
Ciencia

La Cibernética: Fundamentos y Proyecciones

ALBERTO E. SAGASTUME BERRA

NACIDO EN LA PLATA en 1905, el prof. Alberto E. Sagastume Berra se doctoró en matemática en la Universidad de La Plata en 1928. Desde entonces —y hasta el corriente año— ejerció la docencia en la misma universidad, obteniendo la cátedra titular en 1940. Fué profesor de matemática y cosmografía en el Colegio Nacional de la Universidad (1928-1957). En noviembre de 1956 fué designado miembro titular de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Es miembro titular de la Sociedad Científica Argentina y de la Unión Matemática Argentina. En la actualidad es (conjuntamente con el prof. José Babini) delegado argentino ante la "Comisión Internacional de Enseñanza Matemática". Es autor de sesenta publicaciones destacándose: FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DE LA MÚSICA (1937), los textos de MATEMÁTICA para la enseñanza media (en colaboración con el Dr. Ramón Loyarte) e INTRODUCCIÓN A LA MATEMÁTICA SUPERIOR (1946).

LA Matemática ha seguido, en su evolución histórica, una trayectoria pendular, inclinándose alternativamente hacia sus aspectos puro y de aplicación. En el primero constituye, como se sabe, una ciencia en la que la abstracción tiene un papel preponderante, mientras que en el segundo constituye un instrumento o herramienta de trabajo sumamente preciso y eficaz. Ambos aspectos interaccionan entre sí: la experiencia y la práctica se subliman en teorías abstractas, y éstas a su vez permiten prever nuevas experiencias y aplicaciones. Por lo demás, las nociones mismas de lo "abstracto" y lo "concreto" varían con el devenir histórico y cultural: si los conceptos del cálculo infinitesimal fueron abstractos en su época, hoy se aplican a los objetos más concretos; y a la inversa, una operación tan concreta y vulgar como el arrojar unos dados o extraer naipes de un mazo, ha dado origen a la teoría abstracta de las probabilidades, con todas sus consecuencias teóricas y prácticas.

En el momento actual y después de la era de extrema abstracción que caracterizó el siglo pasado y el comienzo del actual, parecemos que la Matemática se inclina nuevamente hacia la faz de aplicación. Ejemplos de ello son los desarrollos de las máquinas calculadoras (los llamados "cerebros electrónicos") con la evolución con siguiente de los métodos de cálculo numérico, y el auge cada vez mayor de las teorías probabilísticas y estadísticas con sus aplicaciones cada vez más vastas. Advirtamos que todas estas afirmaciones no deben tomarse en una forma absoluta: siempre existen interacciones entre los dos tipos de Matemática, vinculaciones siempre saludables, y solo se trata de un predominio, ora de uno, ora del otro, pero sin excluir a ninguno de ellos. Nuestra era, a pesar de la tendencia anotada, no carece, ni mucho menos, de matemáticos puros de primera fuerza.

Una de las teorías más recientes, nacida de necesidades prácticas y que poco a poco se va organizando y desarrollando en una nueva ciencia, es la *Cibernética*. Fué definida por el matemático e ingeniero norteamericano Norbert Wiener, uno de sus creadores, como "la ciencia del control y la comunicación, en el animal y en la máquina". Wiener atribuye a esta ciencia tal importancia, que la cree capaz de ejercer un papel decisivo en el gobierno de las cosas y de los hombres, y de ahí la elección del nombre "cibernética", derivado de una palabra griega que significa el que gobierna o pilota un navío. Es, pues, una ciencia dirigida a establecer leyes y conclusiones para el mejor gobierno de los mecanismos de cualquier naturaleza que sean. Sus conclusiones pueden aplicarse tanto a las máquinas en el sentido usual, como en el sentido más amplio que aquí tiene la palabra "máquina". Para la Cibernética, *máquina* es todo aquello que realiza una transformación; puede, pues, ser un dispositivo mecánico, eléctrico, óptico, el sistema nervioso de un animal o del hombre, un sistema social o un sistema económico.

MÁQUINAS. TRANSFORMACIONES

La máquina, para la Cibernética, es, pues, algo que transforma situaciones o *estados* en nuevos *estados*: a un estado A puede transformarlo en A' , al estado B en B' , al C en C' , etc. A la Cibernética

le interesa la transformación misma, la cual queda definida por los pares A, A' ; B, B' ; C, C' ; ... y nada más. La pregunta: ¿por qué A se transforma en A' , B en B' , etc.? no es del dominio de la Cibernética; a ella le interesa solamente el *cómo* y no el *porqué*. Las leyes generales que deduce y utiliza se refieren al *comportamiento* ("behaviour") de la máquina, a su construcción para obtener tal o cual comportamiento, como aparecen a un observador que simplemente mira lo que ocurre y razona sobre ello.

Quedamos, pues, en que nos interesan primeramente las transformaciones. En este sentido, la Cibernética se liga con teorías matemáticas conocidas, que se ocupan también de transformaciones en abstracto y cuyos métodos y terminología se pueden aplicar íntegramente. La Teoría de los Grupos, magnífica creación de la Matemática abstracta, viene aquí en nuestra ayuda. Claro está que para que la transformación definida por los pares A, A' ; B, B' ; C, C' ; ... sea interesante desde el punto de vista cibernético, es menester que sea ante todo *cerrada*. Con este término se significa que los estados resultantes A' , B' , ... deben hallarse entre los originales A, B, \dots ; para que así la transformación pueda continuar aplicándose.

Antes de seguir adelante debemos hacer una advertencia: nuestra descripción se refiere a una transformación *discreta*, que concebimos actuando reiterada pero intermitentemente, en sucesivos momentos, instantáneamente en cada uno de ellos, mientras que en los intervalos que quedan entre ellos no ocurre nada. Parecen escapar así a esta descripción los procesos *continuos*, ciertamente importantísimos, en que el sujeto de la transformación va cambiando por grados insensibles en el transcurso del tiempo y sin saltos. En realidad no es así. Si concebimos las cosas del primer modo descrito, es porque así resulta más claro y cómodo, y, porque la transformación continua puede obtenerse a partir de la discreta, por un proceso de *paso al límite*, muy conocido de los matemáticos, y que consiste en considerar sucesivas transformaciones discretas que aproximan cada vez más a la transformación continua.

TIPOS DE MÁQUINAS. EJEMPLOS

Prosigamos, pues, con las transformaciones discretas. Si la transformación T es invariable, tenemos lo que se llama una máquina *determinada*. Pero T puede variar de diversas maneras: la máquina puede contener dispositivos (palancas, conmutadores, relays, etc.) que la hagan variar de comportamiento. Por comodidad conviene atribuir valores numéricos a las distintas posiciones de esas palancas o conmutadores, y hablar así, más matemáticamente, de los valores de un *parámetro* o variable; éste constituye la *entrada* ("input") de la máquina. Si el parámetro tiene el valor a , la máquina efectúa la transformación T_a , mientras que a otro valor distinto b del parámetro corresponde otra transformación distinta T_b (como si fuera otra máquina distinta). Este es el tipo más importante de máquina, la máquina *con entrada* o *transductor*; que es en realidad la reunión de varias máquinas determinadas (cada una correspondiente a un valor del parámetro) y por lo tanto tiene todavía un comportamiento determinado, si bien variable. Existe todavía otro tipo más general, la *máquina markoviana*, de índole probabilística, que no nos interesa detallar por cuanto el transductor constituye el tipo más importante.

Algunos ejemplos aclararán los conceptos anteriores. Un reloj común puede considerarse como una máquina determinada, cuya transformación puede expresarse en términos no matemáticos diciendo que el minutero describe una vuelta cada hora, mientras que la aguja horaria marcha con velocidad doce veces menor. Un estado posible es, por ejemplo, cuando el reloj marca las 12 horas, otro estado, cuando marca las 12 horas 30 minutos; con respecto a la posición anterior, las manecillas han recorrido 180° y 15° respectivamente. La transformación especificada por estos ángulos, que transforma cualquier estado del reloj (significado por una hora determinada) en otro estado que corresponde a media hora más tarde, puede considerarse como una de las transformaciones discretas que aproximan a la transformación continua de la máquina; es como si el reloj se estuviera quieto durante media hora, al cabo de la cual saltara bruscamente para marcar la nueva hora. Con minutos en lugar de

medias horas, es éste, precisamente, el proceso que sigue cierto tipo de relojes eléctricos.

Otro ejemplo de máquina determinada lo tenemos en un cultivo microbiano. El estado del mismo puede especificarse por el número de microorganismos existentes en un momento dado; y si contamos los microbios una hora después, por ejemplo, el nuevo número nos especifica el nuevo estado del cultivo, que ha sufrido así una transformación.

Una vulgar máquina de calcular es un ejemplo sencillo de transductor: con una palanca en cierta posición (la de la operación de sumar), y dados los números 6 y 3, nos da por resultado 9; con la palanca en la posición de restar, y para los mismos datos (estado), nos da el resultado 3; con la palanca en la posición de multiplicar, obtenemos 18; y si en la posición de dividir, nos da 2. He aquí cuatro *salidas* ("outputs") diferentes para los mismos datos o estado inicial (a causa, precisamente, de las distintas posiciones de la palanca o valores de la entrada).

CALCULADORAS. MÁQUINAS QUE RECUERDAN Y APRENDEN

Precisamente este ejemplo, de las máquinas de calcular, merece un párrafo aparte, debido al enorme desarrollo que han tenido desde hace algunos años y la importancia que han adquirido en la economía, en ciertas industrias, en el arte militar, etc.

Existen dos tipos fundamentalmente distintos de máquinas de calcular: las de *analogía* y las *digitales*. En las del primer tipo, las cantidades o números que se manejan están representados por alguna magnitud física que puede variar con continuidad, por ejemplo: la longitud de una regla, la intensidad o el voltaje de una corriente eléctrica, etc.; en cambio en las máquinas digitales, los números se representan por unidades discretas, separadas; son "contados" y no "medidos" como en el caso anterior: un número 3 por ejemplo, puede estar representado por tres dientes de un engranaje, por tres impulsos eléctricos, por tres descargas de un condensador electrostático, etc. Un ejemplo simple de *máquina analógica* lo tenemos en la regla de cálculo que usan los ingenieros, en la cual los números están representados por longitudes de una regla fija y otra movable; y las operaciones

aritméticas, por ciertas manipulaciones efectuadas con ambas reglillas; en cambio el ejemplo más conocido de *máquina digital* es la máquina de sumar que se usa en bancos y oficinas, en la cual hay sucesivos tambores, de diez dientes cada uno, que representan las diez cifras o dígitos (de ahí el nombre), dispuestos de tal modo que cada vuelta completa de un tambor induce a avanzar un diente al siguiente, para así transformar diez unidades en una decena, diez decenas en una centena, etc., según el sistema decimal.

Nos llevaría muy lejos intentar una historia de las máquinas de calcular. Bástenos una referencia somera a las máquinas digitales, cuyo desarrollo durante y después de la segunda guerra mundial ha sido verdaderamente prodigioso. Ya hoy las máquinas puramente mecánicas nos parecen lentas y anticuadas; se prefieren dispositivos electrónicos, que son mucho más eficientes, rápidos y seguros. Los dispositivos electrónicos pueden representar muy bien una alternativa binaria: circuito abierto o cerrado, condensador cargado o no, existencia o no de corriente o de tensión en un determinado punto, etc. Por esto (además de otras no despreciables razones de economía) se ha adoptado para estas máquinas un sistema donde no existen más que las cifras 0 y 1, en lugar de las diez del sistema ordinario. Es el sistema de numeración de base 2, que si es familiar a los matemáticos, en cambio parece extraño al que lo encuentra por primera vez. Se comprende que enlazando eléctricamente "relais" o válvulas electrónicas, pueda representarse, según la existencia o no de corriente en las sucesivas etapas, toda suerte de números. Los tubos electrónicos tienen además la ventaja de obrar instantáneamente, y así se obtienen las enormes velocidades de operación que caracterizan a estas máquinas: la ENIAC, de la Universidad de Pennsylvania, puede efectuar una multiplicación en tres milésimas de segundo; sus constructores se jactan de haber podido calcular la trayectoria de un obús antes de que éste llegase al blanco. La máquina electrónica de Princeton lleva a cabo en un segundo 100.000 sumas, con sumandos de veinte cifras; y en el mismo tiempo puede realizar 2.000 multiplicaciones y 1.200 divisiones, siempre con números de veinte cifras.

Además de su rapidez de operación, el otro perfeccionamiento tal vez decisivo de estas máquinas se debe a que son capaces, mediante un adecuado código, de recibir instrucciones completas acerca de la

sucesión de operaciones que se espera de ellas; mediante tarjetas o cintas perforadas según una clave, o cintas magnéticas, o registros fotográficos, se introducen en la máquina las instrucciones acerca del objeto de un cálculo; automáticamente la máquina realiza todas las operaciones y proporciona los resultados, incluso por escrito y traducidos nuevamente a la numeración ordinaria. Más aún, se ha hecho famosa la “memoria” de estas calculadoras: es un organismo de índole magnética, electrónica o piezoeléctrica, que permite retener un resultado parcial todo el tiempo que sea necesario hasta que deba volver a utilizarse.

Verdad es que estas máquinas pueden, como queda dicho, realizar largas y complejas operaciones de cálculo con extraordinaria rapidez, pero lo que no podrán jamás es reemplazar al hombre en la tarea de plantearse y formular matemáticamente un problema. Sólo el hombre es capaz de fabricar máquinas, a las que no puede dotar de raciocinio ni de imaginación ni de inteligencia; empero ellas le ayudarán a liberarse de engorrosos trabajos que no requieren el empleo de estas cualidades superiores.

Es realmente asombroso (y en cierto sentido, también pavoroso) lo que ha llegado ya a realizarse con máquinas, en especial las destinadas a imitar el comportamiento animal o humano. La “*machina speculatrix*” o tortuga de Grey Walter —eminente neurólogo inglés— tiene un andar normal errático; pero un dispositivo fotoeléctrico está constantemente registrando el horizonte, y apenas aparece una señal luminosa, el aparato se dirige hacia ella. Los norteamericanos Shannon y Howard han construido máquinas también electromecánicas que, no sólo son capaces de descifrar un laberinto, sino que después conservan memoria de él, de tal modo que a la segunda vez que se los coloca ante el problema, ya muestran haber aprendido la solución, y no se equivocan. Más aún, el mismo Grey Walter, ya citado, ha ideado su “*machina docilis*” que muestra un comportamiento que recuerda los “reflejos condicionados” de Pavlov: de ordinario el aparato acude cuando se produce una señal luminosa; pero si unas veinte veces se hace preceder la luz del sonido de un silbato, ya después el silbato sólo hace acudir al animalito mecánico.

LA REALIMENTACIÓN NEGATIVA

Pero volvamos a nuestras consideraciones generales. Nos referiremos ahora a un concepto de la mayor importancia: es el principio de la *realimentación* ("feedback"), en particular la *negativa*. Bajo estos términos, *realimentación negativa*, todo aficionado a la radio conoce un principio que aplica a ciertas circunstancias del funcionamiento de las válvulas electrónicas. Lo que posiblemente no sabe es que el concepto tiene una amplísima aplicación. En términos abstractos, hay *realimentación* cuando un transductor se acopla consigo mismo de modo que su salida vuelve a influir en su entrada; tal *realimentación* puede ser *positiva*, cuando su acción tiende a reforzar la de la máquina, o *negativa*, cuando tiende a oponérsele. Tal vez mejor que la definición abstracta nos ilustren aquí los ejemplos concretos: uno clásico lo tenemos en el famoso regulador de Watt para una máquina de vapor: consiste en un par de esferas montadas sobre un paralelogramo articulado cuyo eje, vertical, está movido por la máquina misma; cuando dicho eje gira, las esferas, obedeciendo a la fuerza centrífuga que se opone a la gravedad, tienden a separarse, y entonces el paralelogramo está dispuesto en tal forma que ese movimiento de separación tiende a cerrar la entrada del vapor al cilindro de la máquina, con lo que la velocidad disminuye. Pero si la disminución es excesiva, las esferas caen, se juntan, y esto tiene por efecto abrir la válvula, con el consiguiente aumento de la velocidad. Se consigue así que ésta quede regulada entre límites prefijados.

Otro ejemplo más modesto del mismo principio lo tenemos en el vulgar flotante de un tanque de agua: sabido es que cuando el nivel del agua disminuye, el flotante baja y este movimiento abre la válvula que alimenta el tanque; con lo cual entra cierta cantidad de agua y el nivel sube; en cambio si la suba es excesiva, también sube el flotante y obtura la válvula. El resultado es una regulación, que mantiene el nivel de agua dentro de límites prefijados.

Bien mirado, hay *realimentación negativa* en muchos de nuestros propios actos. Supongamos, por ejemplo, que queremos dejar un libro en su sitio vacío de la biblioteca. Tomamos el libro (y si analizáramos detalladamente esta acción ya encontraríamos la *realimentación nega-*

tiva) y tratamos de llevarlo al sitio vacío que vemos. El movimiento de nuestra mano está regulado por un mecanismo de realimentación negativa: si el movimiento es demasiado brusco o rápido y nos “pasamos” del sitio, nuestra vista, junto con otros sentidos, realimenta y nos dice que debemos volver atrás; y a la inversa si nuestro gesto no alcanza el sitio elegido. De hecho, en toda nuestra acción hay una constante regulación por realimentación negativa a través de nuestra vista, cerebro y nervios motores.

En todos estos casos, y otros muchos que el lector puede imaginar, aparece también la función principal de la realimentación negativa, con propósitos de *regulación* o *control* de los mecanismos.

COMUNICACIÓN. MENSAJES. CANTIDAD DE INFORMACIÓN

Otro concepto que interviene implícitamente en todo lo anterior es el de la comunicación; o mejor, *comunicación de la información*: por medio de tarjetas perforadas u otro procedimiento, el operador *comunica* a la máquina de calcular cuál es su programa de cálculo; terminado éste, la máquina *comunica* el resultado al operador. La tortuga de Walter recibe la *señal* luminosa que se le comunica, y reacciona ante la *información* que ella contiene. La máquina de vapor informa constantemente de su velocidad a su regulador; y así sucesivamente. La teoría de la comunicación, esbozada por Hartley, fué después desarrollada por Shannon y Wiener, y completada por otros investigadores.

Un sistema de comunicación consta de varios elementos; primeramente, la fuente donde se origina el mensaje; luego viene un transmisor o *codificador*, encargado de traducir el mensaje en el simbolismo apropiado a la vía elegida; estos símbolos o *señales* son transmitidos por una vía o, como se dice adoptando la terminología de las radio-comunicaciones, un *canal*; viene luego un receptor o *decodificador*, que reconstituye el mensaje, el cual llega por fin al utilizador. Un ejemplo sencillo lo tenemos en la transmisión telegráfica corriente: aquí el mensaje, oral o escrito, es codificado en el sistema Morse de puntos y rayas, y estos signos son transmitidos bajo la forma de corrientes eléctricas cortas o largas que viajan a lo largo del cable telegráfico hasta llegar a la estación de destino, donde, ya sea que se reciban a oído o que lleven a aparatos especiales, son escritas nue-

vamente en escritura corriente (que es por otra parte una nueva suerte de código). Otros ejemplos están al alcance de la mano, particularmente en nuestra época en que las radiocomunicaciones y la fonografía tienen tan gran importancia. Bajo este concepto general, aún una sinfonía de Beethoven es un mensaje, en que el gran genio de Bonn nos comunica algo; el canal es en este caso la orquesta, encargada de transmitirnos los signos codificados en la partitura musical; y el decodificador lo tiene cada cual en su interior; será un decodificador fiel si la sensibilidad artística personal nos hace vibrar con las mismas emociones que impulsaron al sordo genial a escribir su obra.

El acto de la comunicación necesariamente implica, como lo ha mostrado Shannon, la consideración de todo un conjunto de mensajes posibles, entre los cuales figura el realmente recibido; y esta consideración de conjuntos de mensajes hace posible la aplicación de métodos estadísticos en esta teoría. Ashby nos da un ejemplo sencillo para hacer ver cómo la información contenida en un mensaje depende no solo de éste, sino del conjunto de mensajes posibles: imaginemos, dice, dos soldados que han caído prisioneros, uno en el país A, otro en el país B; ambos envían a sus respectivas esposas mensajes idénticos: "Estoy bien". Pero estos mensajes idénticos no tienen de ninguna manera el mismo significado, pues mientras que el país A permite al prisionero escoger entre: "Estoy bien", "Estoy ligeramente enfermo", "Estoy gravemente enfermo", en cambio el país B solo permite el mensaje "Estoy bien" o nada. Es evidente que la cantidad de información contenida en el mensaje que proviene de A es bastante mayor que la del que proviene de B.

No podemos entrar en mayores detalles acerca de la teoría de Shannon y sus distintos problemas: de la transmisibilidad de los mensajes, la capacidad de un canal, las perturbaciones o ruidos, etc. Su conclusión fundamental, creemos, podría resumirse diciendo que la "transmisibilidad" de un mensaje en un tiempo dado es una cantidad susceptible de medida.

CONCLUSIÓN: PROYECCIONES DE LA CIBERNÉTICA

En lo anterior hemos pasado revista a los conceptos más destacados de la Cibernética; deteniéndonos más o menos según nos hayan

parecido más dignos de nota o más importantes. Hemos querido dar al lector una información, siquiera sumaria, acerca de los temas de que se ocupa esta nueva ciencia y de sus proyecciones. Estas ya se pueden imaginar a partir de lo dicho. Se aplica la Cibernética a cosas tan variadas como la sociología, la biología general, la teoría del sistema nervioso, la economía, las comunicaciones de cualquier índole, la regulación y control en general, los juegos, la estrategia militar, y la *automación*. Bajo este término se entiende ahora todo lo que se refiere a regulación y control automáticos de máquinas o conjuntos de máquinas, incluso fábricas o industrias enteras. Los procedimientos de automación tienden a sustituir no sólo el trabajo físico del hombre, sino aún los trabajos mentales e intelectuales, por los de aparatos automáticos. Existen, como se ha visto, aparatos contruídos por las manos del hombre y que son capaces de resolver por sí solos ciertos problemas, de aprender ciertas técnicas, de recordar lo aprendido, y aún de adquirir ciertas costumbres. Y si ya en el comienzo de esta ciencia podemos afirmar tal cosa, es ciertamente incalculable lo que llegará a hacerse en el futuro. No es exagerado prever, como lo ha hecho en un reciente discurso la luminosa inteligencia del Papa Pío XII, que todo ello provocará sin duda una modificación profunda en las condiciones sociales y económicas de la humanidad. Deseemos de todo corazón, con el Papa, que todo ello sea para bien.