

**INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL CONTROL ANGULAR PARA MESAS
DE MECANIZADO.**

Por:

David Norbey Almeyda Reyes



**Facultad de Ingeniería Mecatrónica
División de Ingenierías y Arquitectura
Universidad Santo Tomás
Bucaramanga, 29 de Abril de 2025**

**INSTRUCTIVO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL CONTROL ANGULAR PARA MESAS
DE MECANIZADO.**

Para optar el título de
Ingeniero Mecatrónico

Por:
David Norbey Almeyda Reyes.

Aprobado por:
Ing. Luis Rodrigo Mancilla López.
Director

Ing. Carlos Daniel Pimentel Díaz.
Codirector

**Facultad de Ingeniería Mecatrónica
División de Ingenierías y Arquitectura
Universidad Santo Tomás
Bucaramanga, 29 de Abril de 2025**

RESUMEN

El presente proyecto consiste en el diseño e implementación de un sistema automatizado de control angular para una mesa de mecanizado inclinable. A grandes rasgos, se trata de un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) aplicado a una operación de control mecánico de precisión, en el cual se integran funciones de supervisión, adquisición de datos, procesamiento en tiempo real y control sobre un sistema físico.

La inclinación de la mesa se logra mediante dos mecanismos de desplazamiento lineal sincronizados, accionados por motores eléctricos controlados mediante señales PWM generadas por un microcontrolador Arduino. Cada uno de estos actuadores está conectado a la estructura de la mesa a través de un sistema de eslabones mecánicos, lo que permite transformar el desplazamiento lineal de los motores en un movimiento angular controlado y preciso de la superficie de trabajo.

La medición del ángulo real alcanzado por la mesa se realiza mediante un goniómetro digital, compuesto por un sensor inercial MPU6050 y un microcontrolador ESP32-C3 mini. Este subsistema de sensado calcula en tiempo real el ángulo de inclinación utilizando datos de aceleración y velocidad angular, y transmite dicha información mediante un enlace inalámbrico Bluetooth hacia la unidad central de control. Esta unidad está representada por una Raspberry Pi 4, que cumple la función de supervisión y procesamiento del sistema.

La Raspberry Pi ejecuta una interfaz gráfica desarrollada en Python, la cual permite al operador visualizar el ángulo actual de la mesa, establecer un valor de inclinación deseado y monitorear en tiempo real la respuesta del sistema. A partir de los datos recibidos del goniómetro, la interfaz determina la diferencia entre el ángulo objetivo y el actual y, en función de este error, genera comandos de corrección que son enviados al Arduino a través de una conexión serial USB. El Arduino, a su vez, ajusta el movimiento de los motores mediante modulación por ancho de pulso (PWM), cerrando así el lazo de control.

El sistema destaca por su arquitectura modular y distribuida, que separa claramente las funciones de sensado, procesamiento, visualización y accionamiento. Además, la implementación de una interfaz amigable permite una interacción sencilla y segura por parte del operador, facilitando el ajuste preciso de la inclinación de la mesa en aplicaciones de mecanizado donde se requiere alta exactitud. La integración de tecnologías de bajo costo y alto rendimiento, como el ESP32, la Raspberry Pi y el sensor MPU6050, convierte este sistema en una solución robusta, escalable y adaptable a diversos entornos industriales.

ÍNDICE

Introducción	pág. 4
Descripción del Sistema	pág. 4
Especificaciones Técnicas	pág. 5
Programación	pág. 13
Operación del Sistema	pág. 14
Mantenimiento Preventivo	pág. 22
Mantenimiento Correctivo	pág. 23
Conclusión	pág. 24

INTRODUCCIÓN

En el mundo del mecanizado moderno, la precisión en el posicionamiento y la orientación de las piezas es fundamental para asegurar la calidad del producto final. Las mesas inclinables que se utilizan en los centros de mecanizado son especialmente útiles, ya que permiten realizar cortes, perforaciones, refrentados, etc., en ángulos específicos, lo que amplía considerablemente las posibilidades de operación. Sin embargo, ajustar estas mesas de forma manual puede ser impreciso, lento y propenso a errores, sobre todo cuando se requieren configuraciones angulares diferentes durante el mismo proceso de fabricación.

Para mejorar la precisión, la repetibilidad y la eficiencia operativa, se ha desarrollado un sistema automatizado de control angular para una mesa de mecanizado inclinable. Este sistema permite ajustar y supervisar electrónicamente el ángulo de inclinación gracias a la integración de tecnologías de sensado, procesamiento y control. La propuesta combina componentes de hardware asequibles con herramientas de software específicas, ofreciendo así una solución robusta y adaptable a entornos industriales reales.

El desarrollo se concibe, en términos generales, como un sistema SCADA adaptado para su uso en una planta. Con este enfoque, se logra supervisar en tiempo real el ángulo de inclinación mediante un goniómetro digital, controlar automáticamente el movimiento con actuadores eléctricos y facilitar la interacción directa con el operador a través de una interfaz gráfica intuitiva.

Esta introducción establece el contexto para el presente instructivo de operación y mantenimiento, cuyo objetivo es documentar el funcionamiento general del sistema, detallar su arquitectura técnica y establecer los procedimientos necesarios para garantizar un uso seguro, eficiente y prolongado del dispositivo en condiciones de trabajo.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

A. Visión general del sistema

Sistema de movimiento lineal que empuja y tira al mismo tiempo; cada acción se ejecuta desde un lado de la mesa y se invierte según el sentido del ángulo objetivo. El sistema está compuesto por tres partes bien diferenciadas y separadas: control, adquisición de datos y ejecución de tareas.

B. Componentes principales

Las tres etapas se descomponen de la siguiente manera:

- Control: Panel de color blanco que contiene pantalla, teclado, interruptor de encendido/apagado y un paro de emergencia.
- Adquisición de datos: Goniómetro digital basado en un MPU6050, una ESP32-C3, una batería LiPo y un cargador de batería TP4056.
- Ejecución de tareas: Motores de escobillas con salida de alto torque, varilla roscada, tuerca de desplazamiento, rodamientos lineales y estructura construida en acero inoxidable en su totalidad.

C. Cómo interactúan esos componentes

La Raspberry Pi 4 actúa como el centro de control principal del prototipo. Desde este dispositivo se gestiona todo el funcionamiento del sistema, estableciendo comunicación con los distintos módulos mediante diversos medios y protocolos.

Uno de los módulos conectados es el sistema de adquisición de datos, en adelante denominado goniómetro, el cual transmite información mediante una conexión Bluetooth. Esta comunicación se realiza a través de un servidor Bluetooth configurado en la Raspberry Pi, que utiliza una dirección y un identificador único (UUID) para garantizar que solo la ESP32-C3 pueda acceder al canal de datos.

El propósito de esta conexión es permitir una retroalimentación en tiempo real de los ángulos medidos, asegurando que el sistema de control pueda ajustar o supervisar la inclinación de forma precisa y continua.

La conexión entre el centro de control y la parte operativa se establece a través de un microcontrolador ATmega2560, con el cual la Raspberry Pi interactúa mediante comunicación serial USB.

El microcontrolador se encarga de controlar los actuadores utilizando drivers BTS7960, que requieren dos señales PWM por actuador para definir el sentido de giro y la velocidad de movimiento.

D. Tecnologías utilizadas

El prototipo hace uso de tecnologías basadas en protocolos de comunicación como USB, Bluetooth e I2C, los cuales ofrecen robustez y confiabilidad en la transmisión de datos. Estos protocolos permiten una integración eficiente entre los distintos componentes del sistema, asegurando un funcionamiento estable y preciso.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

El sistema de posicionamiento angular está diseñado para ser lo menos invasivo posible con el centro de mecanizado donde será instalado. Esto implica que solo utilizará de este el espacio físico, ya que aspectos importantes como la alimentación, el cableado y otros elementos están concebidos para ser autónomos. En el caso del cableado, está pensado para sobreponerse a la estructura existente, y en cuanto a la alimentación eléctrica, el sistema cuenta con su propia fuente de energía.

Dicha fuente centralizada entrega un voltaje de salida de 12 V en corriente continua y recibe como entrada corriente alterna de 110 V, proveniente de la red local colombiana. Esta fuente se encarga de alimentar los drivers de los motores, los motores propiamente dichos, y la etapa de potencia de las tarjetas optoacopladoras integradas en el sistema.

La Raspberry Pi, o centro de control, está alimentada por su propio transformador, el cual garantiza la corriente necesaria tanto para su funcionamiento como para los periféricos que se alimentan desde ella, como la pantalla, el Arduino y la etapa de control de las tarjetas optoacopladoras.

Sistema optoacoplador

Las tarjetas optoacopladoras están ubicadas entre las salidas PWM del Arduino y las entradas PWM de los drivers. Su finalidad es aislar completamente la etapa de control de la etapa de potencia, evitando daños a componentes sensibles al ruido electromagnético, comúnmente generado por los motores y las fuentes centralizadas.

El diseño de estas tarjetas se basa en el optoacoplador de referencia PC817, el cual es activado mediante la modulación por ancho de pulso (PWM) generada por el ATmega2560. Esta señal es traducida, pero ahora con el voltaje de la fuente, que se reduce de 12 V a 5 V mediante un regulador.

El diseño de la tarjeta fue simulado en Proteus, y su esquema se muestra en la Imagen 1.

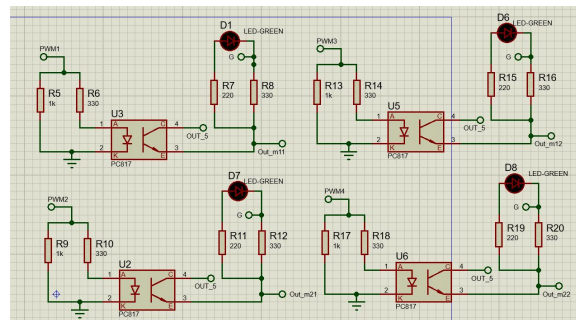


Imagen 1 Esquema de tarjeta opto-acoplador, imagen del autor

Como se puede asumir a partir de la Imagen 1, solo se requiere una de estas tarjetas, ya que su diseño permite manejar cuatro canales. Cada driver, encargado de controlar un motor, necesita dos canales, y como se mencionó anteriormente, el sistema cuenta con dos actuadores.

Sin embargo, se hace referencia a estas tarjetas en plural, ya que el sistema ha sido concebido con la posibilidad de ampliarse para controlar más actuadores, específicamente aquellos destinados al movimiento de una segunda mesa de grados.

En el montaje real, es posible encontrar estas tarjetas instaladas una sobre otra, ubicadas en la esquina superior derecha (viendo la carcasa de forma frontal). Para conocer su apariencia física, se puede consultar la Imagen 2.

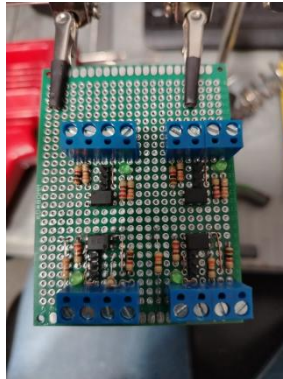


Imagen 2 Tarjeta opto-acoplador, imagen del autor

Drivers de control

Luego de salir del microcontrolador y pasar por el optoacoplador, la señal PWM, ahora reinterpretada, es entregada a los drivers BTS7960, los cuales operan con una entrada de 12V y cuentan con borneras de salida capaces de manejar motores de hasta 24 V. Se eligieron estos drivers debido a su alta capacidad de corriente, que alcanza hasta 43 A.

Cada driver cuenta con ocho pines macho para su control:

- Pines 1 y 2: Alimentación del driver (5 V, GND).
- Pines 3 y 4: Señales de detección de corriente (opcional en esta aplicación).
- Pines 5 y 6: Activación del sentido de giro. Para esta aplicación, ambos pines se conectaron a 5 V directamente (mediante un puente), de modo que siempre estén activos.
- Pines 7 y 8: Entradas PWM. Solo uno de estos pines debe recibir una señal con ciclo de trabajo distinto de cero, mientras el otro debe mantenerse en cero para garantizar el funcionamiento correcto del driver.

En la etapa actual del proyecto, se utilizan dos drivers, uno por actuador. Sin embargo, el sistema ha sido diseñado para permitir la expansión a dos motores adicionales, anticipando aplicaciones futuras.

Para conocer visualmente estos drivers, consultar la Imagen 3.

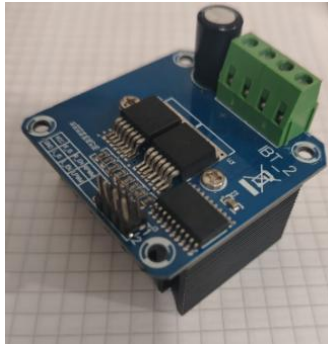


Imagen 3 Driver de control BTS7960, imagen del autor.

Arduino y Raspberry Pi

En este punto, los componentes restantes, además de los ya descritos (optoacopladores y drivers de motor), son el Arduino y la Raspberry Pi.

El primero es un microcontrolador ampliamente utilizado en proyectos tanto educativos como industriales, gracias a su facilidad de programación y control de señales.

La segunda, la Raspberry Pi, es un microprocesador ideal para el procesamiento de imágenes, video y ejecución de tareas versátiles. Estas características, combinadas con las capacidades de control ofrecidas por Arduino, conforman una pareja ideal para la implementación de sistemas SCADA u otros sistemas de automatización embebida.

Dentro de la carcasa del sistema, estos dos componentes se ubican en la esquina superior izquierda, con la Raspberry Pi montada sobre el Arduino.

Para visualizar esta distribución, consulte la Imagen 4.

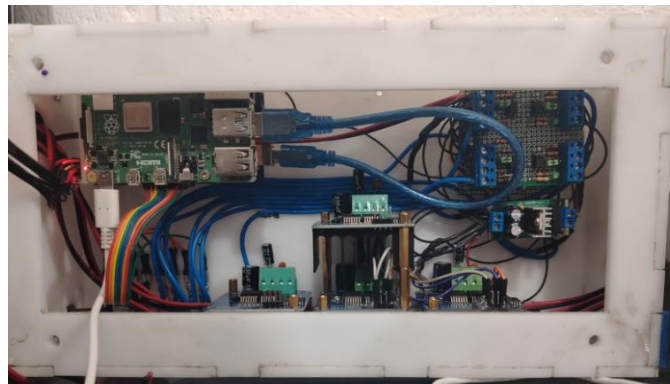


Imagen 4 Distribución electrónica, imagen del autor.

La carcasa mostrada en la Imagen 4 está fabricada en acrílico y cuenta, en su lateral y parte inferior, con tuercas y tornillos (ver Imagen 5) que facilitan su instalación en el gabinete de control del centro de mecanizado.

El sistema de montaje consiste en empotrar la caja en el gabinete y ajustarla mediante los tornillos mencionados. Para una mejor visualización del mecanismo de fijación, consulte la Imagen 5.

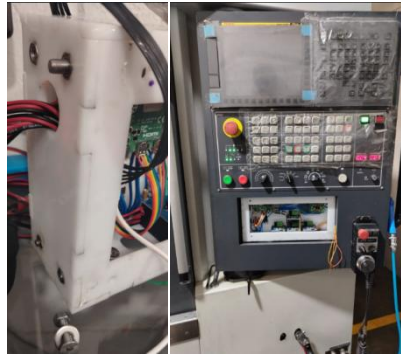


Imagen 5 Ajuste al tablero, imagen del autor.

Cerrando este apartado, la carcasa exterior presenta una forma particular (ver Imagen 6) con el fin de proporcionar un ángulo de visión adecuado para el operario, así como una ubicación cómoda para el uso del teclado, el botón de paro de emergencia y el interruptor de encendido/apagado.

En la parte posterior, la carcasa cuenta con orificios que coinciden con la parte frontal de la carcasa interna, lo que permite una mayor fijación y estabilidad del sistema.



Imagen 6 Carcasa exterior, imagen del autor.

El teclado, visible en la Imagen 6, es del tipo matricial alfanumérico, montado sobre PCB, con una configuración de 4x4 teclas y dimensiones reales de 65 mm x 68 mm.

La pantalla corresponde a la referencia LCD-IPS-TFT-7-TOUCH, con un tamaño de 7 pulgadas y tecnología táctil capacitiva, lo cual permite una interacción fluida y precisa con la interfaz.

El paro de emergencia consiste en un pulsador de acción directa, de tipo común, ubicado de forma accesible para el operador.

Dispositivo mecánico

El sistema motorizado está compuesto por actuadores de la referencia 12V 12RPM DC Worm Gear Motor 70 kg·cm, que proporcionan un par elevado adecuado para tareas de posicionamiento de carga.

El sistema de desplazamiento está dotado de dos varillas lisas que sirven de guía para un carro deslizante, el cual se monta sobre dos rodamientos lineales tipo SC8UU, con eje de 8 mm de diámetro.

La conversión del movimiento rotativo a lineal se realiza mediante una varilla roscada de referencia D8mm, con una longitud de 250 mm y un avance de 2 mm por vuelta, acompañada de una tuerca de latón que actúa como elemento móvil.

Todo el mecanismo ha sido construido en acero inoxidable, con el fin de prevenir la oxidación y aumentar la durabilidad del sistema en entornos industriales exigentes.

Para proteger los motores, se diseñaron guardas que fueron recubiertas con resina, con el propósito de evitar que el refrigerante-lubricante del centro de mecanizado entre en contacto con los componentes eléctricos. (Ver Imagen 7).

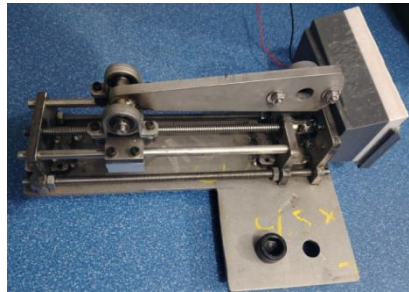


Imagen 7 Mecanismo, imagen del autor.

Finalmente, el sistema cuenta con un eslabón que encaja con ejes anclados a ambos lados de la mesa de grados, mediante el uso de cojinetes de pared. Este eslabón está unido al carro deslizante a través de un eje transversal y dos cojinetes de orientación vertical, lo cual permite que el eslabón gire con respecto al carro, suavizando el movimiento en las zonas críticas del mecanismo. (Ver Imagen 8).

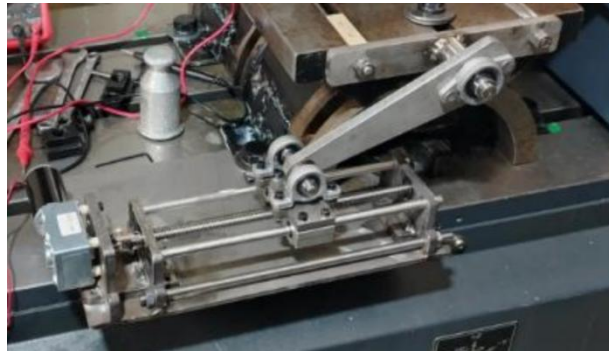


Imagen 8 Ensamble a mesa de grados, imagen del autor.

Todo lo descrito está duplicado en el otro lado de la mesa de grados, con el fin de proporcionar mayor suavidad y estabilidad al movimiento, generando un efecto contrario: mientras un mecanismo empuja, el otro tira.

El tamaño desproporcionado del eslabón que conecta el mecanismo con la mesa se debe a la altura a la que se instala el eje en la mesa. Esta altura ha sido determinada para que el ángulo de variación entre el eslabón y la bancada se mantenga constante durante la

mayor parte del recorrido, evitando así la concentración de fuerzas en direcciones distintas.(Ver Imagen 9).

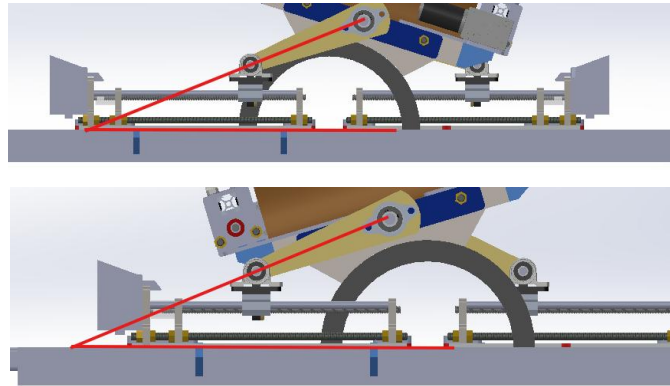


Imagen 9 Simulación de movimiento en ángulos extremos, imagen del autor.

Por último, en teoría, la altura descrita debería ser lo más corta posible, ya que coincide con el centro de giro de la mesa. Cuanto más cerca esté el eslabón de este centro, menor será el recorrido necesario para cubrir un determinado ángulo. En ese sentido, el posicionamiento hacia el ángulo objetivo sería más rápido, aunque también más complejo de controlar.

Teniendo esta altura definida y siendo clara la dependencia con el desplazamiento lineal, se determinó que el largo del recorrido estaría dado por los ángulos máximos y mínimos que debe alcanzar la mesa de grados.

Según la codificación del proceso de producción, la mesa debe presentar inclinaciones simétricas de +30 grados (vista de frente hacia la derecha) y -30 grados. En ese orden, se agregó una distancia entre placas guía de 215 mm.

El mecanismo de varilla roscada se implementó por su propiedad de ser autoblocante, es decir, no permite retroceso ni movimiento en dirección opuesta.

Se descartó el uso de un husillo de bolas debido a su alto costo, pensando en una solución más económica de fabricar.

Cabe destacar que la varilla roscada reposa en rodamientos incrustados en las placas guía, y se conecta al eje del motor mediante una junta universal. Esta junta presenta perforaciones transversales en la varilla y en el eje del motor, que permiten su fijación mediante tornillos, garantizando un ajuste firme entre ambos componentes (ver Imagen 10).



Imagen 10 Varilla roscada pinada, imagen del autor.

Goniómetro

El goniómetro es el encargado de la recolección de datos del sistema. Se trata de un goniómetro digital basado en el sensor MPU6050. Este dispositivo tiene la capacidad de medir ángulos en dos ejes de referencia (X e Y). Aunque para la etapa actual del proyecto una sola dirección de medición sería suficiente, se ha optado por incorporar lecturas en ambos ejes, pensando en futuras mejoras y ampliaciones del producto sin necesidad de modificar el diseño base.

El MPU6050 es un sensor inercial de seis grados de libertad que integra un acelerómetro de tres ejes y un giroscopio de tres ejes en un solo chip. Este sensor se comunica con el sistema de control mediante el protocolo I2C.

En esta implementación se utiliza principalmente el acelerómetro, que permite detectar aceleraciones lineales, incluyendo la componente gravitacional. Esta propiedad es aprovechada para determinar la inclinación del sensor respecto al eje vertical. Cuando el dispositivo se encuentra en reposo, las aceleraciones medidas corresponden casi exclusivamente a la gravedad, lo que permite calcular el ángulo de inclinación mediante relaciones trigonométricas.

$$\theta_x = \tan^{-1} \frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \quad \theta_y = \tan^{-1} \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}$$

El resultado de estas operaciones es el valor angular en grados, que constituye la variable de interés para el sistema de control.

Dado que las lecturas del sensor pueden verse afectadas por ruido, pequeñas vibraciones o movimientos no deseados, se implementa un filtro de promedio móvil que permite estabilizar las lecturas y mostrar valores más suaves sin comprometer la capacidad de respuesta del sistema. Este filtrado es esencial para asegurar una retroalimentación precisa y confiable.

Todos estos cálculos recaen sobre un microcontrolador RISC-V propio de la ESP32-C3, escogido por su tamaño compacto y conectividad.

Esta tarjeta soporta conexiones inalámbricas Bluetooth y Wi-Fi, y tiene dimensiones de 18 mm x 22.5 mm. Para conocer su aspecto, revise la imagen 11.

DIMENSIONES
ESP32-C3 SuperMini Placa de Desarrollo USB Tipo C

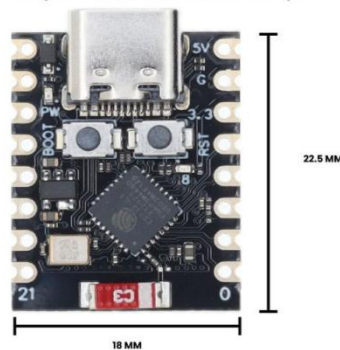


Imagen 11 ESP32c3 , Imagen tomada del catálogo de SSDIELECT ELECTRONICA SAS.

En el apartado de alimentación, cuenta con una batería LiPo de 3.7 V y 1 A, suficiente para alimentar el microcontrolador, el sensor y la pantalla. Esta última es una pantalla LCD con protocolo I2C, de tamaño 5 x 0.96 pulgadas y bajo consumo. Su función es otorgar versatilidad al dispositivo, permitiendo al usuario visualizar los ángulos sin depender de la pantalla principal de control. A continuación, en la imagen 12 se aprecia el goniómetro en su diseño CAD, y su primer prototipo se puede ver en la imagen 13.

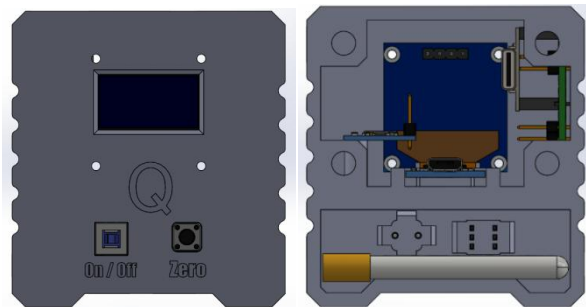


Imagen 12 Diseño CAD goniómetro, imagen del autor.



Imagen 13 Prototipo real, imagen del autor.

Finalmente, para cargar el dispositivo se incorpora un puerto USB tipo C, que permite realizar la carga usando el estándar actual de dispositivos móviles. Para este propósito, se integra una tarjeta de carga basada en el módulo TP4056, con dimensiones de 28 mm x 17 mm. Para conocer su aspecto, consulte la imagen 14.



Imagen 14 Módulo de carga TP4056, imagen tomada de la tienda Electroniclab.

PROGRAMACIÓN

La programación para este proyecto mantiene las mismas 3 partes, dos de ellas programadas en C usando el compilador libre de Arduino (goniómetro y Arduino) y la restante programada en Python usando Geany, un entorno de desarrollo propio de Raspberry Pi OS, el actual sistema operativo de Raspberry Pi, anteriormente conocido como Raspbian.

Todas las programaciones serán subidas al repositorio de la empresa para su consulta y las mejoras pertinentes. Cada código está comentado en puntos críticos.

La programación de la interfaz se realizó en multihilo para garantizar fluidez y una comunicación continua. Se recomienda tener especial cuidado en el orden de arranque de los mismos. Para garantizar su funcionamiento, se debe ejecutar desde un entorno virtual que contiene todas las dependencias necesarias; su ruta se encuentra en la imagen 15.

```
rascnc@raspberrypi:~ $ cd Desktop
rascnc@raspberrypi:~/Desktop $ cd Interfaz
rascnc@raspberrypi:~/Desktop/Interfaz $ source venv/bin/activate
(venv) rascnc@raspberrypi:~/Desktop/Interfaz $ python /home/rascnc/Desktop
/Interfaz/Centro_Mecanizado_2.py
```

Imagen 15 Ruta de ejecución, imagen del autor.

El nombre de usuario de la Raspberry es “rascnc” y su contraseña es “cnc”, datos relevantes para realizar alguna intervención importante o proyección de vídeo mediante métodos inalámbricos usando interfaces como VNC o SSH.

Volviendo al código interno, se encontrarán dos archivos: el principal y un archivo secundario encargado de la conexión serial con el Arduino. Esto se hizo para que pueda ser utilizado tanto en esta aplicación como en cualquier otra, cumpliendo con la metodología de trabajo implementada en el desarrollo de todo el producto.

En cuanto a la programación del Arduino, se destaca que en la generación de la señal PWM fue necesario aumentar su frecuencia para minimizar al máximo la presencia de armónicos. Esto se logra editando registros internos del microcontrolador llamados timers, los cuales están numerados como 1, 3 y 4.

- El timer1 modula la frecuencia de trabajo de los pines 9 y 10.
- El timer3 controla los pines 2, 3 y 5.
- El timer4 se encarga de los pines 6, 7 y 8.

La frecuencia de operación por defecto de estos pines es aproximadamente 490.2 Hz, y se estableció en 62.5 kHz para minimizar la presencia de ruidos electromagnéticos, garantizando un funcionamiento más suave de todo el sistema.

Estos registros se modifican en particular porque no afectan otras funciones internas del microcontrolador, como el timer0, que está encargado de funciones recurrentes como millis(), delay() y micros(). Modificar la frecuencia de trabajo del timer0 podría provocar problemas en el funcionamiento de estas funciones.

Fuera de esto, el programa no cuenta con configuraciones anormales; realiza cálculos simples, manejo de banderas y mantiene comunicación serial activa a 115200 baudios con la Raspberry Pi.

OPERACIÓN DEL SISTEMA

Para iniciar con la operación, se debe verificar primero el suministro de energía. Esto se puede comprobar asegurándose de que el gabinete de alimentación tenga encendido su testigo luminoso rojo. (Ver imagen 16).



Imagen 16 Gabinete energizado, imagen del autor.

Después de esta verificación, deberá accionar el interruptor ubicado en el panel principal de control. Esto encenderá la interfaz gráfica y parte del sistema de control, lo cual se notificará mediante el encendido de la pantalla. En caso de que la pantalla no se encienda, deberá informar al encargado de mantenimiento.

Una vez encendido el sistema, aparecerá la pantalla de inicio de la interfaz. Esta, luego de un mensaje de bienvenida en su parte superior, indicará que está lista para operar. (Ver imágenes 17 y 18).

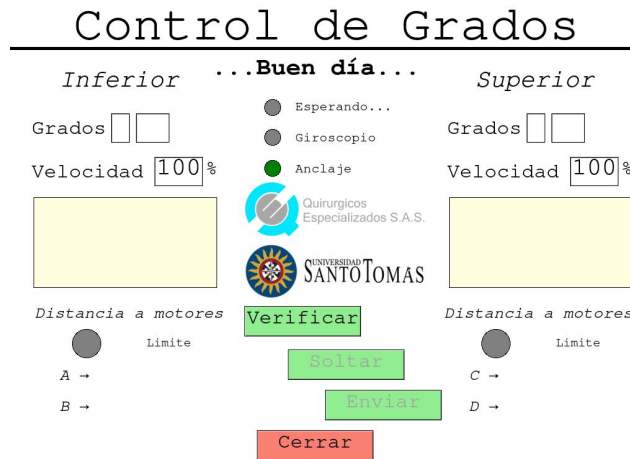


Imagen 17 Interfaz iniciado todo el sistema y estableciendo conexiones, imagen del autor

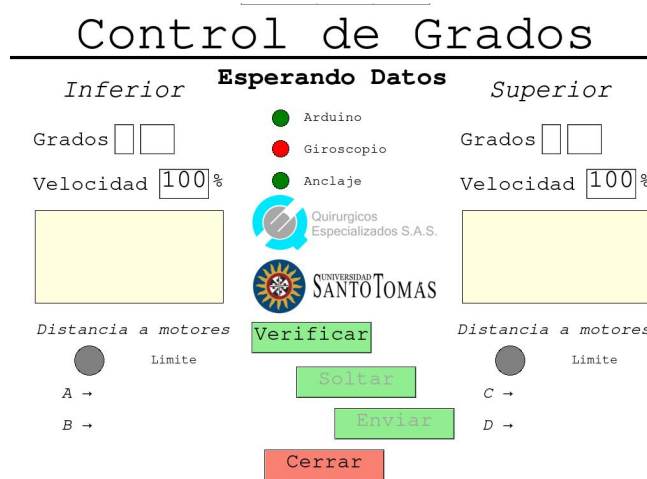


Imagen 18 Interfaz con Arduino conectado exitosamente y esperando la conexión con el goniómetro, imagen del autor.

Como se puede ver en la imagen 17, la interfaz cuenta con cinco testigos de colores. Para los dos primeros testigos superiores, “Arduino” y “Giroscopio”, se emplea un sistema de tres colores: gris cuando se está esperando la conexión (ver imagen 17), verde cuando la conexión es exitosa y rojo cuando no se ha establecido conexión.

En condiciones normales de operación, la interfaz debe verse como se muestra en la imagen 18: con la conexión al Arduino establecida (testigo en verde) y el giroscopio posiblemente sin conexión (testigo en rojo). Si el testigo de “Arduino” está en verde y el del “Giroscopio” en rojo, se deberá informar al encargado.

El nombre “Giroscopio” hace referencia al sensor integrado en el goniómetro digital. Si su testigo aparece en rojo, indica que el sensor está apagado o demasiado lejos del sistema de control. En cualquiera de los casos, deberá encenderse o acercarse el goniómetro al sistema. Una vez hecho esto, el testigo cambiará de rojo a verde, se desplegará una animación de inclinación en las viñetas amarillas, aparecerán números indicando la distancia y se iluminará el testigo izquierdo de la interfaz.

En esta primera etapa del producto, solo será relevante el lado izquierdo, que se refiere a los grados de la mesa inferior del montaje (ver imagen 9).

En cuanto al tercer testigo, “Anclaje”, este cuenta con dos colores: verde indica que el anclaje de la mesa está asegurado, mientras que naranja indica que la mesa está libre para moverse. La interfaz siempre asumirá que, al iniciar, el anclaje de la mesa está colocado. Por lo tanto, al finalizar su uso, siempre se deben volver a colocar los tornillos de anclaje.

A ambos lados de estos testigos hay cuadros de texto interactivos. En primer plano se encuentran dos cuadros junto al texto “Grados” (ver imagen 18). En el primero se debe ingresar el signo del grado solicitado, “+” o “-”, y en el segundo, el valor absoluto del ángulo requerido.

Debajo de estos cuadros se encuentra un apartado denominado “Velocidad”. Este campo no está habilitado para el usuario y solo puede ser editado por el encargado.

El modo de digitación está definido de dos maneras. En primer lugar, de forma intuitiva: el usuario puede tocar los cuadros y, en pantalla, se desplegará un teclado con las opciones válidas para ese campo (ver imagen 19).

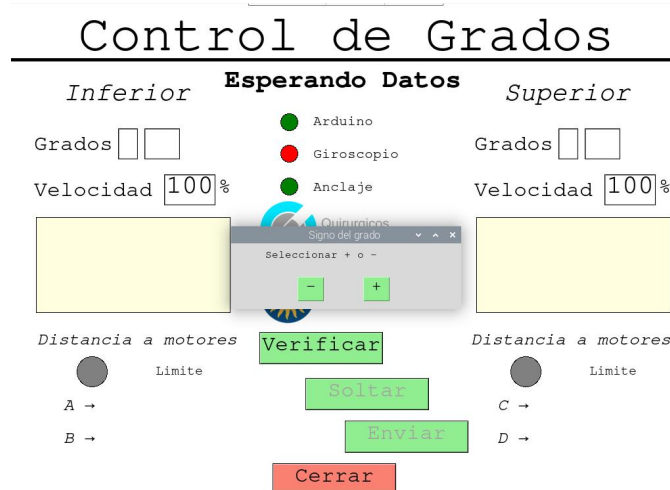


Imagen 19 Cuadro de selección luego de tocar el cuadro de texto que tendrá el signo, imagen del autor.

Es importante que el primer cuadro que se toque sea el sugerido (el signo del grado del apartado inferior). De esta forma, luego de la selección, la misma interfaz irá cambiando paso a paso por los campos requeridos.

Siguiendo con el ejemplo anterior, se selecciona el signo “+” tocando el cuadro verde

correspondiente, y de inmediato se desplegará el siguiente cuadro de selección: un teclado numérico matricial, en donde, pulsando los números, se podrá formar el ángulo de configuración para esa etapa.
Ver imagen 20.

Imagen 20 Cuadro para escribir el ángulo set, imagen del autor.

Para este ejemplo, se escribe “15”, de modo que la interfaz interpreta que el ángulo set es +15 grados para el apartado inferior. A continuación, se requiere que el operario toque en “Siguiete”, asegurándose de que todo esté correcto. En caso de haber ingresado mal el signo, puede tocar en “Anterior” y la interfaz volverá a desplegar la ventana mostrada en la imagen 19, donde podrá reconfigurar la selección. Una vez corregido, se volverá a ejecutar el cuadro de la imagen 20 para continuar con la configuración.

Retomando: cuando se toque el botón “Siguiete”, la interfaz volverá a pedir un signo, esta vez para los grados superiores. En esta etapa de operación, se puede colocar cualquier signo y valor, ya que aún no está desarrollado el control para el segundo piso. Sin embargo, se recomienda ingresar el valor requerido para tener un referente visual.

De la misma manera que antes, al seleccionar el signo se desplegará un teclado para ingresar el ángulo. Esta vez, en lugar del botón “Siguiete”, aparecerá el botón “Confirmar”. Al tocarlo, se cerrará el teclado y se podrá verificar la configuración. Ver imagen 21.

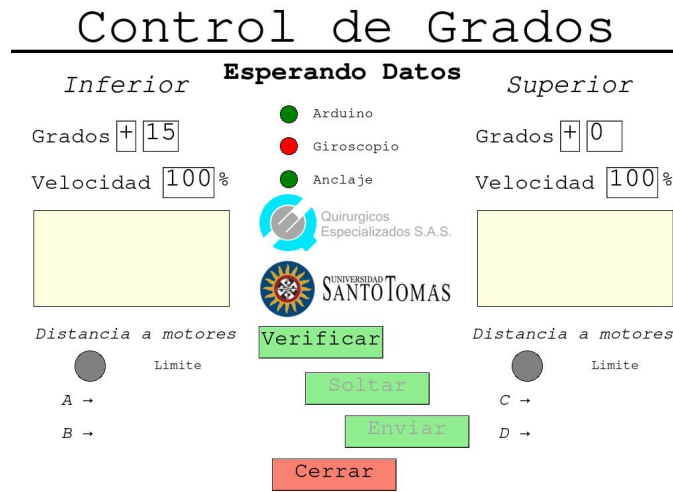


Imagen 21 Interfaz luego de confirmación por parte del operario, imagen del autor.

Si en este punto el operario detecta que algún dato es incorrecto, podrá tocar el cuadro que contiene el error; esto borrará el contenido y permitirá reescribirlo con ayuda del teclado que se despliega. Sin embargo, deberá seguir el recorrido completo nuevamente. Por ejemplo, si el error se encuentra en el cuadro que contiene la magnitud del ángulo inferior, deberá volver a ingresar tanto el signo como la magnitud del ángulo superior.

Una vez que esté todo listo y se haya verificado que los datos ingresados son correctos, se deberá encender el goniómetro. Esta acción puede realizarse antes, pero no después de este punto. Al encenderlo, será necesario esperar entre 10 y 20 segundos mientras los dispositivos se emparejan. Este proceso se refleja en la interfaz mediante el cambio del testigo “Giroscopio” de color rojo a verde, junto con las acciones descritas anteriormente (ver imagen 22). Para encender el goniómetro, se debe presionar el botón azul ubicado en el lado izquierdo del dispositivo (ver imagen 12).

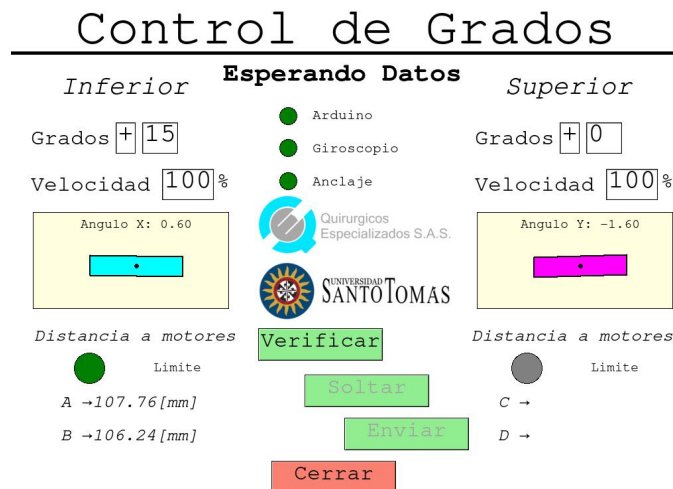


Imagen 22 Interfaz con el goniómetro conectado, imagen del autor.

Una vez encendido el goniómetro, el paso siguiente es calibrar el “cero” de operación. Esta calibración debe realizarse solo una vez, ya que el dispositivo guarda este valor y lo aplica incluso después de haber sido apagado.

Para ejecutar la calibración, se debe oprimir el pulsador ubicado en el lado derecho del dispositivo (ver imagen 12) y seguir las instrucciones que aparecerán en la pantalla. Es necesario mantener el pulsador presionado durante 3 segundos, soltarlo y esperar mientras el sistema realiza el ajuste de cero. Todo el proceso será notificado en la pantalla del dispositivo.

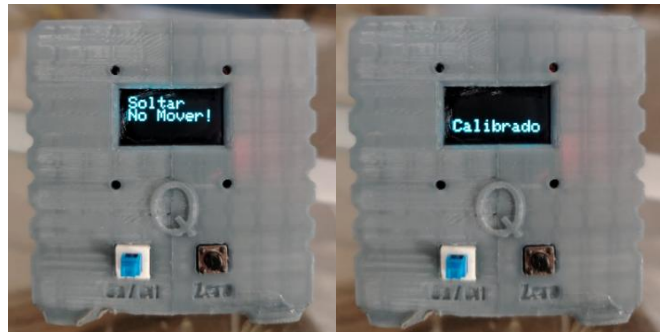


Imagen 23 Instrucciones luego de soltar el pulsador, imagen del autor.

Lo siguiente es ubicar el goniómetro sobre la superficie de la mesa angular. Este dispositivo medirá el ángulo actual de la mesa y enviará estos datos a la interfaz, que a su vez los utilizará para el control proporcional.

Como se puede observar en la imagen 22, se dibujan barras en los cuadros de color amarillo; estas barras representan gráficamente el ángulo, y sobre ellas se muestra el valor numérico del ángulo leído por el goniómetro.

Debajo de los cuadros amarillos se encuentra un apartado denominado “Distancia a motores”, con letras que identifican cada actuador: para la parte inferior, las letras son A y B; para la parte superior, C y D. Esta nomenclatura permite nombrar cada actuador de forma clara. En la imagen 24 se puede apreciar esta identificación desde una vista superior de la simulación.

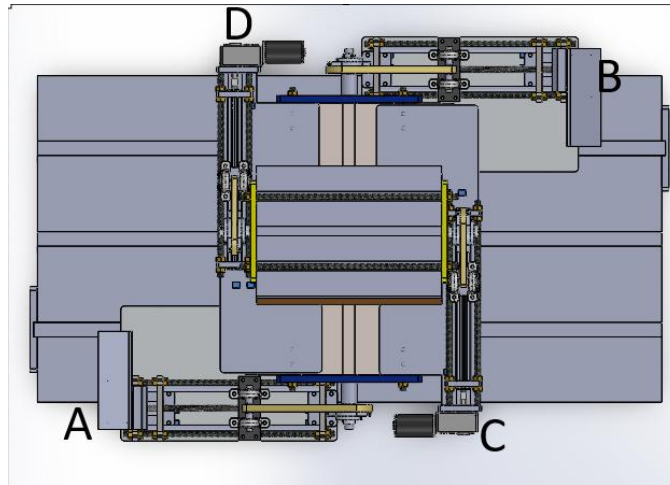


Imagen 24 Nombre para motores, imagen del autor.

Ahora, el dato numérico puesto justo enfrente de cada letra representa una aproximación hecha en función del ángulo medido de la distancia que hay desde el carro de desplazamiento hasta cada motor (ver imagen 25). El testigo ubicado justo al lado del rótulo “Límite” es una ayuda visual; este alternará entre verde si está a una distancia prudente, naranja si está a una distancia media y rojo si la distancia es muy próxima, para evitar colisiones.

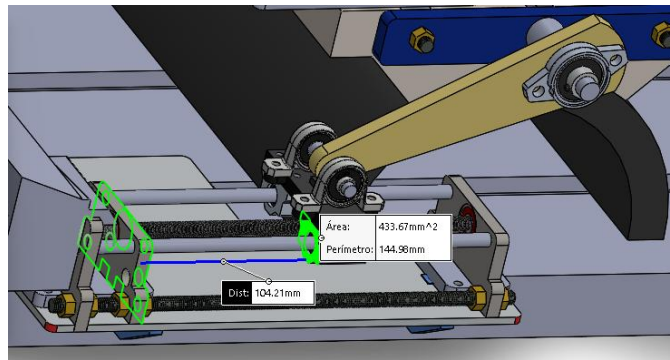


Imagen 25 Distancia a motores, imagen del autor.

Volviendo a la interfaz, ya habiendo realizado la operación de forma intuitiva usando el táctil de la pantalla, ahora se explica otra manera de llenar estos campos, pero por medio del teclado físico ubicado en el lado izquierdo de la máquina, ver imagen 6. Una vez iniciada la interfaz, podrá desplazarse entre cada cuadro de texto interactivo usando las teclas A y B, siendo A para ir al siguiente cuadro o empezar, y B para ir al cuadro anterior.

Cuando se abre el cuadro para seleccionar entre “+” o “-”, podrá hacer la selección usando las teclas “*” para “-” y “#” para “+”. Al abrir el cuadro para ingresar el valor absoluto del ángulo, podrá escribirlo directamente desde el teclado. Para saltar al siguiente cuadro o confirmar deberá presionar la tecla “A”, y si desea corregir algo anterior

puede usar la tecla “B”. En este modo de uso, tendrá que borrar el contenido de los cuadros en caso de corrección; para esto debe usar la tecla “C”. Si desea cerrar la aplicación, la tecla “D” es la indicada.

Llegados a este punto, independientemente del modo que escoja, lo siguiente será tocar el botón “Verificar” para evaluar que los valores ingresados estén dentro del rango permitido (-30 grados a 30 grados). De no estarlo, el programa emitirá un mensaje indicando que está fuera de rango (ver imagen 26), y deberá editar el valor incorrecto. En este caso, si en el ángulo inferior se ingresa el valor +31 grados, estará fuera del rango permitido.

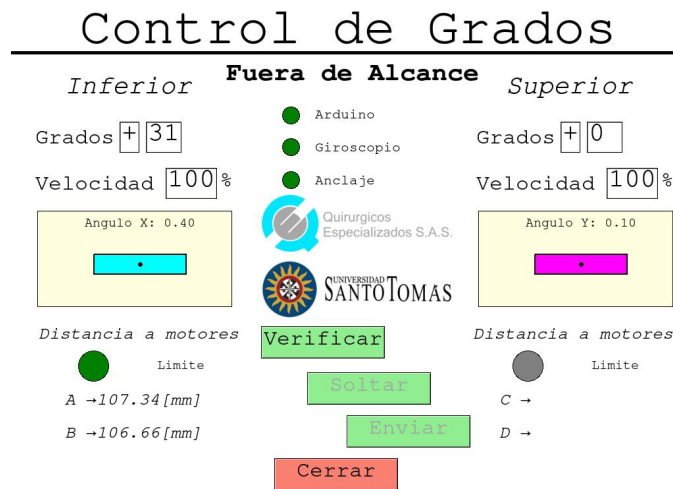


Imagen 26 Interfaz validando datos de ingreso errados, imagen del autor.

Corrigiendo el ángulo fuera de rango y volviendo a verificar, la interfaz notificará con el mensaje “Datos Ok” y se habilitará el botón Soltar. Al tocarlo o presionar la tecla “A” para dar siguiente, se abrirá una ventana como se muestra en la imagen 27.

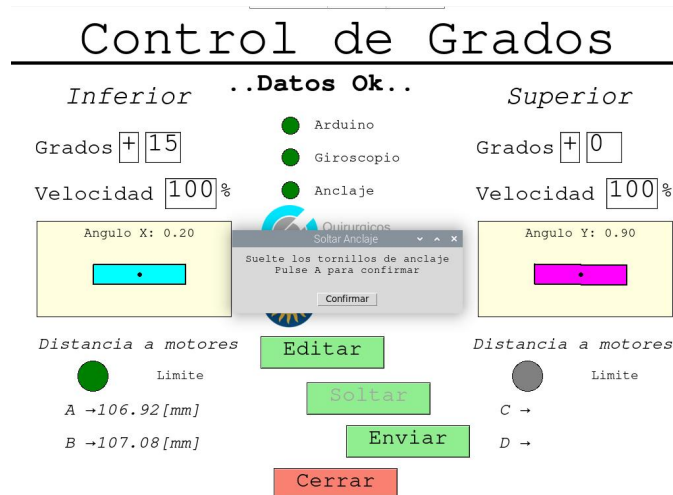


Imagen 27 Ventana preventiva, imagen del autor.

En esta ventana se indica al operario que suelte los tornillos que anclan la mesa. Se recomienda primero soltarlos y luego dar en confirmar o presionar la tecla “A”, pues la interfaz, al dar confirmar, asume que la prensa está libre para ser inclinada, y lo anuncia al usuario cambiando el color del testigo “Anclaje” a naranja (ver imagen 28).

Seguido, el botón “Soltar” cambiará su texto a “Anclar” y se deshabilitará, dando paso al botón Enviar. Este botón enviará la configuración registrada al Arduino al tocarlo o presionar nuevamente la tecla “A” (ver imagen 28).

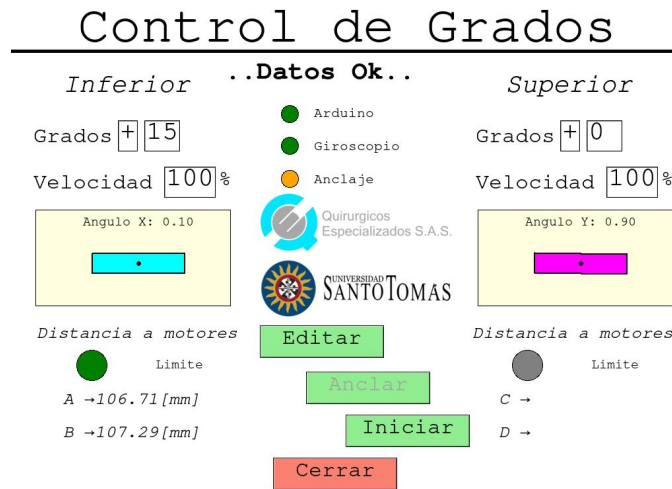


Imagen 28 Interfaz después de dar clic en el Botón confirmar y luego en "Enviar", imagen del autor.

Ahora el botón Enviar cambió a Iniciar. El siguiente paso es oprimir la tecla “A” o tocar el botón Iniciar; esto activará los motores, pondrá en marcha el control proporcional con retroalimentación y cambiará nuevamente el botón, esta vez a Parar. En caso de emergencia, deberá oprimir este botón o tocar el pulsador externo de color rojo que está en la carcasa (ver imagen 6). Esta acción detendrá los motores de inmediato, cambiará el texto del botón de Parar a Enviar, y luego de corregir podrá presionar nuevamente Iniciar.

MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Se recomienda hacer revisiones periódicas semanales al estado de la varilla roscada. Al detectar el mínimo desgaste en su rosca, se debe revisar la alineación de las varillas lisas. Un desajuste en esta alineación significa un desgaste prematuro de las escobillas de los motores.

También se debe revisar, con la misma frecuencia, el estado de los ejes que reposan sobre los rodamientos presentes (ver imagen 29).

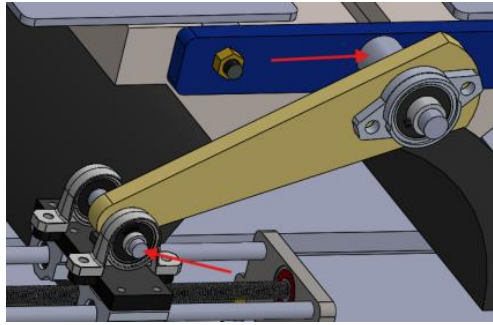


Imagen 29 Ejes sujetos revisión, imagen del autor.

Revisar desgaste o desviaciones.

En esta versión temprana del goniómetro digital se debe evitar al máximo cualquier tipo de caída, salpicadura o exposición al polvo o virutas. En la imagen 30 se presenta el esquema electrónico del dispositivo.

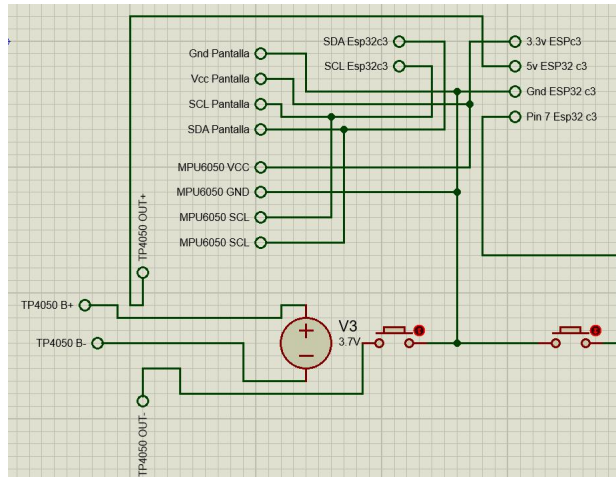


Imagen 30 Esquema electrónico de goniómetro, imagen del autor.

Luego de realizar el ajuste de ángulo, se recomienda apagar el dispositivo para prolongar la duración de la batería.

En caso de fallas en los botones del teclado, debe realizarse el cambio del mismo; la referencia ya fue mencionada en el apartado de “Descripción del sistema”. Su desmontaje se resume en soltar los tornillos Bristol, retirar el marco y empujar el teclado; cuenta con pines en su parte trasera que deben desconectarse y conectarse en el mismo orden.

Para el cuidado de la pantalla, se recomienda no aplicar fuerza. A pesar de ser capacitiva, tiene una respuesta rápida. Mantenerla limpia y evitar manipularla con las manos sucias.

Para realizar algún cambio en la electrónica, se debe soltar la pantalla. Para ello, se retira el marco y luego se aflojan los cuatro tornillos Bristol, siempre con extremo cuidado de no golpear la pantalla.

MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Volviendo a la revisión de los ejes, en caso de detectar señales de flexión o indicios de trabajo forzado, se recomienda cambiar los rodamientos de pared por rodamientos flexibles en su centro, estilo “ojo de pescado”, para suavizar su funcionamiento.

Si presenta alguna mejora en el código del goniómetro digital y desea aplicarla en el dispositivo, deberá retirar la tapa trasera y ubicar el puerto USB-C de la ESP32-C3 para cargar el código modificado. Recuerde que el goniómetro tiene una configuración de conexión Bluetooth con la Raspberry Pi, por lo que si realiza alguna configuración adicional, debe asegurarse de tenerlo en cuenta también en la Raspberry.

Si dentro de la falla que se presenta no hay respuesta por parte de los actuadores, antes de emitir cualquier diagnóstico, se recomienda revisar dentro del gabinete que los 9 canales estén funcionando correctamente. Esto se verifica encendiendo la fuente y comprobando que los 9 LEDs indicadores estén encendidos (ver imagen 31). Si alguno está apagado, podrá rastrear esa línea de alimentación para encontrar más rápidamente el origen del problema. Antes de cambiar el fusible, es recomendable hacer esta búsqueda para identificar la causa que provocó el fallo del fusible.

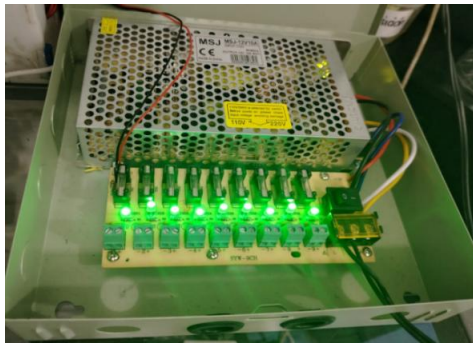


Imagen 31 Fuente centralizada con los 9 canales funcionando correctamente, imagen del autor.

CONCLUSIÓN

El sistema de control para la mesa de mecanizado ofrece una solución robusta y precisa para ajustes angulares con alta confiabilidad. Integra un goniómetro digital basado en MPU6050 y ESP32-C3, con una interfaz centralizada en Raspberry Pi 4 para monitoreo y ajuste continuo del ángulo. El control de motores mediante PWM con retroalimentación en tiempo real asegura movimientos suaves y precisos, minimizando errores y tiempos de respuesta.

Su arquitectura modular, junto con rutinas de calibración y filtrado, garantiza estabilidad en las mediciones en entornos industriales. La documentación de mantenimiento soporta operación prolongada con rendimiento óptimo.

En conclusión, el sistema optimiza el mecanizado angular, ofreciendo operación segura, confiable y de bajo mantenimiento, cumpliendo con los estándares industriales de precisión y eficiencia.