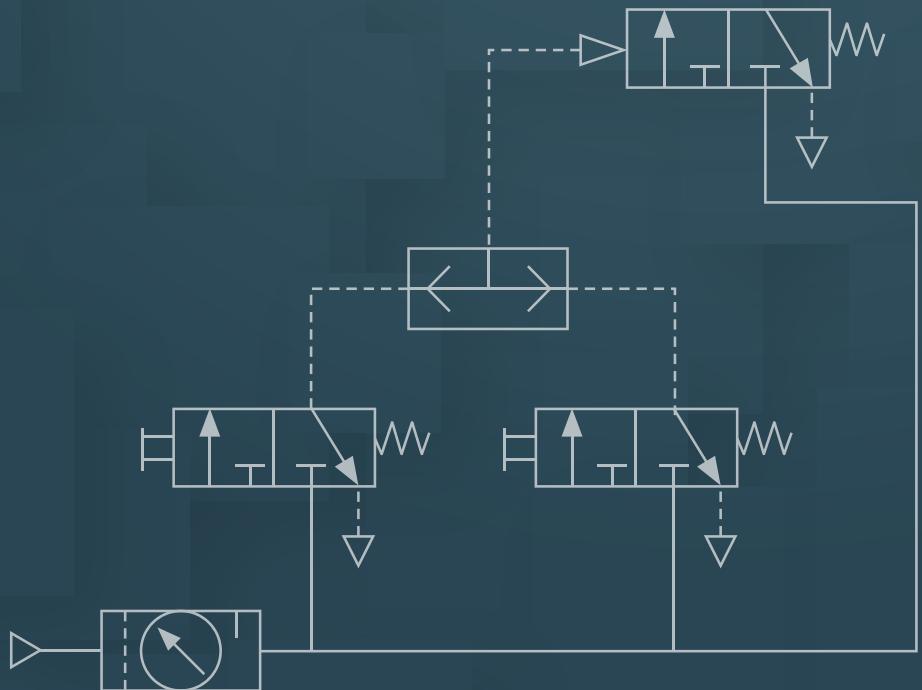


ELECTRONEUMÁTICA APLICADA

Fundamentos, esquemas y sistemas de control
en la automatización industrial



Nilton Zeballos Hurtado • Arturo Cosi Blancas

ELECTRONEUMÁTICA APLICADA

*Fundamentos, esquemas y sistemas de
control en la automatización industrial*

Nilton Zeballos Hurtado • Arturo Cosi Blancas

ELECTRONEUMÁTICA APLICADA

FUNDAMENTOS, ESQUEMAS Y SISTEMAS DE CONTROL EN LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

Copyright 2025 Compañía Editorial
Reservados todos los derechos.
© Editorial QUEYÁM Cía. Ltda.
Pérez de Anda 01-180 y Castillo
Ambato – Ecuador
Teléfono: (+593) 96 239 7155
editorial@queyam.com

PRIMERA EDICIÓN

ISBN: 978-9942-7337-7-1
Fecha de Publicación: 2025-05-25

AUTORES:

- Zeballos Hurtado Nilton Juan
- Cosi Blancas Arturo Jesus

EQUIPO EDITORIAL

Director: Diego Bonilla Jurado
Coordinador editorial: Fernanda Núñez Ambato
Editor Literario: Evelyn Cepeda Cahuatijio
Diseño y Diagramación: Christian Poaquiza Punina
Prologuista: Luis Delfín Bermejo Peralta

REVISORES:

Msc. Mauricio Orlando Gómez Argueta (España)
Msc. Juan Josué Sánchez Vargas (Ecuador)

La redacción de este trabajo, particularmente en los relatos biográficos, se enriqueció mediante el uso de herramientas digitales, en conformidad con los principios éticos establecidos por la UNESCO.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del autor. El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del autor o de sus representantes.



ZEBALLOS HURTADO NILTON JUAN

Graduado en Ingeniería Mecánica Eléctrica por la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, con una Maestría en Educación y Gestión Educativa por la Universidad Privada de Tacna, y Doctorado en Educación por la Universidad César Vallejo. Actualmente, se desempeña como docente principal en la Universidad José Carlos Mariátegui.

A lo largo de su carrera, ha ocupado diversas responsabilidades, tales como: Jefe de la Oficina de Servicios Académicos, Evaluación y Registro Central; Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental; Jefe de la Oficina de Logística y Servicios Generales; Jefe de la Oficina de Extensión y Proyección Universitaria; y Jefe de la Oficina de Economía. Además, ha sido responsable de la gestión de la investigación y, en la actualidad, es Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, así como Coordinador de Investigación de dicha escuela.

Es también miembro del Comité Editorial de la revista *Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*.

Correo: nzeballos@ujcm.edu.pe



COSI BLANCAS ARTURO JESÚS

Realizó estudios en la Universidad San Luis Gonzaga de Ica, donde obtuvo el título de Ingeniero Mecánico Electricista. Inició su carrera docente en la carrera de Mecánica de Producción en el Instituto Tecnológico José Carlos Mariátegui, donde laboró durante un período de 8 años. De manera paralela, comenzó su incursión en la docencia universitaria, y en 2002, a través de un concurso nacional, logró el nombramiento como docente ordinario auxiliar.

Posteriormente, ascendió en su carrera académica y, gracias a su dedicación, logró el ascenso al nivel de docente asociado. En 2010, finalizó sus estudios de doctorado, obteniendo el grado de Doctor en el año 2014.

Correo: arcofe@hotmail.com

Dedicatoria

*Dedicamos esta obra a Dios nuestro señor, por ser
nuestro guía en medio de la oscuridad y nuestro refugio en las
adversidades.*

Agradecimiento

Agradecemos a nuestros familiares y seres queridos, ya que siempre nos apoyaron en nuestros sueños y fueron un gran apoyo en los momentos más difíciles.

CONTENIDO

Prólogo	XIII
Introducción	XV

CAPÍTULO I

LA REVOLUCIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN. DEL AIRE AL CONTROL INTELIGENTE

Fundamentos de la automatización: Lógica cableada vs. lógica de control programada	3
La evolución de los sistemas neumáticos: Fortalezas y limitaciones.....	5
Contextualización teórica y motivaciones que guiaron esta obra	8
Claves conceptuales iniciales: Simplicidad e interoperabilidad	10

CAPÍTULO II

ENTENDER PARA TRANSFORMAR. PERSPECTIVAS TEÓRICAS Y CONCEPTUALES

Electrónica, neumática y automatización: Un triángulo productivo	17
La electroneumática en la literatura científica reciente	22
Conceptos esenciales para el análisis: Energía, turbomáquinas, eficiencia	24

CAPÍTULO III

DISEÑAR EL ANÁLISIS. ESTRATEGIA METODOLÓGICA Y ENFOQUE DE ESTUDIO

Enfoque de investigación: Visión descriptiva y sistemática	29
Selección de fuentes: Población, criterios y muestra.....	30
Estrategias de recolección: Observación científica y fichaje.....	31
Procesamiento de datos: Análisis de contenido e interpretación estructurada.....	33
Reflexiones sobre el proceso metodológico	34

CAPÍTULO IV

EL LENGUAJE DE LAS MÁQUINAS. RESULTADOS, APLICACIONES Y ESQUEMAS

Accionamientos neumáticos y mandos directos: Fundamentos y ejemplos	39
Mandos indirectos o servopilotaje: Innovación en la comutación	44
Diseño y simbología de válvulas: Centralización, identificación y estandarización	48
La electroneumática en acción: Análisis de esquemas secuenciales reales	67

CAPÍTULO V

REFLEXIONES FINALES Y PROYECCIONES

Síntesis de hallazgos: El valor de la electroneumática en la automatización	73
Epílogo	81
Referencias Bibliográficas	83

ANEXOS

Anexo I	91
Anexo II	92
Anexo III.....	93
Anexo IV.....	94

Prólogo

Hoy en día nuestro mundo se ve afectado por enormes cambios, los cuales hacen que nuestra propia conducta sea motivo de evaluación, no solo individualmente, sino también a nivel de nuestra sociedad debemos cuestionarnos, entendiendo que, al ser parte de este mundo, debemos colaborar con las futuras generaciones, poniendo nuestro granito de arena para hacerlo mejor, mas solidario, mas inclusivo, mas tolerante. La lectura y la escritura son dos bellas maneras de hacer de nuestra tierra un mejor lugar para vivir y es por ello que debemos alegrarnos por nuestros colegas, catedráticos de la Universidad José Carlos Mariátegui que han podido redactar este libro que sin lugar a dudas contribuirá a la cultura de nuestro país, a enriquecer las mentes de nuestros estudiantes y a hacer de este mundo un lugar más bello para vivir.

Dr. Luis Delfín Bermejo Peralta
Rector de la Universidad José Carlos Mariátegui

Introducción

En un mundo industrial cada vez más automatizado, la necesidad de tecnologías que combinen eficiencia operativa, precisión lógica y economía de implementación se vuelve imperativa. La electroneumática ha emergido como una solución intermedia pero altamente poderosa, capaz de articular la simplicidad y robustez de los sistemas neumáticos con la flexibilidad y el control propio de los sistemas eléctricos. Esta obra nace como una respuesta a esa necesidad, y también como una propuesta de comprensión profunda, sistemática y aplicada de esta tecnología.

Lejos de limitarse a un manual técnico o a un texto meramente descriptivo, este libro ha sido concebido como un recorrido estructurado que articula fundamentos teóricos, estrategias metodológicas, esquemas funcionales y análisis interpretativo, orientado tanto a lectores en formación como a profesionales en ejercicio. A lo largo de la obra, los principios teóricos fundamentales se complementan con un estudio de caso práctico, que aplica los conceptos discutidos para proporcionar una visión más clara de cómo se implementan.

El contenido se organiza en cinco capítulos, cada uno de los cuales responde a una lógica progresiva, diseñada para ir desde la contextualización del problema hasta la aplicación práctica y la reflexión final.

El **Capítulo I**, “*Reconstruir un problema. Fundamentos de una transición tecnológica*”, explora el origen y la motivación de esta obra, partiendo del análisis de las limitaciones de los sistemas neumáticos tradicionales y el surgimiento de la electroneumática como solución evolutiva. Se abordan aquí las preguntas orientadoras del estudio, los propósitos técnicos y estratégicos, y las variables fundamentales que guían el análisis.

En el **Capítulo II**, “*Perspectivas teóricas para interpretar el fenómeno*”, se establece el marco conceptual de la electroneumática. Se abordan tanto sus principios funcionales como su tratamiento en la literatura científica reciente, integrando categorías clave como simplicidad estructural e interoperabilidad funcional. Este capítulo ofrece, además, una visión de los sistemas híbridos como expresión de una evolución tecnológica convergente.

El **Capítulo III**, “*Diseñar el análisis. Estrategia metodológica y enfoque de estudio*”, describe con detalle el enfoque investigativo que da sustento a la obra. Desde la selección de fuentes y la técnica de fichaje analítico, hasta el procesamiento sistemático de la información, este apartado pone en evidencia el rigor con que ha sido estructurada la revisión y permite legitimar los hallazgos que se presentan posteriormente.

En el **Capítulo IV**, “*El lenguaje de las máquinas. Resultados, aplicaciones y esquemas*”, se presenta el núcleo operativo del libro. A través de esquemas detallados, ejemplos funcionales y análisis secuenciales, se evidencian las aplicaciones reales de la electroneumática en distintos contextos. Se abordan temas como mandos directos e indirectos, enclavamientos, sensores, relés, simbología, autorretención y secuencias automatizadas, constituyéndose en una guía visual y funcional de referencia.

El **Capítulo V**, “*Reflexiones finales y proyecciones*”, cierra la obra con una visión crítica y prospectiva. Se sintetizan los hallazgos centrales, se plantean recomendaciones para la formación técnica, la práctica profesional y la investigación futura, y se propone una mirada abierta sobre los desafíos y oportunidades que presenta esta tecnología en el marco de la automatización moderna.

Este libro ha sido concebido para servir como una herramienta académica, formativa y técnica. Puede ser utilizado por estudiantes de ingeniería y tecnología, docentes de automatización, técnicos en mantenimiento, ingenieros de planta, y diseñadores de sistemas, así como por investigadores interesados en la evolución de los sistemas de control neumático y su transición hacia entornos más inteligentes.

Más allá de su contenido técnico, esta obra busca ofrecer una invitación al pensamiento lógico, a la planificación funcional y al análisis riguroso de los sistemas que componen el lenguaje silencioso pero esencial de las máquinas. La electroneumática, como aquí se propone, no es solo un conjunto de dispositivos, sino una forma de comprender, estructurar y transformar los procesos que dan forma a la industria contemporánea.

Capítulo I

LA REVOLUCIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN. DEL AIRE AL CONTROL INTELIGENTE

FUNDAMENTOS DE LA AUTOMATIZACIÓN: LÓGICA CABLEADA VS. LÓGICA DE CONTROL PROGRAMADA

En el campo de la automatización industrial, la evolución de los sistemas de control ha sido un proceso progresivo. Desde los primeros sistemas de control basados en lógica cableada hasta las sofisticadas soluciones que emplean control programado, ha existido una transición que ha permitido aumentar la eficiencia, flexibilidad y precisión de los sistemas productivos.

- 1. Lógica Cableada:** Aunque este método tiene limitaciones en términos de flexibilidad y escalabilidad, fue clave en el desarrollo de sistemas automatizados en la era pre-digital, siendo los sistemas secuenciales su aplicación más destacada.

A lo largo de la historia de la automatización, la necesidad de flexibilidad y adaptabilidad en el control de procesos industriales llevó a la introducción de teorías de control más complejas, como la lógica de control programada. En este contexto, el control secuencial y las teorías de sistemas automáticos permitieron a los ingenieros diseñar procesos más dinámicos y adaptativos, lo que a su vez dio paso a la evolución hacia tecnologías más avanzadas como los PLC.

- 2. Lógica de Control Programada:** Con la llegada de los Controladores Lógicos Programables (PLC) y otros sistemas digitales, la lógica programada surgió como una solución más avanzada. En lugar de depender de conexiones

físicas fijas, la lógica de control programada permite a los ingenieros escribir un conjunto de instrucciones en un programa para controlar el comportamiento del sistema. Esto proporciona una mayor flexibilidad y facilidad para modificar o expandir los sistemas, permitiendo su adaptación a nuevas necesidades o cambios en los procesos productivos. A través de programación, se pueden controlar sistemas más complejos y con mayor precisión, además de integrarse fácilmente con otras tecnologías, como la electrónica, la robótica y la neumática.

Relación entre las técnicas clásicas y los avances modernos

Aunque la lógica cableada y la lógica de control programada pueden parecer enfoques muy distintos, ambas técnicas no son excluyentes. De hecho, cada una tiene su lugar en la automatización industrial moderna. La lógica cableada sigue siendo útil en ciertas aplicaciones donde la simplicidad y la fiabilidad son esenciales, mientras que la lógica programada ofrece la flexibilidad necesaria para adaptarse a los requerimientos dinámicos de los sistemas industriales avanzados.

Es crucial para el lector comprender que estas técnicas clásicas, aunque menos prevalentes en el contexto de la automatización moderna, siguen siendo fundamentales para los sistemas de control tradicionales. Su existencia y su conocimiento no solo proporcionan un contexto histórico y práctico, sino que también permiten una comprensión más completa y operativa de los nuevos paradigmas tecnológicos en automatización.

LA EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS NEUMÁTICOS: FORTALEZAS Y LIMITACIONES

Desde los albores de la automatización industrial, los sistemas neumáticos han desempeñado un papel fundamental en el accionamiento de máquinas y dispositivos, convirtiéndose en una tecnología ampliamente adoptada por su sencillez, bajo costo relativo y fiabilidad operativa.¹ La naturaleza mecánica y directa de estos sistemas los hizo altamente valorados en un contexto en el que la prioridad era la robustez y la facilidad de mantenimiento. No obstante, el escenario actual de la industria demanda niveles superiores de precisión, flexibilidad y eficiencia energética, desafíos ante los cuales los sistemas neumáticos tradicionales comienzan a mostrar importantes limitaciones.

Una de las principales fortalezas de la neumática radica en su simplicidad estructural.² Los componentes neumáticos, en general, presentan un diseño compacto, con una buena relación potencia-peso, lo que facilita su integración en diversos entornos productivos.³ Además, su mantenimiento es sencillo y económico, y su durabilidad ha sido ampliamente demostrada a lo largo del tiempo. Sin embargo, esta misma simplicidad puede convertirse en un factor limitante cuando se requiere un control más fino y adaptable, especialmente en procesos que implican secuencias complejas o sincronización con otros sistemas de automatización.⁴

El suministro de aire comprimido, indispensable para el funcionamiento de estos dispositivos, supone un consumo energético considerable y una infraestructura complementaria que puede no ser óptima desde la perspectiva del ahorro energético.⁵ Además, en un contexto donde la sostenibilidad energética y la eficiencia operativa se han convertido en ejes prioritarios, el coste de producción, tratamiento y distribución del aire comprimido representa un factor que debe reevaluarse.^{2,6}

Ante estas limitaciones, la electroneumática emerge como una evolución tecnológica que integra la capacidad de control preciso de

los sistemas eléctricos con la fuerza y velocidad de respuesta de la neumática.⁷ Este salto no es meramente técnico, sino paradigmático: introduce un enfoque en el cual el control lógico, la automatización avanzada y la interoperabilidad entre sistemas cobran protagonismo. La incorporación de controladores programables (PLC), sensores inteligentes y dispositivos híbridos ha dado paso a un nuevo ecosistema productivo más ágil, adaptativo y eficiente.⁸

Este proceso de transición no se da por sustitución simple, sino por la necesidad de superar los retos que los sistemas exclusivamente neumáticos ya no pueden resolver con suficiencia. En este sentido, el presente estudio no solo documenta esta evolución, sino que analiza críticamente sus implicaciones y proyecta su relevancia en el marco de los procesos industriales contemporáneos, donde la inteligencia de los sistemas y la optimización de recursos son más que una tendencia: son una exigencia del desarrollo tecnológico sostenible.

El surgimiento de los sistemas electroneumáticos como solución tecnológica

La creciente complejidad de los procesos industriales ha impulsado el desarrollo de tecnologías que, más allá de ofrecer fuerza y movimiento, permitan una gestión inteligente, segura y eficiente de los recursos.⁹ En este contexto, los sistemas electroneumáticos han ganado protagonismo como una solución intermedia y estratégica entre la robustez de la neumática y la precisión de la electrónica. Lejos de ser una tecnología incipiente, la electroneumática representa una maduración técnica que responde directamente a las demandas emergentes de automatización flexible y conectividad funcional.¹⁰

El paso de los sistemas puramente neumáticos hacia configuraciones electroneumáticas no se produjo por azar, sino por la necesidad de superar limitaciones estructurales asociadas a la falta de control secuencial, la rigidez operativa y el elevado consumo energético inherente al uso exclusivo de aire comprimido.¹¹ A diferencia de la neumá-

tica tradicional, en los sistemas electroneumáticos, la activación y el control de los actuadores se realiza mediante señales eléctricas, lo que permite integrar dispositivos de mando, sensores, temporizadores y lógica programada con una precisión y una capacidad de secuenciación notablemente superior.¹²

Uno de los aspectos más destacados de esta transición tecnológica radica en la incorporación del control eléctrico como interfaz entre el operador humano y el sistema físico.¹³ Esto permite una mayor modularidad en el diseño de procesos, facilita la retroalimentación del sistema en tiempo real, y optimiza el consumo de recursos mediante una gestión más precisa del flujo de trabajo.¹⁴ Además, la electroneumática amplía las posibilidades de supervisión remota, integración con sistemas ciberfísicos y adaptación a los entornos de la industria 4.0.

La evolución hacia la electroneumática también debe entenderse como parte de un proceso más amplio de convergencia tecnológica, en el cual las fronteras entre las disciplinas mecánica, eléctrica, electrónica y digital tienden a diluirse.² Esta fusión se traduce en un nuevo paradigma de automatización industrial en el que la interoperabilidad, la eficiencia energética y la flexibilidad de respuesta son elementos clave.

En suma, los sistemas electroneumáticos no solo constituyen una mejora técnica respecto a sus antecesores, sino que representan un cambio cualitativo en la forma de concebir el control de procesos industriales. Su adopción responde tanto a la necesidad de adaptabilidad operativa como al objetivo estratégico de mejorar la eficiencia productiva, reducir costos en el largo plazo y cumplir con los estándares tecnológicos y ambientales del presente.^{7,15}

CONTEXTUALIZACIÓN TEÓRICA Y MOTIVACIONES QUE GUIARON ESTA OBRA

El desarrollo de esta obra se originó en la necesidad de comprender, desde una perspectiva técnica, científica y aplicada, los fundamentos, ventajas y desafíos asociados al uso de sistemas electroneumáticos en contextos industriales automatizados. La electroneumática, como disciplina híbrida entre la neumática clásica y los sistemas de control eléctrico, plantea una serie de interrogantes sustantivos que no solo tienen implicancia tecnológica, sino también metodológica y estratégica en el ámbito de la producción industrial moderna.

Una de las principales motivaciones que impulsó este estudio fue la percepción de que, a pesar de su creciente utilización, los sistemas electroneumáticos aún no han sido suficientemente abordados desde un análisis integral que articule su estructura funcional, su impacto en los procesos automatizados y su potencial de mejora continua en términos de eficiencia y adaptabilidad. Se identificó así una oportunidad para explorar con mayor profundidad el funcionamiento, la evolución y la aplicabilidad de estos sistemas, no solo desde una lógica descriptiva, sino a través de un análisis fundamentado en datos científicos.

En este contexto, se plantea la siguiente pregunta central como eje fundamental del análisis:

¿Cuáles son las capacidades, limitaciones y áreas problemáticas identificadas en los sistemas neumáticos tradicionales que llevaron al desarrollo y evolución de los sistemas de control electroneumáticos?

Este planteamiento teórico da lugar a una serie de cuestiones complementarias, que incluyen:

- ¿Qué ventajas operativas ofrece la electroneumática en comparación con los sistemas tradicionales de control?
- ¿De qué manera influyen factores como la simplicidad tecnológica y la interoperabilidad en la eficiencia de los sistemas automatizados en general?

- ¿Qué avances científicos recientes se han generado en torno a esta tecnología en el ámbito académico y profesional?

Estas preguntas orientaron la formulación de los objetivos teóricos y la elección de enfoques conceptuales, estableciendo un marco claro para el análisis crítico y la reflexión académica sobre el tema. Más allá de abordar cuestiones técnicas, estas inquietudes reflejan la intención de aportar al conocimiento teórico en ingeniería, ofreciendo herramientas conceptuales que faciliten la comprensión y el desarrollo de soluciones en contextos donde la automatización y la innovación tecnológica son factores clave para el avance y la competitividad industrial.

De lo técnico a lo estratégico

La motivación técnica que dio origen a esta obra se transforma, progresivamente, en una reflexión estratégica sobre el papel de los sistemas electroneumáticos en la configuración de una industria más eficiente, precisa y adaptable. Si bien el análisis parte de una necesidad de comprender en profundidad el funcionamiento de esta tecnología, su alcance trasciende lo meramente descriptivo para situarse en un plano de proyección y toma de decisiones fundamentadas en evidencia.

El propósito de este análisis es doble. Por un lado, busca sistematizar el conocimiento existente acerca de los sistemas electroneumáticos a partir de una revisión rigurosa de la literatura científica especializada, especialmente aquella generada en los últimos cinco años. Este enfoque permite identificar tendencias, validar supuestos y reconocer aportes clave sobre las aplicaciones, ventajas y limitaciones de esta tecnología en los procesos industriales. El método bibliométrico y cienciométrico empleado no solo garantiza un marco de objetividad, sino que posibilita una lectura estructurada del desarrollo temático en el campo.

Por otro lado, la obra pretende ser una guía de referencia para ingenieros, técnicos, docentes y estudiantes vinculados a los procesos de

automatización. En este sentido, no se limita a exponer información técnica, sino que proporciona herramientas de análisis que permiten comprender el valor estratégico de la electroneumática en el diseño e implementación de sistemas industriales. La eficiencia energética, la precisión operativa, la capacidad de respuesta ante variaciones del entorno y la facilidad de integración con tecnologías digitales son aspectos que deben ser considerados no solo en términos técnicos, sino también desde una perspectiva de sostenibilidad y competitividad.

El análisis se orienta, por tanto, a generar un conocimiento aplicable, que sirva de base para nuevas investigaciones, desarrollos experimentales o decisiones de implementación tecnológica. Se trata de un estudio que invita a repensar el lugar de la electroneumática dentro del ecosistema industrial contemporáneo, no como una simple alternativa técnica, sino como una solución estratégica alineada con los principios de la automatización avanzada y la transformación digital.

CLAVES CONCEPTUALES INICIALES: SIMPLICIDAD E INTEROPERABILIDAD

Dentro del análisis técnico y científico de los sistemas electroneumáticos, dos conceptos emergen como pilares fundamentales para comprender su valor funcional en los entornos automatizados contemporáneos: la simplicidad tecnológica y la interoperabilidad sistémica. Estas nociones no son meramente operativas, sino que constituyen criterios estratégicos que permiten evaluar la pertinencia, eficiencia y adaptabilidad de los sistemas de control en contextos industriales complejos.

La simplicidad tecnológica, entendida como la capacidad de un sistema para operar con un número reducido de componentes, minimizando la complejidad en su instalación, mantenimiento y operación, es una cualidad particularmente valorada en ambientes de alta exigencia productiva.¹⁶ En los sistemas electroneumáticos, esta simplicidad se traduce en esquemas de control más compactos, interfaces más amigas

bles y menor dependencia de configuraciones externas. Esta característica incide directamente en la reducción de errores, el acortamiento de tiempos de respuesta y la mejora en la disponibilidad operativa de los equipos.^{16, 17}

Por su parte, la interoperabilidad refiere a la capacidad que tienen los elementos del sistema para integrarse y comunicarse entre sí, sin requerir dispositivos adicionales o adaptaciones complejas.¹⁸ En el contexto de la automatización industrial, esta propiedad se convierte en un factor determinante para la escalabilidad de los procesos, permitiendo que distintos componentes –como sensores, válvulas, actuadores y controladores programables– trabajen de manera armónica dentro de un mismo esquema de control. Además, facilita la integración con plataformas digitales, entornos de supervisión remota y sistemas ciberfísicos propios de la Industria 4.0.¹⁹

Ambas variables, simplicidad e interoperabilidad, no solo configuran los atributos técnicos del sistema, sino que se erigen como indicadores clave de su desempeño y viabilidad en escenarios reales de aplicación. Su valoración adecuada no puede limitarse a una observación empírica o intuitiva, sino que exige una conceptualización precisa y una metodología que permita evaluarlas de forma objetiva.⁸ Por ello, estas categorías fueron definidas, operacionalizadas y tratadas como ejes de análisis en la presente obra, con el propósito de establecer criterios técnicos claros que sustenten las decisiones en materia de automatización y control industrial.

La comprensión del funcionamiento, ventajas y proyección de los sistemas electroneumáticos requiere una base teórica que articule principios de diversas disciplinas: la neumática, la electricidad, la electrónica y, más recientemente, la automatización digital.²⁰ La intersección de estos campos no solo enriquece la comprensión técnica del fenómeno, sino que explica por qué la electroneumática ha logrado posicionarse como una solución eficaz ante los retos de la industria contemporánea.

Uno de los primeros fundamentos a considerar es que la automatización de procesos industriales no puede entenderse de manera

unidimensional.²¹ En los sistemas modernos, la eficiencia no depende exclusivamente de la capacidad de generar movimiento o fuerza, sino de cómo ese movimiento es controlado, adaptado y sincronizado con el resto de la operación. En ese sentido, la integración de señales eléctricas como medio de control —en combinación con el trabajo mecánico de los actuadores neumáticos— constituye un principio central de la electroneumática.^{19,22} Esta hibridación permite superar los límites del accionamiento puramente neumático, ofreciendo mayor precisión, velocidad de respuesta y control programado.

Desde la teoría de sistemas de control, se reconoce que los dispositivos de mando eléctrico y electrónico aportan una ventaja significativa al permitir la implementación de lógicas secuenciales y la interconexión con sensores y unidades de procesamiento.²³ Esta capacidad de gestión lógica, sustentada en la transmisión de señales eléctricas, permite optimizar operaciones repetitivas, ajustar parámetros en tiempo real y responder a variaciones del entorno con una eficiencia que los sistemas tradicionales no podían ofrecer.

En paralelo, la literatura científica reciente ha comenzado a registrar con mayor énfasis los beneficios concretos de los sistemas electroneumáticos en diversos sectores industriales. Investigaciones como las de Bristol et al. (2022) o Reyes y Corrales (2023) han documentado mejoras significativas en la precisión, velocidad de ejecución, y flexibilidad de integración, evidenciando además una relación directa entre la implementación de sistemas electroneumáticos y la reducción del consumo de aire comprimido, así como una optimización del consumo eléctrico cuando se emplean elementos de mando eficiente.^{3,13} Por su parte, autores como Markodimitrakis et al. (2022) y Castaño et al. (2023) han demostrado la versatilidad de estos sistemas en aplicaciones que van más allá del entorno fabril, como el control de fluidos o simulaciones biomédicas.^{4,14}

A partir de este cuerpo teórico y empírico se consolida la premisa de que la electroneumática no debe verse como una simple extensión de la neumática tradicional, sino como un campo autónomo y dinámico, con sus propios principios operativos, desafíos técnicos y oportu-

nidades de innovación. Esta obra se construye, precisamente, sobre esa base: un enfoque integrador que reconoce la riqueza conceptual de esta tecnología, y que busca proyectar su aplicabilidad en el marco de una industria cada vez más automatizada, inteligente y sostenible.

Capítulo II

ENTENDER PARA TRANSFORMAR. PERSPECTIVAS TEÓRICAS Y CONCEPTUALES

ELECTRÓNICA, NEUMÁTICA Y AUTOMATIZACIÓN: UN TRIÁNGULO PRODUCTIVO

La automatización industrial contemporánea descansa sobre la confluencia de tres grandes pilares tecnológicos: la neumática, la electrónica y la electricidad.²⁴ Esta tríada, lejos de constituir un conjunto de disciplinas aisladas, configura un sistema sinérgico que ha posibilitado el tránsito hacia procesos productivos más eficientes, precisos y adaptables. En el corazón de esta convergencia se ubica la electroneumática, entendida no como una mera hibridación técnica, sino como un sistema de control avanzado que integra lo mejor de cada uno de estos dominios.

La neumática ha ofrecido históricamente soluciones eficaces para la transmisión de energía mediante aire comprimido, aprovechando su capacidad de generar fuerza y movimiento de manera limpia, rápida y segura.²⁵ Sin embargo, su principal limitación ha radicado en la escasa posibilidad de control detallado de sus variables operativas. Es aquí donde la electricidad —y particularmente la electrónica— han introducido un nuevo paradigma. La posibilidad de emplear señales eléctricas para activar válvulas, controlar actuadores y coordinar procesos ha permitido alcanzar niveles de exactitud y repetibilidad impensables en los sistemas puramente neumáticos.²³

Este cambio se ve reflejado en la implementación de dispositivos de mando eléctrico, temporizadores, sensores, y relés de control, cuya función no es otra que dotar de inteligencia y autonomía a los sistemas de producción. De este modo, el circuito electroneumático deja de ser un simple canal de transmisión de energía para convertirse en un entramado lógico de toma de decisiones, en el que cada componente responde a una secuencia programada o a una condición operativa preestablecida.

En los últimos años, esta articulación tecnológica ha sido objeto de creciente atención en el campo científico. Estudios como el de Bristol et al. (2022) han revelado el papel protagónico de la electro-neumática en el desarrollo de sistemas de automatización industrial de alto rendimiento, destacando su potencial en términos de simplicidad funcional, interoperabilidad entre dispositivos y adaptabilidad a distintos entornos de producción.²⁴ Por su parte, investigaciones como la de Reyes y Corrales (2023) han demostrado empíricamente que estos sistemas superan en eficiencia y capacidad de respuesta a los controles neumáticos tradicionales, además de contribuir a una significativa reducción del consumo de aire y tiempos de ciclo.³

Otros aportes recientes —como el de Castaño et al. (2023)— han llevado estas aplicaciones más allá del ámbito puramente industrial, mostrando la capacidad de los sistemas electroneumáticos para modelar comportamientos dinámicos complejos, como en el caso del control de parámetros viscoelásticos en simulaciones biomédicas.¹⁴ Incluso, se han explorado sus potenciales en entornos de realidad aumentada para la formación profesional, como lo evidencian los trabajos de Sukardio et al. (2023).

Estas contribuciones confirman que la electroneumática no debe ser comprendida como un recurso auxiliar, sino como una plataforma tecnológica de base, capaz de integrarse con los estándares de la automatización avanzada, la robótica industrial y los sistemas inteligentes de producción.²⁶ Su comprensión, por tanto, exige una lectura no sólo técnica, sino también conceptual, que reconozca la magnitud de este triángulo productivo que da forma a la automatización industrial del siglo XXI.

Variables tecnológicas clave: Simplicidad estructural e interoperabilidad funcional

El análisis de los sistemas electroneumáticos desde una perspectiva científica requiere aislar, definir y comprender aquellas variables

que permiten explicar su desempeño dentro de los entornos automatizados. En esta obra, dos conceptos estructuran el enfoque interpretativo: la simplicidad estructural y la interoperabilidad funcional. Estas no solo constituyen características técnicas observables, sino categorías analíticas que permiten valorar la eficiencia, adaptabilidad y sostenibilidad de los sistemas en estudio.

La simplicidad estructural puede ser entendida como la capacidad de un sistema para operar con un mínimo de elementos técnicos sin que ello comprometa su funcionalidad ni su precisión.²⁴ En el ámbito electroneumático, esta simplicidad se expresa en configuraciones compactas, arquitecturas limpias y una reducción en la dependencia de componentes auxiliares. Este principio tiene una clara correlación con la eficiencia operativa, ya que implica menores costos de mantenimiento, menor propensión al fallo, y una curva de aprendizaje más rápida para los usuarios.

Sin embargo, esta simplicidad no debe ser confundida con limitación técnica. Lejos de representar una restricción, actúa como un criterio de diseño estratégico que busca optimizar la relación entre funcionalidad y recursos utilizados. En este sentido, es relevante lo señalado por Reyes y Corrales (2023), quienes evidencian que las soluciones electroneumáticas más efectivas no son las más complejas, sino aquellas que logran mayor rendimiento con configuraciones mínimas pero bien integradas.¹³

Por su parte, la interoperabilidad funcional se refiere a la capacidad de los componentes del sistema para interactuar eficazmente entre sí, independientemente de su origen, marca o nivel de complejidad. Esta propiedad es especialmente valiosa en entornos de automatización progresiva, donde los sistemas deben ser ampliables, adaptables y capaces de coexistir con nuevas tecnologías. En un contexto industrial cada vez más definido por la integración digital, la interoperabilidad deja de ser un valor agregado para convertirse en una condición fundamental para la escalabilidad y la sostenibilidad técnica.

En estudios como el de Bristol et al. (2022), esta variable aparece como un eje recurrente en la literatura especializada. Allí se señala que los sistemas con alta interoperabilidad son los más valorados en procesos de migración tecnológica, especialmente cuando se busca conectar la electroneumática con plataformas de control lógico programable (PLC), redes de sensores industriales o incluso sistemas ciberfísicos.

Ambas variables, en tanto categorías analíticas, operan como indicadores de madurez tecnológica. En la medida en que un sistema electroneumático es más simple en su estructura y más interoperable en su funcionamiento, mayor será su adaptabilidad a distintas lógicas de producción, a cambios en el entorno operativo y a demandas futuras de automatización. Su estudio no responde a una finalidad meramente técnica, sino a la necesidad de construir criterios de evaluación que trasciendan el diseño y se proyecten hacia el impacto real de estas tecnologías en la transformación productiva.

Sistemas híbridos y evolución tecnológica en la automatización industrial

La historia reciente de la automatización industrial puede entenderse como un tránsito progresivo desde sistemas monodisciplinares hacia configuraciones tecnológicas híbridas, en las que convergen distintas formas de energía, control y lógica operativa. En este contexto, la electroneumática se erige como una expresión paradigmática de este proceso de evolución, al conjugar las ventajas propias de los sistemas neumáticos con las capacidades de control y coordinación que ofrece la tecnología eléctrica y electrónica.

El concepto de sistema híbrido, en este marco, no se refiere únicamente a la coexistencia de dispositivos distintos, sino a una integración funcional que permite maximizar el desempeño global del sistema. Este tipo de integración no ocurre de forma arbitraria, sino que responde a una lógica de complementariedad: la neumática aporta velocidad y fuerza mecánica, la electricidad permite activar y desactivar

componentes con rapidez, y la electrónica introduce capacidades de lógica, temporización, retroalimentación y coordinación. El resultado es una arquitectura técnica que supera las limitaciones inherentes a cada sistema cuando opera de manera aislada.

La electroneumática representa, por tanto, una solución evolutiva e inteligente, que ha emergido como respuesta directa a las exigencias de precisión, versatilidad y eficiencia que demanda la industria moderna. La tendencia hacia sistemas más adaptativos, programables y conectados encuentra en esta tecnología un punto de articulación viable, especialmente en aplicaciones donde se requiere control secuencial, seguridad operativa y tiempos de respuesta mínimos.

Este tipo de evolución no se limita a lo técnico. Supone también una transformación epistemológica y profesional, ya que obliga a repensar los procesos de diseño, mantenimiento y gestión de los sistemas automatizados. La formación de los técnicos y los ingenieros debe adaptarse a esta lógica interdisciplinaria, desarrollando competencias que integren saberes de mecánica, electrónica, control y programación.

Asimismo, los sistemas híbridos ofrecen una ventaja estratégica adicional: la modularidad. Al estar compuestos por unidades con funciones diferenciadas pero interoperables, permiten escalabilidad, mantenimiento por bloques, y actualizaciones sin necesidad de redesignar completamente la infraestructura. Esta cualidad es altamente valorada en el marco de la llamada Industria 4.0, donde la flexibilidad y la capacidad de adaptación tecnológica son criterios esenciales para la sostenibilidad operativa.

Desde una perspectiva más amplia, puede afirmarse que la electroneumática no es solamente una evolución técnica de la neumática tradicional, sino una expresión de un nuevo paradigma en la ingeniería de sistemas: el de la automatización convergente, en la cual distintas tecnologías se ensamblan en función de un objetivo común —mejorar la eficiencia, la precisión y la inteligencia de los procesos productivos—, superando los límites que históricamente impusieron las soluciones unidimensionales.

LA ELECTRONEUMÁTICA EN LA LITERATURA CIENTÍFICA RECIENTE

El estudio de los sistemas electroneumáticos ha experimentado un notable crecimiento en la producción académica especializada durante la última década, particularmente a partir del interés por soluciones de automatización más integradas, versátiles y alineadas con los principios de eficiencia energética y digitalización industrial. La literatura científica reciente ha dejado de considerar esta tecnología como un campo meramente instrumental para posicionarla como un objeto de estudio en sí mismo, abordado desde metodologías cuantitativas, aplicaciones experimentales y marcos de análisis orientados a la innovación tecnológica.

Una tendencia destacada en los estudios contemporáneos es la orientación hacia la evaluación sistemática de la electroneumática desde enfoques bibliométricos y cienciométricos, como ha sido ejemplificado por el trabajo de Bristol et al. (2022). Este tipo de estudios no solo permite mapear el crecimiento del campo, sino identificar líneas de investigación dominantes, países líderes en publicaciones, revistas indexadas relevantes y las variables más abordadas. De este modo, se evidencia una consolidación disciplinaria que vincula la electroneumática con los desarrollos en ingeniería mecatrónica, automatización industrial, robótica aplicada y educación técnica.

Por otro lado, una línea emergente en la literatura se enfoca en aplicaciones no convencionales de la electroneumática, como lo muestra el estudio de Castaño et al. (2023), en el que se desarrolla un modelo experimental para simular comportamientos viscoelásticos en entornos biomédicos. Este tipo de contribuciones expanden el horizonte de aplicabilidad más allá de la manufactura tradicional, posicionando a la electroneumática como un recurso viable para el diseño de simuladores, entornos de prueba y dispositivos de precisión en áreas críticas como la medicina y la biomecánica.

Asimismo, los estudios de Markodimitrakis et al. (2022) han explorado la interacción entre superficies controladas mediante presión neumática y campos eléctricos, orientando su investigación hacia la modificación de propiedades físicas de materiales en contextos de microfluídica. Este enfoque revela una apertura disciplinar hacia sectores como la ciencia de materiales y la nanotecnología, en donde la electroneumática aparece como una herramienta de control físico-mecánico con alta especificidad.

En paralelo, investigaciones como la de Sukardio et al. (2023) han puesto el acento en el ámbito educativo, desarrollando entornos de aprendizaje virtual basados en realidad aumentada para la enseñanza práctica de circuitos electroneumáticos. Este giro pedagógico en la literatura refleja no solo una necesidad de formación técnica, sino una preocupación por la actualización metodológica en la enseñanza de la automatización, a través de simuladores interactivos que permiten replicar condiciones reales sin los riesgos y costos del laboratorio físico.²⁷

Finalmente, los trabajos de Reyes y Corrales (2023), centrados en la comparación empírica entre distintos sistemas de control, evidencian un creciente interés por validar experimentalmente los beneficios operativos de la electroneumática frente a otras tecnologías, utilizando herramientas estadísticas y pruebas de desempeño cuantitativo. Este tipo de estudios promueven una cultura evaluativa rigurosa, indispensable para sustentar la toma de decisiones en contextos de producción automatizada.¹³

En conjunto, la literatura más reciente sugiere que la electroneumática ha dejado de ser un campo marginal o puramente técnico para convertirse en un espacio de innovación, análisis transversal y aplicación estratégica, cuya expansión abarca desde la investigación científica hasta la formación profesional y el rediseño de procesos industriales complejos.

CONCEPTOS ESENCIALES PARA EL ANÁLISIS: ENERGÍA, TURBOMÁQUINAS, EFICIENCIA

El estudio de los sistemas electroneumáticos exige una apropiación precisa de ciertos conceptos técnicos que no solo forman parte del vocabulario disciplinar, sino que constituyen la base estructural para interpretar los principios de funcionamiento, transferencia de energía y eficiencia en el diseño de dispositivos automatizados. Entre estos conceptos destacan la energía, las turbomáquinas y el ahorro energético, todos con una relevancia significativa en el marco de los sistemas híbridos de automatización.

El primero de ellos, la energía, se define en términos físicos como la capacidad de un sistema para realizar trabajo.²⁸ En el contexto de la electroneumática, este principio adquiere una dimensión aplicada, ya que el sistema se basa en la conversión de diferentes formas de energía: desde la eléctrica, que activa los elementos de control y mando, hasta la neumática, que produce el trabajo mecánico en los actuadores. Esta doble conversión requiere no solo una comprensión técnica, sino también un análisis de eficiencia, ya que cada transformación conlleva una inevitable pérdida de energía útil.²

Las turbomáquinas, por su parte, constituyen un elemento clave dentro del proceso de generación o aprovechamiento de energía en sistemas de automatización.¹ Se trata de dispositivos que permiten intercambiar energía con un fluido, mediante componentes giratorios y estacionarios, y cuya función puede orientarse tanto a la producción (como en el caso de compresores y bombas) como a la extracción de energía (como en turbinas).²⁹ En el ámbito de la electroneumática, el conocimiento funcional de estas máquinas es indispensable, ya que muchas de las aplicaciones dependen del uso eficiente de compresores de aire —elemento vital para la generación de presión neumática—, cuyo rendimiento tiene un impacto directo sobre el consumo energético total del sistema.

En relación con ello, el concepto de ahorro energético adquiere una importancia estratégica. La optimización del uso de energía no es solo un objetivo económico, sino también una exigencia tecnológica y ambiental. La automatización actual exige soluciones que no solo sean funcionales, sino también sostenibles.³⁰ Esto implica reducir el consumo innecesario de aire comprimido, minimizar el tiempo de activación de válvulas y garantizar que los sistemas operen dentro de parámetros de eficiencia que cumplan con normativas de responsabilidad energética. En este sentido, el diseño de circuitos electroneumáticos debe incorporar criterios de eficiencia desde su planificación, mediante el uso de dispositivos de bajo consumo, estrategias de control inteligente y mantenimiento predictivo.³¹

Por último, conceptos como generador eléctrico o sistemas de transmisión también juegan un papel en la comprensión del ecosistema energizado de la electroneumática. Un generador, en tanto dispositivo capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica, permite cerrar el ciclo de autonomía en instalaciones donde se busca operar de forma independiente o bajo principios de autosuficiencia energética.³² Aunque no forma parte directa del sistema electroneumático, su conocimiento es esencial para comprender el encadenamiento de dispositivos que sustentan un entorno automatizado completo.^{30, 33}

En conjunto, estos conceptos no son tratados en esta obra como definiciones estáticas, sino como categorías de análisis dinámico, que permiten comprender cómo opera, evoluciona y se proyecta la electroneumática en función de criterios de rendimiento, sostenibilidad y aplicabilidad técnica.

Capítulo III

DISEÑAR EL ANÁLISIS. ESTRATEGIA METODOLÓGICA Y ENFOQUE DE ESTUDIO

ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN: VISIÓN DESCRIPTIVA Y SISTEMÁTICA

El presente estudio se construyó bajo una lógica metodológica de carácter descriptivo y documental, orientada a examinar sistemáticamente el estado del conocimiento científico en torno a los sistemas electroneumáticos aplicados a la automatización industrial. Esta elección metodológica responde a la necesidad de acceder a una comprensión detallada del fenómeno investigado, no mediante la manipulación experimental de variables, sino a través de un proceso riguroso de identificación, análisis y organización de información contenida en fuentes académicas especializadas.

El carácter descriptivo de la investigación implica que su objetivo no radica en establecer relaciones causales ni en intervenir directamente sobre el objeto de estudio, sino en caracterizarlo con precisión, atendiendo a sus propiedades, principios de funcionamiento, aplicaciones y líneas de desarrollo tecnológico. En otras palabras, el propósito es construir un retrato analítico de la electroneumática como tecnología emergente, reconociendo tanto sus fundamentos estructurales como sus expresiones más recientes en el campo de la ingeniería industrial.

Este enfoque metodológico se articula con una perspectiva sistemática, en la medida en que el proceso de recolección y análisis de la información se llevó a cabo bajo criterios previamente definidos, asegurando la trazabilidad, la validez técnica y la representatividad de los datos obtenidos. El uso de una lógica sistemática permitió organizar los hallazgos en torno a categorías específicas —como simplicidad estructural, interoperabilidad, eficiencia operativa y evolución funcional— que orientaron el desarrollo del cuerpo argumental de esta obra.

El diseño adoptado, de tipo no experimental, permitió trabajar directamente con información secundaria, es decir, aquella contenida en artículos científicos publicados, sin que ello implicara una pérdida de rigurosidad. Por el contrario, la sistematización bibliográfica aplicada en esta investigación ha sido concebida como una herramienta de alta precisión para generar conocimiento válido y transferible, especialmente en campos tecnológicos donde el acceso a entornos de prueba físicos puede ser limitado o costoso.

Este tipo de enfoque no sólo se justifica por la naturaleza del objeto de estudio, sino que además permite trazar un panorama consolidado de la producción científica reciente, lo cual constituye un aporte valioso para investigadores, docentes y profesionales que requieren una visión actualizada, crítica y bien fundamentada sobre la electro-neumática como sistema aplicado a la automatización de procesos.

SELECCIÓN DE FUENTES: POBLACIÓN, CRITERIOS Y MUESTRA

La validez de una investigación de carácter documental descansa, en buena medida, sobre la calidad y relevancia de las fuentes utilizadas. En este estudio, se optó por trabajar con literatura científica reciente, publicada en revistas indexadas de prestigio, con el propósito de asegurar un enfoque actualizado, técnicamente sólido y metodológicamente confiable sobre el fenómeno de estudio: los sistemas electroneumáticos en contextos de automatización industrial.

La población bibliográfica se definió a partir de un universo conformado por 60 artículos científicos, seleccionados por su pertinencia temática y cronológica. Como criterio central de inclusión, se estableció que los estudios analizados debían haber sido publicados en los últimos cinco años, con el fin de garantizar que las aproximaciones conceptuales, técnicas y empíricas reflejen el estado más reciente del conocimiento en el área. Además, las fuentes debían pertenecer

a revistas académicas indexadas en bases de datos reconocidas como Scopus y Scielo, lo que garantiza estándares editoriales de revisión por pares y calidad investigativa.

A partir de esta población inicial, se aplicó un proceso de selección intencionada orientado a la relevancia técnica y científica de los documentos. En esta etapa, se identificaron 10 artículos clave, que fueron seleccionados como muestra definitiva para el análisis profundo. Estos textos fueron elegidos no sólo por su frecuencia de citación o su impacto medible, sino principalmente por la riqueza conceptual y metodológica con la que abordaban el tema de la electroneumática, ya sea desde estudios de caso, análisis comparativos, desarrollos experimentales, aplicaciones educativas o investigaciones cienciométricas.

La lógica de esta muestra no buscó representatividad estadística, sino densidad analítica, es decir, la capacidad de los textos seleccionados para ofrecer aportes sustantivos que nutrieran el marco interpretativo de la obra. En ese sentido, la muestra fue tratada como una unidad estratégica de información cualitativa, sobre la cual se aplicaron posteriormente las técnicas de observación documental y análisis de contenido que permitieron estructurar los hallazgos presentados en los capítulos siguientes.

ESTRATEGIAS DE RECOLECCIÓN: OBSERVACIÓN CIENTÍFICA Y FICHAJE

Para abordar el estudio desde una base metodológica rigurosa, se diseñó una estrategia de recolección centrada en la observación documental sistemática, entendida como el proceso mediante el cual se examina, identifica y registra información contenida en fuentes académicas, siguiendo criterios previamente definidos. Esta técnica, ampliamente utilizada en estudios de tipo cualitativo y descriptivo, permite extraer datos relevantes de la literatura sin alterar el contenido original, respetando su estructura argumental y contexto de publicación.

El procedimiento de observación se orientó a detectar patrones recurrentes, conceptos clave, enfoques teóricos predominantes, y tendencias metodológicas en el conjunto de artículos seleccionados. Se estableció un protocolo de lectura exhaustiva, mediante el cual cada documento fue analizado en función de categorías temáticas previamente delimitadas —tales como sistemas de control, eficiencia, interoperabilidad, simplicidad estructural, aplicaciones prácticas, y evolución tecnológica—. Este enfoque garantizó una exploración profunda del contenido, más allá de una revisión superficial o meramente descriptiva.

Como soporte técnico de esta estrategia se empleó el fichaje analítico, instrumento metodológico que permitió organizar la información recopilada de manera ordenada y funcional. Cada ficha incluyó elementos esenciales como autoría, año de publicación, revista de origen, enfoque del estudio, metodología empleada, hallazgos centrales y conceptos teóricos relevantes. Este sistema no solo facilitó el almacenamiento y recuperación de datos, sino que también permitió establecer comparaciones y relaciones entre distintas investigaciones.

Cabe destacar que el fichaje no se limitó a la extracción de citas textuales, sino que incorporó elementos de síntesis interpretativa, en los cuales se identificaban los aportes del artículo al marco conceptual del presente estudio. Este ejercicio reflexivo fue fundamental para construir un mapa temático coherente que sirviera de base al análisis posterior, sin comprometer la fidelidad de las fuentes ni introducir sesgos interpretativos.

El uso articulado de observación documental y fichas analíticas permitió, en definitiva, estructurar una base empírica sólida, desde la cual se desarrollaron los argumentos, reflexiones y ejemplos prácticos incluidos en los capítulos sustantivos del libro. Esta estrategia respondió tanto a la naturaleza del objeto de estudio como a las exigencias de una investigación basada en la revisión sistemática del conocimiento científico.

PROCESAMIENTO DE DATOS: ANÁLISIS DE CONTENIDO E INTERPRETACIÓN ESTRUCTURADA

Una vez recolectada la información mediante observación documental y fichaje analítico, el proceso metodológico avanzó hacia una etapa crítica: el análisis de contenido. Esta técnica, ampliamente reconocida en el ámbito de las ciencias sociales y la investigación tecnológica, permite interpretar información cualitativa con base en criterios de categorización, frecuencia, relevancia y convergencia temática.

El análisis de contenido empleado no se limitó a la identificación de temas recurrentes, sino que incorporó una estructura de interpretación sistemática, orientada a reconocer patrones, contrastar enfoques y establecer relaciones entre conceptos clave. Para ello, se definieron categorías analíticas derivadas de los objetivos de la obra y de los principales ejes que emergieron de la literatura seleccionada. Estas categorías fueron fundamentales para organizar el cuerpo teórico, construir argumentaciones sólidas y proyectar conclusiones fundamentadas.

Tabla 1. Categorías centrales del análisis de contenido

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	CRITERIOS DE CODIFICACIÓN
Simplicidad estructural	Nivel de optimización del diseño de sistemas electroneumáticos	N.º de componentes, complejidad de montaje, escalabilidad
Interoperabilidad funcional	Capacidad de los sistemas para integrarse con otros dispositivos y plataformas	Compatibilidad, conectividad, adaptación tecnológica
Eficiencia operativa	Desempeño técnico en términos de velocidad, consumo y precisión	Tiempo de respuesta, ahorro energético, exactitud funcional
Aplicaciones prácticas	Ámbitos de uso documentados en los artículos seleccionados	Industria, educación, biomedicina, microfluídica
Avance conceptual y metodológico	Evolución en la forma de estudiar y abordar la electroneumática	Enfoques teóricos, diseños de estudio, herramientas analíticas

Estas categorías fueron utilizadas como base para codificar los contenidos de los artículos analizados, lo cual permitió construir un corpus interpretativo orientado no a la mera acumulación de información, sino a la comprensión crítica del fenómeno investigado.

El análisis incorporó una perspectiva comparativa entre estudios, lo que permitió identificar coincidencias teóricas, divergencias metodológicas y nuevas tendencias emergentes. Esta aproximación enriqueció la interpretación al mostrar cómo diversos enfoques académicos coinciden en reconocer la electroneumática como una solución tecnológica en expansión, aunque aún enfrenta desafíos significativos en términos de integración y sostenibilidad.

Además, se aplicó un principio de triangulación interna, es decir, se contrastaron los hallazgos obtenidos del análisis con las categorías previamente definidas, asegurando así la coherencia entre la información extraída y el marco conceptual de la obra. Esta triangulación fortaleció la validez interpretativa de los resultados y permitió jerarquizar los aportes más relevantes de la literatura.

En suma, el análisis de contenido no se limitó a una etapa intermedia de tratamiento de datos, sino que funcionó como puente reflexivo entre la información recolectada y la construcción argumental del libro. Su valor metodológico radicó en la capacidad de organizar el conocimiento disponible de forma significativa, proyectando una visión crítica, actualizada y técnicamente fundamentada sobre el fenómeno de la electroneumática.

REFLEXIONES SOBRE EL PROCESO METODOLÓGICO

Toda estrategia de investigación, por rigurosa que sea, es también el resultado de decisiones, adaptaciones y aprendizajes que emergen durante el propio desarrollo del estudio. En este caso, la elección de un enfoque descriptivo y no experimental permitió construir un análisis

técnico y argumentativo sólido, basado en la observación sistemática de fuentes científicas. Sin embargo, esta metodología también implicó ciertos desafíos que merecen ser examinados con perspectiva crítica.

Uno de los aspectos más significativos fue la delimitación y depuración del corpus documental. Si bien el acceso a bases de datos académicas como Scopus y Scielo facilitó la identificación de literatura relevante, el proceso de selección exigió criterios muy claros para evitar la dispersión temática y garantizar una muestra coherente. Esta tarea requirió un equilibrio constante entre la amplitud del campo —con múltiples aplicaciones de la electroneumática— y la necesidad de mantener el foco en aquellas publicaciones que ofrecieran profundidad conceptual, rigor metodológico y aplicabilidad a los objetivos de esta obra.

Otro aspecto clave fue la exigencia de mantener la objetividad interpretativa en el análisis de contenido. En investigaciones de carácter documental, existe siempre el riesgo de caer en lecturas sesgadas o en la sobrevaloración de hallazgos que coinciden con las hipótesis del investigador. Para evitar este sesgo, se establecieron procedimientos de categorización previos a la lectura detallada de los textos, así como mecanismos de triangulación interna, lo que permitió garantizar un nivel aceptable de neutralidad metodológica.

Asimismo, el proceso de fichaje analítico reveló una heterogeneidad importante en los enfoques metodológicos utilizados por los autores revisados. Mientras algunos estudios ofrecían datos cuantitativos sólidos y replicables, otros operaban desde lógicas cualitativas, exploratorias o incluso didácticas. Esta diversidad, lejos de representar un obstáculo, fue asumida como una oportunidad para enriquecer el análisis, ya que permitió acceder a múltiples formas de comprender y aplicar la electroneumática en contextos distintos.

Finalmente, es preciso reconocer que el enfoque metodológico adoptado presenta limitaciones inherentes a su naturaleza no experimental. Al no haberse trabajado con prototipos o validaciones empíricas directas, los hallazgos de esta investigación no pretenden sustituir

estudios de campo o simulaciones prácticas. No obstante, al ofrecer una sistematización rigurosa de la producción científica más reciente, el estudio cumple una función estratégica: organizar, analizar y proyectar el conocimiento disponible, facilitando así futuras investigaciones aplicadas que podrán nutrirse de este marco teórico y bibliográfico.

En conjunto, el proceso metodológico seguido en esta obra permitió alcanzar un doble propósito: garantizar la solidez académica del análisis y sostener una narrativa clara, coherente y fundamentada sobre la electroneumática como fenómeno tecnológico y científico. Esta base rigurosa será la que, en los capítulos siguientes, sustentará la presentación e interpretación de los hallazgos, desde una perspectiva técnica y proyectiva.

Capítulo IV

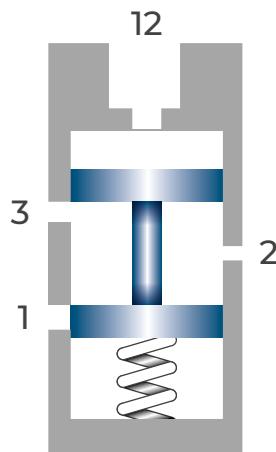
**EL LENGUAJE DE LAS MÁQUINAS.
RESULTADOS, APLICACIONES Y
ESQUEMAS**

ACCIONAMIENTOS NEUMÁTICOS Y MANDOS DIRECTOS: FUNDAMENTOS Y EJEMPLOS

En el universo de la automatización neumática, los accionamientos directos representan una de las formas más simples, pero funcionales, de gobernar el comportamiento de actuadores. Estos sistemas operan mediante la aplicación directa de presión sobre elementos de control, lo cual genera una respuesta inmediata del componente móvil, sin la necesidad de intervención electrónica o lógica externa.

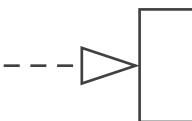
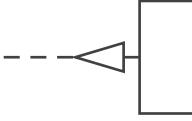
En un esquema típico de mando directo, el aire comprimido ingresa a través de un conducto específico —habitualmente denominado ducto 12—, aplicando presión sobre el émbolo interno de la válvula direccional. Esta presión vence la fuerza de oposición ejercida por el resorte interno, provocando la conmutación del sistema. Cuando el flujo de aire se interrumpe, el resorte devuelve automáticamente al émbolo a su posición original, restableciendo la conexión entre las vías de escape y de reposo.

Figura 1. Válvula 3/2 accionada por mando directo



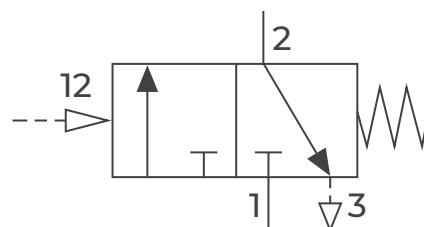
Este principio puede observarse claramente en válvulas del tipo **3/2 normalmente cerradas**, donde la posición de reposo impide el paso de aire hasta que el pulsador sea accionado. En estas condiciones, la presión del aire permite la conexión entre las vías 1 y 2, desplazando el vástagos del actuador. Al cesar la presión, la válvula retorna a su estado inicial, permitiendo la evacuación del aire por la vía 3.

Tabla 2. Accionamientos neumáticos

SÍMBOLO	DENOMINACIÓN
	Por presión
	Por depresión

Adicionalmente, existen configuraciones más sofisticadas dentro del mismo principio de mando directo, como las **válvulas distribuidoras 5/2 biestables**, las cuales permiten comutar entre dos posiciones permanentes mediante la activación alternada de dos entradas de pilotaje neumático. Estas válvulas conservan su última posición hasta que una nueva señal modifica su estado, lo que las convierte en herramientas esenciales en procesos que requieren estabilidad mecánica entre ciclos.

Figura 2. Válvula 3/2 biestable con doble pilotaje neumático



La válvula 3/2 bistable con doble pilotaje neumático, representada en la figura, es un componente fundamental en sistemas neumáticos, especialmente en aquellos donde se requiere un control preciso y confiable. Esta válvula tiene tres puertos y dos posiciones, y su operación se basa en un sistema de pilotaje neumático que permite cambiar su estado de forma estable. En su configuración bistable, la válvula mantiene su posición sin necesidad de una fuente continua de energía, lo que la hace eficiente en términos de consumo energético.

La lógica de funcionamiento de esta válvula puede ser expresada de manera simplificada mediante la ecuación:

$$F = P \times A,$$

donde F es la fuerza de desplazamiento, P la presión del aire, y A el área efectiva del émbolo.

Este fundamento físico permite comprender cómo la válvula convierte la presión del aire en una fuerza que actúa sobre el émbolo, habilitando el control de los diferentes estados de la válvula. La ecuación indica que, a mayor presión o área efectiva del émbolo, mayor será la fuerza generada, lo que es crucial para la correcta operación de la válvula.

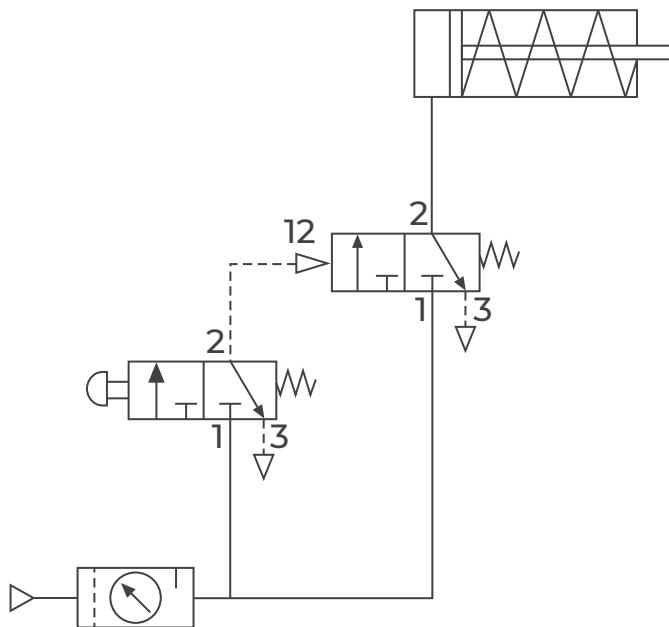
Este principio físico, al ser comprendido y aplicado correctamente, permite diseñar esquemas de control de sistemas neumáticos más confiables y eficientes, que operan bajo control directo sin la necesidad de circuitos de re-realización adicionales. Esto se traduce en un control más sencillo y preciso, adaptado a diversas aplicaciones industriales donde se requiera automatización de procesos con altos estándares de fiabilidad.

Ejemplos funcionales

1) Control de un cilindro de simple efecto con válvula 3/2 NC

En este esquema, al presionar un pulsador manual, se permite el ingreso de aire a través de la vía 12, activando la válvula y extendiendo el vástagos del cilindro. Al soltar el pulsador, el sistema retorna automáticamente a su estado de reposo.

Figura 3. Esquema de control de un cilindro de simple efecto con válvula 3/2, NC

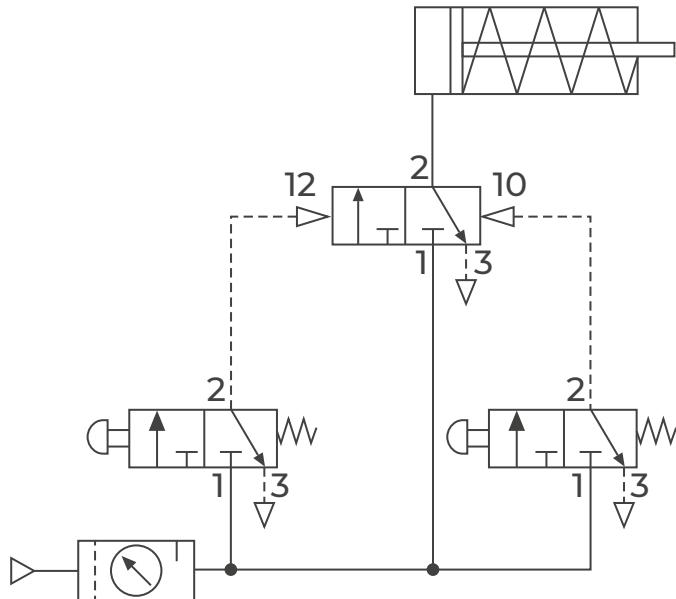


2) Accionamiento de un actuador con válvula 3/2 monostable

A continuación, se presenta un esquema de un circuito neumático compuesto por tres válvulas distribuidoras 3/2 vías, una principal con doble pilotaje neumático y dos secundarias accionadas manualmente, que controlan

un cilindro neumático de simple efecto con retorno por resorte, empleado habitualmente para controlar de forma sencilla la posición del actuador desde distintos puntos del sistema neumático.

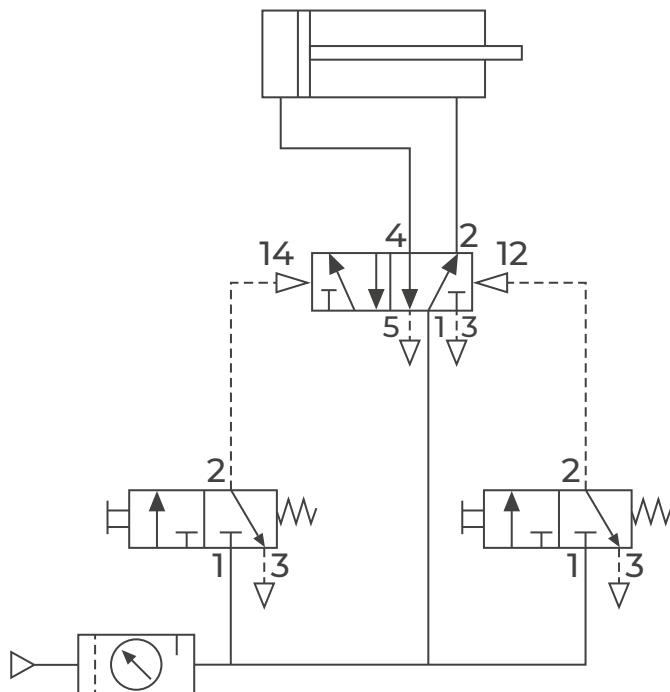
Figura 4. Circuito neumático de control con válvulas 3/2 y cilindro simple efecto



3) Cilindro de doble efecto con válvula 5/2 biestable

Esquema neumático que muestra un cilindro de doble efecto controlado por una válvula distribuidora 5/2 biestable, la cual cambia su posición mediante señales neumáticas generadas por dos válvulas secundarias 3/2 vías accionadas manualmente. Este arreglo permite controlar tanto la extensión como la retracción del vástagos del actuador mediante señales neumáticas independientes.

Figura 5. Circuito neumático con válvula 5/2 biestable para cilindro de doble efecto



Estos esquemas evidencian cómo los mandos directos permiten una interacción sencilla pero eficaz con el sistema, siendo ampliamente utilizados en aplicaciones donde la intervención del operario o la simplicidad del proceso justifican la ausencia de componentes eléctricos o electrónicos.

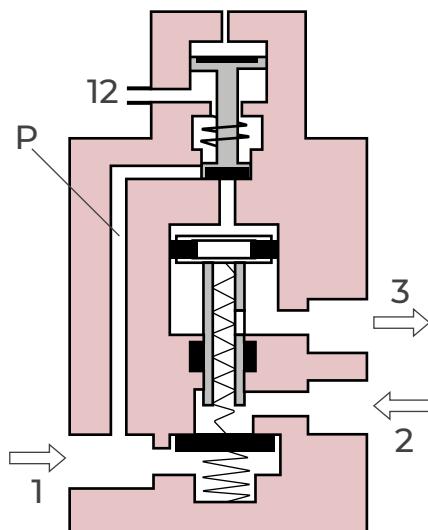
MANDOS INDIRECTOS O SERVOPILOTAJE: INNOVACIÓN EN LA CONMUTACIÓN

A medida que los sistemas neumáticos evolucionan, surgen nuevas configuraciones de control que buscan optimizar el rendimiento con menores requerimientos de presión, mayor fiabilidad operativa y menor esfuerzo mecánico en el accionamiento. Dentro de esta evolución, el mando indirecto o servopilotaje representa un avance signifi-

ficativo en el diseño de válvulas neumáticas, especialmente en sistemas que requieren conmutaciones frecuentes o condiciones de operación de baja presión (Figura 6).

A diferencia del mando directo —donde la presión del aire actúa directamente sobre el émbolo principal de la válvula—, el mando indirecto introduce un mecanismo intermedio. En este caso, la presión no actúa directamente sobre el elemento móvil de la válvula, sino que se activa primero un pilotaje auxiliar que a su vez permite el paso del aire principal hacia el émbolo. Esto reduce el esfuerzo requerido para conmutar la válvula, mejora la sensibilidad del sistema y permite emplear muelles de menor resistencia, lo cual tiene impacto positivo en la vida útil y en la confiabilidad operativa del conjunto.

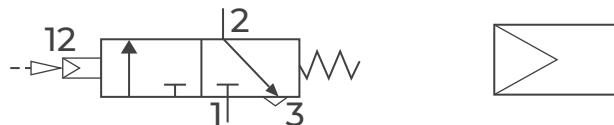
Figura 6. Esquema de mando indirecto y servopilotaje en válvulas neumáticas



Este principio de funcionamiento permite que, al aplicarse aire comprimido por una vía auxiliar (por ejemplo, la vía 12), se venza primero un muelle de bajo calibre, habilitando así el paso del aire a través de la vía principal (P), cuya presión final será la encargada de accionar el émbolo. De esta manera, el esfuerzo principal ya no recae sobre el operador o sobre un actuador de gran tamaño, sino que el proceso se

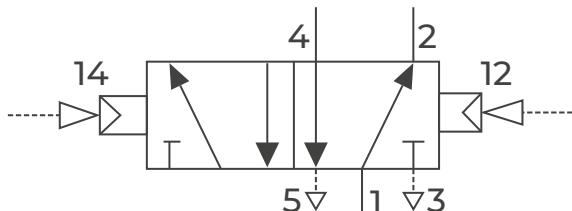
facilita mediante una secuencia de presión controlada internamente, como se muestra en la Figura 7 (a) y (b).

Figura 7. Esquema de funcionamiento de válvula con control por aire comprimido y muelle de bajo calibre



Este tipo de mando es particularmente útil en válvulas de múltiples vías, como los 5/2 biestables con servopilotaje, en las que basta una señal de corta duración —entre 10 y 25 milisegundos— para lograr la comutación efectiva del sistema, como se muestra en la Figura 8. Esta característica las convierte en soluciones ideales para procesos cíclicos, repetitivos o que requieren sincronización con señales provenientes de sensores o controladores lógicos.

Figura 8. Esquema de válvula 5/2 biestable con servopilotaje



La figura 8 muestra una válvula 5/2 bistable con servopilotaje. Este tipo de válvula se caracteriza por su eficiencia en el control de flujos, permitiendo una comutación precisa con un consumo energético bajo. La válvula pilotada, al contar con un sistema de servopilotaje, es capaz de ofrecer una gran capacidad de comutación, incluso en condiciones de baja presión. El diseño modular de estas válvulas facilita su integración en circuitos más complejos, como aquellos controlados por PLC o sistemas híbridos electronumáticos.

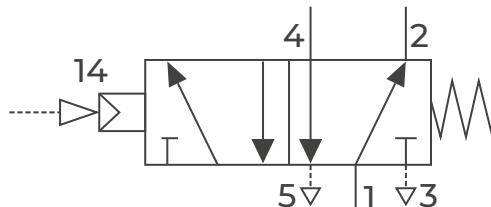
Ejemplo funcional

1. Identificación y análisis de válvulas con servopilotaje

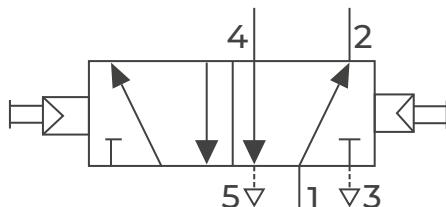
En este ejercicio, se solicita al lector analizar la denominación de diversas válvulas bajo el criterio de mando indirecto, reconociendo los elementos simbólicos que indican la presencia de este tipo de accionamiento.

Figura 9. (a) Válvula 5/2 con accionamiento por presión y servopilotaje con retorno por muelle. (b) Válvula direccional 5/2 biestable con accionamiento manual por servopilotaje.

(a)



(b)



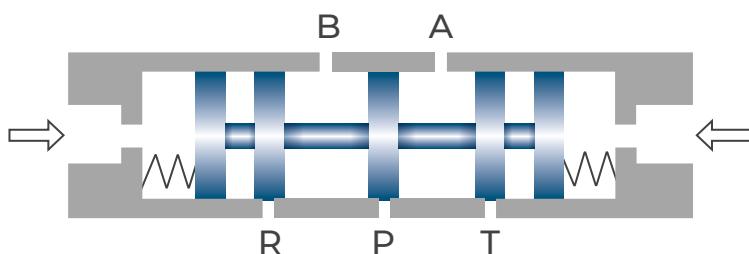
Este tipo de pilotaje redefine el modo en que se diseñan los esquemas neumáticos, permitiendo mayor flexibilidad operativa, reducción de desgaste mecánico y adaptación a condiciones variables de trabajo. Su incorporación en sistemas de automatización moderna representa un paso importante hacia una neumática más inteligente, precisa y eficiente.

DISEÑO Y SIMBOLOGÍA DE VÁLVULAS: CENTRALIZACIÓN, IDENTIFICACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN

En los sistemas neumáticos, el correcto diseño y la adecuada representación simbólica de las válvulas distribuidoras constituyen aspectos fundamentales para el diseño, comprensión, mantenimiento y documentación técnica de los circuitos. Estas representaciones no sólo permiten visualizar el comportamiento de cada componente en diferentes estados, sino que también responden a normas internacionales que garantizan la estandarización e interoperabilidad de los esquemas.

Uno de los aspectos técnicos más relevantes en el diseño de válvulas es el concepto de centralización, el cual aparece particularmente en aquellas válvulas que cuentan con tres posiciones. En estos casos, se requiere que la válvula retorne automáticamente a una posición de reposo, conocida como posición central, después de que cese la acción de control. Este retorno se logra, por lo general, mediante resortes de centrado dispuestos en ambos extremos del sistema de conmutación.

Figura 10. Válvula con sistema de centralización y retorno automático a posición de reposo



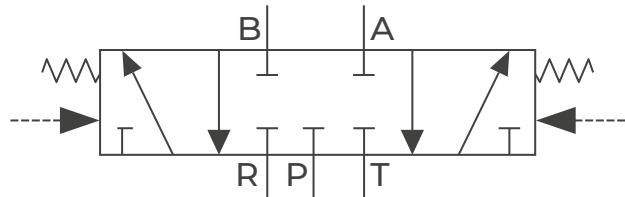
Este tipo de diseño tiene como finalidad garantizar la seguridad del sistema, evitar movimientos no deseados de los actuadores, y proteger la integridad del circuito durante fases de reposo. La válvula en estado de centralización puede presentar configuraciones como centro

cerrado, centro abierto o presurización simultánea, dependiendo de la función específica del circuito en el que esté incorporada.

La simbología asociada refleja fielmente estas configuraciones, utilizando diagramas que representan gráficamente las posiciones de las vías y la lógica de comutación interna de la válvula. La designación correcta de estas válvulas requiere indicar:

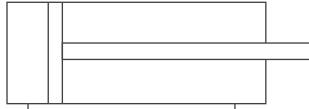
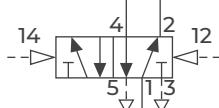
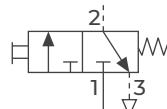
- El número de vías (conductos de paso de fluido),
- El número de posiciones de la válvula,
- El tipo de accionamiento (manual, neumático, eléctrico, etc.),
- Y el tipo de retorno o centrado (por muelle, por presión, sin retorno, etc.).

Figura 11. Válvula direccional 5/2 con posición central presurizada



La claridad en esta simbología es especialmente relevante cuando se trabaja con esquemas complejos o con sistemas híbridos en los que conviven múltiples dispositivos de mando y actuación. Para asegurar la correcta lectura e interpretación, se ha adoptado una disposición lógica de los elementos en los esquemas neumáticos e hidráulicos, ordenando los componentes desde la fuente de alimentación hasta los actuadores, según la secuencia de flujo y control.

Tabla 3. Orden de colocación de los dispositivos

Ejecución de una orden	Actuadores: • Cilindros • Motores	
Emitir señales	Dispositivos de maniobra: • Válvulas direccionales	
Procesar señales	Procesamiento de señales: • Válvula selectora • Válvula de presión • Válvula direccional	
Ingreso de señales	Dispositivos de entrada: • Válvulas direccionales con pulsador • Sensores	
Alimentación	Dispositivos de alimentación: • Unidad de mantenimiento • Línea de presión	

Este ordenamiento facilita el diagnóstico, la formación técnica y el mantenimiento del sistema. En el caso de esquemas didácticos o industriales, se privilegia una representación horizontal o vertical progresiva, que permite seguir fácilmente el flujo de señales, comandos y respuesta de los actuadores.

En conjunto, el diseño y la simbología de válvulas no deben ser vistos como simples convenciones gráficas, sino como un lenguaje técnico universal que traduce la lógica de funcionamiento del sistema en una estructura visual comprensible. Su correcto dominio es indispensable para ingenieros, técnicos y estudiantes, ya que constituye la base para interpretar, construir y optimizar circuitos neumáticos y electroneumáticos con precisión y seguridad.

Ejemplos funcionales aplicados

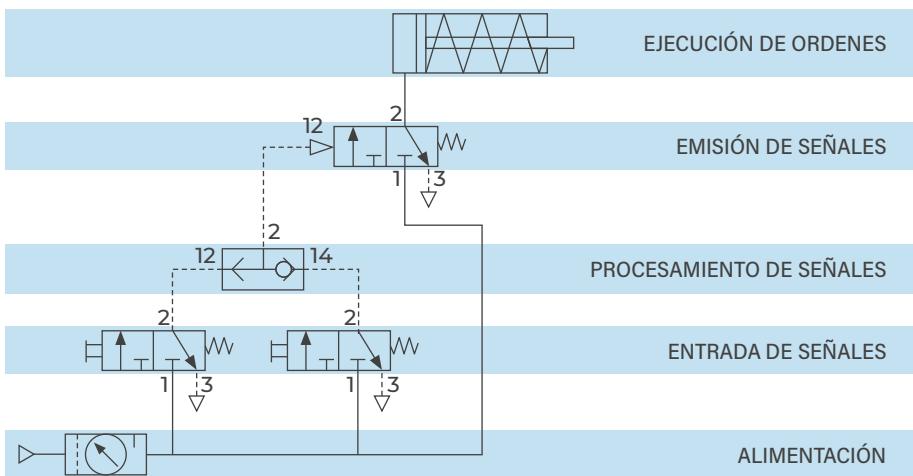
La electroneumática encuentra su verdadera potencia en la capacidad de diseñar circuitos funcionales que resuelvan operaciones automatizadas de forma precisa, eficiente y repetible. Los esquemas que aquí se presentan constituyen aplicaciones prácticas que integran los principios de mando directo, servopilotaje, válvulas distribuidoras, sensores de final de carrera, y sistemas de control secuencial, reflejando su aplicabilidad real en entornos industriales o formativos.

Cada circuito ha sido seleccionado por su valor pedagógico y técnico, ilustrando diferentes configuraciones de accionamiento y control que, si bien parten de estructuras básicas, permiten escalarse a sistemas más complejos según la necesidad del proceso automatizado.

Ejemplo 1: Automatización con cilindro de simple efecto y válvula 3/2 normalmente cerrada

En este montaje, el accionamiento de un cilindro de simple efecto se logra mediante el control de una válvula 3/2 NC, la cual permite la extensión del vástago al ser activada por un pulsador manual.

Figura 12. Esquema funcional con cilindro de simple efecto y válvula 3/2 NC



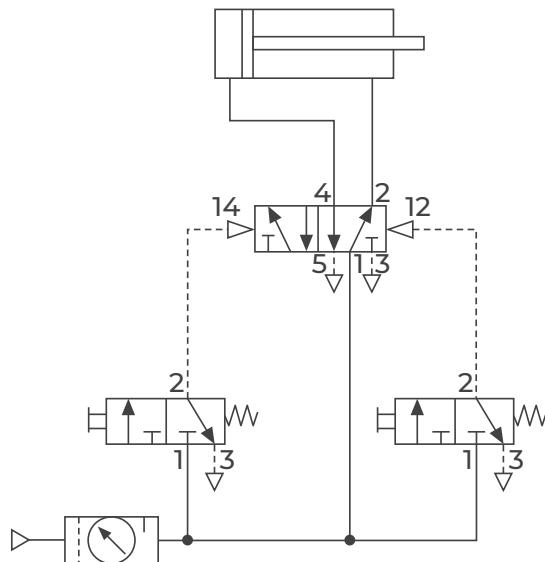
Descripción funcional:

- Se activa la fuente de aire comprimido.
- Al oprimir el pulsador, el aire comprimido accede a la válvula.
- Esta conmuta su posición, permitiendo el paso de aire hacia el cilindro.
- El cilindro se extiende mientras dura la presión.
- Al liberar el pulsador, el muelle de la válvula retorna la posición, evacuando el aire.

Ejemplo 2: Mando de doble efecto mediante válvula 5/2 biestable con servopilotaje

En este circuito, se emplea un cilindro de doble efecto cuyo movimiento es gobernado por una válvula 5/2 biestable, pilotada neumáticamente.

Figura 13. Control de cilindro de doble efecto mediante válvula 5/2 biestable



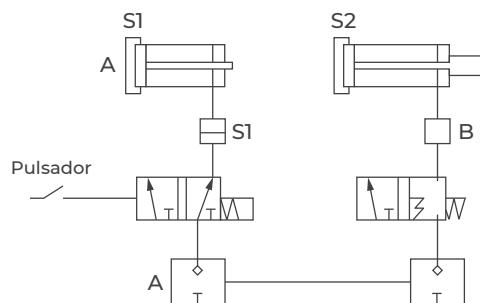
Descripción funcional:

- Dos pulsadores (válvulas secundarias 3/2 vías con accionamiento manual y retorno por resorte) controlan independientemente las señales de pilotaje neumático.
- La válvula principal 5/2 biestable cambia su posición al recibir estas señales:
 - El piloto A está ubicado en la entrada (12) del lado derecho.
 - El piloto B está ubicado en la entrada (14) del lado izquierdo.
- Cada señal neumática cambia la posición de la válvula principal, provocando que el cilindro de doble efecto se extienda al activarse el piloto A (12) y se retraija al activarse el piloto B (14).
- La válvula principal permanece estable en cada posición hasta recibir una nueva señal del piloto contrario.

Ejemplo 3: Aplicación con doble actuador secuencial

Este montaje integra dos cilindros de doble efecto en secuencia controlada, utilizando finales de carrera como elementos de retroalimentación.

Figura 14. Secuencia de doble actuador con sensores de posición



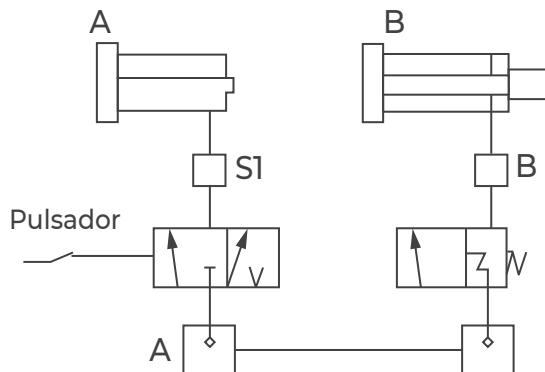
Descripción funcional:

- La activación del pulsador manual genera una señal neumática que conmuta la válvula distribuidora 5/2 del actuador A, extendiendo el vástagos del cilindro.
- Al alcanzar el actuador A la posición final de extensión, el sensor final de carrera (**S1**) genera una señal neumática que conmuta la válvula del actuador B, produciendo su extensión.
- Al completar el actuador B su desplazamiento, el sensor final de carrera (**S2**) envía una señal que restablece la posición inicial de la válvula del actuador A, lo cual provoca la retracción del vástagos de dicho actuador.
- Una vez completado este ciclo, el sistema queda listo para reiniciar manualmente al presionar nuevamente el pulsador, o automáticamente si se añade un circuito complementario.

Ejemplo 4: Circuito de mantenimiento con válvula de enclavamiento

En sistemas donde es necesario mantener una posición sin necesidad de presión constante sobre el pulsador, se emplean enclavamientos neumáticos que conservan la posición de conmutación.

Figura 15. Circuito con enclavamiento por válvula 5/2 biestable



Descripción funcional:

- Al pulsar la entrada A, la válvula biestable comuta y el actuador se activa.
- El sistema se mantiene en esta condición sin necesidad de mantener el pulsador o la señal activa.
- Una segunda señal (entrada B) comuta la válvula a su estado original, retornando el sistema al reposo.

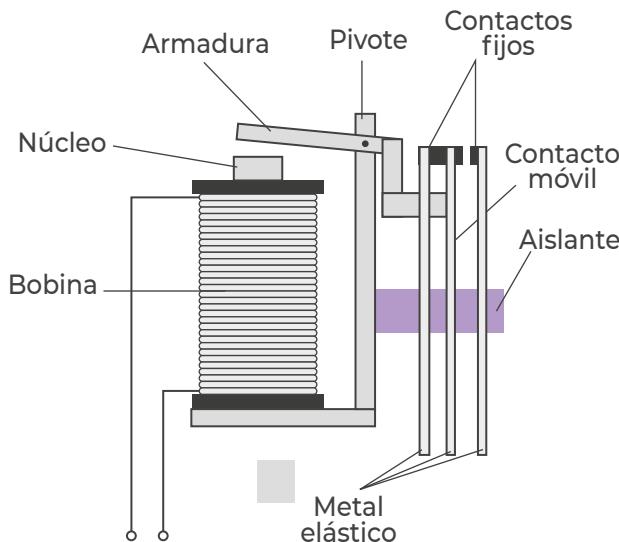
Estos esquemas funcionales evidencian la versatilidad y adaptabilidad de los sistemas electroneumáticos para el diseño de soluciones automatizadas. Cada circuito responde a principios técnicos sólidos, pero también admite adaptaciones según el contexto de uso, lo que refuerza el valor pedagógico y técnico de su análisis.

Relés electromagnéticos, enclavamientos y control lógico

En los sistemas electroneumáticos, el control de procesos no se limita al flujo físico del aire comprimido, sino que se complementa con dispositivos eléctricos capaces de generar lógica de operación, retención de estados y secuencias automáticas. Entre estos elementos, los relés electromagnéticos destacan como componentes esenciales para activar, mantener o interrumpir señales dentro de un circuito eléctrico de mando, operando como el puente entre los elementos de entrada (sensores, pulsadores) y los de salida (válvulas solenoides).

Un relé electromagnético es un dispositivo que, al recibir corriente en su bobina, genera un campo magnético que cierra uno o varios contactos eléctricos. Este mecanismo permite, por ejemplo, que una señal débil proveniente de un sensor active un componente de mayor potencia sin contacto directo, lo que garantiza seguridad, aislamiento eléctrico y capacidad de gobernar múltiples dispositivos desde un solo punto de control (Figura 16).

Figura 16. Estructura y funcionamiento de un relé electromagnético



Los relés se utilizan ampliamente en sistemas de control eléctrico tanto para mantener condiciones activas mediante *autoenclavamiento* (o realimentación con contactos auxiliares) como para establecer enclavamientos de seguridad. En el primer caso, permiten conservar un estado operativo sin necesidad de una señal continua desde el operador. En el segundo caso, los relés se emplean para prevenir activaciones simultáneas incompatibles (por ejemplo, dos salidas en conflicto), evitando así fallos como cortocircuitos o acciones peligrosas. Esta doble funcionalidad hace que los relés sean fundamentales en automatización, garantizando tanto la continuidad del proceso como la seguridad del sistema.

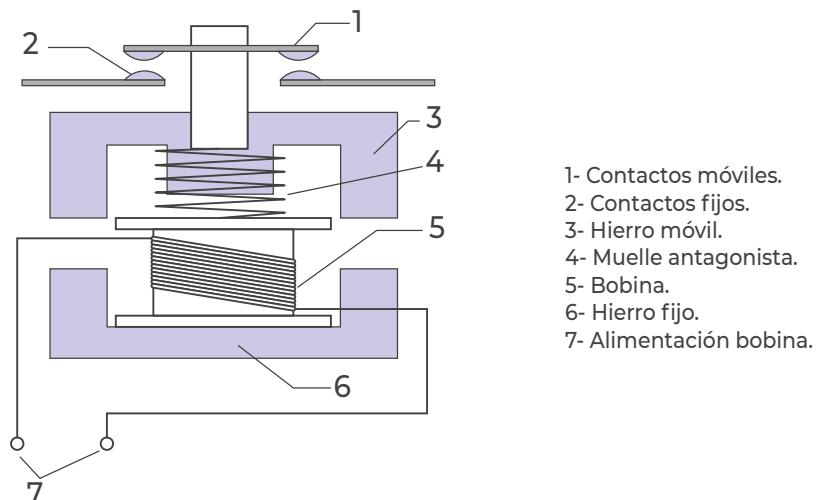
Tipos de enclavamientos más comunes:

- **Enclavamiento por realimentación:** se logra conectando un contacto del propio relé en paralelo al pulsador que lo activa. Una vez energizado, el contacto mantiene el circuito cerrado aunque el pulsador se libere.
- **Enclavamiento cruzado o mutuo:** se utiliza para evitar la activación simultánea de dos relés que gobiernan fun-

ciones excluyentes (por ejemplo, avance y retroceso de un actuador).

- **Enclavamiento con señal de interrupción:** se activa un estado que se mantiene hasta que otro evento provoca su desconexión.

Figura 17. Componentes internos de un relé electromagnético



Esta figura muestra los componentes principales de un relé electromagnético: bobina, contactos móviles, contactos fijos y núcleo de hierro. Estos elementos permiten commutar circuitos eléctricos mediante señales de control de baja potencia, sirviendo como base física para lógicas de control como el *autoenclavamiento* o el enclavamiento mutuo que se implementan externamente mediante conexiones de contactos auxiliares.

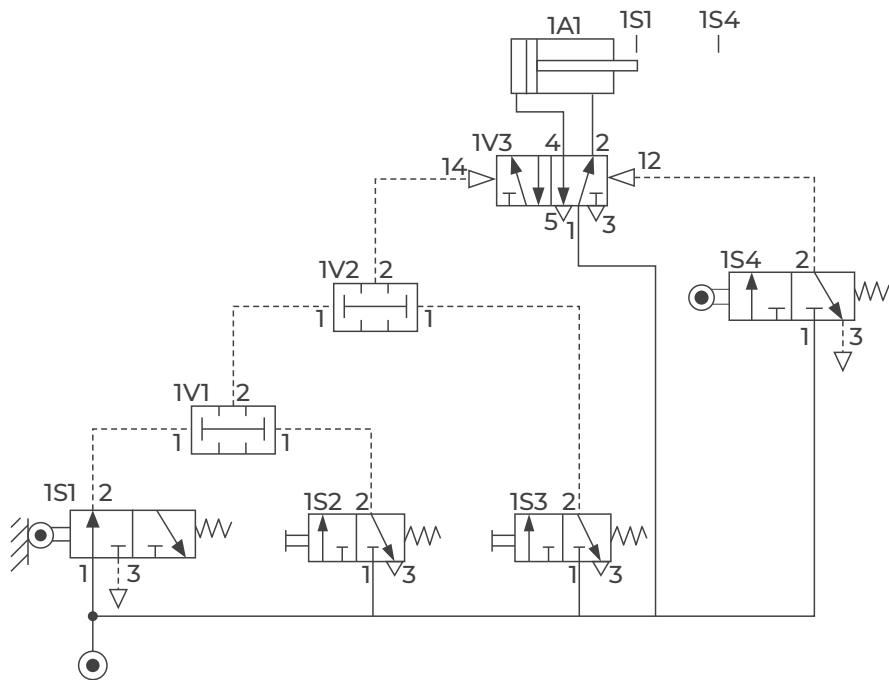
Aplicación funcional:

Ejemplo: circuito neumático con enclavamiento secuencial para cilindro de doble efecto

En este esquema, el movimiento del cilindro de doble efecto se controla mediante una secuencia de válvulas neumáticas. Un pulsador neumático inicial activa la señal de avance, y al alcanzar su extensión, una válvula final de carrera genera la señal para activar el siguiente paso del proceso. El sistema utiliza válvulas de simultaneidad y de memoria (por ejemplo, válvulas 3/2 con accionamiento por señal y retorno por resorte) que permiten mantener el estado del cilindro hasta que una nueva señal provoque el cambio.

Este tipo de esquemas permite crear lógica neumática sin necesidad de PLC ni relés eléctricos, lo que facilita la implementación en sistemas autónomos y de bajo costo. Son ideales para aplicaciones donde se requiere mantener un estado activo sin supervisión constante.

Figura 18. Circuito neumático secuencial con enclavamiento mediante válvulas de señal y simultaneidad



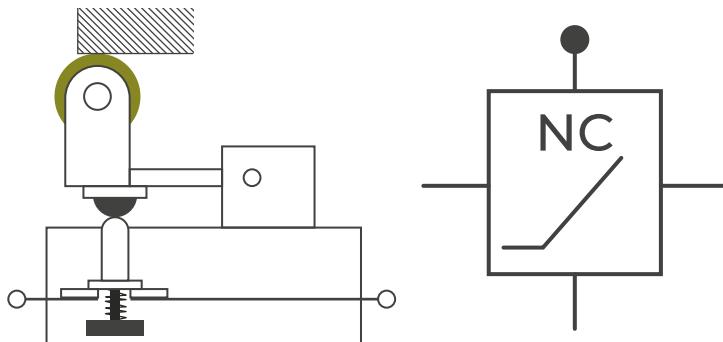
Sensores y finales de carrera: El control del movimiento inteligente

El control eficiente de un sistema automatizado depende en gran medida de la capacidad para detectar, registrar y responder a los cambios de estado de sus componentes mecánicos. En este contexto, los sensores y finales de carrera juegan un papel esencial como dispositivos de retroalimentación. Su función es proporcionar señales confiables sobre la posición de los actuadores, el estado de los procesos o la ocurrencia de eventos determinados, permitiendo que el sistema tome decisiones de forma autónoma o coordinada.

Los finales de carrera neumáticos o eléctricos actúan como interruptores mecánicos que se activan al contacto con una parte móvil del sistema, como el vástago de un cilindro. Una vez activados, envían una señal eléctrica o neumática que puede ser utilizada para:

- Activar una nueva válvula,
- Energizar o desenergizar un relé,
- Emitir una señal de parada,
- O iniciar una nueva secuencia de trabajo.

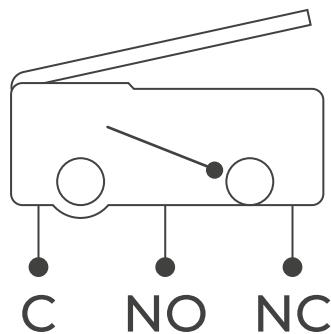
Figura 19. Final de carrera mecánico con contacto normalmente cerrado (NC)



Existen diferentes configuraciones según el tipo de contacto:

- **Normalmente abierto (NA):** el circuito está abierto hasta que se presiona el sensor, cerrando el paso de la corriente.
- **Normalmente cerrado (NC):** el circuito está cerrado en reposo y se abre al ser accionado, interrumpiendo el paso de corriente.
- **Cambio de contacto (conmutado):** permite elegir el tipo de señal enviada según la conexión realizada.

Figura 20. Esquema funcional de sensor con contacto conmutado (SPDT)

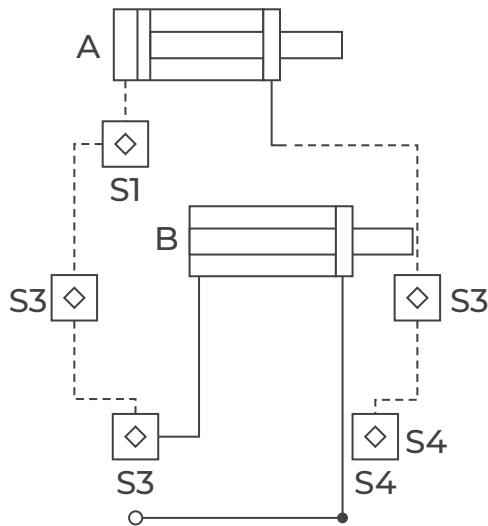


Además de los sensores mecánicos, los sistemas electroneumáticos modernos incorporan sensores eléctricos y electrónicos que operan por proximidad, magnetismo o contacto sin contacto físico directo. Estos dispositivos permiten mayor precisión y durabilidad, al evitar el desgaste por fricción.

Ejemplo funcional: control de secuencia mediante sensores de posición

Un sistema automatizado compuesto por dos cilindros, A y B, opera en secuencia gracias a sensores finales de carrera colocados estratégicamente en las posiciones de **extensión** y **retracción** de ambos actuadores. Cada sensor genera una señal que habilita el siguiente paso del ciclo.

Figura 21. Esquema secuencial de doble actuador A y B con sensores de posición S1–S4 asociados a sus extremos de carrera



Secuencia de funcionamiento:

1. Se pulsa el botón de inicio (no representado en la figura) → **el cilindro A avanza.**
2. El sensor **S1** (final de carrera de extensión del cilindro A) detecta el fin del recorrido → **el cilindro B avanza.**
3. El sensor **S2** (final de carrera de extensión del cilindro B) detecta el fin del recorrido → **el cilindro B retorna.**
4. El sensor **S3** (final de carrera de retracción del cilindro B) activa el **retorno del cilindro A.**
5. El sensor **S4** (final de carrera de retracción del cilindro A) confirma el fin del ciclo → el sistema queda listo para reiniciar con una nueva orden.

En la figura, los sensores S1 y S4 están ubicados en los extremos del cilindro A (extensión y retracción, respectivamente); mientras que S2 y S3 corresponden a los extremos del cilindro B.

Esta arquitectura de control no sólo permite automatizar la secuencia, sino que también proporciona diagnóstico en tiempo real, identificando si un componente no ha alcanzado su posición o si el ciclo no se ha completado correctamente.

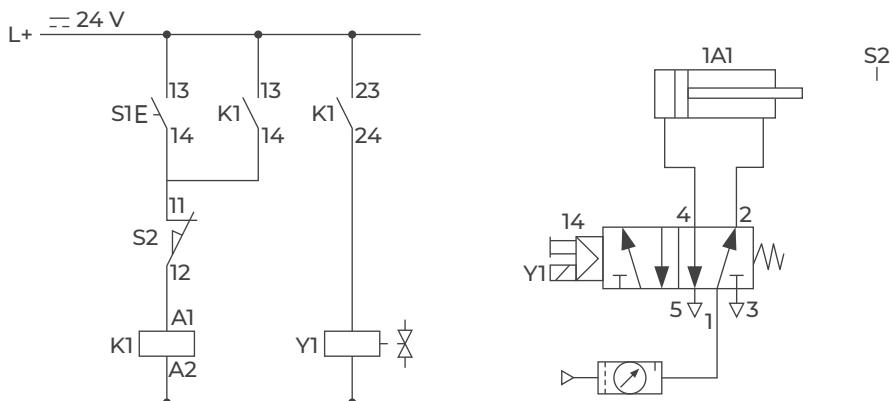
Además de su función en la secuencia lógica, los sensores pueden incorporarse en estrategias de seguridad, impidiendo que ciertas acciones ocurran si no se cumplen condiciones previas (por ejemplo, evitar la retracción de un cilindro si el otro no ha salido completamente).

Los sensores y finales de carrera no sólo representan un mecanismo de monitoreo, sino un recurso fundamental para construir inteligencia operativa dentro del sistema. Su correcta integración permite dotar a la automatización de autonomía, precisión y capacidad de respuesta.

Circuitos autorretenidos y secuencias automatizadas

En los sistemas electroneumáticos, la autorretención constituye una estrategia lógica esencial para mantener una señal activa incluso después de que la acción que la originó haya cesado. Esta propiedad permite que un actuador conserve su estado sin la necesidad de una presión constante sobre el dispositivo de mando, lo que resulta especialmente útil en procesos cílicos o en aquellos donde se requiere que el sistema permanezca en una posición estable hasta que se cumpla una nueva condición.

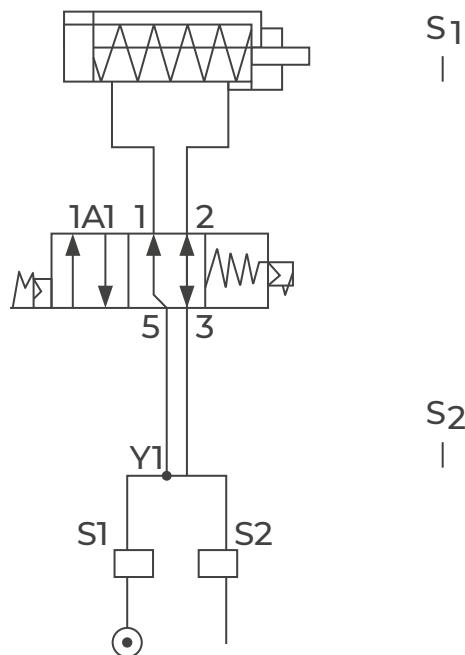
La autorretención se implementa principalmente mediante relés electromagnéticos o válvulas biestables, integrando una lógica de realimentación positiva. Esta lógica consiste en utilizar un contacto auxiliar del propio dispositivo de salida para mantener la señal de activación cerrada, eliminando la necesidad de mantener la presión o la señal de entrada manual de forma continua.

Figura 22. Circuito de autorretención mediante relé con contacto auxiliar*Funcionamiento básico de la autorretención:*

1. El operador presiona un pulsador momentáneo (entrada).
2. Se activa el **relé K1**, cerrando su contacto auxiliar (13–14).
3. Este contacto mantiene energizada la bobina K1 incluso después de soltar el pulsador (autorretención).
4. Como consecuencia, se energiza la **electroválvula Y1**, que conmuta la válvula 5/2 y activa el cilindro.
5. El sistema permanece en ese estado hasta que otra señal (por ejemplo, el pulsador S2 de paro) interrumpe la autorretención.

En circuitos neumáticos, esta función se implementa mediante válvulas distribuidoras biestables, que conservan su estado mecánico hasta que una nueva señal neumática de pilotaje modifique su posición.

Figura 23. Esquema neumático de válvula 5/2 biestable con enclavamiento mediante doble señal neumática



- **V1:** Válvula 3/2 con accionamiento manual (pulsador) y retorno por resorte, controla el pilotaje 12.
- **V2:** Válvula 3/2 con accionamiento manual (pulsador) y retorno por resorte, controla el pilotaje 14.
- **1A1:** Válvula distribuidora 5/2 biestable con pilotaje neumático a doble señal.
- **Cilindro:** Actuador de doble efecto comandado por la válvula 5/2.
- Las líneas punteadas representan señales neumáticas.

Este circuito neumático emplea una válvula 5/2 biestable que conmuta mediante señales neumáticas generadas por dos válvulas 3/2 manuales con retorno por resorte (V1 y V2). Al presionar V1, se aplica presión al pilotaje 12, lo que conmuta la válvula 5/2 y provoca el avance del cilindro. La válvula 5/2 permanece en esta posición

hasta que se acciona V2, enviando una señal al pilotaje 14, lo que provoca el retorno del cilindro. Este tipo de enclavamiento es natural en válvulas biestables: conservan su estado hasta recibir una nueva señal contraria.

El sistema permite controlar el actuador de forma segura y sin necesidad de señal continua, gracias a la memoria neumática inherente de la válvula 5/2.

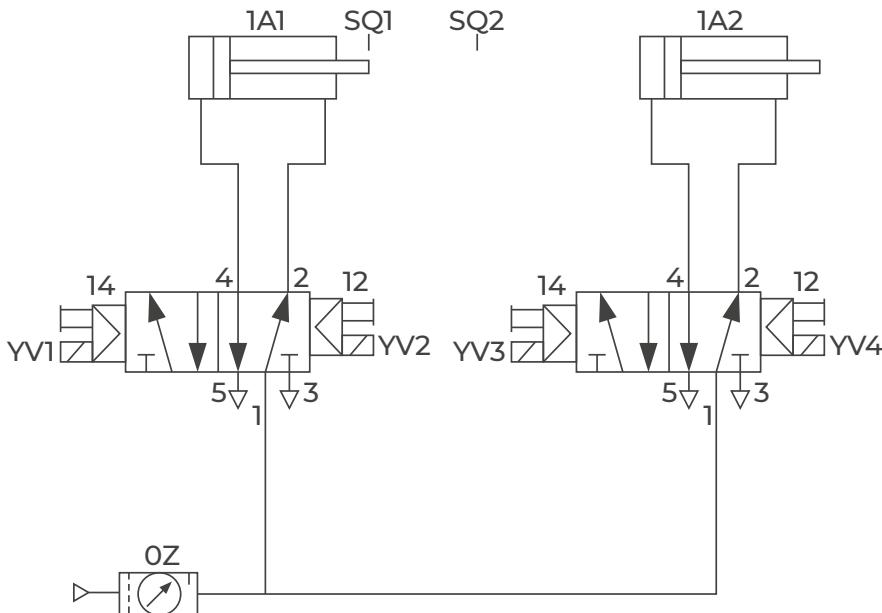
Secuencias automatizadas

Los circuitos autorretenidos son la base para construir secuencias automatizadas, en las que cada etapa del proceso se activa a partir del cumplimiento de una condición anterior. Estas condiciones pueden ser señales de sensores, contactos de relés, finales de carrera u otros eventos del sistema.

La secuencia puede programarse de forma:

- Lineal, donde cada acción activa la siguiente.
- Condicional, en la que una acción depende de la combinación de dos o más condiciones.
- Cíclica, donde el proceso se repite automáticamente una vez alcanzado el estado final.

Figura 24. Ejemplo de secuencia neumática automatizada con doble actuador y sensores de posición



La Figura 24 muestra únicamente el circuito neumático de potencia, en el cual los cilindros A y B son activados mediante válvulas 5/2 biestables, operadas por señales provenientes de electroválvulas (YV1 a YV4). Sin embargo, para su funcionamiento completo, este sistema requiere un circuito de control eléctrico o lógico que gestione la activación secuencial de las solenoides, en función del estado de sensores (S1 a S4) y del pulsador de inicio.

Este circuito de control puede implementarse de forma eléctrica, mediante relés y contactos auxiliares (en un sistema cableado clásico), o bien mediante un controlador lógico programable (PLC). En ambos casos, se deben definir las siguientes condiciones de control:

- El pulsador de inicio energiza la bobina de YV1 (avance de A).
- El sensor S1, al detectar la extensión completa de A, activa YV2 (avance de B).

- S2 activa YV3 (retorno de B), y S3, tras confirmar ese retorno, energiza YV4 (retorno de A).
- Finalmente, S4 marca el fin de ciclo para reiniciar.

La lógica de control debe garantizar que cada válvula reciba su señal únicamente cuando se haya cumplido la condición anterior, evitando conflictos o sobreposiciones en los movimientos de los actuadores.

El uso de circuitos autorretenidos y secuencias automatizadas no sólo optimiza el funcionamiento del sistema, sino que aumenta su inteligencia operativa, reduce errores humanos y mejora la eficiencia general del proceso. Su correcta implementación es clave para cualquier solución técnica basada en electroneumática.

LA ELECTRONEUMÁTICA EN ACCIÓN: ANÁLISIS DE ESQUEMAS SECUENCIALES REALES

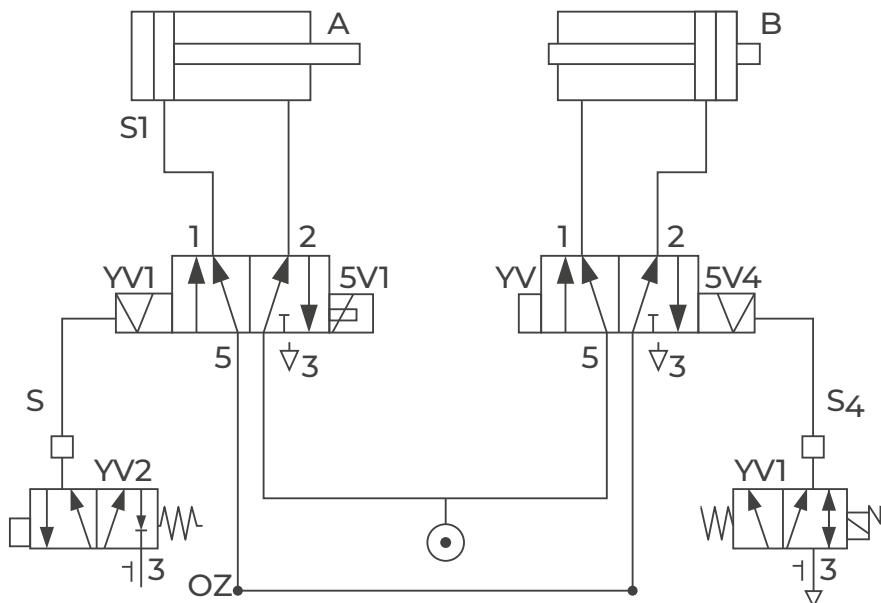
La aplicación práctica de los principios electroneumáticos encuentra su expresión más completa en el diseño e implementación de esquemas secuenciales reales, es decir, circuitos complejos en los que múltiples actuadores, válvulas, sensores y relés trabajan de manera interconectada para ejecutar operaciones repetitivas con precisión y autonomía.

Estos esquemas no sólo integran lo aprendido respecto al mando directo, el servopilotaje, la autorretención o el enclavamiento, sino que exigen una lectura lógica transversal: cada componente cumple una función dentro de una cadena de eventos sincronizados, y su activación o reposo afecta directamente al comportamiento de los demás elementos.

Esquema 1: Secuencia de doble cilindro controlada por sensores y válvulas 5/2

En este sistema, dos cilindros neumáticos trabajan en una secuencia determinada: el primero (A) debe extenderse completamente antes de que el segundo (B) inicie su ciclo. Una vez que B haya completado su avance y retroceso, A puede retornar. El control se realiza mediante sensores de final de carrera y válvulas 5/2 biestables.

Figura 25. Secuencia A+ → B+ → B- → A- con sensores S1, S2, S3 y S4



Lógica operativa del sistema:

1. Pulsador inicial activa el avance del cilindro A.
2. Sensor S1 detecta A+ y envía señal para activar B+.
3. Sensor S2 detecta B+ y envía señal para activar B-.
4. Sensor S3 detecta B- y activa A-.
5. Sensor S4 (A-) cierra el ciclo.

Este tipo de secuencia exige una lectura precisa del comportamiento del sistema, tanto en su lógica temporal como en su sincronización espacial. Una mala configuración del orden de sensores o válvulas podría comprometer la estabilidad operativa.

Interpretación de los hallazgos y discusión técnica

El análisis de los esquemas, dispositivos y configuraciones desarrolladas a lo largo de este capítulo ha permitido evidenciar no solo la eficacia operativa de los sistemas electroneumáticos, sino también la lógica constructiva y secuencial que sustenta su funcionamiento. Lejos de tratarse de simples arreglos técnicos, cada circuito analizado responde a una estructura de pensamiento sistemático que conjuga conocimiento de mecánica, neumática, electricidad y automatización.

Uno de los hallazgos más relevantes es que, incluso sin la incorporación de controladores programables (PLC), es posible diseñar sistemas con comportamiento secuencial inteligente, capaces de responder a múltiples condiciones, retener estados, sincronizar acciones y ejecutar tareas automatizadas con precisión y confiabilidad. Esta afirmación adquiere relevancia en contextos educativos, de formación técnica o de automatización de bajo costo, donde el uso de relés, válvulas biestables y sensores mecánicos aún representa una solución viable y eficaz.

Desde una perspectiva técnica, los circuitos autorretenidos, enclavados y pilotados indirectamente han demostrado ser estructuras versátiles. Su desempeño no depende únicamente de la complejidad del sistema, sino de la claridad en la lógica de diseño, la ubicación precisa de los sensores, y la correcta identificación de las condiciones de activación y retorno. Estas variables son decisivas para garantizar la seguridad del proceso, la fiabilidad de las operaciones y la durabilidad de los componentes.

Otro aspecto fundamental observado ha sido el valor de la simbología y el diseño estandarizado. Los esquemas bien estructurados no solo facilitan la comprensión y el montaje, sino que también permiten el diagnóstico técnico, la formación del personal y la implementación escalable de soluciones. La correcta disposición de válvulas, vías de escape, sensores y relés genera un lenguaje técnico que trasciende el plano del diseño gráfico, y se convierte en una herramienta de comunicación técnica entre operarios, diseñadores e ingenieros.

En términos de evolución tecnológica, estos hallazgos refuerzan el papel de la electroneumática como una tecnología puente entre los sistemas puramente neumáticos del pasado y las soluciones integradas del presente y futuro. La posibilidad de combinar componentes mecánicos con lógicas eléctricas ha permitido mantener la robustez y la economía de la neumática, al tiempo que se incorporan ventajas como la secuenciación, la temporización y la supervisión lógica.

Finalmente, la revisión técnica de los esquemas reales ha puesto en evidencia que la automatización basada en electroneumática sigue siendo una herramienta pedagógica, profesional e industrial altamente vigente. Su valor no se reduce al funcionamiento del circuito, sino que reside en su capacidad para enseñar principios de lógica, control, eficiencia y resolución de problemas técnicos, lo cual la convierte en una plataforma idónea para la formación de competencias integrales en ingeniería y tecnología.

Capítulo V

REFLEXIONES FINALES Y PROYECCIONES

SÍNTESIS DE HALLAZGOS: EL VALOR DE LA ELECTRONEUMÁTICA EN LA AUTOMATIZACIÓN

El recorrido teórico y práctico desarrollado a lo largo de esta obra ha permitido consolidar una visión integral de la electroneumática como una tecnología con alto valor funcional, formativo e industrial, cuya evolución responde a las necesidades reales de automatización en entornos productivos cada vez más exigentes.

Uno de los hallazgos más consistentes es que la electroneumática permite combinar la fuerza mecánica y simplicidad estructural de la neumática con la precisión, versatilidad y lógica de control propias de los sistemas eléctricos y electrónicos. Esta integración convierte a los sistemas electroneumáticos en soluciones intermedias de alto rendimiento, aptas para una amplia gama de aplicaciones, desde tareas secuenciales básicas hasta procesos industriales con requerimientos complejos.

A lo largo del análisis se ha podido verificar que las variables clave de simplicidad e interoperabilidad no son meras características técnicas, sino factores estratégicos que inciden directamente en la eficiencia, mantenibilidad y escalabilidad de los sistemas. En particular, la simplicidad en el diseño y montaje de los circuitos contribuye a una menor tasa de fallos, facilita la intervención técnica, y reduce los costos operativos, mientras que la interoperabilidad permite una integración fluida con otros sistemas, ampliando las posibilidades de conexión con tecnologías digitales y de automatización avanzada.

Los esquemas funcionales analizados han demostrado que incluso sin el uso de PLC o sistemas programables, es posible desarrollar estructuras lógicas robustas, capaces de ejecutar tareas cíclicas con alto nivel de control y autonomía. Esto confirma que la electroneumática

no solo mantiene su vigencia, sino que representa una alternativa formativa y técnica de gran valor en entornos donde la tecnología debe ser comprendida, no solo utilizada.

Asimismo, el tratamiento científico de la temática —a través del análisis bibliométrico y cienciométrico— ha revelado un creciente interés académico e industrial por esta tecnología, validando su aplicación en contextos diversos que van desde la manufactura, la formación técnica y la automatización educativa, hasta usos más avanzados como la simulación biomédica o el desarrollo de prototipos con lógica neuromática-electrónica integrada.

En suma, los hallazgos permiten afirmar que la electroneumática no es una solución transitoria ni de bajo nivel, sino una plataforma tecnológica autónoma, capaz de resolver necesidades operativas con eficiencia, escalabilidad y economía, siempre que su diseño responda a una lógica funcional rigurosa y se integren principios de control técnico sólidos.

Consideraciones para la implementación práctica

La implementación de sistemas electroneumáticos en entornos industriales o educativos exige más que el conocimiento técnico de sus componentes. Requiere una planificación integral, que considere desde el diseño lógico del circuito hasta las condiciones reales de operación, pasando por la elección adecuada de los dispositivos, la disposición espacial, la gestión energética, la seguridad operativa y el mantenimiento preventivo.

Uno de los primeros aspectos a tener en cuenta es la definición clara de la función del sistema. La electroneumática no debe aplicarse de forma indiscriminada, sino en procesos donde su combinación de fuerza, velocidad y control lógico represente una ventaja sobre otras alternativas. Por ejemplo, es altamente eficiente en tareas de desplazamiento repetitivo, prensado, transferencia de objetos, paletizado, entre otros.

A partir de allí, se deben considerar los siguientes elementos:

1. *Selección técnica de componentes*

La elección de válvulas, actuadores, sensores, relés y fuentes de aire comprimido debe basarse en criterios funcionales específicos: presión de trabajo, caudal requerido, velocidad de operación, tipo de carga, espacio disponible, entre otros. Es recomendable que los dispositivos cuenten con documentación técnica estandarizada y que cumplan normas internacionales (como ISO, DIN, o ANSI).

2. *Diseño lógico y simbólico*

Antes del montaje físico, se debe desarrollar un esquema funcional simbólico, respetando el orden lógico del sistema: alimentación → mando → control → ejecución → retroalimentación. Este diseño debe prever secuencias, enclavamientos, autorretenciones y condiciones de seguridad, permitiendo la simulación previa del funcionamiento y la identificación temprana de errores.

3. *Integración con otras tecnologías*

Los sistemas electroneumáticos pueden operar de manera autónoma, pero su valor se multiplica cuando se integran con dispositivos eléctricos, electrónicos o digitales, como temporizadores, PLC, sensores de proximidad o interfaces hombre-máquina. Esto exige prever la compatibilidad entre señales, niveles de tensión, entradas lógicas y tipos de señal (NA o NC).

4. *Seguridad operativa*

Todo sistema automatizado debe prever condiciones de paro de emergencia, protección de sobrepresión, aislamiento eléctrico y detección de fallos. En el caso de la electroneumática, también se

deben considerar válvulas de corte rápido, presostatos, reguladores y silenciadores, que garanticen una operación segura para el operario y los equipos.

5. *Mantenibilidad y documentación*

Un sistema eficiente es aquel que no solo opera correctamente, sino que puede ser mantenido con facilidad. Para ello se recomienda:

- Generar documentación técnica clara (diagramas, manuales de funcionamiento, listas de componentes).
- Establecer rutinas de mantenimiento preventivo (limpieza de filtros, revisión de conexiones, lubricación de cilindros).
- Capacitar al personal técnico en la lógica de funcionamiento del sistema.

La implementación de un sistema electroneumático debe comprenderse como una acción estratégica que conjuga conocimiento técnico, diseño lógico y ejecución operativa, asegurando que la tecnología aplicada cumpla su propósito sin comprometer la eficiencia, la seguridad ni la escalabilidad futura.

Recomendaciones para la formación y la investigación futura

La electroneumática, como tecnología aplicada a la automatización, no puede ser comprendida únicamente desde el punto de vista operativo. Su correcta implementación, evolución y aprovechamiento sostenido dependen de una articulación activa entre tres ámbitos complementarios: la formación técnica, la práctica profesional y la investigación científica. En este apartado, se plantean recomendaciones orientadas a fortalecer esos tres pilares.

1. *Formación: construir competencias integradas*

La enseñanza de la electroneumática debe superar el enfoque tradicional basado en la simple conexión de componentes. Se recomienda que los procesos formativos:

- Enfaticen el razonamiento lógico secuencial, promoviendo el análisis de circuitos antes del montaje.
- Integren conocimientos de neumática, electricidad, simbología, control y seguridad, en un enfoque multidisciplinario.
- Incorporen herramientas de simulación digital para el diseño y validación previa de circuitos (por ejemplo, Fluid-SIM, Automation Studio).
- Desarrollen proyectos integradores en los que el estudiante diseñe, arme y justifique sistemas funcionales completos.
- Fomenten la lectura e interpretación de documentación técnica y normas internacionales, como parte del proceso de alfabetización tecnológica.

Estas estrategias permiten que el aprendizaje no se limite a la ejecución mecánica de tareas, sino que promueva la comprensión profunda del comportamiento de los sistemas, preparando a los futuros profesionales para resolver problemas reales.

2. *Práctica profesional: de la operación a la optimización*

En entornos laborales, la electroneumática debe ser asumida no solo como una tecnología de producción, sino como una herramienta de mejora continua. Se recomienda:

- Utilizar los principios de eficiencia energética para rediseñar sistemas que reduzcan consumo y aumenten rendimiento.

- Incorporar esquemas de mantenimiento predictivo, a partir del monitoreo de señales, tiempos de ciclo y condiciones de operación.
- Aplicar criterios de interoperabilidad para la integración de sistemas neumáticos con controladores lógicos, sensores inteligentes y plataformas digitales.
- Establecer protocolos de evaluación técnica post-implementación, que permitan medir el impacto real de las soluciones electroneumáticas en términos de productividad, seguridad y sostenibilidad.

Estas prácticas consolidan una cultura técnica estratégica, en la que el profesional no se limita a operar sistemas, sino que participa activamente en su diseño, mejora y evaluación.

3. *Investigación: expandir las fronteras del conocimiento técnico*

Finalmente, la electroneumática constituye un campo fértil para la generación de conocimiento nuevo, especialmente en relación con:

- Optimización de secuencias lógicas aplicadas a sistemas complejos.
- Modelado y simulación de sistemas neumáticos bajo condiciones variables.
- Desarrollo de prototipos educativos, de bajo costo y alta replicabilidad, para la enseñanza técnica.
- Integración de la electroneumática con realidad aumentada, sistemas ciberfísicos y entornos virtuales de aprendizaje.
- Estudios sobre análisis energético y sostenibilidad de sistemas automáticos híbridos.

Estas líneas de investigación permitirán proyectar la electroneumática hacia nuevas áreas de aplicación, consolidando su lugar dentro

de los sistemas de automatización industrial inteligente, y aportando evidencia científica que fundamente su mejora continua.

La convergencia entre formación, práctica e investigación no solo asegura la vigencia de esta tecnología, sino que convierte a la electroneumática en un instrumento pedagógico, profesional y científico, capaz de adaptarse a los desafíos de la industria moderna y de impulsar procesos formativos con alto valor agregado.

Limitaciones del estudio y posibilidades de continuidad

El estudio desarrollado en esta obra ha permitido trazar un recorrido completo por los fundamentos, aplicaciones y perspectivas de la electroneumática, consolidando una visión técnica y conceptual que posiciona a esta tecnología como una herramienta clave en la evolución de los sistemas de automatización. Sin embargo, como todo proceso investigativo, este trabajo se encuentra delimitado por condiciones metodológicas, alcance temático y enfoque analítico que es necesario reconocer con claridad para sustentar su validez y orientar su proyección.

En primer lugar, debe señalarse que esta investigación ha adoptado un enfoque descriptivo y documental, centrado en el análisis teórico y funcional de fuentes académicas y esquemas técnicos. Aunque esta estrategia ha permitido construir un marco riguroso y fundamentado, no incluye la validación experimental directa en entornos de producción reales, lo cual podría constituir una limitación en términos de aplicabilidad inmediata. Esta carencia no resta valor al trabajo realizado, pero sí señala una oportunidad para futuras investigaciones que incluyan pruebas prácticas, ensayos comparativos y evaluaciones de desempeño en condiciones industriales.

Del mismo modo, el estudio se ha enfocado en esquemas electroneumáticos construidos sin el uso de controladores programables (PLC), con el objetivo de demostrar que es posible alcanzar

comportamientos automatizados complejos utilizando únicamente lógica cableada, sensores y relés. Esta elección metodológica tiene una intención pedagógica y técnica clara, pero también delimita el alcance del análisis, excluyendo herramientas más avanzadas de programación, comunicación digital o integración ciberfísica, que representan hoy un componente central en la automatización de alto nivel.

A pesar de estas delimitaciones, el trabajo ha evidenciado múltiples posibilidades de evolución y aplicación de la electroneumática:

- Como tecnología de base en procesos industriales que requieren fuerza, precisión y confiabilidad.
- Como recurso formativo altamente didáctico para la enseñanza de automatización lógica y diseño de circuitos.
- Como campo de investigación en desarrollo, con potencial para articularse con tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, la robótica colaborativa y la digitalización industrial.

En este sentido, el futuro del campo no debe entenderse únicamente como una transición hacia sistemas más complejos, sino como la consolidación de un pensamiento técnico crítico, capaz de combinar eficiencia, simplicidad e innovación. La electroneumática, bien comprendida y adecuadamente implementada, puede seguir siendo una tecnología estratégica, tanto por sus prestaciones técnicas como por su capacidad de adaptarse a diversos contextos productivos y educativos.

Finalmente, esta obra deja planteado un horizonte abierto para quienes deseen profundizar, complementar o aplicar los conocimientos aquí expuestos. La electroneumática no se agota en su definición técnica; es una invitación permanente a pensar, diseñar y automatizar con inteligencia.

Epílogo

Pensar técnicamente es, en el fondo, una forma de pensar el mundo con orden, sentido y propósito. En esta obra, el recorrido por la electroneumática ha sido más que una exposición de principios, esquemas y dispositivos: ha sido un ejercicio de articulación entre la lógica de los sistemas y la lógica del conocimiento. Cada válvula analizada, cada circuito interpretado, cada esquema descompuesto, ha servido como punto de partida para comprender cómo la técnica se convierte en lenguaje, y cómo ese lenguaje estructura realidades productivas y educativas.

La electroneumática no es una tecnología nueva, pero sí es una tecnología renovable. Su vigencia no depende únicamente de sus aplicaciones actuales, sino de su capacidad de diálogo con las exigencias de la automatización inteligente, la eficiencia energética, la sostenibilidad operativa y la formación crítica. En tiempos de transformación digital, en los que las soluciones tienden a complejizarse, la electroneumática ofrece una alternativa clara: resolver problemas con estructuras simples, confiables y fundamentadas.

Este libro se ha propuesto ofrecer no solo información, sino criterios de análisis, herramientas de interpretación y elementos de proyección. Se ha escrito pensando tanto en el técnico que diseña con destreza, como en el estudiante que da sus primeros pasos, el docente que sistematiza su enseñanza o el investigador que busca fundamentos para nuevas propuestas. Su contenido, lejos de agotarse, queda ahora disponible para ser ampliado, discutido o aplicado.

La automatización, como toda tecnología, no es un fin en sí mismo. Es un medio para construir sistemas más eficientes, ambientes de trabajo más seguros y sociedades más productivas. Que la electro-neumática siga cumpliendo ese propósito dependerá de nuestra capacidad para combinar experiencia y reflexión, conocimiento y creatividad, técnica y ética. Si este libro contribuye, aunque sea mínimamente, a ese propósito, entonces su tarea estará cumplida.

Referencias Bibliográficas

1. Foit, K., Banaś, W. & Ćwikla, G. The pneumatic and electropneumatic systems in the context of 4 th industrial revolution. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 400, (2018).
2. Zeballos Hurtado, N. J., Cosi Blancas, A. J., Zeballos Hurtado, N. J. & Cosi Blancas, A. J. Control de secuencias por mandos a distancia en sistemas electroneumáticos: una revisión de la literatura. *Revista InveCom* 4, (2024).
3. Carlos, R. & Corrales, J. Análisis comparativo de controles Neumáticos y Electroneumáticos en diferentes tipos de Secuencias. *Revista Científica Multidisciplinar G-nerando* 4, 883-902–883–902 (2023).
4. Markodimitrakis, I. E., Vourdas, N. & Papathanasiou, A. G. Electropneumatic Surfaces: Pairing Electrowetting and Air Pressure for Reversible Droplet Mobility Switching. *Adv Mater Interfaces* 10, 2201814 (2023).
5. Cofré Barrientos, C. E. Estudio de factibilidad de renovación de la planta de aire comprimido para el incremento de la productividad en una empresa textil ica - 2018. (2018).

6. Iglesias-Ríos, M. & Mujica-Ortega, H. Implementación del gemelo digital de un proceso secuencial. *AMCA* 1, 13–15 (2021).
7. Concobá González, B. A. Buenas prácticas para el montaje de tubería ASTM A53-B del sistema neumático del molino 1 de una planta cementera. *Universidad de San Carlos de Guatemala* 1, (2022).
8. Meza, J., Leal, M. & Cevallos, G. I Simposio ‘Ciencia, tecnología e innovación’. *Revista de Investigación Científica TSE DE* 7, ág. 1-138 (2024).
9. Villa-López, F. H., García-Guzmán, J., Enríquez, J. V., Leal-Ortíz, S. & Ramírez-Ramírez, A. Electropneumatic System for Industrial Automation: A Remote Experiment within a Web-Based Learning Environment. *Procedia Technology* 7, 198–207 (2013).
10. Ayadi, A., Smaoui, M., Aloui, S., Hajji, S. & Farza, M. Adaptive sliding mode control with moving surface: Experimental validation for electropneumatic system. *Mech Syst Signal Process* 109, 27–44 (2018).
11. Quintino Gargantilla, S. et al. Eficacia de las medias de compresión neumática intermitente frente a la terapéutica tradicional farmacológica. *Revisando la evidencia de los retos en Salud*, 2021, ISBN 978-84-1122-673-8, págs. 271-282 271–282 (2021).
12. Kotkas, L., Donskoy, A., Zharkovskii, A. & Zhurkin, N. The Distributed Parameter Model of an Electro-Pneumatic System Actuated by Pneumatic Artificial Muscles with PWM-Based Position Control. *Energies* 2024, Vol. 17, Page 3381 17, 3381 (2024).

13. Corrales, J., Estrella, D., Pazuña, W., Hidalgo, W. & Romero, F. Introducción Práctica a la Neumática: conceptos básicos y aplicaciones inmediatas. *Revista Científica Multidisciplinar G-nerando* 4, 11–11 (2023).
14. Castaño, J. et al. Electropneumatic system for the simulation of the pulmonary viscoelastic effect in a mechanical ventilation scenario. *Scientific Reports* 2023 13:1 13, 1–11 (2023).
15. Qi, Y., Lu, H., Du, H., Guo, X. & Liu, H. Effect of resistance components on solid mass flow rate of the pneumatic conveying system. *Chemical Engineering Research and Design* 212, 536–545 (2024).
16. Estupiñán Gómez, L. F. Diseño del plan de mantenimiento preventivo para equipos industriales de la empresa Papeles Regionales S.A.S. (Universidad Tecnológica Pereira, 2024).
17. Triviño, J., Barberán, J., Ordóñez, D., Lojano, J. & Quintero, J. Realidad aumentada como herramienta educativa para aprender electroneumática. *Revista Científica Multidisciplinar G-nerando* 4, 12–19 (2023).
18. Thayil, T., Zhang, J., Vadakkepat, P., Al Mamun, A. & Sagar, K. A Novel Interoperability Evaluation Framework for the Warehouse Management System. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)* (2023) doi:10.1109/IECON51785.2023.10312572.
19. Barragán, L. & Zaldívar, D. Automatización de Procesos en la Industria 4.0. *Revista de Investigación Formativa: Innovación y Aplicaciones Técnico - Tecnológicas* 5, 6–6 (2023).

20. Chalanga, A. & Plestan, F. High-Order Sliding-Mode Control with Predefined Convergence Time for Electropneumatic Actuator. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 29, 910–917 (2021).
21. Saravanakumar, D., Mohan, B. & Muthuramalingam, T. A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems. *Precis Eng* 49, 481–492 (2017).
22. Cox, S. Advances in pneumatic systems draw in more machine applications | Control Design. *Control Design* 2, 11–23 (2023).
23. Urteaga, E. La teoría de sistemas de Niklas Luhmann. *Contrastes. Revista Internacional de Filosofía* 15, (2010).
24. Escaño, J., Caballero, J. & García, A. *Planificación de La Instalación Del Sistema Automático*. vol. 1 (Paraninfo, Madrid, 2019).
25. Ceceña, A. & Barreda, A. *Producción Estratégica y Hegemonía Mundial*. vol. 1 (Siglo XXI, Madrid, 1995).
26. Ng, H. W. & Alleyne, A. Modeling and Control of an Electro-Pneumatic Actuator. *IFAC Proceedings Volumes* 33, 351–357 (2000).
27. Cornejo, J. et al. *Buenas prácticas para el aseguramiento de la calidad en la educación superior*. (Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2023).
28. Coto, M. R., Orellana, J. S. M., Soriano, R. A. L., Aguilar, M. R. Z. & Escobar, H. A. F. Artículo Circulo: Sobre el desarrollo humano. *Revista Perspectivas del Desarrollo* 6, 271–296 (2021).

29. Gattringer, H., Naderer, R. & Bremer, H. Modeling and Control of a Pneumatically Driven Stewart Platform. *Motion and Vibration Control - Selected Papers from MOVIC 2008* 93–102 (2009) doi:10.1007/978-1-4020-9438-5_10.
30. Casa Verde. Automatización sostenible: energía de residuos con IA. *Casa Verde Hub* 23–32 (2024).
31. Vázquez, T. Automatización energética sostenible para el éxito empresarial. *Life Is On - Schneider Electric* (2024).
32. Editorial. Automatización energética sostenible para el éxito empresarial. *Ibero News* 1, 11–13 (2024).
33. Sánchez, H. A. S., Tarango, L. A., Rangel, H. S. S. & Ortega, V. I. B. Diseño del sistema de gestión inteligente para eficientar el uso de la energía a través de la automatización de un edificio en una Institución Superior. *Revista Electrónica sobre Tecnología, Educación y Sociedad* 11, (2024).

Anexos

ANEXO I

Tabla 4. Simbología neumática normalizada

SÍMBOLO	ELEMENTO REPRESENTADO	DESCRIPCIÓN
□□→□	Válvula 3/2 NC (normalmente cerrada)	3 vías, 2 posiciones, cerrada en reposo
□←→□→□	Válvula 5/2 biestable	Controla doble efecto, con doble pilotaje
□→	Final de Carrera	Sensor eléctrico
→	Cilindro de simple efecto	Solo extensión bajo presión
⇄	Cilindro de doble efecto	Extensión y retracción bajo presión
🌀	Fuente de aire comprimido	Alimentación del sistema neumático
■	Solenoide	Bobina de activación eléctrica de una válvula

Nota. Referencia visual y técnica de los símbolos más utilizados en esquemas neumáticos y electroneumáticos, según normativas internacionales (ISO 1219, DIN 24300).

ANEXO II

Tabla 5. Codificación y denominación de válvulas

CÓDIGO	TIPO	VÍAS	POSICIONES	FUNCIÓN CARACTERÍSTICA
3/2 NC	Válvula normalmente cerrada	3	2	Paso de aire al pulsar
3/2 NO	Válvula normalmente abierta	3	2	Paso de aire en reposo
5/2	Válvula de doble efecto	5	2	Extiende y retrae cilindro
5/3 CC	Válvula centro cerrado	5	3	Mantiene posición de actuadores
5/3 CO	Válvula centro abierto	5	3	Descarga aire en reposo
5/3 PP	Válvula centro presurizado	5	3	Aire activo en ambas cámaras

Nota. Estandarización de la identificación de válvulas en función de sus características técnicas.

ANEXO III

Tabla 6. Fichas técnicas de componentes de un sistema electroneumático

COMPONENTES	DETALLES
Cilindro de Doble Efecto	<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro: 32 mm • Carrera útil: 100 mm • Presión de trabajo: 2 – 10 bar • Tipo de montaje: Brida frontal • Velocidad: hasta 0.5 m/s
Válvula 5/2 Biestable	<ul style="list-style-type: none"> • Vías: 5 • Posiciones: 2 • Actuación: Doble pilotaje neumático • Presión mínima: 2.5 bar • Caudal: 500 l/min
Relé Electromagnético	<ul style="list-style-type: none"> • Tensión: 24 VCC • Contactos: 2 NA + 2 NC • Capacidad de carga: 6 A • Tiempo de activación: 15 ms
Sensor de final de carrera (eléctrico)	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo: Mecánico • Contacto: Normalmente cerrado (NC) • Tensión admisible: 24 VCC / 220 VCA • Vida útil: 10^6 ciclos

ANEXO IV

Tabla 7. Glosario técnico

TÉRMINO	DEFINICIÓN
Autorretención	Técnica que mantiene una señal activa tras cesar la acción de entrada
Enclavamiento	Lógica que impide la activación simultánea de señales incompatibles
Servopilotaje	Activación de válvulas mediante una señal auxiliar previa
Válvula 5/2	Componente que permite controlar el avance y retroceso de un cilindro
Final de carrera	Sensor que detecta la llegada de un actuador a una posición determinada
Relé	Dispositivo eléctrico que conmuta señales mediante un campo magnético
Simbología neumática	Representación gráfica estandarizada de componentes de automatización
Interoperabilidad	Capacidad de distintos dispositivos de trabajar coordinadamente
Caudal	Volumen de aire que pasa por un conducto en un tiempo determinado

Electroneumática Aplicada: Fundamentos, Esquemas y Sistemas de Control en la Automatización Industrial ofrece un análisis detallado de la electroneumática aplicada a la automatización industrial, explorando su transición desde sistemas neumáticos tradicionales hacia soluciones híbridas que integran la neumática y la electrónica. Aborda los fundamentos teóricos, la evolución tecnológica y las aplicaciones prácticas de esta tecnología en entornos industriales.

Dividido en cinco capítulos, el texto comienza con la historia de la automatización y la evolución de los sistemas de control, destacando la electroneumática como respuesta a las limitaciones de los sistemas neumáticos clásicos. Se analizan conceptos clave como la simplicidad estructural y la interoperabilidad, esenciales para el diseño de sistemas avanzados y eficientes.

El libro incluye ejemplos funcionales y esquemas detallados, facilitando la comprensión de mandos neumáticos, servopilotaje y diseño de válvulas. Finalmente, se reflexiona sobre el futuro de la electroneumática y su papel crucial en la optimización de procesos industriales. Este texto es una herramienta clave para estudiantes, ingenieros y técnicos en el campo de la automatización industrial.

