

Development of an experimental prototype of a manufacturing cell for process automation teaching

Daniel Noriega-Pineda * Jesús Morales-Valdez *
René Sagredo-Hernández *

* *Colegio de Ciencia y Tecnología, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Calzada Ermita Iztapalapa No. 4163, Col. Lomas de Zaragoza, Alcaldía Iztapalapa, C.P. 09620, CDMX, México, (e-mail: daniel.noriega@uacm.edu.mx, jesus.morales@uacm.edu.mx, luis.sagredo@uacm.edu.mx).*

Abstract: For the industrial sector, the filling, sealing and labeling system represents one of the most used processes with several applications, that involves the food and beverage industry until the chemical plants, among many others applications. The propouse of this work is to develop an academic prototype of a manufacturing cell for teaching the automation of industrial processes, in order to emulate the filling, sealing and labeling system. The goal is to design a learning methodology such that the acquired academic knowledge can be transported to a real industrial environment. To achieve this, the PLC S7-300, industrial proximity sensors, pneumatic cylinders of the Festo brand, as well as their respective solenoid valves, are used. The programming methodology is based on a functional graph controlled by stages and transitions (GRAF CET). In contrart with other project based on Arduino, this project employs standard signals and variable scaling.

Keywords: Automatización, controlador lógico programable, celda de manufactura.

1. INTRODUCCIÓN

En la historia de la humanidad, la automatización de procesos data desde tiempos muy antiguos. Algunos autores reportan que el comienzo de ésta se remonta al antiguo Egipto, con un sistema de apertura de puertas por medio de vapor fabricado bajo el gobierno de Herón de Alejandría (Woodcroft, 1851). Aunque hay quienes afirman que ésta de desarrolló a partir de una clase de maquinas en las que una fuente de energía accionaba un mecanismo ingeniosamente combinado, que permitía imitar los movimientos de los seres animados, es decir, como una especie de estatuas animadas que habrían sido construidas en el templo de Dàdalo. Bajo este contexto, posteriormente los griegos y los romanos desarrollaron varios tipos de juguetes mecánicos según se reporta en Moreno (2001).

Por otro lado, la era moderna de la automatización comienza con la aparición de la maquina de vapor en 1775, construida por James Watt (Moreno, 2001). En el contexto actual se pueden clasificar 4 revoluciones indus-

triales como se describen a continuación:

- *La primera revolución industrial se desarrolló entre los años 1760 y 1840, con origen en Inglaterra. Esta etapa se caracteriza por el desarrollo de la máquina de vapor, que dio lugar al trabajo mecanizado. Además, fue aquí donde se desarrollaron avances en el los medios de transporte y producción textil (Xu et al., 2018b; Chaves Palacios, 2004).*
- *La segunda revolución industrial comprende desde mediados del siglo XIX a 1914. Se caracteriza por la producción en masa de bienes (Xu et al., 2018a). Aparecen nuevos materiales como el acero, aluminio y el cobre, entre otros, también aparece el petróleo.*
- *La tercera revolución industrial comprende desde el año 1970 hasta la actualidad. Este es una era conocida también como revolución digital, que se caracteriza por el aumento de la automatización y el control de los procesos de fabricación mediante el empleo de la electrónica y las herramientas de información tecnológica (IT, por sus siglas en inglés) (Morrar et al., 2017). Es aquí donde aparecen dispositivos como los Controladores de Lógica Programable*

* Agradecimiento al Colegio de Ciencia y Tecnología de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por el apoyo otorgado a través de los proyectos UACM CCYT-2023-INI-02 y UACM CCYT-2023-INI-01

(PLC, por sus siglas en inglés), los sensores y actuadores inteligentes. Estos elementos constituyen el núcleo para la automatización de procesos industriales.

- En la cuarta revolución industrial, existe interconectividad entre todos los elementos del sistema automatizado y con otros procesos externos, a esto se le llama industria 4.0 ó también conocida como industria inteligente (Zuehlke, 2010), que representa a una nueva fase en la revolución industrial que se enfoca en gran medida en la interconectividad, la automatización, la inteligencia artificial y los datos en tiempo real (Hermann et al., 2016).

Todas estas revoluciones industriales han dado como resultado crecimiento económico, aumento de la productividad y bienestar con impacto positivo en bienes y servicios de alta calidad (Maloney, 2006).

Hoy en día, los sistemas de fabricación modernos deben ser cada vez más flexibles, reactivos, integrados y rentables para permitir que las empresas industriales sigan siendo competitivas a nivel global. Bajo este contexto, la enseñanza de la automatización de procesos en las escuelas, a nivel medio superior, técnico o superior, lugar donde se forman los futuros ingenieros, juega un rol muy importante en el desempeño de los procesos de manufactura. Sin embargo, esta tarea es difícil de alcanzar, debido a que la mayoría de las universidades no cuenta con equipos suficientes como celdas de manufacturas, variadores de velocidad, controladores de lógica programables (PLC, por sus siglas en inglés), instrumentos eléctricos y neumáticos, entre otros, por el alto costo que representa la adquisición de estos equipos.

Una alternativa para superar estas limitantes, es a través del desarrollo a escala de pequeños prototipos para la enseñanza, que reducen considerablemente el precio de fabricación respecto a celdas industriales.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo de celda de manufactura que emula el llenado, embazado y etiquetado de un producto líquido, el cual tendría aplicaciones en la industria farmacéutica, de bebidas y alimentos, productos de limpieza, entre otros. El objetivo es analizar las variables involucradas dada una tarea encomendada, con el fin de desarrollar aplicaciones en campo utilizando el PLC S7-300 y el software TIA PORTAL de Siemens. Los resultados experimentales validan la efectividad de la celda desarrollada.

El resto del artículo está organizado de como sigue: la sección 2 describe el planteamiento del problema resuelto, y las consideraciones correspondientes. El desarrollo experimental de la celda se describe en la Sección 3, mientras que la evaluación experimental se exponen en la Sección 4. Finalmente, las conclusiones y observaciones finales se proporcionan en la Sección 5.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Derivado de que el sistema de envasado, llenado, tapado y etiquetado es ampliamente utilizado en plantas de alimentos y bebidas, plantas farmacéuticas, de productos para el cuidado del cuerpo, de productos de limpieza, plantas químicas, etc. En este trabajo se construye y emula una celda de este proceso de manufactura a partir de un prototipo didáctico a escala.

3. DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE CELDA DE MANUFACTURA

En esta sección se presenta el diseño y construcción del prototipo académico que emula el llenado, embazado y etiquetado de un producto líquido, con aplicaciones industriales diversas.

3.1 Diseño y construcción del prototipo

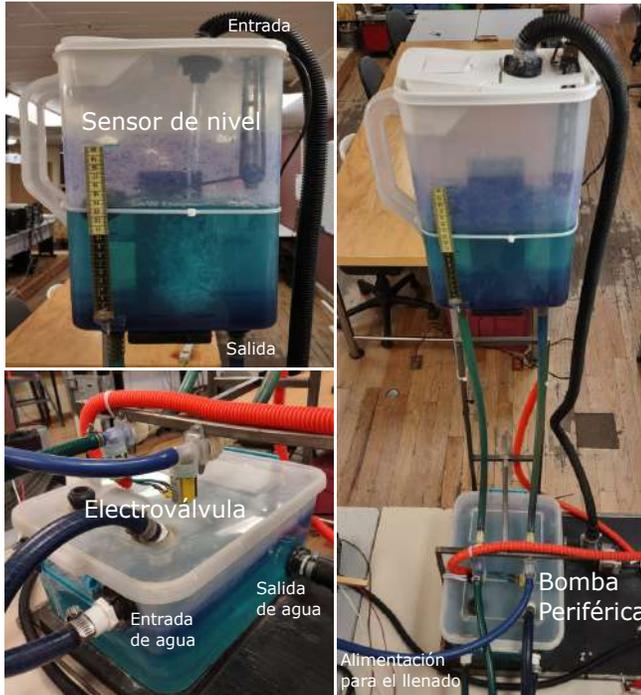
La celda de envasado, llenado, tapado y etiquetado consta de un concentrador de señales provenientes de sensores y actuadores que, mediante un controlador lógico programable de la marca Simens modelo S7-300 son analizadas y determinan las acciones correspondientes para lograr un objetivo final y desempeño deseado de la planta. Este modelo utiliza un sistema de control interconectado para lograr la automatización con actuadores y sensores del tipo industrial, dando como resultado un proceso eficiente. Note que, el PLC S7-300 cuenta con un CPU 313C-2DP con 16 entradas y 16 salidas, y un módulo de entradas analógicas SM331 AI 2 × 12 bits. El PLC fue programado mediante el software de TIA PORTAL versión 17 en la modalidad de prueba.

Por otro lado, el diseño de la celda considera la integración de dos contenedores, uno como depósito de abastecimiento de líquido, mientras que el otro es usado para el llenado de botellas, debidamente equipado con electroválvulas para realizar esta tarea. Este último contempla un sensor de nivel a partir de un potenciómetro y un circuito de acondicionamiento electrónico para obtener la señal normaliza de $[0 - 10]V$, como se ilustra en la Figura. 1. En el caso de las válvulas empleadas se encuentran las de tipo terminal modelo VMPA-KMS1-8-2.5, 2 válvulas 5/2 vías biestables, las cuales se alimentan a 24 VCD con una presión de funcionamiento entre $-0,09 \dots +1$ MPa. Ambas de la marca Festo.

Por otro lado el prototipo de celda contempla el diseño de una banda transportadora reversible, la cual esta debidamente instrumentada para llevar a cabo diferentes acciones durante su recorrido, como son el llenado, revisión de nivel, colocación de tapas, y etiquetado. Los demás elementos que participan en el diseño de la celda son descritos en la Tabla 1,

En cuanto a la construcción del prototipo experimental, éste se llevo a cabo en diferentes etapas durante 2

Contenedor secundario (2)



Contenedor primario (1)

Fig. 1. Instrumentación de los contenedores

meses hasta su puesta en marcha. Inicialmente, los 2 contenedores fueron adquiridos luego de consultar precios en el mercado. La solución más rápida y sencilla fue comprar aditamentos comerciales de fácil acceso y de bajo costo para adaptarlos como contenedores. Estos a su vez fueron instrumentados, por ejemplo, uno de los contenedores fue equipado con 2 tuberías (una para llenado y la otra para distribución), dos electroválvulas (una para llenado y la otra para el vaciado del tanque de distribución) y una bomba de agua periférica para enviar el líquido al segundo contenedor de llenado. Este último está instrumentado con un electrónivel equipado con un potenciómetro lineal de 10 k Ω y un circuito acondicionador para obtener una señal normalizada de [0–10] V que se usa como señal analógica en el PLC. Mediante un escalamiento de variable se determinó los niveles mínimos y máximo requeridos para que el sistema de llenado funcione correctamente, evitando que el líquido se derrame

Tabla 1. Elementos que constituyen el prototipo experimental

Tanque de almacenamiento primario
Contenedor de líquido para llenado
Electroválvulas de paso
Tuberías de distribución y llenado
Banda transportadora
Sensores
Controlador Lógico Programable (PLC)
Fuente de alimentación
Actuadores

ante un sobre nivel o que las botellas no se llenen debido a la falta de líquido en el segundo contenedor.

En una segunda etapa se construyó la banda transportadora a partir de materiales como paneles de fibra de madera (MDF por sus siglas en inglés) de 2 cm de grosor, con dimensión de 120 cm de largo por 40 cm de ancho. La banda empleada está fabricada de hule anti derrapante comercial con ancho de 40 cm. El accionamiento de ésta se logra a través de un motor de corriente continua a 12V con reductor de velocidad (caja de engranes) para brindar mayor par. La transmisión de movimiento entre el motor y la banda transportadora se realiza mediante una cadena 3/32" con paso de 1/2", acompañada de sus respectivas catarinas. Es importante señalar que, dado que las salidas digitales del PCL poseen poca corriente, insuficiente para activar el motor, se diseñó y construyó un circuito de etapa de potencia para realizar el accionamiento, basado en transistores y accionamiento con relé de 24V de corriente continua. Adicionalmente, para lograr el cambio de giro de la banda, se incorporó un módulo de CI puente H drive L298, como se presenta en la figura 2. De manera que la banda transportadora puede ser controlada en la dirección de giro a través de la activación de los 2 relés por medio de las salidas digitales a 24 V del PLC. Sin embargo, el voltaje se reduce de 24V a 5V mediante relés para la activación del puente H.

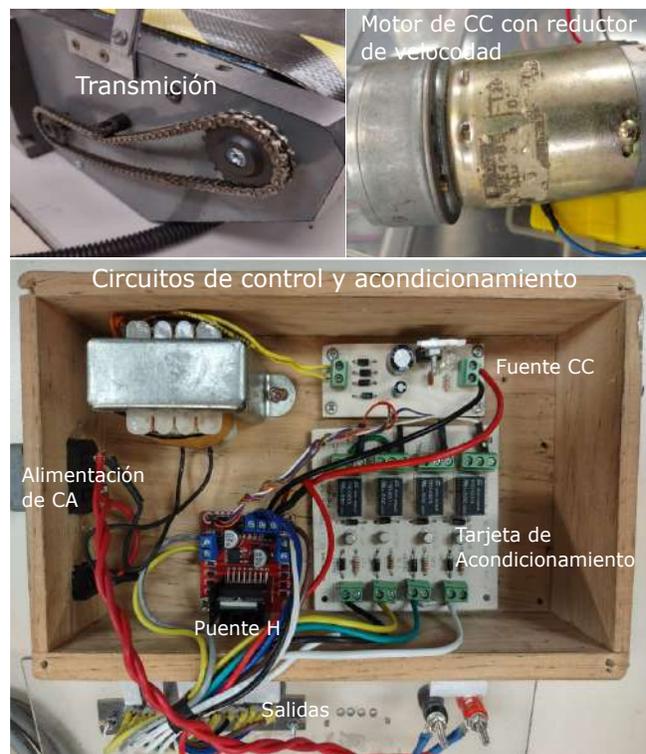


Fig. 2. Circuitos de acondicionamiento y control para la banda transportadora

Finalmente, una vez construido el prototipo experimental se procedió a la instrumentación e instalación de un tablero de control y una caja de luces indicadoras. Por ejemplo, en la figura 3 se presentan los sensores empleados en la banda transportadora, mientras que en la figura 4 se ilustran los actuadores.

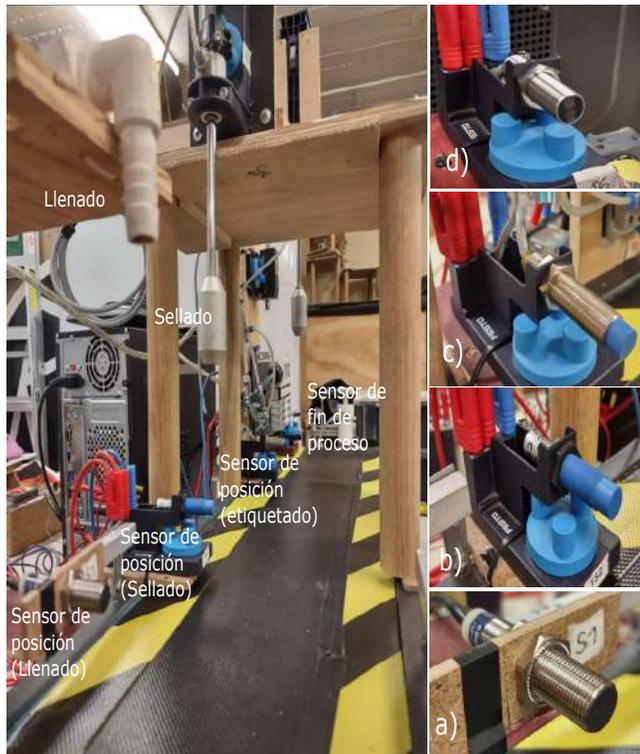


Fig. 3. Instrumentación y equipado de la banda transportadora: a) Sensor de efecto Hall, b) Sensor capacitivo, c) Sensor inductivo, d) Sensor de luz

El resto de los componentes instalados en la banda transportadora para emular la celda son especificados en la Tabla 2. Toda esa información es concentrada y analizada a través del PLC, con el objetivo de realizar las tareas a fin de cumplir con el correcto funcionamiento de llenado, embazado y etiquetado. Es importante señalar que Siemens es una marca mundialmente reconocida a nivel industrial, y por lo tanto se busca que, el conocimiento académico adquirido por los estudiantes trascienda al mundo laboral empleando elementos industriales de campo. En la figura 5 se puede apreciar el panel de control empleado para la operación del sistema automatizado, el módulo así como el PLC empleado, mientras que en la figura 6 se puede apreciar una parte del programa escalera.

4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación experimental del prototipo de celda de manufactura desarrollada (ver figura 7), localizado en el Laboratorio de Robótica (LIIDET) perteneciente a la Academia de

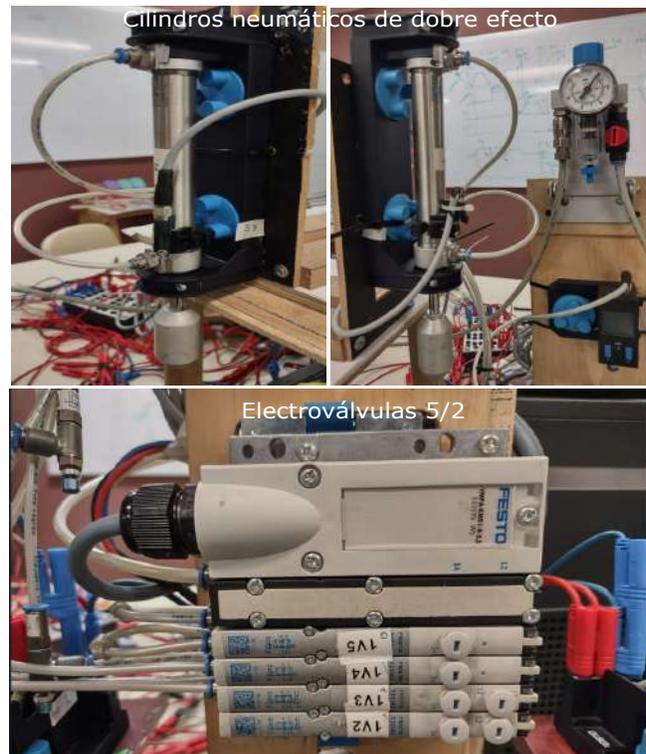


Fig. 4. Instalación neumática



Fig. 5. Tablero de control, indicadores del proceso y PLC S7-300

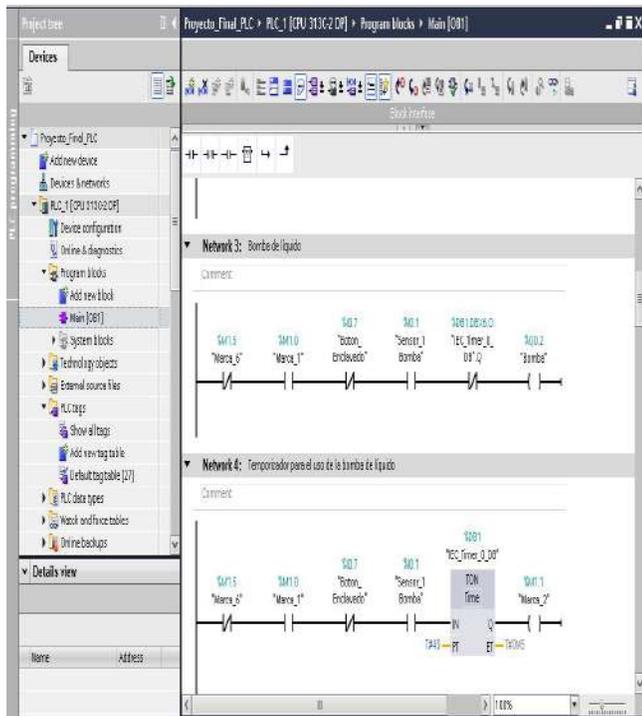


Fig. 6. Programación escalera (Ladder)

Ingeniería en Sistemas electrónicos Industriales de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, plantel Casa

Tabla 2. Componentes instalados en el prototipo experimental

No.	Salidas
2	Cilindros de doble efecto marca Festo
2	Electroválvulas 5/2 marca Festo
5	Pilotos marca Festo
1	Motor de corriente continua (CC)
1	Bomba periférica de corriente alterna (CA)
2	Electroválvulas
No.	Entradas
1	Sensor de nivel
1	Sensor inductivo
1	Sensor óptico
1	Sensor capacitivo
1	Sensor de fin de carrera
1	Pulsador de arranque
1	Pulsador de paro
1	Pulsador de paro de emergencia
No.	Otros elementos
1	PLC modelo S7-300 de Siemens con CPU 313C-2DP
16	Entradas digitales (16 DI/16 DO)
16	Salidas digitales
1	Módulo de entradas Digitales, PLC S300
1	Módulo de salidas Digitales, PLC S300
1	Módulo de entradas Analógicas SM331 AI 2 x 12 bits
1	Fuente de 24V, 3A
1	Fuente de dos voltajes: 12V a 1A y 5V a 0.5A
1	Módulo puente HL298D
1	Circuito de acondicionamiento de 12V a 10V

Libertad.

La meta fue implementar una línea de llenado, embazado y etiquetado en un prototipo de celda de manufactura. Para ello, se deben que cumplir las siguientes tareas:

- Se inicia el proceso a través del pulsador **start**, se debe corroborar que el nivel del contenedor secundario sea el indicado, en caso contrario se debe accionar la bomba del contenedor primario hasta llenar al secundario a su nivel máximo.
- Una vez asegurado el punto anterior, se activa la banda transportadora hasta llegar a la primera unidad de sensado, para comenzar el proceso de llenado. Durante este tiempo la banda es detenida.
- Una vez completado el llenado y verificado los niveles, el PLC acciona nuevamente la banda hasta llegar a la sección de tapado y roscado, donde la banda se detiene durante un segundo simulando este proceso.
- Enseguida, se reactiva la banda transportadora y pasa a la sección de etiquetado.
- Una vez terminada esta secuencia, el producto final es enviado a otra parte del proceso.

Para llevar a cabo esta tarea, se implementó la metodología con base en un gráfico funcional controlador por etapas y transiciones (GRAFCET por sus siglas en Inglés), resultando un total de 8 estados, los cuales posteriormente fueron programas en el PLC mediante el lenguaje escalera (Ladder). La figura 8 representa el diagrama de fase-tiempo, donde se describe la forma de operar de cada uno de los actuadores derivado de las etapas y condiciones del proceso a partir de la información obtenida por los diferentes sensores.

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha desarrollado un plataforma académica para la enseñanza de la automatización de procesos industriales que emula una celda de llenado, embazado y etiquetado de productos líquidos, con diversas aplicaciones. La instrumentación de la plataforma se llevó a cabo mediante sensores de proximidad industriales y actuadores la marca FESTO, como son cilindros neumáticos y electroválvulas. La programación del proceso de llevó a cabo mediante el lenguaje escalera empleando lo metodología GRAFCET para sistemas secuenciales. Luego de ejecutar el programa, se puede corroborar que este es robusto a perturbaciones externas, cuando aleatoriamente se perturban a los diferente sensores de proximidad. El proceso continua con su secuencia programada pesar de estás acciones, lo que resulta una programación robusta y confiable. Derivado del PLC empleado, los estudiantes han empleado el software industrial TIA PORTAL, el cual puede ser extrapolado para programar los PLCs S7-1200 y PLCs S7-1500.

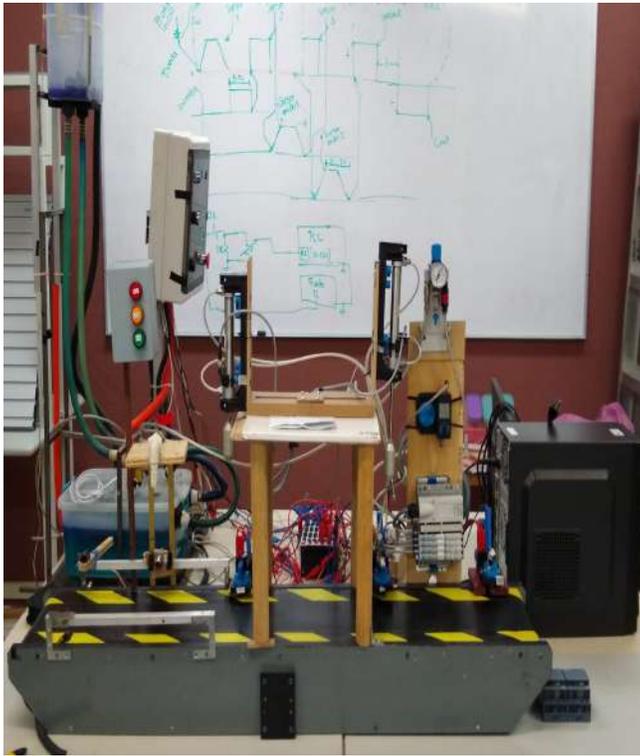


Fig. 7. Prototipo de la celda de manufactura desarrollada

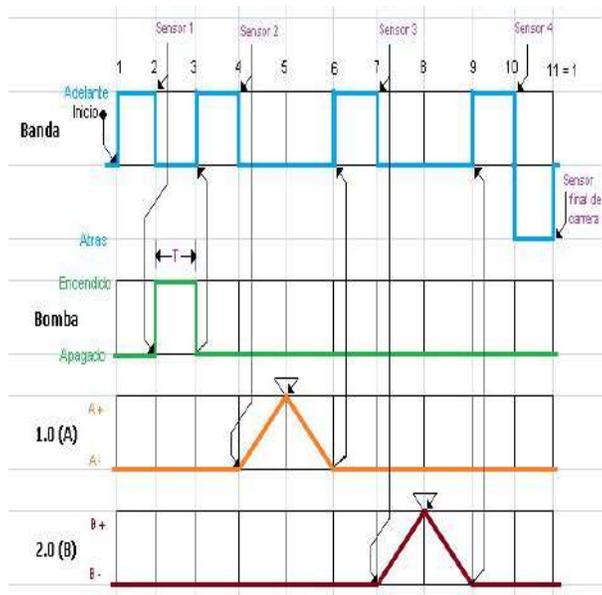


Fig. 8. Diagrama de espacio-fase

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Colegio de Ciencia y Tecnología de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por el apoyo otorgado para llevar a cabo esta investigación, la cual fue patrocinada por los proyectos UACM CCYT-2023-INI-02 y UACM CCYT-

2023-INI-01. Los autores también agradecen el apoyo de los estudiantes Arely Castillo y Carlos Jiménez por su ayuda en las pruebas de laboratorio.

REFERENCES

- Chaves Palacios, J. (2004). Desarrollo tecnológico en la primera revolución industrial.
- Hermann, M., Pentek, T., and Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*, 3928–3937. IEEE.
- Maloney, T.J. (2006). *Electrónica industrial moderna*. Pearson Educación.
- Moreno, E.G. (2001). *Automatización de procesos industriales*. Alfaomega Valencia.
- Morrar, R., Arman, H., and Mousa, S. (2017). The fourth industrial revolution (industry 4.0): A social innovation perspective. *Technology innovation management review*, 7(11), 12–20.
- Woodcroft, B. (1851). The pneumatics of hero of alexandria. *The Pneumatics of Hero of Alexandria Publisher: TAYLOR WALTON AND MABERLY*.
- Xu, L.D., Xu, E.L., and Li, L. (2018a). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International journal of production research*, 56(8), 2941–2962.
- Xu, M., David, J.M., Kim, S.H., et al. (2018b). The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges. *International journal of financial research*, 9(2), 90–95.
- Zuehlke, D. (2010). Smartfactory—towards a factory-of-things. *Annual reviews in control*, 34(1), 129–138.