

LA INFORMACIÓN Y LAS MÁQUINAS*

Javier Aracil Santonja

Universidad de Sevilla, Spain. E-mail: aracil@cartuja.us.es *Conferencia pronunciada en el Ateneo de Sevilla el 20 de febrero de 2001 y publicada en las Memorias de la Real Academia Sevillana de Ciencias, vol. 4.

Recibido: 13 Marzo 2004 / Revisado: 16 Abril 2004 / Aceptado: 12 Mayo 2004 / Publicado: 15 Junio 2004

Resumen: La información se ha convertido en un elemento clave en la época que vivimos, siendo su manejo y gestión imprescindibles para el desarrollo y comprensión de muchas facetas del mundo actual, tanto en el ámbito científico-tecnológico como en el social. Este trabajo trata sobre la evolución de las técnicas de tratamiento de la información aplicadas en el control de las máquinas, comenzando por los sistemas de control más básicos -supervisión llevada a cabo por operarios- hasta llegar a la autogestión de aquéllas. Conceptos como "realimentación" o "control automático", así como los antecedentes históricos que llevan a aquéllos, se desarrollan a lo largo del texto recalcando la necesidad del desarrollo y perfeccionamiento de la teoría de sistemas, como condición necesaria para la evolución de la tecnología humana y, con ella, de la ingeniería en sí misma.

Palabras Clave: control - desarrollo - información - ingeniería - tecnología - teoría de sistemas

1. LA ERA DE LA INFORMACIÓN

Nuestra época, rica y variada como pocas, posee, sin embargo, algunos rasgos que contribuyen a darle una cierta unidad. Uno de ellos es, sin duda, el de la relevancia que adquiere en ella la información. Sin embargo, inmediatamente advertimos lo evasivo de este concepto, la dificultad de definirlo. Nos encontramos en una situación semejante a la de San Agustín con respecto al tiempo: él sabía lo que era, mientras nadie se lo preguntara, pero tan pronto como alguien lo hacía se quedaba sin contestación posible. Ante estos aparentes callejones sin salida siempre tenemos una solución. Considerar el término en cuestión como una primitiva que no admite definición y que, sin embargo, en principio hay un amplio consenso con relación a qué significa y, en

consecuencia, lo incorporamos, con aparente tranquilidad, a nuestras descripciones del mundo. Porque, en efecto, hoy en día resulta casi imposible desenvolverse sin hablar de información. Cualquiera que sea el ámbito del que estemos hablando la idea de información está siempre presente. Por ejemplo, es patente que cada vez es menor el porcentaje de población activa dedicada a la producción de bienes tangibles, y mayor el de los dedicados, de una forma u de otra, a procesar información. El sector terciario de la economía está prácticamente dedicado a esta forma de actividad: la investigación y la enseñanza, el mundo de las finanzas, los medios de comunicación, el mundo del ocio y tantos otros tienen un modo de actividad que consiste fundamentalmente en adquirir, procesar y transmitir información.

Algunas de las ramas más innovadoras de la ciencia moderna son también ininteligibles sin el concepto de información. Por ejemplo, el código genético, posiblemente el mayor descubrimiento biológico de nuestro tiempo, ha puesto de manifiesto como la esencia misma de la vida está asociada a procesos en los que la información juega un papel esencial. Al fin y al cabo todo ser vivo es un sistema abierto que se sustenta mediante el procesamiento de materia, energía e información. Los recientes trabajos sobre el genoma son otra muestra, que está teniendo, en estos días, una considerable incidencia en los medios de comunicación, como pone de manifiesto el chiste aparecido en la primera página del diario *Le Monde*¹ y que se reproduce en la figura 1. No hace falta mucha imaginación para comprender que el hombre asciende por la escalera de la información. Quizás entre las ciencias básicas la física haya sido la más reticente a aceptarla. Se comprende que así sea porque a principios del siglo XX todavía la física pretendía reducirlo todo a

materia y energía, las dos primitivas con las que pretendía alcanzar una descripción completa del mundo. Estas dos primitivas del físico clásico quedaron fusionadas en una sola con la teoría de la relatividad. Sin embargo, en el propio seno de la física, tras el misterioso concepto de entropía, hacía su aparición en escena, en forma más o menos encubierta, el de información, y con él una nueva primitiva.

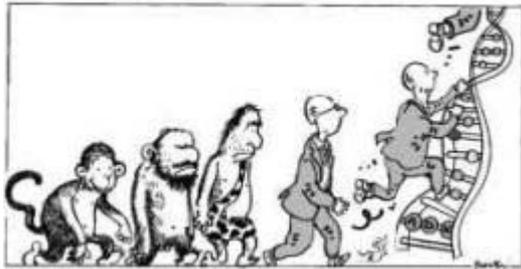


Ilustración 1. Ascenso por la escala de la información

Decía al principio que el concepto de información aún no lo tenemos claramente establecido -acaso tampoco los de materia y energía, y menos aún al aparecer fundidos en uno solo. Pero si nos proponemos una primera aproximación a este concepto, convendremos que es 'algo' cuya posesión por un agente hace que modifique su conducta. Es decir, lo que haría alguien 'antes' de recibir una información es diferente de lo que hará 'después' de hacerlo. De este modo la información tiene connotaciones con el tiempo y por tanto también con la entropía. Ya se ve que la alusión a San Agustín con la que iniciábamos esta conferencia no es simplemente una analogía superficial.

Esta noción de información puede precisarse enriqueciéndola con la noción de probabilidad, y formulando cómo, para un agente, cambia la probabilidad de que se produzca un determinado suceso debido a la recepción de información. Estas ideas, convenientemente reelaboradas, condujeron a Claude Shannon, en 1948, a la formulación de una teoría matemática de la información. Teoría que, sin embargo, limita su aplicación a los procesos de transmisión de información por canales de comunicación, relacionando la entropía de la fuente con la capacidad de transmisión por el correspondiente canal. El teorema fundamental de Shannon establece limitaciones a esta capacidad de transmisión. Es notable relacionar ese teorema con los de Gödel o Turing que levantan fronteras entre lo que es posible en principio alcanzar y lo que es imposible. Sin embargo, los resultados de Shannon, con toda su brillantez, no

resultan relevantes al tema que aquí nos ocupa: la relación entre la información y las máquinas. Conviene, no obstante, traerlos a colación puesto que forman parte del substrato del que emergen las aplicaciones del concepto de información a la concepción de máquinas.

2. LAS MÁQUINAS TAMBIÉN INCORPORAN INFORMACIÓN

Así pues, vamos a ocuparnos de la incidencia de la información en el funcionamiento de las máquinas. Si el concepto de información tenemos que aceptarlo aunque no sepamos precisarlo, el de máquina es muchísimo más vago y general. En lo que sigue entenderé por máquina el arquetipo de objeto técnico, es decir, producto de la actividad técnica del hombre, mediante el cual nuestra especie, en una compulsiva búsqueda de la satisfacción de sus necesidades siempre crecientes -cuyo horizonte se nos escapa continuamente- ha edificado el mundo artificial en el que hoy se desenvuelve nuestra vida, llegando incluso a envolvernos a nosotros mismos con las prótesis con las que remediamos nuestras deficiencias. Aún a riesgo de pecar de trivialidad es patente que en todo lo que nos rodea aparece el rastro de la actuación técnica del hombre, de la ingeniería. Ni siquiera los pretendidos reductos de la naturaleza que son los eufemísticamente denominados parques naturales son ajenos a la intervención humana. Tenemos que asumir que, por acción de la técnica, nuestra especie ha conseguido transformar el mundo natural en otro artificial en el que aunque cierta moda tienda a resaltar exclusivamente sus aspectos negativos, es indudable que con él hemos alcanzado cotas de bienestar y de longevidad inimaginables en un mundo natural. Así pues voy a referirme a las máquinas en un sentido muy amplio que pretende englobar todos los artefactos, producto de la técnica, de cualquier naturaleza que sean. Pues bien, en las entrañas de estos artefactos, en nuestro tiempo, la información ha pasado a jugar un papel primordial. Esta idea es la que pretendo desarrollar en lo que sigue.

Bajo una perspectiva muy general podemos considerar a una máquina como un proceso en cuyo seno se producen interacciones entre las diferentes partes que la componen. Este proceso se controla mediante la actuación sobre determinados mandos que se pueden activar desde su exterior (pulsando botones, girando volantes, moviendo palancas, ...). Con estos actuadores se puede gobernar el comportamiento

de una máquina. Así, si un operador dispone de información sobre ese comportamiento (es decir, conoce los valores alcanzados por las magnitudes relevantes: por ejemplo, una posición, velocidad, temperatura, o cualquier otra magnitud imaginable) actuará sobre la máquina, mediante los mandos antes indicados, para conseguir que su comportamiento se ajuste a sus propósitos.

En la figura 2a se presenta esquemáticamente este proceso de actuación. El operario, recibe la información del proceso, la procesa de acuerdo con las normas que le han sido suministradas, y actúa en consecuencia. La función del operador, en el caso de procesos continuos que se trata de mantener constantes durante largos períodos de tiempo, puede ser extremadamente tediosa. A principios de siglo, en determinadas industrias de proceso químicas, se dotaba al operario de una banqueta con una sola pata, para que tuviese una cierta comodidad pero evitando que la rutina no le llevase a la somnolencia.

La cuestión que se suscita ahora es: ¿cabe la posibilidad de que las propias máquinas lleven a cabo su propio proceso de gobierno? ¿Es posible concebir una máquina adicional que se encargue de esta misión? La respuesta a estas preguntas, como es bien sabido, es afirmativa y de llevarla a la práctica se ocupa la ingeniería de control (figura 2b).

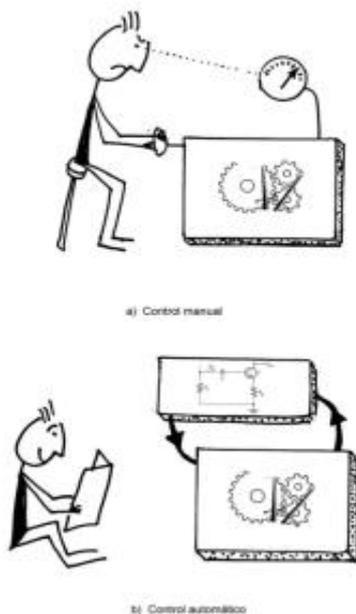


Ilustración 2. Control manual y control automático

Esta rama de la ingeniería, conocida también como automática, es de las pocas que tiene

raíces precursoras en nuestro país. De hecho, la propia denominación de automática tiene sus orígenes en los trabajos de Torres Quevedo que escribió unos seminales *Ensayos sobre Automática. Su definición. Extensión teórica de sus aplicaciones*² y de un precursor Laboratorio de Automática. Torres Quevedo postula que, de manera natural, las máquinas encargadas de sustituir al operador humano en las funciones de control antes mencionadas deben estar dotadas de unos 'sensores' que registren información con relación al comportamiento de la máquina, un órgano de procesamiento de esta información, que hoy denominamos órgano de control o 'controlador', y unos 'actuadores' que conviertan la información generada en el órgano de control en actuaciones concretas sobre la máquina cuyo comportamiento se trata de gobernar. En el escrito de Torres Quevedo hay una pequeña joya lingüística que lamentablemente los ingenieros de control no hemos sido capaces de cuidar y conservar. Dice Torres Quevedo que la función fundamental del órgano de control es el discernimiento entre las diferentes opciones de actuación que se presentan. Con la perspectiva actual no puede dejar de maravillar la propiedad del término.

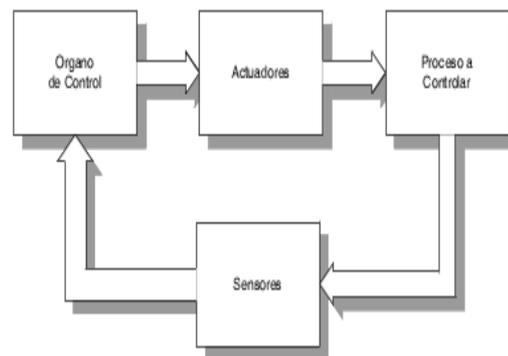


Ilustración 3. Estructura de realimentación

En la figura 3 se muestra el esquema general de una máquina dotada de control automático -en la que se indican mediante bloques los sensores, el órgano de control, y los actuadores-, en la que al propio proceso que se trata de controlar se ha añadido otra máquina, el órgano de control -que en la actualidad es normalmente un ordenador- que lleva a cabo las labores de controlarla. La máquina resultante posee una notable estructura en la que conviene detenerse. Si se observa la figura se verá que hay una cadena circular de relaciones de influencia. El proceso genera un comportamiento que es registrado mediante unos sensores, que a su vez suministran información al órgano de control, que decide cómo actuar sobre el proceso, actuación que se

lleva a cabo mediante unos actuadores que determinan modificaciones en el comportamiento que, de nuevo, son registradas por los sensores. Se reinicia así el proceso que, como es bien patente, da lugar a una cadena sin fin.

3. LA ESTRUCTURA DE REALIMENTACIÓN

La estructura causal circular implícita en la figura 3 recibe la denominación de estructura de realimentación y constituye una de las más notables aportaciones de la ingeniería del siglo XX, cuyas implicaciones trascienden ampliamente este campo de actividad. Lo primero que hay que decir con relación a la estructura de realimentación es que su aplicación práctica es menos trivial de lo que parece. La relación causal circular, implícita en esa estructura, junto con los inevitables retrasos que se producen a lo largo de ella, produce fenómenos de inestabilidad que pueden llevar a situaciones delicadas y cuyo estudio sistemático requiere el concurso de importantes complementos matemáticos. Esto es algo que lamentablemente escapó a la perspicacia de Torres Quevedo y que ha lastrado el reconocimiento de su aportación.

Precisamente unos diez años después de que Torres Quevedo publicase sus reflexiones sobre automática, un ingeniero de telecomunicaciones americano, Harold Black establecía las bases del amplificador realimentado cuyo estudio sistemático por parte de él mismo, y de los también ingenieros Harry Nyquist y Hendrik W. Bode, dio lugar a métodos sistemáticos para el diseño y análisis de controladores que constituyen la base del cuerpo disciplinario sobre el que se ha edificado la ingeniería de control.

La estructura de realimentación pone de manifiesto la relevancia de la información para el gobierno del funcionamiento de una máquina. De hecho, el controlador, es un procesador de información que se alimenta con la que suministran los sensores con relación al comportamiento de la máquina, y produce, de ese procesamiento, otra información relativa a cómo debe actuarse sobre el proceso en cuestión para conseguir que el comportamiento sea el requerido. Es fácil ver que esta estructura está presente en todo proceso de decisión con independencia del dominio en el que se adopte. Pero ahora no nos interesa detenernos en este punto, sobre el que volveremos luego, sino resaltar otro aspecto notable de la estructura de

realimentación. Mediante su concurso lo que hacemos es dosificar la inyección de energía exterior para actuar sobre el proceso que tratamos de gobernar, a partir de información. La sutileza de este matiz se pone de manifiesto en la figura 4. La energía externamente inyectada actúa sobre el proceso a controlar a través de los actuadores, que se encargan de dosificarla, atendiendo a las instrucciones que les suministra el órgano de control.

La información relativa a la actuación sobre el proceso desencadena la inyección de energía para conseguir que la máquina alcance el objetivo propuesto. La mera información de cómo actuar no es suficiente si con ella no somos capaces de desencadenar la actuación de la fuerza correspondiente. Este hecho está en los orígenes de una de las aplicaciones más antiguas que se conocen de los sistemas realimentados: los servomecanismos de posicionamiento de los timones de los barcos. El mecanismo correspondiente, basado en una estructura de realimentación, consigue dosificar la energía que posiciona efectivamente el timón a partir del conocimiento de la discrepancia entre su posición real y la deseada. La estructura de realimentación suministra un mecanismo mediante el cual se consigue que el comportamiento del sistema anule esta discrepancia, y el timón se coloque en la posición deseada (algo análogo sucede en las servodirecciones de los coches a las que estamos tan familiarizadas).

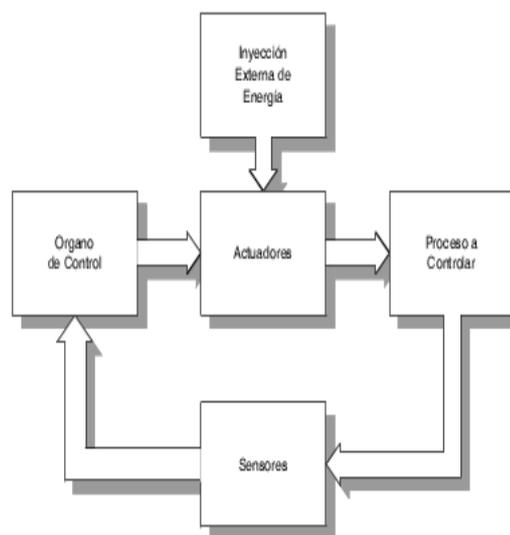


Ilustración 4. Inyección de energía dosificada mediante la información que suministra la realimentación

La estructura de realimentación permite un uso muy flexible. Es posible, por ejemplo, concebir otra estructura de realimentación que actúe

sobre la directamente implicada en el proceso que se trata de controlar. Se tiene entonces lo que se conoce como control adaptativo. En esta forma de control, la nueva estructura de realimentación trata de ajustar el controlador a eventuales cambios en el entorno en el que está inmerso el sistema. Se tienen, por tanto, dos estratos de actuación. Uno mediante el cual el controlador corrige la variable que se trata de controlar. Un segundo mediante el cual se actúa sobre el propio controlador ajustándolo a cambios en el entorno. En la figura 5 se muestra un diagrama en el que aparecen estos dos modos de realimentación.

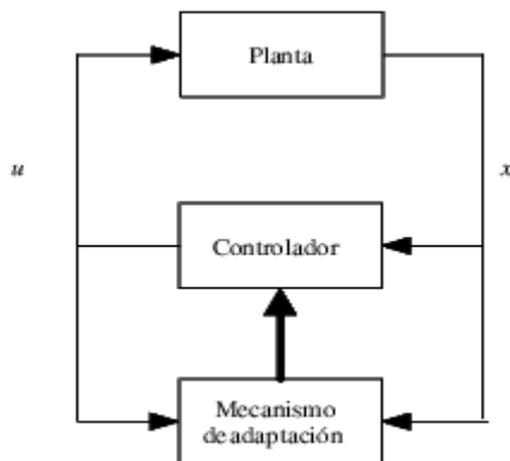


Ilustración 5. Control adaptativo. Estructura de adaptación de un controlador por realimentación

4. LA REALIMENTACIÓN ALLENDE LA INGENIERÍA

La ubicuidad de la estructura de realimentación fue puesta de manifiesto por Norbert Wiener en su libro *Cibernética*³. El subtítulo de este libro "El control y la comunicación en el animal y en la máquina" es suficientemente expresivo para nuestros propósitos. Postula Wiener que encontramos estructuras de realimentación no sólo en las máquinas automáticas que nosotros concebimos, sino en los propios procesos reales que están dotados de formas de gobierno autónomo del comportamiento. Es lo que sucede en los seres vivos, a los que considera islotes antientrópicos; es decir, enclaves en los que se contradicen localmente los supuestos del segundo principio de la termodinámica. Esta transgresión local parece estar íntimamente asociada con el procesamiento de la información implícito en la estructura de realimentación. En efecto, los seres vivos, lo mismo que las máquinas dotadas de autocontrol, son sistemas abiertos, cuyo funcionamiento requiere el

consumo de energía exterior al propio sistema. Pues bien, como hemos visto anteriormente, mediante la estructura de realimentación se dosifica, de forma autónoma, la inyección de energía externa de modo que el comportamiento del sistema alcanza a contravenir, durante el tiempo en que permanece activo -vivo- los principios de la termodinámica (sin embargo, este es un extremo que aún hoy no hemos logrado hacer suficientemente explícito). No en balde Wiener caracteriza la información como la entropía con el signo cambiado.

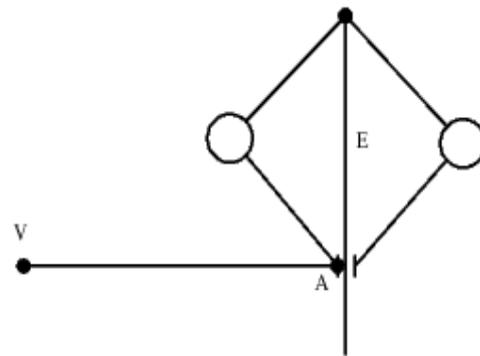


Ilustración 6. Esquema básico de un regulador a bolas de Watt: el giro del eje E imprime una fuerza centrífuga en las bolas, que se traduce en un deslizamiento del anillo A, que a su vez actúa sobre la válvula V que alimenta la máquina de vapor

El hecho, aún no bien comprendido hoy en día, de que información y entropía estén relacionados posee raíces más profundas de lo que pudiera parecer. Por ejemplo, en la conferencia anterior de este ciclo, el Profesor Zamora invocaba a la máquina de vapor como precursora de la disciplina que él cultiva: la termodinámica. Algo análogo podríamos hacer ahora, y decir que en la máquina de vapor están igualmente las raíces de la disciplina que yo practico: el control automático. La máquina de vapor es también la protomáquina automatizada, dotada de control automático. En efecto, la máquina de vapor, que con toda justicia ha pasado a la historia por sus contribuciones energéticas a la revolución industrial, incorpora en su concepción una estructura de realimentación negativa mediante el regulador a bolas de Watt. En la figura 6 se muestra el esquema básico de un regulador a bolas de Watt, que actúa como sensor de la velocidad de giro del eje de la máquina de vapor. Este sensor está basado en un ingenioso mecanismo mediante el cual el giro del eje da lugar a una fuerza centrífuga en unas bolas que, a su vez, produce el deslizamiento de un anillo que, de este modo, "registra" la velocidad de giro de la máquina. Por tanto, este anillo genera información sobre

la velocidad de la máquina. Esta información se transmite mecánicamente a la válvula que alimenta el cilindro de la máquina de vapor (figura 7). Se tiene así una estructura realimentada que se muestra mediante bloques en la figura 8.

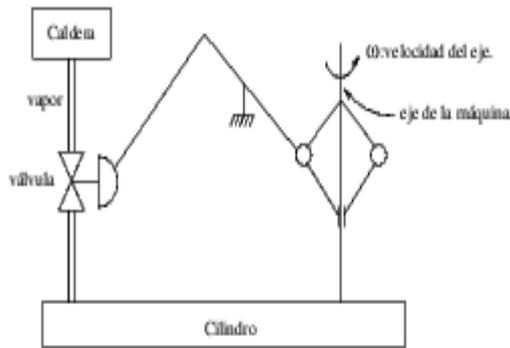


Ilustración 7. Esquema básico de una máquina de vapor en el que se pone de manifiesto como la información sobre la velocidad suministrada por el regulador a bolas se emplea para actuar la válvula que alimenta el cilindro

El regulador a bolas es esencial para el funcionamiento de la máquina, que se convierte así en referencia obligada en la historia de la automática. Más aún, es precisamente en esta máquina en la que se registran por primera vez de forma clara, y con toda su virulencia, los fenómenos de oscilación parásitos asociados a los sistemas realimentados. Los problemas inherentes a estas oscilaciones atraen la atención, a lo largo del siglo XIX, no sólo de los ingenieros encargados de su concepción, como el ingeniero y matemático ruso Vichnegradski⁴, sino también de significados científicos como el propio James Clerk Maxwell, que le dedicó una celebrada memoria⁵. Sobre las relaciones entre transmisión de información, entropía, aparición de enclaves antientrónicos, y cuestiones relacionadas hay que mencionar también las aportaciones capitales de Alan Turing y de Ilya Prigogine. Es lamentable que ante temas tan sugerentes se esté realizando poca investigación debido, sin duda, a uno de los males de nuestro tiempo que obliga a publicar mucho y pensar poco. Y para lo primero ya se sabe que lo más productivo es recorrer sendas trilladas.

La estructura de realimentación ha pasado de ser algo que los ingenieros incorporamos a nuestros proyectos para conseguir que las máquinas gobiernen su comportamiento de forma autónoma, a ser una estructura básica para la comprensión del comportamiento de los sistemas que pueblan nuestro entorno. Junto con la estructura de realimentación negativa,

responsable de los comportamientos autoregulados, encontramos la de realimentación positiva, que da lugar a los procesos de crecimiento. Combinando ambas estructuras, en los sistemas complejos, podemos dar razón de formas de comportamiento muy elaboradas. La combinación de varias estructuras de realimentación en un único proceso conduce inevitablemente a que su descripción requiera el uso de matemáticas no lineales. Esto complica extraordinariamente el análisis del comportamiento de estos sistemas, pero al mismo tiempo enriquece las posibilidades de comportamientos que pueden presentar. Por ejemplo, se pueden dar múltiples comportamientos a largo plazo, dependiendo de las condiciones iniciales. Este hecho es capital ya que nos obliga a considerar la multiplicidad de comportamientos que puede presentar un único sistema dependiendo de esas condiciones. Los sistemas no lineales también pueden aparecer oscilaciones que, en el caso de ser aperiódicas, conducen al fascinante mundo del caos, en el que la capacidad de previsión de ciertos sistemas deterministas resulta significativamente mermada, y cuyas consecuencias aún estamos empezando a entender.

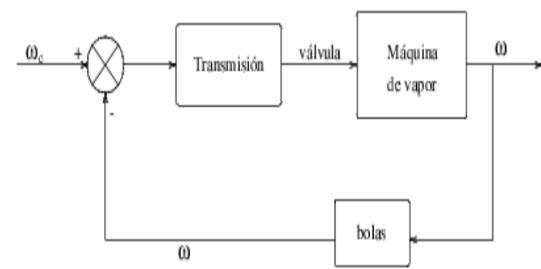


Ilustración 8. Diagrama de bloques de una máquina de vapor en el que se pone de manifiesto la estructura de realimentación negativa

Estas complejas estructuras, con múltiples procesos de realimentación interactuando entre sí, además de encontrarse en los sistemas biológicos, especialmente en los procesos homeostáticos mediante los cuales los seres vivos mantienen invariables sus constantes vitales, y también en los procesos ecológicos, en la dinámica de poblaciones, las encontramos también en los sistemas sociales. De este modo los estudios sobre estabilidad, y tantos otros, como los relativos a optimización, desarrollados por los ingenieros para mejor entender el comportamiento de sus esquivas máquinas autónomas, están encontrando un floreciente campo de aplicaciones en todos estos campos, que van más allá del reducto de la ingeniería de control.

5. LA REALIMENTACIÓN Y LAS FORMAS COMPLEJAS DE COMPORTAMIENTO

El comportamiento autónomo de las máquinas, mediante el cual ellas mismas toman las decisiones para conseguir los objetivos propuestos, es tan sorprendente que no es extraño que se haya producido un cierto embaucamiento que ha conducido a denominar 'inteligente' a este comportamiento. Al movernos por el dominio de la información parece natural toparnos con el concepto de inteligencia; al fin y al cabo, una de las manifestaciones del quehacer inteligente es procesar información con vistas a tomar decisiones. Aunque estas decisiones sean el resultado de aplicar reglas claramente establecidas no por ello dejamos de asociar a ese modo de actividad un contenido de alguna forma 'intelectual'.

Podríamos imaginar una prueba semejante a la de Turing mediante la cual nos planteásemos si un determinado comportamiento (y no una serie de preguntas y respuestas, como en el caso de Turing) permiten decidir si el comportamiento de la máquina es 'inteligente' o no. Soy de los suspicaces con relación a la propiedad de esa denominación que más parece una degradación del término que un uso adecuado. Si bien, en algunos casos, resulta adecuado emplear términos zoomorfos con relación a las máquinas, y así hablar del brazo de un robot o las alas de un avión, parece que el término inteligencia debería reservarse para funciones más propias de la especie humana, y más cuando, en este último empleo, aún no acabamos de entender qué es la inteligencia.

Sin embargo, por el indudable impacto comercial que tiene esa denominación por un lado y, por otro, por el desmedido afán de celebridad de algunos constructores de máquinas, el caso es que ese término ha hecho fortuna y ya se ha incorporado al lenguaje ordinario. Así cada vez más se oye hablar de la adición de inteligencia a un automóvil o a un electrodoméstico, de un edificio inteligente, u otros usos similares, especialmente cuando uno es el comprador de esos productos. En todos estos casos la denominación debe recibirse con una sonrisa escéptica y hay que pensar que se trata, sencillamente, de la incorporación de una (o de varias) estructura de realimentación que, mediante un adecuado tratamiento de la información procedente del artefacto en

cuestión, decide la mejor manera de comportarse la máquina para alcanzar determinados objetivos en su comportamiento.

Una máquina es el prototipo de un sistema, de una entidad que resulta de la adecuada coordinación de las partes constituyentes. En este sentido las máquinas han suministrado una metáfora del mundo como sistema complejo para cuya intelección había que recurrir al conocimiento de los mecanismos constituyentes y de cómo se relacionan entre sí. Ya en la antigüedad Lucrecio en su *De la Naturaleza de las cosas* habló de la *machina mundi*. En tiempos más cercanos a nosotros, esta metáfora, inspiró, en gran medida, la filosofía de Descartes. Sin embargo, en esa visión de las cosas parecía asumirse que conociendo las propiedades de los elementos constituyentes seríamos capaces de comprender las del sistema resultante de su integración. Esta postura filosófica se conoce como reduccionismo fisicalista.

Frente a este punto de vista, muy querido por los físicos, se ha propuesto otro, más apreciado por biólogos y especialistas en ciencias sociales, en virtud del cual las propiedades del sistema no dependen tanto de las de los elementos constituyentes sino de la forma como estos elementos se integran en la unidad de orden superior que es el sistema. Los partidarios de este segundo punto de vista son los sistemistas, que pretenden estudiar lo propiamente sistémico. La estructura de realimentación permite ilustrar de forma muy clara lo que se entiende por una propiedad sistémica. En el comportamiento de un sistema (objeto formado por una serie de partes en interacción) una propiedad sistémica es aquella que depende de la forma de organizarse los objetos que forman el sistema, en la estructura del sistema, y no de las propiedades de estos objetos. El comportamiento autorregulador asociado a una estructura de realimentación negativa, lo mismo que el comportamiento explosivo asociado a una positiva, es un claro ejemplo de qué se entiende por una propiedad sistémica. De este modo la estructura de realimentación constituye uno de los pilares metodológicos para el desarrollo de una teoría de sistemas que se viene reclamando insistentemente desde distintos foros, en unos tiempos en los que la complejidad es una nota dominante, pero que todavía no ha llegado a cuajar en un cuerpo de conocimiento establecido.

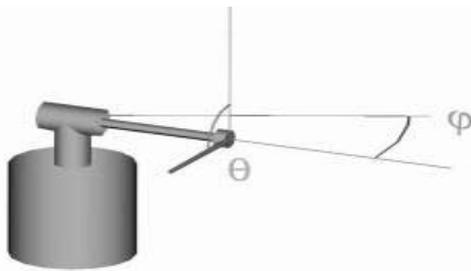


Ilustración 9. Péndulo invertido rotatorio

Llegados a este punto acaso convenga concretar lo que se acaba de decir y referirlo a un ejemplo concreto de sistema realimentado que resulte especialmente llamativo. Para ello voy a recurrir a un sencillo artilugio conocido como péndulo invertido, que consiste en un motor, de eje vertical del que es solidario un brazo, que, por tanto, gira con el motor (en la figura 9 el giro del brazo se mide por el ángulo ϕ). Del extremo del brazo cuelga libremente un péndulo (cuya posición, en la figura 9, se mide por el ángulo θ) que oscilará tras cualquier movimiento del motor. La posición natural del péndulo, cuando el motor está parado, es la de pender hacia abajo ($\theta = \pi$). El objetivo que se pretende alcanzar es que este péndulo se mantenga erecto en el extremo del brazo ($\theta = 0$). Se trata de un comportamiento artificial que puede interpretarse diciendo que se trata de invertir la acción de la gravedad que en lugar de tirar del péndulo hacia abajo, lo succione hacia arriba.

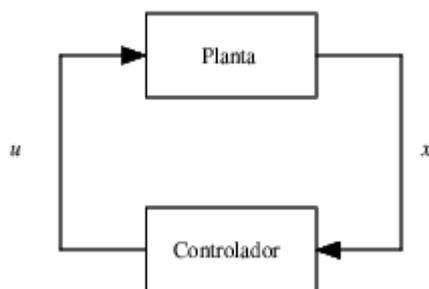


Ilustración 10. Estructura de realimentación de un péndulo invertido rotatorio

Para conseguir este objetivo se requiere medir, mediante un sensor adecuado, el ángulo que forma el péndulo con la vertical y, a partir de esta información, decidir qué actuación debe tener el motor para lograr el objetivo propuesto. Se trata, una vez más, de una sencilla estructura de realimentación mediante la cual a partir de una medida, el ángulo del péndulo con la posición vertical, se procesa esa información en un ordenador, mediante un algoritmo adecuado

(cuya concepción constituye una de las aportaciones básicas del ingeniero de control) se decide la actuación conveniente, que se lleva a cabo mediante el motor que, en este caso, es el actuador sobre el sistema a controlar; esto es, el péndulo.

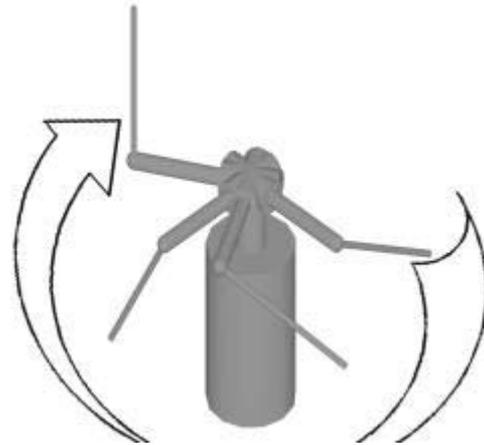


Ilustración 11. Balanceo y estabilización de un péndulo invertido rotatorio

El interés de este proceso radica en que se trata de un sistema subactuado en el cual el actuador, el motor, actúa sobre el brazo del que pende el péndulo, y no sobre el péndulo cuya posición se trata precisamente de controlar. Esto da lugar a interesantes problemas de estabilidad que han hecho de este sistema uno de los problemas de control que ha recibido una considerable atención en la literatura en los últimos años. Aquí, sin embargo, como es natural, no nos ocuparemos de esas sutilezas. Sí conviene, sin embargo, considerar dos aspectos de este problema de control.

Por una parte, el sistema resulta aparentemente sencillo desde un punto de vista mecánico, y no es difícil obtener las ecuaciones matemáticas que gobiernan su comportamiento. Sin embargo, tras esta aparente simplicidad formal se esconde una considerable dificultad. Para llevar el péndulo de la posición colgante a la superior se requiere inyectarle la energía que corresponde a la diferencia entre las energías potenciales correspondientes a esas dos posiciones. Este problema es aparentemente sencillo y se conoce su solución. Por otra parte, una vez el péndulo se encuentra cercano a la posición deseada, el problema que se plantea es análogo al de el malabarista que trata de mantener un palo en la punta del dedo. Este problema también se sabe resolver razonablemente bien. Lo que se hace en los péndulos invertidos actualmente en

funcionamiento es resolver estos dos problemas separadamente. En primer lugar, se aplica la estrategia de inyección de energía para llevar el péndulo a una posición cercana a la deseada y, en segundo lugar, se conmuta a otra estrategia de control (la del malabarista) que permite estabilizar el sistema en esta posición. Es notable, sin embargo, que no se haya encontrado una ley de control única que realice estas dos funciones.

En este sentido el péndulo invertido es un ejemplo paradigmático de un problema de ingeniería. Un problema ante el cual el ingeniero, para alcanzar el objetivo propuesto, recurre a una síntesis entre las soluciones a los diferentes subproblemas en los que se descompone un proceso complejo. Estas distintas soluciones comprenden desde aspectos de concepción (como son, en este caso, las dos estrategias que hay que combinar) hasta cuestiones de implantación (que en nuestro caso se traducen en la elección de sensores adecuados y en un sistema informático -un DSP- adecuado para procesar la información correspondiente, ver figura 12). La labor del ingeniero consiste en integrar creativamente (es decir, con una libertad sólo sometida al logro del objetivo deseado) todos estos elementos y plasmarlos en una solución concreta y eficiente al problema propuesto. Es notable observar que, en ese sentido, el péndulo invertido, siendo un sistema relativamente simple, aporta un ejemplo de máquinas mucho más complejas, como pueden ser un robot o un automóvil.

Por otra parte, el otro aspecto del comportamiento del péndulo invertido sobre el que conviene prestar atención es el que se deriva de la observación de su comportamiento. El péndulo invertido, en funcionamiento, parece empeñarse obstinadamente en mantenerse en la posición artificial que ha motivado su concepción. Si mediante una perturbación adecuada (el golpe con una varilla, o sencillamente la aplicación de un par con la mano) se saca al péndulo de la posición deseada, este reacciona restituyéndola de forma autónoma. El péndulo se comporta de modo que la "causa final" (por usar la clasificación de causas de Aristóteles) es la que parece presidir su comportamiento. La constatación de este hecho obliga a replantear algunos supuestos comúnmente aceptados con relación al comportamiento de las máquinas. A la conducta del péndulo cabe darle una interpretación teleológica. Las máquinas parecían constituir la

realización ejemplar de la causalidad eficiente aristotélica. No obstante, vemos como el péndulo invertido (y en general las máquinas dotadas de realimentación) presentan un comportamiento que parece estar regido por la causa final (el objetivo propuesto). Sin embargo, y esto es lo notable, de estas máquinas también poseemos una descripción en términos de causalidad eficiente. Así pues lo teleológico, que normalmente es desdeñado como poco científico, es susceptible, sin embargo, de una interpretación al gusto precisamente de aquellos que, por otra parte, lo desdeñan. Compárese esto con lo dicho anteriormente con relación a la emergente teoría de sistemas y se comprenderá la riqueza del campo de reflexión que aporta esta rama de la ingeniería en la que máquinas e información se entremezclan de forma tan sugerente.

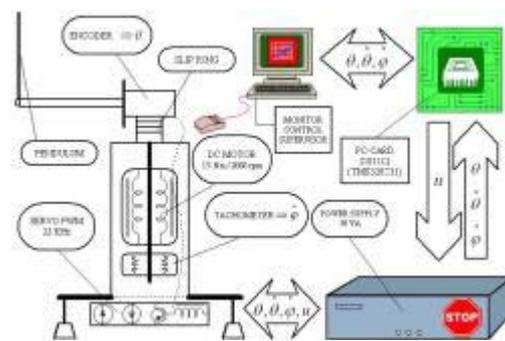


Ilustración 12. Realización informática del sistema de control del péndulo invertido

Capítulo aparte merece el apartado de las responsabilidades éticas de las decisiones que toman las máquinas. El proyectista de una máquina automática, como hemos visto, no sólo fija los objetivos sino que establece los mecanismos con los que los alcanzará. ¿De quién es la responsabilidad de las decisiones que toma la máquina? Porque, como es sabido, la ética se ocupa de sentar las bases a partir de las cuales establecer las responsabilidades que derivan de las decisiones tomadas. Este es un ámbito de reflexión para el campo poco explorado de la ética de los ingenieros.

Así pues hemos visto como la información se ha situado en el núcleo de las máquinas con las que convivimos. Que para la concepción de las máquinas en las que la información juega un papel esencial se ha tenido que desarrollar una nueva rama de la ingeniería que es el control automático. Este nueva rama tiene un carácter transversal, y afecta a todas las tradicionales, es decir a la ingeniería eléctrica, mecánica, química, entre otras. En todas ellas se emplea la

información y la estructura de realimentación para gobernar autónomamente el comportamiento de las máquinas. Hemos visto también que el concepto de realimentación no se limita a la ingeniería de control, sino que ha trascendido al estricto mundo de la técnica y hoy lo empleamos para comprender y explicar procesos complejos que tienen lugar tanto en los seres vivos como en los sistemas sociales. Con el control automático nos encontramos con una disciplina emergente que, como sucedió con la termodinámica hace dos siglos, antecede en sus conceptos y en sus métodos a la ciencia establecida. Constituye una muestra palpable de la autonomía del mundo de la técnica y, por tanto, de la ingeniería, así como de sus más conspicuas posibilidades innovadoras y creativas, tanto en lo que respecta a conseguir artefactos que enriquezcan nuestra vida, como a elaborar conceptos que nos ayuden a entender mejor el mundo en el que vivimos.

NOTAS

¹ *Le Monde*, 13 de febrero de 2001.

² Publicado originalmente en la *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid* (Torres Quevedo, L., "Ensayos sobre Automática. Su definición. Extensión teórica de sus aplicaciones". *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid*, enero de 1914, 391-419) y que alcanzó gran difusión al ser traducido al francés en la *Révue Générale des Sciences Pures et Appliquées* con el título "Essais sur l'automatique. Sa définition. Etendue théorique de ses applications". Se dispone de una reciente edición de estos trabajos realizada por INTEMAC en 1996.

³ Wiener, N., *Cybernetics*, Cambridge (MA), The MIT Press, 1948, segunda edición ampliada en 1961. De este libro hay dos traducciones al español que distan mucho de hacerle justicia, una en Guadiana de Publicaciones, 1960, y la otra en Tusquets Editores, 1985. Es un libro tan sugerente como difícil pero, en todo caso, no es conveniente que un traductor no entienda lo que traduce.

⁴ Wischnegradski, J., "Sur la théorie générale des régulateurs", Paris, Comt. Rend. Acad. Sci., Vol. 83, 1876, 318-321.

⁵ Maxwell, J.C., "On governors". *Proceedings of the Royal Society of London*, volumen 16, 1868, 270-283.