

Design and Implementation of a CNC Wire Bending Machine Controlled with ESP32-S3 and Operation through a Mobile App

Esteban Montes Ardiles, Br.¹; Paul Navarrete Rodríguez, Br.²; Marcelo Quispe Ccachuco, Dr.³ y César Castillo Cáceres, Dr.⁴

^{1,2,3,4}Universidad Católica de Santa María, Perú, esteban.montes@estudiante.ucsm.edu.pe,
paul.navarrete@estudiante.ucsm.edu.pe, mquispec@ucsm.edu.pe, ccastill@ucsm.edu.pe

Abstract– *The project develops an automated device for bending wires up to 2 mm in diameter, using low-cost technology. The machine combines mechanical and electronic design to ensure functionality and simplicity.*

On the mechanical side, the design was made with Autodesk Inventor, and the main parts, such as the bending shaft and smoothing rollers, were analyzed with ANSYS Workbench to validate their strength. These parts were manufactured using 3D printing with inexpensive filaments, to reduce costs. The structure allows for a bending shaft operating range of -110° to 110°, suitable for different bending configurations.

On the electronic side, NEMA 17 motors, A4988 controllers and an ESP32 were integrated. The system uses a dual source of 5V, 12V and 3.3V. The user interface was developed with Blynk IoT, allowing intuitive remote control from mobile devices.

During implementation, tests were carried out that ensured accuracy and repeatability, with a margin of error of ± 2 mm and a maximum capacity of 50 mm per operation. The results demonstrated the feasibility of the design, identifying improvements such as the use of more resistant materials, additional sensors and a greater operating range.

This project stands out for its focus on economic sustainability and technological accessibility, representing an innovative solution for bending processes in low-budget environments. Future proposals include expanding the system's capabilities, optimizing accuracy, and improving the durability of critical parts.

Keywords– *3D printing, Automation, ESP32-S3, Wi-Fi remote control, Wire bending.*

Diseño e Implementación de una Máquina CNC Dobladora de Alambres Controlada con ESP32-S3 y Operación a través de una Aplicación Móvil

Esteban Montes Ardiles, Br.¹; Paul Navarrete Rodríguez, Br.²; Marcelo Quispe Ccachuco, Dr.³ y César Castillo Cáceres, Dr.⁴

^{1,2,3,4}Universidad Católica de Santa María, Perú, esteban.montes@estudiante.ucsm.edu.pe,
paul.navarrete@estudiante.ucsm.edu.pe, mquispec@ucsm.edu.pe, ccastill@ucsm.edu.pe

Resumen– El proyecto desarrolla un dispositivo automatizado para doblar alambres de hasta 2 mm de diámetro, utilizando tecnología de bajo costo. La máquina combina diseño mecánico y electrónico para garantizar funcionalidad y simplicidad.

En el aspecto mecánico, el diseño fue realizado con Autodesk Inventor, y las piezas principales, como el eje de flexión y los rodillos alisadores, se analizaron con ANSYS Workbench para validar su resistencia. Estas piezas se fabricaron mediante impresión 3D con filamentos económicos, para reducir costos. La estructura permite un rango de operación del eje de flexión de -110° a 110° , adecuado para diferentes configuraciones de doblado.

En el aspecto electrónico, se integraron motores NEMA 17, controladores A4988 y un ESP32. El sistema usa una fuente dual de 5V, 12V y 3.3V. La interfaz de usuario fue desarrollada con Blynk IoT, permitiendo un control remoto intuitivo desde dispositivos móviles.

Durante la implementación, se realizaron pruebas que garantizaron precisión y repetitividad, con un margen de error de ± 2 mm y una capacidad máxima de 50 mm por operación. Los resultados demostraron la viabilidad del diseño, identificándose mejoras como el uso de materiales más resistentes, sensores adicionales y mayor rango de operación.

Este proyecto resalta por su enfoque en la sostenibilidad económica y la accesibilidad tecnológica, representando una solución innovadora para procesos de doblado en entornos de bajo presupuesto. Las propuestas futuras incluyen ampliar las capacidades del sistema, optimizar la precisión y mejorar la durabilidad de las piezas más importantes.

Palabras clave– Automatización, Control remoto vía Wi-Fi, Doblar de alambres, ESP32-S3, Impresión 3D.

I. INTRODUCCIÓN

El doblado de alambres es un proceso fundamental en la fabricación de componentes metálicos utilizados en diversas industrias, desde la construcción hasta la automotriz. Las máquinas dobladoras de alambres automatizadas han ganado relevancia en los últimos años debido a su capacidad para mejorar la precisión, la productividad y la reducción de costos operativos. A medida que avanza la automatización industrial, la implementación de soluciones personalizadas y ecoamigables se vuelve indispensable para abordar las necesidades específicas de producción, minimizando el impacto ambiental.

En un mundo donde la automatización y la optimización de procesos industriales son cada vez más relevantes, las máquinas dobladoras de alambres destacan como herramientas clave en la fabricación de componentes metálicos. Estas máquinas permiten realizar tareas repetitivas con precisión, calidad y ahorro de tiempo, adaptándose a las necesidades específicas de producción. Este proyecto se enmarca en el contexto del crecimiento constante del campo de la automatización, que ha revolucionado la manera en que se realizan actividades complejas, contribuyendo significativamente a la reducción de costos y a la mejora en la calidad de los productos finales [1].

En los últimos años, el desarrollo de máquinas dobladoras de alambres CNC ha avanzado significativamente con la incorporación de B-code, un lenguaje que automatiza las secuencias de doblez, mejorando la precisión y reduciendo errores en la fabricación [2]. Además, las máquinas con sistemas tridimensionales de fijación ajustable han ampliado la capacidad de realizar configuraciones complejas al minimizar las colisiones del alambre [3]. La planificación avanzada de trayectorias, mediante simulaciones previas, optimiza los movimientos y permite prever errores antes del proceso real, aumentando la eficiencia y la seguridad [4]. La integración de estas tecnologías en el sistema basado en ESP32-S3 podría mejorar su precisión, ampliar su funcionalidad y facilitar la creación de figuras complejas desde una interfaz móvil.

La evolución tecnológica en este campo ha llevado a la incorporación de sistemas de control avanzado y dispositivos electrónicos modernos, como microcontroladores y motores paso a paso, que garantizan precisión en las operaciones de doblado. Por ejemplo, los sistemas controlados mediante microcontroladores como el ESP32 permiten no solo automatizar el proceso, sino también integrar capacidades de monitoreo y control remoto, aumentando la eficiencia y adaptabilidad de las máquinas [2], [6]. Además, soluciones innovadoras como la "Wirebender", que utiliza conectividad Wi-Fi y control avanzado, son una muestra del impacto que estas tecnologías tienen en la fabricación moderna [7].

En los últimos años, la investigación y el desarrollo en esta área han permitido integrar técnicas avanzadas como el control numérico computarizado (CNC) y el diseño asistido por computadora (CAD/CAM), que mejoran la precisión y

versatilidad de los sistemas automatizados. Por ejemplo, Hamid e Ito [8] demostraron cómo los modelos tridimensionales en sistemas CNC optimizan los procesos de doblado, mientras que Bhundiya y Cordero [9] introdujeron el método Bend-Forming, que combina el doblado CNC con planificación avanzada de trayectorias para fabricar estructuras complejas con mayor exactitud.

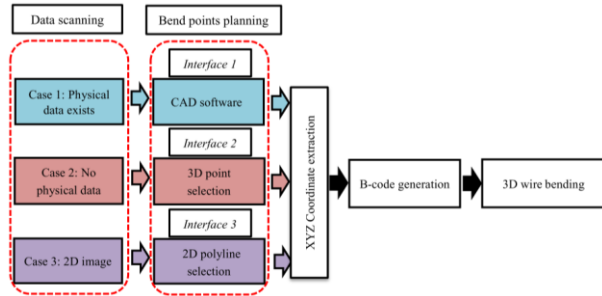


Fig. 1 Propuesta de trabajo para la fabricación de doblado de alambre usando CNC. [8]

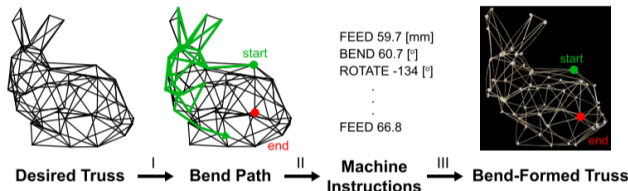


Fig. 2 Proceso de fabricación usando el método Bend-Forming. [9]

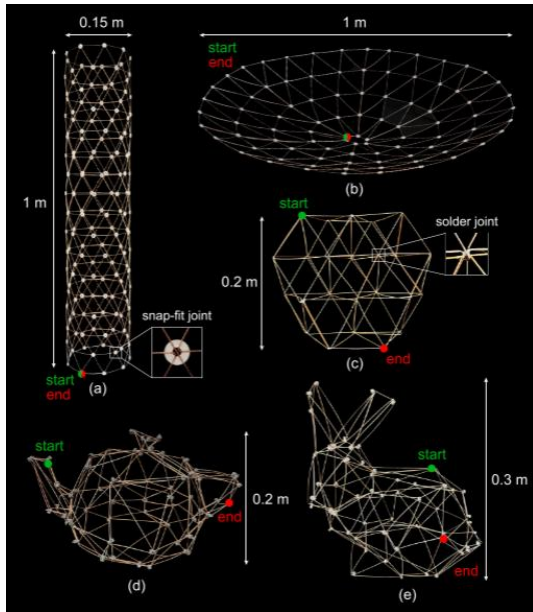


Fig. 3 Fotografías de estructuras de alambre tridimensionales ejemplares fabricadas con Bend-Forming. [9]

La inclusión de tecnologías de control como los sistemas de control numérico computarizado (CNC) ha ampliado la capacidad de las máquinas dobladoras, permitiendo un mayor nivel de precisión y control en el proceso de fabricación. De

hecho, el uso de CAD/CAM en combinación con CNC ha permitido a los ingenieros diseñar piezas con geometrías complejas, optimizando el proceso de doblado [10]. En este sentido, el trabajo de Herrmann et al. [11] resalta la importancia de la integración de estos sistemas en la mejora del diseño y fabricación de componentes industriales, resaltando la adaptabilidad y la mejora continua en estos procesos.

Además, el análisis de los materiales utilizados en los sistemas de doblado es esencial para garantizar su desempeño óptimo. El diagrama de tensión-deformación es una herramienta clave en este análisis, ya que describe cómo un material responde a la carga aplicada, desde la fase elástica hasta la fractura. Este diagrama, obtenido a través de ensayos de tracción uniaxial, muestra la relación entre la tensión (fuerza por área) y la deformación (cambio relativo en la longitud del material). Las etapas del diagrama incluyen la región elástica, donde el material sigue la ley de Hooke y se deforma proporcionalmente a la carga, y la región plástica, donde el material sufre deformaciones permanentes antes de llegar al punto máximo de tensión y finalmente a la fractura [12].

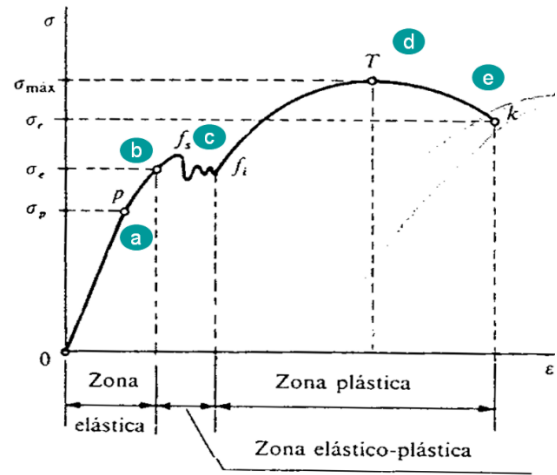


Fig. 4 Diagrama de tensiones y deformaciones. [12]

En este contexto, las fórmulas de momento de flexión y esfuerzo de flexión son esenciales para determinar las cargas y las tensiones involucradas en el doblado de alambres. El momento de flexión se calcula mediante la fórmula:

$$M = F \cdot d \quad (1)$$

Donde:

F : es la fuerza aplicada.

d : es la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza al eje de doblado.

Por otro lado, el esfuerzo de flexión se determina con la fórmula:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (2)$$

Donde:

c : es la distancia del eje neutro al punto más lejano de la sección transversal.

I : es el momento de inercia de la sección transversal.

Para una sección circular, el momento de inercia se calcula como:

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (3)$$

Donde:

d : es el diámetro del alambre [13].

En sectores como la construcción, máquinas como las descritas por Apaza Cocarico [14] han optimizado el doblado de barras de acero corrugado, aumentando la eficiencia en obras civiles. Del mismo modo, Gaidhane et al. [15] destacaron el uso de impresión 3D para redefinir métodos de fabricación, abriendo nuevas posibilidades en la fabricación de estructuras tridimensionales, superando las limitaciones de los métodos convencionales. Estas innovaciones no solo han mejorado la eficiencia en el proceso de fabricación, sino que también han permitido la creación de piezas con formas más complejas, adaptándose mejor a los requerimientos de diversas industrias.



Fig. 5 Diagrama de bloques para la utilización del sistema doblador. [14]

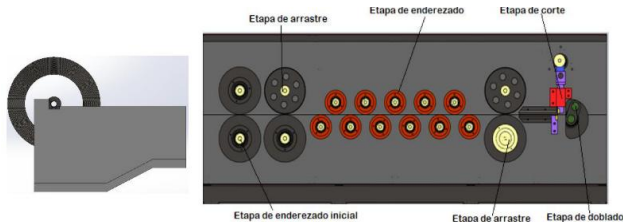


Fig. 6 Esquema de configuración sistema doblador de estribos para la construcción. [14]

El avance de la automatización y la optimización en el doblado de alambres también ha sido potenciado por el desarrollo de tecnologías como la impresión 3D y la fabricación aditiva. Según estudios recientes, como el de Gaidhane et al. [15], la adopción de estas tecnologías ha ampliado las posibilidades de fabricación, permitiendo la creación de piezas con geometrías más complejas y una mayor personalización, lo que contribuye a mejorar la eficiencia en la producción y a la reducción de costos operativos.



Fig. 7 Modelo conceptual de una máquina dobladora de alambres impreso en 3D. [15]

Para llevar a cabo este proyecto, se aprovecharán herramientas modernas de diseño y análisis como ANSYS Workbench para el análisis estructural y Ultimaker Cura para la impresión de piezas en 3D. Este enfoque permitió diseñar e implementar una máquina dobladora de alambres accesible, eficiente y adaptable a diferentes entornos industriales, contribuyendo al avance del sector manufacturero mediante soluciones tecnológicas modernas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Diseño del sistema y análisis de partes CAD

El diseño mecánico de la máquina dobladora de alambres incluyó varios componentes críticos, cada uno fabricado con materiales y especificaciones que garantizaron su funcionalidad. El diseño fue realizado mediante software CAD Autodesk Inventor, con un enfoque en la optimización del peso y resistencia de cada componente.

Montura para el Motor: Diseñada para fijar el motor paso a paso NEMA 17, asegurando estabilidad y precisión. Fabricada con ranuras ajustables para una alineación óptima.

Eje de Flexión: Transmite el torque del motor al sistema de doblado. Diseñado para resistir la torsión, con extremos acoplables al motor y al mecanismo.

Boquilla para el Alambre: Guía el alambre hacia la zona de doblado, minimizando el roce y garantizando un flujo continuo. Impresa en 3D con material resistente a la abrasión.

Montura para el Alimentador: Soporta el mecanismo de alimentación del alambre, garantizando estabilidad y alineación. Incluye ranuras para ajustar la tensión.

Parte Inferior de la Alisadora: Base que soporta los rodillos alisadores, con cavidades para fijación y ajuste de posición, proporcionando estabilidad al sistema.

Parte Superior de la Alisadora: Complementa la parte inferior, aplicando presión uniforme para eliminar deformaciones en el alambre. Su diseño permite ajustes mediante tornillos o resortes.

Rodillos Alisadores: Fabricados con material resistente al desgaste y diseñados para un contacto uniforme. Su configuración optimiza la rectificación del alambre.

Soporte para el Alambre: Mantiene el alambre alineado antes y durante el proceso de doblado. Incluye un canal central y perforaciones para fijación firme.

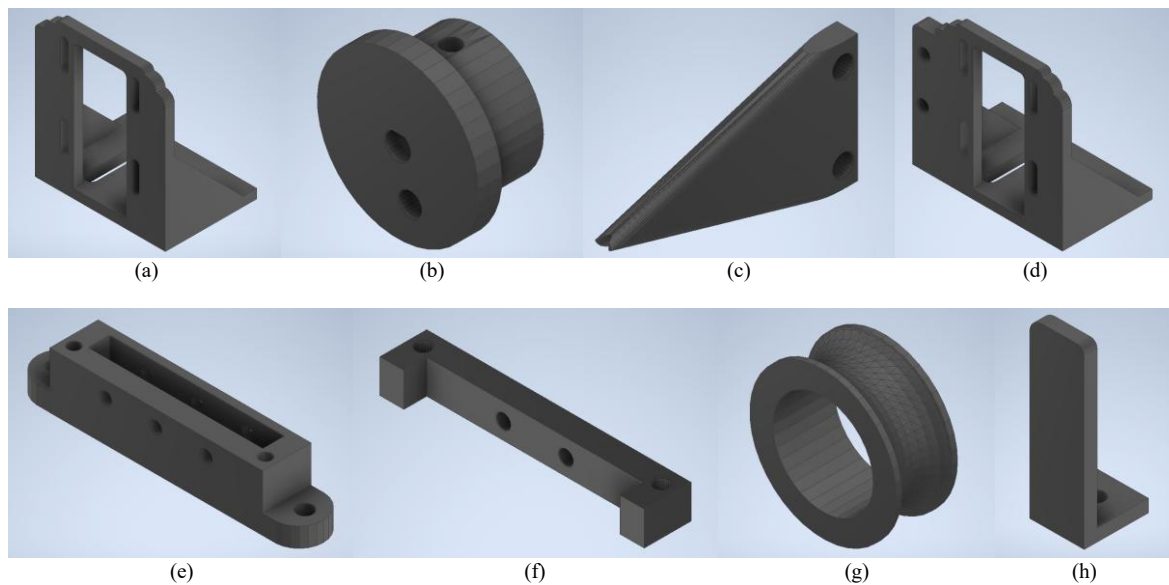


Fig. 8 (a) Montura para el Motor, (b) Eje de Flexión, (c) Boquilla para el Alambre, (d) Montura para el Alimentador, (e) Parte Inferior de la Alisadora, (f) Parte Superior de la Alisadora, (g) Rodillos Alisadores, (h) Soporte para el Alambre.

Para la fabricación de todas las partes mecánicas de la máquina dobladora de alambres, se utilizó PLA (ácido poliláctico) como material base, aprovechando la tecnología de impresión 3D. Además, antes de realizar el análisis de esfuerzos se realizó el cálculo del torque necesario y el cálculo de fuerza máxima ocasionada por el momento de flexión.

Se realizó el cálculo del torque necesario para cada diámetro de alambre según la norma AWG, se necesitó saber el límite elástico del material a doblar. Para este proyecto se realizó este análisis con alambres de cobre.

TABLA I
YIELD STRENGTH σ_y , AND TENSILE STRENGTH σ_{ts}

Material	σ_y (MPa)	σ_{ts} (MPa)
Cast irons	215–790	350–1000
High carbon steels	400–1155	550–1640
Medium carbon steels	305–900	410–1200
Low carbon steels	250–395	345–580
Low alloy steels	400–1100	460–1200
Stainless steels	170–1000	480–2240
Aluminum alloys	30–500	58–550
Copper alloys	30–500	100–550
Lead alloys	8–14	12–20
Magnesium alloys	70–400	185–475

Nota. La tabla muestra los rangos de resistencia a la cedencia (σ_y) y tracción máxima (σ_{ts}) de distintos materiales.

TABLA II
MOMENTO DE FLEXIÓN PARA CADA DIÁMETRO

AWG	Diámetro (mm)	Momento de Inercia (I)	Distancia c (mm)	Momento de Flexión (M)
22	0.6438	8.43284E-15	0.3219	0.00550139
21	0.7239	1.34798E-14	0.36195	0.00782087
20	0.8128	2.14242E-14	0.4064	0.01107058
19	0.912	3.39586E-14	0.456	0.01563881
18	1.024	5.39722E-14	0.512	0.02213701
17	1.1495	8.57049E-14	0.57475	0.03131455
16	1.2908	1.36272E-13	0.6454	0.04434004
15	1.4503	2.17171E-13	0.72515	0.06289161
14	1.6281	3.44901E-13	0.81405	0.08897386
13	1.8288	5.49079E-13	0.9144	0.1261008
12	2.0523	8.7083E-13	1.02615	0.17821396
11	2.3038	1.38277E-12	1.1519	0.25208878
10	2.5883	2.20307E-12	1.29415	0.35748928
9	2.9058	3.49972E-12	1.4529	0.5058437
8	3.2646	5.57558E-12	1.6323	0.71731369
7	3.6652	8.85851E-12	1.8326	1.01510794
6	4.1154	1.40805E-11	2.0577	1.4369953
5	4.6212	2.23866E-11	2.3106	2.03462081
4	5.1892	3.55936E-11	2.5946	2.88084848
3	5.8273	5.6603E-11	2.91365	4.0796351
2	6.543	8.99658E-11	3.2715	5.77497289
1	7.3481	1.4311E-10	3.67405	8.1798316

Nota. La tabla detallada propiedades mecánicas clave de alambres según su calibre AWG.

Se calculó la fuerza que tendrá que soportar el doblador de alambres se usó la fórmula (1). Donde el torque máximo que nos puede proporcionar el motor paso a paso Nema 17 es 0.48

Nm, según su Datasheet, y la distancia desde el punto de aplicación es 9,6 mm. Se reemplazo estos valores en la formula (1) y nos dio como resultado:

$$F = \frac{0,48 [Nm]}{9,6 \cdot 10^{-3} [m]}$$

$$F = 50N$$

Con esta fuerza se pudo realizar el análisis de esfuerzos en ANSYS para determinar si el doblador de alambres impreso mediante manufactura asistida es capaz de soportar dichos esfuerzos.

El eje de flexión es esencial en el proceso de doblado del alambre y está sometido a una torsión debido al motor paso a paso NEMA 17. Se realizó una simulación con una malla de 5 mm, fijando los extremos del eje para simular su sujeción. Se aplicó un momento torsional de 1,5 N·m, correspondiente al par del motor. Se realizó un cabo análisis de esfuerzo equivalente y deformación total, cuyos resultados se presentarán a continuación:

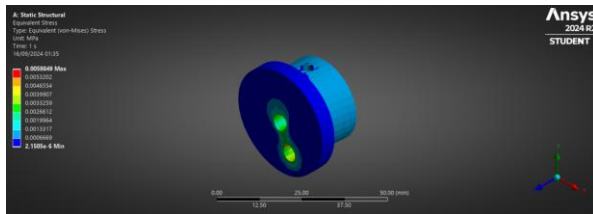


Fig. 9 Análisis de Esfuerzos Equivalentes (Eje de Flexión).

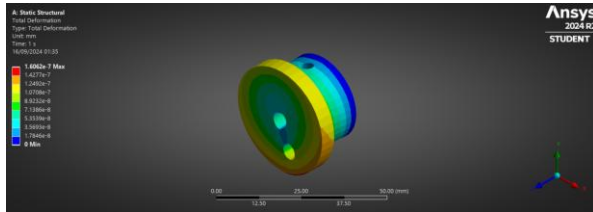


Fig. 10 Análisis de Deformación Total (Eje de Flexión).

La montura del motor paso a paso NEMA 17 soporta su peso y las vibraciones generadas durante la operación. Se generó una malla con elementos de 0,9 mm y se fijaron las superficies de la montura en los puntos donde está atornillada a la estructura. Se aplicó una fuerza equivalente al peso del motor (2.94 N) en la dirección vertical y fuerzas adicionales de 5 N para simular vibraciones bajo cargas dinámicas. Se realizó análisis de esfuerzo equivalente y deformación total.

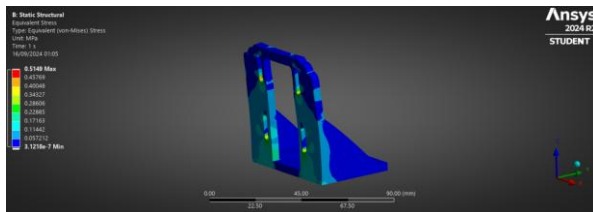


Fig. 11 Análisis de Esfuerzos Equivalentes (Montura del motor paso a paso).

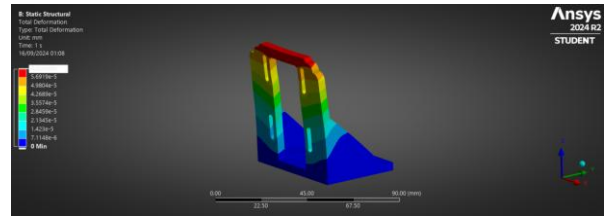


Fig. 12 Análisis de Deformación Total (Montura del motor paso a paso).

La montura para el alimentador sostiene el mecanismo que alimenta el alambre hacia el sistema de doblado. Se generó una malla con elementos de 1 mm y se fijaron los puntos de sujeción en la estructura. Se aplicó una fuerza lateral de 6 N en los soportes, simulando el peso del motor paso a paso y el alimentador. Se realizó análisis de esfuerzo equivalente y deformación total, cuyos resultados se presentarán a continuación:

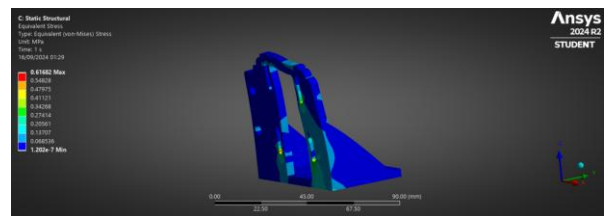


Fig. 13 Análisis de Esfuerzos Equivalentes (Montura para el alimentador).

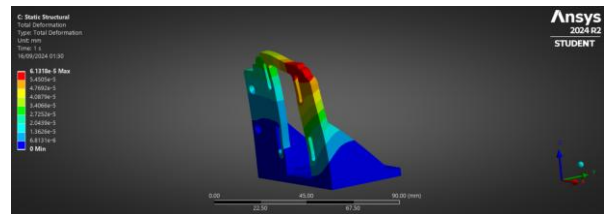


Fig. 14 Análisis de Deformación Total (Montura para el alimentador).

La boquilla para el alambre es clave en el sistema de doblado, actuando como punto de apoyo para el alambre durante la flexión. Se diseñó para resistir las fuerzas de contacto generadas por el alambre telefónico de 22 AWG. Se generó una malla refinada con elementos de 0,5 mm en la punta y 1,18 mm en el resto de la geometría. La base se fijó mediante un soporte fijo, y en la punta se aplicó una fuerza de 3 N, simulando el esfuerzo del alambre. Se realizaron análisis de tensiones máximas, que se espera se concentran en la punta, y deben estar por debajo del límite elástico del material (65 MPa). Las deformaciones deben ser mínimas para mantener la funcionalidad de la pieza. Los resultados de estos análisis se presentarán a continuación.

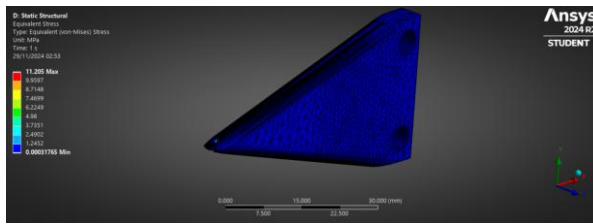


Fig. 15 Análisis de Tensiones Máximas (Boquilla del alimentador).

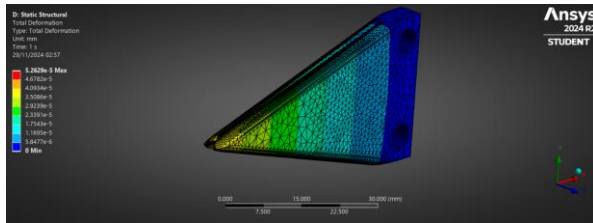


Fig. 16 Análisis de Deformación Total (Boquilla del alimentador).

Es importante mencionar que cada pieza fue impresa en 3D con PLA (Acido Poliláctico), con una calidad alta de paso 0.12 mm y una densidad del 80% para garantizar que soporte las cargas mencionadas.

B. Consideración de materiales alternativos

Durante el desarrollo del sistema se utilizó PLA por su bajo costo, facilidad de impresión y disponibilidad local. No obstante, se observó que algunas piezas sometidas a esfuerzos

continuos o vibraciones, como el eje de flexión y las monturas de los motores, podrían requerir materiales con mayor resistencia mecánica y térmica. Por ello, se propone considerar alternativas como PETG, ABS o filamentos con fibra de carbono, que ofrecen mayor durabilidad, resistencia al impacto y al calor.

C. Sistema electrónico y ensamble

El sistema electrónico está compuesto por:

Motores Paso a Paso NEMA 17: Actuadores principales que garantizan la precisión y fuerza necesarias para el doblado del alambre.

Drivers A4988: Controlan los motores paso a paso bipolares, gestionando la corriente de hasta 2A y asegurando un funcionamiento estable.

Microcontrolador ESP32-S3: Gestor central del sistema que coordina las tareas de control, programación y operación. Ofrece conectividad Wi-Fi y Bluetooth para posibles expansiones.

Fuente de Alimentación: Proporciona 12V y 1A, asegurando un suministro estable para todos los componentes electrónicos.

El diagrama de conexiones detalla la configuración del circuito, incluyendo las conexiones entre el ESP32, los drivers, los motores y la fuente de alimentación. Este diagrama fue realizado en Wokwi y se muestra a continuación:

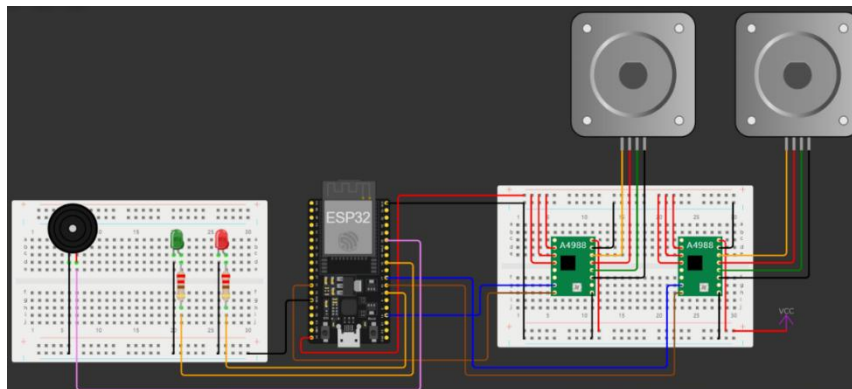


Fig. 17 Circuito esquemático del sistema.

Los componentes electrónicos fueron montados y conectados de acuerdo con el diagrama de conexiones. Se fijó los drivers a los motores y su enlace al ESP32-S3.

D. Programación y creación de la aplicación móvil

El ESP32-S3 fue programado para gestionar las secuencias de doblado, el control de los motores y la alimentación del alambre. A continuación, se presentará fragmentos del código utilizado para el control del motor.

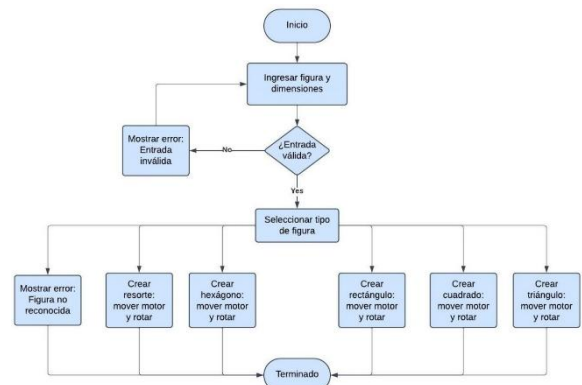


Fig. 18 Diagrama de flujo para el programa principal.

TABLA III
SECUENCIA PARA LA CREACIÓN DE UN TRIÁNGULO

```
if (a == 1){
  Serial.println("Hacer un triángulo con la longitud de los lados ");
  Serial.print(b);
  Serial.println("mm");
  for (int x=0; x<3; x++){
    Feed_stepper.move(FEEDSTEPS*b*MICROSTEPS);
    delay(Delay);
    Bend_stepper.rotate(95);
    delay(Delay);
    Bend_stepper.rotate(-95);
  }
}
```

Nota. Este fragmento del código forma un triángulo moviendo un motor x doblando 95° tres veces.

TABLA IV
SECUENCIA PARA LA CREACIÓN DE UN RESORTE

```
if (a == 5){
  Serial.println("Hacer resorte de longitud ");
  Serial.print(b);
  Serial.println("mm");
  for (int x=0; x<b*5; x++){
    Feed_stepper.move(360);
    delay(Delay);
    Bend_stepper.rotate(60);
    delay(Delay);
    Bend_stepper.rotate(-60);
  }
  Feed_stepper.move(FEEDSTEPS*15*MICROSTEPS);
  a = 0;
  b = 0;
}
```

Nota. El código crea un recurso de longitud en mm mediante movimientos del alimentador y dobles de 60°, repitiendo el proceso por 5 veces.

Para la creación de la aplicación móvil se usó Blink IoT, aprovechando la conectividad Wi-Fi del ESP32-S3. Esta interfaz permite al usuario seleccionar la figura a realizar (triángulo, cuadrado, rectángulo, hexágono o resorte), definir el tamaño de la figura, ajustar el número de figuras a crear y activar el sistema para empezar el proceso de doblado.

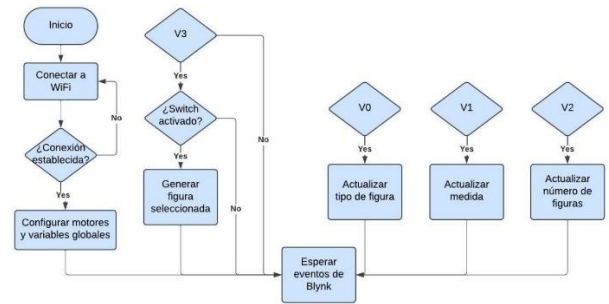


Fig. 19 Diagrama de flujo para el código de la interfaz.

TABLA V
CONFIGURACIÓN BLINK EN EL CÓDIGO

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL2igy7dPGw"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Máquina Dobladora de Alambres"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN
"Sjx8GFP4iTYExFmSpIx32WbbOHxAFIV"
// Configuración de red Wi-Fi
char auth[] = BLYNK_AUTH_TOKEN;
char ssid[] = "AndroidAP"; // ID del Wi-fi
char pass[] = "whgl3986"; // Contraseña del Wi-fi
```

Nota. El código configura la conexión a Blynk y Wi-Fi, incluyendo el ID del proyecto, nombre de la máquina, token, SSID y contraseña.

Cabe resaltar que el token que se asigna automáticamente al crear un nuevo proyecto en la plataforma Blynk y este es único para cada proyecto.

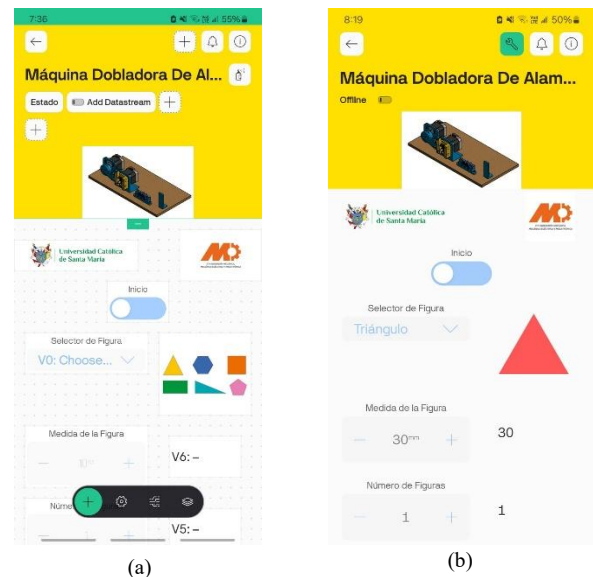


Fig. 20 (a) Pantalla Principal de edición de Blynk para la app móvil de la Máquina Dobladora de Alambres. (b) Interfaz final de Blynk.

Además de la fabricación de figuras individuales, se planteó y materializó la posibilidad de realizar secuencias

continuas de figuras geométricas. Para alcanzar esto, se llevó a cabo un rediseño estratégico del eje de flexión, adaptándolo para soportar de manera eficiente los procesos repetitivos y continuos que estas secuencias requieren, logrando que la máquina pudiera ejecutarlas.



Fig. 21 Rediseño del Eje de Flexión para Secuencias de Figuras.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de realizar pruebas exhaustivas, se obtuvieron resultados significativos sobre la capacidad y funcionalidad de la máquina dobladora de alambres. Las pruebas incluyeron la fabricación de figuras geométricas básicas y complejas, tales como triángulos, cuadrados, pentágonos, hexágonos y un resorte. Cada figura fue configurada a través de una interfaz gráfica basada en la plataforma Blynk, lo que permitió al usuario establecer parámetros clave como la longitud de los lados, el diámetro y el número de dobleces. Los comandos enviados desde la interfaz fueron interpretados correctamente por el sistema de control, y los resultados mostraron que la máquina pudo replicar las figuras con un alto grado de precisión.

La máquina fabricó un triángulo con precisión, logrando que los ángulos y longitudes correspondieran a las configuraciones iniciales.

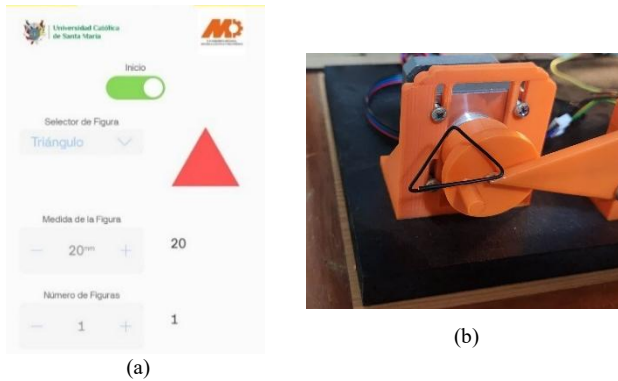


Fig. 22 (a) Interfaz gráfica configurada para la creación del triángulo. (b) Resultado final del triángulo fabricado por la máquina dobladora.

Para el cuadrado, los cuatro dobleces necesarios se realizaron sin problemas, obteniendo un cuadrado simétrico y conforme a las dimensiones establecidas.



Fig. 23 (a) Interfaz gráfica configurada para la creación del cuadrado. (b) Resultado final del cuadrado fabricado por la máquina dobladora.

La complejidad adicional del pentágono fue gestionada con éxito, destacando la capacidad del sistema para realizar múltiples dobleces consecutivos con precisión.

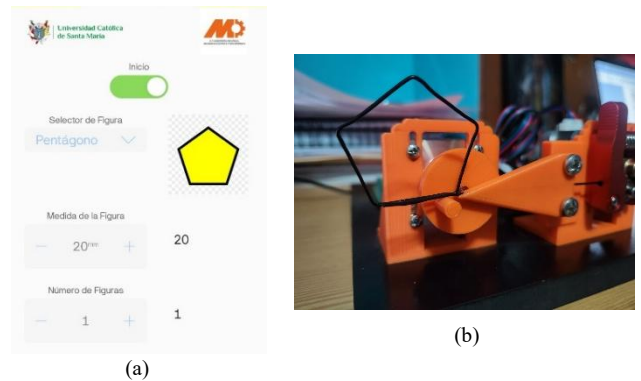


Fig. 24 (a) Interfaz gráfica configurada para la creación del pentágono. (b) Resultado final del pentágono fabricado por la máquina dobladora.

En el hexágono la uniformidad en los ángulos internos y las longitudes de los lados evidenciaron la precisión del sistema para fabricar figuras geométricas regulares.

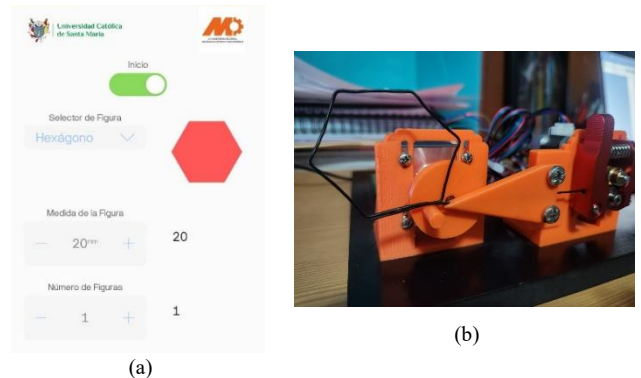


Fig. 25 (a) Interfaz gráfica configurada para la creación del hexágono. (b) Resultado final del hexágono fabricado por la máquina dobladora.

Y, por último, para el resorte, a pesar de ser la figura más desafiante, la máquina logró producir un recurso funcional y uniforme, evidenciando su capacidad para manejar configuraciones avanzadas y procesos repetitivos.

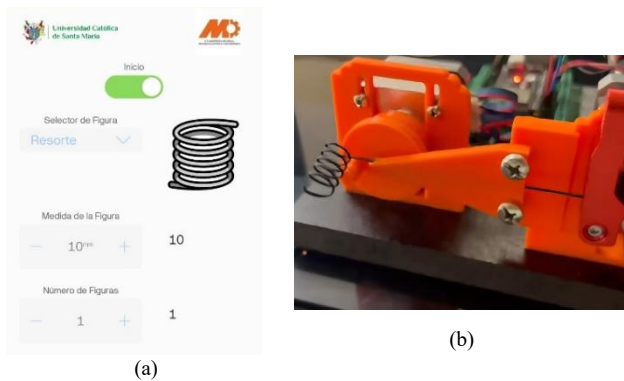


Fig. 26 (a) Interfaz gráfica configurada para la creación del resorte. (b) Resultado final del resorte fabricado por la máquina dobladora.

En todos los resultados, las figuras fabricadas cumplieron con las especificaciones definidas, destacando la funcionalidad intuitiva de la interfaz gráfica y la efectividad del sistema mecánico y de control. Estos mostraron que la máquina dobladora de alambres es capaz de fabricar figuras geométricas con un alto nivel de precisión. Sin embargo, en figuras más complejas como el resorte o el pentágono, se observaron pequeñas variaciones en las dimensiones finales, con un margen de error de ± 2 mm, posiblemente causadas por ligeras imprecisiones en el diseño del sistema de flexión o en la calibración inicial del sistema.

A pesar de estas variaciones, el desempeño general fue satisfactorio, validando el diseño del sistema y su capacidad para cumplir con los objetivos planteados. Además, la interfaz gráfica demostró ser una herramienta eficiente para la configuración de parámetros y la personalización de las figuras fabricadas.

Además, se realizaron pruebas de secuencias de figuras geométricas (como triángulos y cuadrados consecutivos). Sin embargo, en varias ocasiones, el alambre chocó con la base, provocando deformaciones en las figuras fabricadas. Este problema limitó la capacidad del sistema para realizar secuencias más grandes o complejas, lo que sugiere la necesidad de realizar ajustes en el diseño de la base para eliminar estas interferencias.

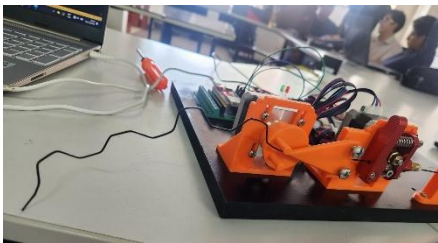


Fig. 27 Resultado de la Secuencia de Cuadrados.

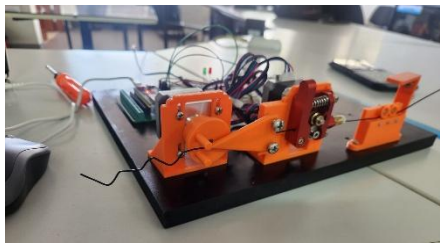


Fig. 28 Resultado de la Secuencia de Triángulos

El desempeño de la máquina dobladora de alambres demuestra su potencial para aplicaciones prácticas en proyectos que requieren precisión en la fabricación de figuras geométricas. Aunque existen áreas de mejora, los resultados obtenidos validan la funcionalidad básica del sistema y sientan las bases para futuras optimizaciones que incrementan su versatilidad y rendimiento.

A. Comparación con tecnologías existentes

TABLA VI
COMPARATIVA DE LA DOBLADORA PROPUESTA CON OTRAS
TECNOLOGÍAS EXISTENTES

Características	Propuesta en este proyecto	Máquina CNC comercial	Proyecto académico
Precisión	± 2 mm	± 0.5 mm	± 3 mm
Costo estimado	~80 USD	>3000 USD	~150 USD
Control desde app móvil	Sí (Blynk IoT)	Variable	No
Capacidad de figuras	Triángulo a hexágono + resorte	Ilimitada	Solo 2D
Tecnología de fabricación	Impresión 3D (PLA)	Aleación metálica	Impresión 3D (PLA)

Nota. La tabla compara la dobladora propuesta con una CNC comercial y un proyecto académico anteriormente citado [15], destacando ventajas en costo, control y funcionalidad.

B. Impacto práctico y sectores de aplicación

El desarrollo de la máquina dobladora de alambres controlada por ESP32-S3 y una aplicación móvil ofrece una solución accesible y personalizable para distintos sectores. En el ámbito educativo, su bajo costo y facilidad de implementación la hacen ideal para enseñar automatización, electrónica, diseño mecánico y control IoT en laboratorios universitarios e institutos técnicos.

En el sector artesanal y de pequeña producción, permite optimizar procesos de fabricación de piezas decorativas, joyería y prototipos, ofreciendo precisión, repetitividad y facilidad de configuración a bajo costo.

Además, su diseño modular y abierto la convierte en una base atractiva para proyectos de investigación aplicada y el desarrollo de soluciones flexibles en manufactura distribuida y automatización accesible.

C. Optimización estructural para evitar colisiones

Para evitar colisiones del alambre durante la fabricación de secuencias, se propone modificar la base, sustituyendo la sección bajo el eje de flexión por un soporte abierto,

permitiendo mayor libertad de movimiento sin afectar la estabilidad estructural.

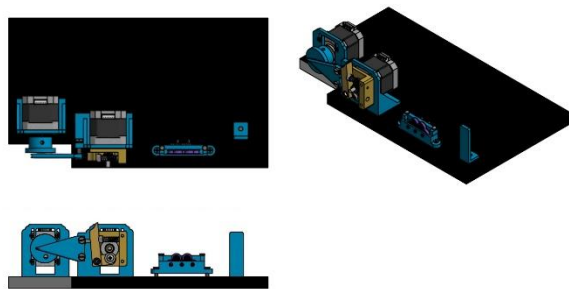


Fig. 29 Propuesta de rediseño de la base para evitar colisiones.

IV. CONCLUSIONES

Se logró desarrollar una máquina dobladora de alambres que cumple con los requerimientos establecidos en el objetivo general. La máquina, construida con componentes accesibles y tecnologías asequibles como la impresión 3D, mostró ser funcional dentro de las limitaciones técnicas y presupuestarias del proyecto. A través de un sistema de control electrónico basado en microcontroladores y motores paso a paso, la máquina fue capaz de realizar doblados de alambre con precisión, adaptándose a diversas geometrías.

Los resultados de las pruebas mostraron que la máquina dobladora de alambres mantiene un margen de error de ± 2 mm, evidenciando su capacidad para realizar figuras geométricas con un alto grado de exactitud y repetir los dobleces de manera confiable. Esto valida la eficacia del diseño en aplicaciones donde la precisión es fundamental.

La integración de componentes accesibles, como el microcontrolador ESP32-S3, los motores NEMA 17 y los controladores A4988, permitieron desarrollar una solución eficiente y económica. Este enfoque posiciona el proyecto como una alternativa factible para quienes necesitan automatizar procesos de doblado sin recurrir a equipos costosos.

La aplicación móvil desarrollada con la plataforma Blynk IoT ofreció una experiencia de uso intuitiva, facilitando al usuario la selección de figuras, dimensiones y el inicio del proceso de doblado desde su dispositivo móvil. Esta implementación demostró el potencial de las interfaces basadas en IoT para simplificar tareas complejas de manera práctica.

Durante las pruebas de secuencias de figuras geométricas, se observó que el alambre podía colisionar con la base de la máquina, provocando deformaciones en las piezas. Este hallazgo resalta la necesidad de rediseñar la base para evitar estas interferencias y permitir la fabricación de secuencias más complejas sin contratiempos.

La funcionalidad demostrada por la máquina indica que puede ser una herramienta útil tanto en el ámbito industrial como académico. Además, su diseño modular permite añadir nuevas características, como sensores adicionales o mejoras en

la interfaz, ampliando su capacidad para adaptarse a diferentes necesidades y proyectos futuros.

REFERENCIAS

- [1] M. P. Groveer, "Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing (4th ed.)," 2020.
- [2] R. Abdul Hamid, K. Morisaki, and T. Ito, "B-CODE GENERATION FOR A CNC DENTISTRY WIRE BENDING MECHANISM," 2018.
- [3] M. O. Farhan, M. M. H. Al-Khafaji, and M. Q. Abood, "Design and Implementation of a Versatile Flexible 3D Wire Bending Machine with Accuracy Algorithm," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 244–254, 2024, doi: 10.12913/22998624/180310.
- [4] R. Liu, W. Wan, E. Isomura, and K. Harada, "Metal Wire Manipulation Planning for 3D Curving -- How a Low Payload Robot Can Use a Bending Machine to Bend Stiff Metal Wire," Mar. 2022, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2203.04024>
- [5] K. M. Bhurchandi and A. K. Ray, "ADVANCED MICROPROCESSORS AND PERIPHERALS," vol. THIRD EDITION, 2021.
- [6] I. R. Al-Saedi, F. M. Mohamed, and S. S. Obayes, *CNC Machine Based on Embedded Wireless and Internet of Things for Workshop Development*. IEEE, 2017.
- [7] R. Kunst, L. Avila, A. Binotto, E. Pignaton, S. Bampi, and J. Rochol, "Improving devices communication in Industry 4.0 wireless networks," *Eng Appl Artif Intell*, vol. 83, pp. 1–12, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.engappai.2019.04.014.
- [8] R. A. Hamid and T. Ito, "Integration of CAD/CAM in developing the CNC dental wire bending machine," in *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, Japan Society of Mechanical Engineers, 2018. doi: 10.1299/jamdsm.2018jamdsm0079.
- [9] H. G. Bhundiya and Z. C. Cordero, "Bend-Forming: A CNC deformation process for fabricating 3D wireframe structures," *Additive Manufacturing Letters*, vol. 6, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.addlet.2023.100146.
- [10] S. Balamurugan, "CAD/CAM/CNC IN MANUFACTURING Current Trends in manufacturing (system) Engineering," 2021. [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=3767525>
- [11] P. Herrmann, M. Gerngroß, and C. Endisch, *Benefits of Numerical Optimization and CAD/CAM in Needle Winding Processes*. IEEE, 2019.
- [12] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek, "MECÁNICA DE MATERIALES," vol. 8TH EDITION, Apr. 2021.
- [13] Russell C. Hibbeler, "MECHANICS OF MATERIALS (10th ED.)," Sep. 2017.
- [14] C. A. Apaza Cocarico, "SISTEMA DOBLADOR DE ESTRIBOSDE BARRAS DE ACERO CORRUGADO PARA EL ARMADO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS," La Paz, Nov. 2022. Accessed: Aug. 24, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/30933>
- [15] R. V. Gaidhane *et al.*, "Design and Analysis of 3d CNC Bending Machine Prototype and Manufacturing It Using 3d Printing Technology," 2021.