

Implementación de PAC y HMI en la propuesta de automatización de un sistema tipo carrusel para el llenado de cilindros de gas LP

PAC and HMI implementation in the automation proposal of a carousel-type system for filling LP gas cylinders

K.A. Jacinto-Acosta ^a, E. Flores-García ^b, E. Alvarado-Santos ^c, R.V.H. Calderón-Medina ^d

Abstract:

The growing demand for Liquefied Petroleum Gas (LPG) requires more efficient and safer filling processes. This work presents the development of an industrial automation system for a 30 Kg LPG cylinder filling carousel, inspired by the "Gas Bienestar" plant in Tepeji, Hidalgo, Mexico. The system was designed in order to eliminate operational bottlenecks and reduce personnel exposure to risks associated with manual gas handling. The solution proposal is based on a Programmable Automation Controller (PAC) Emerson PACSystems RX3i, whose control logic was developed in the software Proficy Machine Edition. Real-time monitoring and operation are performed through a Human-Machine Interface (HMI) designed in Cimplicity Workbench. The paper details the system design, including Piping and Instrumentation Diagrams (P&ID), selection of field instruments (level, mass, flow, and pressure sensors), and the automated control sequence. The results demonstrate that the proposal establishes the foundation for a continuous, robust, and safe process, improving productivity and reducing human intervention.

Keywords:

Cimplicity Workbench, Filling Carousel, HMI, Industrial Automation, LPG, PACSystems RX3i, Proficy Machine Edition.

Resumen:

La creciente demanda de Gas Licuado de Petróleo (GLP) requiere procesos de envasado más eficientes y seguros. Este artículo presenta el desarrollo de un sistema de automatización industrial para un carrusel de llenado de cilindros de GLP de 30 Kg, inspirado en la planta "Gas Bienestar" en Tepeji, Hidalgo, México. El sistema fue diseñado para eliminar cuellos de botella operativos y reducir la exposición del personal a riesgos asociados con el manejo manual del gas. La propuesta de solución se basa en un Controlador de Automatización Programable (PAC) *Emerson PACSystems RX3i*, cuya lógica de control se desarrolló en el software *Proficy Machine Edition*. La supervisión y operación en tiempo real se realiza a través de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) diseñada en *Cimplicity Workbench*. El artículo detalla el diseño del sistema, incluyendo los diagramas de tubería e instrumentación (DTI), la selección de instrumentos de campo (sensores de nivel, masa, caudal y presión) y la secuencia de control automatizada. Los resultados demuestran que la propuesta establece las bases para un proceso continuo, robusto y seguro, mejorando la productividad y reduciendo la intervención humana.

Palabras Clave:

Automatización Industrial, Carrusel de Llenado, Cimplicity Workbench, GLP, HMI, PACSystems RX3i, Proficy Machine Edition.

^b Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Tizayuca | Tizayuca-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4606-8217>, Email: efloresg@uaeh.edu.mx

^{a,c,d} Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Tizayuca | Tizayuca-Hidalgo | México, ^a<https://orcid.org/0009-0005-3752-8129>, Email: ja400595@uaeh.edu.mx; ^c<https://orcid.org/0000-0002-1058-3794>, Email: eduardo_alvarado@uaeh.edu.mx;

^d<https://orcid.org/0000-0002-7292-6051>, Email: rafael_calderon@uaeh.edu.mx

1. Introducción

En México, el Gas Licuado de Petróleo (GLP) es un combustible esencial para los hogares, posicionando al país en el sexto lugar de consumo a nivel mundial según la *International Energy Agency* (IEA) [1]. La empresa "Gas Bienestar", administrada por PEMEX, fue creada para ofrecer este combustible a precios accesibles. Una de sus plantas de distribución, ubicada en Tepeji del Río, Hidalgo, enfrenta el desafío de incrementar su capacidad de producción, la cual actualmente supera los mil cilindros por jornada de 24 horas con más de 30 operarios (Figura 1).

El proceso de llenado manual presenta inherentes riesgos de seguridad para los operadores, incluyendo la exposición a fugas de gas que pueden formar atmósferas explosivas y causar problemas de salud [2]. Además, este método es propenso a inconsistencias en el llenado y limita la escalabilidad de la producción.



Figura 1. Planta Bienestar de Tula Tepeji.

La automatización industrial surge como la alternativa idónea para estos desafíos. Este trabajo propone el desarrollo de un sistema automatizado tipo carrusel, controlado por un PAC (*Programmable Automation Controller*) y supervisado mediante una HMI (*Human-Machine Interface*). El objetivo principal es crear un proceso continuo, preciso y seguro que optimice el llenado de cilindros de GLP (30 Kg), reduciendo significativamente la intervención humana directa y los riesgos asociados.

2. Metodología y Desarrollo de la Propuesta

2.1. Descripción del Proceso y Secuencia de Operación

El sistema automatizado se compone de tres etapas principales (Figura 2):

1. **Posicionamiento:** Los cilindros vacíos son transportados por una banda de entrada hacia una base giratoria. Esta base orienta el cilindro para

alinearse automáticamente su válvula de servicio con la válvula de llenado del sistema, utilizando sensores de posicionamiento (finales de carrera).

2. **Llenado-Pesado:** El cilindro posicionado es transferido al carrusel, donde se coloca sobre una báscula automática con celda de carga. Un mecanismo con servomotor abre la válvula del cilindro. El llenado se inicia, controlado por un lazo que monitorea la masa en tiempo real. Un sensor de caudal asegura el suministro correcto y detiene el flujo al alcanzar el valor de masa deseado. Finalmente, el mecanismo cierra la válvula.
3. **Repesado y Salida:** Una vez lleno, el cilindro pasa por una etapa de repesado final para verificar que su peso se encuentre dentro de la tolerancia permitida. De ser correcto, una banda de salida lo transporta fuera del sistema. De lo contrario, un actuador lo desvía a una línea de rechazo.

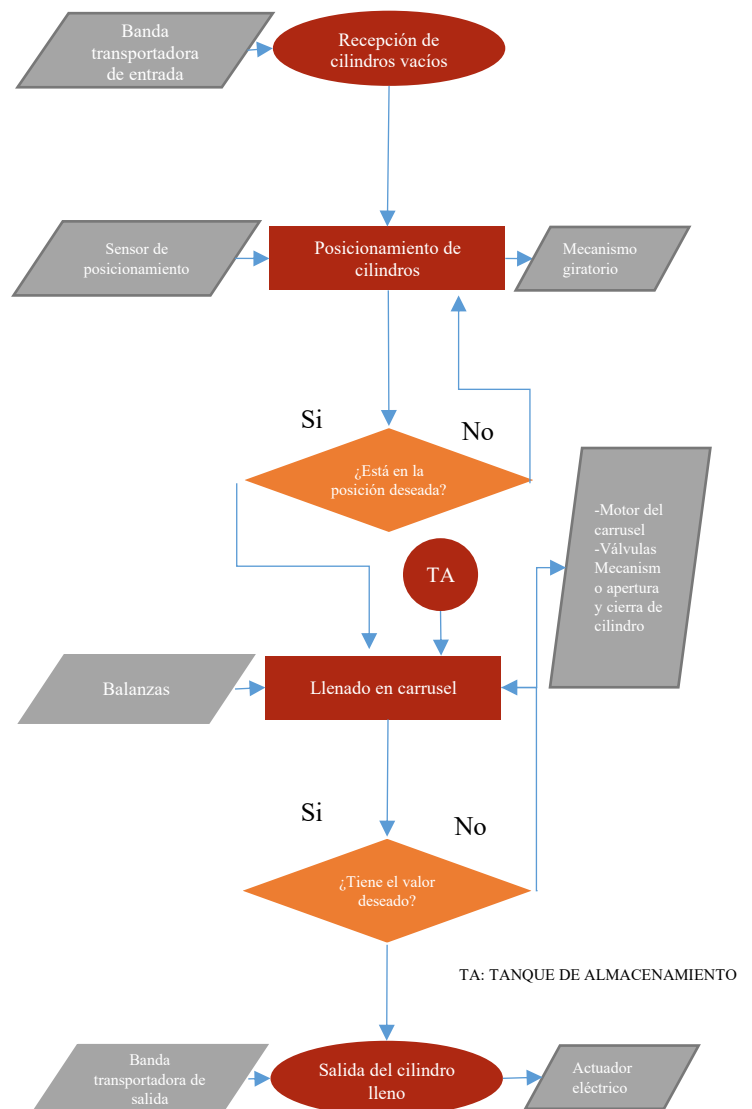


Figura 2. Diagrama de flujo del sistema de llenado tipo carrusel

La propuesta de implementación se materializa a través de un sistema mecánico tipo carrusel, diseñado para llenar los cilindros de manera continua y sincronizada. Como se ilustra en la Figura 3, el modelo CAD desarrollado muestra la base giratoria que avanza posicionando cada cilindro en las distintas estaciones de trabajo. La configuración del carrusel garantiza que, al completar una vuelta completa, cada cilindro haya finalizado su ciclo de llenado, optimizando así el tiempo del proceso y asegurando la continuidad operativa [5-8].

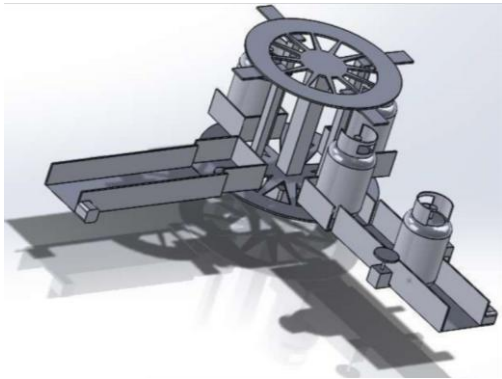


Figura 3. Modelo CAD del sistema mecánico tipo carrusel propuesto.

La Fig. 3 muestra la base giratoria con las estaciones de llenado; el mecanismo de posicionamiento mediante servomotores; y la disposición de balanzas automáticas con celda de carga. Este diseño permite el llenado continuo y sincronizado de cilindros, garantizando la alineación precisa de válvulas y optimizando el flujo del proceso. Desarrollado en *SolidWorks*® para validación mecánica y de integración espacial.

2.2. Arquitectura de Control y Hardware

El núcleo del sistema de control es un *PACSystems RX3i* de *Emerson* [3, 4]. Este equipo fue seleccionado por su robustez, modularidad y capacidad para manipular tanto señales discretas como analógicas en un entorno industrial exigente. La configuración de hardware incluye un *rack* de 12 *slots* con los siguientes módulos principales:

- Módulo de CPU.
- Módulos de entradas digitales (MLD230) para señales de finales de carrera y sensores de presencia.
- Módulos de entradas analógicas para señales de las celdas de carga, sensor de caudal y transductor de presión.
- Módulos de salidas digitales para actuadores, motorreductores y servomotores.
- Módulo de comunicación Ethernet para la conexión con la HMI.

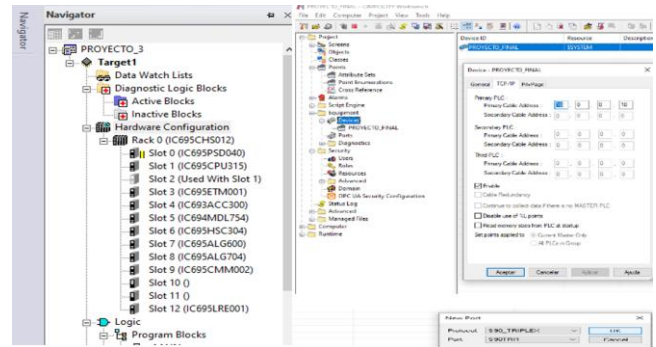


Figura 4. Configuración de hardware en *Proficy Machine Edition*.

2.3. Instrumentación y Actuadores

Se implementaron los siguientes elementos de campo para la medición y el control [9]:

- **Variables Analógicas:**
 - **Masa:** Celdas de carga integradas en las básculas del carrusel.
 - **Nivel:** Sensor ultrasónico en el tanque de almacenamiento principal de GLP.
 - **Caudal:** Sensor de flujo másico en la línea de llenado.
 - **Presión:** Transductor en la tubería de suministro.
- **Señales Digitales:**
 - **Posicionamiento:** Interruptores de final de carrera (*limit switches*).
 - **Presencia:** Sensores de proximidad.
- **Actuadores:**
 - Motorreductores para las bandas transportadoras.
 - Servomotores para el mecanismo de apertura/cierre de válvulas de cilindros.
 - Motor principal del carrusel.
 - Válvulas solenoides para el control de flujo de GLP.

2.4. Desarrollo de Software y Lógica de Control

Para el desarrollo del algoritmo de control del sistema, se seleccionó el lenguaje de programación *Ladder Diagram* (LD) o diagrama escalera [10]. Esta elección se basó en su naturaleza gráfica e intuitiva, la cual se deriva directamente de los esquemas eléctricos de control tradicionales, facilitando su interpretación y mantenimiento por parte de ingenieros y técnicos.

La lógica de control, desarrollada en el entorno *Proficy Machine Edition*, gestiona de manera integral la secuencia automática del carrusel. El programa se estructura en rutinas específicas que orquestan el funcionamiento de cada subsistema, desde el transporte de cilindros hasta el llenado y la evacuación. Todas las variables del proceso, como los estados de los sensores y las salidas a los actuadores, se encuentran mapeadas en la memoria del

PAC. Las entradas digitales, designadas con la notación %I, fueron asignadas a un módulo discreto MLD230, el cual procesa las señales provenientes de los *limit switch* y sensores de presencia.

Secuencia Principal de Operación

El proceso se inicia con la activación de los motores principales que accionan las bandas transportadoras de entrada y salida. Los tiempos operativos de cada subproceso (por ejemplo, el retardo para el cierre de válvulas) son configurables por el operador desde la HMI. Estos valores se almacenan en registros del tipo *GE INT* dentro del PAC, permitiendo una flexibilidad operativa sin necesidad de modificar el código del programa.

A continuación, se detallan las rutinas de control más significativas:

- **Control de la Banda de Entrada (Banda 1):** Esta rutina controla el suministro de cilindros vacíos al sistema. Un sensor de presencia (configurado como un seguidor de línea negra) detecta el cilindro y asegura su posicionamiento correcto para el posterior alineamiento de la válvula de llenado. La lógica incorpora interruptores de final de carrera que verifican la presencia y posición del cilindro a lo largo de la banda, habilitando o deshabilitando el motorreductor y los solenoides de sujeción de acuerdo con la secuencia establecida (ver Figura 5).

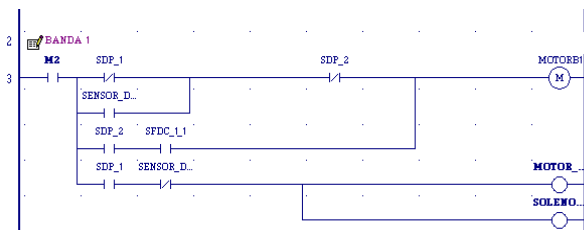


Figura 5. Lógica de control en diagrama escalera para la Banda de Entrada 1.

La Fig. 5 comprende la lectura del sensor de presencia (seguidor de línea negra) y de interruptores de final de carrera para detección y posicionamiento del cilindro, así como la rutina de control del motorreductor y solenoides de sujeción para el transporte seguro hacia el carrusel.

- **Operación del Carrusel:** El movimiento del carrusel es generado por su motor principal. La secuencia lógica integra dos finales de carrera que definen los puntos de parada para las etapas de llenado y descarga. Cuando un cilindro alcanza una estación de llenado, la lógica activa dos servomotores que se encargan de manera automatizada de la apertura y el cierre de la válvula del cilindro (ver Figura 6).

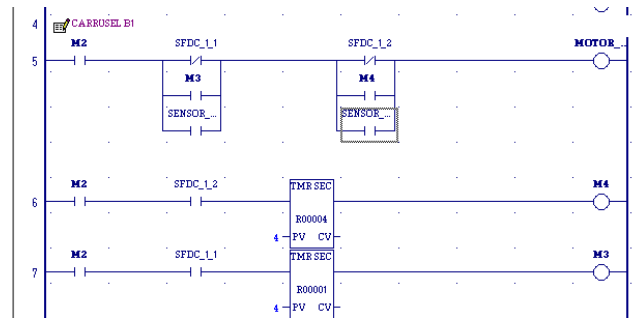


Figura 6. Lógica de control en diagrama escalera para la operación del carrusel.

En la Fig. 6 se muestra la rutina de control del motor principal y gestión de posicionamiento mediante interruptores de final de carrera, y secuencia de activación de servomotores para apertura/cierre automatizado de válvulas en las estaciones de llenado.

- **Ciclo de Llenado en Básculas 1 y 2:** La lógica para ambas básculas es analógica. Un sensor de presencia confirma que el cilindro está correctamente posicionado en la báscula. Al cumplirse esta condición, se activa un servomotor lineal que desciende para acoplar y abrir la válvula de suministro del cilindro. Tras un tiempo predefinido, necesario para completar la transferencia de gas, el servomotor retorna a su posición inicial, cerrando la válvula (ver Figuras 7a y 7b).

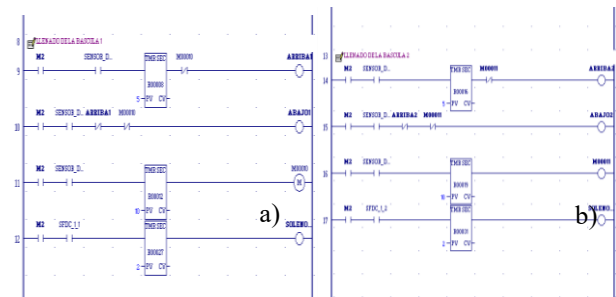


Figura 7. Secuencia automatizada del ciclo de llenado en las básculas del carrusel: (a) acoplamiento inicial de la válvula mediante servomotor lineal; (b) monitoreo en tiempo real de la masa durante la transferencia de GLP.

- **Accionamiento del Sistema de Bombeo:** El arranque y paro de las bombas que suministran el GLP a los cilindros está gobernado por señales digitales de confirmación. Interruptores de final de carrera instalados en el sistema de bombas envían una señal al PAC para indicar que se encuentran en

su posición operativa final, permitiendo así un control seguro y verificable del flujo de gas (ver Figura 8).

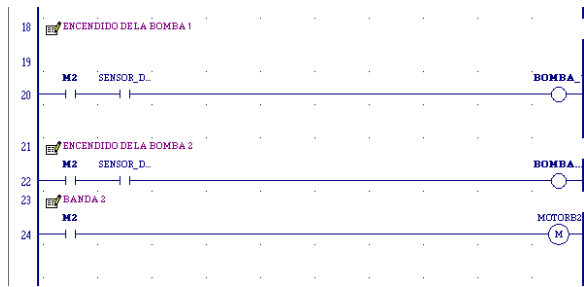


Figura 8. Lógica de control en diagrama escalera para el accionamiento del sistema de bombeo de GLP.

El diagrama de la Fig. 8 presenta el circuito de habilitación basado en señales de interruptores de final de carrera para verificación de posición operativa, y rutina de arranque/paro seguro de las bombas mediante señales digitales de confirmación.

2.5. Diseño de la Interfaz Humano-Máquina (HMI)

La HMI se desarrolló utilizando el software *Cimplicity* [11]. La pantalla principal permite visualizar en tiempo real:

- El estado del carrusel y las bandas transportadoras.
- Los valores de las variables de proceso (masa, nivel, caudal, presión).
- El estado de bombas, motores y válvulas.
- Un tablero de indicación con alarmas y estados del sistema.

La comunicación entre la HMI y el PAC se estableció a través del protocolo Ethernet (S90_TRIPLEX), permitiendo una supervisión y control integral y en tiempo real.

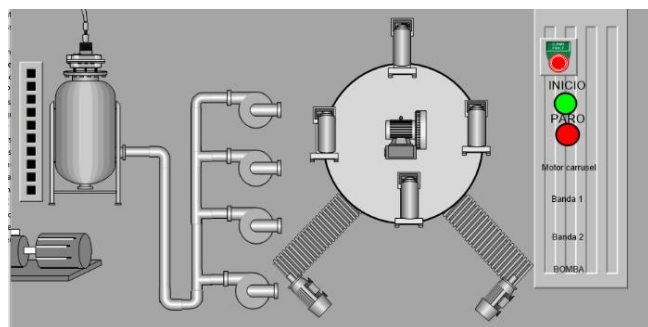


Figura 9. Pantalla principal de la HMI en *Cimplicity*.

2.6. Integración Mecánico-Eléctrica: Diagramas DTI

Se elaboró el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI; Figura 10) que integra la instrumentación, elementos de control, actuadores y la red de tuberías. Este diagrama

ha sido fundamental para el diseño físico y la apropiada integración de los componentes del sistema.

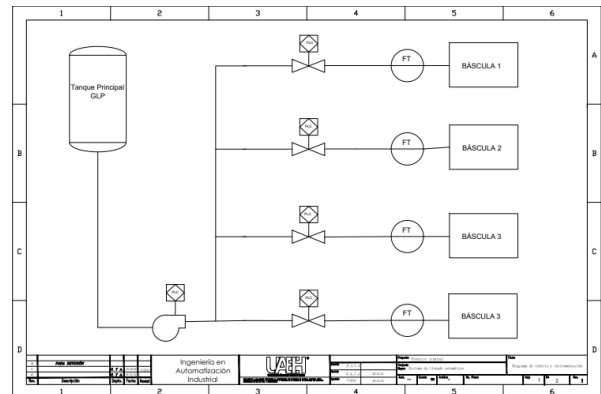


Figura 10. Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI) del sistema.

3. Resultados y Discusión

La implementación de la propuesta de automatización se validó mediante la construcción y puesta en marcha de un prototipo a nivel laboratorio (Figura 11). Este modelo tecnológico funcional permitió verificar la secuencia de automatización completa, desde el posicionamiento del cilindro hasta su llenado y repesado, confirmando la eficacia de la integración entre los componentes mecánicos, eléctricos y de control. A continuación, se detallan los principales resultados obtenidos y se discuten sus implicaciones.



Figura 11. Modelo tecnológico a nivel laboratorio del sistema de llenado tipo carrusel, mostrando la integración de los mecanismos, sensores y actuadores con el *PAC RX3i*.

3.1. Sistema de Control Centralizado y Confiable

La integración del *PAC RX3i* con la totalidad de los sensores y actuadores demostró un control preciso y

confiable sobre el proceso secuencial. Durante las pruebas, el PAC ejecutó eficientemente la lógica de control programada en *Proficy Machine Edition*, gestionando más de 20 señales digitales y ocho señales analógicas. La estabilidad del sistema se corroboró en ciclos de prueba continuos de ocho horas, sin presentar fallos en la comunicación o en el procesamiento de las señales. Este resultado subraya la idoneidad del PAC *RX3i* para entornos industriales exigentes, donde la confiabilidad es un factor crítico.

3.2. Supervisión en Tiempo Real y Operación Remota

La HMI desarrollada en *Cimplicity Workbench* proporciona una visualización clara e intuitiva del estado del proceso en tiempo real. Los operadores tienen la posibilidad de monitorear variables clave (nivel, masa, caudal, presión) y el estado de los actuadores, así como configurar parámetros operativos (como los tiempos de llenado y los *setpoints* de masa) de manera remota. Esta capacidad reduce la curva de aprendizaje y empodera al operador para responder de manera ágil a cualquier contingencia, mejorando la eficiencia operativa y la seguridad.

3.3. Reducción de la Intervención Humana y Mitigación de Riesgos

La secuencia automatizada ha eliminado en su mayoría la necesidad de que el operario realice tareas manuales de transporte de cilindros y manipulación directa de las válvulas de llenado. Esto mitiga significativamente los riesgos asociados a la exposición al GLP, como intoxicaciones o posibles incendios. Además, se reduce la variabilidad introducida por el factor humano, asegurando que cada cilindro sea procesado de manera idéntica, lo que incrementa la consistencia del proceso [12].

3.4. Precisión y Cumplimiento Normativo en el Llenado

El uso de celdas de carga para el control por masa demostró una precisión consistente en el llenado, con una desviación máxima observada de ± 0.1 Kg respecto del valor deseado de 30 Kg; muy por debajo de los límites establecidos por la normativa aplicable [5]. Este nivel de precisión no solo garantiza el cumplimiento normativo, sino que también reduce el desperdicio de producto y mejora la calidad percibida por el cliente final.

3.5. Validación del Prototipo y Escalabilidad

El modelo tecnológico a nivel laboratorio (Figura 11) validó exitosamente la funcionalidad de los mecanismos diseñados y la lógica de programación. Todos los subsistemas (bandas transportadoras, base giratoria, mecanismos de apertura/cierre de válvulas y sistema de bombeo) operaron de manera coordinada según lo planeado. La arquitectura modular del PAC *RX3i* y la

estructura del software permiten una fácil expansión del sistema, por ejemplo, para incrementar el número de estaciones del carrusel o añadir nuevos módulos de control. Esto convierte a la propuesta en una base sólida para una implementación industrial escalable.

Los resultados obtenidos demuestran que la automatización del carrusel de llenado de cilindros de GLP es técnica y operativamente viable. La integración de un PAC de gama industrial, junto con una HMI robusta y una cuidadosa selección de instrumentación, permite lograr los objetivos de eficiencia, seguridad y precisión. Si bien el prototipo validó el concepto a nivel laboratorio, un despliegue a escala industrial requeriría considerar aspectos como la redundancia de componentes críticos, protocolos de seguridad adicionales (por ejemplo, sistemas de paro de emergencia) y un análisis de costo-beneficio más detallado. Futuros trabajos podrían explorar la incorporación de técnicas de control avanzado, como la dosificación adaptativa, y la integración con sistemas de gestión de planta (MES) para la trazabilidad completa de cada cilindro.

4. Conclusión

El presente trabajo muestra exitosamente el diseño, la implementación y la validación de un sistema de automatización para un carrusel de llenado de cilindros de GLP, empleando tecnologías de vanguardia en control y supervisión industrial. El desarrollo de un modelo tecnológico funcional a nivel laboratorio, ha permitido: 1) Validación Técnica Integral: se corroboró el correcto funcionamiento de la secuencia automatizada completa, desde el posicionamiento hasta el repesado, confirmando la efectiva integración entre la arquitectura de control (PAC *RX3i*), los mecanismos electromecánicos diseñados y la interfaz de operación (HMI en *Cimplicity*); 2) Cumplimiento de Objetivos Clave: se consiguió un sistema que prioriza la seguridad operativa, al eliminar la exposición directa del personal a los riesgos asociados con el manejo de GLP. Simultáneamente, se aseguró la precisión del proceso mediante el control por masa, garantizando el cumplimiento de las normas de envasado y se sentaron las bases para un incremento significativo de la productividad mediante un flujo continuo y automatizado; 3) Robustez y Escalabilidad: la utilización del PAC *Systems RX3i*, junto con la programación en *Proficy Machine Edition*, probó ser una plataforma modular confiable. Esta elección no solo asegura el desempeño en un entorno de pruebas, sino que también proporciona un sustento sólido para una futura escalabilidad industrial, permitiendo la adición de más estaciones de llenado o la integración con sistemas de gestión superiores (MES/SCADA).

Referencias

- [1] International Energy Agency (IEA). (2021). *World Energy Outlook 2021*. Paris: IEA Publications.
- [2] Secretaría de Energía (SENER). (2018). *Prospectiva del Mercado de Gas Licuado de Petróleo 2018-2032*. Ciudad de México: SENER.
- [3] GE Digital. (2020). *PACSystems RX3i Controllers User Manual*. GE Industrial Solutions.
- [4] Emerson Automation Solutions. (2021). *Proficy Machine Edition Programming Guide*. Emerson Electric Co.
- [5] Secretaría de Economía. (2018). *NORMA Oficial Mexicana NOM-213-SCFI-2018: Recipientes portátiles y recipientes transportables para contener gas licuado de petróleo*. Diario Oficial de la Federación.
- [6] OSINERGMIN. (2011). "El gas natural y sus diferencias con el gas LP". *Revista Técnica de Hidrocarburos*, 2(8), 8-9.
- [7] Aguilar, A.P.C. (2018). *Reingeniería del llenado de gas licuado de petróleo en cilindros de 10 Kg en la planta envasadora de Inti Gas - Chorrillos* (Tesis de maestría). Universidad Nacional del Callao, Perú.
- [8] León, I.S. (2015). *Determinación de un método para identificar el tamaño óptimo de la muestra en el proceso de llenado, para asegurar el correcto envasado del cilindro de gas doméstico* (Tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil, Ecuador.
- [9] Gutiérrez, H.M.V., & Iturbe, S.A.K. (2017). *Fundamentos Básicos de Instrumentación Industrial*. Universidad Península de Santa Elena.
- [10] Bolton, W. (2015). *Programmable Logic Controllers*. 6th ed. Newnes.
- [11] Siemens AG. (2019). *HMI Programming with Simplicity: Advanced Applications*. Siemens Technical Documentation.
- [12] Johnson, C.D. (2014). *Process Control Instrumentation Technology*. 8th ed. Prentice Hall.