

Implementación de métodos de solución para procesos secuenciales por medio de funciones lógicas en sistemas programables

1st Torres Edgar

*División de ingeniería mecatrónica
Instituto Tecnológico Superior de San
Luis Potosí
San Luis Potosí, México
edgar.torres@tecsuperiorslp.edu.mx*

2nd Rangel Gabriela

*División de ingeniería mecatrónica
Instituto Tecnológico Superior de San
Luis Potosí
San Luis Potosí, México
gabriela.rangel@tecsuperiorslp.edu.mx*

3rd Flores Efrén

*Departamento de ingeniería eléctrica,
electrónica y mecatrónica
Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
San Luis Potosí, México
efren.fg@slp.tecnm.mx*

4th Luna Uriel

*División de ingeniería mecatrónica
Instituto Tecnológico Superior de San
Luis Potosí
San Luis Potosí, México
L21350302@slpotosicapital.tecnm.mx*

5th Ávila Martín

*División de ingeniería mecatrónica
Instituto Tecnológico Superior de San
Luis Potosí
San Luis Potosí, México
avilamartineztaдео@gmail.com*

6th Aguilar Jahir

*División de ingeniería mecatrónica
Instituto Tecnológico Superior de San
Luis Potosí
San Luis Potosí, México
121350267@slpotosicapital.tecnm.mx*

Abstract—Actualmente, las empresas del sector industrial demandan personal especializado capaz de generar análisis críticos y que les permita tomar decisiones para poder diseñar e implementar soluciones y atender las necesidades de los automatismos industriales. Las instituciones educativas de nivel superior y medio superior cuyos planes de estudio cuentan con enfoque de automatización, son los encargados de proveer a sus estudiantes de las competencias mínimas indispensables que les permitan afrontar estos retos mediante estrategias de aprendizaje basadas en esquemas teórico práctico. En este artículo se exponen algunas de las principales metodologías utilizadas para la resolución de problemas secuenciales, enfocados a procesos que involucran actuadores neumáticos y/o hidráulicos, usando planteamientos de ecuaciones lógicas estandarizadas que permitan su implementación en diversos dispositivos programables o software, tales como: PLC's, microcontroladores, y LabVIEW, usando su lenguaje nativo.

Keywords—Automatismo, secuencial, ecuaciones lógicas, dispositivos programables

I. INTRODUCCIÓN

En el sector industrial la mayoría de los procesos automatizados basan su funcionamiento en una serie de secuencias ordenadas ejecutadas por diferentes actuadores como pueden ser cilindros, motores, lámparas, etc. Estas secuencias se generan para satisfacer las necesidades de funcionamiento del sistema o proceso [1].

Generalmente los ingenieros encargados de automatizar estos procesos, carecen de metodologías bien establecidas que les permita dar solución de una manera sistematizada, en la mayoría de los casos, se resuelven estos problemas aplicando métodos intuitivos basados en procedimientos empíricos.

Esto puede generar problemas cuando el sistema requiere cambios en el proceso o el producto, ya que, al carecer de una metodología para automatizar el proceso, provoca que el sistema tenga que ser analizado e implementado nuevamente desde cero. Ocasionando paros en el proceso, generando pérdidas económicas a causa de tiempos muertos.

Por otra parte, las instituciones educativas de nivel medio superior y superior, son las encargadas de proporcionar a sus estudiantes las competencias necesarias, para que sean capaces de generar un sentido crítico que permita analizar los requerimientos y necesidades de los procesos automatizados y les permita crear soluciones a estas aplicaciones.

Existen diferentes técnicas o metodologías utilizadas para analizar y automatizar sistemas secuenciales, estas están basadas en una serie de pasos que al seguirlos garantiza el funcionamiento adecuado del proceso, de acuerdo a las necesidades del mismo [2].

Algunas de las técnicas más utilizadas, son el método paso a paso mínimo, máximo, cascada, GRAFCET y máquinas de estados finitos, solo por mencionar algunas. Cada una de ellas tienen sus características particulares, y generalmente son aplicadas a dispositivos programables como PLC's, [3].

En este trabajo se aborda el uso de la metodología paso a paso mínima aplicada para dar solución a un sistema industrial, cuyos actuadores son del tipo neumáticos, y realizan una secuencia de movimientos para dar cumplimiento a las necesidades del proceso. La aplicación de esta metodología, está basada en ecuaciones lógicas básicas, las cuales permitirán a partir de un mismo análisis realizar su adaptación a diferentes sistemas programables.

En la sección II inciso A, se explicará como implementar la metodología paso a paso a un sistema electroneumático con funciones lógicas básicas. Posteriormente en el inciso B, se realiza la aplicación de esta metodología a un sistema industrial común, con ayuda del software FluidSim para la elaboración de los diagramas. En el inciso C, se aplica la solución al sistema descrito en el inciso anterior usando como herramienta de simulación para validar el resultado, el software de Factory I/O, y su complemento Control I/O. En la sección D se emplean las mismas ecuaciones, pero para su comprobación se genera una conexión por medio de un servidor OPC para conectar el software de LabVIEW y validar el resultado. Finalmente, en el

II. ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA

A. Metodología paso a paso

La metodología expuesta en este documento es del tipo cualitativo, está consiste en una serie de pasos que dan solución a un sistema. Para analizar en este documento, se propone aplicar la metodología a sistemas secuenciales neumáticos. los pasos a seguir para la metodología paso a paso son los siguientes [4-11]:

1. Determinar cuántos actuadores hay en el proceso y nombrarlos con letras mayúsculas o números consecutivos.
2. Establecer el orden y la secuencia de operaciones que se realizan en el proceso, de acuerdo al plano de situación.
3. Realizar el diagrama espacio fase.
4. Obtener la ecuación de movimiento, indicando el nombre del actuador acompañado de un signo (+) cuando se trata de un avance y de un signo (-) cuando se trata de un retroceso.
5. Agrupar la ecuación de movimiento en un mínimo de tres grupos.
6. Asegurar que los grupos incluyan la mayor cantidad de movimientos
7. La única restricción que se debe considerar es que, dentro de un grupo, no se debe repetir movimiento de un mismo actuador. Es decir, el grupo puede contener n movimientos de n cilindros, pero no puede tener movimiento de avance y retroceso de un mismo cilindro.
8. Considerar un par de sensores finales de carrera para cada cilindro, tanto para detectar el avance (+) y retroceso (-) del vástago, etiquetarlo con la letra "S", estos sensores se van a numerar de forma consecutiva.
9. Para el diagrama neumático y/o hidráulico, si los cilindros son de doble efecto, considerar electroválvulas de control 5/2 y/o 4/2, si son de simple efecto usar válvulas 3/2, para cada uno de ellos, y nombrar el solenoide con la letra "Y", continuar una numeración consecutiva.
10. Dentro de la ecuación de movimientos, asignar los sensores finales de carrera, considerando que son los elementos que dan origen a generar los movimientos y los cambios de grupo. Tomar en cuenta lo siguiente:

Los sensores finales de carrera que realizan el cambio de grupo se ubican sobre las líneas verticales que separan cada grupo en la ecuación.

- a. Los sensores que generan movimiento dentro de un grupo, se ubican en la parte inferior y/o superior de la ecuación de movimiento.
- b. El sensor final de carrera que cicla la secuencia, es el que se ubica en la parte inferior de toda la ecuación de movimientos.

11. Considerar que los grupos dentro de la ecuación serán etiquetados con la letra K y tendrán una numeración consecutiva.

12. La nomenclatura que se utilizará para identificar, los elementos usados en el planteamiento de las ecuaciones se concentran en la tabla 1.

TABLE I. NOMENCLATURA UTILIZADA EN LAS ECUACIONES

Nombre	Nomenclatura
Sensor final de carrera que cambia de grupo	FC
Sensor final de carrera que genera el movimiento	FCM
Grupo Anterior	GAnt
Grupo Actual	GAct
Grupo Siguiente	GSig
Grupo 0	K0
Salida	Y
Botón Inicio	BInicio
Botón Paro	BP

13. Para la implementación del sistema de control se proponen dos ecuaciones bases:

$$K0 = [BInicio + K0] * (\overline{BS}) \quad (1)$$

La ecuación (1), es la que se encarga de realizar el proceso de puesta en marcha y frenado del sistema.

La ecuación (2), tiene como finalidad realizar los cambios de grupo, y esta se debe de replicar tantas veces como grupos se tenga en el paso cinco:

$$GAct = [(FC * GAnt) + GAct] * (\overline{GSig}) \quad (2)$$

En la etapa de potencia, que es donde se generan los movimientos de los actuadores, se proponen dos ecuaciones, la ecuación (3), es la que se utilizará siempre en el primer movimiento de cada grupo.

$$Y = GAct \quad (3)$$

Para cada uno de los movimientos secundarios que se realizan en cada grupo, la ecuación a utilizar, es el número (4).

$$Y = GAct * FCM \quad (4)$$

B. Aplicación del método paso a paso a un sistema industrial

Una forma de entender el procedimiento es aplicar esta técnica en un caso típico del sector industrial, el cual consiste en automatizar el siguiente proceso mostrado en la figura 1[12].

En el paso número 11, especifica que debe realizarse la asignación de la etiqueta K a cada uno de los grupos y darle una numeración consecutiva, para este caso que son tres grupos, las etiquetas serían K1, K2 y K3.

Para el paso 12 se establece la nomenclatura que se utilizará en las ecuaciones.

Finalmente, en el paso 13, se procede a realizar el planteamiento de las ecuaciones que serán utilizadas para automatizar el proceso mediante los dispositivos mencionados anteriormente en la introducción de este documento.

Para la puesta en marcha y freno del sistema, la ecuación que se utilizará es el número (1), para la etapa de control se plantearán 3 ecuaciones porque son 3 grupos, cada una de ellas está basada en la ecuación número (2).

La primera ecuación que se plantea es la que genera el cambio del grupo I al grupo II, esta quedaría expresada de la siguiente manera:

$$K1 = [(S2 * K0) + K1] * \overline{K2} \quad (8)$$

La segunda ecuación a utilizar será la encargada de realizar el cambio del grupo II al grupo III, el planteamiento de esta ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$K2 = [(S1 * K1) + K2] * \overline{K3} \quad (9)$$

La última ecuación de la etapa de control es el número (10), esta se encargará de realizar el cambio del grupo III al grupo I.

$$K3 = [(S5 * K2) + K3] * \overline{K1} \quad (10)$$

Una vez que se plantearon las ecuaciones para la etapa de control se procede a realizar el planteamiento de las ecuaciones de la etapa de potencia, recordando que en esta etapa es donde se generan los movimientos de los actuadores, cuando el movimiento es el primero del grupo, como es el caso de A+, A- y C-, se utiliza como referencia la ecuación (3), para el caso del primer y único movimiento del grupo I, la ecuación es la siguiente:

$$Y0 = K1 \quad (11)$$

Para el primer movimiento del grupo II, que es el retroceso del cilindro A, la ecuación que representa este movimiento es el número (12).

$$Y1 = K2 \quad (12)$$

Para representar el primer movimiento del grupo III, que es el retroceso del cilindro C, se tiene lo siguiente:

$$Y5 = K3 \quad (13)$$

Las próximas 3 ecuaciones que se plantean, representan los movimientos secundarios del grupo II y III, estas ecuaciones se basan en la ecuación (4). Para expresar el movimiento positivo del actuador B, su ecuación es la siguiente:

$$Y2 = K2 * S0 \quad (14)$$

Para expresar el último movimiento secundario del grupo 2, se tiene la siguiente ecuación.

$$Y4 = K2 * S3 \quad (15)$$

Finalmente, la última ecuación que se plantea, es la encargada de generar el movimiento secundario del grupo III, correspondiente al retroceso del cilindro B.

$$Y3 = K3 * S4 \quad (16)$$

C. Implementación de las ecuaciones obtenidas del método paso a paso aplicados con Control I/O de Factory I/O

Para poder validar que el planteamiento de las ecuaciones es correcto, se utiliza el software de Factory I/O, creando una escena que contiene los 3 cilindros de doble efecto, recordar, que esta escena es solo demostrativa, no es una simulación idéntica del proceso mostrado en el plano de situación planteado en la figura 1.

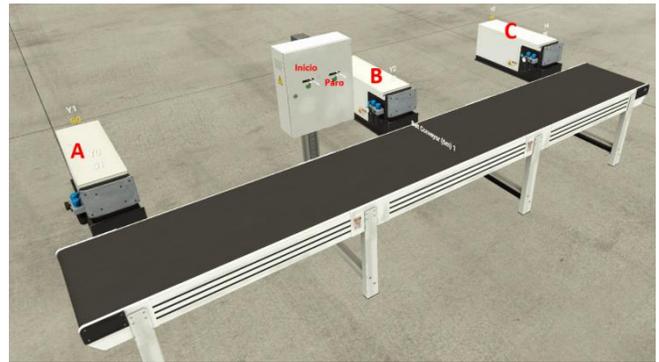


Fig. 5. Escena en el software de Factory IO.

Una vez que se concluye con la creación de la escena propuesta en el software de Factory, se realiza la implementación de las ecuaciones tanto de la etapa de potencia como la etapa de control, en la herramienta de Control I/O, la implementación de estas ecuaciones se muestra en la figura 6 y 7.

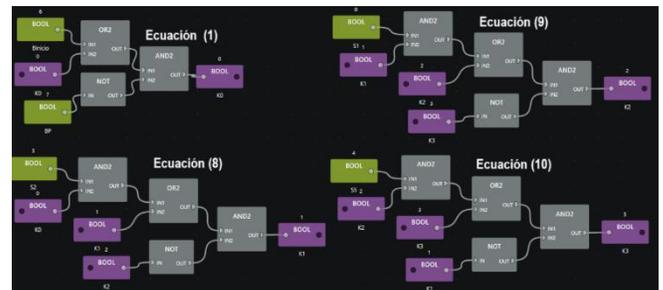


Fig. 6. Ecuaciones de la etapa de control en el software Control IO.



Fig. 7. Ecuaciones de la etapa de control en el software Control IO.

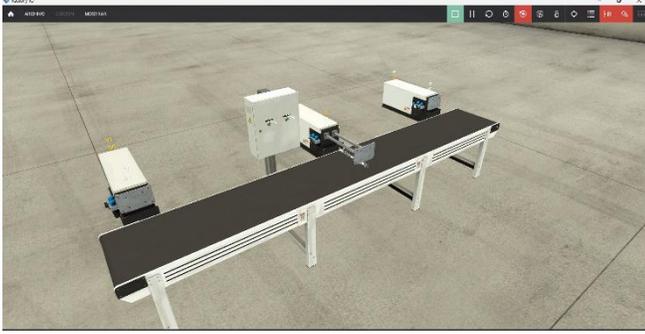


Fig. 8. Simulación del sistema movimiento de C+.

La figura 8 muestra la simulación del sistema donde se genera el movimiento de avance del cilindro C. La simulación del sistema completo, se muestra en el siguiente [enlace](#).

D. Implementación de las ecuaciones obtenidas del método paso a paso aplicados con LabVIEW y Factory I/O

Para continuar con la validación de estas ecuaciones, se implementarán en el software de LabVIEW, reutilizando la escena propuesta en la figura 5, realizada en Factory I/O.

Para realizar la comunicación entre ambos software se establece una conexión por medio de un servidor OPC. Las ecuaciones implementadas se muestran en el siguiente diagrama de bloques [13-14]:

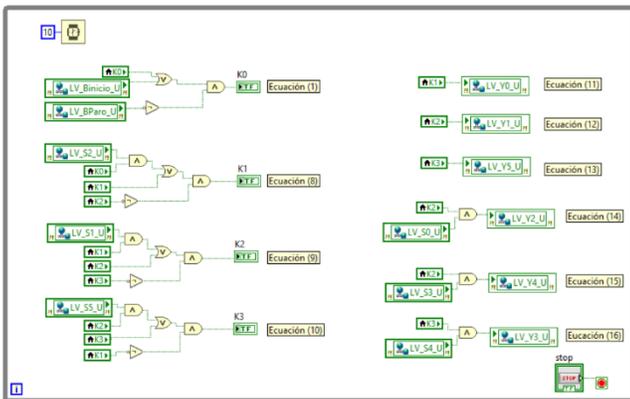


Fig. 9. Planteamiento de ecuaciones en LabVIEW.

Como se puede apreciar, las herramientas utilizadas en LabVIEW para expresar estas ecuaciones, se encuentran disponibles en la paleta de funciones lógicas, y corresponden a las funciones (AND, OR y NOT).

Una vez que se crearon las ecuaciones, y que se realizó la configuración del servidor, se procede a realizar la simulación, esta se muestra en la figura 10. El video con la simulación completa está disponible en el siguiente [link](#).

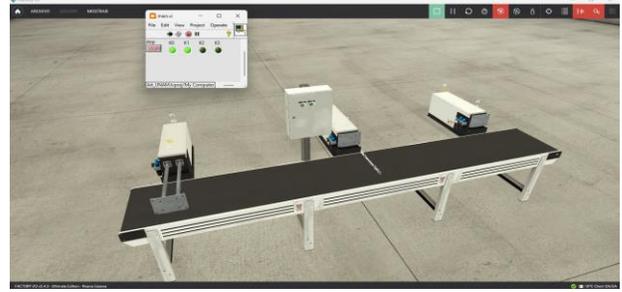


Fig. 10. Simulación con LabVIEW y Factory IO.

E. Código para implementar las ecuaciones obtenidas del método paso a paso aplicadas con arduino

El lenguaje de programación C++, es la base de la plataforma de Arduino, conociendo la sintaxis de este, se puede verificar, que se cuenta con los operadores lógicos necesarios para implementar las ecuaciones propuestas en este documento, para dar la solución al sistema planteado en la figura 1.

Recordar que Arduino divide sus programas en dos funciones principales, *void main* y *void setup*. En la función *void setup*, es donde se definen los pines físicos de la tarjeta que serán utilizados para conectar los sensores y actuadores utilizados en este sistema.

Comentando lo anterior, para este documento se omite la explicación de la configuración de los pines físicos, así como la explicación de la declaratoria de variables, si se desea acceder al código completo, este está disponible en el siguiente [Link](#).

Dentro de la función *Void Main*, es donde se genera el código principal, al igual que en los otros sistemas, primero se programan las ecuaciones encargadas del control, estas líneas de código que representan esta etapa, son mostradas en la figura 11.

```

47 //*****Grupo 0*****
48 if( ((BInicio==HIGH || k0==HIGH) && (BParo==!HIGH) )
49 {
50   k0=HIGH;
51 }
52 else
53 {
54   k0=LOW;
55 }
56 //*****Grupo 1*****
57 if( ((s2==HIGH && k0==HIGH) || (k1==HIGH)) && (k2==!HIGH) )
58 {
59   k1=HIGH;
60 }
61 else
62 {
63   k1=LOW;
64 }
65 //*****Grupo 2*****
66 if( ((s1==HIGH && k1==HIGH) || (k2==HIGH)) && (k3==!HIGH) )
67 {
68   k2=HIGH;
69 }
70 else
71 {
72   k2=LOW;
73 }
74 //*****Grupo 3*****
75 if( ((s5==HIGH && k2==HIGH) || (k3==HIGH)) && (k4==!HIGH) )
76 {
77   k3=HIGH;
78 }
79 else
80 {
81   k3=LOW;
82 }
83
84

```

Fig. 11. Ecuaciones de la etapa de control, programadas para arduino.

La etapa de potencia, está formada por las ecuaciones del número (11) al número (16), estas ecuaciones son planteadas en la figura 12.

```

86 //*****Actualizas las salidas*****
87 if(k1==HIGH)
88 {
89   digitalWrite(10,HIGH);//y0
90 }
91 else
92 {
93   digitalWrite(10,LOW);//y0
94 }
95 if(k2==HIGH)
96 {
97   digitalWrite(11,HIGH);//y1
98 }
99 else
100 {
101   digitalWrite(11,LOW);//y1
102 }
103 if(k3==HIGH)
104 {
105   digitalWrite(15,HIGH);//y5
106 }
107 else
108 {
109   digitalWrite(15,LOW);//y5
110 }
111 if( (k2==HIGH) && (s0==HIGH))
112 {
113   digitalWrite(12,HIGH);//y2
114 }
115 else
116 {
117   digitalWrite(12,LOW);//y2
118 }
119 if( (k2==HIGH) && (s3==HIGH))
120 {
121   digitalWrite(14,HIGH);//y4
122 }
123 else
124 {
125   digitalWrite(14,LOW);//y4
126 }
127 if ( (k3==HIGH) && (s4==HIGH))
128 {
129   digitalWrite(13,HIGH);//y3
130 }
131 else
132 {
133   digitalWrite(13,LOW);//y3
134 }

```

Fig. 12. Ecuaciones de la etapa de potencia, programadas para arduino.

Como se puede apreciar, el planteamiento de las 10 ecuaciones propuestas para dar solución a este sistema, son fáciles de aplicar en cualquier dispositivo programable.

III. RESULTADOS

Al culminar el presente trabajo se puede verificar la metodología paso a paso, al obtener ecuaciones equivalentes usando funciones lógicas. Estas ecuaciones son sencillas de implementar en diferentes tipos de sistemas programables, para este caso la validación se realizó con Control I/O de Factory I/O y usando el software de LabVIEW, verificando que su funcionamiento presentando en ambos sistemas programables es el mismo resultado de acuerdo a las especificaciones de funcionamiento del sistema, y lo más importante, es que solo se requirió un solo análisis.

Adicional se presenta una propuesta de código para la tarjeta Arduino, su implementación es sencilla, pues el lenguaje nativo de este microcontrolador, cuenta con los operadores lógicos básicos, con los cuales se puede realizar la adaptación sin mayor complicación.

IV. CONCLUSIONES

En el marco de esta investigación se puede apreciar que la metodología paso a paso facilita la implementación de sistemas

Artificial (CIMCIA), UNAM, FESC, Estado de México, 2024 secuenciales de actuadores neumáticos y/o hidráulicos. Esto permite abordar aplicaciones industriales que cuenten con estas características aplicando este mismo análisis, permitiendo una forma estandarizada de dar solución, pero con la posibilidad de ampliarlo a diferentes dispositivos programables. Debido a que todos los lenguajes de programación tienen dentro de sus instrucciones los operadores lógicos, se facilita la implementación de una ecuación estándar de manera sencilla siguiendo los pasos expuestos en este trabajo.

Este método fue el que se seleccionó para realizar la adaptación, pero esto es la base para poder adaptar alguna otra herramienta como la metodología cascada, máquinas de estado finito, etc. Cabe resaltar que estos métodos de manera teórica son aplicados principalmente a secuencias con actuadores neumáticos y/o hidráulicos, pero no son exclusivas únicamente a estos procesos, ya que la metodología puede migrar a otro tipo de aplicaciones.

En la actualidad, la industria 4.0 demanda el uso de nuevas tecnologías, como el internet industrial de las cosas, inteligencia artificial y el blockchain, solo por mencionar algunas de estas nuevas tendencias.

Tomando en cuenta el blockchain se puede trabajar en desarrollar una nueva línea de investigación basada en sistemas o procesos autónomos implementando las bases del método cascada para facilitar la coordinación y la toma de decisiones en tiempo real.

REFERENCIAS

- [1] S. S. P. y. H. R. Brunete A., *Introducción a la automatización industrial*, Madrid: Bookdown, 2024.
- [2] A. N. G. J. G. C. Juan Escaño González, *Integración de sistemas de automatización industrial*, Paraninfo, 2019.
- [3] B. M. y. G. J., «Metodologías para diseño de circuitos ladder con base en sistemas secuenciales y combinacionales,» Programa de ingeniería eléctrica, pp. 98-110, 2010.
- [4] O. V. Sepúlveda, «Desarrollo e implementación de circuitos de mandos electroneumáticos utilizando un controlador lógico programable integral en el entorno de las prácticas industriales,» 2020.
- [5] A. J. G. L. Guerrero A., «Solución de secuencias neumáticas aplicando el uso del diagrama de espacio fase empleando el método intuitivo,» *Innovación y desarrollo tecnológico*, pp. 109-118, 2018.
- [6] M. J. M. F. Mendoza J., «Aplicación del método paso a paso en la solución de problemas de electroneumática,» *Scientia Et Technica*, pp. 313-317, 2011.
- [7] C. J. y. M. J. Muriel J., «Aplicación de métodos secuenciales en la solución de problemas de electroneumática,» *Scientia et Technica Año XV*, pp. 193-198, 2009.
- [8] D. J., «Aplicación del método cascada al diseño de circuitos electroneumáticos,» *Revista Arista Digital*, pp. 53-71, 2010.
- [9] J. C. C. Martín, *Sistemas Secuenciales Programables*, Editéx, 2021.
- [10] Z. R. y. B. J. Páez H., «Programación de Controladores Lógicos (PLC) mediante ladder y lenguaje de Control Estructurado (SCL) en MATLAB,» *Revista facultad de ingeniería*, pp. 109-119, 2015.
- [11] J. B. C. Carlos B. Macías Reyes, «Análisis comparativo de controles Neumáticos y Electroneumáticos en diferentes tipos de secuencias,» *Revista Científica Multidisciplinar G-ner@ndo*, vol. 4, n° 2, p. 54, 2023.
- [12] H.R. (1991) *Colección de ejercicios con soluciones nivel avanzado*. Alemania: Festo.
- [13] C. A., *Simulación y control de procesos por ordenador*, España: Marcombo, 2007.
- [14] C. L. d. A. C. M. C. S. Alejandra Santoyo Sanchez, «SecuenciaLab:Laboratorio de simulación para entrenamiento en manejo

