

Darío Armando Weitz

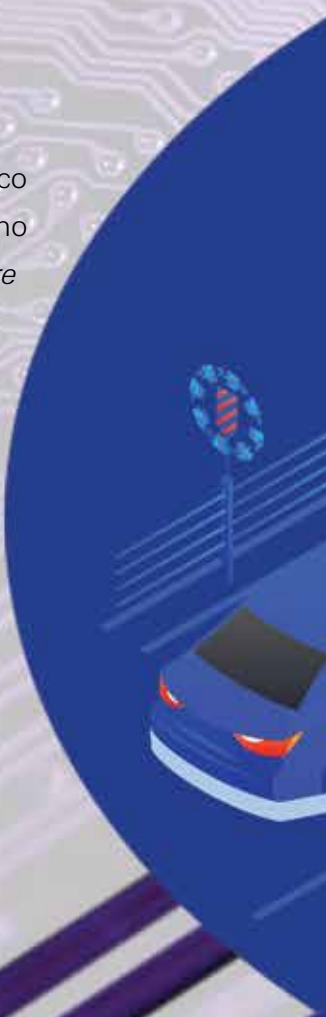


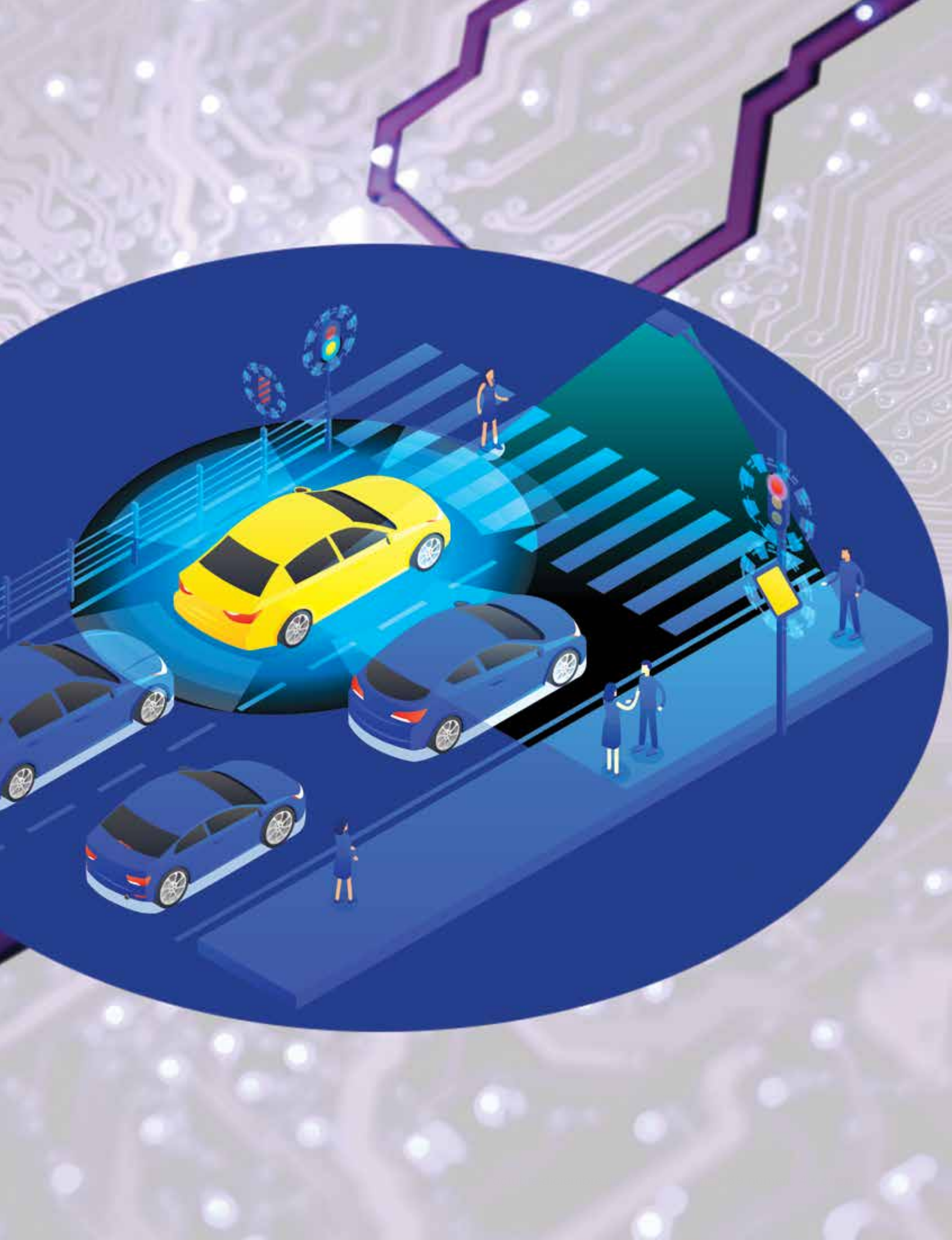
La mágica tecnología oculta

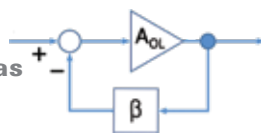
Los sistemas de control están presentes en todo el universo tecnológico moderno. No reciben la misma atención que otros sistemas porque no se observan a simple vista, sino que están incorporados en el *software* de los procesadores informáticos. Se basan en el principio de retroalimentación (o realimentación), que permite obtener sistemas precisos, resilientes, insensibles a influencias externas y al deterioro de los componentes.

A finales de la Segunda Guerra Mundial se puso en evidencia una situación muy particular: diferentes ramas de la ingeniería utilizaban la misma tecnología, pero habían llegado a ella por caminos totalmente separados e ignoraban que compartían el mismo principio fundamental.

Los *sistemas de control* estaban presentes en la generación y transmisión de electricidad, en el control de procesos industriales, en el guiado automático de barcos, en los pilotos automáticos de aviones civiles y militares, en la telefonía de larga distancia, en la regulación de calderas y en los sistemas más avanzados de defensa antiaérea. Todos compartían el mismo principio fundamental: poseían un lazo de retroalimentación (o realimentación, *feedback*). A través de éste, una señal relacionada con la salida de un sistema real se realimenta para compararla con una señal de referencia. Se denomina retroalimentación negativa cuando la señal realimentada se resta de la señal de referencia; es retroalimentación positiva cuando se suman ambas señales. La retroalimentación aparece en numerosos sistemas naturales: los organismos regulan sus condiciones fisiológicas, térmicas y químicas mediante un proceso realimentado denominado homeostasis; el clima







del planeta depende de interacciones realimentadas entre la atmósfera, los océanos, el sol y los suelos. Esta historia se enfoca en los lazos de retroalimentación de los sistemas ingenieriles creados por el ser humano.

■ **La carta que llegó a tiempo**

■ Históricamente, el primer camino lo marcó la regulación de la velocidad en las máquinas de vapor. A principios del siglo XVIII el viento y el agua eran las fuentes principales de energía. En 1712 aparece un formidable competidor: el vapor. Los inventores ingleses Thomas Savery y –posteriormente– Thomas Newcomen fabrican máquinas de vapor utilizadas para extraer el agua del interior de las minas de carbón y estaño. Más adelante se comenzó a utilizarlas en la industria textil para proveer energía a los telares. No obstante, estas máquinas tienen un gran defecto: no pueden mantener constante la velocidad de salida, lo cual afecta seriamente la calidad del producto final. Se hace imprescindible agregar un dispositivo –un regulador– que permita mantener constante la transferencia de energía desde la máquina de vapor al telar.

James Watt, inventor escocés nacido en Greenock en 1736, no tuvo una educación formal debido a su delicado estado de salud. A pesar de ello, su espíritu autodidacta lo condujo inicialmente a fabricar instrumentos matemáticos, pero pronto comprendió que en las máquinas de vapor estaba el germen de una revolución. Watt se asoció con Mathew Boulton, propietario de un taller metalúrgico en Birmingham, para fabricar equipos con un nuevo diseño; en pocos años se convirtieron en la empresa de máquinas de vapor más importante de Inglaterra.

Comenzaron por construir en las cercanías de Londres un molino harinero impulsado por máquinas de vapor. Si bien fue un pésimo negocio –un incendio destruyó el molino en 1791–, los constantes viajes de Boulton desde Birmingham hacia Londres, en los que observaba numerosos molinos en el camino, se tradujeron en una carta que Boulton le escribió a su socio describiéndole un dispositivo inventado por Thomas Mead en 1787. Se trataba de

un aparato basado en un péndulo centrífugo doble cónico que permitía detectar la velocidad del viento e intentaba ajustar la separación entre las piedras del molino para conseguir una presión constante sobre el grano. No era un regulador de velocidad, sino un dispositivo a lazo abierto –sin retroalimentación– y que Mead rápidamente patentó. En esa patente propuso un esquema para un regulador de velocidad de lazo cerrado, pero no hay evidencias de que el mismo fuera aplicado en algún molino de viento.

Pocas veces en la historia de la tecnología una carta ha llegado en un momento tan apropiado: algunos días antes, Watt había perfeccionado una válvula mariposa para la regulación manual de la velocidad de sus máquinas de vapor. Era una válvula muy liviana que requería poca fuerza para su operación. Rápidamente el inventor se dio cuenta de que podía combinarla con el péndulo centrífugo que su socio le describía en la carta –con fecha del 28 de mayo de 1788–. Comenzó a trabajar y, según el registro, para diciembre ya tenía el primer dibujo del regulador centrífugo *fly-ball* que Boulton y Watt incorporan a su máquina de vapor. El diseño (véase la Figura 1) incluía un péndulo con dos esferas metálicas suspendidas por dos brazos articulados; estaba acopla-



Figura 1. Péndulo centrífugo inventado por T. Mead y adaptado por J. Watt y M. Boulton.

do sobre la válvula de admisión del vapor de forma tal que un aumento en la velocidad de la máquina producía un incremento de la velocidad centrífuga, el alejamiento de las esferas del eje de rotación y el correspondiente cierre de la válvula de admisión. El objetivo del regulador centrífugo era mantener una velocidad constante de la máquina independiente de las condiciones de carga. El primer diseño, concluido en 1789, tiene serias desventajas: sólo provee control proporcional y, por lo tanto, el control exacto de velocidad se da en una sola condición operativa; operaba en un rango reducido de velocidades y requería un mantenimiento riguroso. A pesar de ello, el funcionamiento de esa máquina de vapor fue muy superior al de otros modelos de la época. Pronto los socios se enriquecieron con los numerosos pedidos de fabricación que comenzaron a recibir.

En este momento de la historia Boulton y Watt son conscientes de que no pueden patentar el regulador de velocidad porque –básicamente– adaptaron el péndulo centrífugo de Mead a la válvula mariposa del escocés. Deciden mantenerlo en secreto: no hay anuncios en las sociedades científicas ni escritos a la Oficina de Patentes. Pero el éxito en las ventas no podría pasar inadvertido y los competidores comienzan a copiar el diseño, que no estaba protegido por una patente. El primer modelo de la competencia aparece en 1793, y durante el siguiente decenio toda Inglaterra observa la instalación de máquinas de vapor que incorporan un regulador de velocidad basado en el péndulo centrífugo. Como resultado, se acelera de manera notable el proceso que caracterizó la denominada Primera Revolución Industrial.

Una chispa de inspiración

El 2 de agosto de 1927, un joven ingeniero de los Laboratorios Bell (AT&T), llamado Harold Black, tuvo una “chispa de inspiración” durante el viaje que realizaba habitualmente en el *Lackawanna Ferry* sobre el río Hudson para llegar a su trabajo en Manhattan, Nueva York. La compañía telefónica más importante del mundo tenía serios inconvenientes con la distorsión y la inestabilidad en los amplificadores de tubos al vacío cuando los mismos se conectaban

en tándem (repetidoras) para proveer un servicio de telefonía de larga distancia. AT&T necesitaba resolver el problema para expandir el número de líneas telefónicas nacionales e intercontinentales, que eran muy redituables, pero el aumento en el número de repetidoras (amplificadores) se traducían inexorablemente en un aumento en la distorsión de la señal.

A comienzos de la década de 1920 los ingenieros de comunicaciones habían acuñado el término *retroalimentación* para describir el reingreso positivo parasitario de la señal de salida de un amplificador al circuito de entrada. La genialidad de Black radicó en el uso de una retroalimentación negativa para reducir la amplificación en un dispositivo de alta ganancia. Encontró que un esquema de retroalimentación negativa correctamente diseñado podía reducir la distorsión y el ruido, mientras se garantizaba la estabilidad al hacer la ganancia dependiente de una red de retroalimentación negativa, en vez de hacerla depender de elementos activos problemáticos, tal como los tubos de vacío. Escribió la fundamentación matemática del procedimiento en una hoja en blanco que ese día traía el ejemplar del *The New York Times*, diario que leía en el *ferry* mientras se dirigía a su trabajo (véase la Figura 2). Con la sensación

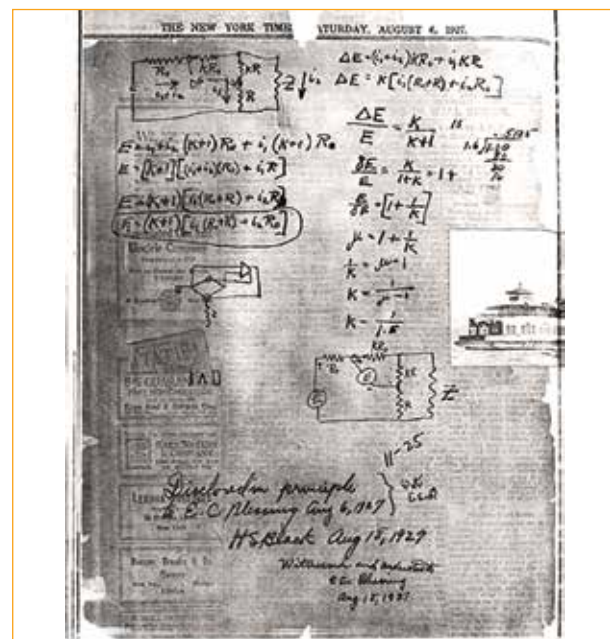
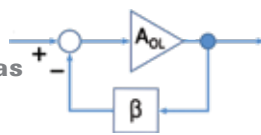


Figura 2. Hoja del *The New York Times* con las anotaciones de H. Black.



de urgencia que da el temor a perder la inspiración, Black detalló los principios de funcionamiento del primer amplificador de retroalimentación negativa estable, y apenas llegó a su oficina reunió a sus colaboradores, les explicó la idea y así comenzó una compleja y extensa tarea para formalizar el invento.

Lo primero fue preparar una solicitud para una patente, que al final constaba de 52 páginas y 126 pretensiones. Sin embargo, la Oficina de Patentes de Estados Unidos la rechazó porque la idea de una retroalimentación negativa se oponía a todas las concepciones teóricas relacionadas con los sistemas de telefonía vigentes en ese momento. Los técnicos encargados de aprobar las patentes se negaban a creer en la posibilidad de un lazo de retroalimentación estable con una ganancia en el orden de las centenas, por lo que, periódicamente, solicitaban nuevas pruebas y resultados.

Black continuó insistiendo con su inspiración, tal como lo indicó en un artículo de 1958: “Años de estudio y muchos fracasos precedieron a esta súbita concepción de la retroalimentación estable. A pesar del inmediato reconocimiento de su importancia, se necesitaron años de trabajo adicional antes de que se le encontrara una aplicación comercial sustancial.” La Oficina de Patentes finalmente aceptó su propuesta en 1937, cuando ya una teoría sobre la retroalimentación negativa tenía fundamentos sólidos y una aceptación generalizada. En 1977–50 años después de aquella “chispa de inspiración”– Black recordaba: “Súbitamente comprendí que si alimentaba la salida del amplificador nuevamente hacia la entrada en fase inversa y evitaba las oscilaciones, obtendría lo que estaba buscando: una manera de cancelar la distorsión en la salida.” AT&T pudo reducir la distorsión en las líneas telefónicas, extender su red de larga distancia y controlar el mercado hasta el inicio de la Segunda Guerra Mundial.

Tenacidad al límite de la cordura

Wilbur y Orville Wright asistieron al colegio secundario en Richmond (Indiana, Estados Unidos), aunque no concluyeron los estudios formales debido a la mudanza de su familia hacia la ciudad de Dayton

en 1884. Cuenta la leyenda que el interés por las máquinas voladoras surgió en los hermanos cuando su padre les regaló un helicóptero de juguete hecho de papel, bambú y corcho. Como suele suceder, el juguete se rompió y los hermanos se propusieron –y consiguieron– construir una réplica que funcionó bastante bien.

Los primeros negocios de los Wright fueron una imprenta seguida de un par de periódicos. El espíritu emprendedor los llevó a cambiar de rubro cuando en la última década del siglo XIX Estados Unidos estaba inmerso en una fiebre de consumo de bicicletas. En 1892 abren la Wright Cycle Company, originalmente dedicada a la venta y reparación de bicicletas, y cuatro años más tarde comienzan a fabricar sus propios modelos.

Los hermanos comprenden que algunos conocimientos adquiridos durante la fabricación de bicicletas, relacionados con el equilibrio, la resistencia al viento y el control del vehículo, les pueden ser de suma utilidad para un proyecto más ambicioso: la invención de un aparato volador. El inicio del siglo XX marca el comienzo de casi cuatro años de trabajo y experimentación exhaustivos, frustrantes y extraordinariamente incómodos. El sitio elegido para las pruebas fue en las playas de arena de Kitty Hawk en Carolina del Norte: una oficina postal, un puesto de la Guardia Costera; el calor húmedo y los mosquitos del verano; lluvias intensas, frío glacial y vientos implacables en invierno. Ahí montaron sus tiendas de campaña y cobertizos, y llevaron sus aparatos, herramientas y una tenacidad que desafiaba los límites de la cordura.

Los ensayos realizados con dos planeadores entre 1900 y 1901 les permitieron idear un sistema de torsión de las alas que ayudaba a conseguir el ascenso y el descenso de los aparatos. Pero algo faltaba, porque no lograban sustentación ni control; las arenas de Kitty Hawk evitaban la destrucción total de los planeadores, pero había que recomenzar periódicamente la tarea. Construyeron un “túnel de viento” para probar distintos tipos de alas, hasta que resolvieron el problema de la sustentación y entonces se concentraron en el tema del control. A finales de 1902 incorporaron un timón vertical para completar un

Pretensiones

Alcances de una patente de invención.

Sustentación

Fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido en dirección perpendicular a la de la velocidad de la corriente incidente. La aplicación más conocida corresponde al ala de un ave o de un avión, superficie generada por el denominado perfil alar.

sistema de control de tres ejes, y así el tercer planeador se convirtió en el primer aeroplano que permitía controlar el balance, el cabeceo y el movimiento alrededor del eje vertical.


Los hermanos Wright regresan a Kitty Hawk el 23 de septiembre de 1903 con un nuevo motor a gasolina, liviano y lo suficientemente poderoso como para propulsar al aeroplano. Comienzan las pruebas... y los problemas; en particular, la rotura de la hélice posterga las pruebas hasta diciembre. Los hermanos se ponen ansiosos: intuyen que están cerca del éxito, pero ya está próxima la Navidad y quieren pasarla en familia. El 12 de diciembre la hélice está en su sitio, sólo que el viento no ayuda. El día 14 les gana la ansiedad, y a pesar del escaso viento deciden hacer un ensayo. Tiran la moneda para decidir quién vuela: gana Wilbur. El aparato se eleva cinco metros, pero el piloto no maneja bien los controles y el aeroplano se entierra en la arena.

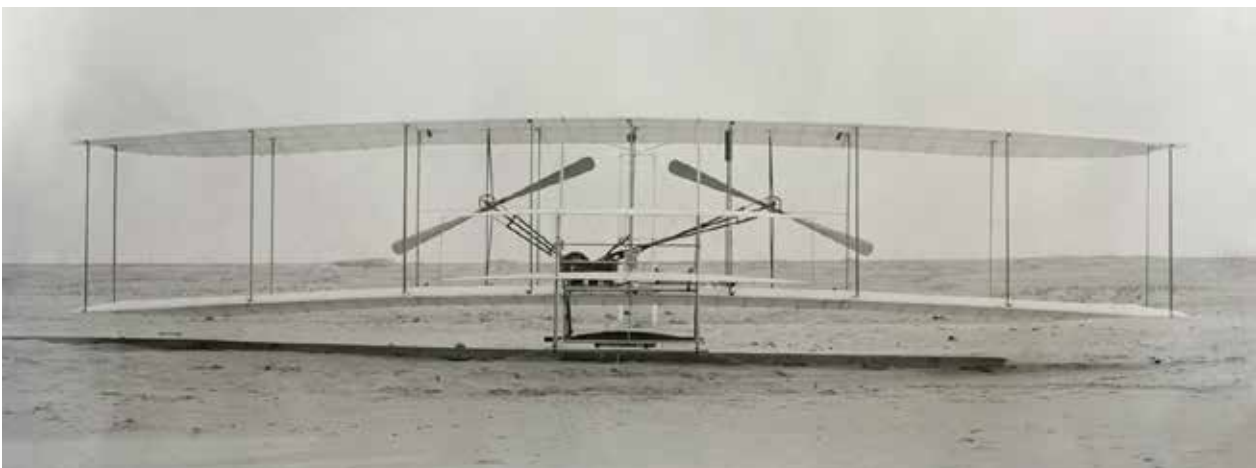
El 16 amanece lluvioso y los hermanos desesperan. Postergan la decisión de volar para el día siguiente. A las 10:30 horas del 17 de diciembre de 1903, con la ayuda de unos integrantes de la Guardia Costera que abandonan el calor de la estufa del cuartel para acompañar a este par de excéntricos que insisten en su máquina voladora, Orville se acomoda en el aeroplano, verifica el funcionamiento de los controles, indica a su hermano que prepare la máquina de fotos y arranca el motor. A las 10:35 el aparato comienza a recorrer la pista, súbitamente se eleva, intenta volver a tierra, pero una hábil maniobra del

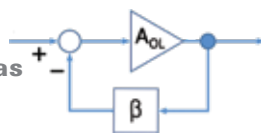
piloto lo vuelve a elevar. Todos gritan alborozados y una foto registra el momento histórico.

La expresión habitual es: “los hermanos Wright inventaron el avión”. Es habitual pero incorrecta: la primera aeronave de ala fija había sido diseñada y probada un siglo antes del *Wright Flyer*. Wilbur y Orville fueron los primeros en construir una aeronave que podía ser controlada para que se mantuviera en el aire. Su capacidad técnica e inventiva les permitió desarrollar un aparato que incluía controles para mover las alas hacia la derecha o la izquierda, para subir o bajar la punta del avión, o bien para girarlo de lado a lado. Estos tres niveles de control fueron la clave para que un aparato más pesado que el aire pudiera mantenerse en vuelo durante el tiempo que le permitía la reserva de combustible. No fue casual que el documento presentado por los hermanos Wright ante la Oficina de Patentes de Estados Unidos (Nº 821,393. Specification of Letters Patent. Patented May 22, 1906) se concentrara en los sistemas de control.

Siempre logrará pasar

 En el siglo XX se avcina un nuevo campo de batalla: el espacio aéreo. La aviación tuvo un protagonismo menor durante la Primera Guerra Mundial (1914-1918), utilizada principalmente con fines de reconocimiento. En la década siguiente los aviones aumentan de manera considerable en tamaño, distancia recorrida y velocidad; ya se vislumbra que podrán





acarrear bombas muy destructivas y arrojarlas sobre ciudades, fábricas y barcos. Resulta imperioso mejorar los sistemas de defensa antiaérea porque, tal como lo expresó el Primer Ministro británico Stanley Baldwin, en 1932, “el bombardero siempre logrará pasar”.

Al comienzo de la Segunda Guerra Mundial (1940) se requerían hasta 14 soldados, armados de gráficos y manuales, para realizar la tarea coordinada de detectar la posición del avión enemigo, calcular sus futuras posiciones, armar el cañón antiaéreo y moverlo mediante motores hidráulicos o eléctricos en la dirección calculada. Pronto vendrían las mejoras para acelerar el proceso: se incorpora al sistema una computadora analógica para calcular las trayectorias futuras del objeto volador. Un conjunto de soldados –con largavistas– realiza el monitoreo del avión enemigo y se hacen girar ruedas mecánicas para ingresar la información al sistema, de forma tal que la computadora analógica pueda calcular la trayectoria del aparato por derribar. La siguiente mejora fue la incorporación del radar como elemento sensor. Bajo la conducción del ingeniero Sir Robert Watson-Watt, varias estaciones de radar de alerta temprana estaban operativas en 1940 para monitorear la llegada hacia las costas inglesas de los 2 400 aviones y bombarderos que Hitler disponía enviar antes de invadir la isla.

Los estadounidenses intuyen la necesidad de constituir una organización que pudiera capitalizar los conocimientos y la experiencia científica y técnica para intentar resolver los nuevos problemas

bélicos. En 1940 se forma el Comité Nacional de Investigación para la Defensa, con la participación del Instituto Tecnológico de Massachusetts y los Laboratorios Bell. Se crean el Laboratorio de Radiación y el de Servomecanismos, con más de 4000 investigadores y tecnólogos. En 1943 entra en acción un sistema de defensa antiaérea, denominado M-9/SCR-584 (véase la Figura 3), que fue desarrollado por el Laboratorio de Radiación. Se trata del primer sistema basado en señales de radar que puede hacer seguimiento automático del avión objetivo mediante una computadora analógica y servomecanismos eléctricos; posteriormente se le agregó una espoleta de proximidad adosada al proyectil antiaéreo. El nuevo sistema permitió reducir de miles a cientos el número de proyectiles que se requerían para abatir a un avión enemigo. Inclusive, tuvo una tarea crucial en el derribo de los misiles V1 –primer misil guiado que se utilizó en la guerra para bombardear Londres y Amberes, y precursor de los actuales misiles crucero–. Fue el último intento de Hitler para torcer el rumbo de la contienda, rápidamente contrarrestado por los sistemas automáticos de control de fuego radarizados.

■ **Mágica y oculta**

■ *Control* emerge como disciplina científica al final de la Segunda Guerra Mundial, resultado del esfuerzo técnico y científico desarrollado por los aliados para perfeccionar los sistemas de defensa antiaérea. Se utilizaron lazos realimentados tanto a nivel de sistema como en cada uno de sus componentes (radar-computadora analógica-apuntado automático-comunicaciones). Se puso énfasis en los servomecanismos: sistemas de control realimentados cuya variable de salida es la posición, velocidad o aceleración.

El Laboratorio de Radiación fue disuelto al terminar el conflicto bélico, pero antes de cerrarlo se decidió mantener el sueldo de los investigadores por seis meses más para que publicaran el resultado de sus estudios y desarrollos. El volumen 25, *Teoría de Servomecanismos*, escrito por H. James (físico), N. Nichols (ingeniero de la Taylor Instrument Company)

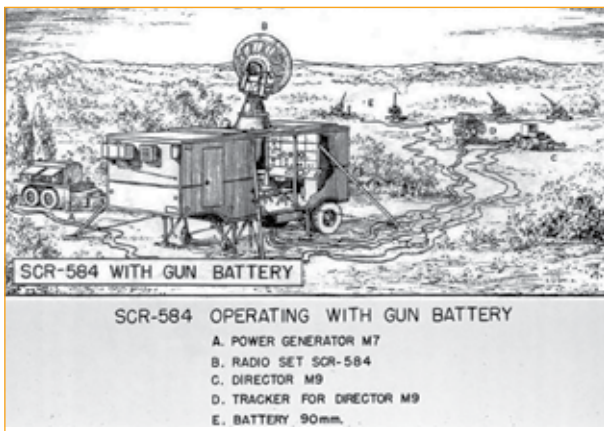


Figura 3. Sistema de defensa antiaérea M-9/SCR-584.

y R. Phillips (matemático) ilustra con claridad que el control tiene una naturaleza multidisciplinaria y que su evolución estuvo guiada por una sinergia entre la academia, la industria y el ejército.

La teoría de servomecanismos estableció los fundamentos teóricos de la nueva disciplina. El breve reinado de las computadoras analógicas se dio en el contexto de su utilización en la implementación de nuevos controladores. Se verificaron avances en el campo de las comunicaciones como resultado de las necesidades en los sistemas de control de fuego antiaéreo y en las salas de control en las industrias de procesos. Tras cientos de años de evolución espasmódica, caótica, pragmática, por caminos totalmente separados, emerge un enfoque holístico, sistémico, que comprende teoría y aplicaciones, y es el punto de partida de una industria moderna y sofisticada que atraviesa las distintas disciplinas de la ingeniería.

Los sistemas de control están presentes en todo el universo tecnológico moderno: generación y transmisión de energía, sistemas de comunicación y transporte, iluminación y energía en edificios, instrumentación y mecatrónica, entretenimiento, armamento y viajes espaciales, control de variables en todos los procesos industriales y sistemas de manufactura, dinámica de procesos económicos, e incontables más.

Sin embargo, muy poco se habla de los mismos, aun en ambientes científicos y tecnológicos. Lo que sucede es que no están a la vista, sino principalmente “escondidos” en el *software* de los procesadores. Observamos con detenimiento y admiración el avión, la industria petroquímica, la computadora, la nave espacial, el misil, el automóvil, el producto manufacturado, pero no el lazo de control realimentado que todos contienen y que cumple sus funciones de manera exacta y confiable. Por ello ha recibido la denominación de “tecnología oculta”, y sólo se manifiesta durante alguna falla grave, tal como fue el desastre nuclear de Chernóbil.

Pero también es “mágica” porque la retroalimentación permite obtener sistemas precisos aunque los mismos posean componentes imprecisos. También logra que los sistemas sean resilientes, a pesar de las perturbaciones externas, y que se pueda crear un comportamiento lineal a partir de componentes no



Figura 4. Vehículo autónomo.

lineales. Debido a la retroalimentación, los sistemas se vuelven insensibles a las influencias externas y al deterioro natural de sus componentes por el paso del tiempo. Ésta permite estabilizar sistemas diseñados de manera inestable (aviones de combate) y les da a los diseñadores nuevos grados de libertad para que mejoren sus productos finales.

Un conjunto de tecnologías disruptivas se apresura a modificar definitivamente la vida de los seres humanos. Tal vez sean los vehículos autónomos o las computadoras cuánticas; tal vez, los avances en genómica o el internet de las cosas. Aún desconocemos su real influencia en nuestra futura vida diaria. Sólo podemos garantizar que la mágica tecnología oculta estará presente en todas ellas.

Darío Armando Weitz

Universidad Tecnológica Nacional, Rosario, Argentina.
dar.wtz@gmail.com

Lecturas recomendadas

Moñux Chércoles, D. (2001), “Historia de la automática”. Disponible en: <<http://isa.uniovi.es/~gojea/funding/documentos/historia%20automatica.pdf>>. Consultado el 20 de agosto de 2018.

Weitz, D. A. (2013), “Contextos históricos en el desarrollo de los sistemas de control”, *Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería*, 2(5):61-68.