

Implementación del gemelo digital de un proceso secuencial electroneumático

Matias Iglesias-Rios * Hoover Mujica-Ortega **

* Facultad de Ingeniería - UNAM, División de Ingeniería Mecánica e Industrial, C.U., 04510, México CDMX e-mail: matias.iglesias.rios@gmail.com

** Facultad de Ingeniería - UNAM, Departamento de Control y Robótica, Lab. Automatización, C.U., 04510, México CDMX e-mail: hmuji@unam.mx

Resumen: En este artículo se presenta la implementación del gemelo digital de un proceso secuencial electroneumático, para el cual se desarrolló el modelo tridimensional del proceso mediante la utilización de herramientas de diseño asistido por computadora con base en la información proporcionada por las hojas del fabricante e ingeniería inversa. Para describir la dinámica del sistema se propone un modelo matemático mediante ecuaciones diferenciales no lineales, este modelo es implementado en *EmulPro* que nos permite emular el proceso y mediante una conexión OPC, se conecta con su contraparte física. Se realizó una evaluación al gemelo digital en dos escenarios. En el primer escenario se evaluó la respuesta del sistema a la expulsión y retracción del émbolo. En el segundo escenario se evaluó en tiempo real el control de tres cilindros de doble efecto mediante una secuencia implementada con la metodología GRAFCET, programada en el lenguaje SFC bajo la norma IEC 61131-3, utilizando el controlador ControlLogix y el software *Studio 5000 Logix Designer*. Los resultados mostraron que el gemelo digital desarrollado puede ser utilizado para la evaluación rutinas de control secuencial.

Palabras clave: Gemelo digital, Industria 4.0, Control secuencial, Electroneumática.

1. INTRODUCCIÓN

El gemelo digital es una tecnología de integración entre el mundo físico y su contraparte virtual, se puede definir como el modelo virtual dinámico de un proceso o sistema (Camposano et al., 2021). El desarrollo de los gemelos digitales se ha incrementado en la última década debido a que ha tomado gran relevancia a nivel industrial, aunado al avance en el desarrollo de las tecnologías que habilitan su implementación en la industria y en el ámbito de la academia. Este impulso se debe a que es el eje central de varias propuestas que tienen por objetivo revolucionar las fábricas del futuro, como la Industria 4.0 promovida por el gobierno alemán, la manufactura avanzada por parte del gobierno de los Estados Unidos o la manufactura inteligente propuesta por China.

Existe controversia en cuanto al origen del concepto del gemelo digital, su uso se remonta al programa Apolo de la NASA, donde se construyeron dos modelos idénticos de naves espaciales, uno se envió al espacio y el otro se mantuvo en la tierra, este último sirvió antes del lanzamiento, como centro para capacitar a la tripulación y posterior al lanzamiento como sujeto de pruebas en la tierra, para reflejar y predecir el estado y condición del vehículo espacial en acción, con la finalidad de ayudar a los tripulantes a tomar las mejores decisiones (Rosen et al., 2015).

El surgimiento del concepto del gemelo digital fue anticipado en la obra del autor David Gelernter titulado *Mirror Worlds* en 1991 (Gelernter, 1993). Este libro predice un futuro donde cada aspecto de la vida tiene un mundo espejo, el autor describe a los mundos espejo como un modelo de *software* de la realidad que absorbe océanos de información y tiene la capacidad de emular la realidad en cada momento, también plantea las razones y ventajas de su construcción, así como formas en las que se podrían

desarrollar, dando una perspectiva bastante amplia acerca de los beneficios del desarrollo de los mundos espejo.

En el 2003 el concepto de gemelo digital es introducido por Michael Grieves de la Universidad de Michigan en un curso ejecutivo acerca de la Gestión del ciclo de vida del producto (PML, por sus siglas en inglés) (Grieves, 2015), donde propone al gemelo digital como un modelo subyacente y lo describe como un modelo virtual en el mundo digital conectado a su gemelo físico (Azad M. et al., 2019).

En el Lab. de Automatización de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, motivados por el deseo de incrementar significativamente el nivel formativo y cognitivo de los profesionales en ingeniería que interactúan con sistemas de control distribuido, controladores industriales programables y supervisión e integración SCADA, en (Macías Bejarano and Mujica Ortega, 2018) y (Hernández, 2020) se desarrolló un emulador de procesos (EmulPro), el cual es una herramienta capaz de resolver la dinámica de sistemas físicos en tiempo real, empleando un motor de resolución de ecuaciones diferenciales no lineales, también tiene la capacidad de conectarse mediante el protocolo de Comunicaciones de Plataforma Abierta (OPC, por sus siglas en inglés) a un controlador industrial para interactuar de manera bidireccional con el proceso físico, es un entorno que permite la implementación de gemelo digitales.

En este trabajo se desarrolló y evaluó el gemelo digital de una plataforma electroneumática que representa al proceso real, con el cual es posible realizar control en lazo cerrado con sistemas de control industrial en tiempo real.

2. GEMELO DIGITAL (DIGITAL TWIN)

El gemelo digital hace referencia a los procesos y métodos para describir y modelar las características, compor-

tamiento, procesos de formación, rendimiento y objetos físicos usando tecnología digitalizadora a la que también se puede referir como la tecnología del gemelo digital (Wang, 2020).

El modelo del gemelo digital se refiere a un modelo virtual que corresponde completamente y es consistente a las entidades físicas del mundo real, puede emular el comportamiento y rendimiento en tiempo real (Ver Figura 1).

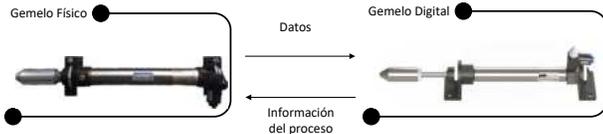


Figura 1. Concepto del gemelo digital.

3. PROCESO ELECTRONEUMÁTICO

En la Figura 2 podemos observar a la plataforma electro-neumática del Lab. de Automatización, diseñada y desarrollada en (Salazar Maldonado and Mujica Ortega, 2019), compuesta por seis cilindros de doble efecto con sus respectivas válvulas de regulación de flujo y sensores de posición de efecto *reed*, donde dos cilindros de doble efecto tienen finales de carrera neumáticos de accionamiento mecánico.

La plataforma cuenta con cuatro cilindros de simple efecto con sus respectivos finales de carrera y válvulas de regulación de flujo, para el apartado de mando se cuenta con dos conjuntos de válvulas de control conformadas cada una por tres válvulas de control de cinco vías y dos posiciones con accionamiento eléctrico, una válvula de retorno por muelle de 5 vías y dos posiciones con accionamiento eléctrico, tres válvulas de control de cinco vías y dos posiciones con accionamiento neumático y una válvula de retorno por muelle de 5 vías y dos posiciones con accionamiento neumático.

Además se cuenta con dos temporizadores neumático positivos y negativos, finalmente se cuentan con cuatro válvulas lógicas *AND* y cuatro válvulas lógicas *OR*, que se utilizan para el diseño de circuitos neumáticos, la plataforma cuenta con distribuidores de aire, dos unidades de mantenimiento, una botonera conformada por dos pulsadores auto enclavados normalmente cerrados eléctricos, dos pulsadores normalmente abiertos eléctricos, dos pulsadores neumáticos y dos indicadores visuales de alimentación de aire.

4. MODELO TRIDIMENSIONAL

En primera instancia se realizó un levantamiento de campo, en donde se obtuvieron medidas generales de los componentes de la plataforma neumática, utilizando herramientas como el pie de rey, para obtener dimensiones de elementos pequeños, como diámetros, longitudes, profundidades, etc.

Posteriormente se consultaron las hojas de especificaciones del fabricante y con base en los parámetros obtenidos se construyeron los modelos tridimensionales utilizando la herramienta de *software SolidWorks*, para cada uno de los ensamblajes de los elementos de la plataforma.

Adicionalmente, se utilizaron texturas con las herramientas de diseño de apariencias integrada en *SolidWorks* y

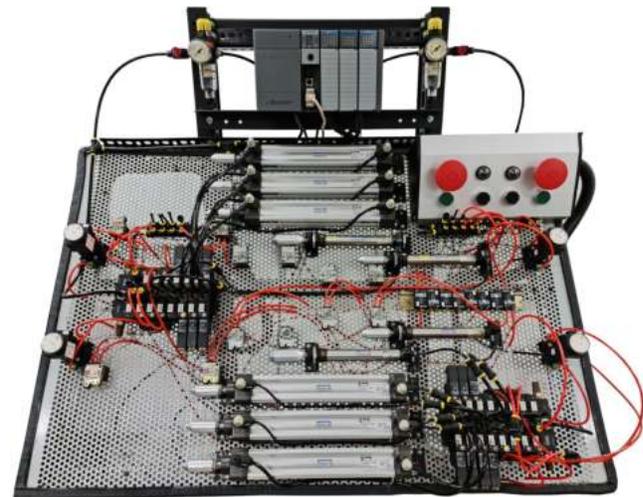


Figura 2. Plataforma electro-neumática.

para obtener las imágenes renderizadas se utilizó *Photo-View360*, posteriormente se construyeron los subensambles y ensamblajes generales, para finalmente obtener un ensamble completo de la plataforma, que cumple con las características de un gemelo digital de nivel 1, denominado pregemelo digital (Ver Figura 3).

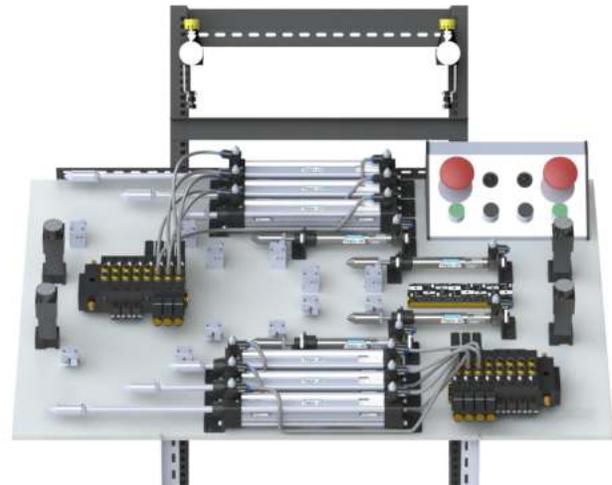


Figura 3. Ensamble de la plataforma neumática.

5. MODELO MATEMÁTICO

Para proponer el modelo matemático se consultaron diferentes fuentes donde se modelan cilindros de doble efecto de características similares; como en (Weist and Arteaga Pérez, 2011), el cual propone un modelo matemático para un pistón diferencial, (Bo Tran et al., 2019) donde se analizan los efectos de la fricción en la simulación de cilindros neumáticos, (Beater, 2007) y (Tressler et al., 2002) que propone un análisis del comportamiento dinámico de los sistemas neumáticos para extensores de extremidades inferiores.

En la Figura 4 se muestra una representación de un cilindro de doble efecto, donde $L[m]$ es el desplazamiento máximo del émbolo y $x[m]$ es el desplazamiento del émbolo. Para $i = 1, 2$; $L_i[m]$ es el ancho de la zona muerta de la cámara i , $d_v[m]$ es el diámetro del pistón, $A_i[m^2]$ es el área de la sección transversal de la cámara del pistón, $V_i[m^3]$ es el

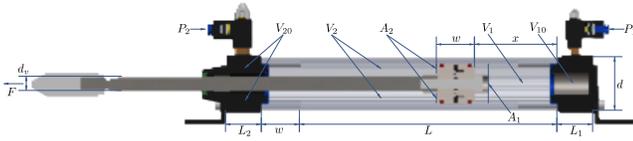


Figura 4. Diagrama del cilindro de doble efecto.

volumen en la cámara i , $V_{i0}[m^3]$ es el volumen muerto de la cámara i , incluidos los tubos, $d_v[m]$ es el diámetro del vástago del pistón, $w[m]$ es el ancho del pistón, $P_i[Pa]$ es la presión de la cámara i . Finalmente, $F[N]$ es la fuerza aplicada.

5.1 Dinámica de componentes mecánicos

La aceleración del pistón puede ser descrita por la segunda ley de Newton.

$$F = ma \quad (1)$$

En el caso de un cilindro neumático de doble efecto, existen fuerzas en ambos lados, donde la presión más baja viene dada por la presión atmosférica y la más alta por la presión suministrada. Para completar el modelo se ha añadido un término para la fricción viscosa, sabiendo que la fricción real es mucho más compleja que este término; sin embargo, se podrían agregar modelos de fricción como los utilizados en (Bo Tran et al., 2019), siendo el modelo de fricción de LuGre el recomendado. Por tanto, de la siguiente ecuación

$$F = M\ddot{x} = F_1 - F_2 - F_v \quad (2)$$

despejando el término de aceleración, tenemos

$$F = M\ddot{x} = A_1(p_1 - P_{atm}) - A_2(p_2 - P_{atm}) - F_v\dot{x}, \quad (3)$$

$$\ddot{x} = \frac{A_1}{M}p_1 - \frac{A_2}{M}p_2 - \frac{A_1 - A_2}{M}p_{atm} - \frac{F_v}{M}\dot{x}, \quad (4)$$

donde \ddot{x} es la aceleración $[\frac{m}{s^2}]$, A_1 el área transversal del émbolo $[m^2]$, A_2 el área transversal del émbolo menos el área transversal del vástago $[m^2]$, P_{atm} la presión atmosférica $[Pa]$, F_v el coeficiente de fricción $[\frac{Nm}{s}]$ y \dot{x} es la velocidad $[\frac{m}{s}]$.

Para el cálculo de las presiones se toman las siguientes condiciones (Bo Tran et al., 2019):

- El aire usado es un gas ideal y su energía cinética es insignificante en la cámara del cilindro.
- Las fugas del cilindro son despreciables.
- La variación de temperatura en las cámaras de los cilindros son despreciables con respecto a la temperatura de suministro.
- La presión y la temperatura en la cámara del cilindro son homogéneas.
- La evolución del gas en cada cámara es un proceso politrópico.
- Las presiones de suministro y ambiente son constantes.

Bajo estas consideraciones se puede describir la relación entre las energías internas y agregadas mediante:

$$U = H_1 - H_2, \quad (5)$$

donde U es la energía interna a volumen constante ($V_u = Cte.$), H_1 la entalpía agregada al sistema y H_2 la entalpía del sistema en forma de trabajo. Cada elemento se puede escribir como:

$$U = mC_vT \quad (6)$$

$$H_1 = mC_pT \quad (7)$$

$$H_2 = mC_pT. \quad (8)$$

Donde m es la masa $[kg]$, C_p la capacidad calorífica a presión constante, C_v la capacidad calorífica a volumen

constante y T la temperatura $[K]$. Despejando a la masa de la ecuación del gas ideal tenemos:

$$m = \frac{pV}{R_iT}, \quad (9)$$

despejando la capacidad calorífica a presión constante del coeficiente adiabático de dilatación, tenemos:

$$C_v = \frac{C_p}{\kappa}, \quad (10)$$

donde κ el coeficiente adiabático de dilatación. Redefiniendo la ecuación, tenemos:

$$U = \frac{pV_uC_vT}{R_iT} = \frac{C_p pV_u}{\kappa R_i} \quad (11)$$

$$H_2 = \frac{p_{H_2}V C_p T}{R_iT} = \frac{C_p p_{H_2}V}{R_i} \quad (12)$$

$$\frac{C_p pV_u}{\kappa R_i} = mC_pT - \frac{C_p p_{H_2}V}{R_i} \quad (13)$$

Factorizando la presión:

$$p = \frac{\kappa m R_i T}{V_u} - \frac{\kappa p_{H_2} V}{V_u} = \frac{k}{V_u} (m R_i T - p_{H_2} V) \quad (14)$$

Obteniendo la primera derivada:

$$\dot{p} = \frac{\kappa}{V_u} (\dot{m} R_i T - p_{H_2} \dot{V}). \quad (15)$$

El volumen de las cavidades del cilindro de doble efecto cambia conforme la distancia del desplazamiento, como describen las siguientes ecuaciones:

$$V_1 = V_{10} + A_1 x \quad (16)$$

$$V_2 = V_{20} + A_2 (L - x), \quad (17)$$

donde V_1 es el volumen total 1 $[m^3]$, V_{10} el volumen de la cavidad 1 $[m^3]$, V_2 el volumen total 2 $[m^3]$, V_{20} el volumen de la cavidad 2 $[m^3]$, A_1 el área transversal del émbolo $[m^2]$ y A_2 el área transversal del émbolo menos el área transversal del vástago $[m^2]$. Reescribiendo la ecuación para el caso del cilindro de doble efecto

$$\dot{p}_1 = \frac{\kappa}{V_{10} + A_1 x} (\dot{m}_1 R_i T - p_1 \dot{x} A_1) \quad (18)$$

$$\dot{p}_2 = \frac{\kappa}{V_{20} + A_2 (L - x)} (\dot{m}_2 R_i T - p_2 \dot{x} A_2) \quad (19)$$

5.2 Dinámica de componentes neumáticos

Para obtener el valor de la presión en las cavidades muertas del cilindro de doble efecto es necesario calcular el flujo másico en la cavidad, sin embargo, existen distintos casos para el cálculo del mismo que recaen en relación de presiones críticas, ya que una vez superado esto la velocidad y expulsión del pistón no aumenta a pesar de que aumenta la presión del aire en la cavidad.

$$\dot{m}_j = \begin{cases} \gamma_{jb} P_s \sqrt{\frac{k}{RT_s}} K_{v1} (u_j - u_m) & , u_m \leq u_j \leq 24 \\ 0 & , u_n \leq u_j \leq u_m \\ \gamma_{je} P_j \sqrt{\frac{k}{RT_s}} K_{v1} (u_j - u_m) & , 0 \leq u_j \leq u_n \end{cases} \quad (20)$$

donde \dot{m}_j es el flujo másico en la cavidad j $[\frac{kg}{s}]$, P_s la presión suministrada $[Pa]$, R la constante de los gases ideales $[\frac{J}{kgK}]$, T_s la temperatura ambiente $[K]$, K_{v1} y K_{v1} ganancias de las válvulas, u_j el voltaje de la primera electroválvula de expulsión $[V]$ y u_m el voltaje de la segunda electroválvula de contracción $[V]$.

Donde γ_{jb} y γ_{je} son un factor que modifica el comportamiento del flujo de acuerdo a la relación entre la presión suministrada y la presión de atmosférica, de (Tressler et al., 2002) se obtiene la siguiente ecuación para calcular dichos factores.

$$\gamma_{jb} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{k-1}} \left(\frac{p_j}{p_s}\right)^{\frac{k+1}{2k}}, & \frac{p_j}{p_s} \geq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \\ 0.58 & \frac{p_j}{p_s} < \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (21)$$

$$\gamma_{je} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{k-1}} \left(\frac{p_{atm}}{p_j}\right)^{\frac{k+1}{2k}}, & \frac{p_{atm}}{p_j} \geq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \\ 0.58 & \frac{p_{atm}}{p_j} < \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (22)$$

5.3 Modelo completo

Para obtener el modelo final se propone el siguiente vector de estados, donde se define a la posición, velocidad, la presión 1 y 2 como variables de estado.

$$X = [x \dot{x} p_1 p_2]^T = [x_1 x_2 x_3 x_4]^T, \quad (23)$$

derivando el vector de estados y obteniendo la resultante de la primera derivada, se obtienen las siguientes cuatro ecuaciones diferenciales:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (24a)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{A_1}{M} x_3 - \frac{A_2}{M} x_4 - \frac{A_1 - A_2}{M} P_{atm} - \frac{F_v}{M} x_2 \quad (24b)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{\kappa}{V_{10} + A_1 x_1} (\dot{m}_1(x_3, u) R_i T - x_2 x_3 A_1) \quad (24c)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{\kappa}{V_{20} + A_2 x_1} (\dot{m}_2(x_4, u) R_i T - x_2 x_4 A_2) \quad (24d)$$

Para calcular $\dot{m}_2(x_4, u)$ se utiliza la ecuación 20.

6. IMPLEMENTACIÓN DEL GEMELO DIGITAL

Para la implementación del gemelo digital es necesario la integración del modelo tridimensional y el matemático en EmulPro, en la Figura 5 se muestra el diagrama de conexión del gemelo digital, el cual se conecta de manera bidireccional con el controlador de automatización programable (PAC, por sus siglas en inglés) *ControlLogix*, mediante el protocolo OPC, con la plataforma electro-neumática (Gemelo físico) y el EmulPro (Gemelo digital).

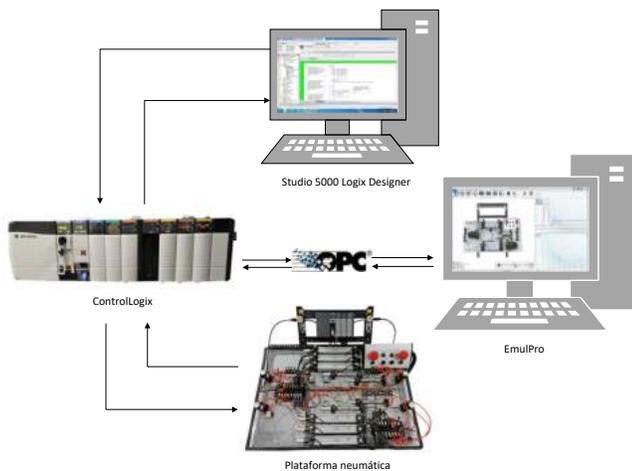


Figura 5. Gemelo digital integrado al EmulPro.

7. EVALUACIÓN DEL GEMELO DIGITAL

En la Figura 6 se muestran, como parte de la validación del gemelo digital desarrollado, la utilización del emulador *Studio 5000 Logix Emulate*, que toma el lugar del PAC *ControlLogix*, para procesar las rutinas de control diseñadas en *Studio 5000 Logix Designer*, y a través del protocolo de comunicación OPC se obtiene una conexión bidireccional entre el gemelo digital del proceso secuencial electroneumático implementado en *Matlab Simulink*, con el cual también es posible validar su comportamiento. A continuación se presenta en la Tabla 1 los parámetros del modelo matemático.

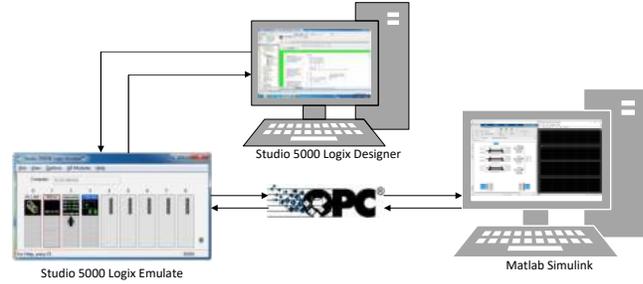


Figura 6. Conexión de la plataforma experimental.

TABLA 1. PARÁMETROS DEL CILINDRO DE DOBLE EFECTO

Área de la sección transversal 1	$A_1 = 8.0425 \times 10^{-4} [m^2]$
Área de la sección transversal 2	$A_2 = 6.9115 \times 10^{-4} [m^2]$
Volumen de la cavidad 1	$V_{10} = 8.0425 \times 10^{-5} [m^3]$
Volumen de la cavidad 2	$V_{20} = 6.9115 \times 10^{-5} [m^3]$
Masa en movimiento	$M = 0.13 [kg]$
Desplazamiento máximo del pistón	$L = 0.2 [m]$
Ancho de zona muerta cámara 1 y 2	$L_1 = L_2 = 0.1 [m]$
Coefficiente de fricción viscosa	$F_v = 150.1 [Nm/s]$
Coefficiente adiabático de dilatación	$\kappa = 1.4$
Constante universal gases ideales	$R = 287.05 [J/(kgK)]$
Presión atmosférica	$p_{atm} = 101325 [Pa]$
Presión suministrada	$p_s = 275790 [Pa]$
Temperatura ambiente	$T_s = 295 [K]$
Apertura del Racor 1	$R_a = 0.3228$
Apertura del Racor 2	$R_a = 0.1228$
Voltaje de bloqueo 1	$u_n = 12 [V]$
Voltaje de bloqueo 2	$u_m = 12 [V]$
Ganancia de la válvula 1	$Kv1 = 0.000000342 [m^2 V^{-1}]$
Ganancia de la válvula 2	$Kv2 = 0.000000342 [m^2 V^{-1}]$

7.1 Escenario 1: Expulsión y contracción del cilindro de doble efecto

El primer escenario es el funcionamiento que normalmente se utiliza en la mayoría de las aplicaciones, en la Figura 7 se muestra el diagrama de espacio-fase que describe al escenario 1. Comienza en la etapa 0 donde el pistón 1A se encuentra en reposo y en un estado de contracción completa, la secuencia inicia al activar la variable interna *start* que activa la electroválvula de expulsión *EV_E1*, el pistón permanece expulsado hasta que el temporizador *T1* termina su tiempo, para contraer el pistón y activar otro temporizador al estar completamente contraído repitiendo el ciclo.



Figura 7. Diagrama de espacio-fase del escenario 1.

7.2 Escenario 2: Seguimiento de control de una secuencia mediante la metodología GRAFCET

Con la finalidad de mostrar el desempeño del gemelo digital, en este escenario se realiza una evaluación utilizando la secuencia que se muestra en la Figura 8.

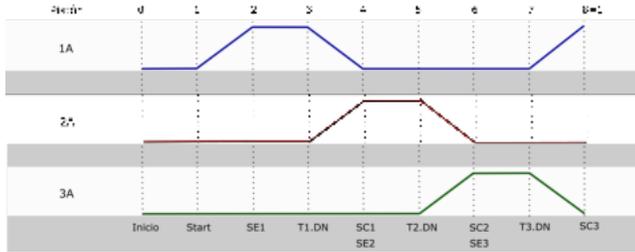


Figura 8. Diagrama espacio-fase de secuencia E2.

Además de implementar la secuencia, se deben cumplir con las siguientes condiciones en el diseño de la rutina de control:

- Etapa *Home*: Todos los pistones deben iniciar contraídos, lo cual asegura que la secuencia va a empezar como se propone, y esto debe ser antes de que el operador presione el pulsado de START.
- Al presionarse el pulsador START la secuencia debe iniciar, expulsando el pistón 1A y continuar como lo marca el diagrama de tiempos.

8. RESULTADOS

8.1 Resultados del escenario 1

En la Figura 9 se puede observar el comportamiento de la electroválvula de expulsión (EV_E1) y la electroválvula de retracción (EV_C1). Bajo este comportamiento de los actuadores, en la Figura 10 se muestra la posición del cilindro 1A, al iniciar la expulsión del cilindro, podemos observar que inicia de forma relativamente suave y se detiene de una manera abrupta, debido al impacto con la tapa del cilindro. Otro fenómeno que se aprecia es la diferencia en el tiempo de expulsión y retracción debido a la diferencia en la apertura de las válvulas de regulación de flujo.

Por otro lado, la Figura 11 muestra la velocidad del cilindro 1A, donde se confirma que la velocidad del cilindro comienza de forma suave y se detiene de forma abrupta, en un lapso se puede observar que la velocidad oscila. En la Figura 12 se muestra la respuesta de las presiones que confirman la diferencia entre la expulsión y retracción ya que existe una menor presión al retraer.

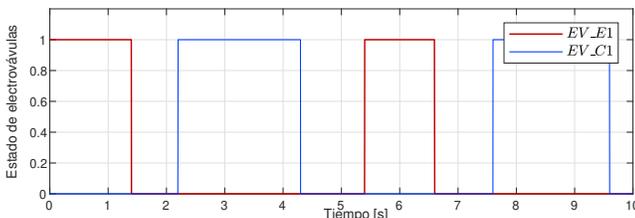


Figura 9. Gráfica del estado de los actuadores.

8.2 Resultados del escenario 2

Para la implementación de la secuencia descrita en la Figura 8 se utilizó la metodología GRAFCET implementada en el lenguaje de programación SFC bajo la norma

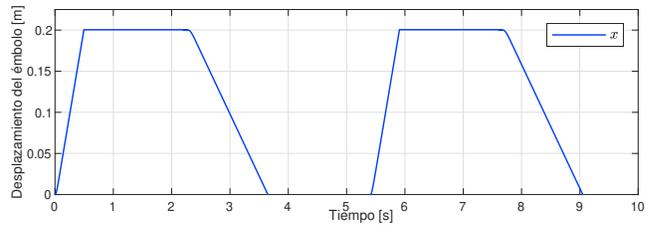


Figura 10. Gráfica de desplazamiento del émbolo.

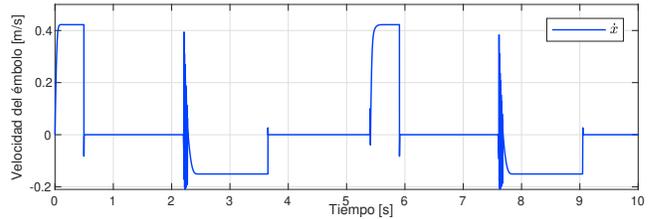


Figura 11. Gráfica de velocidad del émbolo.

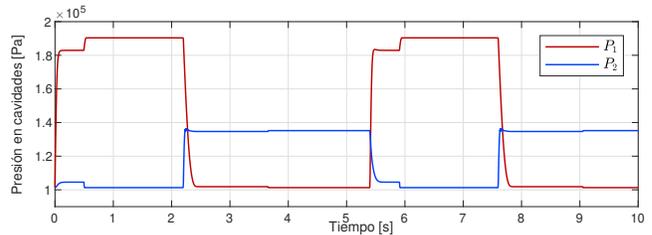


Figura 12. Gráfica de presión en las cavidades.

IEC 61131-3. En la Figura 13 se muestra la rutina de control implementada, la cual cuenta con 7 etapas y 8 transiciones, en la etapa 0 están programadas las acciones para la Etapa de *home*, que activa las válvulas de retracción de los cilindros que se encuentren expulsados, para evitar el sobrecalentamiento de los solenoides, estas se activan solo cuando el sensor de retracción no se encuentra activo. La subrutina en SFC es activada mediante una rutina principal implementada en LD IEC 61131-3, donde además se implementa el inicio de la rutina mediante un enclavamiento, y el *reset* que lleva a la subrutina en SFC a la etapa E0.

La respuesta del desplazamiento se muestra en la Figura 14, donde se aprecia el correcto seguimiento de la secuencia implementada, así como una pequeña diferencia en el tiempo de expulsión y retracción debido a una diferencia en la apertura de las válvulas de regulación de flujo (*racor*).

Las respuestas de los sensores se muestran en la Figura 15. Por otro lado, la gráfica de las respuestas de los actuadores se muestra en la Figura 16 donde se puede apreciar que se mantienen activas por un corto tiempo debido a que están condicionadas a los sensores *reed*.

9. CONCLUSIONES

A pesar de ser un concepto tecnológico relativamente nuevo, el gemelo digital tiene mucho potencial en desarrollo, debido principalmente a que es una tecnología de integración, depende directamente del desarrollo de otras tecnologías emergentes que permitan acortar las diferencias entre el gemelo digital y el gemelo físico, por esta razón la implementación del gemelo digital es un proceso de mejora continua a lo largo de todo el ciclo de vida del producto, el concepto contempla no solo la digitalización

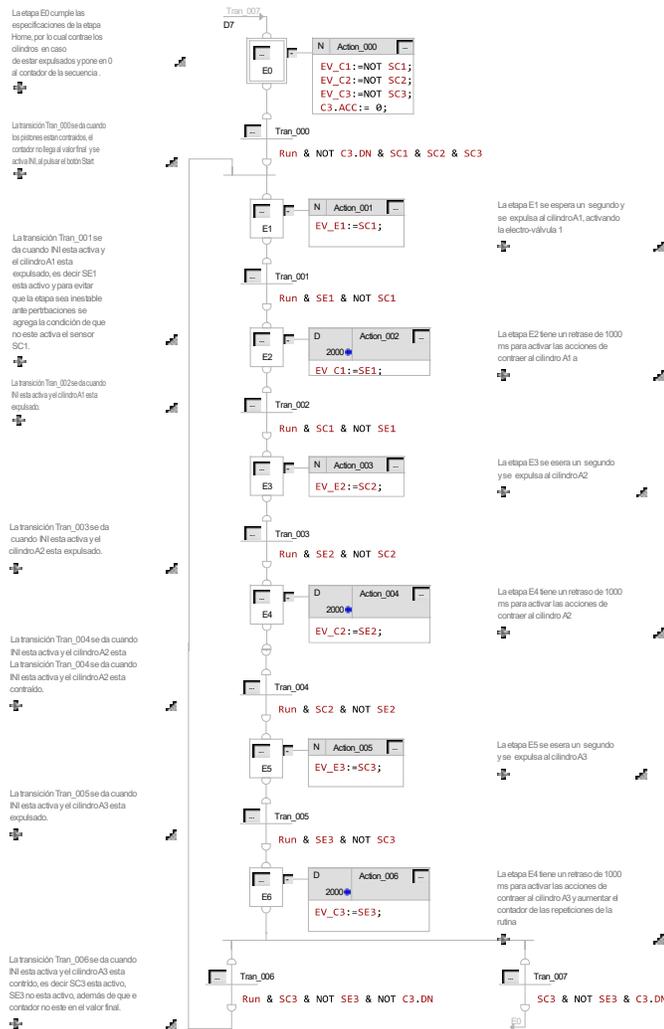


Figura 13. Rutina de control secuencia SFC IEC 61131-3.

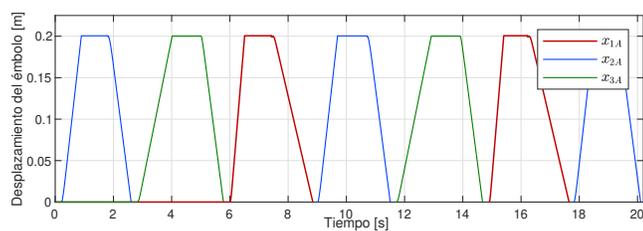


Figura 14. Posición de los émbolos de pistones.

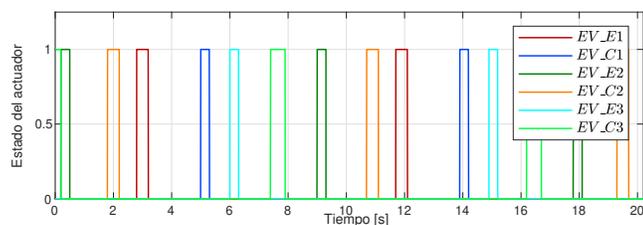


Figura 15. Comportamiento de válvulas solenoides.

de los procesos, si no incluso a la fabrica en su totalidad o al modelo de negocios, abarcando todos los aspectos posibles.

El gemelo digital implementado en este trabajo es un paso que nos permite incursionar en la digitalization del Lab. de Automatización, que permite emular el proceso de

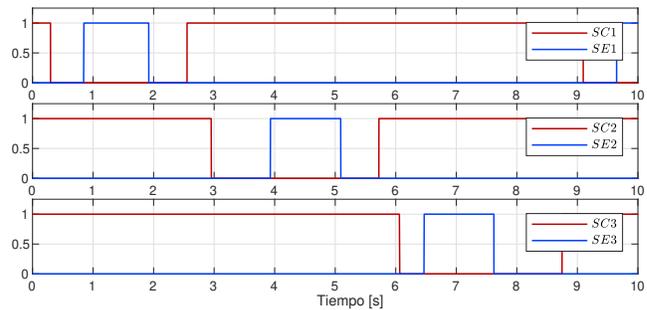


Figura 16. Sensores reed de final de carrera

manera remota e interconectada al gemelo físico, cuenta con un modelo tridimensional del sistema con detalle en el funcionamiento interno, dotándolo de un gran realismo que permite capacitar a los futuros operadores del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la DGAPA-UNAM por el apoyo brindado en el Programa UNAM-PAPIME PE109121. Matias Iglesias-Rios agradece la beca de licenciatura recibida.

REFERENCIAS

Azad M., M., Carla C., M., and Scott D., L. (2019). Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems*, 7(1), 7.

Beater, P. (2007). *Pneumatic drives : system design, modelling and control*. Springer.

Bo Tran, X..., Lai Nguyen, V. (1, .., and Duong Tran, K.... (2019). Effects of friction models on simulation of pneumatic cylinder. *Mechanical Sciences*, 10(2), 517–528, 10.5194/ms-10-517-2019.

Camposano, J.C., Smolander, K., and Ruippo, T. (2021). Seven metaphors to understand digital twins of built assets. *IEEE Access*, 9, 27167–27181, 10.1109/ACCESS.2021.3058009.

Gelernter, D. (1993). *Mirror worlds: Or the day software puts the universe in a shoebox... How it will happen and what it will mean*. Oxford University Press.

Grieves, M. (2015). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication.

Hernández, A.Á. (2020). Plataforma de emulación de procesos físicos para la evaluación de estrategias de control.

Macías Bejarano, C.S. and Mujica Ortega, H. (2018). *Diseño y desarrollo de una plataforma experimental para evaluar estrategias de control en procesos térmicos industriales*.

Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., and Bettenhausen, K.D. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 567–572, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>. 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.

Salazar Maldonado, D.I. and Mujica Ortega, H. (2019). *Implementación de una plataforma electro-neumática para la evaluación de estrategias de control secuencial*.

Tressler, J., Clement, T., Kazerooni, H., and Lim, A. (2002). Dynamic behavior of pneumatic systems for lower extremity extenders. In *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*, volume 3, 3248–3253 vol.3. 10.1109/ROBOT.2002.1013727.

Wang, Z. (2020). Digital twin technology. In T. Bányai and A.P.F.D. Felice (eds.), *Industry 4.0*, chapter 7. IntechOpen, Rijeka, 10.5772/intechopen.80974.

Weist, J. and Arteaga Pérez, M.A. (2011). Control de desplazamiento y fuerza de un pistón neumático diferencial (displacement and force control of a differential pneumatic actuator).