

Cilindros con posicionamiento eléctrico para demostración de actuadores neumáticos.

Cylinders with electrical positioning for demonstration of pneumatic actuators

Recibido: 29 de septiembre de 2024

Aceptado: 27 de noviembre de 2024

Francisco Alberto Barrena Rodríguez

Instituto Tecnológico de Durango/TecNM

barrenaitd@itdurango.edu.mx

Obed Antonio García Cano

Instituto Tecnológico de Durango/TecNM

Dafne Hazzely Durán Vázquez

Instituto Tecnológico de Durango/TecNM

Carlos Omar Ríos Orozco

Instituto Tecnológico de Durango/TecNM

RESUMEN

La enseñanza en el campo de la automatización industrial es usual en las escuelas de ingeniería, pero con mayor énfasis en las escuelas de enseñanza práctica en México. Muchas de las cuales no cuentan con el equipamiento necesario para desarrollar competencias en el campo de la automatización. Sin embargo, en la actualidad, todas las escuelas deberían complementar su enseñanza con prácticas que logren conceptualizar la teoría enseñada en las aulas. El equipamiento en el campo de la automatización y particularmente en el campo de la neumática tiene altos costos para escuelas de nivel superior y medio superior. Si a esto se añade que en prácticamente la totalidad de las escuelas se cuenta con energía eléctrica, cabe la posibilidad de diseñar un actuador lineal eléctrico que simule o imite los movimientos de los actuadores neumáticos. Con un diseño simple y efectivo que permita que los usuarios interactúen y contemplen otras formas de emplear dispositivos que suplan a los elementos neumáticos. Por lo que se presenta el diseño de un actuador impreso en 3D para parámetros de movimientos lineales de carrera normal, que podrá ser adquirido por escuelas de enseñanza práctica en distintos niveles educativos. Actualmente la fase se encuentra en prototipo y se ha utilizado para la enseñanza en el Instituto Tecnológico de Durango.

Palabras clave: actuador lineal, automatización, impresión 3D, enseñanza, neumática.

Abstract

Teaching in the field of industrial automation is common in engineering schools, but with greater emphasis in practical teaching schools in Mexico. Many of which do not have the necessary equipment to develop skills in the field of automation. However, currently, all schools should complement their teaching with practices that conceptualize the theory taught in the classrooms. Equipment in the field of automation and particularly in the field of pneumatics has high costs for higher and secondary schools. If we add to this that practically all schools have electric power, it is possible to design an electric linear actuator that simulates or imitates the movements of pneumatic actuators. With a simple and effective design that allows users to interact and consider other ways of using devices that replace pneumatic elements. Therefore, the design of a 3D printed actuator for normal stroke linear movement parameters is presented, which can be acquired by practical teaching schools at different educational levels. Currently the phase is in prototype and has been used for teaching at the Durango Technological Institute.

Keywords: linear actuator, automation, 3D printing, teaching, pneumatics.

INTRODUCCIÓN

El 70% de todas empresas fabricantes tiene un sistema de aire comprimido, es por ello que la neumática es una de las principales tecnologías usadas en el mundo en los procesos industriales, y va desde el uso para limpieza hasta su uso en la robótica industrial (KAESER, 2021). Los sistemas de automatización más comúnmente utilizados en México son movidos a través de aire comprimido. Y se destacan las principales características que tiene:

- Capacidad de almacenamiento
- Seguridad
- Velocidad
- Fuerza
- Tecnología limpia

Los sistemas neumáticos a pesar de ser ampliamente utilizado en la automatización de procesos industriales presentan una serie de desafíos al momento de su implementación y manejo durante los procesos ya sea en actividades de empaquetado o en las industria automotriz, eléctrica, textil y otras. La principal limitación que presentan estos sistemas está en su baja precisión, ya que presentan múltiples desafíos al controlar factores como la velocidad y posicionamiento de los actuadores, para ser aplicables en estas actividades requieren de componentes extra como sensores y servomecanismos para el control del vástago. Además, se deben de seleccionar los elementos adecuados para el buen funcionamiento del equipo (Aucapiña, 2024)

Una gran deficiencia en el uso de los sistemas neumáticos está en el alto consumo y desperdicio de energía eléctrica empleada en los compresores para obtener el aire comprimido que es utilizado como transmisor de movimiento por los actuadores neumáticos. Como factor destacable, un artículo publicado por la empresa GARGIL en 2022 expone que en la actualidad un 20% del consumo eléctrico en la industria es generado por los sistemas neumáticos, este consumo proviene de los diversos elementos que lo conforman, como el compresor. Otra gran limitación, es el uso del aire comprimido como transmisor de energía mecánica, ya que en todo momento se depende de la presión acumulada del sistema para un correcto desempeño de los actuadores y elementos de control, esto lo vuelve sensible a fugas que puedan disminuir la presión del sistema.

La empresa KOHEN Industries marca cinco limitantes básicas de los actuadores neumáticos y que a su vez generan desgaste en los elementos. El primero de ellos es la contaminación del aire comprimido, y esto ocurre cuando el aire comprimido no se limpia y filtra adecuadamente, por lo que las impurezas pueden generar desgaste. El segundo problema estriba es que no se dé un buen mantenimiento a las unidades de mantenimiento, que a su vez genera un desgaste prematuro en el cilindro. El tercer problema radica en que los actuadores al estar en constante movimiento suelen deteriorarse y ocasionar fugas de aire.

Y si a este problema añadimos que los programas de estudios marcan como uno de los conocimientos fundamentales el uso de diversas tecnologías para la enseñanza de la automatización. Además, se requieren equipos especializados para su enseñanza, y brindar el tiempo necesario a la práctica, puesto que es definida como una actividad de carácter transformador históricamente condicionada y sujeta a desarrollo (Addine 2020).

Hoy día existen diversos métodos de enseñanza en neumática, que implican teoría y simulación computacional, los cuales permiten poner al estudiante en el contexto de la realidad. Sin

embargo, si se logra brindar al estudiante la experiencia en aplicar la teoría y simular circuitos de aplicaciones neumáticas industriales, le permitirías comprender mejor la parte teórica y se le brindan las herramientas para enfrentar situaciones reales. Es por ello por lo que todas las carreras técnicas deben tener equipos de enseñanza o recursos educativos en el área en lo particular, puesto que el desarrollar habilidades y competencias es esencial para el buen desarrollo de los estudiantes. (Spanhol, 2020)

Particularmente el área de Ingeniería presente en algunas carreras contiene asignaturas relacionadas a la automatización industrial, aunado a esto el Tecnológico Nacional de México (TecNM) se declara institución de educación superior tecnológica más grande de Latinoamérica, en la cual se “forman profesionales competitivos de la ciencia y la tecnología” (TecNM, 2021). Por lo que todas las instituciones de educación superior en ingeniería y particularmente aquellas que pertenecen al TecNM deben comprometerse a desarrollar las competencias y habilidades que permitan a sus egresados insertarse de manera exitosa en el ámbito laboral. Así cuando los egresados están en puestos afines a su perfil sienten bienestar y satisfacción personal (Guillen, 2023)

Entre las carreras que más utilizan esta área en su desarrollo laboral está la carrera de Ingeniería Mecánica, en el séptimo semestre se encuentra la asignatura de automatización industrial la cual aporta a los estudiantes “la capacidad para analizar y diseñar circuitos hidráulicos y neumáticos de utilización en procesos y equipos mecánicos”. Y entre las practicas propuestas presenta el control de directo e indirecto de un actuador lineal, el control de la velocidad de avance y retroceso de un actuador de simple y doble efecto.

En la carrera de Ingeniería Mecatrónica también en el sexto semestre se tiene la asignatura de Circuitos Hidráulicos y Neumáticos cuyo objetivo primordial es “conocer, comprender e identificar los elementos de trabajo que intervienen en un circuito neumático o hidráulico” y en sus prácticas propuestas sugiere la demostración del: control directo e indirecto de un cilindro de simple y doble efecto, el control de la velocidad y avance de un cilindro de doble y simple efecto.

En la carrera de Ingeniería Electromecánica se presenta la asignatura de Sistemas Hidráulicos y Neumáticos de Potencia, en la que se destaca que su objetivo es interpretar, controlar y diseñar de forma óptima los circuitos neumáticos o hidráulicos por medio mecánicos. Entre las sugerencias de prácticas a realizar invita a realizar los circuitos de mando directo e indirecto de actuadores de simple y doble efecto, aso como la regulación de velocidad en actuadores.

La carrera de Ingeniería Industrial opción Mantenimiento de Sistemas Productivos, invita a que el estudiante proponga soluciones creativas que generen ventajas competitivas en la selección de equipo neumáticos y en su parte práctica sugiere explicar el funcionamiento gráfico de los componentes principales de un sistema neumático.

Es importante destacar que todas estas carreras dan una gran importancia a la automatización, y es que el avance de la automatización industrial exige que las escuelas se les exija que sus egresados sean profesionistas que especializados en el mantenimiento e instalación de sistemas automáticos (Cembranos, 2008).

Sin embargo, el alto costo de los equipos neumáticos e hidráulicos sigue siendo una limitante para el desarrollo e instrucción en este campo. Festo, reconocido por ser una de las empresas

líderes en automatización, ha desarrollado paquetes de formación en neumática, el de neumática para principiantes y el de neumática para avanzados.

Las causas por las cuales las escuelas no logran transmitir adecuadamente los conocimientos en el área de la neumática e hidráulica, es que para tener modelos de enseñanza no solo deben adquirir el equipo neumático, sino también adquirir compresores, así como diseñar y establecer las redes que permitan mover el aire comprimido o el aceite desde la ubicación del compresor hasta el tablero de enseñanza. Lo que ha impedido que el alumno desarrolle sus habilidades completamente, al no interactuar con los actuadores físicos directamente ni conocer cómo desarrollar un control para su posicionamiento.

Sin embargo, la inclusión de tecnologías tales como la manufactura aditiva y/o la impresión 3D cada vez suelen ser más una alternativa para el ámbito de la educación, la innovación tecnológica y la creación de mejores elementos de enseñanza (Cabrera & Córdova 2023).

Actualmente la impresión 3D se sigue difundiendo en áreas del conocimiento, donde era difícil ser utilizada, dando lugar a modelos de aprendizaje cada vez más sencillos y económicos (Zelada et al.2024)

METODOLOGÍA

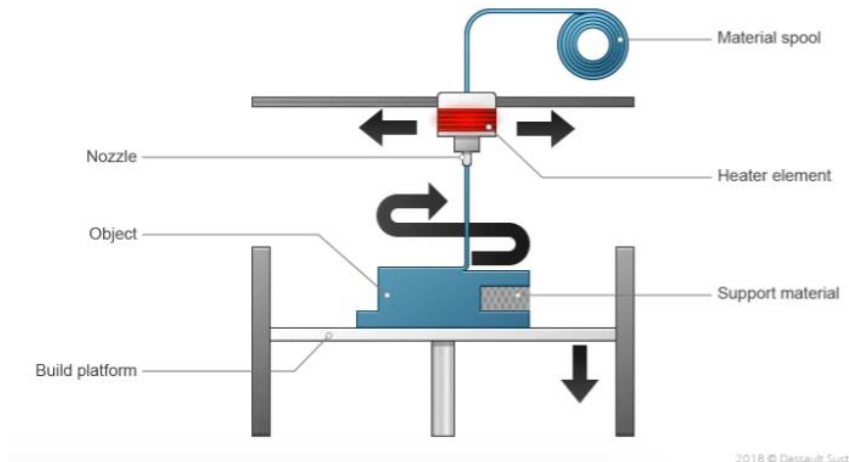
En la carrera de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Durango, que pertenece al Tecnológico Nacional de México, se desarrolla la propuesta de diseñar y fabricar un actuador lineal movido a través de una cremallera por medio de un motor eléctrico que permita el posicionamiento a lo largo de la carrera del pistón a través de impresión 3D.

En el año 2023 Ochoa mencionó que los avances en el campo de la impresión 3D abarcan dispositivos y modelos de enseñanza que bien utilizados, pueden convertirse en aplicaciones reales. Por otro lado, Dassault Systemes define la impresión 3D como el proceso de creación de objetos mediante el depósito de capas de material unas sobre otras. Un modelo digital en 3D se presenta en forma de capas finas por medio de un *software* leído por la impresora 3D, quien deposita el material en su lugar.

Esta tecnología se utiliza en la creación de prototipos rápidos, pero también en piezas de uso final que aumentan la fuerza y la resistencia de las piezas, utilizando materiales más ligeros. El método de FFF (o FDM, por Fused Deposition Modeling) dibuja una capa de plástico fundido en la cama de impresión o construye una placa. La fusión se produce dentro de un extrusor, que calienta el filamento de plástico a medida que los engranajes lo empujan a través de la boquilla.

Figura 1

Método de fabricación de filamento fundido



Nota: En la presente figura se observa el método usado para la fabricación del actuador 3D
Fuente: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/3d-printing>

ANÁLISIS DE ACTUADORES SERVO NEUMÁTICOS

En el mercado se observó que existe una propuesta desarrollada por la empresa FESTO, el uso de sistemas servoneumáticos. Los sistemas servoneumáticos se componen de dispositivos que combinan la potencia neumática y el control mediante válvulas de posicionamiento, controladores y actuadores. Para el movimiento de los actuadores deben recibir aire comprimido y el control se da a través de la regulación de la presión.

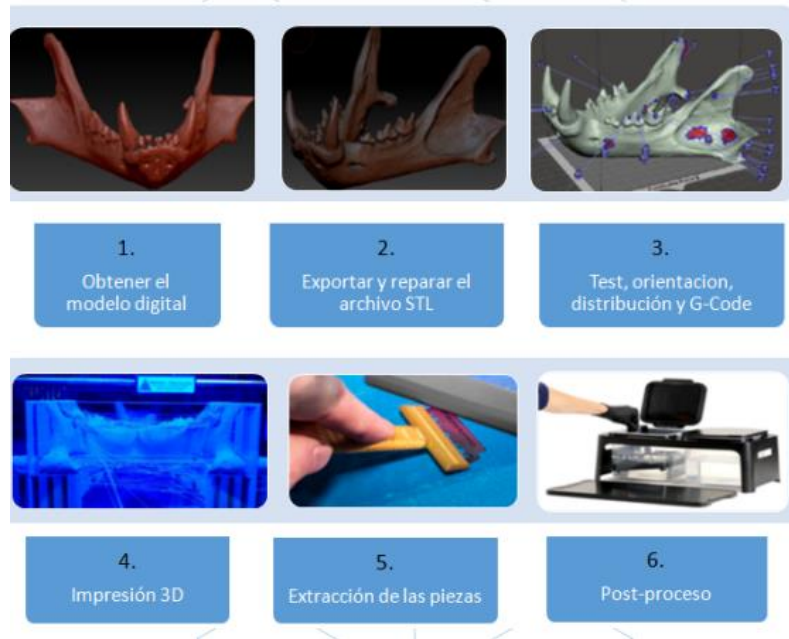
En el mercado se encuentran diversos actuadores neumáticos controlados a través de motores eléctricos, para lo que, obviamente requieren corriente eléctrica para su accionamiento. De manera común se usan motores paso a paso para convertir el movimiento giratorio a lineal mediante un tornillo sin fin acoplado al rotor del motor. Estos actuadores proporcionan precisión de movimiento, sin embargo, presentan decadencias en el tema de velocidad en cuanto a RPM y con cargas muy pequeñas.

DISEÑO DEL ACTUADOR LINEAL

Después de analizado el mercado se propuso el desarrollo del actuador lineal accionado por servomotores y controlado por controladores PID. Para lo cual, se comenzó con los pasos recomendados por la empresa Dassault Systems.

Figura 2

Diagrama de pasos a seguir para el método de filamento fundido



Nota: En la presente figura se observa los pasos para realizar la impresión 3D
Fuente: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/3d-printing>

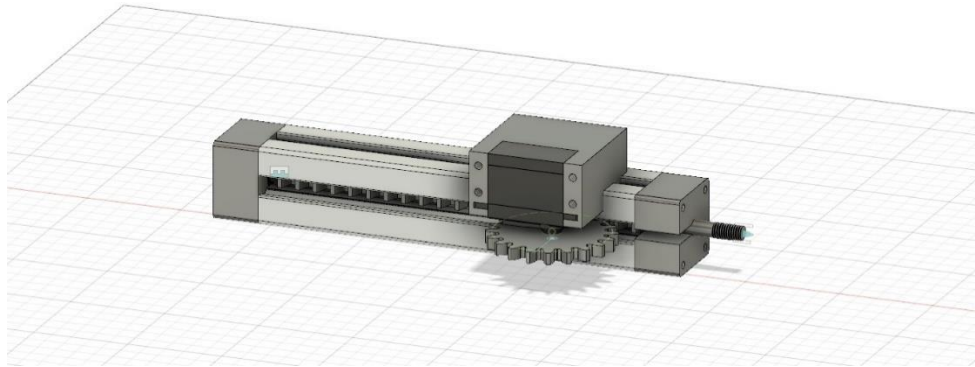
En la etapa primera de la impresión por filamento fundido siguiente se comenzó a desarrollar el cuerpo del actuador lineal, y para lo cual se tomó como base los perfiles BOSCH. Este diseño permite desarrollar un actuador que tenga las mismas ventajas del perfil, es decir, guardas de seguridad perimetral alrededor del propio elemento y a la vez, tener un elemento para realizar sujeciones posteriores si fuera necesario. Al tener una figura de prisma rectangular se tiene un dispositivo que es común en los elementos industriales.

Posteriormente se diseñó el vástago del actuador, considerando dos opciones: por medio de cremallera o por medio de engrane helicoidal. La primera opción, es un mecanismo mecánico que va acoplado con un piñón, permite convertir el movimiento giratorio o circular en un movimiento rectilíneo o lineal. Mientras que la segunda opción, son engranes que a través de sus dientes en forma de hélice permiten la transmisión de un movimiento giratorio a una lineal de manera silenciosa.

Para el diseño del prototipo se optó por el mecanismo de cremallera debido a la facilidad de realizar la impresión del mecanismo, así como su facilidad para acoplarse en el actuador lineal.

Figura 3

Diseño del actuador lineal

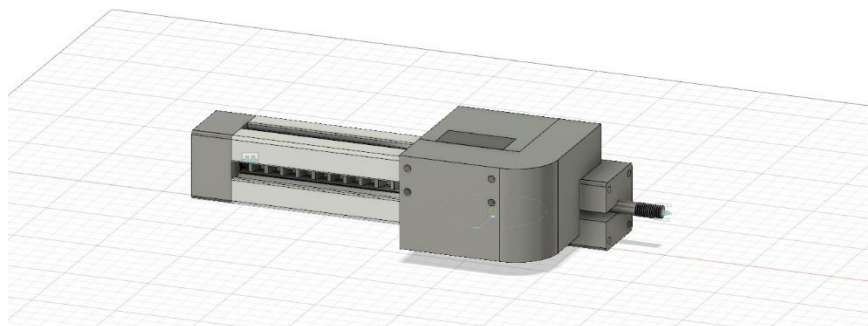


Nota: En la presente figura se observa el actuador con la cremallera acoplada
Fuente: Propia

Posteriormente se exportó el archivo STL. Cuando la pieza ya está diseñada y modelada es necesaria una conversión de formato a esta extensión ".stl". Enseguida se decidió el posicionamiento y orientación de la pieza en la base de impresión o cama. Teniendo en cuenta que se utilizara el mínimo material (y conseguir menor tiempo de impresión).

En el siguiente paso, se genera el código G, recordando que este parámetro tiene mucha importancia también, e influirá significativamente en la calidad final de la superficie de la pieza. Una altura de capa pequeña resultará en mejor resolución o calidad, pero también en un mayor tiempo de impresión

Figura 4



Nota: En la presente figura se observa el actuador con la cremallera acoplada
Fuente: Propia

Posteriormente se procedió a la fabricación del prototipo, el cual fue realizado en impresión 3D. El material que se utilizó fue PLA (Acido Poli Láctico), puesto que lo que se desea es tener un método de verificación de funcionamiento del actuador. Para la impresión se utilizó una impresora RAISEN y a través del programa CURA se determinó que la impresión se realice a un 80% para tener una buena resistencia en el material.

Para la etapa de control del actuador se realizará a través de un PID (Controlador proporcional, integral y derivativo) en un PLC (Controlador Lógico Programable), que es un método probado de control de actuadores (Cuenca, 2020). Se investiga la posibilidad de integrar en sistema de motores digitales, ya que estos tienen la ventaja de una precisión elevada en la posición rotacional, además de poder controlar la temperatura de cada uno de ellos, la velocidad y la aceleración y el torque de cada motor. Una de las ventajas de los motores digitales, es que usan el protocolo RS485 en cual se conectan en serie todos los dispositivos pudiéndose conectar

hasta 256 de estos con tan solo 3 cables (dos de alimentación y uno de datos). Y para efectos de evitar que el mecanismo se encuentre expuesto a condiciones de funcionamiento donde exista polvo, o algún elemento que se pueda integrar en el producto, se diseñó una cubierta para evitar exponerlo. Esta cubierta además debe colocarse por seguridad en el propio elemento. Además, que dicho control es económico y capaz de cumplir con los requerimientos didácticos necesarios (Choque, 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La propuesta consiste en el desarrollo de un producto el cuál esencialmente es un sistema de automatización industrial basado en válvulas y actuadores lineales eléctricos, cuya área de aplicación pertenece a la industria electrónica de sistemas embebidos, debido al uso del sistema como alternativa de automatización a las industrias productivas. Esto coincide con lo expresado en la conferencia Edunovatic 2023, donde se mencionó que la educación puede ser transformada de acuerdo con este tipo de herramientas novedosas de maneras sorprendentes.

Entre las ventajas del dispositivo esta una mayor precisión, control y eficiencia energética en comparación con los sistemas neumáticos, aplicados en la automatización industrial. Se busca generar un sistema integral que simplifique el uso de componentes auxiliares como los presentes en los sistemas neumáticos. El diseño aplica el uso de motores de corriente directa y elementos de transmisión mecánica de movimiento rotacional a movimiento lineal, conservando las mismas dimensiones y métodos de sujeción que poseen los actuadores neumáticos comerciales a fin de facilitar su implementación.

Como elemento de control, se presenta el rediseño de las válvulas neumáticas convencionales, siendo reemplazadas por sistemas electrónicos controlados por un sistema embebido capaz de modular el accionamiento de los actuadores, controlando parámetros como la posición y la velocidad del vástago sin necesidad de recurrir a elementos o sensores auxiliares externos, brindando la posibilidad de alcanzar nuevas aplicaciones en los procesos industriales enfocados a precisión.

Además, emplea el uso de corriente directa como elemento de accionamiento, de un servomotor eléctrico que a su vez en conjunto con un sistema de elementos mecánicos transmite movimiento lineal.

Figura 5



Nota: En la presente figura se observa 4 prototipos fabricados con su respectivo control
Fuente: Propia

En conjunto de la transmisión piñón cremallera que se aplicó, tiene un funcionamiento similar al del engranaje simple donde la velocidad de esta dada por el piñón (engranaje) este está conectado de forma directa al servomotor y entonces la velocidad y la posición por las caracterizas de esté. Se puede aplicar la fórmula que dice: la velocidad de la cremallera es igual al diámetro primitivo del piñón entre dos, y variando este diámetro se varia la velocidad mecánica del sistema. Es importante recalcar que también de forma electrónica se puede variar la velocidad en el motor y por ende en la velocidad de carrera del sistema.

Las características eléctricas son: consumo de 4.8V con una carga de 3.1Kg-cm; 6.0V con una carga de 6.5Kg-cm. Sus velocidades de rotación 0.17seg/60° con 4.8V de alimentación sin carga; 0.4seg/60° con alimentación de 6V. El desplazamiento de la cremallera es relativo al giro del motor, es decir que calculando con el diámetro primitivo del piñón ya que tenemos un diámetro primitivo de 7 cm el piñón, la circunferencia es de 22 cm. Con estos datos se puede ver que el desplazamiento de la cremallera seria de 11cm ya que el servomotor solo se desplaza 180° de giro. Basándose en las caracterizas, la salida el vástago es de 1.2 segundos con un torque 6.5kg. (carga máxima del servomotor)

Hablando de la eficiencia energética el servomotor con la alimentación de 5VCD una carga de 4kg consume una corriente de 106mA contrastando con el consumo de un compresor comercial de Master Hardware 2 HP, 25 Litros de capacidad 110VCA y 2900Ma (Dato del fabricante). Caben resaltar que para la selección de un compresor de tiene que realizar un cálculo previo del consumo en de aire del sistema neumático y su compresor.

Una de las mejoras posibles, es la utilización de un servomotor digital de comunicación serial, el cual; aunque tiene un control electrónico diferente al PWM del utilizado, tiene más precisión porque se puede controlar la temperatura, el torque u la velocidad y también pueden ser monitoreadas. Esto llevaría un desarrollo de control de internet de las cosas mas avanzado.

Este dispositivo se está aplicado a un modelo didáctico del aula, que está siendo utilizado para prácticas de programación de PLC, pantallas HMI y modelo de tiempos para Automatización Industrial como se puede observar en a la siguiente imagen.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

La aplicación de sistemas neumáticos y electrónicos para sistemas industriales convergen en la creación e implementación de nuevas tecnologías, la propuesta de desarrollo de un sistema completamente electrónico aporta una solución a las pérdidas de energía y su respectivo costo, aporta precisión y un control computacional y no mecánico. Se puede controlar con casi cualquier sistema digital electrónico, no siendo exclusivo de una marca o fabricante; es decir, son limitaciones de compatibilidad por marcas o candados.

El desarrollo de estos dispositivos muestra que puede ser una alternativa razonable y a bajo precio para la utilización de actuadores lineales. Lo que permitiría que más escuelas de ingeniería y de nivel medio superior adquirieran equipo para la realización de prácticas a un costo bajo y sin la necesidad de complementar con equipo de generación de aire comprimido.

En cuanto a las implicaciones de la investigación, se destaca la posibilidad de crear una cultura de diseño y desarrollo de modelos de enseñanza para temas prácticos a nivel técnico y de ingeniería. Por lo que no solo se tendría una aplicación sencilla, sino que se pudieran desarrollar modelos más sencillos y económicos para el movimiento de algunas piezas sencillas y ligeras.

La aplicación de modelos 3D es cada vez más común y se vuelve cada vez más relevante en la inclusión de dispositivos de tipo industrial. Los actuadores lineales en múltiples ocasiones no requieren el transporte de grandes cargas, por lo que pensar en un modelo impreso con controles eléctricos resulta una posibilidad real.

Actualmente se está desarrollando una línea de producción que utiliza más dispositivos del mismo tipo. Se espera desarrollar en corto plazo este dispositivo con servomotores digitales y se conecten de forma secuencial; esto es, que se interconecten bajo un protocolo industrial para cumplir con otros estándares industriales. El protocolo sugerido es el profibus o profinet. Se sugiere ver la imagen de los resultados obtenidos para tener un panorama de aplicación industrial.

REFERENCIAS

Addine, F., Recarey, S., Fuxá, M., & Fernández, S. (2020). *Didáctica: teoría y práctica*. Editorial Pueblo y Educación.

Aucapiña Castillo, S. A., & Rivera Gunsha, A. J. (2024). Implementación de un módulo didáctico para la manipulación y colocación de un cuerpo de actuadores para un sistema de montaje de cilindros neumáticos.

Cabrera Frías, Lorena, & Córdova Esparza, Diana Margarita. (2023). La impresión 3D como herramienta educativa para desarrollar el pensamiento creativo: revisión sistemática. *Apertura (Guadalajara, Jal.)*, 15(2), 88-103. Epub 19 de febrero de 2024. <https://doi.org/10.32870/ap.v15n2.2382>

Cembranos Nistal, F. J. (2008). *Automatismos eléctricos, neumáticos e hidráulicos*. Ediciones Paraninfo, SA.

Choque Pardo, O. S. *Diseño y construcción de un servoposicionador neumático de bajo costo para fines académicos y de investigación* (Doctoral dissertation).

Compresores KAESER En línea]. Available: <https://mx.kaeser.com/>

Creus Sole, A. (2007) *Neumática e Hidráulica* MARCOMBO, S.A.

Cuenca, E. R. C., & Gualpa, J. D. G. (2020). Posicionamiento lineal de un cilindro neumático Festo utilizando control predictivo. *Opuntia Brava*, 12(1), 423-435.

Festo Didactic, «Tecnología industrial,» [En línea].
Available:https://www.festo.com/es/es/c/formacion-tecnica/sistemasdidacticos/automatizacion-de-fabricas-e-industria-4-0/tecnologia-de-controlindustrial-id_FDID_01_02_03/.

García Mompean, J.A. Que ventajas e inconvenientes tiene la neumática. Extraído de <https://gargil.es/que-ventajas-e-inconvenientes-tiene-la-neumatica/>

Guillén, C. F., de Lara González, N., Guijarro, J. I. C., Ibarra, C. J. C., & Rodríguez, P. H. (2023). Inserción laboral de egresados con diferente especialidad en la carrera de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico Superior de Loreto: Labor insertion of graduates with different specialty in the career of Industrial Engineering of the Higher Technological Institute of Loreto. *Latam: revista latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(3), 4.

Impresión 3D. (s.f.). Dassault Systèmes. <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/3d-printing>

Ochoa Guevara, A. . (2023). ORIGEN Y AVANCE DE LA IMPRESIÓN 3D. + *Ciencia*, (33), 24–28. Recuperado a partir de <https://publicaciones.anahuac.mx/index.php/masciencia/article/view/2092>

REDINE (Ed.). (2023). Conference Proceedings EDUNOVATIC 2023. Madrid, Spain: Adaya Press. <https://doi.org/10.58909/adc24139168>

Spanhol, F. J., Martín-Cuadrado, A. M., & Pereira, N. L. (2020). Prácticas para la enseñanza y el aprendizaje de habilidades digitales en la educación superior: una revisión sistemática en la literatura. *Revista Exitus*, 10.

Tecnológico Nacional de México (2015). Manual de Lineamientos Académico-Administrativos del Tecnológico Nacional de México

Zelada Espejo, M. I., Segura Beltrán, F., Margas Cavieres, F., & Rojas Pino, M. (2024). Impacto de la impresión 3D en el aprendizaje de estudiantes de medicina: una revisión sistemática. *Revista Española de Educación Médica*, 5(4). <https://doi.org/10.6018/edumed.626811>