

Semi-automatic Prototype for the Control of the Processes of Pressing, Braiding and Cutting of Wires in the Manufacture of Flowerpot Hooks

Sixto-Santamaria, Estefany. Coello-Juarez, Salma Y. Ramírez-Hernández, Gabriel T.
Trinidad-Sánchez, Guillermo. Márquez-Rubio, Juan F.

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Culhuacán, Instituto Politécnico Nacional, CDMX, México. (e-mails: esixtos1800@alumno.ipn.mx, scoelloj1700@alumno.ipn.mx, gramirezhl1700@alumno.ipn.mx, gtrinidads@ipn.mx, jmarquezzr@ipn.mx)

Abstract: This paper presents the design and construction of a semi-automatic prototype to control the processes of pressing, braiding and cutting of wire in the manufacture of flowerpot hooks at the Maquiladora Hermanos CAYFRA (Xochimilco, CDMX). The prototype was developed using 3D modeling and printing, electronics and programming in C language. The proposed prototype is mainly composed of three mechanical structures, an electronic circuit and a user interface to control the processes. The main objective of this work is to improve and reduce the manufacturing time of the wire hooks for flowerpots.

Keywords: Process control, automatic configuration, sensor and actuator networks, control system design, human-machine interface, 3D modeling.

1. INTRODUCCIÓN

Después de la revolución industrial las máquinas lograron un gran impacto en la productividad de la industria manufacturera, logrando remplazar la mano de obra. Se entiende por máquina al conjunto de piezas o elementos, móviles o no móviles que por efecto de su enlace es capaz de transformar la energía que se le suministra (Schwab, 2011).

Hoy en día, la automatización industrial se ha apoderado del proceso de producción en las industrias debido a que mejora la calidad del producto, ahorra tiempo, reduce los gastos y aumenta el rendimiento (Sicma, 2021). No obstante, algunas pequeñas y medianas empresas se enfrentan a varios obstáculos para automatizar sus procesos, entre los problemas más comunes esta la asignación de procesos complejos y los costes de implementación (Lange, 2020).

Maquiladora Hermanos CAYFRA es una pequeña empresa que forma parte de la asociación de productores de plantas y flores de ornato de la alcaldía Xochimilco en la CDMX. Entre sus actividades esta la elaboración de ganchos de macetas para la venta de plantas y flores de ornato.

Maquiladora Hermanos CAYFRA cuenta con su propia máquina de manufactura manual para la fabricación de los ganchos de maceta, su finalidad es prensar, trenzar y cortar tres alambres de calibre 22; sin embargo, al tratarse de un proceso totalmente manual tiene algunos inconveniente como por ejemplo: no hay precisión en el número de vueltas ocasionando que a veces el trenzado quede flojo y se deshaga, en el proceso de prensado el operador puede llegar a aplicar

demasiada fuerza ocasionando que los alambres se rompan y el tiempo de fabricación es tardado.

Actualmente existen diferentes máquinas especializadas para realizar los procesos ya mencionados: prensar, trenzar y cortar. Por ejemplo, HERZOG es una empresa líder en el mercado de máquinas trenzadoras y bobinadoras. Entre sus productos tienen una máquina trenzadora de alambres para hilos metálicos recomendada para la producción de mangueras de alta presión o cable de tierra (Herzog, s.f). Otro caso es la empresa Sedeke, líder en la fabricación de máquinas para el corte, pelado, prensado y caucho para arneses de cables en sistemas de automatización industrial. Cuentan con una máquina prensadora semiautomática para terminales de alambre diseñada para crimpar terminales cilíndricos con una fuerza de crimpado de hasta 2 toneladas y también cuentan con una maquina automática de corte de alambre con precisión de hasta 0.1mm y potencia de 150 W (Sedeke, s.f.).

Las maquinas mencionadas anteriormente están enfocadas a otras actividades, por lo que podrían llegar a ser robustas y de alto costo en comparación a lo que se necesita implementar en la Maquiladora Hermanos CAYFRA. Lo que se requiere es una máquina que cuente con las siguientes características: tener un mejor control, mayor precisión y reducir el tiempo de elaboración del producto, además de que el coste de mantenimiento sea bajo.

Al no contar en el mercado con una máquina que cumpla con los requerimientos para la fabricación del tipo de ganchos que realizan en la Maquiladora Hermanos CAYFRA, se pretende iniciar con el diseño y construcción de un prototipo semi-

automatizado para el control de los procesos de prensado, trenzado y corte de alambres en la fabricación de ganchos para macetas mediante la implementación de un sistema de control de lazo abierto que trabaje con un programa preestablecido en base al tiempo.

2. METODOLOGÍA

La metodología se divide en dos partes fundamentales. La primera corresponde al diseño y construcción de tres estructuras mecánicas diferentes para los procesos de prensado, trenzado y corte. La segunda parte corresponde al diseño y construcción de un circuito electrónico, así como una interfaz de usuario.

2.1 Diseño de las estructuras mecánicas.

Para cada uno de los procesos (prensado, trenzado y corte) se diseñó una estructura mecánica diferente. El software que se utilizó fue FreeCAD. Con el diseño de cada mecanismo se buscó mejorar cada proceso y hacer que se volviera más cómodo y fácil de usar para el usuario.

2.1.1 Diseño para el proceso de trenzado.

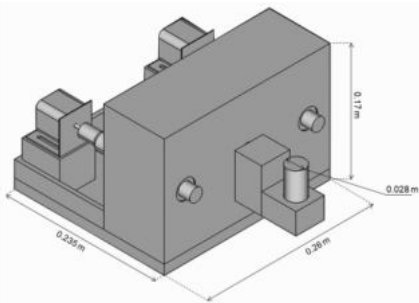


Fig. 1. Diseño de la estructura mecánica para el trenzado.

El diseño de la estructura mecánica para el proceso de trenzado se muestra en la Fig. 1. Este diseño cuenta con una carcasa que en su interior tiene una configuración de tres engranes como se muestra en la Fig. 2. Los engranes menores tienen 19 dientes y son los conductores ya que cada uno está acoplado a un motor a pasos de 1.7 A con un torque de 0.3922 Nm mientras que el engrane mayor es el conducido y tiene 57 dientes.

La relación de transmisión (i) se da entre el cociente del número de dientes del engrane conductor (Z_1) y el número de dientes del engrane conducido (Z_2), la ecuación es la siguiente:

$$i = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (1)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación (1), tenemos:

$$i = \frac{19}{57} = \frac{1}{3}$$

Esto indica que por cada tres vueltas que da el engrane conductor el engrane conducido da solo una vuelta. Al resultar

un valor menor a uno se trata de un sistema reductor de velocidad. Esto nos asegura que la velocidad disminuye pero el torque aumenta.

Los engranes de menor tamaño transfieren la fuerza de los motores al engrane central el cual está conectado a un brazo rotatorio. La transferencia de fuerza a través de los engranes se da por medio de un movimiento angular, pero dado a que las fuerzas se aplican en el mismo sentido se puede interpretar como un movimiento lineal. Dicho tipo de movimiento se trata de una suma de torques de los motores a pasos, resultando en la siguiente ecuación:

$$\tau_r = \tau_1 + \tau_2 \quad (2)$$

El torque total se calculó usando (2) y se obtuvo un valor de 0.7844 Nm. Al conocer el torque total podemos calcular la fuerza aplicada para trenzar los alambres.

El torque (τ) es el producto entre la fuerza aplicada (F) y la distancia desde el eje de rotación hasta el punto donde se aplica la fuerza (r), matemáticamente se expresa como:

$$\tau = F \times r \quad (3)$$

Al despejar la fuerza de la ecuación (3) nos queda:

$$F = \frac{\tau}{r} \quad (4)$$

Para conocer la fuerza central en el engrane mayor con un radio de 0.01 m, sustituimos los valores en (4), dando como resultado:

$$F_c = \frac{0.7844 \text{ Nm}}{0.01 \text{ m}} = 78.44 \text{ N}$$

Y para obtener la fuerza de palanca conocemos que la circunferencia primitiva del engrane mayor tiene un radio de 0.05 m, al sustituir valores en la ecuación (4) tenemos que:

$$F_p = \frac{0.7844 \text{ Nm}}{0.05 \text{ m}} = 15.688 \text{ N}$$

Por lo tanto, los alambres son trenzados con una fuerza central de 78.44 N y una fuerza de palanca de 15.688 N.

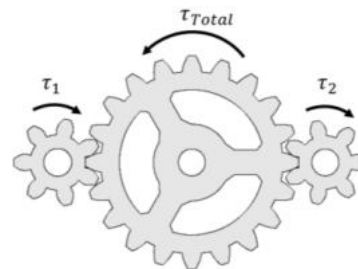


Fig. 2. Configuración de engranes.

2.1.2 Diseño para el proceso de prensado.

En la Fig. 3 se muestra el diseño de la estructura mecánica para el proceso de prensado. Este diseño cuenta con una mordaza

de dos piezas: una parte móvil y una fija. A través de la mordaza pasan dos varillas roscadas trapezoidales que se encuentran acopladas a un par de motores a pasos de 1.5 A y un torque de 0.3138 Nm, esto le permite a la pieza móvil juntarse y separarse de la pieza fija, logrando el efecto de abrir y cerrar la mordaza para prensar tres alambres de calibre 22.

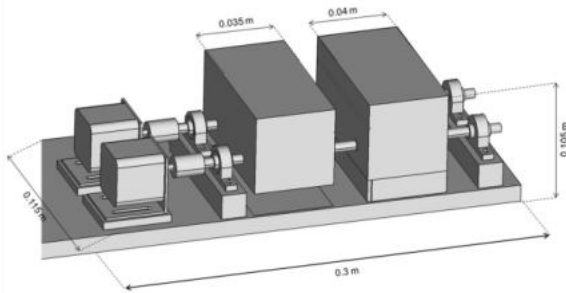


Fig. 3. Diseño de la estructura mecánica para el prensado.

En la Fig. 4 se presenta un diagrama en el cual muestra como los motores a pasos transfieren su fuerza a través de dos ejes verticales (varillas). La fuerza transferida por cada motor a pasos está dada por la ecuación (4), teniendo en cuenta que la fuerza de trabajo del motor es con un radio de 0.01 m, obtenemos una fuerza de 31.38 N.

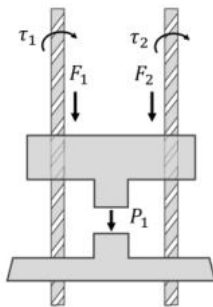


Fig. 4. Diagrama para los cálculos de prensado y corte.

Como ambos motores tienen las mismas características, la fuerza es la misma. De modo que, la fuerza total (F_{α}), es la suma de las fuerzas de los dos motores dando como resultado 62.76 N. Esta fuerza total (F_{α}) es transferida a la mordaza móvil que en el diagrama de la Fig. 4 se interpreta como una placa horizontal. Al conocer F_{α} , podemos calcular la presión ejercida en esta placa, la cual tiene un área de $2.1 \times 10^{-3} m^2$.

La presión (P) es la cantidad de fuerza (F) ejercida por unidad de área (A) y se expresa de la siguiente forma:

$$P = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Sustituyeron los valores en (5), tenemos como resultado:

$$P_{\alpha} = \frac{62.76 N}{2.1 \times 10^{-3} m^2} = 29.885 KPa$$

Por lo tanto, el prensado de alambres se realizará con una presión de 29.885 KPa de manera ideal.

2.1.3 Diseño para el proceso de corte.

En la Fig. 5 se muestra el diseño de la estructura mecánica para el proceso de corte. El diseño cuenta con una estructura metálica de soporte para una estructura mecánica compuesta por dos brazos de eje los cuales están conectados a un par de motores a pasos de 1.7 A con un torque de 0.3922 Nm, esto permite mover un bloque central y a su vez ejercer presión sobre una pinza de corte.

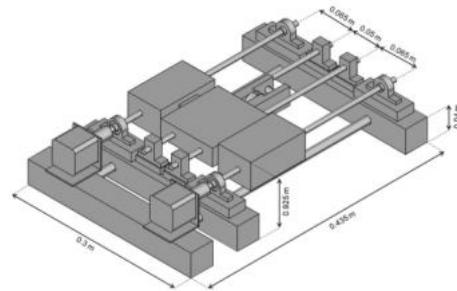


Fig. 5. Diseño de la estructura mecánica del proceso de corte.

Para interpretar esta información desde el punto de vista de la física clásica tenemos el diagrama de la Fig. 4. Se observa que los motores a pasos transfieren una fuerza a través de los ejes verticales a una placa horizontal, en la cual se realiza una suma de fuerzas que se convierten en una presión.

Usando la ecuación (4), calculamos la fuerza transferida de cada motor, tomando en cuenta que la fuerza de trabajo del motor es con un radio de 0.01 m, obteniendo un valor de 39.22 N.

Como ambos motores tienen las mismas características, la fuerza transferida es la misma. Se realizó una suma de fuerzas para obtener la fuerza total (F_{β}), dando como resultado 78.44 N. Al conocer la fuerza total (F_{β}) podemos calcular con la ecuación (5) la presión ejercida en el punto de contacto con la pinza de corte, la cual tiene un área de $2.5 \times 10^{-5} m^2$, dando como resultado que el corte de alambres se realizará con una presión de 3.1376 MPa de manera ideal.

2.2 Diseño del sistema electrónico.

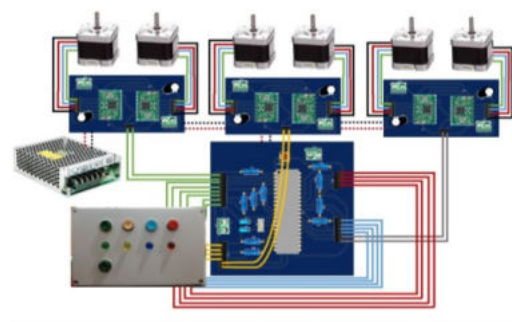


Fig. 6. Diagrama esquemático del sistema electrónico.

Se presenta el diagrama esquemático del sistema electrónico en la Fig. 6, que consiste en un arreglo de cuatro PCBs las cuales se diseñaron en el software de EasyEDA y se realizaron por el método del planchado. La placa principal contiene el PIC16F887, esta permite la comunicación tanto de las señales de entrada (botones) como salidas (leds) de la interfaz de usuario con las otras tres placas que contienen dos drivers A4988 cada una, de estas últimas tres placas se conectan los motores a pasos correspondientes a cada proceso (prensado, trenzado y corte).

En total se utilizaron seis motores a pasos, dos motores que trabajan con una corriente de 1.5 A y cuatro motores de 1.7 A. Todos los motores son alimentados por un voltaje de 12V.

La potencia (P) es el producto entre la tensión (V) y la intensidad de la corriente (I) y se expresa como:

$$P = VI \quad (6)$$

La potencia de los motores se calculó usando (6). Para el caso de los motores de 1.5 A, la potencia es de 18 W y para los motores de 1.7 A es de 20.4 W.

En el proceso de prensado se utilizaron dos motores de 18 W, por lo que la potencia total del proceso de prensado es de 36 W.

En los procesos de trenzado y corte se utilizaron dos motores de 20.4 W por proceso, por lo que la potencia total de cada proceso es de 40.8 W.

Por lo tanto, la potencia total de todo el proceso de fabricación se expresa por la ecuación (7), dando como resultado:

$$P_{TOTAL} = P_{TRENZADO} + P_{PRENSADO} + P_{CORTE} \quad (7)$$

$$P_{TOTAL} = 40.8 W + 36 W + 40.8 W = 117.6 W$$

Para el caso de los drivers es importante ajustar el voltaje de referencia de forma correcta para no perder pasos en el motor.

De acuerdo con la hoja de especificaciones del driver A4988 la corriente máxima (I_{max}) se establece mediante el valor del sense resistor (R_s) y el voltaje de entrada (V_r) en el pin V_{ref} , la ecuación se expresa como:

$$I_{max} = \frac{V_r}{(8xR_s)} \quad (8)$$

Donde el número 8 de la expresión anterior es una constante.

Nos interesa conocer el voltaje de referencia, así que se despeja de (8):

$$V_r = (I_{max})(8)(R_s) \quad (9)$$

Sin embargo; no es la ecuación final, también se toma en cuenta el tipo de configuración de los motores. En este caso se usó la configuración *full step* o pasos completos, de acuerdo con la hoja de especificaciones del driver A4988 trabaja con un valor máximo del 70%, de modo que a la ecuación (8) se le calcula el 70%, obteniendo la siguiente expresión:

$$V_{REF} = (I_{max})(8)(R_s)(0.7) \quad (10)$$

Usando (10), se calculó el voltaje de referencia final (V_{REF}). Conociendo que el valor de $R_s = 0.1 \Omega$, se obtuvo que el voltaje de referencia final (V_{REF}) para calibrar correctamente el potenciómetro de los drivers A4988 para los motores a pasos de 1.5A es de 0.84V y para los motores de 1.7 A es de 0.952 V.

2.2.1 Funcionamiento general del sistema.

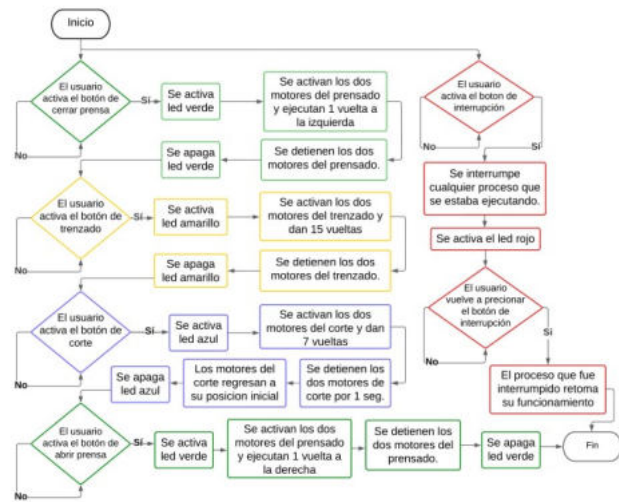


Fig. 7. Diagrama de flujo del funcionamiento general del sistema.

En la Figura 7, se describe el funcionamiento general del sistema. Los tres procesos utilizan algoritmos similares, es decir, cuando se activa una señal de entrada (botones), simultáneamente se activa un led y dos motores correspondientes al proceso seleccionado. El número de vueltas depende del mismo, y todo se desactiva en conjunto. Las señales de salida corresponden a acciones mecánicas, dado que se trata de un sistema en lazo abierto.

El orden de activación es el siguiente: primero, se inicia el proceso de prensado, que abre el mecanismo de prensa; luego, se activa el proceso de trenzado, que hace girar un brazo rotatorio para trenzar los alambres. Después, el proceso de corte cierra el brazo de una pinza para cortar los alambres, por último, se vuelve a activar el proceso de prensado, pero esta vez realiza la acción de abrir prensa para obtener el producto terminado. Además, se ha implementado una función de interrupción que permite detener cualquier proceso cuando sea necesario.

3. PRUEBAS Y RESULTADOS.

Se realizaron las pruebas de forma independiente de cada proceso (prensado, trenzado y corte) con la finalidad de ir resolviendo las dificultades que se iban presentando en cada uno de ellos para después realizar una prueba general de todo el sistema con cada parte funcionando correctamente.

3.1 Pruebas del trenzado.

En esta sección se realizaron diferentes pruebas como se muestra en la Tabla 1, con el fin de encontrar el número correcto de vueltas programables para el trenzado y la distancia entre el brazo rotatorio del trenzado con el punto de prensado.

Tabla 1. Pruebas del trenzado a diferentes distancias.

No. Prueba	No. De vueltas programadas	Distancia del brazo del trenzado al punto de prensado	Resultado
1	18	0.03 m	Alambres sobretorcidos y deformación del trenzado.
2	15	0.035 m	Trenzado poco tenso.
3	15	0.04 m	Trenzado firme.

De la tabla 1, observamos que los parámetros que necesitamos para que el proceso del trenzado funcione correctamente son los de la prueba 3.

3.2 Pruebas del prensado.

Al realizar la calibración de los motores se detectó un ligero error de sincronización, esto se resolvió dejando un solo motor para realizar la acción de prensado. En lugar del segundo motor se colocó una varilla lisa de 10 mm que permite el apoyo de la parte derecha de la pieza móvil. Como resultado de este cambio la fuerza de la prensa se concentra en un solo lado. Después del cambio realizado se hizo una prueba para verificar que las mordazas ejercieran la presión suficiente sobre el alambre. Al accionar el botón de cerrar prensa el motor gira en sentido horario haciendo que la mordaza móvil se junte con la parte fija y el alambre quede presionado entre las dos placas por lo que, a pesar del cambio realizado el mecanismo funciona correctamente, como se aprecia en la Fig. 8. La prensa deja de presionar el alambre hasta que se acciona el botón de abrir prensa.

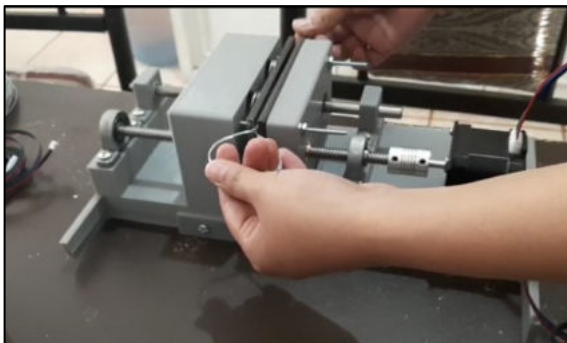


Fig. 8. Prensa ejecutando la acción de cerrar sus mordazas.

3.3 Pruebas del corte.

Primero, se fue calculando el número de vueltas programables de los motores a pasos para que el mecanismo de corte llegara a la posición correcta. Con esto se determinó que los motores a pasos tenían que dar un total de siete vueltas para que el proceso de corte funcionara correctamente.

Después, se realizó una prueba del mecanismo de corte con la interfaz de usuario y las PCBs. El proceso de corte se activó por medio del botón azul de corte, enseguida se encendió el led azul y sus motores se activaron haciendo que la pinza de corte se fuera cerrando.

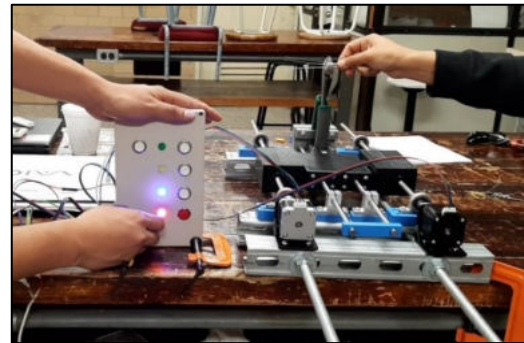


Fig. 9. Activación de la función de interrupción durante el proceso de corte.

Antes de que la pinza se cerrara por completo, se acciono el botón de interrupción como se indica en la Fig. 9 y el proceso se detuvo hasta que el botón rojo fue activado nuevamente y el proceso de corte reanudo desde el punto en donde se había quedado, comprobando así que la interrupción funciona correctamente. Finalmente, la pinza se cerró completamente cortando los tres alambres y la pinza se mantuvo cerrada por un segundo y luego regreso a su posición inicial.

3.4 Pruebas general.

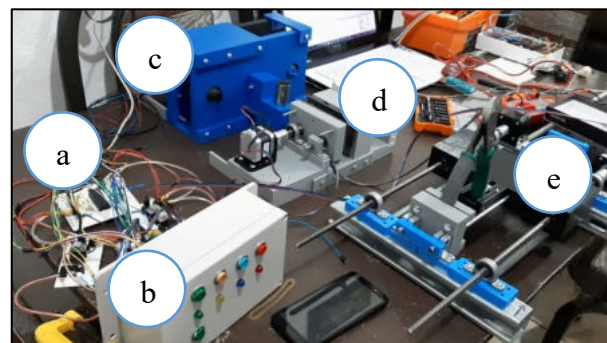


Fig. 10. Prototipo completo del sistema. a) Circuito electrónico, b) interfaz de usuario, c) mecanismo del trenzado, d) mecanismo del prensado y e) mecanismo del corte.

Al verificar que cada proceso funcionaba correctamente por separado, lo siguiente que se hizo fue hacer una prueba con los

tres procesos (trenzado, prensado y corte) en conjunto más la interfaz de usuario y el arreglo de las 4 PCBs que conforman el sistema electrónico, mostrado en la Fig. 10.

Durante la prueba no se presentó ningún problema y como resultado se obtuvo un gancho como se muestra en la Fig. 11 con las siguientes características: la argolla tiene un diámetro de 2.8 cm, de largo mide 45 cm y el trenzado se hace con la cantidad de 5 vueltas completas, se destaca que el trenzado no se deshace y tampoco se sobre tensa y la fuerza aplicada en el prensado es adecuada porque los alambres no se rompen.

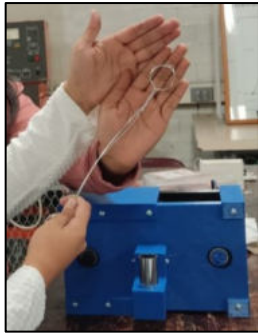


Fig. 11 Resultado final del gancho obtenido.

3.5 Comparación de datos.

Tabla 2. Comparación de tiempos de ejecución para cada proceso.

	Ejecución programada (s).	Ejecución del prototipo con usuario (s).	Ejecución tradicional (s).
Prensa Cerrada	1	2	2
Trenzado	4	7	12
Corte	5	7	6
Prensa Abierta	1	1	2
Proceso sin pérdidas	11	17	22
Tiempo perdido	6	18	74
Proceso completo	17	34	96

La Tabla 2 muestra una comparación del tiempo que tarda en ejecutarse cada proceso en tres situaciones diferentes. Es importante notar como la presencia del usuario aumenta el tiempo de fabricación. Comparando el tiempo del proceso completo del prototipo con la maquina artesanal se da una diferencia de 62 segundos. Existe una pérdida de tiempo entre los procesos, pero el proceso artesanal tiene más pérdidas que el proceso con el prototipo.

4. CONCLUSIONES

En el mecanismo de prensado se detectó un ligero error de sincronización el cual se solucionó retirando uno de los motores y sustituyéndolo por una varilla lisa, por lo que al final las tres estructuras mecánicas se lograron complementar bien con el circuito electrónico logrando controlar los procesos de prensado, trenzado y corte por medio de la interfaz de usuario.

Conforme a las pruebas realizadas también el botón de interrupción cumple correctamente con su funcionamiento de detener en cualquier instante cualquiera de los tres procesos. El tiempo completo de fabricación por cada gancho con la presencia del usuario se redujo a 34 segundos en comparación al método tradicional con 96 segundos de acuerdo a la tabla 2, se respetaron las características del producto (gancho) y el prototipo es muy intuitivo y fácil de usar.

Como trabajo futuro se pretende emplear un sistema de control en lazo cerrado para automatizar por completo los procesos de prensado, trenzado y corte de alambres en la fabricación de ganchos para macetas; agregando un sensor hall en la etapa de trenzado y sensores de final de carrera en las etapas de prensado y corte, esto nos permitirá tener una realimentación en el sistema que compare la señal de referencia con la de salida para tener una mayor precisión y estabilidad en el sistema.

REFERENCIAS

- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas quinta edición*. Editorial McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Domínguez, F. J. (2018). *Elementos de máquinas* (1ª Edición). Alfaomega grupo editor, México.
- García, E. (2008). *Compilador C CCS y simulador Proteus para microcontroladores PIC*. Alfaomega Grupo editor, S.A. de C.V. México.
- Herzog. (s.f). *Máquinas trenzadoras*. Herzog Braiding Machines. <https://herzog-online.com/maquinas-trenzadoras/>
- Jordana, J. M. (2015). *De la Impresión 3D a la Fabricación Digital*. Universidad Politécnica de Catalunya Barcelona TECH. <https://www.caminstech.upc.edu/ca/comment/223>
- Lange, R. H. (2020). *Cuatro motivos claves por los que muchas pymes todavía no han automatizado sus procesos de negocios*. <https://es.linkedin.com/pulse/cuatro-motivos-claves-por-los-que-muchas-pymes-han-de-hoffman-lange>
- Malvino, A. P. (2000). *Principios de Electrónica sexta edición*. Editorial McGRAW-HILL/INTERAMERICANA de España, S.A.U.
- Schvab, L. (2011). *Máquinas y herramientas*, capítulo 1. Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. República Argentina. <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL007249.pdf>
- Sedeke. (s.f). *Máquina cortadora de alambre, aplicador, herramientas para sujetar cables-Henan Sedeke Industrial Co.Ltd*. <https://www.sedeke.com/es/>
- Sicma. (2021). Por qué es importante la Automatización Industrial. Ventajas. *Soluciones Integrales para la Industria 4.0*. <https://www.sicma21.com/automatizacion-industrial-importancia-y-beneficios/>
- Valdivieso C. & Solís R. M. (2018). *Microprocesadores Fundamentos y Aplicaciones*. LATIn Project.
- Wildi, T. (2007). *Maquinas Eléctricas y sistemas de potencia*. Sexta edición. Pearson Educación. México.