

# ESTADO ACTUAL Y FUTURO DE LA INGENIERÍA DE CONTROL

O. Pinzón Ardila<sup>1</sup>, Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga

Recibido Julio 6, 2010 – Aceptado Septiembre 30, 2010

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v4n2.a01>

**Resumen**—En este artículo se muestra una breve revisión del estado actual de la ingeniería de control y se analiza el campo del control automático desde una perspectiva tecnológica, mostrando los éxitos y el impacto que ha tenido en las últimas décadas esta área de conocimiento en la sociedad moderna. También se analizan los diferentes sistemas de control industrial y se muestran las oportunidades y retos tanto actuales como futuros a los que se debe enfrentar este campo de la ingeniería sin olvidar los aspectos claves en el área de la enseñanza de la ingeniería de control.

**Palabras Clave**—Tecnología, ingeniería de control, sistemas de control, control industrial, control automático, sistemas en lazo cerrado, control distribuido, sistemas SCADA.

**Abstract**—This article shows a brief overview of the current state of control engineering, analyzing the fields of automatic control from a technological perspective, showing the successes and the impact that it has had in recent decades in modern society. Also, different kind of industrial control systems are discussed, showing opportunities and challenges in automatic control without forgetting the key aspects in the field of engineering control education.

**Keywords**—Technology, control engineering, control systems, industrial control, automatic control, closed loop systems, distributed control, SCADA systems.

## I. INTRODUCCIÓN

EL campo de la ingeniería de control establece los principios y los métodos que se utilizan para diseñar sistemas donde se muestra un funcionamiento deseado de forma automática, adaptándose a los cambios del entorno. De hecho, durante los últimos cuarenta años el campo de la ingeniería de control ha sido testigo de grandes avances, aprovechando las mejoras tecnológicas en los sistemas de medición y computación con avances en los conceptos y fundamentos matemáticos [1]. Hoy en día, los sistemas de control juegan un papel importante en muchos campos, incluyendo la industria de manufactura, electrónica, comunicaciones, transporte, redes de computadores y sistemas militares.

## II. REVISIÓN DE LA INGENIERÍA DE CONTROL

Al comenzar el siglo XXI, se expanden las posibilidades de aplicar los principios y métodos de la ingeniería de control. La computación, comunicación y los sensores son dispositivos cada vez más económicos, que incluyen procesadores embebidos, sensores y hardware de red [2]. Lo anterior ha hecho posible el desarrollo de máquinas con un grado de inteligencia que influyen en casi todos los aspectos de la vida en este planeta, incluyendo no sólo los productos disponibles, sino también el entorno mismo en que vivimos.

Los nuevos desarrollos en este mundo de la información se han incrementado, requiriendo una importante expansión del conjunto de herramientas básicas de control. La complejidad de las ideas involucradas en la operación de internet, mandos semi-autónomos de sistemas de control y la gestión de las cadenas de suministro de las empresas, por citar algunos ejemplos, están al límite de lo que actualmente se puede desarrollar con los métodos disponibles en control [3]. Las futuras aplicaciones en el transporte y la robótica aeroespacial, la información y redes, las máquinas inteligentes, la biología y la medicina, los materiales y el procesamiento van a crear sistemas que están mucho más allá de nuestros actuales niveles de complejidad [4]. Por lo tanto se requerirá de un nuevo desarrollo en investigación en la próxima evolución de los sistemas de control.

El control generalmente utiliza algoritmos y realimentación en los sistemas. En su forma más simple, un sistema de control es un dispositivo que mide una cantidad o variable para modificar el comportamiento de un sistema mediante la computación y los actuadores [5]. La ingeniería de sistemas de control tiene sus raíces en la revolución industrial con dispositivos tales como el gobernador centrífugo de *James Watt* [6,7]. Este dispositivo utiliza un mecanismo denominado *flyball* para medir la velocidad de rotación de una turbina de vapor y ajusta el flujo de vapor en la máquina utilizando una serie de conexiones mecánicas. Por ese entonces, la velocidad de la turbina entregaba seguridad, confiabilidad y una operación consistente necesaria para permitir una rápida propagación de las fábricas de vapor [6].

Hoy en día, el control juega un papel importante y esencial en el desarrollo de las tecnologías tales como la energía

<sup>1</sup> O Pinzón-Ardila, Profesor Asociado de la Facultad de Ingeniería Electrónica. Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga. Km 7 Vía Piedecuesta, Bucaramanga, Colombia, e-mail: omar.ninzon@unb.edu.co

eléctrica, las comunicaciones, el transporte y la manufactura [8]. Ejemplos de esto se pueden ver en los sistemas de piloto automático en la aviación tanto militar como la comercial, la regulación y control de las redes eléctricas, en la precisión alcanzada para el posicionamiento de las cabezas de los discos duros cuando realizan operaciones de lectura o escritura. La realimentación está llevando a la tecnología en una gran variedad de áreas de aplicación, esta ha sido reinventada y patentada muchas veces en diferentes contextos [8].

Desde un punto de vista moderno, el control se encarga de observar la realimentación como una herramienta para mitigar las incertidumbres. Al medir el funcionamiento de un sistema, comparándolo con una referencia y ajustando las variables de control disponibles [5]. Hoy en día, se puede hacer que el sistema responda correctamente, incluso si su comportamiento dinámico no se conoce con exactitud o en presencia de las perturbaciones externas tienden a causar que el sistema responda de forma errática. Esta es una característica esencial de los sistemas dado que estos sistemas deben operar de forma confiable y eficiente bajo una variedad de condiciones. Es precisamente este aspecto del control una condición necesaria para garantizar la robustez e incertidumbre y lo que explica el por qué los sistemas de control realimentado están cada día más en nuestro moderno mundo tecnológico [9]. Por lo tanto, los sistemas de control se encuentran en nuestros hogares, automóviles, productos electrónicos de consumo, en nuestras fábricas y sistemas de comunicaciones, en nuestros medios de transporte y en sistemas militares y espaciales [10].

El uso del control es muy amplio y abarca diversas aplicaciones. Estas incluyen el control de sistemas electromecánicos, donde los actuadores controlados por un computador y los sensores regulan el comportamiento del sistema; el control de los sistemas electrónicos, donde la retroalimentación se utiliza para compensar las variaciones de los parámetros o los componentes para proporcionar un funcionamiento más confiable y repetible; el control de la información y sistemas de decisión, donde los recursos limitados se asignan dinámicamente basándose en las estimaciones de las necesidades futuras [11]. Los principios de control también se pueden encontrar en áreas como la biología, la medicina y la economía, donde los mecanismos de retroalimentación siempre están presentes. Cada vez más, el control es también una función crítica en ingeniería de sistemas donde los sistemas fallarán si el sistema de control no funciona.

Las contribuciones en el campo del control provienen de muchas disciplinas, incluyendo las matemáticas puras y aplicadas, de ingenierías tales como la aeroespacial, química, mecánica y eléctrica; la ingeniería industrial y la economía; las ciencias físicas y biológicas. La interacción con estos diferentes campos son una parte importante de la historia y el esfuerzo de este campo [12,13].

Por otra parte, la Ingeniería de Control o de Sistemas de Control es una disciplina de la ingeniería donde se aplica la teoría de control para el diseño de sistemas con comportamientos predecibles [11]. En la práctica se utilizan sensores para medir la salida del dispositivo a controlar y estas medidas se utilizan para dar realimentación a los actuadores que pueden hacer correcciones para lograr un funcionamiento deseado. Cuando un dispositivo se diseña para funcionar sin la necesidad de una acción humana y corregir los cambios a perturbaciones se denomina control automático (por ejemplo, el control de crucero que utilizan los vehículos de alta gama). La ingeniería de los sistemas de control, multidisciplinar en su naturaleza, se centra principalmente en la implementación de los sistemas de control derivados de modelado matemático de sistemas muy diversos [14].

La ingeniería de control moderna es un campo de estudio relativamente nuevo que consiguió una gran atención durante el siglo XX con el adelanto de la tecnología. Esta disciplina puede definirse como la aplicación práctica de la teoría de control [1]. La ingeniería de control ha jugado un papel importante en el desarrollo de una amplia gama de sistemas de control, ya sea desde simples máquinas lavadoras hasta los aviones de combate de alto rendimiento tales como los F-16 [15]. En esta disciplina se trata de comprender los sistemas físicos, utilizando modelos matemáticos, en términos de entradas, salidas y varios componentes con diferentes comportamientos; la utilización de herramientas de diseño de sistemas de control para desarrollar controladores para estos sistemas e implementar los controladores en sistemas físicos utilizando la tecnología disponible. Un sistema puede ser mecánico, eléctrico, químico, financiero o biológico, los cuales se modelan matemáticamente, se analizan y diseñan controladores utilizando la teoría de control en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, dependiendo de la naturaleza del problema de diseño [5].

Antes de emerger como disciplina única, la ingeniería de control se desarrolló como una parte de la ingeniería mecánica así que la teoría de control se estudiaba como una parte de la ingeniería eléctrica, dado que los circuitos eléctricos se podían describir fácilmente mediante la técnica de la teoría de control. En las primeras expresiones del control, una corriente de salida se podía representar con una entrada de un control de tensión [7]. Sin embargo, no se contaba con la tecnología adecuada para implementar un sistema eléctrico de control, así que los diseñadores se quedaron con la opción de sistemas mecánicos que respondían lentamente pero eran menos eficientes. Un muy efectivo controlador mecánico que es aún utilizado en algunas plantas hidroeléctricas es el gobernador [10]. Más tarde, anterior a la electrónica de potencia moderna, los sistemas de control de procesos en aplicaciones industriales fueron ideados por ingenieros mecánicos que utilizaban dispositivos de control neumáticos e hidráulicos, muchos de los cuales todavía están en uso hoy en día.

El control del proceso es una disciplina que mezcla la estadística y la ingeniería para crear arquitecturas, mecanismos y algoritmos para el control de la salida de un proceso específico. Por ejemplo, climatizar la temperatura de una habitación es un proceso que tiene un resultado específico, se desea alcanzar y mantener constante una temperatura definida (por ejemplo, 21° C) [3]. En este caso, la temperatura es la variable controlada. Al mismo tiempo que es la variable de entrada del sistema porque se mide con un termómetro y se utiliza para decidir si hay que aumentar o disminuir la temperatura. La temperatura deseada es la consigna, referencia o mando. El estado de la calefacción o aire acondicionado se llama la variable manipulada, ya que está sujeta a acciones de control.

Un dispositivo de uso común en el área de control es el controlador lógico programable. Este dispositivo se utiliza para leer un conjunto de entradas digitales y analógicas donde se aplican un conjunto de instrucciones lógicas y se generan un conjunto de salidas analógicas y digitales. Retomando el ejemplo del sistema de climatización de una habitación, la temperatura ambiente sería una entrada al PLC (*Programmable Logic Controller* en sus siglas en inglés). Las declaraciones lógicas sería comparar el punto de ajuste a la temperatura de entrada y determinar si es necesario activar la calefacción o activar el aire acondicionado para mantener la temperatura constante. Una salida del PLC se destina para operar la calefacción y la otra salida para operar el aire acondicionado en función de los requerimientos del sistemas [11].

Hay dos grandes divisiones en la teoría del control, fundamentalmente: la clásica y la moderna [5], que tienen repercusiones directas sobre las aplicaciones de ingeniería de control. El ámbito de aplicación de la teoría clásica de control se limita al diseño de sistemas de una sola entrada y una sola salida (denominados sistemas SISO). El análisis de sistemas se realiza fundamentalmente en el dominio del tiempo mediante ecuaciones diferenciales o en el dominio del espacio complejo con la transformada de *Laplace* o el dominio de la frecuencia mediante la transformación del dominio del espacio complejo. En este caso, todos los sistemas se supone que son de segundo orden y de una sola variable, con lo cual se ignoran las respuestas de orden superior, al igual que se eliminan los efectos de un sistema multivariable. Un controlador que se diseña utilizando la teoría clásica por lo general requiere de un ajuste en planta debido a las aproximaciones dadas en su diseño. Sin embargo, debido a la facilidad de implementación física del controlador si se compara con un controlador diseñado mediante la teoría de control moderna, los controladores clásicos son los preferidos en la mayoría de aplicaciones industriales. Los controladores más comunes diseñados utilizando la teoría clásica de control son los controladores PID (Proporcional Integral Derivativo) [16].

En la mayoría de los casos, los ingenieros de control utilizan realimentación en el diseño de sistemas de control. Esto se logra a menudo mediante un sistema de controlador PID [1]. Por ejemplo, en un automóvil con control de crucero, la velocidad se monitorea y se realimenta continuamente el par del motor para mantener la velocidad constante del vehículo. Donde hay una realimentación periódica, la teoría de control se puede utilizar para determinar cómo responde el sistema a esa realimentación.

Aunque la realimentación es un aspecto importante de la ingeniería de control, los ingenieros también pueden trabajar en el control de los sistemas sin realimentación. Esto se conoce como control en lazo abierto. Un ejemplo clásico de control en lazo abierto es una lavadora que funciona a través de un ciclo de predeterminado sin utilizar sensores [16].

En contraste, la teoría de control moderna se lleva a cabo estrictamente en el espacio complejo o el dominio de la frecuencia y puede hacer frente a múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) [17]. Esto supera las limitaciones de la teoría clásica de control en la mayoría de problemas de diseño más sofisticado, como lo es, el control de procesos de hidrocarburos. En el diseño moderno, un sistema se representa como un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden, definidas mediante las variables de estado. Las teorías de control no lineal, multivariable, adaptativo y robusto entran en esta división. La teoría de control moderna, siendo relativamente nueva, tiene muchas áreas aún por explorar, a pesar que los estudiosos tales como *Rudolf E. Kalman* y *Aleksandr Lyapunov* han desarrollado los fundamentos muchos años atrás [16].

La ingeniería de control es la disciplina de la ingeniería que se centra en el modelado de una amplia gama de sistemas dinámicos (por ejemplo, los sistemas mecánicos) y el diseño de controladores que hacen que estos sistemas se comporten de la manera deseada. Aunque los controladores no requieren que sean eléctricos, muchos lo son, por lo tanto la ingeniería de control es a menudo vista como un sub-área de la ingeniería eléctrica y electrónica. Sin embargo, con la caída del precio de los microprocesadores se está consiguiendo que la aplicación de los sistemas de control sea mucho más efectiva.

### III. UNA PERSPECTIVA TECNOLÓGICA

La tecnología industrial de los sistemas de control ha evolucionado en las últimas tres o cuatro décadas. Los sistemas de control distribuidos o los DCS de sus siglas en inglés se utilizan para controlar procesos industriales como la generación de energía eléctrica, refinerías de petróleo y gas, agua y tratamiento de aguas residuales, y químicos, los alimentos y la producción de automóviles. Los DCS se integran como una arquitectura de control que contiene un nivel de supervisión de múltiples sub-sistemas integrados que

se encargan de controlar los detalles de un proceso localizado. El concepto DCS surgió de una necesidad de reunir datos y controlar los sistemas en un gran campo en tiempo real, utilizando una banda ancha de datos con una baja latencia en las redes de comunicación [18,19]. Es común que los controles locales requieren enviar información a otros controladores de más alto nivel en un DCS. Estos sistemas evolucionaron debido a la necesidad de ampliar los sistemas neumáticos de control más allá de una pequeña área de una refinería [1].

Por su parte, el controlador lógico programable, PLC de sus siglas en inglés, surgió de la necesidad de reemplazar gabinetes de relés. Estos últimos no eran fiables y eran difíciles de cablear y diagnosticar cuando existía un fallo. Los PLCs facilitan las operaciones lógicas booleanas, contadores de tiempo, y (en algunos modelos) el control continuo PID, ajustando las ganancias de la función de control del PLC que puede asociar a un sistema continuo. Los PLC son dispositivos de estado sólido basados en microprocesadores que controlan equipos y procesos industriales. Mientras que el PLC puede controlar los componentes de un sistema SCADA y utilizarlos en los sistemas de DCS, a menudo son los principales componentes en configuraciones más pequeñas del sistema de control utilizado para proporcionar el control reglamentario de los procesos discretos, tales como líneas de montaje de automóviles. De hecho, hoy en día los PLC se utilizan ampliamente en casi todos los procesos industriales [21].

Por su parte, la historia del SCADA tiene sus raíces en aplicaciones de distribución, tales como la energía, el gas natural, y las tuberías de agua, donde hay una necesidad de recopilar datos a distancia a través de enlaces de poco ancho de banda, alta latencia, poco fiables o con operación intermitente. Los sistemas SCADA crean lazos de control con sitios que están muy separados geográficamente. De hecho, un sistema SCADA utiliza RTU (unidades terminales remotos, también conocidos como unidades de telemetría a distancia) para enviar datos de control de nuevo a un centro de control. La mayoría de los sistemas de RTU poseen alguna capacidad limitada para manejar los controles locales, si la estación principal no está disponible. Sin embargo, en los últimos años los sistemas de RTU han crecido más su capacidad de manejar los controles locales.

Las fronteras entre estas definiciones del sistema se van difuminando con el tiempo. El límite técnico que llevó a los diseños de estos diversos sistemas ya no son un problema. Muchas plataformas de PLC actualmente pueden realizar operaciones de pequeños DCS, utilizando el control remoto de entradas salidas analógicas y los lazos de control con capacidad de comunicar los datos al sistema supervisorio. Hoy en día no es raro tener excelentes infraestructuras de telecomunicaciones con alta fiabilidad que en algunos sistemas SCADA consiguen el control en lazo cerrado a largas distancias.

Con los desarrollos tecnológicos se ha llegado al concepto de un PAC (controlador de automatización programable o controlador de automatización de procesos). Esto es una mezcla de estos tres conceptos: PLC, RTU y DCS. El tiempo y el mercado determinarán si esto puede simplificar la parte de la terminología y la confusión que rodea a estos conceptos en la actualidad.

#### IV. SISTEMAS DE CONTROL INDUSTRIAL

Los Sistemas de Control Industrial (SCI) son un término general que cubre varios tipos de sistemas de control, incluido el control supervisorio y de adquisición de datos, denominado sistemas SCADA, los sistemas de control distribuido o DCS y otras configuraciones más pequeñas de los sistema de control, tales como conseguidas con los controladores lógicos programables que a menudo se encuentran en los sectores industrial y de infraestructuras críticas.

Los sistemas de control industrial se utilizan normalmente en industrias tales como la electricidad, agua, transporte de petróleo o de gas. Estos sistemas se fundamentan en la información recibida de las estaciones remotas, automatizadas o accionadas por el mando de un operador de control, el cual puede activar dispositivos que se encuentran alejados de la estación de control, los cuales a menudo se les conoce como dispositivos de campo. Los dispositivos de campo se encargan de controlar las operaciones locales, tales como abrir o cerrar válvulas, operar interruptores, o recoger datos de los sistemas de sensores y vigilancia local para determinar las condiciones de alarma.

#### V. LOS ÉXITOS Y EL IMPACTO DE LA INGENIERÍA DE CONTROL

En los últimos 40 años con la llegada de la electrónica analógica y digital hizo posible que la tecnología de control se extienda más allá de sus aplicaciones iniciales, logrando que se aplique la ingeniería de control a muchas aplicaciones. Entre los éxitos visibles de los desarrollos pasados del control se encuentran [1]:

- *El guiado y control de vehículos aeroespaciales*, incluyendo las aeronaves, guiado de misiles, aviones avanzados de combate, lanzamiento de satélites. Estos sistemas de control junto con el circuito de seguimiento, proporcionando una estabilidad en la presencia de grandes perturbaciones en el entorno del sistema.
- *Los sistemas de control en las industrias de fabricación*, desde la automoción a los circuitos integrados. Las máquinas controladas por computador proporcionan un montaje y posicionamiento preciso necesario para producir una alta calidad de fabricación de los productos y componentes de alto rendimiento.

- *Los sistemas de control de proceso industriales*, especialmente en la industria de los hidrocarburos y del tratamiento químico. Estas mantienen una alta calidad del producto mediante la vigilancia de miles de señales obtenidas de sensores y realizan los ajustes correspondientes de cientos de válvulas, calentadores, bombas y otros actuadores.
- *Control de los sistemas de comunicaciones*, incluido los sistemas telefónicos, teléfonos celulares e Internet. Los sistemas de control regulan los niveles de potencia de la señal de los transmisores y repetidores, gestionar los buffers de paquetes en la red de enrutamiento de los equipos y proveen la cancelación de ruido adaptativo para responder a una variedad de características de las líneas o medios de transmisión.

Estas aplicaciones han tenido un enorme impacto en la productividad de una sociedad moderna. Además de su repercusión en las aplicaciones de ingeniería, el control también ha realizado importantes contribuciones intelectuales. Los teóricos de control y los ingenieros han hecho un uso riguroso de la ingeniería de control y contribuciones a las matemáticas, motivadas por la necesidad de desarrollar técnicas que demuestren herramientas adecuadas para el diseño de sistemas realimentados. Los ingenieros han sido coherentes defensores de la perspectiva de "los sistemas" y han desarrollado técnicas confiables de modelado, análisis y diseño junto con las pruebas que permiten el diseño y la aplicación de una amplia variedad de sistemas muy complejos en ingeniería. Por otra parte, la comunidad del control es una fuente importante y un campo de entrenamiento para las personas que requieren aplicar la ingeniería de control a sus sistemas.

## VI. OPORTUNIDADES Y RETOS FUTUROS

Al mirar hacia adelante, las posibilidades de nuevas aplicaciones se extienden rápidamente fundamentándose en los avances del control. La llegada de la computación distribuida, la comunicación y los sistemas de sensores han comenzado a crear un entorno en el que se tiene acceso a enormes cantidades de datos y con una capacidad de procesar y comunicar esos datos de forma que eran inimaginables hace 20 años [1]. Esto tendrá un profundo efecto en las aplicaciones militares, comerciales y científicas, especialmente en los sistemas de software que comienzan a interactuar con los sistemas físicos de una forma cada vez más integradas [15]. Un ejemplo de estos son los sistemas de control dedicados al despacho de energía eléctrica. En estos sistemas, el control será un elemento cada vez más esencial de la construcción de tales sistemas interconectados, proporcionando un alto rendimiento, un alto grado de confianza y la posibilidad de una operación reconfigurable en presencia de eventualidades o

incertidumbres.

En todas estas áreas, los requisitos de cada nivel del sistema serán muy superiores a la confiabilidad alcanzada por cada uno de los componentes de forma individuales. En este punto es donde precisamente el control, en su sentido más general, desempeña un papel central, ya que permite que el sistema se asegure que está logrando sus objetivos a través de la corrección de sus acciones con base en detección de su estado actual. El reto para el campo es pasar de la vista tradicional de los sistemas de control como un único proceso con un solo controlador al reconocimiento de sistemas de control como una colección heterogénea de sistemas físicos y de información con complejas interconexiones e interacciones [3].

Además de la comunicación de bajo costo, la computación e instrumentación integran una importante tendencia en el control pasando del control de bajo nivel a niveles superiores de toma de decisiones. Esto incluye avances tales como una mayor autonomía en los sistemas de vuelo (hasta llegar a completar la operación de vuelos no tripulados), y la integración de los lazos locales de realimentación dentro de la planificación de toda la empresa y sistemas de asignación inteligente de recursos. Al extender los beneficios del control de estos sistemas no tradicionales se ofrece enormes oportunidades para la mejora de la eficiencia, productividad, seguridad y confiabilidad [17,19].

El control es una tecnología crítica en los sistemas de defensa y es cada vez más importante en la lucha contra el terrorismo. El control permite el funcionamiento de los sistemas autónomos no tripulados y semiautomáticos para ejecutar misiones difíciles o peligrosas, así como los mandos sofisticados de sistemas de control que permitan sistemas robustos [21]. La utilización del control en los microsistemas y los sensores web mejorará nuestra capacidad para detectar amenazas antes de causar daños y los nuevos usos de la realimentación en los sistemas de comunicación proporcionarán redes fiables, flexibles y seguras para una operación dinámica, incierta y desarrollada en entornos adversos.

Con el fin de aprovechar el potencial del control aplicado a estas nuevas aplicaciones, nuevos métodos y enfoques se deben desarrollar. Entre los desafíos que actualmente enfrenta el campo, se muestran unos ejemplos que permiten comprender las dificultades que se adelantan [3]:

- *Control de sistemas al mismo tiempo de dinámicas tanto simbólicas como continuas*. La próxima generación de sistemas combinarán operaciones lógicas (tales como el razonamiento simbólico y la toma de decisiones) con cantidades continuas (tales como tensiones y posiciones). La teoría actual no se ha adaptado para hacer frente a esos sistemas, especialmente a medida que la escala de los sistemas

es muy elevada.

- *El control distribuido en entornos de una red asíncrona.* El control distribuido a través de múltiples unidades de computación, interconectados a través de las comunicaciones basadas en paquetes, requerirá de nuevos formalismos para garantizar la estabilidad, rendimiento y robustez. Esto es especialmente cierto en aplicaciones donde no se puede ignorar las limitaciones computacionales y de comunicaciones en las operaciones de control.
- *Alto nivel de coordinación y autonomía.* Cada vez más, la retroalimentación se está diseñando en los sistemas de decisión de toda las empresas, incluyendo la gestión de la cadena de suministro y la logística, gestión del espacio y tráfico aéreo. Los avances de las últimas décadas en el análisis y diseño de sistemas de control robusto pueden extenderse a un nivel de toma decisiones siempre que estos sistemas puedan funcionar de manera confiable en entornos reales.
- *La síntesis automática de algoritmos de control,* con la verificación y validación integrada. Los futuros sistemas de ingeniería requieren la capacidad de diseñarse, rediseñar e implementar el software de control rápidamente. Los investigadores deben desarrollar herramientas mucho más potentes de diseño, automatizando el proceso completo de diseño de un sistema de control desde el desarrollo del modelo a su prueba en sistemas de prototipado rápido, incluyendo la verificación y validación del software.

Cada uno de estos desafíos requiere de muchos años de esfuerzo por parte de la comunidad científica para que los resultados sean rigurosos, prácticos y ampliamente disponibles. Además, se requiere solicitar las inversiones de los organismos financieros para asegurar que el progreso actual sea continuo y que las tecnologías de próxima generación se logren implantar al máximo.

## VII. EDUCACIÓN

En muchas universidades, los cursos de ingeniería de control se enseñan en ingeniería eléctrica, electrónica, mecánica y aeroespacial, en otras se está relacionando a la ingeniería de sistemas, dado que en la actualidad la mayoría de las técnicas de control se aplican a través de computadores, a menudo se integra a la ingeniería de sistemas. El campo de control dentro de la ingeniería química es a menudo conocido como control de procesos [23]. Se trata principalmente con el control de las variables en un proceso químico en una planta. Se enseña como parte del plan de estudios de pregrado de cualquier programa de ingeniería química y emplea muchos de los principios de la ingeniería de control. Otras disciplinas de

ingeniería también se solapan con la ingeniería de control ya que se puede aplicarse a cualquier sistema que sea susceptible de modelarse [5].

La ingeniería de control posee una diversidad de aplicaciones que incluyen ciencia, gestión financiera e incluso el comportamiento humano. Los estudiantes de ingeniería de control pueden iniciar con un curso de control de sistema lineal que desarrolla temas en el dominio del tiempo y el dominio complejo  $s$ , con lo cual se requiere un fundamento en las matemáticas elementales y la transformada de *Laplace*. En el control lineal, el estudiante realiza un análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia. El control digital y los cursos de control no lineal requieren del conocimiento del álgebra y de la transformada  $z$  y podría decirse que con estos cursos finalizan la educación básica en el área de control [24]. A partir de aquí existen varias sub-ramas en las que se puede profundizar [13].

Originalmente la ingeniería de control se desarrolló sobre los sistemas continuos. El desarrollo de las herramientas de control plantea un requerimiento a la ingeniería de sistemas de control discretos como consecuencia de las necesidades de comunicación entre el controlador digital basado en computador y el sistema físico que se gobierna por un reloj de computador [5]. El equivalente a la transformada de *Laplace* en el dominio discreto es la transformada  $z$ . Actualmente, los sistemas de control se controlan por computador, integrando tanto los componentes digitales como los componentes analógicos.

Por lo tanto, en la fase de diseño, los componentes digitales se mapean en el dominio continuo y el diseño se lleva a cabo en este dominio o por el contrario, los componentes analógicos se mapean en el dominio discreto y el diseño se lleva a cabo en este espacio. El primero de estos dos métodos se utiliza a menudo en la práctica porque muchos sistemas industriales presentan componentes de sistemas continuos, donde se incluyen componentes mecánicos, fluidos, biológicos y eléctricos [25].

Del mismo modo, las técnicas de diseño han avanzado y el diseño manual utilizando regla y papel evolucionó a un diseño basado en el diseño asistido por computador y actualmente se habla de un diseño automatizado por computador (CAutoD), lo cual ha sido posible gracias a la evolución de la ingeniería de la computación. El CAutoD puede aplicarse no sólo a la sintonización de un sistema de control, sino que también ha permitido la optimización, identificación de los sistemas de control y la invención de novedosos sistemas de control, basados fundamentalmente, en los requerimientos de desempeño, independiente de cualquier esquema de control que se esté utilizando [16].

## VIII. CONCLUSIONES

En este artículo se muestra una breve revisión del estado actual de la ingeniería de control, analizado desde una perspectiva tecnológica, mostrando los éxitos y el impacto que ha tenido en las últimas décadas esta área de conocimiento en nuestra sociedad. También se han analizado los diferentes sistemas de control industrial con los que se cuenta actualmente y se muestran las diferentes oportunidades y retos a los que se debe enfrentar este campo de la ingeniería. Por último se hace una breve descripción de las áreas prioritarias de conocimiento necesarias en un plan de estudios para la enseñanza la ingeniería de control.

## BIOGRAFÍA



Omar Pinzón Ardila. Ingeniero Electricista por la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Magíster en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de los Andes de Bogotá, Colombia. Doctor Ingeniero Industrial en el área de Automática e Informática Industrial por la Universidad Pontificia Comillas de Madrid, España. Actualmente es profesor asociado de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga. Ha participado en proyectos conjuntos con la industria

en el diseño y construcción de módulos inversores para automóviles híbridos, sistemas de aerogeneración y filtros activos de potencia. Es autor de diversas publicaciones nacionales e internacionales. Sus áreas de interés se centran en aplicaciones del control electrónico de potencia, el estudio de energías alternativas y el diseño e implementación de plataformas experimentales para el control avanzado de sistemas en tiempo real.

## REFERENCIAS

- [1] M. Athans, J. J. S. Sentieiro, and M. A. Dahleh. Workshop on future directions in systems and control theory. Cascais, Portugal, June 2000.
- [2] M. B. Barron and W. F. Powers. The role of electronic controls for future automotive mechatronic systems. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 1(1):80–89, 1996.
- [3] European Commission. Workshop on future and emerging control systems, November 2000. Available at [ftp://ftp.cordis.lu/pub/ist/docs/ka4/report\\_controlws.pdf](ftp://ftp.cordis.lu/pub/ist/docs/ka4/report_controlws.pdf).
- [4] A. Becskei and L. Serrano. Engineering stability in gene networks by autoregulation. *Nature*, 405(6786):590–593, 2000.
- [5] W. S. Levine. *Control System Fundamentals*. CRC Press, 1999.
- [6] S. Bennett. *A History of Control Engineering: 1800–1930*. Peter Peregrinus, 1986.
- [7] S. Bennett. *A History of Control Engineering: 1930–1955*. Peter Peregrinus, 1986.
- [8] W. F. Powers and P. R. Nicastrì. Automotive vehicle control challenges in the 21st century. *Control Engineering Practice*, 8:605–618, 2000.
- [9] P. Parrilo. *Structured Semidefinite Programs and Semialgebraic Geometry Methods in Robustness and Optimization*. PhD thesis, California Institute of Technology, Control and Dynamical Systems, 2000.
- [10] T. R. Bewley. Flow control: new challenges for a new Renaissance. *Progress in Aerospace Sciences*, 37:21–58, 2001.
- [11] S. J. Qin and T. A. Badgwell. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 2002.
- [12] W. H. Fleming, editor. *Future Directions in Control Theory: A Mathematical Perspective*. SIAM, 1988.
- [13] H. Nijmeijer and J. M. Schumacher. Four decades of mathematical system theory. In J. W. Polderman and H. L. Trentelman, editors, *The Mathematics of Systems and Control: From Intelligent Control to Behavioral Systems*, pages 3–83. Univ. of Groningen, 1999.
- [14] R. W. Brockett. New issues in the mathematics of control. In B. Engquist and W. Schmid, editors, *Mathematics Unlimited—2001 and Beyond*, pages 189–220. Springer Verlag, 2000.
- [15] National Research Council. *Embedded, Everywhere: A Research Agenda for Networked Systems of Embedded Computers*. National Academy Press, 2001.
- [16] K. J. Astrom, T. Hagglund, The future of PID control, *Control Engineering Practice*, Volume 9, Issue 11, November 2001, Pages 1163–1175, ISSN 0967-0661, DOI: 10.1016/S0967-0661(01)00062-4.
- [17] G. M. Homsy, H. Aref, K. Breuer, S. Hocqreb, and J. R. Koseff. *Multimedia Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, 2000.
- [18] J. Marescaux, J. Leroy, M. Gagner, F. Rubino, D. Mutter, M. Vix, S. E. Butner, and M. K. Smith. Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature*, 413:379–380, 2001.
- [19] P. R. Kumar. New technological vistas for systems and control: The example of wireless networks. *Control Systems Magazine*, 21(1):24–37, 2001.
- [20] E. Brown and H. Rabitz. Some mathematical and algorithmic challenges in the control of quantum dynamics phenomena. *Journal of Mathematical Chemistry*, 31:17–63, 2002.
- [21] R. M. Murray, K. J. Astrom, S. P. Boyd, R. W. Brockett, G. Stein, Future directions in control in an information-rich world. *IEEE Control Systems Magazine*, 23(2): 20-33, 2003.
- [22] D. Hanahan and R. A. Weinberg. The hallmarks of cancer. *Cell*, 100:57–70, 2000.
- [23] P. Antsaklis, T. Basar, R. DeCarlo, N. H. McClamroch, M. Spong, and S. Yurkovich, editors. *NSF/CSS Workshop on New Directions in Control Engineering Education*. National Science Foundation and IEEE Control Systems Society, 1998. Available at <http://robot0.ge.uiuc.edu/~spong/workshop>.
- [24] National Science Foundation. NSF workshop for high school teachers of mathematics and science. American Control Conference, June 2000. Available at [http://www.math.ukans.edu/ksacg/nsf\\_hswkshop.html](http://www.math.ukans.edu/ksacg/nsf_hswkshop.html).
- [25] National Science Foundation. NSF workshop on dynamic data-driven application systems, March 2000. Available at <http://www.cise.nsf.gov/eia/dddas>.