe-area compensation, making them essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1.0A output current. They are intended as fixed voltage regulators in a wide range of applications including local (on-card) regulation for elimination of noise and distribution problems associated with single-point regulation. In addition to use as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable output voltages and currents.

Considerable effort was expended to make the entire series of regulators easy to use and minimize the number of external components. It is not necessary to bypass the output, although this does improve transient response. Input bypassing is needed only if the regulator is located far from the filter capacitor of the power supply.

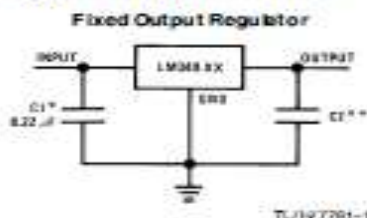
The 5V, 12V, and 15V regulator options are available in the steel TO-3 power package. The LM340A/LM340/LM7800C series is available in the TO-220 plastic power package, and the LM7805 and LM7812 are also available in the surface-mount TO-263 package.

Features

- Complete specifications at 1A load
- Output voltage tolerances of $\pm 2\%$ at $T_J = 25^\circ\text{C}$ and $\pm 4\%$ over the temperature range (LM140A/LM340A)
- Line regulation of 0.01% of V_{OUT}/V of ΔV_{IN} at 1A load (LM140A/LM340A)
- Load regulation of 0.3% of V_{OUT}/A (LM140A/LM340A)
- Internal thermal overload protection
- Internal short-circuit current limit
- Output transistor safe area protection
- P+ Product Enhancement tested

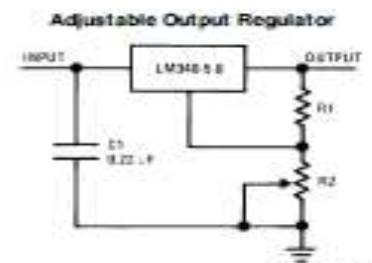
Device	Output Voltages	Packages
LM140A/LM140	5, 12, 15	TO-3 (K)
LM340A/LM340	5, 12, 15	TO-3 (K), TO-220 (T)
LM7800C	5, 6, 8, 12, 15, 18, 24	TO-220 (T), TO-263 (S) (5V and 12V only)

Typical Applications

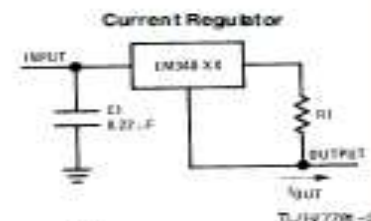


*Required if the regulator is located far from the power supply filter.

**Although no output capacitor is needed for stability, it does help transient response. (If needed, use 0.1 µF, ceramic type.)



$V_{OUT} = 5V + (5V/R1 + I_Q) R2$ $5V/R1 > 3 I_Q$
load regulation (L_R) = $[(R1 + R2)/R1] (I_Q \text{ of LM340-5})$



$I_{OUT} = \frac{V_{ZD}}{R1} + I_Q$
 $\Delta I_Q = 1.3 \text{ mA over line and load changes}$

Apéndice D

Programa del microcontrolador

```
#define STEP 4    // pin STEP (pin 15) de A4988 a pin (D4)

#define DIR 5     // pin DIR (pin 16) de A4988 a pin (D5)

bool UP=6;

bool UPFIN=8;

bool DOWN=7;

bool DOWNFIN=9;

#include <DigiPotX9Cxxx.h>

int butpup=2;

int butpdow=13;

DigiPot pot(10,11,12); //cambiar 2x9,3x10,4x11

#define LED 3

int BRILLO;

void setup() {

  pinMode(STEP, OUTPUT); // pin 4 como salida

  pinMode(DIR, OUTPUT); // pin 5 como salida

  pinMode(UP, INPUT);
```

```

pinMode(UPFIN,INPUT);

pinMode(DOWN, INPUT);

pinMode(DOWNFIN,INPUT);

pinMode(butpup,INPUT);//pin 2digital

pinMode(butpdow,INPUT);// pin 13 digital

pinMode(LED,OUTPUT);

}

void loop() // ciclo base

{

delay (1);

UP=digitalRead(6);

UPFIN=digitalRead(8);

DOWN=digitalRead(7);

DOWNFIN=digitalRead(9);

if ((UP==1)&&(UPFIN==0)) {

digitalWrite(DIR, HIGH);

for(int i = 0; i < 100; i++){ // 200 pasos para motor de 0.9 grados de ángulo de paso

digitalWrite(STEP, HIGH);

```

```

delay(1);

digitalWrite(STEP, LOW);

delay(1);

}

}

if ((DOWN==1) && (DOWNFIN==0)){

digitalWrite(DIR, LOW);    // giro en sentido opuesto

for(int i = 0; i < 100; i++){

digitalWrite(STEP, HIGH);

delay(1);

digitalWrite(STEP, LOW);

delay(1);

}

}ese {

if (digitalRead(butpup)==HIGH){

pot.increase(1);

BRILLO = analogRead(A0);

analogWrite(LED, BRILLO/4);

```

```
delay(10);

}

if (digitalRead(butpdow)==HIGH){

pot.decrease(1);

BRILLO = analogRead(A0);

analogWrite(LED, BRILLO/4);

delay(10);

}

else

{

delay(10);

}

}
```