Revista Ciencia Innovación y Tecnología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria Juan de Castellanos. ISSN en línea: 2422-0264. Vol. 5. Año 2021

CONTROLADORES ELECTRÓNICOS EN LA AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES

Becerra Duitama, Jhonatan Alexander[1]; Enciso, Carlos Javier; Gómez, Juan David

Maestría en Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada,
[1]u3900273@unimilitar.edu.co

RESUMEN

En la actualidad, dentro del ámbito de la automatización, y específicamente en el desarrollo de sistemas industriales, se han desarrollado tres tecnologías principales para la transformación de energía en movimientos o procesos requeridos: la neumática, la hidráulica y la eléctrica. Cada uno de estos sistemas posee ventajas y desventajas particulares, y su aplicación se dirige a diferentes segmentos de la industria en función de los requerimientos propios de cada uno. Estas tres tecnologías abarcan casi en su totalidad todos los procesos industriales actuales, por lo que este trabajo se centrará en dar a conocer las investigaciones vigentes en cada campo, con el fin de determinar la trayectoria que está tomando cada una de ellas y las posibles aplicaciones futuras que se pueden dar a estos desarrollos en el marco de una automatización a un sistema industrial.

Palabras clave: sistemas industriales, automatización, neumática, hidráulica, eléctrica.

ABSTRACT

Currently, in the field of automation focused more specifically on the development of industrial systems, three main technologies have been developed for the transformation of energy into required movements or processes, which are pneumatic, hydraulic and electrical. Each of these systems has advantages and disadvantages and are oriented to different segments in the industry according to the specific requirements of each. These three technologies cover almost entirely all current industrial processes, so this work will focus on making available current research in each field in order to enable it to determine what direction each of them is taking and the possible future applications that can be given to these developments within the framework of an automation to an industrial system.

Keywords: industrial systems, automation, pneumatics, electric, hydraulics.

INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, el hombre ha tenido la necesidad de fabricar máquinas y sistemas que le faciliten sus labores cotidianas. Inicialmente, con la invención de la rueda y la transmisión del movimiento de manera manual, mediante animales o mediante flujo de agua controlado; y en los últimos años, con la transmisión de energía mecánica empleando mecanismos tales como correas de transmisión, cadenas, piñones, poleas, bielas, engranajes, entre otros. Sin embargo, estos sistemas de transmisión poseen baja eficiencia respecto a la velocidad de operación, a la baja capacidad de control del torque, a una distribución desigual de las cargas

y a la necesidad de contar con un espacio grande de trabajo. Por tal motivo, se han desarrollado tres sistemas principales de transmisión de energía, los cuales pueden clasificarse como neumáticos, hidráulicos y eléctricos (Suzumori y Faudzi, 2018).

En primer lugar, los sistemas neumáticos constituyen una forma de energía extensamente utilizada en la industria, gracias a sus atributos operativos tales como la entrega de energía rápida y sencilla, el almacenamiento simple, la exactitud y precisión, además de su resistencia ante diversas condiciones ambientales a las que puedan estar expuestos. Como es de esperarse, cualquier sistema también cuenta con ventajas y desventajas, en este caso, el aire necesita ser tratado adecuadamente antes de ingresar al sistema con el fin de eliminar impurezas existentes y la humedad, esto con el fin de conservar en buen estado todos los elementos posteriores (Papoutsidakis *et al*., 2018), además de esto, actualmente este tipo de sistemas de fluidos (incluyendo la hidráulica), cuentan con eficiencia extremadamente bajas en comparación a los sistemas eléctricos (Stelson, 2011), lo cual hace que se sigan dando desarrollos enfocados en mejorar esta cifra y explorando nuevas aplicaciones para la industria como se verá más adelante.

Los sistemas hidráulicos son utilizados para una gran variedad de aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento, tales como el sector de la construcción, el sector industrial (prensas hidráulicas), en aplicaciones militares, aeroespaciales y de maquinaria móvil. Los actuadores hidráulicos tienen ventaja sobre los actuadores eléctricos y neumáticos, debido a que tienen una amplia capacidad de carga, una gran robustez, facilidad de controlar la velocidad de flujo y una alta relación peso/potencia entregada (Parr, 2011). Cabe resaltar que, los sistemas hidráulicos funcionan con aceites derivados del petróleo, esto permite un mayor control en la fuerza aplicada y la velocidad de carga. No obstante, los sistemas hidráulicos poseen ciertas limitaciones, tales como pérdidas de energía y singularidades, las cuales se atribuyen en gran medida a las válvulas convencionales (Mattila *et al*., 2017).

En cuanto a los sistemas eléctricos automatizados, ampliamente utilizados en diversas industrias, estos desempeñan funciones de protección a través de sistemas de apantallamiento (que abarcan desde pararrayos hasta dispositivos de protección contra sobretensiones - DPS) en cada nivel de la instalación eléctrica (Arévalo y Moreno, 2016). Asimismo, realizan tareas de sensado, comúnmente ejecutadas por sensores de presencia (basados en la perturbación de campos magnéticos o eléctricos, tales como sensores capacitivos o inductivos), sensores de variables eléctricas (intensidad y voltaje) y sensores de variables físicas vectoriales y escalares (posición, temperatura, humedad, nivel, entre otras). Adicionalmente, se cuenta en la actualidad con actuadores lineales y rotacionales que inciden directamente en el proceso industrial automatizado.

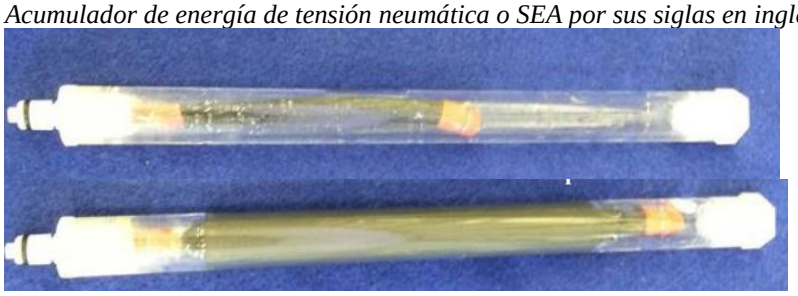
Adicionalmente, las nuevas tecnologías eléctricas y electrónicas permiten la programación de tareas por medio de *software* especializados y orientados a la automatización que ejecutan y supervisan el proceso industrial, dichos *software* hacen uso de diferentes lenguajes de programación como Ladder, VHDL; algunos de ellos permiten implementar sistemas de control, además de ejecución y supervisión en tiempo real. Ahora, es importante también mencionar las tendencias hacia la industria 4.0 y todo lo que supone la autosuficiencia de los procesos industriales.

En este artículo se compila información sobre diferentes tecnologías actuales utilizadas para la automatización de procesos industriales: i) Sistemas neumáticos, ii) Sistemas hidráulicos, y iii) Sistemas eléctricos. Además, se concluye con una discusión acerca de los beneficios y desventajas de cada tecnología.

1. Sistemas Neumáticos

Los sistemas neumáticos, como ya se mencionó, son muy flexibles, pero presentan algunas debilidades a la hora de su aplicación en entornos reales por las limitaciones de la tecnología implementada hasta el momento. A raíz de esto, se han presentado desarrollos que se centran en mejorar estos aspectos, con el fin de aumentar la aplicabilidad y eficiencia de esta tecnología que tiene gran potencial por las ventajas con las que cuenta. Por un lado, en Stelson (2011), se menciona que la eficiencia es realmente baja, incluso menor que en el caso de la hidráulica, debido a la presencia de reguladores y filtros, lo cual sienta el precedente de que es necesario explorar tecnologías que permitan obtener sistemas más eficientes y, por tanto, amigables con el medio ambiente, tal como el descrito en Cummins *et al*. (2017). En este trabajo se muestra de manera experimental un novedoso prototipo que permite reciclar el gas de escape de un actuador neumático de manera eficiente, y este, a su vez, es utilizado para alimentar otro elemento neumático. Como resultado, se logró pasar de un 15 % de eficiencia del sistema inicialmente planteado a valores entre el 31 % y el 60 %, demostrando así que puede tratarse de una opción viable para mejorar significativamente la eficiencia de los sistemas neumáticos conocidos hasta el momento.

Figura 1.
Acumulador de energía de tensión neumática o SEA por sus siglas en inglés.



Nota. Tomado de Cummins *et al*. (2017).

Por otra parte, se ha venido trabajando en el mejoramiento de otra de las aplicaciones de la neumática en la industria, el cual es el transporte de sólidos mediante tuberías haciendo uso de presiones de aire. Si bien este sistema de transporte es eficiente y limpio, adolece de ciertos inconvenientes que son objeto de investigación para su resolución. En la actualidad, se constata la ausencia de un método de medición no invasiva del flujo de sólidos que ofrezca fiabilidad y precisión en la obtención de datos en tiempo real. Esta carencia supone un desafío para su incorporación en numerosas industrias que demandan una visualización continua de los procesos y todas las variables inherentes a ellos. En este contexto, Zheng y Liu (2011) presentan diversas tecnologías destinadas a solventar dicha problemática, como los sensores térmicos, cuya particularidad reside en su implementación invasiva o no invasiva según los requerimientos y los datos que se deseen visualizar del proceso, junto con otros desarrollos igualmente válidos y aplicables a sectores específicos de las industrias para las cuales fueron concebidos.

Otra de las problemáticas es descrita por Kotzur *et al*. (2018), quienes afirman que, durante la implementación de este tipo de sistemas, no existe un ensayo que permita identificar de manera fiable el desgaste mecánico de las partículas sólidas transportadas. Por tal motivo, se considera crucial seguir investigando estos campos específicos para estructurar un ensayo con condiciones controladas que permita establecer las condiciones de trabajo idóneas en respuesta a las necesidades actuales.

Figura 2.
Sección de un sistema neumático para el transporte de sólidos.

Nota. Pneumatic Conveying – Tunra Bulk Solids (s.f.).

A través del tiempo, se han desarrollado actuadores neumáticos que imitan el comportamiento de un tejido muscular regular, para efectuar movimientos que no serían posibles obtener haciendo uso de los actuadores rotacionales o lineales convencionales. Estos dispositivos, conocidos como músculos artificiales neumáticos o PAM (acrónimo de su denominación en inglés), cuyos primeros prototipos datan aproximadamente de 1950, constituyen un tema de investigación vigente para potenciales aplicaciones en la industria, la robótica y otras áreas de la ingeniería. Su atractivo radica en el bajo costo relativo a la complejidad de los movimientos que posibilitan y en su diseño idóneo para la implementación en interfaces humano-máquina, al disminuir la exposición a riesgos inherentes a otros sistemas existentes. Los aportes más recientes se centran en el modelado de estos actuadores mediante redes neuronales o esquemas de lógica difusa. Esto ha permitido obtener mejores resultados, eliminando no linealidades y mejorando el control, lo que los convierte en una opción de diseño cada vez más viable (Krishna *et al*., 2011).

Figura 3.
Variantes de PMAs.

Nota. Tomado de Deaconescu (2007).

Finalmente, y en conexión con lo expuesto, se persigue la realización de aportes en el control y la exactitud que pueden alcanzarse mediante el empleo de actuadores neumáticos en general. Esta línea de investigación se refleja en Saravanakumar *et al*. (2017), donde, partiendo de los principios fundamentales de un sistema neumático convencional, se analizan los diversos avances realizados en los últimos años para el control de posición en servoactuadores neumáticos. Se trata de un ámbito complejo, dada la presencia de no linealidades intrínsecas a esta tecnología, y que se encuentra en pleno desarrollo con miras a su aplicación en la manufactura de productos de pequeña escala que exigen una elevada precisión (en ciertos casos, a escala nanométrica). Aunque esto último se consigue mediante actuadores híbridos, estos adolecen de desventajas notables en comparación con la neumática, tales como la necesidad de un suministro de corriente continuo y de alta intensidad, o la incapacidad para operar en entornos húmedos, polvorientos, químicamente agresivos o en presencia de radiación o campos electromagnéticos.

2. Sistemas Hidráulicos

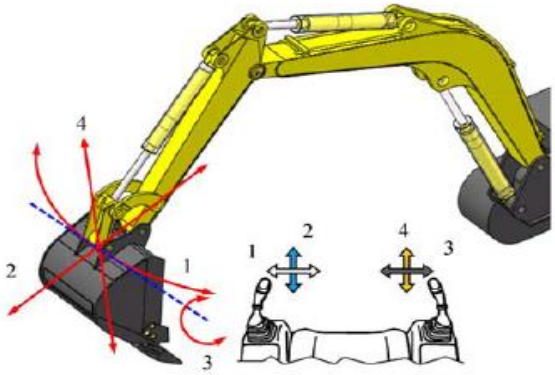
Un campo de aplicación de la hidráulica, que ha tenido grandes avances tecnológicos recientemente, es el campo de la maquinaria móvil. Las maquinarias móviles, tales como excavadoras y grúas, se caracterizan por un espacio de instalación limitado y una producción elevada de emisiones por parte del motor. Sumado a lo anterior, la presión y el flujo de aceite no permanecen constantes, es decir, varían frecuentemente en el tiempo (Xu y Cheng, 2018). Para garantizar un correcto funcionamiento de estas máquinas, es necesario considerar dos aspectos importantes. En primer lugar, el sistema debe tener buena dinámica, es decir, debe tener robustez, buena amortiguación, margen de estabilidad y velocidad de respuesta; y, en segundo lugar, debe tener alta eficiencia, debido a que la eficiencia en las máquinas actuales varía del 6 % al 40 % dependiendo de la aplicación (Stelson, 2011).

El objetivo de las máquinas móviles es que un operador controle varios actuadores simultáneamente, por medio de varias palancas, con buena respuesta y comportamiento dinámico. A diferencia de otras máquinas con sistemas electromecánicos, el control automático sigue siendo una deficiencia en la maquinaria móvil, esto debido a que el reconocimiento del entorno de trabajo y la identificación automática de la tarea a realizar dificulta controlar el sistema. De igual manera, la fiabilidad, el costo, el ruido y algunos otros aspectos son factores que afectan dicho control. Por tal razón, se han desarrollado circuitos y estrategias de control para cumplir con las necesidades existentes (Xu y Cheng, 2018).

Una de las herramientas que han sido implementadas es el sistema hidromecánico de detección (SHD). Este sistema está conformado por una bomba de desplazamiento variable y válvulas de centro cerrado o direccionales. La presión de la bomba se controla mediante la retroalimentación de la presión del sistema, preestableciendo un valor por encima de la carga máxima (Axin *et al*., 2016). No obstante, aún se generan pérdidas de energía, tal como las generadas por el valor de presión preestablecido, las ocasionadas por el estrangulamiento y las producidas por la variación de la carga y la presión consumida por el compresor (Xu y Cheng, 2018). Para evitar este tipo de pérdidas en el sistema hidráulico de maquinaria móvil, utilizando SHD, se han implementado válvulas electrohidráulicas. Con este tipo de válvulas, se ha mejorado la eficiencia, debido a que ahorra energía, aumenta la flexibilidad en el sistema y mejora el funcionamiento de la maquinaria (Ding *et al*., 2017).

Otro factor a considerar es el manejo de la maquinaria. Entender la cinemática inversa del brazo hidráulico (excavadora), requiere de un tiempo extenso de entrenamiento y de extrema concentración. Un modo de operación menos complicado es el denominado Control Coordinado de Velocidad, Coordinated Rate Control (CRC), el cual controla la velocidad del flujo. La figura 4 ilustra este sistema de operación. Este método consiste en dos *joysticks* electrónicos que controlan la posición del efector final, uno es para la altura y los movimientos de la pala, y el otro es para los movimientos de balanceo y la distancia radial. Las pruebas han demostrado que la interfaz de control de posición coordinada, Coordinated Position Control (CPC), facilita el funcionamiento y mejora la precisión, en comparación con los esquemas de control convencionales (Yoon y Manurung, 2010).

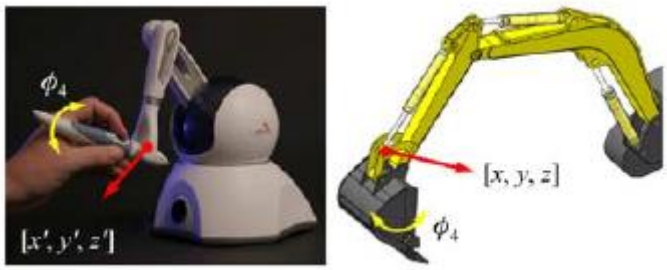
Figura 4.
Operación típica del Control Coordinado de la Tasa.



Nota. Tomado de Winck *et al*. (2015).

Otro tipo de control manual es el control de posición. El *joystick*, en este caso, da las órdenes de posición de los actuadores, en vez de las velocidades. Los resultados han confirmado que el control por posición es superior al control de velocidad, exceptuando el caso en donde exista gran manipulación con baja dinámica (bajas frecuencias naturales). Los dispositivos que generan comandos de control de posición se pueden dividir en dos tipos: palancas de mando cinemáticamente similares (Osafo-Yeboah *et al*., 2013) y palancas de mando cinemáticamente no similares (Chung *et al*., 2010). Se han utilizado dispositivos de entrada hápticos (Phantom Premium y SensAble Omni) para generar comandos de posición (figura 5). Esto significa que el brazo de la maquinaria solo imita el movimiento del dispositivo de entrada con escalado de posición (control maestro-esclavo).

Figura 5.
Control de posición usando SensAble Omni devices.



Nota. Tomado de Xu y Cheng (2018).

La robótica constituye otro importante campo de acción para la hidráulica, siendo aplicada generalmente en robots de búsqueda y rescate, así como en robots con locomoción basada en patas. La utilización de robots en situaciones de desastre (incendios, terremotos, derrumbes, inundaciones, etc.) reviste gran importancia para optimizar la respuesta en estos escenarios (Suzumori y Faudzi, 2018). No obstante, la mayoría de los robots actualmente disponibles no se encuentran operativos en este tipo de ambientes. Por tal motivo, se concibió el proyecto ImPACT, cuyo objetivo primordial es la congregación de expertos académicos e industriales con el fin de generar robots robustos capaces de soportar estas condiciones extremas (Kimura *et al*., 2019). Se espera que estos robots posean resistencia física (gracias a sistemas hidráulicos), adaptabilidad al terreno y otras capacidades relevantes.

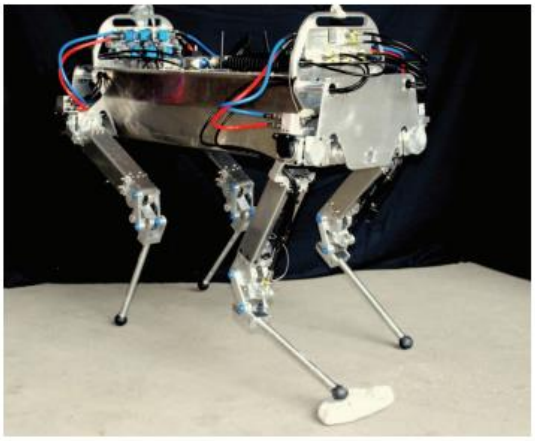
Por ejemplo, Komatsu y la universidad de Osaka desarrollaron una mano con cuatro dedos usando un actuador hidráulico novedoso para uso en robots de construcción (Yoshinada *et al*., 2019), como el que se muestra en la figura 6. El cilindro utilizado tiene una relación fuerza/masa dos veces mayor que el cilindro hidráulico normal. El actuador rotativo tiene casi tres veces la relación par/masa que el motor hidráulico convencional; y la articulación giratoria permite que la manguera se mueva con facilidad, evitando torcerse, enredarse o romperse. Estos componentes permiten que la manguera aplique una fuerza diferente dependiendo de la forma del elemento a cargar (Suzumori y Faudzi, 2018).

Figura 6.
Manipulador de cuatro dedos levantando carga.

Nota. Tomado de Kamegawa *et al*. (2017).

Otro tipo de robot, con aplicaciones hidráulicas, es el robot con patas. Dependiendo de la configuración, pueden existir robots de 2 a 6 patas. El robot HyQ es un cuadrúpedo de 1 metro de altura, con una masa aproximada de 90 kg y doce articulaciones de par controlado accionadas mediante una combinación de actuadores hidráulicos y eléctricos (Semini *et al*., 2011). De este robot se han desarrollado dos versiones mejoradas: el MiniHyQ y el HyQ2max. El MiniHyQ (figura 7), que constituyó el robot hidráulico más pequeño hasta ese momento, es controlado íntegramente por pares de torsión, presentando una masa de 35 kg y una altura cercana a 1 metro (Khan *et al*., 2017). El HyQ2max representa la evolución del HyQ, con una masa de 80 kg y, debido a su mayor robustez, requiere una potencia superior y exhibe habilidades de locomoción extendidas (Semini *et al*., 2017).

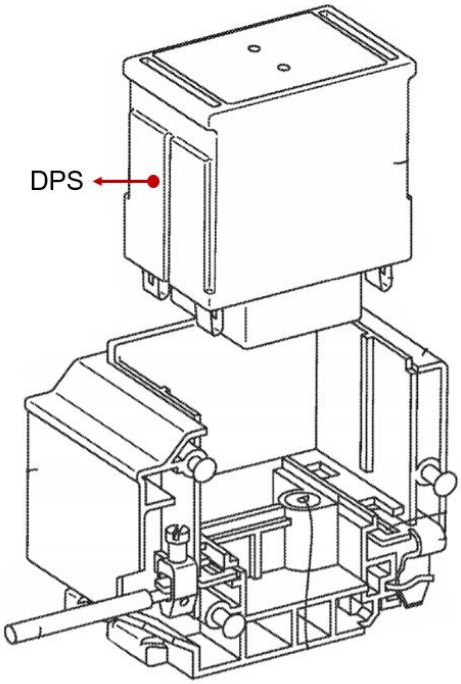
Figura 7.
Robot MiniHyQ.



Nota. Tomado de Khan *et al*. (2017).

Los sistemas eléctricos automatizados comprenden desde los sistemas de apantallamiento, cuya función es la protección de la instalación eléctrica y la prevención de posibles daños ocasionados por disrupciones (entendidas como la avería de dispositivos electrónicos producto de sobretensiones), hasta la implementación de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS). Estos últimos, mediante un conmutado de alta velocidad, disipan la energía generada por las descargas eléctricas atmosféricas (Harris, 2010). En la figura 8, adaptada de (Gillespie *et al*., 2012), se ilustra un DPS común.

Figura 8.
Dispositivo protector contra sobretensiones (DPS).

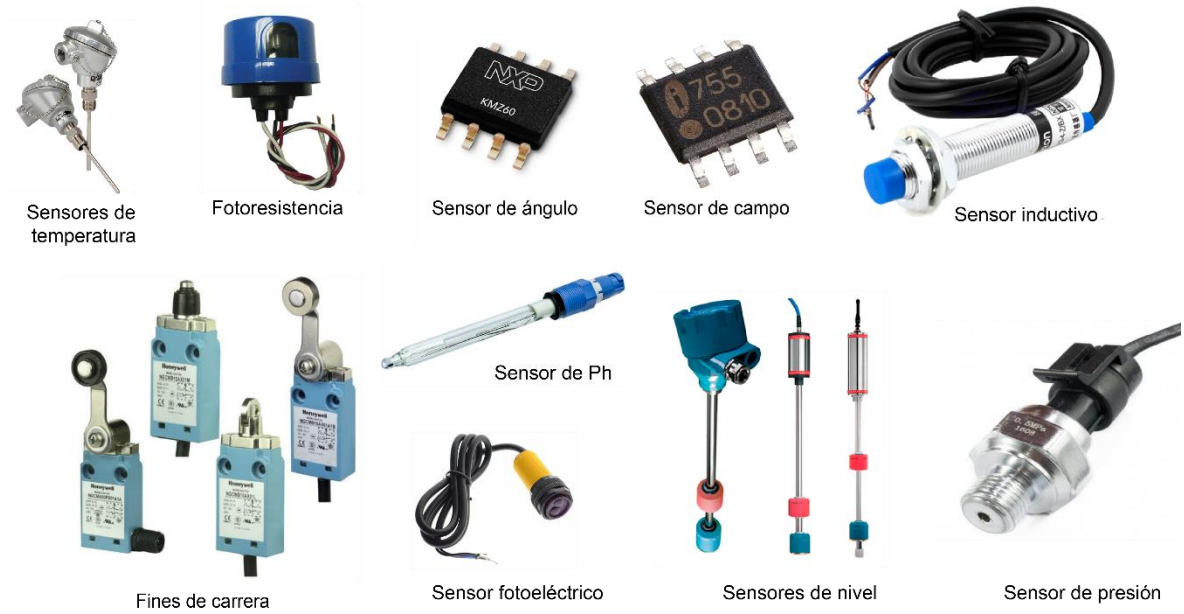


En los procesos automatizados, se encuentran asimismo sensores que posibilitan la lectura del estado actual de diversas variables físicas o químicas, información crucial para determinar el nivel de eficiencia con el que se desarrolla el proceso (Wendling, 2010). Dado que las características eléctricas de los sensores no siempre son compatibles con un sistema de control, su señal de salida generalmente requiere ser manipulada mediante circuitos de

interfaz. Estos circuitos cumplen la función de amplificar, escalar y acondicionar la señal, la cual, dependiendo del tipo de sensor, puede ser de naturaleza analógica o digital. Un sensor analógico se define por una señal de salida que proporciona información en un espectro infinito de valores dentro de un rango preestablecido (Serna, 2010). En contraste, la señal de salida de un sensor digital se distingue por ofrecer valores discretos y únicos dentro de una codificación binaria.

En la industria se hace uso de una gran gama de sensores que hacen lectura de infinidad de variables. En la figura 9 se pueden observar algunos de los más utilizados.

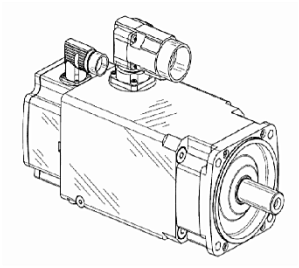
Figura 9.
Sensores industriales.



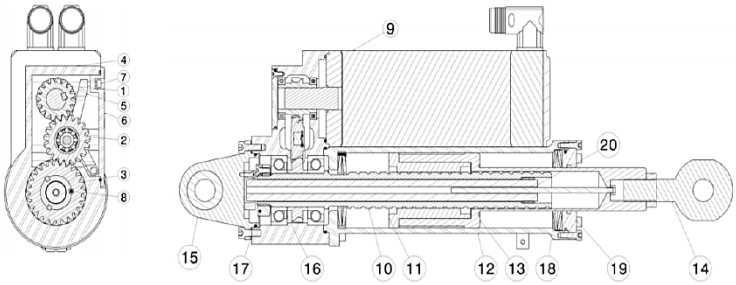
Nota. Adaptada de Qian *et al*. (2014), Jogschies *et al*. (2015) y Golby (2010).

De igual manera, en la industria se dispone de dispositivos que proporcionan energía mecánica a los procesos industriales conocidos como actuadores, los cuales, a partir de un estímulo físico, generan movimiento, rotacional o lineal. El actuador eléctrico por excelencia es el motor, a partir del cual, y por medio de sistemas mecánicos, se pueden generar diferentes tipos de movimientos. En la figura 10 se observan algunos actuadores eléctricos.

Figura 10.
Sensores industriales.



Actuador eléctrico rotacional (Motor)



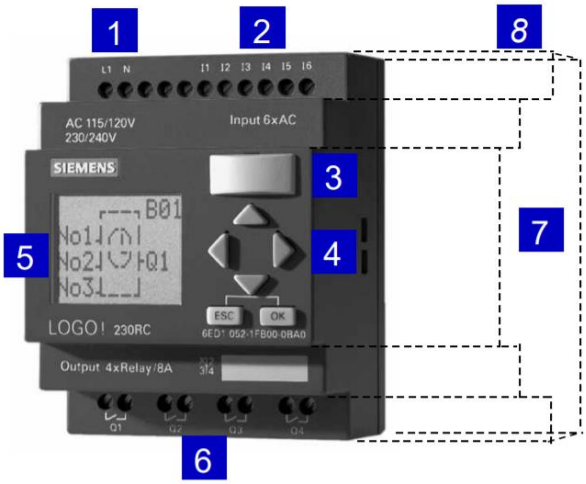
ITEM	Nombre	ITEM	Nombre
1	Engranaje Conductor	11	Tuerca Tornillo de Bolas recirculante
2	Engranaje Intermediario	12	Cilindro
3	Engranaje Conducido	13	Embolo
4	Carcaza	14	Extremo Articulado
5	Ballesta	15	Toma articulada
6	Tapa Carcaza	16	Rodamientos de CA
7	Tornillo de Ajuste	17	Tuerca de Precarga
8	Chaveta	18	Resorte Platillo
9	Motor ITT-MDM 5000-0854	19	Tapa antirotativa
10	Tornillo de Bolas recirculante 32x10	20	LVDT

Actuador eléctrico lineal (Pistón)

Nota. Adaptada de Veeh y Oechsner (2016) y Dutto *et al*. (2016).

Las nuevas tecnologías electrónicas también permiten automatizar procesos industriales a través de unidades lógicas programables, computadores y tarjetas de desarrollo, las cuales, por medio de sus entornos de software, ofrecen herramientas de supervisión y modificación del proceso de manera remota. Inicialmente, podemos hablar de los Relés programables que son dispositivos basados en lógica booleana y compuertas lógicas como los LOGO de Siemens (ver figura 11).

Figura 11.
Relé programable LOGO.



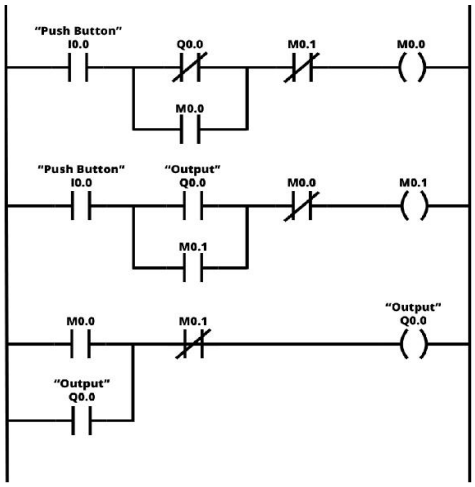
Anchura: 72 mm (4WM) ó 126 mm (7WM)
Altura: 90 mm 90 mm
Profund: 55 mm 55 mm

1 Terminales de alimentación
2 Terminales de entrada
3 Conector PC/Módulo
4 Teclado de servicio
5 Pantalla de Visualización
6 Terminales de salida
7 Montaje sobre perfil DIN de 35 mm. mediante un simple ¨clack¨
8 AS-Interface opcional para los modelos ¨Largos¨

Nota. Adaptada de Siemens (2011).

Posterior a los relés lógicos programables, se desarrollaron los controladores lógicos programables (PLC), dispositivos similares a los Relés, pero en los cuales la lógica de programación está gobernada por Ladder (Escalera en inglés), el cual es un lenguaje gráfico basado en esquemas eléctricos básicos y que recibe su nombre debido a la forma en que se dispone en pantalla, en forma de escalera. En la figura 12 se observa el lenguaje Ladder y un PLC.

Figura 12.
Ladder y Controlador lógico programable PLC.



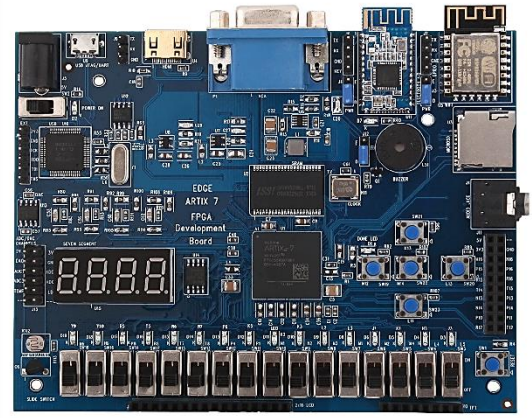
Nota. Adaptada de Beresford (2011).

Tecnologías aún más actuales se basan en el uso de tarjetas de desarrollo, algunas de las cuales se programan en VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language), un lenguaje mediante el cual se configuran dispositivos denominados FPGA (Field Programmable Gate Array) (Ashenden, 2010). Su versatilidad radica en su capacidad para adaptarse a diferentes sectores industriales y en la amplitud de sus posibles aplicaciones. La figura 13 ilustra el lenguaje VHDL y un dispositivo FPGA.

Figura 13.
VHDL y Tarjeta FPGA.

```
use WORK.ANALOG_DEFS.all;
entity ANALOG_AMP is
port
    (INPUT : in ANALOG_SIGNAL;
     OUTPUT : out ANALOG_SIGNAL;
     PWR, GND : in ANALOG_SIGNAL);
    -- Declare propagation delay
    constant AMP_DELAY : TIME := 15 ns;
end ANALOG_AMP;

architecture FUNCTIONAL of ANALOG_AMP is
    -- Declare transconductance gain
    constant TRANSCONDUCTANCE_GAIN : REAL := 1_000.0;
begin
    -- Describe input/output transform
    OUTPUT.I <= TRANSCONDUCTANCE_GAIN * INPUT.V after AMP_DELAY;
end FUNCTIONAL;
```



Nota. Adaptada de Vachoux *et al*. (2012).

CONCLUSIONES

Los métodos avanzados de Control Coordinado de Velocidad y Control Coordinado de Posición son capaces de lograr seguridad, comodidad, precisión y funcionamiento efectivo. Sin embargo, sus altos costos y la baja confiabilidad impiden la implementación de estos métodos de control.

El sector de la robótica tiene mucho potencial para utilizar componentes hidráulicos. Sin embargo, como los movimientos deben ser precisos, se debe trabajar en controlar el torque y la velocidad de los actuadores.

REFERENCIAS

Arévalo Díaz, E. Y. y Moreno Pérez, E. H. (2016). *Sistema de apantallamiento contra descargas atmosféricas en campos abiertos*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/145

Ashenden, P. J. (2010). *The designer's guide to VHDL*. Morgan Kaufmann.

Axin, M., Eriksson, B. y Krus, P. (2016). A flexible working hydraulic system for mobile machines. *International Journal of Fluid Power*, *17*(2), 79-89. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/14399776.2016.1141635

Beresford, D. (2011). Exploiting siemens simatic s7 plcs. *Black Hat USA*, *16*(2), 723-733.

Chung, J., Lee, S. H., Yi, B. J. y Kim, W. K. (2010). Implementation of a foldable 3-DOF master device to a glass window panel fitting task. *Utomation in Construction*, *19*(7), 855-866. https://doi.org/s://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.05.004

Cummins, J. J., Nash, C. J., Thomas, S., Justice, A., Mahadevan, S., Adams, D. E. y Barth, E. J. (2017). Energy conservation in industrial pneumatics: A state model for predicting energetic savings using a novel pneumatic strain energy accumulator. *Applied Energy*, *198*, 239-249. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.036

Deaconescu, T. (2007). *Studies regarding the performance of pneumatic muscles* (Vol. 8).

Ding, R., Xu, B., Zhang, J. y Cheng, M. (2017). Self-tuning pressure-feedback control by pole placement for vibration reduction of excavator with independent metering fluid power system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *92*, 86-106. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.01.012

Dutto, E. A., Salomone, J. E., Onco, A. R., Lagier, S., Cova, W. J., Jazni, J. E. y Pedroni, J. P. (2016). *Diseño definitivo de un actuador electromecánico de control de vector empuje para vehículos lanzadores con tobera flexible*. [ponencia]. V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. Santiago del Estero, República de Argentina.

Gillespie, B. J., Laubach, C. J., Moser, R. D., Mcclellan, D. M. y Mickievicz, S. K. (2012). *U.S. Patent Application No. 13/329,793*.

Golby, J. (2010). *Advances in inductive position sensor technology*. Sensor Review. doi:10.1108/02602281011022742

Harris, R. A. (2010). *U.S. Patent No. 7,768,761*. U.S. Patent and Trademark Office.

Jogschies, L., Klaas, D., Kruppe, R., Rittinger, J., Taptimthong, P., Wienecke, A., Rissing, L. y Wurz, M. C. (2015). Recent developments of magnetoresistive sensors for industrial applications. *Sensors*, *15*(11), 28665-28689.

Kamegawa, T., Qi, W., Suhara, H., Matsuda, E., Akiyama, T., Sakai, S. y Suzuki, Y. (2017). Development of a snake robot moving in a pipe with helical rolling motion. In *JSME Conference on Robotics and Mechatronics* (pp. 1-4).

Khan, H., Kitano, S., Frigerio, M., Camurri, M., Barasuol, V., Featherstone, R., Caldwell, D. y Semini, C. (2017). Development of the lightweight hydraulic quadruped robot — MiniHyQ. In *IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)* (pp. 6343-6348). https://doi.org/10.1109/TePRA.2015.7219671

Kimura, T., Takamori, T., Sheh, R., Murao, Y., Igarashi, H., Hasumi, Y. y Tadokoro, S. (2019). Field Evaluation and Safety Management of ImPACT Tough Robotics Challenge. *Disaster Robotics*, *128*, 481-506. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-05321-5_10

Kotzur, B. A., Berry, R. J., Zigan, S., García-Triñanes, P. y Bradley, M. S. A. (2018). Particle attrition mechanisms, their characterisation, and application to horizontal lean phase pneumatic conveying systems: A review. *Powder Technology*, *334*, 76-105. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.047

Krishna, S., Nagarajan, T. y Rani, A. M. A. (2011). Review of current development of pneumatic artificial muscle. *Journal of Applied Sciences*, *11*(10), 1749-1755. https://doi.org/10.3923/jas.2011.1749.1755

Mattila, J., Koivumäki, J., Caldwell, D. G. y Semini, C. (2017). A Survey on Control of Hydraulic Robotic Manipulators with Projection to Future Trends. *IEEE/ASME Trans Mechatronics*, *22*(2), 69-80. https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2668604

Osafo-Yeboah, B., Jiang, S., Delpish, R., Jiang, Z. y Ntuen, C. (2013). Empirical study to investigate the range of force feedback necessary for best operator performance in a haptic controlled excavator interface. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *43*(3), 197-202. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.02.005

Papoutsidakis, M., Chatzopoulos, A. y Tseles, D. (2018). Hydraulics and Pneumatics: A Brief Summary of their Operational Characteristics. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, *5*(10), 8973-8977.

Parr, A. (2011). *Hydraulics and Pneumatics: A Technician's and Engineer's Guide* (3.ª ed.). Elsevier.

Pneumatic Conveying – Tunra Bulk Solids. (s.f.). Recuperado el 28 febrero de 2020, de https://www.bulksolids.com.au/Services/Services---Items/Pneumatic-Conveying-Equipment-and-Testing-Services.aspx?tag=806

Qian, Y., Luo, Z., Liu, Z., Zhao, H., Li, C., Song, Y., ... & Wei, J. (2014). *Application of rtd sensor in the real time measurement and wireless transmission*. [ponencia]. Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (pp. 658-662). IEEE.

Saravanakumar, D., Mohan, B. y Muthuramalingam, T. (2017). A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems. *Precision Engineering*, *49*, 481-492. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.014

Semini, C., Barasuol, V., Goldsmith, J., Frigerio, M., Focchi, M., Gao, Y. y Caldwell, D. G. (2017). Design of the Hydraulically Actuated, Torque-Controlled Quadruped Robot HyQ2Max. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, *22*(2), 635-646. https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2616284

Semini, C., Tsagarakis, N. G., Guglielmino, E., Focchi, M., Cannella, F. y Caldwell, D. G. (2011). Design of HyQ – a hydraulically and electrically actuated quadruped robot. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, *225*(6), 831-849. https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0959651811402275

Serna, A., Ros, F. y Rico, J. C. (2010). *Guía práctica de sensores*. Creaciones Copyright SL.

Siemens, A. G. (2011). *LOGO*. Manual de producto, Núremberg, Alemania.

Stelson, K. A. (2011). *Saving the world's energy with fluid power*. [ponencia] Proceedings of the 8th JFPS International Symposium on Fluid Power (pp. 25-28). Okinawa.

Suzumori, K. y Faudzi, A. A. (2018). Trends in hydraulic actuators and components in legged and tough robots: a review. *Advanced Robotics*, *32*(9), 458-476. https://doi.org/10.1080/01691864.2018.1455606

Vachoux, A., Bergé, J. M., Levia, O. y Rouillard, J. (Eds.). (2012). *Analog and Mixed-Signal Hardware Description Language* (Vol. 10). Springer Science & Business Media.

Veeh, M. y Oechsner, C. (2016). *U.S. Patent Application No. 29/512,151*.

Wendling, M. (2010). *Sensores*. Universidade Estadual Paulista.

Winck, R. C., Elton, M. y Book, W. J. (2015). A practical interface for coordinated position control of an excavator arm. *Automation in Construction*, *51*, 46-58. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.12.012

Xu, B. y Cheng, M. (2018). Motion control of multi-actuator hydraulic systems for mobile machineries: Recent advancements and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*, *13*(2), 151-166. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11465-018-0470-5

Yoon, J. y Manurung, A. (2010). Development of an intuitive user interface for a hydraulic backhoe. *Automation in Construction*, *19*(6), 779-790. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.04.002

Yoshinada, H., Kurashiki, K., Kondo, D., Nagatani, K., Kiribayashi, S., Fuchida, M. y Okutomi, M. (2019). Dual-arm construction robot with remote-control function. *Disaster Robotics*, *128*, 195-264. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-05321-5_5

Zheng, Y. y Liu, Q. (2011). Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *44*(4), 589-604. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.01.013