

El control automático en el siglo XXI

Por Luis Buresti
luis.buresti@gmail.com

Inicialmente hay algunos comentarios generales, pero más adelante describo una serie de ejemplos que considero representativos incluyendo dos casos argentinos.

Un poco de sarasa

Varias veces me ha ocurrido que en el medio de una reunión social o de un asado [1] que algún “amigo de la vida” me pregunte “¿A qué te dedicás exactamente?” Elaborar la respuesta siempre fue un problema, tratando de combinar palabras simples con algún detalle un poco más específico. Creo que la mayoría nunca entendió muy bien en qué consistía mi trabajo.

Obviamente, siempre hubo alguno un poco más informado que avanzó con alguna pregunta estilo: “¿Qué es exactamente control automático?”. Aquí, por supuesto, una pequeña dosis de sarasa [2] siempre venía bien. Pero como esta era una pregunta que de alguna manera podía prever, tenía respuestas más o menos estandarizadas que hacían mención al termostato que está en la pared o al flotante del depósito del inodoro.

Más de una vez, sentí que estaba parodiando alguno de esos libros de chistes y caricaturas que solía publicar la ISA. Pero bueno, creo que aunque sea de una forma aproximada y poco rigurosa conseguía transmitir el concepto.

Entiendo que si hoy en día volviese a insistir con ese tipo de respuesta, solo estaría transmitiendo un mensaje confuso y extremadamente limitado. Tal vez, una respuesta más aggiornada podría ser: “Control automático es el cohete Falcon aterrizando verticalmente en una plataforma que se mueve en el medio del Atlántico”.

No somos nada

AADECA siempre orbitó alrededor de lo que podríamos llamar "Control Automático Industrial", en particular el control continuo, y hasta creo poder decir que se consideraba todo lo vinculado con la automatización discreta como un "arte menor".

Este enfoque "industrial-céntrico" tiene cierta lógica, ya que es bastante claro que el control automático, tal como lo conocemos hoy en día [3], nació para resolver problemas concretos de la era industrial. Sin ir muy lejos, pensemos en las famosas bolas de Watt.

Hace ya algún tiempo que me formulé a mí mismo la siguiente pregunta: ¿cuántos lazos de control hay operando en el mundo? Cuando hablo de "Lazo de control", lo hago en términos más o menos convencionales, o sea, un sistema en donde podamos identificar algún tipo de sensor, alguna unidad de cómputo y algún tipo de actuador.

El área industrial ya no es el núcleo principal en la actividad total de control automático y este centro de interés se ha desplazado claramente hacia aplicaciones mucho más orientadas al consumidor.

Esta definición, en principio, deja afuera todos los lazos embebidos en chips o plaquetas electrónicas. También excluyo a todos los lazos que se incorporan solo con propósitos de seguridad (por ejemplo, un presostato que protege una caldera).

De todas maneras, es fácil notar que esta definición es muy amplia porque incluye desde un controlador de presión en una cañería hasta el sistema de guía de un misil, pasando por cosas tales

como el posicionamiento de un brazo robótico o el termostato con el que opera mi heladera. Creo que es más o menos simple intuir que esta es una pregunta muy difícil de responder con un mínimo grado de precisión. De todas maneras, propongo analizar dos casos específicos.

Haciendo un simple conteo, se puede estimar que un automóvil de gama media tiene unos 26 lazos de control [4], y se calcula que en el mundo hay en circulación unos 1.400 millones de vehículos. ¡Solo aquí podríamos contabilizar 36.400 millones de lazos!

Si, por otro lado, analizamos lo que pasa en las refinerías de petróleo, instalación que habitualmente se cita como ejemplo clásico de la industria de procesos, encontramos que en este momento se estima que hay unas 700 operando en todo el mundo. Según diversas fuentes, la capacidad promedio instalada de refinación es de unas 6,5 MM ton crudo/año (aproximadamente, 20.500 m³/día) con un índice Nelson de complejidad estimado en 8.1. Una planta de este tipo tiene unos 10.000 lazos de control en promedio [5] y, por lo tanto, se pueden totalizar unos siete millones de lazos.

Creo que la simple comparación de estas dos cifras ya dice mucho, aunque alguno pueda criticar que "estoy comparando perros con gatos". Como dije anteriormente, extrapolar este cálculo a todo el universo de lazos de control parece casi imposible. Existen algunos informes de la consultora Gartner que intentan alguna aproximación, pero sin conclusiones convincentes. Por lo tanto, creo que no es posible ni siquiera estimar un valor del share de los lazos industriales en el total con un mínimo grado de precisión. De todas maneras, es casi seguro que no supera el 1 o 2% en cantidad, aunque en monto económico esta participación seguramente sea bastante mayor.

Dicho esto, mi conclusión preliminar es muy simple: el área industrial ya no es el núcleo principal en la actividad total de control automático y este centro de interés se ha desplazado claramen-

te hacia aplicaciones mucho más orientadas al consumidor.

Aquí surge una segunda observación: parecería ser que hay una especie de “democratización” en el ejercicio del control automático, con una gran cantidad de nuevos participantes, muchos de ellos con profesiones bastante alejadas de las ingenierías clásicas. Hasta me atrevería a decir que muchos de estos nuevos participantes están aplicando control automáticos sin saberlo.

¿Cómo hacen las cuentas?

Surge otra pregunta: ¿qué tipo de matemática se está utilizando? En primera instancia, parecería ser que nuestro “amado” PID ha perdido preponderancia, aunque se puede comprobar que aún es el algoritmo subyacente en muchísimas de las aplicaciones nuevas. Muchas veces he llegado a pensar que se están usando nuevas y vistosas denominaciones y terminologías solo por razones de marketing.

También creo que hay proliferación de algoritmos “estilo PID adaptativo” [6], algunos de los cuales funcionan con el agregado de matemática bastante sofisticada. Y, por supuesto, también se ha difundido enormemente lo que podríamos llamar “algoritmos de control por reglas” (que claramente tienen su origen histórico en los métodos de lógica difusa más redes neuronales), que parecen haber encontrado una gran cantidad de diversos caminos.

También tenemos que preguntarnos: ¿cómo se elaboran estos nuevos algoritmos? Aquí la respuesta podría inquietar a muchos. Un camino es, obviamente, “alguien los inventa”, pero el otro mecanismo de desarrollo que se está generalizando es el que se basa en procedimientos de *machine learning*. Esta “guerra” de criterios es bastante evidente en una aplicación muy de moda: los drones, sean estos aéreos, terrestres, marinos o espaciales. De todas maneras, se advierte que

algunos están utilizando estructuras de control hipercomplejas, la mayoría de las veces ocultas tras descripciones o narrativas bastante “esotéricas”.

A este respecto, voy a decir una obviedad: no hay que olvidar que un “controlador” es algo que intenta mantener una salida en un valor deseado, independientemente de las perturbaciones que puedan presentarse. ¿Por qué digo esto? Creo que la información que puede proporcionar un radar que está mapeando un blanco que se acerca a 3.000 km/h, o un LIDAR que intenta determinar qué obstáculos hay alrededor de un vehículo, debe estar a años luz en complejidad de una simple señal de 4-20 mA, pero aun así debo encontrar el procedimiento para simplificar la maraña de datos y elaborar una pequeña cantidad de señales que se envíe efectivamente a los elementos finales de control, que siempre son relativamente pocos.

Y *last but not least* [sic, “último pero no menos importante”] está lo que llamo “instrumentos virtuales”, aunque si usase lenguaje un poco más riguroso debería llamar “observadores”. Claramente, surgen de otra de las premisas básicas de esta actividad: “No se puede controlar, lo que no se puede medir”, y claro está que hay muchos casos en donde medir es muy difícil (o incluso imposible) ya sea por razones técnicas o económicas. Aquí también se advierten algunas soluciones bastante creativas, aunque considero que a largo plazo la gran proliferación de sensores de bajo costo, para toda variable que uno pueda imaginar, va a ir en desmedro de estas técnicas.

Creo que para ilustrar un poco mejor todas estas tendencias e ideas es conveniente pasar a algunos ejemplos concretos, y al hacer esto seguramente voy a dejar muchas cosas en el tintero.

Elon Musk siempre cae parado

El primero de estos ejemplos es precisamente el ya mencionado aterrizaje vertical de la sección booster del cohete Falcon-9. Debo reconocer que no puedo ocultar mi admiración cada vez que veo alguno de los videos que muestran esa secuencia.

Me atrevo a ponerlo en primer lugar porque creo que los problemas que ha superado son inigualables. Para entender la complejidad, basta pensar en las velocidades, masas y geometrías involucradas, en las perturbaciones ambientales, en la estrechez de los márgenes de la zona de estabilidad (lo que se suele llamar "control envelope") y, sobre todo, en la dificultad para operar el principal elemento final de control. Y como "yapa", puede aterrizar en una barcaza autónoma con cierto grado de movimiento por acción del oleaje.

Cuando se hizo el lanzamiento del satélite SAOCOM-1B de INVAP/CONAE, se pudo observar muy bien cómo fue toda esta secuencia de aterrizaje.

En el video 1 se pueden apreciar algunos detalles interesantes de toda la operación de tres de los elementos finales de control [7]: el motor principal, los cohetes auxiliares y las aletas. En particular, en 1:30 se ve el patrón de flujo en las "aletas de control enrejadas".

En mi opinión, creo que se puede afirmar categóricamente que las habilidades desarrolladas por Space-X en materia de control automático son superlativas. Hace unos días, un amigo calificó como "Ascensor" al conjunto Falcon-9-Cápsula Dragón. Creo realmente que ni siquiera esta denominación es apropiada, porque aparentemente los astronautas no tocaron "ni un solo botón" entre el lanzamiento y su llegada a la ISS.

Por último, para que experimenten en carne propia las dificultades involucradas en el aterrizaje del *booster*, los invito a que traten de emular



Video 1. SAOCOM 1B | Launch and Landing
<https://youtu.be/IXgLyCYuYA4>

toda esta maniobra con algún objeto que mantenga una relación de escala con el original. Si lo consiguen, creo que tienen un empleo asegurado en el Cirque du Soleil.

Ningún ingeniero "como uno" trabaja por menos de 100 millones

Otro ejemplo interesante es el de los llamados "vehículos autónomos", aunque entiendo que la denominación en inglés es mucho más ilustrativa: "self-driving cars" ("vehículos que se manejan a sí mismos"). Bajo este concepto se engloban productos que todavía no están disponibles para el gran público y más aún, creo que no está para nada claro para cuándo lo van a estar. No obstante, ya hay disponibles varias soluciones que son una muy interesante "primera aproximación".

Un ejemplo representativo son los automóviles Tesla equipados con la función AutoPilot. Todavía no he tenido oportunidad de viajar en uno de esos vehículos, pero quienes lo han hecho me dicen que es una experiencia alucinante ver cómo se comporta uno de esos automóviles transitando a alta velocidad por una autopista.

Sí tuve la oportunidad de conducir algunos vehículos de versiones más o menos avanzadas de los sistemas que genéricamente se denominan "Drive Assist". Esta es una categoría algo



Video 2. "Terminator" Vs Range Rover | TerraMax | Top Gear | Series 19 | BBC

<https://youtu.be/jV51BG1zkwU>

difusa y bajo ese paraguas caen cosas tales como control de carril de circulación, control de velocidad de cruceo adaptativa, frenado de emergencia, alarmas por la presencia de objetos u otros vehículos en las "zonas ciegas" del conductor, etc. Con respecto a la combinación de las dos primeras funciones, debo mencionar que casi se comportan como un sistema de conducción autónoma cuando las condiciones son ideales; digamos, en una autopista bien demarcada, incluso si esta tiene muchas curvas. En esas condiciones el sistema Drive Assist permite conducir por decenas de kilómetros sin tocar el volante. Pero esa combinación de funciones no es un verdadero sistema *self-driving*, en la práctica hay que, como mínimo, "acariciar" el volante periódicamente porque, caso contrario, una muy molesta alarma le recuerda al conductor que debe "mantener las manos en el volante".

He tenido la oportunidad de hacer algunos ensayos en distintas condiciones ambientales (día, noche, lluvia y niebla) y con distintos grados de ocupación de la autopista, y debo reconocer que los resultados fueron increíblemente satisfactorios.

El video 2 no es nuevo y posiblemente esté "guiornado", pero creo que es un muy buen ejemplo de lo que ya existe, sobre todo considerando que el camión Terramax que se muestra no es precisamente un Fiat 600.

Entiendo que este tipo de vehículos aún no está en circulación, pero ya se han usado extensivamente en zonas de operaciones militares.

Desde un punto de vista puramente de control, creo que hay muchísimos problemas que aún no fueron resueltos, algunos de ellos incluso de naturaleza ética (por ejemplo, el dilema del peatón y el puente [8]).

Para terminar, apporto una nota de color (de color verde): hace pocos meses se conoció que Google le pagó, en concepto de salario, más de 100 MM de dólares al gerente de proyecto de su división de vehículos autónomos por solo unos pocos años de trabajo.

Nadia Comănesci "fue"

Quienes alguna vez pudimos ver las demostraciones del humanoide Asimo en el Miraikan de Tokyo (Museo Nacional de Ciencias Emergentes e Innovación), hemos quedado maravillados. Pero en realidad este "aparato" no hacía mucho más que patear una pelota (algo torpemente) y convertir un "gol regalado".

Hoy en día, a Asimo le costaría bastante competir con este otro "muchacho" que se muestra en el video 3.

Claramente, la empresa Boston Dynamics se ha posicionado muchos pasos adelante, y lo más alarmante es que en los videos que publican solo se ve lo que se les permite mostrar.

La gran limitación de Atlas es todavía la duración de sus pilas, pero creo que en estos momentos nos estamos acercando a un punto de quiebre en lo que respecta a las tecnologías de almacenamiento de energía. Hay que estar atento a las noticias...



Video 3. Boston Dynamics' Atlas Robot Can Do Parkour
<https://youtu.be/hSjKoEva5bg>

No pregunta cuántos son, sino que vayan saliendo

El siguiente no es un ejemplo “políticamente correcto”, pero ocultar la realidad es negligencia. Debo reconocer que originalmente me interesé en el sistema Phalanx-CIWS debido a un video “trucho” que circuló a inicios del año (ver video 4).

El video 4 es solo una animación, pero muestra el concepto con gran realismo.

En cambio, el video 5, si bien mucho menos elegante que el anterior, muestra una intervención real.

Esta arma antiaérea no solo tiene una mecánica muy sofisticada, sino que además cuenta con un sistema de control innovador basado en “estimaciones estadísticas del *set point*”. Es un arma que claramente redefine el concepto de “tirar al bulto” que muchas veces se escucha de boca de militares o policías. El video 6 de presentación semioficial del sistema muestra varios detalles. En 1:03 y 2:28 se puede apreciar la dimensión de las balas explosivas que dispara. Como curiosidad, cabe mencionar que en 6:35 se pueden ver algunos cuadros del video de simulación.

El sistema asesino

Muchas veces, durante el transcurso de alguna charla sobre instrumentación, me divertía haciendo la siguiente pregunta: ¿Con qué nombre se conoce el manómetro que más muertos tiene en su haber? Respuesta: altímetro.

Una vez más, hoy en día debería reformular la pregunta. Y creo que si hablamos de ese tipo de protagonismo el MCAS (del inglés, “sistema de aumento de características de maniobra”) debe ser mencionado en primera instancia.

Es importante tener presente que cuando Boeing diseñó este sistema, simplemente trató de llevar a la aviación comercial un concepto que desde hacía años se empleaba en aviones militares: intercalar entre los mandos que opera el piloto y los actuadores de las superficies de control una unidad “transparente” que convirtiera en estable algo que era inherentemente inestable.

En este caso, el popular Boeing-737 se había convertido en inestable simplemente por tratar de estirar desmedidamente el diseño original. Con el objetivo de lograr versiones más eficientes del avión, se decidió instalar nuevos motores de mayor diámetro, pero estos no cabían fácilmente bajo las alas, por limitaciones infranqueables del tren de aterrizaje [9]. Fue entonces que los proyectistas decidieron instalar los motores “un poco más adelante y un poco más arriba”. Esto



Video 4. Simulation of the Phalanx-CIWS Anti-Aircraft Weapon
https://youtu.be/7zFB2J5_e5g



Video 5. Phalanx CIWS shooting/defending at night
<https://youtu.be/KsVUISS8oHs>

tuvo como consecuencia un desplazamiento del centro de gravedad que en ciertas condiciones de carga del avión lo tornaban inestable. Fue en tales circunstancias que nació el MCAS.

Lamentablemente, las validaciones de este sistema fueron un poco apresuradas y las consecuencias, catastróficas: cientos de muertos y Boeing casi al borde de la quiebra. Este es un ejemplo de todo lo que no debe ser un sistema de control, pero también muestra la preeminencia que se les asigna en muchas aplicaciones.

Con respecto al MCAS, creo que es importante hacer un comentario adicional. En el caso del accidente de avión de Lion Air, a partir de los registros del CVR y del FDR (“las cajas negras”) se pudo establecer que el piloto se dio cuenta claramente de que el MCAS estaba interfiriendo con el control de la aeronave y trató de desconectarlo en varias ocasiones, pero el MCAS se siguió reconectando automáticamente hasta que se produjo el accidente [10].

A mi criterio, esto muestra un cierto comportamiento perverso no solo del sistema en sí mismo sino sobre todo de las decisiones que tomaron los diseñadores. En definitiva, Kubrick se quedó corto con HAL-9000, el MCAS la superó ampliamente.

A veces, lo barato no sale caro

Creo que AADECA, de alguna manera, fue precursora en el tema cuando hace ya muchos años organizó un congreso de la división Low Cost Automation del IFAC. Este es un asunto que ha evolucionado enormemente en los últimos años y que indudablemente en la IoT ha encontrado una gran aliada.

El ejemplo que ahora voy a mencionar no es estrictamente una solución de control automático, pero está muy asociado y está basado en una experiencia personal reciente.

Hace pocas semanas, me tocó analizar una aplicación de variadores de velocidad (drives) para motores tipo *brushless* (sin escobillas) con parámetros nominales de operación del orden de 100 V y 50 A.

Obviamente, mi primer intento fue consultar a quienes suministran equipamiento industrial. No voy a mencionar nombres, pero consulté a tres proveedores elegidos entre los “sospechosos de siempre”. Los precios cotizados oscilaron entre 2.000 y 4.000 dólares según las distintas opciones. Todos eran productos con gran cantidad de certificaciones y muy bien documentados.

Control automático es el cohete Falcon aterrizando verticalmente en una plataforma que se mueve en el medio del Atlántico.

También le solicité cotización a un proveedor de productos *board-level* que atiende al mercado OEM. En este caso, se trataba de una empresa finlandesa que parecía tener un muy buen nivel de ingeniería. Para la misma aplicación, ofrecieron productos cuyos precios oscilaban entre los 350 y 400 dólares.

Por último, contacté una empresa que atiende al “mercado amateur”. Precio en línea: 60 dólares.

Como se puede ver, “valores para todos los gustos”.

Obviamente, resolví hacer un ensayo de la placa de 60 dólares. Claramente era poco lo que se podía perder. Este es un producto fabricado en China, pero el diseñador es un joven ingeniero sueco.

Recibida la placa, una muy mala primera impresión: el “gabinete” era un film termocontraíble y todo el manual era una única página A4 con una foto que indicaba en forma críptica el detalle de cada conector. Incluía un QR para acceder al software de configuración.

Al ensayar la plaqueta, la sorpresa fue muy grata. Estaba ante un producto increíblemente sofisticado tanto desde un punto de vista de hardware como de software. Extremadamente versátil y evidentemente apoyado en matemática muy sólida. Y como yapa, prácticamente utilizaba el mismo chipset que los productos profesionales.

Tal vez, el mayor inconveniente fue decodificar la terminología usada para identificar los parámetros de configuración, absolutamente todos los “conceptos clásicos” estaban presentes pero denominados de otra manera. Solo para dar una idea voy a decir que es una unidad cuyo modo típico de operación es mediante control vectorial,



Video 6. Just How Powerful is USA 20mm Phalanx CIWS
<https://youtu.be/dKrpEfNaQO8>

que incluye un simple procedimiento de autorreconocimiento de los parámetros eléctricos del motor y que permite implementar fácilmente lazos de control PID de velocidad, posición o torque (¡incluyendo procedimientos de *autotuning* y curvas de caracterización!).

El software, por su parte, permite definir manualmente cada parámetro con total libertad o correr rutinas estándares de configuración (*wizards*). Y, además, incluye una muy linda herramienta de monitoreo en tiempo real que hace que la puesta en marcha sea casi un juego.

Aunque pueda parecer chocante, creo que al menos en este caso en particular se puede decir que se trata de “calidad alemana a precios de La Salada” [11].

Tiembla “la Merkel”: un caso criocho de Industria 4.0

Es más o menos evidente que, en los últimos tiempos, las buenas noticias no son muy abundantes. Y esto es cierto en todo el mundo y muy particularmente en nuestro país. Pero “escarbando” un poco, hace un par de semanas encontré en La Nación un interesante artículo que describía las actividades de la firma Opulens/Novar, de Pilar (provincia de Buenos Aires).

Yo no tuve oportunidad de hacer una investigación detallada sobre este tema, pero de ser cierto, estaríamos ante un muy interesante ejemplo vernáculo de la llamada “Industria 4.0”.

Esta gente habría logrado una notable integración del proceso de manufactura, desde la ingeniería básica de producto (con sólidos fundamentos científicos) hasta el producto final, aplicando en forma activa muchas de las *enabling technologies* (“tecnologías habilitadoras”) de la producción moderna.

De todas maneras, también debo decir que hay algunos detalles de esta empresa que me

generan dudas, uno de ellos es el edificio que ocupan. Es un caso interesante para ser investigado con mayor profundidad.

También somos aguafiestas

Creo que es más o menos sabido que hasta hace algunos años (algo más de una década) se consideraba que la energía eólica era un recurso interesante pero cuya única ventaja era su bajo costo operativo. Había grandes discusiones acerca de cuál era el porcentaje máximo que se podía inyectar en las redes sin desestabilizarlas. Claramente, estas dudas estaban muy fundadas: se trataba de un recurso aleatorio casi por definición y, además, las máquinas eran difíciles de controlar.

Creo que es bastante claro que en todo esto no hay ningún milagro. Lo que sí hay es un entendimiento espectacular de la dinámica de las cosas y una aplicación hiperingeniosa de las tecnologías disponibles.

En ese contexto se había popularizado bastante la idea de que el principal destino de la energía eólica podía ser la producción de hidrógeno y luego este (ya en un rol de “vector de energía”) sería transportado hasta los centros de consumo. Inclusive en Argentina se exploró este concepto: la empresa Hychico montó una instalación de estas características en el Yacimiento Diadema, en Comodoro Rivadavia (Chubut). Pero bueno... Creo que sabemos bien cómo terminó todo esto: el control automático le arruinó la fiesta al hidrógeno.

Un muy buen ejemplo de esto también lo informa La Nación. El sábado 15 de septiembre pasado en horas de la tarde, el aporte total al SADI de las nuevas energías renovables [12] marcó un récord de más del 22%, con la energía eólica en primer lugar. En ese momento, el consumo nacional total estaba en el orden de los 13.000 MWe y las nuevas renovables aportaban unos 2.900. Si bien esta participación (22%) está lejos de los récords mundiales, creo que se puede decir que es gracias al control automático que se pueden alcanzar rutinariamente estos aportes tan elevados cuando hasta no hace mucho se los consideraba incompatibles con la estabilidad de las redes.

Para terminar, menciono dos aspectos de este récord:

- » Lo meritorio: este valor se da en un momento en que la carga total no era muy baja. Un Domingo por la mañana bien podría haber sido el doble.
- » Lo *taken for granted* (“dado por hecho”): la verdad es que el parque eólico argentino es bastante nuevo (¡gracias a los planes Renov. Ar!) y entiendo que de lejos predominan las máquinas *direct drive*, que son muy fáciles de controlar en un amplio rango de cargas.

En este sentido, es mucho más interesante lo que ha ocurrido varias veces en España (e incluso Dinamarca), en donde el aporte eólico superó el 50%, aunque en esos casos predominan las máquinas que utilizan la tecnología anterior con caja multiplicadora.

Minicorolario

Como lo había anticipado al comenzar con los ejemplos, son muchas más las cosas que quedan pendientes que las que se pueden incluir.

La realidad es que no incluir cosas tales como los robots de cirugía, el Segway, las plataformas

petroleras con anclaje dinámico, los sistemas de enfoque adaptativo de los grandes telescopios, los drones que se reabastecen en vuelo y aterrizan en un portaaviones [13], las motos que “hacen equilibrio”, los supermercados de Amazon, las sondas espaciales que traen muestras a la Tierra o incluso (¡y muy lamentablemente!) de la “guerra sin soldados”, es brindar un panorama muy parcial de lo que es el control automático en los inicios del siglo XXI. Seguramente, cada uno de ustedes podrá proponer otros ejemplos.

Algunas veces, hablaba de “los milagros del control automático”. Creo que es bastante claro que en todo esto no hay ningún milagro. Lo que sí hay es un entendimiento espectacular de la dinámica de las cosas y una aplicación hiperingeniosa de las tecnologías disponibles.

Sigamos mirando la película. Lo mejor (¿o lo peor?) aún está por llegar.❖

Notas y aclaraciones

- [1] Esta aclaración es especial para los jóvenes que han pasado la mayor parte de su vida en confinamiento. Por “asado con amigos de la vida” se entendía un tipo de ritual social bastante popular en la Argentina del pasado. Tenía una liturgia bastante definida y solía tener efectos muy convenientes para los participantes. En otros países existían ceremonias similares, entre las que se pueden mencionar la barbacoa de Estados Unidos o el churrasquinho de Brasil.
- [2] Término empleado en diversos círculos académicos y políticos para denominar un procedimiento avanzado mediante el cual se le puede explicar un concepto complejo a una audiencia no iniciada en el tema.
- [3] Es importante no olvidar que es casi seguro que las primeras soluciones de instrumentación y control nacieron en el antiguo Egipto. De esa civilización son los primeros medidores de nivel (el “nilómetro” de la Isla Elefantina) y los primeros caudalímetros que se usaban para que el faraón cobrara sus impuestos. El sistema de control de nivel por flotante fue desarrollado (muy probablemente en la era Ptolemaica) para que las clepsidras funcionen con precisión.
- [4] Se llega a este conteo aproximado de mínima para un vehículo con transmisión manual considerando: ECM c/ Crucero (x12), ABS (x4), ESP (x4), EPS (x2), A/C y otros (x4). Es importante tener presente que un

vehículo más sofisticado (con transmisión automática y drive assist) puede fácilmente duplicar o triplicar este conteo.

- [5] Los valores promedio de capacidad instalada e índice de complejidad fueron tomados de diversos artículos escritos por I. Billege, S. Howesm y otros autores. Lamentablemente, la correlación entre estas variables y la cantidad de lazos de control por refinería es bastante más incierta y, según las fuentes, puede variar entre 2.000 y 10.000. Como una estimación puramente personal, he utilizado un valor medio de 5.000 lazos/refinería, valor que de todas maneras creo que tiene algún grado de consenso. Normalmente, este conteo se hace en base a la cantidad de salidas de los DCS.

Como en la práctica, cada elemento final de control casi siempre incorpora como mínimo otro lazo de control (por ejemplo, un posicionador en el caso de válvulas neumática o un encoder en el caso de variadores de velocidad), me he permitido multiplicar ese número por 2.

De todas maneras, independientemente de cómo se realice esta estimación, la proporción de resultados es básicamente la misma.

- [6] Por “PID adaptativo” entiendo un controlador que opera con un algoritmo PID convencional, pero en el cual los valores de k_p , T_i y T_d son modificados en función del *set point*, de la variable medida o de algún otro factor. Con respecto a esta modificación de parámetros, a su vez parecería ser que como mínimo hay dos criterios: a) hacerlo con algún tipo de “ecuación fija”, o b) correr rutinas de *auto-tuning* para cada valor de la variable controlada o de alguna variable auxiliar.
- [7] En forma diametral, en el extremo superior del *booster*, hay también varios cohetes auxiliares que entiendo que son los principales responsables para mantener el equilibrio.
- [8] Este problema ocurre, por ejemplo, cuando un vehículo se acerca por una ruta de doble mano a un puente tipo arco, con columnas a cada lado. Muchas veces esas rutas admiten velocidades algo elevadas (digamos 80 o 90 km/h) y muchas veces los pilares de esos puentes están muy cerca de la ruta (no más de un par de metros). En estas circunstancias, si el automóvil se acerca al puente circulando a la velocidad autorizada, e inesperadamente aparece un peatón en el medio de la ruta (justo por detrás del puente), es muy probable que los tiempos de frenado no alcancen y el sistema de control deba optar: a) desviar al automóvil y eventualmente chocar con uno de los pilares del puente, casi seguro hiriendo o incluso matando al conduc-

- tor que además es el cliente; o b) seguir derecho y atropellar al peatón.
- [9] Creo que todos hemos observado que ya en el caso del los B-737 anteriores la parte inferior del alojamiento de los motores estaba “replanada”. Evidentemente, este problema venía desde hacía tiempo.
- [10] Esto sería un capítulo más de la “guerra hombre-máquina”. Creo que de cosas como esta podría derivarse un análisis infinitamente más amplio y complejo. Me imagino que todos hemos tenido experiencias más o menos similares a este respecto.
A mi gusto, una de las facetas más irritantes de este asunto es cuando nos toca cuestionar la respuesta que nos puede dar un interlocutor que está detrás de un monitor, y solo nos afirma “es así porque lo dice la computadora”.
- [11] Respecto a este asunto de los “componentes baratos” y cómo “todo tiene que ver con todo”, vuelvo al caso de Space-X. Es sabido que esta empresa, desde sus inicios, ha utilizado un criterio de ensayo y validación a nivel de subsistema y sistema en lugar de los clásicos procedimientos desarrollados originalmente por la NASA, que requerían la calificación de cada componente en particular. Esto tuvo como mínimo dos consecuencias para Space-X, por un lado, le provocó graves contratiempos con una seguidilla de accidentes, y por el otro, le permitió reducir sensiblemente los costos al utilizar más ampliamente elementos de “calidad comercial”. Yo no quiero afirmar para nada que Space-X esté comprando “plaquetas chinas por Internet”, pero algo de eso hay.
Es un enfoque similar al que emplean los fabricantes de *low cost satellites* (“satélites de bajo costo”) (CubeSats, Nano-Satellites, etc). Una empresa que opera en este sector es Satellogic, empresa originalmente fundada en nuestro país.
- [12] Uso la palabra “nuevas”, porque no está incluido el aporte hidroeléctrico; el cual no es nada menos que una variante clásica de aprovechamiento de energía termosolar.
- [13] Con respecto a este “asuntito” de los aterrizajes automáticos, dos comentarios adicionales:
» En 2013, un Boeing 777 se estrella al aterrizar en el Aeropuerto de San Francisco (Estados Unidos). Era un accidente muy difícil de explicar: un avión muy moderno que funcionaba perfectamente bien, un clima espectacular, un aeropuerto muy conocido. Pero aun así, había ocurrido un accidente con varios muertos. ¿El problema? Ese día se estaba haciendo mantenimiento de algunos sistemas y el piloto estaba haciendo una aproximación automática, como siempre hacía. Cuando el B-777 se acercó a la cabecera de la pista, el piloto automático se desenganchó por falta

de alguna señal, y el piloto humano tomó el control, segundos después acaeció el accidente. Luego se supo que este piloto nunca había hecho un aterrizaje manual de un B-777 en la vida real, solo lo había hecho durante los entrenamientos en los simuladores.
» Hace algunos años, me tocó viajar en un vuelo de cabotaje entre Roma y Milán (Italia). Al iniciar la aproximación a Linate, el piloto avisó que había una niebla muy cerrada, que los aeropuertos alternativos tenían condiciones similares y que por lo tanto había decidido hacer un aterrizaje en modo automático. También dijo “Por favor, apaguen todos los celulares”, y agregó “A ver si entendieron, cuando dije ‘todos’ es ‘todos’”. Al llegar, me di cuenta de que la visibilidad no alcanzaba los diez metros. Del mensaje del piloto me quedaron dos impresiones: 1) que evidentemente se trataba de algo nuevo, con lo que no estaba totalmente familiarizado y que tenía miedo que pudieran existir interferencias misteriosas; b) que entendía perfectamente bien la idiosincrasia de sus pasajeros.