



CIBERNETICA Y LIMITE DE LO DIGITAL

Dario Maravall

La Cibernética, en su acepción original de los años cuarenta que, curiosamente, aún se conserva en los países del Este, es la disciplina que trata de la **información** y el **control** en los sistemas vivos y en las máquinas.

Esta definición es tan amplia que prácticamente abarca todas las ciencias y técnicas actuales, o al menos aspectos importantes de ellas. Pero los sistemas cibernéticos son un excelente ejemplo para discutir lo analógico y lo digital, puesto que ambos aspectos conviven en su seno.

Para poder centrar el alcance de este artículo, vamos a partir de un diagrama de bloques general y una definición de sistema cibernético (véase Cuadro I).

El sistema cibernético, SC, está constituido de un subsistema de transferencia, de un evaluador del rendimiento y de un subsistema de transformación dotado en la figura de una flecha para simbolizar su acción transformadora, basada en la realimentación introducida por el índice de rendimiento J (la realimentación es el elemento clave de los sistemas cibernéticos).

De la definición se deduce que existen unas ecuaciones matemáticas (1) que relacionan las diferentes variables del sistema. Así, por ejemplo, para el subsistema de transformación se podría tener:

$$\begin{aligned} \vec{F}[\vec{x}(t), \vec{u}(t)] &= \vec{0} \\ \vec{y}(t) &= \vec{G}[\vec{x}(t), \vec{u}(t)] \end{aligned}$$

Estas ecuaciones nos dicen todo sobre lo analógico y lo digital del sistema:

- Continuidad versus discontinuidad en el tiempo de las variables $\vec{x}$, $\vec{y}$, $\vec{u}$.
- Número infinito versus número finito de valores de las variables del sistema.

Es decir, lo analógico y lo digital en el tiempo y lo digital y lo analógico en el campo de existencia de las variables.

En el cuadro II se representan gráficamente los cuatro posibles tipos de variables de un sistema.

El término discreto se ha venido utilizando regularmente para designar un sistema cuyas variables toman un número finito de valores (aunque de forma continua en el tiempo, caso 2). Mientras que por sistema muestreado se entiende el que posee variables del tipo 3 ó 4.

En cuanto al término analógico se refiere al caso 1; mientras que digital a los casos 2 y 4. El tipo 3 constituye un caso aparte que podría definirse como variable continua muestreada.

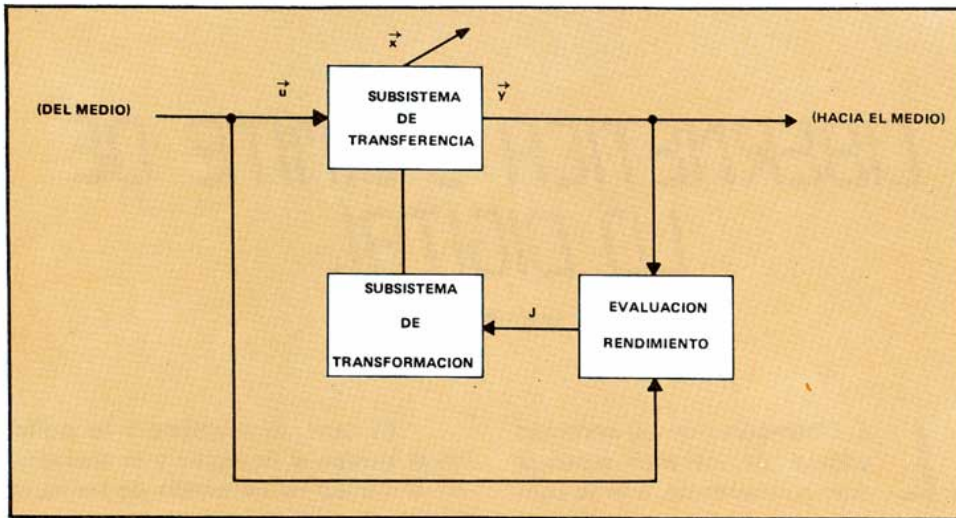
Por supuesto, en un sistema cibernético específico pueden coexistir los cuatro tipos de variables y sistemas.

DE LOS SISTEMAS MUESTREADOS A LOS SISTEMAS DIGITALES

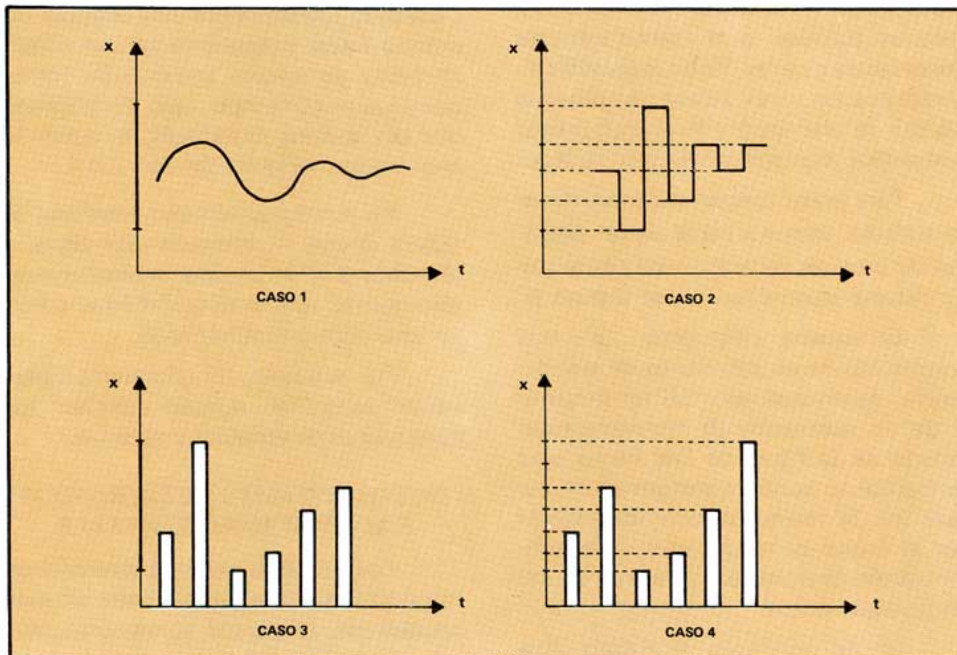
Los primeros sistemas cibernéticos (tomando esta palabra en su sentido más amplio) no analógicos aparecieron mucho antes que se desarrollara su teoría en los años 40 (2). Así, en 1793, el francés Abraham-Louis Breguet inventaba el reloj de "péndulo simpático" en donde el control de las revoluciones del reloj se realizaba por medio de la aplicación cada 12 horas de una señal impulsional. En 1897 Gouy diseña un regulador de horno en el que el procesamiento de la información es de tipo digital.

La teoría de los sistemas muestreados, tal como hoy se utiliza, se desarrolló simultáneamente durante los años 1941-46 en Gran Bretaña y Estados Unidos a partir de problemas de radar, y en la URSS, de sistemas de control.

Desde entonces y hasta finales de los años cincuenta, el estudio de los siste-



Cuadro I.— Esquema general de bloques de un sistema cibernético. El vector $\vec{u}$ representa la acción del medio y el vector $\vec{y}$ la respuesta del sistema. El vector $\vec{x}$ simboliza las variables internas. Esta representación tan abstracta sólo nos sirve para comentar lo analógico y lo digital en este sistema.



Cuadro II.— Los cuatro posibles tipos de variables de un sistema. El segmento grueso de los ejes de ordenadas de los casos 1 y 3 simboliza el que pueden tomar cualquier valor dentro de él.

mas analógicos y muestreados, al menos en lo que a la ingeniería cibernética se refiere, se llevó a cabo de forma paralela y siempre en el denominado dominio de las transformadas; la de Laplace para los continuos y la transformada en z para los muestreados.

Los motivos de que unos sistemas fuesen analógicos y otros muestreados (y no siempre discretos) se debían, hasta entonces, a su propia naturaleza. Por otra parte, los problemas matemáticos de unos y otros se hallaban más o menos resueltos.

A finales de la década de los cincuenta, y también de forma simultánea en los países anglosajones y en la Unión Soviética (un ejemplo más de Zeitgeist, de espíritu de los tiempos, por encima de credos de cualquier tipo), se comienzan a estudiar, diseñar e implementar sistemas de control y de procesamiento de la información rodeados de una cierta aurea mítica, las máquinas de aprendizaje o "inteligentes". El perceptrón de Rosenblatt, del Laboratorio de Aeronáutica de la Cornell University (actualmente expuesto en la Smithsonian Institution de

Washington como un auténtico hito en la ingeniería); las máquinas de gradiente (3) del sabio soviético Aizermann y sus colegas del Instituto de Automática y Telemecánica de Moscú; el filtro adaptativo de Widrow-Hoff; los autómatas de aprendizaje del académico Tsetlin y sus discípulos, que tanto interés han despertado etc. etc. son algunos de los ejemplos más destacados de aquellos sistemas cibernéticos.

Estas investigaciones dieron un nuevo impulso a la Cibernética y a los sistemas de control y de información, que comenzaron a implementar tareas realmente complejas con una cierta inteligencia o, si se prefiere, autoorganización y adaptación.

La herramienta que hizo posible este salto cualitativo, de sencillos sistemas compensadores a sofisticados sistemas autoorganizados, no es otra que el ordenador, la máquina digital por excelencia.

El uso de esta herramienta ha roto el equilibrio, si es que alguna vez existió, entre lo analógico y lo digital en los sistemas cibernéticos. Hablando metafóricamente lo analógico se ha reducido la mayoría de las veces a actuar de mero sensor, mientras que lo digital conforma el cerebro y el corazón del sistema. Por ejemplo, obsérvese el cuadro III que corresponde a una parte del sistema de control de la estabilidad de un hidroavión. El ordenador recibe una información digital de origen analógico, los ángulos de cabeceo y balanceo, así como la derivada del cabeceo, realizando a continuación una serie de cálculos "inteligentes", producto de lo cual son las señales que actúan sobre los elementos estabilizadores, analógicos, del hidroavión.

La utilización de procesadores digitales en los sistemas cibernéticos artificiales (4) les ha dotado de una flexibilidad y potencia inimaginables. Pero, ¿existe un límite a las "performances" de lo digital?

LO DIGITAL Y LO COMPLEJO: LA VIEJA POLEMICA SOBRE LA MECANIZACION DE LAS IDEAS

La pregunta que nos hacíamos en el último párrafo, es decir, sobre lo que puede resolver y lo que no puede resolver lo digital, la vamos a desarrollar utilizando un ejemplo ad hoc, el diseño de un brazo artificial, que nos dará ocasión a iluminar mejor las limitaciones de lo digital.

El microprocesador del brazo artificial del cuadro IV actúa como controlador central, con tareas relativamente sencillas, tales como actuar sobre un motor a partir de señales provenientes de electrodos en la extremidad amputada.

En principio sería posible diseñar un brazo artificial más inteligente si se fuese capaz de automatizar ciertos aspectos del comportamiento humano. Así, aunque todavía esté en vías de desarrollo, un grupo de investigadores de la Universidad de Purdue, en USA, han propuesto un sistema de control mediante la voz de un brazo artificial "remoto" (es decir, no implantado en el paciente), cuya estructura se recoge en el cuadro V.

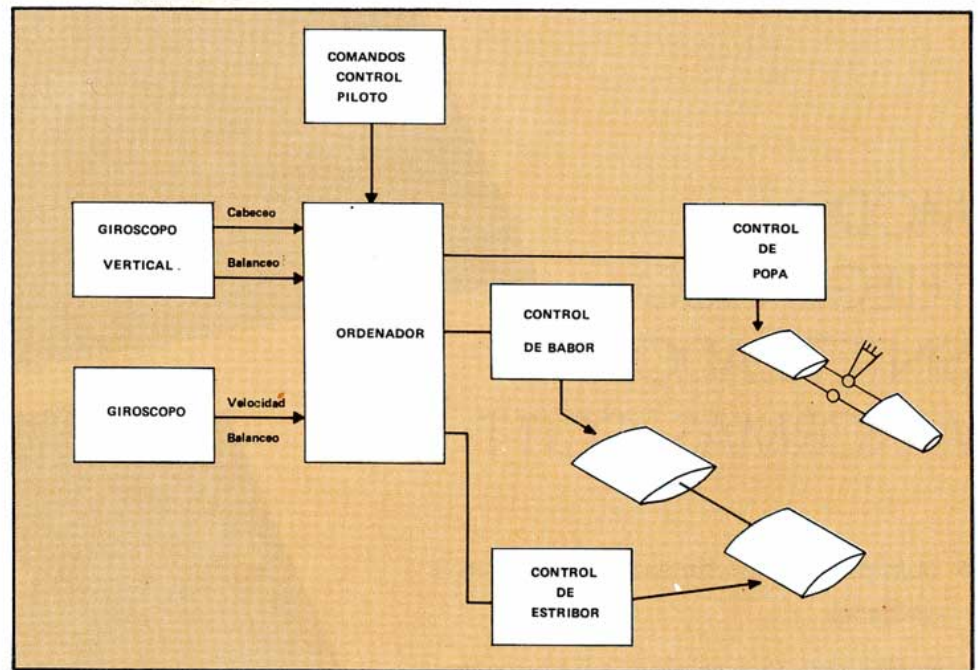
El nivel superior (el "organizador") tiene la tarea de interactuar con el paciente, es decir, entender lo que éste le pide, y asignar acciones a los niveles inferiores para llevar a cabo la orden del paciente.

Dejando de lado los difíciles problemas de análisis de la voz, más o menos resueltos o en vías de serlo, en este sistema cibernético aparece un problema todavía sin solución, la automatización de la comprensión de los lenguajes naturales. No obstante, es posible manipular automáticamente (5) un número restringido de vocablos y de reglas gramaticales. Si el paciente quiere que el brazo coja una botella de agua y lleve un vaso de agua, ambos situados en una misma mesa, no puede emplear cualquier frase, como por ejemplo: "Me gustaría, querido brazo artificial, que fueses tan amable de coger esa botella y echases parte de su contenido en el vaso situado a su derecha, sin que desparrames agua fuera de él".

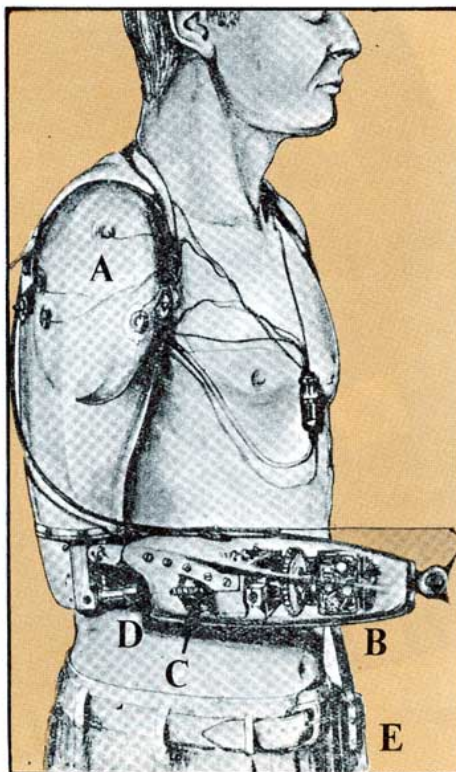
La dificultad para que un programa almacenado en el ordenador encargado de implementar el sistema de control pudiese interpretar esta orden tan educada estriba no en la naturaleza continua de algunas variables (como por ejemplo la altura del agua sobre el fondo del vaso), problema que puede solucionarse fácilmente, sino en la existencia de conceptos y relaciones difíciles de implementar mediante instrucciones de ordenador.

Esta disquisición viene a cuento de la siguiente pregunta, ¿es posible realizar con la máquina digital más potente cualquier cosa? Que es la pregunta sobre las limitaciones de lo digital.

Posiblemente sea ésta una de las preguntas filosóficas más importantes que se puedan plantear. Es la vieja discu-



Cuadro III.— Fotografía y diagrama de bloques de un parte del sistema de control de un hidroavión.



Cuadro IV.— Descripción del "brazo de Boston". Las señales EMG(A) son procesadas por un microprocesador (B) que compara el esfuerzo muscular y la carga en el dispositivo terminal a fin de controlar el motor (C) que actúa sobre el antebrazo. El movimiento del antebrazo se realiza cambiando la longitud del dispositivo (D). La batería (E) alimenta el motor.

sión en torno al razonamiento automático, las máquinas pensantes, la inteligencia artificial...

Si la respuesta fuese afirmativa, podría dejar de existir lo analógico. O si persistiese, lo haría por motivos de efectividad.

Pero volviendo al terreno de la realidad de hoy... todavía lo digital tiene mucho que avanzar en los sistemas cibernéticos.

Existe otra limitación a lo digital, esta vez física y no debida a la ignorancia de los seres humanos. Nos estamos refiriendo a la velocidad de procesamiento de la información digital (6).

Por último pudiera pensarse que lo digital se ha desarrollado con mucha mayor rapidez y profundidad que lo analógico exclusivamente por el factor complejidad. Pero no es éste el único factor. Otras ventajas de lo digital sobre lo analógico serían:

- Mayor exactitud. Aunque parezca una paradoja, la cuantificación de variables continuas produce menos errores que la manipulación directa de las magnitudes continuas.
- Menos influencia del ruido y de las perturbaciones.
- Menor coste.
- Sistemas más compactos y ligeros.
- Mayor sensibilidad.

— Mayor flexibilidad y capacidad de sustitución.

De forma que en los sistemas cibernéticos lo digital ha ido desplazando a lo analógico principalmente por su mayor capacidad de implementar lo complejo y, en segundo término, por los anteriores factores. ■

(1) Si no se llega a relaciones matemáticas es imposible discutir nada acerca de lo analógico y lo digital.

(2) Prácticamente todos los sistemas cibernéticos primitivos eran analógicos.

(3) Un problema importante que aparece en los sistemas cibernéticos es la obtención del máximo o del mínimo de una cierta funcional. Bajo determinadas hipótesis un método muy utilizado es el del gradiente, consistente en "subir" o "bajar" por la superficie definida por la funcional proporcionalmente a su gradiente.

(4) Este artículo sólo trata de sistemas artificiales o a lo sumo en los que la acción del hombre es puramente mecánica. Tema aparte es la influencia de las máquinas digitales en sistemas donde el hombre tiene un comportamiento "inteligente".

(5) Manipulación automática quiere decir ordenador; esto es, máquina digital de programa almacenado.

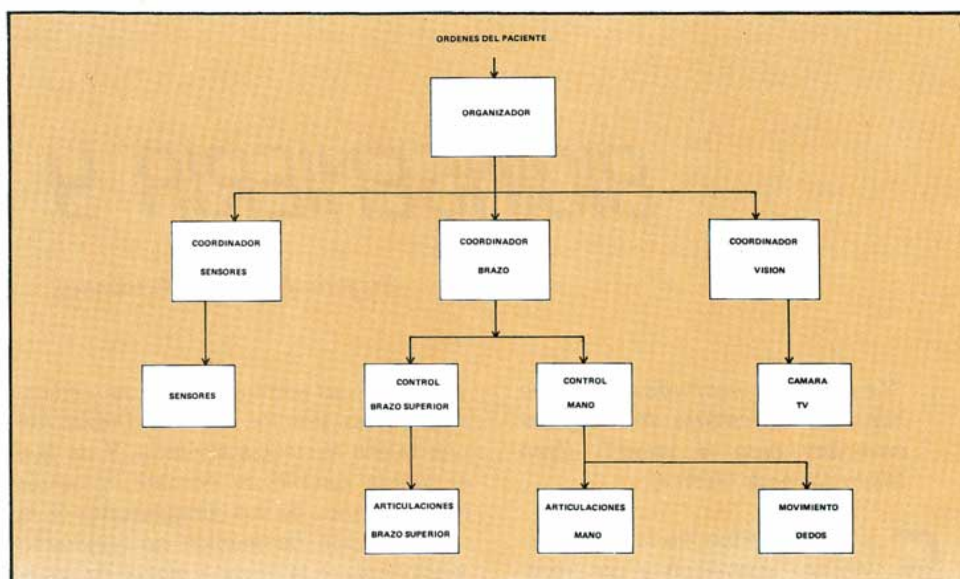
(6) Hemos dado por supuesto que al hablar de sistemas digitales a lo largo del artículo nos estábamos refiriendo a sistemas electrónicos. Se especula con la sustitución de la electrónica por la óptica, sustitución que hoy se limita a aspectos parciales de transmisión y procesamiento de la información. Es posible que algún día se construyan ordenadores ópticos; es decir, procesadores digitales con una velocidad muy superior a la de los actuales.

LECTURAS ADICIONALES

Sobre los sistemas cibernéticos y de control existe una bibliografía inmensa. Nos contentamos con citar algunas pocas referencias de especial interés o accesibilidad.

M.A. ARBIE (1972). *The Metaphorical Brain*. John Wiley & Sons, New York. Una excelente introducción, de nivel medio-avanzado, a la Cibernética, en particular a los aspectos comunes entre la teoría de autómatas, la inteligencia artificial y la denominada teoría del cerebro.

W.R. ASHBY (1956). *An Introduction to Cybernetics*. Chapman and Hall, London (Existe traducción al Castellano: Introducción a la Cibernética, Ed. Nueva Visión, Buenos Aires).



Cuadro V.— Esquema de bloques del sistema jerárquico de control del brazo artificial de la Purdue University.

res, 1977). Un clásico de la Cibernética que aún hoy se lee con cierto provecho.

J.J. D' AZZO, C.R. HOUPIS (1970). *Sistemas Realimentados de Control*. Ed. Paraninfo, Madrid. Abarca exhaustivamente los métodos temporales y de transformadas, incluyendo el estudio de sistemas muestreados mediante la transformada z.

De los mismos autores, una versión moderna no traducida del año 1981 y que recoge el enfoque de variables de estado es *Linear Control Systems Design: Conventional and Modern*. McGraw-Hill, New York.

G.F. FRANKLIN, J.D. POWELL (1980). *Digital Control of Dynamic Systems*. Addison Wesley, Reading, Ma. Orientado a la teoría de control moderno, es recomendable por su carácter didáctico, así como por el excelente tratamiento del importante tema de la estimación.

R.J. JARVIS (1975). "Optimization Strategies in Adaptive Control: A. Selective Survey". *IEEE Trans SMC*, Jan, pp. 83-94. Brillante exposición de algunas de las técnicas actuales en ingeniería de control adaptativo.

W.J. KICKERT et al. (1978). "Some Comments on Cybernetics and Control". *IEEE Trans. SMC*, Nov., pp. 80-809. Un artículo en el que se comenta la escasa atención que han recibido entre los ingenieros de control algunas de las ideas de la teoría de la información.

K.S. NARENDRA, M.A.L. THATHACHAR (1974). "Learning Automata - A Survey". *IEEE Trans. SMC*, July, pp. 323-334. Recopilación de resultados hasta el año de su publicación, con una bibliografía exhaustiva, de una de las ramas de control adaptativo que más interés ha despertado.

A. NETUSHIL (1978) *Theory of Automatic Control*. Mir Publishers, Moscú. Bien equilibrado, entre el rigor matemático propio de las publicaciones soviéticas y el pragmatismo anglosajón.

N.J. NILSSON (1965). *Learning Machines*. McGraw-Hill, New York. El perceptron está abandonado como máquina reconocedora de caracteres, pero ha inspirado aplicaciones prácticas de gran eficacia, especialmente en el área del filtrado adaptativo.

K. OGATA (1970). *Modern Control Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. (Traducido por Prentice-Hall: Ingeniería Moderna de Control, Madrid 1980, 7ª impresión). Una de las mejores introducciones a lo que se ha venido a denominar ingeniería "moderna" de control, en contraposición a la clásica (basada en los métodos de las transformadas).

G.N. SARIDIS (1979). "Toward the Realization of Intelligent Control". *Proceedings of the IEEE*, August, pp. 1115-1133. Aunque parcialmente especulativo, es un buen análisis de las ideas subyacentes al denominado control inteligente, a caballo entre el control automático y la inteligencia artificial.

S.M. SHINNERS (1978). *Modern Control System Theory and Application*. Addison Wesley Reading, Ma. Obra de donde se han reproducido las figuras de los cuadros III y IV.

M.G. SINGH, A. TITLI (1978). *Systems: Decomposition, Optimisation and Control*. Pergamon Press, Oxford. Dos de los autores más destacados en sistemas jerárquicos de control recogen en un libro avanzado de texto algunos de los principales resultados en su campo.

N. WIENER (1948). *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Hermann, Paris. La célebre obra de Wiener en la que se introduce por vez primera el término Cibernética en su acepción actual.

L. ZADEH (1965). "Fuzzy Sets". *Inform. Control*, June, pp. 318-353. Pocas ideas han captado tanta atención en las ciencias de la computación (en su sentido más amplio) como las de Zadeh sobre sistemas borrosos. Este es el artículo pionero de Zadeh. ■