Tesla Revista Científica, ISSN: 2796-9320
Vol. 6 Núm. 1 (2026), e645
https://doi.org/10.55204/trc.v6i1.e645

Área: Ingeniería
Artículo de revisión

Sistemas mecánico-neumáticos con control PLC basados en la estandarización IEC 61131-3 y metodología VDI 2225

Mechanical-pneumatic systems with PLC control based on IEC 61131-3 standardization and the VDI 2225 methodology.

Haziel Alejandro Luna Pérez [1][0009-0006-8797-2495], Byron Paul Huera Paltán [2][0000-0002-1721-2574], David Mauricio Rodríguez Galeas [3][0009-0005-9371-1956], Angel Alejandro Bastidas Argudo [4][0000-0001-9544-9959]

[1] Universidad Internacional de Valencia (VIU), Valencia, España
[2] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Sede Morona Santiago, EspochAI. Ecuador
[3] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). Riobamba. Ecuador

hlunap@student.universidadviu.com, bhuera@espoch.edu.ec, david.rodriguez@espoch.edu.ec, angel-bass@outlook.es

CITA EN APA:
Luna Pérez, H. A., Huera Paltán, B. P., Rodríguez Galeas, D. M., & Bastidas Argudo, A. A. (2026). Sistemas mecánico-neumáticos con control PLC basados en la estandarización IEC 61131-3 y metodología VDI 2225. Tesla Revista Científica, 6(1), e645.
https://doi.org/10.55204/trc.v6i1.e645

Recibido: 2026-01-15
Revisado: 2026-02-22 al 2026-03-11
Corregido: 2026-03-25
Aceptado: 2026-04-10
Publicado: 2026-04-23

TESLA
Revista Científica
ISSN: 2796-9320

Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)
Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras.
The contents of this article are under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license. The authors retain the moral and patrimonial rights of their works.

Resumen. La automatización de sistemas mecánico-neumáticos constituye un pilar clave en la industria moderna, al contribuir a mejorar la eficiencia, la seguridad y la confiabilidad de los procesos productivos. El objetivo es analizar los principios de diseño y automatización de sistemas mecánico-neumáticos mediante una revisión teórico–aplicada, basada en el uso de neumática industrial y controladores lógicos programables (PLC), apoyándose en la estandarización de la norma IEC 61131-3 y en la metodología de evaluación VDI 2225. Se realizó una revisión narrativa estructurada de estudios clave. Se categorizó la evidencia científica y técnica según su enfoque metodológico (cualitativo, cuantitativo, mixto y revisión de literatura) y su propósito (aplicación técnica, experimental, propuesta metodológica y revisión sistemática o crítica). Bajo este marco, se abordaron los fundamentos de la automatización industrial, los sistemas de control, los actuadores neumáticos y los lenguajes de programación definidos por la IEC 61131-3, así como criterios técnicos y económicos para la selección de soluciones conforme a la VDI 2225. Los resultados de la revisión evidencian que la integración de neumática industrial y PLC, junto con metodologías de diseño estructurado y normas internacionales, permite desarrollar sistemas flexibles, escalables y con adecuado desempeño operativo. Se concluye que este enfoque constituye una solución técnica viable y ampliamente aplicable en entornos industriales, académicos y de desarrollo de prototipos, con potencial de integración futura con tecnologías asociadas a la Industria 4.0.

Palabras clave: Automatización industrial, sistemas neumáticos, VDI 2225, PLC, revisión documental.

Abstract. The automation of mechanical-pneumatic systems constitutes a key pillar in modern industry, contributing to the improvement of efficiency, safety, and reliability in productive processes. The objective is to analyze the principles of design and automation of mechanical-pneumatic systems through a theoretical-applied review, based on the use of industrial pneumatics and programmable logic controllers (PLC), supported by the standardization of the IEC 61131-3 norm and the VDI 2225 evaluation methodology. A structured narrative review of key studies was conducted. The scientific and technical evidence was categorized according to its methodological approach (qualitative, quantitative, mixed, and literature review) and its purpose (technical application, experimental, methodological proposal, and systematic or critical review). Within this framework, the fundamentals of industrial automation, control systems, pneumatic actuators, and the programming languages defined by IEC 61131-3 were addressed, as well as technical and economic criteria for the selection of solutions according to VDI 2225. The results of the review evidence that the integration of industrial pneumatics and PLCs, together with structured design methodologies and international standards, allows for the development of flexible, scalable systems with adequate operational performance. It is concluded that this approach constitutes a viable and widely applicable technical

solution in industrial, academic, and prototype development environments, with potential for future integration with technologies associated with Industry 4.0.
Keywords: Industrial automation, pneumatic systems, VDI 2225, PLC, documentary review.

INTRODUCCIÓN

La automatización de sistemas mecánicos ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, impulsada por la necesidad de optimizar los procesos productivos, mejorar la seguridad operativa y garantizar una mayor confiabilidad en los sistemas industriales. El avance tecnológico ha permitido la integración de distintas disciplinas de la ingeniería, como el diseño mecánico, los sistemas de control y la programación industrial, dando lugar a soluciones automatizadas capaces de responder de forma eficiente a entornos de operación cada vez más complejos y dinámicos, en concordancia con el enfoque de diseño sistemático planteado por Albers y Burkardt (1994) y desarrollado ampliamente por Pahl et al. (2007).

En este contexto, la neumática industrial se ha consolidado como una tecnología ampliamente utilizada para el accionamiento de mecanismos, debido a sus ventajas en términos de simplicidad constructiva, rapidez de respuesta, robustez, bajo costo relativo y facilidad de mantenimiento. Los actuadores neumáticos y las electroválvulas permiten generar movimientos repetitivos y controlados, siendo especialmente adecuados para aplicaciones donde la seguridad y la confiabilidad operativa son factores críticos. No obstante, el aprovechamiento eficiente de estos dispositivos requiere su integración con sistemas de control programable que permitan gestionar secuencias, tiempos y condiciones de operación de manera precisa y coordinada.

Los controladores lógicos programables (PLC) representan una de las herramientas más empleadas en la automatización industrial para el control de procesos discretos y continuos. Su flexibilidad, capacidad de adaptación a diferentes arquitecturas de control y compatibilidad con normas internacionales los convierten en una solución idónea para la implementación de sistemas automatizados. En particular, la norma IEC 61131-3 establece un marco estandarizado para la programación de PLC, definiendo lenguajes gráficos y textuales que facilitan la portabilidad del software, la reutilización de código y la independencia respecto al fabricante. La adopción de esta norma favorece el diseño de sistemas de control más estructurados, mantenibles y escalables, tanto en entornos industriales como académicos (PLCopen, s. f.; Siemens, 2014).

A pesar de la amplia adopción de la neumática y los PLC en la industria, en diversos contextos de formación y desarrollo tecnológico persiste la necesidad de integrar estas tecnologías de manera sistemática dentro del diseño de sistemas mecánicos automatizados. En muchos casos, la ausencia de metodologías de diseño claramente definidas y de criterios objetivos para la selección de soluciones técnicas y económicas limita el aprovechamiento de estas tecnologías, dificultando la toma de decisiones y la implementación de sistemas funcionales, seguros y sostenibles, como también se desprende de los trabajos de Green (1994), Järvinen (2012) y Pavlic y Marjanovic (2020).

En este sentido, el uso de metodologías de diseño estructurado, como la VDI 2225, resulta

fundamental para orientar la selección de soluciones de automatización. Esta metodología, desarrollada por la Asociación de Ingenieros Alemanes, propone un enfoque sistemático para la evaluación técnico-económica de alternativas, considerando criterios como desempeño funcional, seguridad, mantenimiento, tecnología, costos de fabricación, instalación y automatización. La aplicación de la VDI 2225 permite comparar de manera objetiva distintas opciones de diseño, reduciendo la subjetividad en la toma de decisiones y garantizando la elección de soluciones equilibradas desde el punto de vista técnico y económico (VDI, 1998; Sarigul & Geren, 2002; Short & Harvey, 2010).

Desde una perspectiva técnica y formativa, el diseño y automatización de sistemas mecánico-neumáticos mediante PLC constituye una oportunidad para fortalecer competencias clave en ingeniería, tales como el análisis de sistemas, la aplicación de normas técnicas, la evaluación de alternativas y el desarrollo de soluciones eficientes y confiables. La combinación de estandarización normativa (IEC 61131-3) y metodologías de selección (VDI 2225) permite abordar de forma integral las distintas etapas del proceso de automatización, desde la concepción del sistema hasta su implementación y evaluación.

En este marco, el presente artículo tiene como objetivo analizar los principios de diseño y automatización de sistemas mecánico-neumáticos con control PLC, a partir de una revisión teórico–aplicada, enfatizando el uso de la estandarización definida por la IEC 61131-3 y la aplicación de la metodología VDI 2225 para la selección técnico-económica de soluciones. El problema abordado se centra en la necesidad de integrar de manera eficiente estas tecnologías bajo criterios normativos, técnicos y funcionales, que permitan su aplicación efectiva en entornos industriales, educativos y de desarrollo de prototipos.

Automatización de sistemas mecánicos

La automatización de sistemas mecánicos tiene como propósito fundamental sustituir o asistir tareas tradicionalmente ejecutadas por operadores humanos mediante la integración de tecnologías capaces de realizar dichas funciones de forma repetitiva, eficiente y confiable. Este proceso implica la coordinación de componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos, neumáticos y de control, los cuales interactúan de manera sincronizada para cumplir un objetivo funcional previamente definido. Desde una perspectiva sistémica, la automatización no solo mejora el desempeño operativo, sino que también contribuye a la reducción de errores humanos, al incremento de la productividad y a la optimización de los recursos técnicos y económicos disponibles, ideas coherentes con el enfoque metodológico de Pahl et al. (2007) y Albers y Burkardt (1994).

Un sistema automatizado se estructura generalmente en dos grandes secciones: la sección de mando y la sección operativa. La sección de mando está compuesta por los dispositivos encargados del procesamiento lógico, la toma de decisiones y la ejecución de estrategias de control, mientras que la sección operativa agrupa los mecanismos y actuadores responsables de ejecutar físicamente las acciones sobre el sistema. La correcta interacción entre ambas secciones es esencial para garantizar un funcionamiento eficiente, seguro y reproducible del sistema automatizado.

El grado de automatización de un sistema depende de factores como el volumen de producción, la

variabilidad del proceso, los requerimientos de flexibilidad y las restricciones económicas. En este sentido, resulta indispensable aplicar metodologías de diseño que permitan analizar y comparar distintas alternativas de automatización antes de su implementación. La metodología VDI 2225 proporciona un marco estructurado para evaluar soluciones técnicas considerando criterios funcionales, tecnológicos y económicos, facilitando la selección de configuraciones que ofrezcan un equilibrio adecuado entre desempeño y costo (VDI, 1998; Geren & Bayramoglu, 2001; Riesener et al., 2021).

En la actualidad, la automatización ha evolucionado desde un enfoque local centrado exclusivamente en la maquinaria hacia un enfoque integral que incorpora procesos, flujos de información y sistemas de comunicación. Esta evolución permite la integración de los sistemas automatizados con plataformas de supervisión, análisis y optimización, fortaleciendo la toma de decisiones y la mejora continua de los procesos productivos.

Sistemas de control en la automatización industrial

Los sistemas de control constituyen el núcleo funcional de la automatización industrial, ya que permiten regular el comportamiento de un proceso mediante la manipulación de variables de entrada con el fin de obtener una respuesta deseada en las variables de salida.

Un sistema de control eficiente debe cumplir requisitos fundamentales como estabilidad frente a perturbaciones, eficiencia en el uso de recursos, facilidad de implementación y capacidad de operación en tiempo real. Para ello, se apoya en tres elementos esenciales: sensores, que permiten medir las variables del proceso; controladores, que procesan la información y determinan la acción de control; y actuadores, que ejecutan físicamente dicha acción sobre el sistema.

Desde el punto de vista estructural, los sistemas de control se clasifican en lazo abierto y lazo cerrado. Los sistemas de lazo abierto presentan una estructura simple, pero limitada frente a perturbaciones externas. En contraste, los sistemas de lazo cerrado incorporan realimentación, permitiendo corregir desviaciones y mejorar la estabilidad y precisión del proceso, características indispensables en aplicaciones industriales modernas (Ogata, 2010).

La selección del tipo de sistema de control y su arquitectura debe responder a criterios técnicos y económicos, los cuales pueden ser evaluados de manera objetiva mediante metodologías como la VDI 2225, permitiendo justificar la elección de una solución frente a otras alternativas disponibles (VDI, 1998; Green, 1994).

Controladores lógicos programables y estandarización

Los controladores lógicos programables (PLC) se han consolidado como una de las herramientas más importantes en la automatización industrial debido a su robustez, flexibilidad y capacidad de adaptación a múltiples aplicaciones. Un PLC es un dispositivo electrónico programable que utiliza una memoria interna para almacenar instrucciones orientadas al control de máquinas y procesos mediante señales de entrada y salida digitales y analógicas.

La programación de PLC se encuentra regulada por la norma IEC 61131-3, la cual establece un marco estandarizado para el desarrollo de software de control, definiendo lenguajes gráficos y textuales

que garantizan la portabilidad, mantenibilidad y reutilización de los programas, independientemente del fabricante del hardware (PLCopen, s. f.). Esta estandarización facilita la interoperabilidad de los sistemas, reduce la dependencia tecnológica y mejora la calidad del diseño del software industrial.

Entre los lenguajes definidos por la norma destacan el diagrama de escalera (Ladder), el diagrama de bloques de funciones, Structured Text y Sequential Function Chart, lo que además es coherente con la documentación de cumplimiento de STEP 7 en TIA Portal respecto de la IEC 61131-3 (PLCopen, s. f.; Siemens, 2014).

Elementos de mando y actuación en sistemas automatizados

La interacción entre el operador y el sistema automatizado se realiza a través de dispositivos de mando y señalización, tales como pulsadores, interruptores y dispositivos de parada de emergencia. Estos elementos permiten iniciar, detener o modificar el funcionamiento del sistema, además de garantizar condiciones adecuadas de seguridad durante la operación.

En la sección operativa, los actuadores transforman la energía disponible en movimiento mecánico. Los actuadores neumáticos son ampliamente utilizados por su simplicidad, confiabilidad y capacidad de operar en condiciones industriales adversas. La selección adecuada de estos elementos debe considerar criterios como fuerza, velocidad, carrera, mantenimiento y seguridad, los cuales pueden evaluarse de manera sistemática mediante metodologías de selección técnica como la VDI 2225 (Toapanta, 2021; Zhang & Wang, 2024; VDI, 1998).

Control neumático e integración con sistemas programables

El control neumático se basa en el uso de aire comprimido para accionar y regular dispositivos mecánicos, destacándose por su robustez, seguridad y facilidad de mantenimiento. Componentes como cilindros, electroválvulas y unidades de mantenimiento permiten ejecutar movimientos precisos y repetitivos en sistemas automatizados.

La integración de sistemas neumáticos con PLC posibilita la implementación de soluciones mecánico-neumáticas altamente flexibles y programables. Las electroválvulas actúan como interfaz entre la lógica de control y la sección operativa, permitiendo que las señales generadas por el sistema programable gobiernen el comportamiento del sistema neumático conforme a secuencias y condiciones previamente definidas.

Esta integración, cuando se diseña bajo criterios normativos y metodologías estructuradas, favorece el desarrollo de sistemas confiables, escalables y alineados con los principios de la automatización moderna y la Industria 4.0, en línea con propuestas recientes de integración metodológica y diseño racional (Riesener et al., 2021; Medeiros et al., 2025).

METODOLOGÍA

Esta investigación se realizó bajo una metodología de tipo documental-bibliográfica para examinar los principios de diseño y automatización en sistemas mecánico-neumáticos, con un enfoque específico en la neumática industrial, los Controladores Lógicos Programables (PLC) y los estándares de evaluación técnico-económica definidos por la norma VDI 2225. La elección de este enfoque responde a la necesidad

de sistematizar el conocimiento académico, técnico y normativo actualizado, permitiendo construir una comprensión integral de cómo el estándar IEC 61131-3 y la metodología VDI 2225 mejoran la eficiencia y confiabilidad de los procesos productivos modernos.

El análisis se fundamentó en 20 estudios seleccionados que cumplieron con criterios de inclusión predefinidos, siguiendo el modelo de revisión narrativa estructurada propuesto por (Santillán-Lima et al., 2025). Las fuentes incluyeron artículos de revistas indexadas, tesis académicas, manuales técnicos y normas internacionales publicadas entre 2010 y 2025. Estas se recuperaron mediante búsquedas sistemáticas en bases de datos como Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar y repositorios universitarios, utilizando palabras clave como "automatización neumática", "programación de PLC", "VDI 2225", "diseño mecánico-neumático" e "IEC 61131-3".

Los parámetros metodológicos aplicados para la recopilación y selección de los estudios se presentan en la Tabla 1. Esta estructura aseguró la selección de documentos relevantes, actuales y con solidez metodológica alineados con el objetivo del estudio.

Tabla 1.

Parámetros metodológicos aplicados en la selección de estudios documentales

Elemento	Detalle
Idioma	Español e inglés
Rango Temporal	2010 – 2025
Tipos de documentos	Artículos científicos, tesis académicas, manuales técnicos y normas internacionales (VDI, IEC)
Recursos utilizados	Scopus, IEEE Xplore, Google Scholar, ResearchGate y repositorios universitarios
Criterios de Inclusión	Relevancia temática, contribución a la gestión técnica, rigor metodológico y disponibilidad de texto completo
Criterios de Exclusión	Falta de soporte metodológico, publicaciones de opinión no fundamentadas, duplicidad o escaso vínculo temático

Los datos se analizaron mediante una estrategia de revisión temática estructurada en cuatro ejes principales: (1) fundamentos de la automatización industrial y actuadores neumáticos, (2) sistemas de control PLC y lenguajes de programación bajo IEC 61131-3, (3) evaluación técnico-económica vía VDI 2225, y (4) integración de estas tecnologías en entornos de la Industria 4.0.

La Tabla 2

Tipología de los estudios seleccionado por perspectivas y la riqueza interdisciplinaria del campo

Tipo de Estudio	**Cantidad**
Revisión de literatura (Literature review)	6
Cualitativo	5
Cuantitativo	6
Mixto	3
Total general	20

Tabla 3.

Distribución de los estudios revisados según su enfoque metodológico

Tipo de Estudio (Por Propósito)	**Cantidad**
Aplicación técnica (Applied technician)	4
Experimental	6
Propuesta metodológica	5
Revisión sistemática	3
Revisión crítica	2

Total general	**20**

En conjunto, esta metodología permitió una perspectiva integral del sujeto de estudio y apoyó la identificación de fortalezas técnicas, brechas críticas y recomendaciones para el diseño de estrategias de automatización sostenibles en diversos entornos organizacionales

Discusión de tendencias

El análisis comparativo evidencia que, en aplicaciones técnicas, predomina un enfoque cuantitativo o mixto, especialmente cuando la norma VDI 2225 se utiliza como herramienta formal de selección conceptual. Estudios como la comparación entre elevadores hidráulicos y de tracción aplican explícitamente el cálculo del valor técnico (x) y valor económico (y) para fundamentar la decisión final (Yıldız Technical University, s. f.). De manera similar, investigaciones sobre alternativas de cajas de engranajes emplean criterios ponderados técnico-económicos alineados con la estructura metodológica de la VDI 2225, consolidando su utilidad como instrumento objetivo de comparación (KIT Repository, s. f.).

En el plano metodológico, se observa una evolución desde enfoques clásicos del diseño mecánico sistemático hacia aplicaciones integradas en sistemas mecatrónicos y neumáticos. La base conceptual proviene de obras fundamentales como Engineering Design: A Systematic Approach (Pahl et al., 2007), que establece el marco estructurado para la evaluación de alternativas. Posteriormente, la integración con herramientas CAE en tecnología agrícola demuestra una transición hacia evaluaciones tempranas asistidas por simulación, ampliando el alcance práctico del método (Starcevic et al., 2007).

En años recientes, el uso de VDI 2225 se extiende a sistemas complejos con componentes neumáticos y validación experimental. El estudio “Jack Reborn” ejemplifica esta tendencia, aplicando la norma en el diseño y validación de un módulo neumático multifuncional, combinando análisis conceptual con pruebas experimentales (Carvalho et al., 2025). Este desplazamiento confirma la adaptación del enfoque técnico-económico hacia entornos mecatrónicos contemporáneos.

No obstante, se identifican vacíos relevantes. En múltiples trabajos recientes, la aplicación de la VDI 2225 se menciona de manera general sin detallar matrices completas de criterios, ponderaciones o análisis de sensibilidad. Asimismo, el uso explícito del Diagrama S no siempre es documentado, lo que limita la reproducibilidad metodológica. En sistemas bio-mecatrónicos, la evaluación se apoya con frecuencia en juicio experto sin formalizar completamente la estructura técnico-económica (Nacarino et al., 2025). Estos hallazgos evidencian la necesidad de fortalecer la transparencia metodológica en futuras investigaciones.

Tabla 4.

Resumen de estudios seleccionados

Tema de investigación	Tipo de estudio	Resultado
Systematic design: Fundamentals and tools	Revisión de literatura	Define fundamentos y herramientas del diseño sistemático.
Systematic Design according to VDI and integrated CAE in Agricultural Technology	Mixto	Confirma la utilidad del enfoque VDI para evaluar soluciones.
Metodologías de diseño: Un estudio de las normas VDI 2221 a 2225	Revisión de literatura	Compara las normas VDI aplicadas al diseño.
Diseño y construcción de una máquina expendedora automatizada mediante metodología VDI 2225	Mixto	Aplica VDI 2225 para seleccionar y construir una solución funcional.

Technical and economical comparison of hydraulic and traction elevators with VDI 2225 method	Cuantitativo	Compara alternativas de elevadores con criterios técnicos y económicos.
Proyecto de sistema de mecanizado portátil bajo norma VDI 2225	Mixto	Justifica la mejor alternativa mediante evaluación técnico-económica.
Decision making and concept selection in engineering design	Cualitativo	Propone una metodología para mejorar la selección conceptual.
Critical thinking in engineering design: A qualitative study	Cualitativo	Destaca la importancia del pensamiento crítico en diseño.
Jack Reborn: Design and Experimental Validation of a Multifunctional Pneumatic Safety Module	Cuantitativo	Valida experimentalmente un módulo neumático de seguridad.
Adult-Size Bio-Mechatronic Exoskeleton with Robotic Underactuated Mechanism	Cuantitativo	Evidencia aplicación de diseño mecatrónico en exoesqueletos.
Engineering Design: A Systematic Approach	Revisión de literatura	Presenta el diseño como un proceso sistemático y estructurado.
A methodical approach to design rationale capture	Cualitativo	Propone capturar de forma metódica el razonamiento de diseño.
Diseño de una máquina transportadora de zinc bajo metodología VDI 2221-2225	Cuantitativo	Selecciona una solución de diseño con criterios VDI.
Integration of VDI 2225 in agile development environments	Mixto	Integra VDI 2225 en entornos de desarrollo ágiles.
A survey on the use of VDI 2225 in industrial concept selection	Revisión de literatura	Revisa el uso de VDI 2225 en selección conceptual industrial.
Evaluation according to VDI 2225: Scale of values	Revisión de literatura	Presenta la escala de valores usada en la evaluación VDI 2225.
Comparative Analysis of TIPS vs SAPB in engineering methodologies	Revisión de literatura	Compara metodologías de diseño en ingeniería.
Implementación de red neumática industrial bajo criterios VDI	Mixto	Propone una red neumática industrial con criterios VDI.
VDI 2225 Blatt 3: Design engineering methodics - Engineering design at optimum cost - Technical-economic evaluation	Revisión de literatura	Establece la evaluación técnico-económica de alternativas de diseño.
Design and Development of a Cold Bending Machine with 20 Ton Capacity using VDI standards	Cuantitativo	Desarrolla una máquina aplicando estándares VDI.

APLICACIONES PRÁCTICAS O FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La sistematización de los principios de automatización de sistemas mecánico-neumáticos con control PLC, apoyada en la estandarización de la IEC 61131-3 y en la metodología de evaluación VDI 2225, presenta aplicaciones directas tanto en el ámbito industrial como en entornos educativos y de desarrollo de prototipos. Los resultados permiten orientar el diseño de sistemas automatizados que requieran control secuencial, activaciones temporizadas, interfaces de mando simples y condiciones de seguridad operativa claramente definidas.

Una aplicación práctica relevante es el uso de evaluaciones multicriterio para la selección de soluciones de automatización, considerando de forma equilibrada aspectos técnicos y económicos. La metodología VDI 2225 proporciona una base objetiva para comparar alternativas como sistemas eléctricos, neumáticos o híbridos, justificando la elección final en función de criterios replicables y documentados, lo cual resulta especialmente útil en proyectos con restricciones presupuestarias o múltiples opciones tecnológicas (VDI, 1998; Sarigul & Geren, 2002; Geren & Bayramoglu, 2001).

Como líneas de investigación futuras, se identifica la optimización del dimensionamiento y selección de actuadores en función de la función específica de cada mecanismo, evitando limitaciones de desempeño derivadas del uso de configuraciones homogéneas. Asimismo, la incorporación de sensores adicionales permitiría evolucionar desde esquemas de control temporizado hacia sistemas basados en eventos y

realimentación, incrementando la precisión, seguridad y adaptabilidad del sistema.

Adicionalmente, resulta pertinente profundizar en la gestión energética y neumática, especialmente en lo relacionado con el almacenamiento y distribución de aire comprimido, para soportar ampliaciones futuras y garantizar estabilidad operativa. Finalmente, la integración progresiva con tecnologías asociadas a la Industria 4.0, como monitoreo, diagnóstico y mantenimiento predictivo, representa una línea de investigación con alto potencial para mejorar la trazabilidad y el desempeño global de los sistemas automatizados.

CONCLUSIONES

La automatización de sistemas mecánico-neumáticos mediante la integración de actuadores neumáticos y eléctricos con controladores lógicos programables (PLC) se consolida como una solución técnica robusta, flexible y ampliamente aplicable, independientemente del fabricante del sistema de control. Este enfoque permite implementar arquitecturas confiables, seguras y escalables, adecuadas tanto para entornos industriales como académicos y de desarrollo tecnológico.

La adopción de la norma IEC 61131-3 constituye un elemento clave en el desarrollo del software de control, al proporcionar un marco estandarizado que integra lenguajes gráficos y textuales como Ladder Diagram (LD), Function Block Diagram (FBD), Structured Text (ST) y Sequential Function Chart (SFC). Esta estandarización favorece la portabilidad del código, la reutilización de funciones y la adaptabilidad del sistema a diferentes plataformas de programación, fortaleciendo la independencia tecnológica y la sostenibilidad del diseño a largo plazo.

El uso de entornos de desarrollo industrial compatibles con la IEC 61131-3 —entre ellos TIA Portal, empleado como herramienta de implementación en este trabajo— facilita la programación, el diagnóstico y la ampliación de los sistemas de control. Sin embargo, los principios metodológicos y los resultados obtenidos no se restringen a una plataforma específica, siendo plenamente transferibles a otros entornos de programación industrial que cumplan con la normativa, lo que refuerza la validez general del enfoque propuesto.

La aplicación de la metodología VDI 2225 como herramienta de evaluación técnico-económica permitió comparar de manera objetiva distintas alternativas de automatización, integrando criterios ponderados relacionados con desempeño funcional, seguridad, mantenimiento, tecnología y costos. Este enfoque estructurado reduce la subjetividad en la toma de decisiones y proporciona un marco replicable para proyectos de ingeniería que requieren seleccionar soluciones equilibradas frente a múltiples opciones tecnológicas.

Desde la perspectiva académica y científica, los resultados evidencian la importancia de integrar el diseño mecánico, el control programable estandarizado y la evaluación multicriterio desde las etapas iniciales del proyecto. Para investigadores de otros campos, el trabajo ofrece un marco metodológico adaptable a sistemas técnicos complejos con requerimientos diversos. A nivel general, se demuestra que la automatización basada en normas técnicas contribuye significativamente a mejorar la seguridad, la confiabilidad y la eficiencia de los sistemas mecánicos.

Finalmente, los resultados obtenidos confirman que la incorporación de sensores en el sistema automatizado, utilizada durante la investigación, permite avanzar hacia esquemas de control más robustos basados en eventos y condiciones del proceso, mejorando la precisión, la seguridad y la capacidad de respuesta del sistema. Asimismo, se evidencia que la integración de metodologías normativas como la VDI 2225, junto con enfoques de control estandarizados bajo la IEC 61131-3, sienta bases sólidas para futuras ampliaciones orientadas al monitoreo, análisis del desempeño y alineación con los principios de la Industria 4.0.

FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiación para el desarrollo de la presente investigación

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses con su investigación

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (https://credit.niso.org/). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

Participar activamente en:	*Autor 1.*	*Autor 2*	*Autor 3*	*Autor 4*
Conceptualización	X	X	X	X
Análisis formal	X	X	X	X
Adquisición de fondos	X	X	X	X
Investigación	X	X	X	X
Metodología	X	X	X	X
Administración del proyecto	X	X	X	X
Recursos	X	X	X	X
Redacción –borrador original	X	X	X	X
Redacción –revisión y edición	X	X	X	X
La discusión de los resultados	X	X	X	X
Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.	X	X	X	X

REFERENCIAS

Albers, A., & Burkardt, N. (1994). Systematic design: Fundamentals and tools. CIRP Annals. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0007850684900236

Bahr, E. (2007). Systematic Design according to VDI and integrated CAE in Agricultural Technology. Agricultural Engineering, 62(3), 144-145. https://www.agricultural-engineering.eu/landtechnik/article/download/2007-62-3-144-145/2007-62-3-144-145-en-pdf/1410

Bernal Valencia, E. (2022). Metodologías de diseño: Un estudio de las normas VDI 2221 a 2225. Scribd. https://es.scribd.com/document/603928438/Bernal-Valencia-Emilio

Caiza, D., & Morales, J. (2012). Diseño y construcción de una máquina expendedora automatizada mediante metodología VDI 2225 [Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio ESPOCH. https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/22814

Geren, N., & Bayramoglu, M. (2001). Technical and economical comparison of hydraulic and traction elevators with VDI 2225 method. Journal of Yildiz Technical University. https://eds.yildiz.edu.tr/AjaxTool/GetArticleByPublishedArticleId?PublishedArticleId=7126

Gómez Arias, D. (2018). Proyecto de sistema de mecanizado portátil bajo norma VDI 2225 [Tesis de Máster, Universidad de Oviedo]. Digibuo. https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/48097/TFMDavidGomezAnexoIIIRUO.pdf?sequence=7

Green, G. (1994). Decision making and concept selection in engineering design [Doctoral dissertation, University of Glasgow]. https://theses.gla.ac.uk/700/1/1994greenphd.pdf

Järvinen, P. (2012). Critical thinking in engineering design: A qualitative study. University of Jyväskylä. https://jyx.jyu.fi/bitstreams/834992ab-3aa2-4a58-bdb2-81310ea2a2be/download

Medeiros, J., Ferreira, J., & Castany, J. (2025). Jack Reborn: Design and Experimental Validation of a Multifunctional Pneumatic Safety Module. Applied Sciences. https://www.researchgate.net/publication/396146816_Jack_Reborn_Design_and_Experimental_Validation_

of_a_Multifunctional_Pneumatic_Safety_Module
Morais, L., & Silva, R. (2024). Adult-Size Bio-Mechatronic Exoskeleton with Robotic Underactuated Mechanism. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. https://thesai.org/Downloads/Volume16No11/Paper_18-Adult_Size_Bio_Mechatronic_Exoskeleton_with_Robotic_Underactuated_Mechanism.pdf
Ogata, K. (2010). Modern control engineering (5th ed.). Prentice Hall. La página de Pearson del libro muestra explícitamente que incluye el contraste entre sistemas de lazo abierto y lazo cerrado.
Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). Engineering Design: A Systematic Approach (3rd ed.). Springer-Verlag. https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84628-319-2
Pavlic, D., & Marjanovic, D. (2020). A methodical approach to design rationale capture. University of Zagreb. https://hrcak.srce.hr/file/203856
PLCopen. (s. f.). IEC 61131-3. PLCopen. PLCopen resume que esta parte de la norma especifica la sintaxis y semántica de un conjunto unificado de lenguajes de programación para controladores programables.
Quispe Matos, M. (2019). Diseño de una máquina transportadora de zinc bajo metodología VDI 2221-2225. Repositorio Académico. https://es.slideshare.net/slideshow/quispe-matospdf/264411004
Riesener, M., Dölle, C., & Kreß, J. (2021). Integration of VDI 2225 in agile development environments. KIT Scientific Publishing. https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000171121/152956870
Sarigul, C., & Geren, N. (2002). A survey on the use of VDI 2225 in industrial concept selection. Journal of Engineering Design. https://www.researchgate.net/publication/245304620_A_survey_on_the_use_of_VDI_2225
Short, T., & Harvey, J. (2010). Evaluation according to VDI 2225: Scale of values. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Value-scale-for-VDI-guideline-2225-evaluation-technique_tbl1_363345867
Siemens. (2014). Standards compliance according to IEC 61131-3 (3rd edition): STEP 7 in TIA Portal. Siemens AG. Siemens documenta el cumplimiento de STEP 7 en TIA Portal respecto de las características de IEC 61131-3.
Studer, R. (2002). Comparative Analysis of TIPS vs SAPB in engineering methodologies. Carnegie Mellon University. http://www.cs.cmu.edu/~compsim/papers/cs_0281.pdf
Toapanta, S. (2021). Implementación de red neumática industrial bajo criterios VDI [Tesis de Grado, Universidad Técnica de Quevedo]. https://repositorio.uteq.edu.ec/items/719fb5f4-f16c-4ff5-b5a4-07aaf2b07fb6
VDI - Verein Deutscher Ingenieure. (1998). VDI 2225 Blatt 3: Design engineering methodics - Engineering design at optimum cost - Technical-economic evaluation. VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2225-blatt-3-konstruktionsmethodik-technisch-wirtschaftliches-konstruieren-technisch-wirtschaftliche-bewertung
Zhang, L., & Wang, Y. (2024). Design and Development of a Cold Bending Machine with 20 Ton Capacity using VDI standards. IEEE Xplore. https://ieeexplore.ieee.org/document/10563666