

**SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE UNA MÁQUINA DE ESCRITORIO
PARA EL TROQUELADO DE CAJAS DE CARTÓN EN EL MARCO DEL PROYECTO
DE MECANOS PARA LA PAZ.**

FABIÁN AUGUSTO RÍOS RESTREPO

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2024**

**SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE UNA MÁQUINA DE ESCRITORIO
PARA EL TROQUELADO DE CAJAS DE CARTÓN EN EL MARCO DEL PROYECTO
DE MECANOS PARA LA PAZ.**

FABIÁN AUGUSTO RÍOS RESTREPO

Trabajo de grado para optar al título de tecnólogo en eléctrica

Asesor técnico:

William Orozco Murillo

MSc Gestión Energética Industrial

Asesora metodológica:

Karen Lemmel Vélez

Magister en Automatización y Control Industrial

INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TECNOLOGÍA ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2024

Contenido

1.	Planteamiento del problema	11
1.1	Descripción.....	11
1.2	Formulación	11
2.	Justificación	12
3.	Objetivos.....	13
3.1	Objetivo general	13
3.2	Objetivos específicos.....	13
4.	Referentes teóricos	14
4.1	Mecanos para la paz	14
4.2	Diseño de cajas de cartón	15
4.3	Troqueles para cajas de cartón	16
4.4	Diseño mecánico	17
4.5	Pruebas de validación de un diseño.....	18
4.6	Automatización de pequeñas máquinas	19
4.7	Ingeniería de control.....	20
4.8	Control de secuencias con máquinas de estado.....	21
4.9	Programación de sistemas	22
5.	Metodología.....	24
5.1	Tipo de proyecto.....	24
5.2	Método	24
5.3	Instrumentos de recolección de información	25
5.3.1.	Fuentes primarias.....	25
5.3.2.	Fuentes secundarias	25
6.	Resultados.....	26
6.1	Requisitos específicos del cliente y del proceso de troquelado	26

6.2	Implementación de la instrumentación de la máquina troqueladora.....	28
6.3	Adopción del controlador que soporte control lógico.....	30
6.4	Elaboración de los diagramas de interconexión.....	31
6.5	Instalación física de los componentes de hardware del control.....	32
6.6	Desarrollo del software necesario para controlar la máquina de troquelado.....	32
6.7	Programación del controlador y configuración del software.....	33
6.8	Validación de la operación mediante la realización de pruebas.....	34
6.9	Revisión del hardware del sistema de control de la troqueladora.....	35
6.10	Pruebas exhaustivas de la operación completa de la troqueladora.....	36
7.	Conclusiones.....	38
8.	Recomendaciones.....	39
9.	Referencias bibliográficas.....	40
10.	Bibliografía.....	41

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Máquina típica de Mecanos para la paz	14
Figura 2. Diseño de cajas de cartón.....	15
Figura 3. Transformación del cartón en cajas personalizadas.....	16
Figura 4. Proceso del diseño mecánico.....	17
Figura 5. Ciclo de pruebas de un diseño.....	18
Figura 6. Proceso de automatización de pequeñas máquinas.....	19
Figura 7. Aplicaciones de la ingeniería de control.....	20
Figura 8. Fases del diseño de control con máquinas de estado.....	21
Figura 9. Ciclo de programación.....	22
Figura 10. Estructura mecánica de la troqueladora.....	27
Figura 11. Actuador lineal utilizado en la troqueladora.....	29
Figura 12. Controlador y fuente de la troqueladora.....	30
Figura 13. Diagrama eléctrico del control de la troqueladora.....	31
Figura 14. Diagrama en bloques de los elementos del control.....	33
Figura 15. Diagrama de estados del control de la troqueladora.....	34
Figura 16. Diagrama de estados para la realización de las pruebas.....	35
Figura 17. Diagrama que indica los puntos de prueba del hardware.....	36

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1.....	28
Tabla 2.....	29
Tabla 3.....	32
Tabla 4.....	37

Resumen

SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE UNA MÁQUINA DE ESCRITORIO PARA EL TROQUELADO DE CAJAS DE CARTÓN EN EL MARCO DEL PROYECTO DE MECANOS PARA LA PAZ.

FABIÁN AUGUSTO RÍOS RESTREPO

Se desarrolla la automatización de una máquina de escritorio para el troquelado de cajas de cartón, como solución de manufactura flexible en el marco de Mecanos para la paz. La máquina tiene características tales como una operación a 12 voltios de corriente directa alimentados desde la red de 110 VAC. Es armable a través de un conjunto de piezas de aluminio y permite el ensamble rápido para la parte mecánica, con conexión eléctrica segura y ágil. También permite la reprogramación de la operación desde el entorno de desarrollo de control lógico para la resolución de las tareas de troquelado. Las cajas de cartón son elementos esenciales en el mundo del embalaje y el transporte, utilizadas en una amplia variedad de industrias, desde alimentos y bebidas hasta productos electrónicos, las cajas de cartón brindan protección y seguridad a los productos durante su distribución.

Con el desarrollo del proyecto se logró la implementación de la instrumentación de la máquina utilizando sensores de posición y motores para la interconexión de la máquina, se desarrolló el programa de control del autómatas programable utilizando metodologías de control secuencial con máquinas de estado para la autonomía de la operación, finalmente se validó la operación del sistema mediante la realización de pruebas funcionales basadas en el modelo de máquinas de estado para el logro del nivel de calidad que debe tener un sistema de producción.

Palabras claves: Troqueladora, automatización, máquinas de estados finitos, instrumentación.

Abstract

The automation of a desktop machine for the die-cutting of cardboard boxes is developed as a flexible manufacturing solution within the framework of “Mecanos para la paz”. The machine has features such as 12 VDC operation powered from the 110 VAC mains. It can be assembled through a set of aluminum parts and allows quick assembly for the mechanical part, with a safe and agile electrical connection. It also allows the reprogramming of the operation from the development environment of logical control for the resolution of die-cutting tasks. Cartons are essential elements in the world of packaging and transportation, used in a wide variety of industries, from food and beverages to electronics, cartons provide protection and security to products during distribution.

With the development of the project, the implementation of the instrumentation of the machine using position sensors and motors for the interconnection of the machine was achieved, the programmable automaton control program was developed using sequential control methodologies with state machines for the autonomy of the operation, finally the operation of the system was validated by carrying out functional tests based on the state machine model for the achievement of the level of quality that a production system must have.

Keywords: Voltage, Die cutter, automation, finite state machines, instrumentation.

Glosario

Actuador lineal: es un dispositivo que convierte el movimiento rotatorio de un motor en lineal. Se puede utilizar para empujar, tirar, levantar, bajar, posicionar o girar una carga.

Automatización: se refiere a una amplia gama de tecnologías que reducen la intervención humana en los procesos, siendo un elemento clave en el crecimiento y desarrollo de la sociedad

Control automático: es un concepto fundamental para entender cómo un sistema de control puede realizar tareas complejas sin la supervisión de un operador humano.

Control lógico: es una técnica de control basada fundamentalmente en la utilización de operadores booleanas mediante diferentes lenguajes, según la norma IEC 61131-3.

Final de carrera: es un interruptor que se coloca en lugares estratégicos de la carrera de un elemento móvil para saber la posición de dicho elemento.

Máquina de escritorio: es un tipo de máquina personal diseñada para ser instalada en una ubicación como un escritorio o mesa, debido a que no tiene una base de fijación al piso.

Mecano: es un conjunto de piezas o elementos mecánicos que se ensamblan entre sí para formar estructuras o máquinas. Estas piezas suelen tener formas y funciones específicas.

Microcontrolador: es un dispositivo electrónico que reúne en un único circuito integrado el procesador, las memorias y los puertos, que se utiliza para controlar otros aparatos electrónicos.

Troquel para cartón: es una pieza mecánica de corte utilizada en la fabricación de cajas de cartón y otros materiales similares. Está basado en el uso de cuchillas flexibles.

Troqueladora: es una máquina con bordes afilados utilizada para estampar o cortar diversos productos como metal, cartón, cuero, papel y plástico, mediante la aplicación de la fuerza.

Introducción

Este proyecto se propone con el fin cumplir con uno de los requisitos para optar por el título de tecnólogo electricista en la Institución Universitaria Pascual Bravo, el producto resultado de este proyecto puede ser aprovechado por las pequeñas empresas dedicadas a la fabricación de cajas y que su proceso es todavía rudimentario.

Las cajas de cartón son elementos esenciales en el mundo del embalaje y el transporte. Utilizadas en una amplia variedad de industrias, desde alimentos y bebidas hasta productos electrónicos, las cajas de cartón brindan protección y seguridad a los productos durante su distribución.

Se propone la automatización de una máquina de escritorio para el troquelado de cajas de cartón mediante un sistema de control automático para el mejoramiento productivo de pequeños fabricantes en el marco del proyecto de mecanos para la paz.

El sistema de control automático para la una máquina de escritorio para el troquelado de cajas de cartón en el marco del proyecto de mecanos para la paz se basará en el control lógico programable. Se implementará la instrumentación de la máquina troqueladora utilizando sensores de posición y motores DC y brushless. Para la interfaz entre la máquina que suministran los encargados de mecanos para la paz y el control automático se utilizará un display.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

Las cajas de cartón son elementos esenciales en el mundo del embalaje y el transporte. Utilizadas en una amplia variedad de industrias, desde alimentos y bebidas hasta productos electrónicos, las cajas de cartón brindan protección y seguridad a los productos durante su distribución. La fabricación de algunas de estas cajas implica la utilización de troqueles y clichés, herramientas fundamentales para dar forma y diseño a las cajas. (Mogrovejo Tigre, 2021)

Una de las problemáticas es la falta de eficiencia en el proceso de troquelado de cajas de cartón para pequeños fabricantes. Esto puede manifestarse de diversas maneras, como baja capacidad de producción, elevados costos de mano de obra y desperdicio de material, falta de flexibilidad para adaptarse a diferentes tamaños o diseños de cajas, y problemas de calidad en las cajas de cartón producidas

Una de las causas de esta problemática se da porque la máquina de troquelado actual no es lo suficientemente versátil y precisa, lo que limita la capacidad de adaptarse a diferentes diseños y tamaños de cajas de cartón. Otra de las causas es la instalación y configuración de la automatización en la máquina de troquelado que puede ser complicada y consumir mucho tiempo, lo que podría causar interrupciones en la producción.

Adicionalmente una vez que se implementa la automatización, los operadores y técnicos pueden no estar familiarizados con su funcionamiento y mantenimiento adecuado.

1.2 Formulación

¿Cómo automatizar una máquina de escritorio para el troquelado de cajas de cartón para el mejoramiento productivo de pequeños fabricantes?

2. Justificación

Este proyecto se propone con el fin cumplir con uno de los requisitos para optar por el título de tecnólogo electricista en la Institución Universitaria Pascual Bravo.

El producto resultado de este proyecto puede ser aprovechado por las pequeñas empresas dedicadas a la fabricación de cajas y que su proceso es todavía rudimentario.

Con la instalación de este sistema se espera incrementar la calidad y la uniformidad de las cajas de cartón producidas, con el fin de que cada caja se corte y se imprima con precisión y consistencia, lo que es esencial para responder por la calidad de las mismas, y que sean apropiadas para que el producto que tengan en su interior; es de anotar que una de las ventajas de las cajas troqueladas es la característica de aprovechar en todo lo posible el espacio disponible, tanto para el almacenamiento como en el transporte.

Adicionalmente el instalar el sistema de control automático de manera eficiente y sin interrupciones en la producción existente le genera una mayor rentabilidad en el proceso de producción a las empresas.

El prototipo final del proyecto hará parte de los productos del proyecto “Mecanos para la Paz”, un proyecto Institucional, que hace parte del plan de desarrollo 2030 de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Automatizar una máquina de escritorio para el troquelado de cajas de cartón mediante un sistema de control automático para el mejoramiento productivo de pequeños fabricantes en el marco del proyecto de mecanos para la paz.

3.2 Objetivos específicos

Implementar la instrumentación de la máquina troqueladora utilizando sensores de posición y motores para la interconexión de la máquina que suministran los encargados de Mecanos para la paz, con el control automático.

Desarrollar el programa de control del autómeta programable que controlará la máquina utilizando metodologías de control secuencial con máquinas de estado para la autonomía de la operación.

Validar la operación del sistema mediante la realización de pruebas funcionales basadas en el modelo de máquinas de estado que se desarrolle para la máquina, para el logro del nivel de calidad esperado para el producto.

4. Referentes teóricos

4.1 Mecanos para la paz

Mecanos para la Paz es una iniciativa de desarrollo tecnológico, ejecutada por medio de la elaboración de proyectos prototípicos, que buscan dar soluciones tecnológicas a problemas de las comunidades en situación de vulnerabilidad; generalmente localizadas en zonas donde es necesario establecer procesos de construcción de paz estable y duradera.

Estos prototipos, basados en la compilación de tecnologías en la erradicación de la pobreza del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), son adaptaciones tecnológicas que incorporan energía solar, potencia similar al esfuerzo humano. (Tabares, 2022)

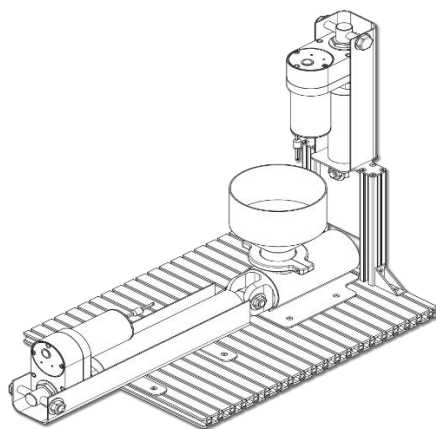


Figura 1. Máquina típica de Mecanos para la paz
Fuente. Presentación Mecanos para la paz.

Las máquinas que se desarrollan en el marco de Mecanos para la paz cumplen una serie de características como el bajo peso de 30 kg, la facilidad de transporte, la calidad de máquinas de producción individual, la operación automatizada y con IoT, un mínimo número de herramientas para su ensamble, el reemplazo del esfuerzo humano, la adición de valor al proceso productivo y el aporte a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. La estrategia consiste en disponer de una serie de mecanos compuestos por partes mecánicas, eléctricas y electrónicas, que permiten prototipar de manera rápida, máquinas para el mejoramiento productivo de las comunidades en condición de vulnerabilidad.

4.2 Diseño de cajas de cartón

El diseño de cajas de cartón es una disciplina que combina funcionalidad, estética y sostenibilidad para crear soluciones de embalaje adaptadas a diversas necesidades. Este proceso comienza con la definición de los requisitos del producto, como el peso, las dimensiones y la protección necesaria, y se extiende hasta considerar aspectos como la experiencia del usuario y el impacto visual. Las cajas de cartón, por su versatilidad, son ampliamente utilizadas en sectores como el comercio electrónico, la industria alimentaria y la logística, destacando por su bajo costo y capacidad de personalización.

El desarrollo de un diseño eficiente implica el uso de patrones estructurales optimizados, como el tipo de troquel y los sistemas de plegado, que minimicen el uso de material sin comprometer la resistencia y funcionalidad. Se emplean herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) para modelar y probar diferentes configuraciones, simulando condiciones como la carga, el apilamiento y los impactos durante el transporte. Además, el diseño gráfico en la superficie del cartón juega un papel importante para reforzar la identidad de marca y captar la atención del consumidor. (Kahn, 2012)

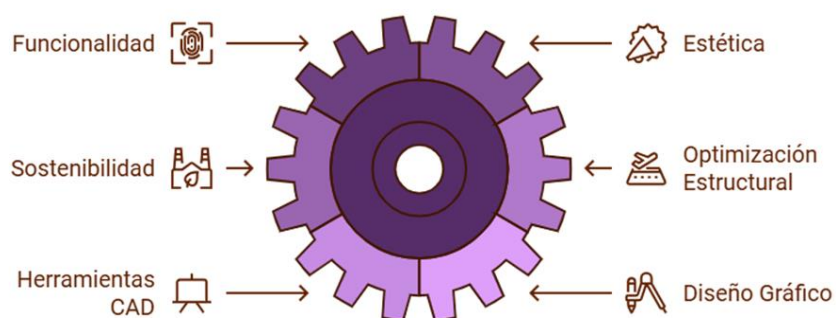


Figura 2. Diseño de cajas de cartón.

Fuente. Diseño mediante IA.

En la actualidad, la sostenibilidad es un aspecto crucial en el diseño de cajas de cartón. Se buscan materiales reciclables y procesos que reduzcan la huella ambiental, alineándose con las demandas de consumidores y regulaciones. Al combinar innovación técnica con creatividad, el diseño de cajas de cartón no solo resuelve necesidades prácticas, sino que también contribuye al posicionamiento estratégico de las empresas en mercados altamente competitivos.

4.3 Troqueles para cajas de cartón

Los troqueles para cajas de cartón son herramientas clave en la industria del embalaje, diseñadas para cortar, marcar y dar forma a láminas de cartón de manera precisa y eficiente. Su función principal es transformar materiales planos en estructuras tridimensionales que cumplen con requisitos específicos de diseño y funcionalidad, como protección, facilidad de transporte y atractivo visual. El uso de troqueles es especialmente relevante en sectores como el alimentario, el menudeo y la logística, donde el embalaje desempeña un rol crucial. (Pahl, 2007)

El proceso de fabricación de troqueles incluye un diseño detallado que asegura el ajuste exacto a las dimensiones y características del producto final. Esto se logra mediante el uso de tecnologías avanzadas, como el diseño asistido por computadora (CAD), que permite modelar y optimizar el patrón de corte y marcado. Los troqueles suelen estar hechos de madera con cuchillas de acero que definen los cortes y pliegues, mientras que las hendiduras y ranuras garantizan que las cajas puedan ensamblarse de forma sencilla y rápida.



Figura 3. Transformación del cartón en cajas personalizadas.

Fuente. Diseño mediante IA.

La calidad de los troqueles es fundamental para lograr un acabado uniforme y reducir el desperdicio de material durante la producción. Además, los troqueles modernos pueden personalizarse para incluir detalles específicos, como perforaciones, ventanas o grabados, que agregan funcionalidad y valor estético a las cajas. Este enfoque combina precisión técnica con creatividad, permitiendo que las cajas de cartón no solo sean un medio de protección, sino también un elemento diferenciador en la experiencia del cliente.

4.4 Diseño mecánico

El diseño mecánico es una rama de la ingeniería que se enfoca en la concepción, desarrollo y análisis de componentes y sistemas mecánicos. Su objetivo principal es crear soluciones funcionales, seguras y eficientes para satisfacer necesidades específicas, considerando aspectos como materiales, costos y condiciones de operación. Desde estructuras simples hasta sistemas complejos como transmisiones y turbinas, el diseño mecánico abarca un amplio espectro de aplicaciones en industrias como la automotriz, aeroespacial, energética y de manufactura.

Este proceso comienza con la identificación de un problema o necesidad y la generación de ideas que se transforman en conceptos iniciales. Posteriormente, se realizan cálculos y simulaciones para validar la viabilidad técnica, utilizando herramientas de análisis, de estudios y dinámicas. En la actualidad, los programas de diseño asistido por computadora (CAD) y las herramientas de análisis por elementos finitos (FEA) son esenciales para modelar y evaluar los diseños de manera precisa previo a fabricación, lo que reduce costos y riesgos. (Shigley, 2001)

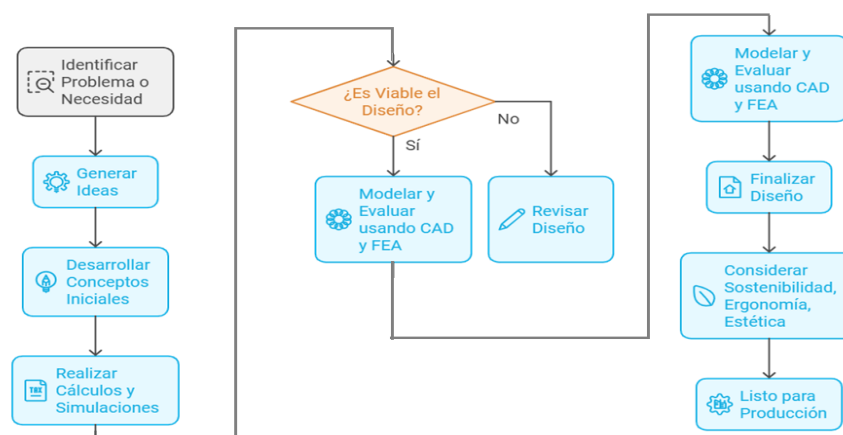


Figura 4. Proceso del diseño mecánico.

Fuente. Diseño mediante IA.

El diseño mecánico no se limita a la funcionalidad; también considera factores como la sostenibilidad, la ergonomía y la estética, que son cada vez más relevantes en un mercado competitivo. Además, requiere un enfoque interdisciplinario, integrando conocimientos de materiales, termodinámica y electrónica. La constante evolución tecnológica y la demanda de innovación hacen del diseño mecánico una disciplina en constante crecimiento sostenibles.

4.5 Pruebas de validación de un diseño

Las pruebas de validación son un paso fundamental en el desarrollo de cualquier diseño, ya que garantizan que el producto final cumpla con los requisitos funcionales, de seguridad y de desempeño establecidos en la fase de planificación. Estas pruebas consisten en someter el diseño a condiciones controladas que simulan su entorno de operación real, verificando su comportamiento y asegurando que las especificaciones técnicas se hayan alcanzado. Esto es especialmente crítico en industrias como la automotriz, la aeroespacial y la médica, donde cualquier falla puede tener consecuencias significativas. (Ulrich, 2015)

El proceso de validación incluye diferentes tipos de pruebas, como ensayos de resistencia, durabilidad, funcionalidad y cumplimiento normativo. Por ejemplo, en el caso de un componente mecánico, las pruebas pueden abarcar desde análisis de tensiones y deformaciones hasta simulaciones de ciclos de carga repetidos para evaluar su vida útil. Las herramientas modernas, como las simulaciones computacionales y los prototipos físicos, permiten identificar fallos potenciales antes de la fabricación a gran escala, ahorrando tiempo y recursos.

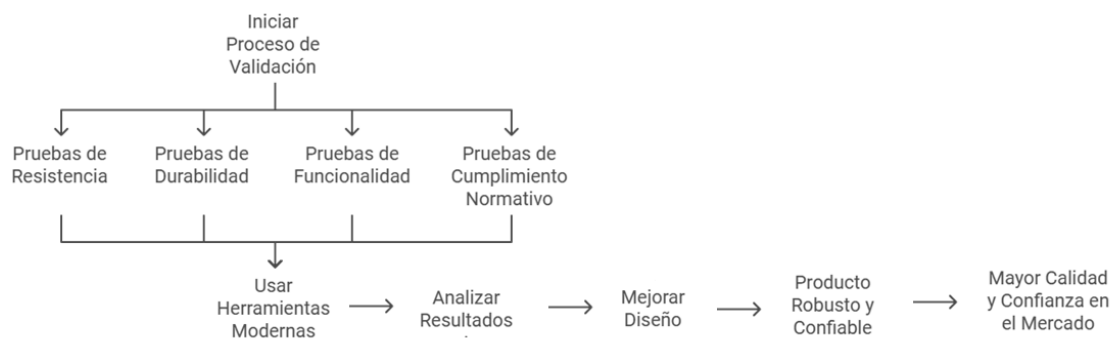


Figura 5. Ciclo de pruebas de un diseño.

Fuente. Diseño mediante IA.

Además de verificar el cumplimiento de especificaciones, las pruebas de validación también son clave para recoger datos valiosos que permitan mejorar el diseño inicial. Este enfoque iterativo asegura no solo un producto más robusto y confiable, sino también uno que se ajuste mejor a las necesidades del usuario. En un entorno de mercado cada vez más competitivo, las pruebas de validación se han convertido en un estándar indispensable para garantizar la calidad y aumentar la confianza en los productos.

4.6 Automatización de pequeñas máquinas

La automatización de pequeñas máquinas se ha convertido en una solución clave para optimizar procesos en sectores como la manufactura, la agricultura y el comercio. Este enfoque busca integrar sistemas electrónicos, mecánicos y de software en máquinas de dimensiones reducidas, permitiéndoles operar de manera autónoma o semiautónoma. Su aplicación no solo incrementa la productividad y la precisión, sino que también reduce la dependencia de la mano de obra directa en tareas repetitivas o de alta precisión, lo que contribuye a mejorar la eficiencia.

El proceso de automatización comienza con la identificación de las funciones esenciales de la máquina, como movimientos específicos, ciclos de trabajo o interacción con el entorno. A partir de ahí, se incorporan elementos como controladores programables (PLC), sensores, actuadores y sistemas de comunicación. Estas máquinas suelen ser controladas mediante interfaces amigables, permitiendo a los usuarios ajustar parámetros en tiempo real. La programación y calibración cuidadosa son cruciales para asegurar que el sistema sea confiable y adaptable. (Dorf, 2011)

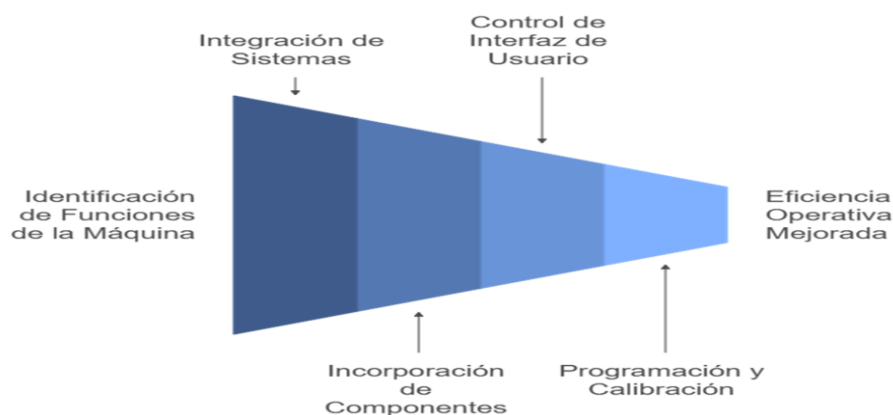


Figura 6. Proceso de automatización de pequeñas máquinas.

Fuente. Diseño mediante IA.

En las pequeñas máquinas, la automatización representa una ventaja significativa al permitir su integración en líneas de producción o su operación independiente en espacios reducidos. Además, el uso de tecnologías como motores eléctricos de alta eficiencia, sensores inteligentes y algoritmos de control mejora su desempeño energético y reduce costos de mantenimiento. En un contexto donde las empresas buscan soluciones accesibles y flexibles, la automatización de pequeñas máquinas destaca como la innovación que democratiza los beneficios de la tecnología.

4.7 Ingeniería de control

La ingeniería de control es una disciplina de la ingeniería que se centra en el diseño, análisis y aplicación de sistemas capaces de regular su comportamiento para alcanzar un objetivo deseado. Este campo se fundamenta en la matemática y la física, combinadas con la computación, para modelar y predecir el comportamiento de sistemas dinámicos, entre los que se destacan los procesos industriales, sistemas de navegación, plantas de energía, robótica y sistemas electrónicos, donde la estabilidad, la precisión y la eficiencia son esenciales. (Ogata, 2010)

El núcleo de la ingeniería de control radica en el uso de técnicas como la retroalimentación, donde las salidas del sistema se comparan con valores deseados para realizar ajustes en las entradas y minimizar errores. Este enfoque se divide en dos categorías principales: el control clásico, que utiliza técnicas basadas en funciones de transferencia, y el control moderno, que emplea representaciones en el espacio de estados para analizar sistemas multivariables más complejos. Herramientas como el diseño de controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID), junto con modelos matemáticos, permiten abordar diversos desafíos de manera eficiente.

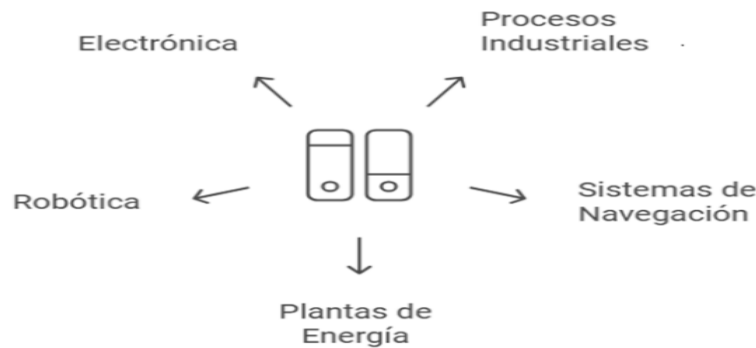


Figura 7. Aplicaciones de la ingeniería de control.

Fuente. Diseño mediante IA.

La evolución tecnológica ha permitido que la ingeniería de control integre técnicas avanzadas como el control adaptativo, robusto y predictivo, así como el uso de inteligencia artificial para optimizar la toma de decisiones en tiempo real. Estos avances amplían su aplicabilidad en áreas como la automatización de procesos, los vehículos autónomos y la gestión de redes inteligentes. Así, la ingeniería de control no solo contribuye a mejorar la funcionalidad y seguridad de los sistemas, sino que también impulsa la innovación en sectores estratégicos de la sociedad

4.8 Control de secuencias con máquinas de estado

El control de secuencias mediante máquinas de estado es una técnica ampliamente utilizada en la automatización industrial para gestionar procesos secuenciales. Consiste en modelar y controlar el comportamiento de un sistema mediante un conjunto de estados finitos, transiciones entre ellos y acciones específicas que se ejecutan en cada estado. Esta metodología es especialmente efectiva en aplicaciones donde los eventos ocurren en un orden predefinido, como el manejo de transportadores, el control de ensamblaje y la operación de sistemas robóticos.

Una máquina de estado funciona definiendo todos los posibles estados en los que puede encontrarse el sistema, las condiciones bajo las cuales cambia de un estado a otro y las acciones asociadas. Estas máquinas pueden ser implementadas tanto en hardware como en software, utilizando herramientas como controladores lógicos programables (PLC) o lenguajes de programación como Python o C++. Un diseño bien estructurado permite simplificar el desarrollo y garantizar la consistencia en el funcionamiento, reduciendo el riesgo de errores lógicos.



Figura 8. Fases del diseño de control con máquinas de estado.

Fuente. Diseño mediante IA.

El uso de máquinas de estado ofrece ventajas como claridad en la lógica del sistema, facilidad para realizar diagnósticos y flexibilidad para realizar modificaciones. Además, al dividir el sistema en estados discretos, se facilita la depuración y el mantenimiento. Esta técnica es fundamental para sistemas complejos donde las operaciones deben ser realizadas en un orden específico, asegurando que cada paso sea ejecutado de forma precisa y controlada, lo que mejora la eficiencia y la confiabilidad en los procesos automatizados. (Balcells, 2005)

4.9 Programación de sistemas

La programación es el proceso de diseñar y codificar instrucciones que permiten a una computadora ejecutar tareas específicas. Este proceso es fundamental en el desarrollo de software, aplicaciones, sitios web y sistemas operativos.

A través del uso de lenguajes de programación como Python, Java, C++ o JavaScript, los programadores traducen problemas del mundo real en soluciones computacionales. Cada lenguaje posee su propia sintaxis y características que lo hacen adecuado para diferentes tipos de proyectos de aplicación, desde la creación de algoritmos complejos hasta la automatización de tareas simples. (McConnel, 2004)

El aprendizaje de programación no solo implica el dominio de un lenguaje, sino también el entendimiento de principios básicos como estructuras de control (condicionales, bucles), estructuras de datos (listas, pilas, colas), y la lógica detrás del diseño de algoritmos de ejecución de los programas.

Además, las buenas prácticas en programación, como el uso de código limpio y modular, son esenciales para garantizar que los programas sean comprensibles y fáciles de mantener. Esto cobra especial importancia en proyectos colaborativos, donde múltiples programadores deben trabajar sobre un mismo código.

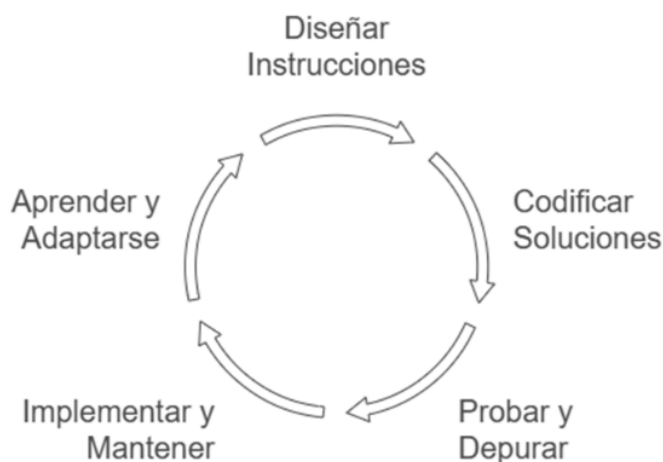


Figura 9. Ciclo de programación.
Fuente. Diseño mediante IA.

En la actualidad, la programación ha evolucionado hacia un enfoque más orientado a la resolución de problemas, con énfasis en herramientas y metodologías como el desarrollo ágil, la programación orientada a objetos y el uso de frameworks.

Estas tendencias buscan optimizar los procesos de desarrollo y responder de manera más eficiente a las necesidades del mercado. Además, el auge de áreas como la inteligencia artificial, la ciencia de datos y la ciberseguridad ha ampliado significativamente el campo de aplicación de la programación, consolidándola como una habilidad indispensable en el mundo moderno.

5. Metodología

5.1 Tipo de proyecto

El proyecto está enfocado en una investigación aplicada debido a que busca generar conocimiento para luego aplicarlo en determinado problema de la sociedad, este tipo de investigación tiene como base los diferentes hallazgos tecnológicos obtenidos en la investigación.

5.2 Método

Para el desarrollo de la investigación se realizan diferentes actividades o fases con el fin de lograr los objetivos definidos en la misma, a saber, implementación de la instrumentación de la máquina troqueladora, desarrollo del programa de control del autómata programable y validación de la operación del sistema.

Para implementar la instrumentación de la máquina troqueladora permitiendo un ajuste preciso adaptándose a diferentes tamaños y diseños de cajas de cartón, se debe realizar las actividades de reunir los requisitos específicos del cliente y del proceso de troquelado de cajas de cartón para guiar el diseño del sistema de control. Seleccionar y adquirir los componentes de hardware necesarios, como sensores, actuadores, controladores, y otros dispositivos relacionados con el sistema de control. Adoptar un controlador que soporte control lógico de motores DC. Diseñar el plano de interconexión de la instrumentación con el controlador. Instalar físicamente los componentes de hardware y realizar las conexiones necesarias en la máquina de troquelado.

Para desarrollar el programa de control del autómata programable se debe realizar las actividades de desarrollo del software necesario para controlar la máquina de troquelado, incluyendo la lógica de control y la interfaz de usuario si es necesario. Programar el controlador y configurar el software de control de acuerdo con las especificaciones y necesidades de la máquina y del proceso de troquelado. Realizar pruebas iniciales para garantizar que el sistema esté funcionando correctamente y que la máquina responda adecuadamente al software de control de la secuencia de operación.

Para la validación de la operación del sistema se debe realizar las actividades de revisión del sistema de control para que esté completamente operativo y que la máquina pueda funcionar de manera eficiente con los elementos interconectados. Realizar pruebas exhaustivas de la troqueladora completa, para asegurar que el sistema de control automático implementado mediante el software cumple con los requisitos del cliente y es capaz de controlar la máquina de manera efectiva.

5.3 Instrumentos de recolección de información

5.3.1. Fuentes primarias. Libros, revistas científicas, informes técnicos y de investigación de instituciones, patentes y normas técnicas.

5.3.2. Fuentes secundarias. Enciclopedias, diccionarios, síntesis, libros y artículos de investigaciones.

6. Resultados

Se propone la automatización de una máquina de escritorio para el troquelado de cajas de cartón, como solución de manufactura flexible. La máquina tiene características tales como una operación a 12 voltios de corriente directa alimentados desde la red de 110 Vac. Es armable a través de un conjunto de piezas de aluminio y permite el ensamble rápido para la parte mecánica, con conexión eléctrica segura y ágil. También permite la reprogramación de la operación desde el entorno de desarrollo de control lógico.

El producto por entregar de este proyecto es el sistema de control automático de la máquina de escritorio para el troquelado de cajas de cartón en el marco del proyecto de mecanos para la paz. Para esto es necesaria la implementación de la instrumentación de la máquina troqueladora utilizando sensores de posición y motores para la interconexión de la máquina con el control automático.

Adicionalmente es necesaria la implementación del algoritmo de control automático mediante el desarrollo del programa de control del autómata programable que controlara la máquina utilizando máquinas de estado para la autonomía de la operación Finalmente es necesaria la realización de pruebas para la validación de la operación mediante la realización de ciclos de operación basadas en el modelo de la máquina de estados.

6.1 Requisitos específicos del cliente y del proceso de troquelado

Es necesario reunir los requisitos específicos del cliente y del proceso de troquelado de cajas de cartón para guiar el diseño del sistema de control para implementar la instrumentación de la máquina troqueladora permitiendo un ajuste preciso adaptándose a diferentes tamaños y diseños de cajas de cartón. La máquina propuesta desde Mecanos para la paz está compuesta por una estructura formada a base de perfiles de 30 x 30 mm² de la serie 80/20. La máquina contiene los accesorios para la sujeción del actuador lineal y de los finales de carrera. También contiene la base para la sujeción del contra molde de los troqueles. Los perfiles disponen de ranuras que facilitan la sujeción de diferentes accesorios utilizando tornillos y tuerca-martillos.

Los troqueles por utilizar pueden ser de madera o de nylon y se sujetan al actuador lineal mediante unos bujes fijos que se alinean con los del actuador. El troque para cartón está realizado en dos piezas que son un molde y un contra molde. El molde tiene unas cuchillas elaboradas a partir de acero flexible y un contra molde que contiene las ranuras que permiten el ingreso de la cuchilla.



Figura 10. Estructura mecánica de la troqueladora.
Fuente. Diseño propio.

La figura 10 presenta la estructura de la máquina troqueladora, a la que se le deben agregar los sujetadores para el contra molde del troquel, el actuador lineal, la instrumentación y el tablero de control que encierra la fuente y el controlador.

Otro requisito fundamental para el desarrollo del proyecto tiene que ver con el talento humano. Para esto se requiere del talento humano que responda a disciplinas como la electrónica para el diseño de sistemas electrónicos y de control para la integración de sensores y actuadores con los sistemas embebidos. De la electricidad para la implementación del sistema de suministro y la instalación de equipos e instrumentos eléctricos, así como de la programación del control lógico y la puesta en marcha y operación inicial del sistema. De la mecánica para las pruebas de entrada y el ensamble de la máquina troqueladora y los ajustes mecánicos para garantizar la operación óptima y el manejo del activo.

6.2 Implementación de la instrumentación de la máquina troqueladora

Para la implementación de la instrumentación de la máquina troqueladora utilizando sensores de posición y motores para la interfaz entre la máquina que suministran los encargados de Mecanos para la paz y el control automático, es necesario seleccionar y adquirir los componentes de hardware necesarios, como sensores, actuadores, controladores, y otros dispositivos relacionados con el sistema de control.

Tabla 1.

Listado de materiales del proyecto

Descripción	Características	Cantidad
Cable vehículo	Negro calibre 18	5 metros
Fuente de alimentación	De 110 voltios AC a 12 voltios DC	1 unidad
Autómata programable	Basado en módulo embebido	1 unidad
Final de carrera	De palanca con contacto N.O.	2 unidades
Actuador lineal DC	Basado en motor DC de 15 cm vástago	1 unidad
Pulsadores de 22 milímetros	Negro y rojo con contactos N.O y N.C	2 unidades
Cable de poder	De 2 metros con polo a tierra	1 unidad
Caja plástica	Encerramiento IP65	1 unidad
Estructura mecánica	A base de perfil de aluminio serie 80/20	1 unidad
Molde y contra molde	De nylon con cuchillas de acero	1 unidad
Accesorios de sujeción	Metálicos y plásticos	10 unidades

Fuente. Diseño propio.

La tabla 1 muestra la lista de materiales necesarios para construir la troqueladora, haciendo énfasis en los elementos para la construcción del control automático. El sistema de control automático de la troqueladora contiene elementos entre los que es importante destacar la fuente de alimentación que convierte el voltaje de 110 a 12 voltios, el controlador que es el que interconecta todos los instrumentos con el actuador lineal, que es el que realiza la acción de movimiento del molde de troquelado.

Existe otro grupo de accesorios que son los que permiten completar el ensamble de la máquina troqueladora para que cumpla su operación, dentro de los cuales es importante resaltar la caja de plástico que cumple la norma IP65, en la cual irán encerrados todos los componentes electro – electrónicos que facilitan el correcto funcionamiento del controlador que comanda la secuencia de operación de la máquina troqueladora.



Figura 11. Actuador lineal utilizado en la troqueladora.

Fuente. Diseño propio.

En la figura 11 se observa el actuador lineal, el cual es utilizado en la troqueladora para realizar la función de los movimientos del troquel. Este actuador funciona con una fuerza hasta de 900 N, lo que equivale aproximadamente a 100 kg de peso, suficiente para el troquelado de cajas de cartón corrugado y de cartón sólido de calibres hasta 1 milímetro.

Tabla 2

Listado de equipos para el desarrollo del proyecto

Descripción	Características	Cantidad
Multímetro	Medición de voltaje, corriente y continuidad.	1 unidad
Pinzas	Mango de goma	1 unidad
Cortafríos	De punta fina para cable 18	1 unidad
Pelacables	Para cable vehículo 18	1 unidad
Destornilladores	Perillero de 5 mm de pala	1 unidad
Ponchadora	Para terminal plano	1 unidad
Cable de programación	Cable de USB tipo A a micro USB	1 unidad
Computador	Con entorno de programación Arduino	1 unidad

Fuente. Diseño propio

La tabla 2 presenta el equipo, los dispositivos y la herramienta necesarios para hacer todos los trabajos que involucran el montaje físico del hardware del controlador y también que involucran su programación para la realización de las funciones de troquelado.

Luego de seleccionar los elementos de instrumentación es necesario disponer de un controlador que permita, de forma efectiva, la programación de las secuencias de movimiento del actuador lineal de la troqueladora.

6.3 Adopción del controlador que soporte control lógico

En la tarea de adoptar un controlador electrónico que soporte el control lógico de motores DC, particularmente del actuador lineal, con inversión de giro, se ha seleccionado el controlador Amp2 que cuenta con entradas universales acopladas con circuito RC y salidas por transistor con configuraciones de puente H.



Figura 12. Controlador y fuente de la troqueladora.
Fuente. Diseño propio.

Para el desarrollo del control se ha seleccionado un dispositivo, el cual se deja programar desde los entornos de desarrollo de Arduino, de Espressif-IDF y de MgdEsp. Este último es el que se utilizará para desarrollar las secuencias de control. En la figura 12 se observa. El controlador conectado a la fuente que va a llevar la troqueladora. Se observa que el controlador tiene un microcontrolador del tipo ESP32, el cual tiene conectividad a Internet y otras características que imprimen una potencia de procesamiento sobresaliente.

El Amp2 es un módulo listo para el desarrollo directo de aplicaciones de IOT y control, basado en el SOC ESP32-s3-WROOM-U1-N4, implementado sobre el procesador de 32 bits LX7 de Xtensa® con dos núcleos con soporte de hasta 240 MHz con 384KB de ROM, 512KB de RAM y 16KB de RTC-RAM. Tiene comunicación WiFi 802.11b/g/n, 1T1R con velocidad de transmisión hasta de 150Mbps con aplicaciones de WiFi MAC/BB/RF/PA/LNA/BLE. Soporta comunicación BLE5.0, Bluetooth a 125Kbps, 500Kbps, 1Mbps, 2Mbps. Posee interfaces del tipo GPIO, UART, I2C, PWM, ADC, SPI, I2S. Soporta múltiples modos de bajo consumo con Corrientes menores que 8uA.

El controlador Amp2 permite conectar USB para conexión directa a PC para la programación mediante JTAG interno y el desarrollo de aplicaciones de IOT y control desde entornos de desarrollo IDF, VisualStudio code, Arduino y Open MgdEsp. También posee salidas opto aisladas mediante transistor que permite el manejo de cargas de hasta 2 Amperios. Posee conectores tipo Header para la conexión de sensores mediante SPI, I2C, Onewire, y similares. Así mismo dispone de bus RS485 para la conexión a dispositivos con protocolos industriales tipo Modbus. Las entradas tienen divisor de tensión y pullDown de 10k y con posibilidad de adición de pullDown de 240r mediante Jumper para la entrada de señales de corriente 4 a 20 mA.

6.4 Elaboración de los diagramas de interconexión

El diagrama de interconexión que se observa en la figura 13, muestra la interconexión del controlador con la fuente de alimentación y la instrumentación. En esta se observa el cilindro al lado derecho y los pulsadores de START, STOP y los interruptores de inicio y final de carrera al lado izquierdo. Esta conexión es fundamental para la operación de la troqueladora.

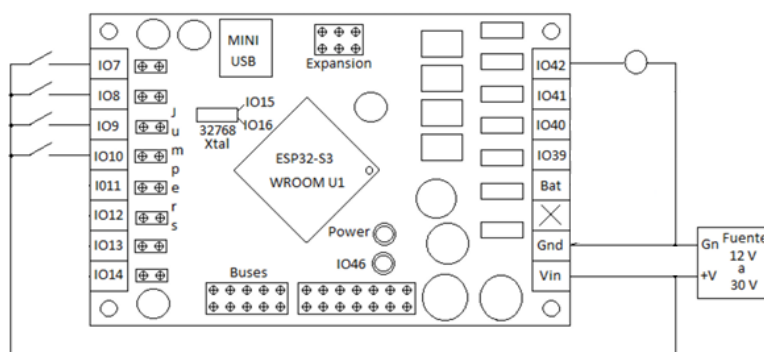


Figura 13. Diagrama eléctrico del control de la troqueladora.
Fuente. Diseño propio.

El principio de funcionamiento de este diagrama se basa en la lectura del estado de los pulsadores para determinar si el operario desea iniciar la operación o detenerla, utilizando los pulsadores de START y STOP: También del estado de los interruptores de inicio y final de carrera para determinar si el molde del troquel ha llegado a las posiciones límite del actuador lineal. También. Es importante destacar que a partir de El Estado de los pulsadores y los finales de carrera se opera sobre el cilindro, el cual transmite movimiento al troquel.

6.5 Instalación física de los componentes de hardware del control

La instalación física de los componentes de hardware consiste en realizar las conexiones necesarias en la máquina de troquelado. Para esto se debe seguir el protocolo especificado en la tabla 3, en la cual hay una columna que especifica la actividad, otra que se refiere al criterio de calidad y otra que establece el resultado esperado. Esta lógica está orientada a que el operario que va a hacer la instalación física debe seguir las actividades que aparecen en la columna de actividades teniendo en cuenta el criterio de calidad y revisar que se cumpla el resultado especificado. De esta manera se deben seguir esos pasos en el orden en que aparecen, lo cual garantiza que a la hora implementar las actividades, no sucedan errores que dañen los componentes.

Tabla 3

Protocolo de instalación de los componentes

Actividad	Criterio de calidad	Resultado
Inspección visual	Revisión de apariencia y marcas.	Cumple
Conexión de la fuente	Revisión de voltaje	12 voltios
Instalación del controlador.	Emplazamiento en la caja.	Sujeta en riel
Conexión del actuador	Prueba de avance desde programa	Hay movimiento
Conexión de los pulsadores	Acción de Jogg del actuador	Operación
Conexión de finales	Desplazamiento hasta límites	Responde
Agrupamiento de cables	Utilizar amarres	Arnés listo

Fuente. Diseño propio

La estrategia de conectar la fuente y el controlador inicialmente, para luego hacerlo con las salidas, tiene la finalidad de disponer cada vez de los elementos que permiten ver los resultados de probar las partes subsiguientes. Por eso se observa que lo último que se instala son los elementos de entrada al controlador, que sólo pueden ser verificados por su reflejo en las salidas.

6.6 Desarrollo del software necesario para controlar la máquina de troquelado

Para el desarrollo del software necesario para controlar la máquina de troquelado, incluyendo la lógica de control es necesario diseñar el programa de control del autómata programable utilizando la metodología de máquinas de estado. Esto se logra utilizando un software que permita modelar máquinas de estados finitos y por ello es importante tener un diagrama en

bloques que permita establecer la relación entre las entradas y las salidas, puesto que su interacción a través de la lógica del control es la que permite crear las secuencias que gobernarán el programa de la troqueladora.

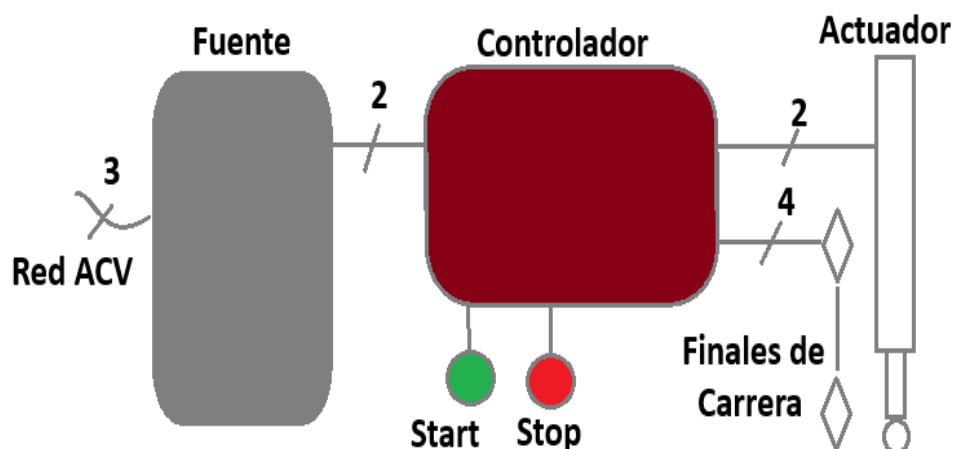


Figura 14. Diagrama en bloques de los elementos del control.

Fuente. Diseño propio.

La figura 14 presenta un diagrama en bloques que permite establecer las entradas y las salidas del control que sirven de variables para la realización del programa de control. De esa manera se observa que existen cuatro entradas, las cuáles son dos finales de carreras y un botón de START y otro botón de STOP. Adicionalmente se observa que hay dos salidas que van hacia el actuador lineal, una corresponde a la orden de salida del vástago, lo que hace que baje el molde del troquel hacia el contra molde. Y otra salida que hace que regrese el vástago del actuador subiendo el molde hacia su posición de reposo.

6.7 Programación del controlador y configuración del software

Programar el controlador y configurar el software de control de acuerdo con las especificaciones y necesidades de la máquina y del proceso de troquelado, se realiza utilizando el software-entorno de programación MgdEsp, el cual permite convertir diagramas de máquinas de estados finitos en programas de código C y a través de esto compilarlos a código de máquina para transmitirlos al controlador Amp2, el cual ejecutará la secuencia tal como se desarrolla en la interfaz gráfica del entorno de programación.

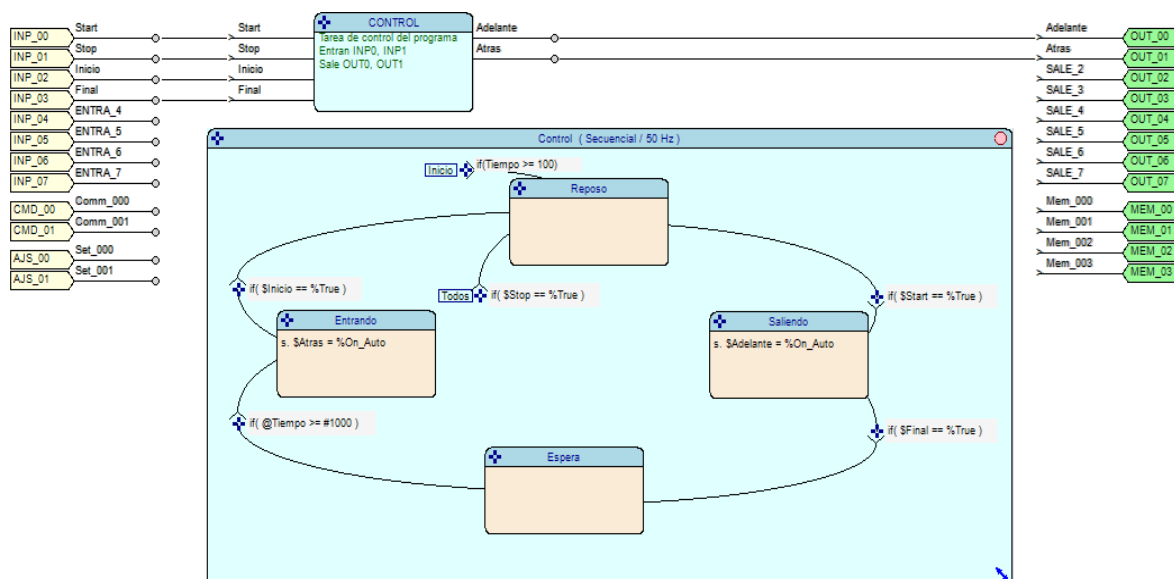


Figura 15. Diagrama de estados del control de la troqueladora.

Fuente. Diseño propio.

La figura 15 muestra el diagrama de control, en el cual es destacable que al lado izquierdo están las entradas del controlador y al lado derecho están las salidas del controlador. Esas entradas y salidas están conectadas a un bloque de control, que, al ser desplegado, presenta la secuencia en la cual hay un estado de “Reposo” que se mantiene hasta que llegue una orden de START, a lo que se pasa a un estado en el cual se está “Saliendo” el vástago a través de la activación de una salida del controlador. El estado se mantiene hasta que se encuentra el final de carrera, luego de lo cual ocurre una “Espera” de 1 segundo troquelando y luego se regresa el vástago en un estado llamado “Regresando” hasta que se encuentra el inicio de carrera. También se observa en la secuencia que tan pronto como pulse el botón de STOP desde cualquier estado, el sistema pasará al estado de “Reposo” y quedará quieto sin hacer ninguna acción.

6.8 Validación de la operación mediante la realización de pruebas

Para la validación de la operación, es necesario realizar pruebas iniciales para garantizar que el sistema esté funcionando correctamente y que la máquina responda adecuadamente al software de control de la secuencia de operación. En este caso es importante tener en cuenta la secuencia que describe la máquina de estados. Así al pulsar START, se verá que el sistema empieza a bajar el molde para troquelar. Esto se ocurre mientras la máquina esté en el estado “Saliendo”. De esta

misma manera, tan pronto como llegue al final de carrera, debe detenerse durante 1 segundo, luego de lo cual empieza a regresar, lo que evidencia que la máquina está en el estado “Entrando” y lo hará hasta que encuentre el sensor de inicio de carrera.

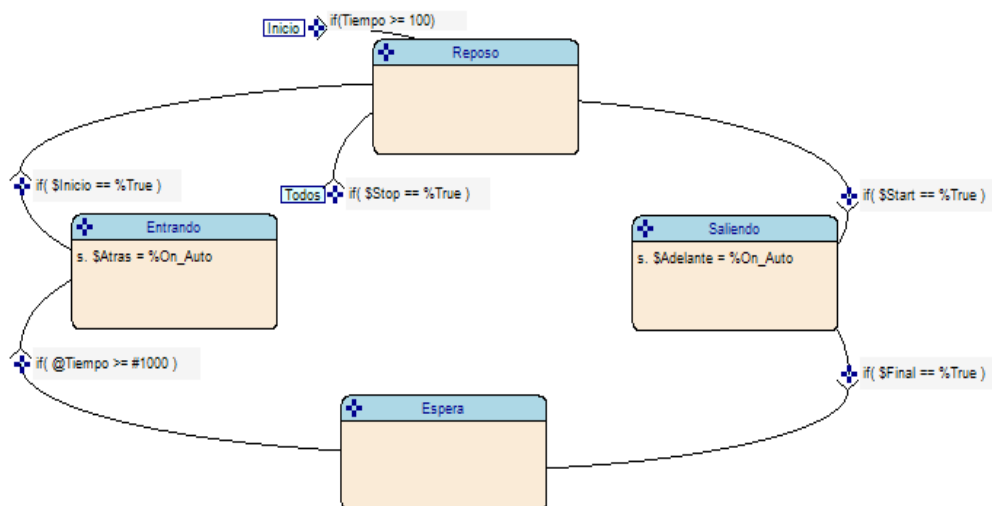


Figura 16. Diagrama de estados para la realización de las pruebas.
Fuente. Diseño propio.

La figura 16 es de mucha utilidad para hacer las pruebas de funcionamiento de la máquina troqueladora para validar su operación. Entonces basta con seguir la secuencia que muestra el diagrama y con ello se hace la prueba paso por paso, la cual empieza pulsando el botón de START y esperando a que se realice el ciclo completo.

6.9 Revisión del hardware del sistema de control de la troqueladora

La revisión del hardware del sistema de control, para que esté completamente operativo y que la máquina pueda funcionar de manera eficiente con los elementos interconectados, implica tener un orden basado en el diagrama eléctrico del controlador conectado a los pulsadores e interruptores de entrada y al actuador lineal de salida. Dichos chequeos se deben hacer basados en las flechas que aparecen indicando los puntos de chequeo en el diagrama de la figura 17, empezando por la fuente (Led “Power”), siguiendo con el controlador (Led IO46), el actuador lineal (Movimientos) y terminando con los pulsadores y los interruptores de final de carrera que determinan la operación de la secuencia de operación.

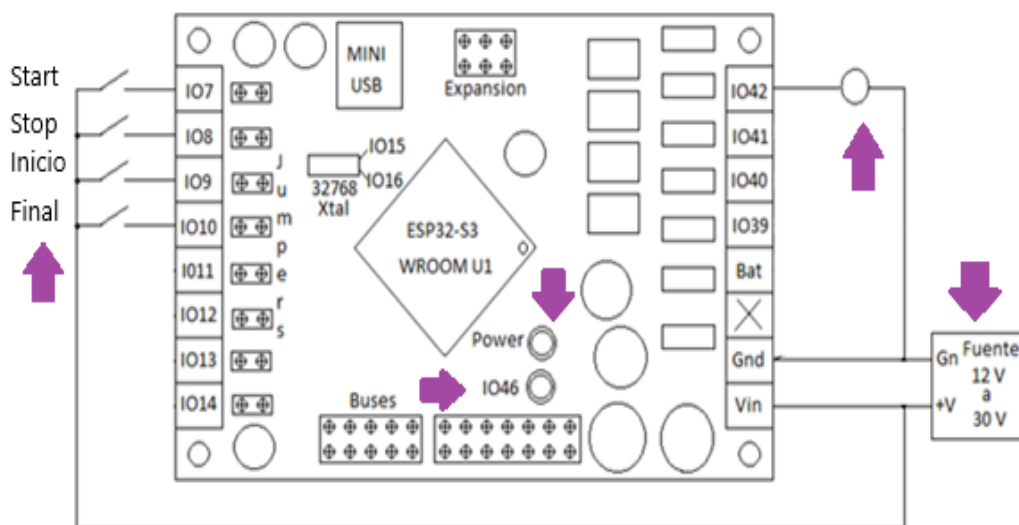


Figura 17. Diagrama que indica los puntos de prueba del hardware.
Fuente. Diseño propio.

El orden de chequeo entonces, según la figura 17, tiene que ver con revisar inicialmente que la fuente esté suministrando el voltaje, luego de conectar la fuente al controlador, revisando que se enciende el LED “Power” y en el momento que el controlador inicie su operación, se verá que el LED IO46 esté destellando. Al pulsar el botón de START, debe iniciar la operación del actuador lineal, que debe parar cuando se pulse el botón de STOP o tan pronto como detecte los interruptores de final o inicio de carrera.

6.10 Pruebas exhaustivas de la operación completa de la troqueladora

La parte final del desarrollo del proyecto tiene que ver con las pruebas exhaustivas de la operación de la troqueladora, realizando las pruebas del funcionamiento completo, para asegurar que el sistema de control automático implementado mediante el software cumple con los requisitos del cliente y es capaz de controlar la máquina de manera efectiva.

Para tal fin se realiza una serie de actividades en el momento en que todo el sistema ya está integrado y se va a poner en explotación por parte de los usuarios finales. En este caso se debe revisar no solamente el control o el hardware, sino toda la operación completa de la máquina, siguiendo el protocolo. Establecido en la tabla número 4.

Tabla 4
Protocolo de ajuste de la troqueladora

Actividad	Criterio de calidad	Resultado
Verificar integridad estructura	Ausencia de tolerancias visibles.	Completa
Verificar desplazamiento.	Parada en los finales de carrera.	Se cumple
Alineación del molde	Bajar molde manualmente	Marca troquel
Energización de la máquina	Enciende led de poder	Enciende
Operación del controlador	Destella led cada segundo	Destella
Secuencia en vacío	Realiza el ciclo completo	Realizado
Secuencia con material	Troquela cartón sin defectos	Troquela

Fuente. Diseño propio

La tabla 4 muestra que hay que realizar una serie de actividades también revisando un criterio de calidad y verificando que se cumpla el resultado propuesto. De esa manera, por ejemplo, cuando se verifica la integridad de la estructura, se refiere a que se revise que no estén sueltos los perfiles, y si se cumple la condición de la ausencia de tolerancias significativas, indica que no hay partes sueltas, indicando que el resultado del paso de verificación está completo.

Si por ejemplo se revisa la operación del controlador, entonces se verifica que el LED IO46 del controlador esté haciendo destellos y así mismo, se siguen los distintos pasos para completar la verificación de que la máquina está lista para ser operada por los operarios que la han de explotar productivamente.

7. Conclusiones

La forma más expedita de hacer funcionar la troqueladora planteada fue utilizando un actuador lineal y dos finales de carrera que indican el momento en el cual el primero llegue a los extremos del recorrido.

La utilización de máquinas de estados finitos es una estrategia que agilizó la programación de la secuencia de la troqueladora y permitió relacionar el modelo de programación con las tareas de pruebas y validación.

La utilización de protocolos de prueba permitió hacer el desarrollo en forma colaborativa con la intervención de especialistas de diferentes áreas de saber y niveles de especialización, lo que optimizó los costos del proyecto.

8. Recomendaciones

Se propone la continuación de proyectos de construcción y automatización de máquinas de escritorio para la producción. Esto redundará en el incremento de recursos para la enseñanza y la investigación en los programas de la facultad de ingeniería y de la de producción y diseño.

Se propone llevar los desarrollos de las máquinas de manufactura flexible, como la de este proyecto, a las instancias de los proyectos de aula y proyectos integradores de aula.

Se debe agregar funcionalidades de IoT a las máquinas para expandir su rango de aplicación a las diferentes actividades que se desarrollan en la institución.

9. Referencias bibliográficas

Balcells, J. (2005). *Autómatas programables*. Barcelona: Marcombo.

Dorf, R. B. (2011). *Modern Control Systems*. London: Prentice Hall.

Kahn, M. K. (2012). *Packaging Design: Successful Product Branding from Concept to Shelf*. Rockport: Rockport Publishers.

McConnel, S. (2004). *A Practical Handbook of Software Construction*. Seattle: Microsoft Press.

Mogrovejo Tigre, K. J. (2021). *Diseño de automatización de máquina pegadora para la producción de cajas de cartón corrugado en la empresa Cartonera del Austro*. Quito: Fondo editorial Salesiano.

Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*. New York: Prentice Hall.

Pahl, G. B. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach*. London: Springer-Verlag London Limited.

Shigley, J. M. (2001). *Mechanical Engineering Design*. New York: McGraw-Hill.

Tabares, L. O. (2022). *Implementación de una máquina empacadora de grano de producción personal en el marco del proyecto Mecanos para La Paz*. Medellín: Biblioteca Pascual Bravo.

Ulrich, K. E. (2015). *Product Design and Development*. New York: McGraw-Hill Education.

10. Bibliografía

Hibbeler, R. C. (2016). Engineering Mechanics: Dynamics. Pearson.

ISO 9001:2015 – Sistemas de gestión de la calidad.

Nise, N. S. (2015). Control Systems Engineering. Wiley.

Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (2014). Feedback Control of Dynamic Systems.

Knuth, D. E. (1997). The Art of Computer Programming. Addison-Wesley.