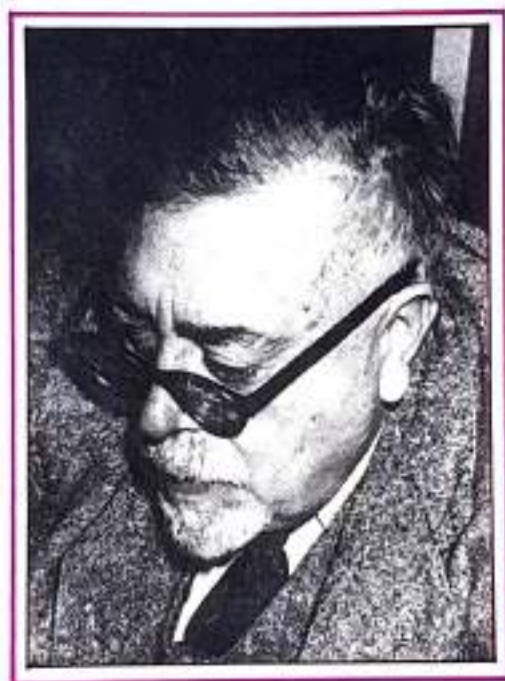


CIBERNÉTICA

o El control y comunicación
en animales y máquinas

Norbert Wiener



METATEMAS 8

LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA

Introducción

Este libro es el resultado, tras más de una década de trabajos, de un programa realizado conjuntamente con el Dr. Rosenblueth, miembro, en aquel entonces, de la Harvard Medical School y actualmente del Instituto Nacional de Cardiología de México. En aquellas fechas, el Dr. Rosenblueth, que era colaborador y colega del difunto Dr. Walter B. Cannon, dirigía unas reuniones mensuales sobre metodología científica. La mayoría de los participantes eran jóvenes científicos de la Harvard Medical School y solíamos reunirnos para almorzar en una mesa redonda del Vanderbilt Hall. Eran unas charlas animadas y desenfadadas, y el lugar no propiciaba ni posibilitaba en absoluto el lucimiento personal. Tras el almuerzo, uno de los comensales —de nuestro grupo o un invitado— leía un trabajo científico, generalmente alguno cuya primera consideración, o al menos una de las consideraciones principales, fuera los problemas de metodología. El orador tenía que aceptar el guantelete de una aguda crítica, bien intencionada pero implacable. Era una catarsis perfecta para las ideas poco maduras, la autocrítica insuficiente, la propia confianza exagerada y la pomposidad. Los que no aguantaban la prueba no volvían, pero entre los asiduos a aquellas reuniones, entre los cuales me cuento, más de uno siguió pensando que fueron un factor formativo de gran importancia en nuestro desarrollo científico.

No todos los participantes procedían del campo de la física o de la medicina. Uno de nosotros, miembro muy asiduo y de gran utilidad en nuestras discusiones, era el Dr. Manuel Sandoval Vallarta, mexicano como el Dr. Rosenblueth, profesor de física en el Massachusetts Institute of Technology, y uno de mis primeros discípulos cuando me incorporé al Instituto después de la primera guerra mundial. El Dr. Vallarta solía traer a algunos de sus colegas del M.I.T. a aquellas reuniones y, en una de ellas, conocí

al Dr. Rosenblueth. Hacía tiempo ya que yo me interesaba por el método científico y había participado en el seminario de Josiah Royce en Harvard sobre el tema, celebrado en 1911-1913. Considerábamos, por otra parte, que era fundamental contar con la presencia de alguien capaz de examinar críticamente los temas matemáticos. De este modo me convertí en miembro activo del grupo hasta que en 1944 el Dr. Rosenblueth fue llamado a México y el trastorno general de la guerra puso fin a las reuniones.

Durante muchos años habíamos compartido el Dr. Rosenblueth y yo la convicción de que los campos más fructíferos para el desarrollo de las ciencias eran aquellos que habían quedado desatendidos como tierra de nadie entre las distintas especialidades establecidas. Desde tiempos de Leibniz no ha existido probablemente nadie con semejante dominio sobre la actividad intelectual de una época. Desde entonces la competencia científica se ha ido restringiendo cada vez más a los especialistas, circunscritos a unos campos con progresiva tendencia a estrecharse. Hace un siglo no había un Leibniz, pero había un Gauss, un Faraday y un Darwin. Actualmente pueden contarse con los dedos de la mano los científicos que no sean exclusivamente matemáticos, físicos o biólogos. Puede haber topólogos, acústicos o coleopteristas que dominen la jerga de su especialidad y conozcan toda la literatura de su especialidad y sus ramificaciones, pero la mayoría de las veces considerarán cualquier otra disciplina como algo propio de un colega con despacho tres puertas más allá en el pasillo, y creerán que cualquier interés por su parte hacia el tema es una injustificable violación de una exclusiva.

Estos campos de especialización aumentan sin cesar invadiendo nuevas áreas. La panorámica recuerda la situación que se produjo en Oregón al invadirlo simultáneamente colonos estadounidenses, ingleses, mexicanos y rusos: una increíble maraña de exploraciones, toponimia y leyes. Como veremos en esta obra, hay campos de actividad científica que han sido explorados desde los distintos ángulos de las matemáticas puras, la estadística, la ingeniería eléctrica y la neurofisiología, y en los que, según el enfoque, un mismo concepto tiene distinta terminología, con lo cual se ha triplicado o cuádruplicado una importante cantidad de trabajo, mientras necesariamente se demoraba otro trabajo importante en determinado campo a falta de resultados que en otra especialidad estaban superados.

Estas regiones limítrofes de la ciencia son las que ofrecen ma-

yores posibilidades al investigador cualificado, siendo al mismo tiempo las más refractarias a las técnicas establecidas de abordaje masivo y división del trabajo. Si la dificultad de un problema fisiológico es esencialmente matemática, los fisiólogos que no sepan matemáticas no lograrán superar esta limitación propia del fisiólogo ignorante de matemáticas. Si un fisiólogo que no sabe matemáticas trabaja con un matemático que no sabe fisiología, uno de los dos será incapaz de expresar el problema en términos comprensibles para el otro, y éste a su vez no le podrá dar una respuesta comprensible. El Dr. Rosenblueth insistía siempre en que la correcta exploración de esas zonas vírgenes del mapa científico sólo podría llevarla a cabo un equipo de científicos, especialista cada uno de ellos en su propio campo, pero con conocimientos profundos y experiencia práctica en las especialidades de sus colegas, además de ser individuos habituados al trabajo en equipo y conocedores de las costumbres intelectuales de sus colegas al punto de ser capaces de reconocer la importancia de una sugerencia, aun antes de que ésta haya sido formulada formalmente. No es una condición necesaria del matemático saber realizar un experimento fisiológico, pero debe poseer la capacidad para entenderlo, criticarlo o sugerir otro. El fisiólogo no necesita saber demostrar un determinado teorema matemático, pero debe estar a la altura de entender su importancia fisiológica, para señalar al matemático qué es lo que debe buscar. Durante años hemos soñado con una institución de científicos independientes que trabajasen en equipo en una de esas áreas científicas, no como subalternos de un ejecutivo, sino voluntariamente incorporados, por necesidad espiritual, y que entiendan ese campo de trabajo como algo unitario en donde se comparte la capacidad de conocimientos.

Ya nos habíamos puesto de acuerdo sobre estos puntos mucho antes de elegir el campo de nuestras investigaciones conjuntas y nuestras respectivas tareas en las mismas. Por mi parte, hacía mucho tiempo que sabía que, en la eventualidad de una emergencia nacional, mi puesto estaría fundamentalmente determinado por dos factores: mi estrecho contacto con el programa de máquinas computadoras desarrolladas por el Dr. Vannevar Bush, y mi propio trabajo conjunto con el Dr. Yuk Wing Lee sobre diseño de redes eléctricas. Ambos dieron importantes resultados, y, en el verano de 1940, dediqué gran parte de mi tiempo al desarrollo de máquinas computadoras para la solución

de ecuaciones diferenciales parciales. Hacía tiempo ya que me interesaba por esta clase de aparatos y estaba convencido de que el principal problema, a diferencia del caso de las ecuaciones diferenciales ordinarias, tan bien tratadas por el Dr. Bush en su analizador diferencial, era el de la representación de funciones de más de una variable. Me constaba igualmente que el proceso de barrido, similar al que se emplea en televisión, era la solución idónea y que, en realidad, la televisión estaba llamada a ser más útil en ingeniería por estas innovaciones tecnológicas que como industria independiente.

Estaba claro que cualquier proceso de barrido incrementaría enormemente el número de datos disponibles, en comparación con el número de datos con que se cuenta en un problema de ecuaciones diferenciales ordinarias. Por lo tanto, para lograr resultados razonables en un tiempo razonable, era necesario aumentar al máximo la velocidad de los procesos elementales, evitando la interrupción del flujo de los mismos por efecto de operaciones de naturaleza más lenta. Era igualmente necesario realizar los procesos individuales con tal grado de exactitud que la enorme repetición de los procesos elementales no produjera un error acumulativo tan grande que encharcara la exactitud. Con arreglo a esto sugerimos los siguientes requisitos:

1. Que el aparato central de adición y multiplicación de la computadora fuera numérico, como en las máquinas corrientes de sumar, en vez de basarse en una medición, como en el analizador diferencial de Bush.

2. Que la regulación de sus mecanismos, que son fundamentalmente dispositivos conectores, se hiciera por medio de tubos electrónicos en vez de engranajes o relés mecánicos, para asegurar una acción más rápida.

3. Que, con arreglo a la política adoptada en algunos aparatos de los laboratorios de la Bell Telephone, sería probablemente más económico un aparato que adoptase la escala dos, por adición y multiplicación, en lugar de la escala diez.

4. Que toda la secuencia de operaciones la compusiera la propia máquina sin que hubiera intervención humana desde la entrada de datos hasta la obtención de los resultados finales, y que todas las decisiones lógicas necesarias para ello las desarrollara la propia máquina.

5. Que la máquina llevara incorporado un aparato para el

almacenamiento de datos, que los registrara con rapidez, los mantuviera seguros hasta su cancelación, los leyera deprisa y estuviera inmediatamente listo para almacenar nuevo material.

Estas recomendaciones, junto con las sugerencias indicativas de los medios para llevarlas a cabo, se le enviaron al Dr. Vannevar Bush para su posible utilización bélica. En aquella fase de preparación armamentística no parecieron dignas de la suficiente alta prioridad para empezar a trabajar sobre ellas. No obstante, formaban un conjunto de ideas que luego se han aplicado a la computadora moderna ultrarrápida. Coincidían mucho aquellos conceptos con el espíritu de la época, y ni por un instante se me ocurre atribuirme la responsabilidad personal de su introducción, pero han resultado útiles y espero que mi comunicado sirviera para popularizarlos entre los ingenieros. En cualquier caso, como veremos en el cuerpo del texto, todos ellos son ideas interesantes en relación con el estudio del sistema nervioso.

Así pues, el trabajo estaba expuesto y aunque no cayera en el vacío, no culminó en un proyecto inmediato entre el Dr. Rosenblueth y yo. Nuestra colaboración efectiva se produjo en otro proyecto que también se realizó por condicionantes intrínsecas a la última guerra. Al estallar el conflicto, el prestigio de la aviación alemana y el papel defensivo de la inglesa se tradujo en la atención de muchos científicos por el perfeccionamiento de la artillería antiaérea. Antes ya de la ruptura de hostilidades se había evidenciado que, debido a la rapidez del avión, todos los métodos clásicos de dirección de tiro quedaban anticuados, y era necesario incorporar al aparato de control todas las computaciones necesarias. Estas resultaban mucho más difíciles por el hecho de que, a diferencia de todos los blancos previamente conocidos, un avión lleva una velocidad que forma parte muy apreciable de la del misil que se utiliza para derribarlo. En consecuencia, es de suma importancia disparar el misil, no contra el blanco, sino de modo que misil y blanco coincidan en un determinado momento futuro en el espacio. Para ello había que encontrar un método para predecir la posición futura del avión.

El método más sencillo consiste en extrapolar el itinerario actual del avión sobre una línea recta. Es el más recomendable. Cuantos más cambios de itinerario y curvas efectúe un avión en vuelo, menos efectiva es su velocidad, menos tiempo tiene para cumplir su misión y más tiempo permanece en una zona peli-

grosa. En igualdad de otros parámetros, un avión sigue un itinerario de vuelo lo más recto posible. Sin embargo, al estallar el primer proyectil los otros parámetros *no* son iguales, y el piloto probablemente zigzagueará, hará una pirueta o intentará cualquier otra clase de acción evasiva.

Si el piloto dispusiera totalmente a voluntad de esa acción y utilizara inteligentemente las posibilidades previsibles como un buen jugador de póquer, por ejemplo, tiene tantas oportunidades de modificar la posición prevista antes de que se produzca el impacto que no podrían considerarse muy buenas las posibilidades de alcanzarle, salvo quizás en el caso de un fuego de barrera muy nutrido. Pero el piloto no tiene libertad completa de maniobra a su antojo. Para empezar, se encuentra en un avión que circula a gran velocidad y cualquier desviación de itinerario excesivamente brusca produce una aceleración que le hace perder el sentido, con el consiguiente riesgo de desintegración del aparato. Además sólo puede controlar el avión maniobrando con las superficies de sustentación, y el nuevo régimen de flujo que se establece tarda unos instantes en desarrollarse. Incluso cuando está plenamente desarrollado, lo único que cambia es la aceleración del avión, y este cambio de aceleración debe convertirse primero en cambio de velocidad y luego en cambio de posición para alcanzar su efectividad final. Además, un aviador sujeto al agobio del combate es difícil que esté en condiciones de llevar a cabo sin ninguna rémora un comportamiento voluntario muy complicado, por lo que es muy probable que efectúe el patrón de acción con que se ha entrenado.

Todo esto hizo que se considerase útil una investigación sobre el problema de la predicción curvilínea del vuelo, independientemente de que sus resultados fueran positivos o negativos para el uso en la práctica de aparatos de control que incorporaran dicha predicción curvilínea. Predecir el futuro de una curva equivale a efectuar cierta operación en el pasado. El auténtico operador de predicción no puede obtenerse con ningún aparato construible, pero hay ciertos operadores que se le asemejan y que son realizables con aparatos que pueden construirse. Sugerí al profesor Samuel Caldwell del Massachusetts Institute of Technology que valía la pena probar tales operadores, y él me animó inmediatamente a que los probásemos en el analizador diferencial del Dr. Bush, utilizando un modelo preparado del aparato de control de tiro en cuestión. Lo hicimos y obtuvimos unos resultados que

discutiremos en el cuerpo del texto. En cualquier caso, me encontré participando en un proyecto bélico, en el cual Julian H. Bigelow y yo compartíamos la investigación de la teoría de la predicción e interveníamos en la construcción de aparatos cuyo funcionamiento incorporase dicha teoría.

Así, por segunda vez, me veía envuelto en el estudio de un sistema mecánico-eléctrico diseñado para suplantar una función específicamente humana: en el primer caso la ejecución de un complicado patrón de computación, y en el segundo la predicción del futuro. En este segundo caso no eludiremos la discusión sobre el proceso de funcionamiento de ciertos actos humanos. Efectivamente, en ciertos aparatos de control de tiro el impulso original para apuntar llega por radar, pero en el caso más general hay un apuntador humano o un artillero, o ambos, acoplados al sistema de control de tiro, que actúan como parte esencial del mismo. Es fundamental conocer sus características, para incorporarlas matemáticamente a las máquinas que controlan. Además, su blanco, el avión, también lo controla un ser humano y conviene conocer sus características de actuación.

Bigelow y yo llegamos a la conclusión de que un factor sumamente importante en la actividad voluntaria es lo que los ingenieros de control denominan *feedback* (retroalimentación). En los capítulos correspondientes trataremos de él con gran detalle. Baste con decir por ahora que, cuando deseamos que un movimiento siga un patrón determinado, la diferencia entre este patrón y el movimiento realmente efectuado se utiliza como nuevo impulso para que la parte regulada se mueva de tal modo que su movimiento se aproxime más al previsto por el patrón. Por ejemplo, una modalidad de motor direccional náutico lleva la lectura de la rueda del timón a un dispositivo que a partir de la barra regula las válvulas del motor direccional de una manera susceptible de desconectarlas. De este modo la barra gira actuando sobre el otro conjunto regulador de válvulas situado en medio del barco y así registra la posición angular de la rueda como posición angular de la barra. Cualquier fricción u otra fuerza contraria que interrumpa el movimiento de la barra aumenta la admisión de vapor en las válvulas de un lado y la disminuye en el otro, de tal manera que incrementa el esfuerzo de rotación para que la barra se enderece en la posición necesaria. De este modo el sistema *feedback* tiende a convertir la actuación de la maquinaria de dirección en relativamente independiente de la carga.

Por el contrario, en determinadas condiciones de retraso, etc., una retroalimentación demasiado brusca impulsaría excesivamente el timón e iría seguida de una retroalimentación en sentido contrario, lo cual desvía aun más el timón hasta que el mecanismo direccional acusa una oscilación incontrolable o *hunting* y se descompone o avería. En el libro de McColl¹ está descrito con todo detalle este mecanismo de retroalimentación, las condiciones en que es útil y las circunstancias en que se descompone. Es un fenómeno bien conocido desde el punto de vista cuantitativo.

Supongamos que cojo un lápiz de plomo; para ello necesito mover determinados músculos. Ahora bien, ninguno de nosotros, salvo algunos anatomistas expertos, conocemos esos músculos e incluso entre los anatomistas hay pocos —si los hay— capaces de realizar la acción de modo totalmente voluntario contrayendo sucesivamente cada uno de los músculos necesarios. Sin embargo, aunque deseamos *coger el lápiz* una vez decidido, nuestro movimiento se efectúa de tal modo que podemos decir en términos generales que, mientras nos acercamos al lápiz, disminuye progresivamente el movimiento. Esta parte de la acción no es totalmente consciente.

Para realizar una acción de este tipo debe existir un registro cuantitativo en el sistema nervioso, consciente o inconsciente, del espacio que a cada instante nos falta para coger el lápiz. Si miramos el lápiz, esa relación es visual, al menos en parte, pero en términos más generales es cinestésica o, para utilizar un término de moda, propioceptiva. Si no hay sensaciones propioceptivas y no las sustituimos por visuales o de otra índole, no podemos realizar el acto de coger el lápiz y nos encontramos en un estado denominado *ataxia*. Una ataxia de este tipo es corriente en la modalidad de sífilis del sistema nervioso central denominada *tapes dorsalis*, en la que la sensación cinestésica transmitida por los nervios raquídeos se halla más o menos destruida.

Sin embargo, un *feedback* excesivo puede ser un inconveniente tan grave para la actividad organizada como una retroalimentación insuficiente. En vista de ello, Bigelow y yo planteamos al Dr. Rosenblueth una cuestión concreta. ¿Existe una afección en la que el paciente, al intentar realizar un acto voluntario,

1. McColl, L.A., *Fundamental Theory of Servomechanisms*, Van Nostrand, Nueva York, 1946.

como el de coger un lápiz, rebase el objetivo e incurra en una oscilación incontrolada? El Dr. Rosenblueth nos contestó inmediatamente que existía una afección muy conocida llamada temblor volicional, generalmente asociada a lesión en el cerebelo.

De este modo contábamos con una importante confirmación a nuestra hipótesis respecto a la naturaleza de, al menos, cierta actividad voluntaria. Es de señalar que nuestro punto de vista trascendía notablemente el imperante entre los neurofisiólogos. El sistema nervioso central dejaba de ser un órgano autorregulable que recibe impulsos de los sentidos y los descarga en los músculos. Por el contrario, algunas de sus actividades más características se explican sólo como procesos circulares que se originan en el sistema nervioso y van a parar a los músculos, volviendo a entrar en el sistema nervioso a través de los órganos sensoriales, independientemente de que sean propioceptores o especializados. Nos pareció que esto marcaba un hito en el estudio del campo de la neurofisiología que trata no sólo de los procesos elementales de los nervios y las sinapsis, sino también de la actividad del sistema nervioso como conjunto integrado.

Los tres opinábamos que el descubrimiento merecía un trabajo, por lo que nos pusimos a redactarlo y lo publicamos². El Dr. Rosenblueth y yo consideramos que aquel trabajo sólo podía servir de base a un programa de un amplio cuerpo de investigaciones experimentales, y decidimos que, si alguna vez lográbamos llevarlas a cabo en una institución intercientífica, el tema constituiría un núcleo casi ideal para nuestra actividad.

A nivel de la ingeniería de comunicación nos parecía (a Mr. Bigelow y a mí) evidente que los problemas de ingeniería de control y de ingeniería de comunicación eran inseparables y se centaban no en torno a la técnica de la ingeniería eléctrica, sino en torno al concepto mucho más fundamental de mensaje, ya fuera transmitido por medios eléctricos, mecánicos o nerviosos. El mensaje es una secuencia discreta o continua de episodios mensurables distribuidos en el tiempo, lo que en estadística se denomina series temporales. La predicción del futuro de un mensaje la realiza cierta clase de operador sobre el pasado, independientemente de que dicho operador lo integre un esquema de

2. Rosenblueth, A., N. Wiener y J. Bigelow, «Behavior, Purpose and Teleology», *Philosophy of Science*, 10, 18-24 (1943).

computación matemática o un aparato mecánico o eléctrico. En este sentido descubrimos que los mecanismos ideales de predicción que en principio habíamos considerado, estaban sujetos a dos tipos de error de naturaleza casi antagónica. Aunque el aparato de predicción que habíamos diseñado era capaz de anticipar una curva muy suave hasta cualquier grado deseado de aproximación, sólo lo lograba a costa de un incremento de sensibilidad. Cuanto más preciso era el aparato en la predicción de ondas suaves, mayores oscilaciones sufría a poco que se apartara de la suavidad y más tiempo tardaba en disiparse la oscilación. Por ello la buena predicción de una onda suave requería un aparato más delicado y sensible que la mejor predicción posible de una curva acentuada, y la elección del aparato concreto a utilizar en casos específicos dependía de la naturaleza estadística del fenómeno a predecir. Estos dos tipos de error en interacción parecían presentar algo en común con los problemas opuestos a la medición de posición y el momento expuestos en la mecánica cuántica de Heisenberg, descrita con arreglo a su principio de incertidumbre.

Cuando comprendimos claramente que la solución del problema de la predicción óptima sólo la obtendríamos recurriendo a las estadísticas de las series temporales predecibles, no nos fue difícil convertir lo que en principio parecía una dificultad de la teoría de predicción en lo que en realidad era una eficaz herramienta para resolver el problema de dicha predicción. Adoptando las estadísticas de una serie temporal podíamos derivar una expresión explícita del error cuadrático medio de predicción mediante una técnica determinada y para una dirección determinada. Una vez conseguido, podíamos trasladar el problema de la predicción óptima a la determinación de un operador específico que redujera al mínimo una cantidad positiva específica dependiente de dicho operador. Los problemas de minimización de esta clase pertenecen a una rama concreta de las matemáticas —el cálculo de variaciones—, una rama con su propia técnica. Con su ayuda pudimos obtener y enunciar la mejor solución del problema de la predicción del futuro de una serie temporal, dada su naturaleza estadística y, lo que es más, obtener una encarnación física de la solución construyendo un aparato.

Una vez hecho esto, al menos un problema de ingeniería cobraba nueva perspectiva. En general, el diseño en ingeniería se ha considerado más un arte que una ciencia. Al reducir un problema de esta clase a un principio de minimización, habíamos

sentado el tema sobre una base mucho más científica. Nos dábamos cuenta de que no se trataba de un caso aislado y de que existía todo un sector de la ingeniería en el que podrían resolverse similares problemas de diseño con el método del cálculo de variaciones.

Con ese mismo método abordamos y resolvimos otros problemas similares, entre ellos el del diseño de filtros de onda. Muchas veces obteníamos un mensaje contaminado por interferencias extrañas que denominábamos *ruido de fondo*. En tales casos, el problema consistía en restablecer el mensaje original, o el mensaje en determinada dirección, por medio de un operador aplicado al mensaje adulterado. El diseño óptimo de tal operador y del aparato que hace su función, depende de la naturaleza estadística del mensaje y del ruido, por separado y juntos. De este modo hemos sustituido en el diseño de filtros de ondas procesos que antes eran de naturaleza empírica y más bien aleatoria, por procesos con justificación totalmente científica.

Al hacerlo, hemos convertido el diseño en ingeniería de comunicación en una ciencia estadística, una rama de la mecánica estadística. El concepto de mecánica estadística lleva más de un siglo rebasando los límites de todas las ramas de la ciencia. Veremos cómo este predominio de la mecánica estadística en la física moderna es de importancia vital en la interpretación de la naturaleza del tiempo. Sin embargo, en el caso de la ingeniería de comunicación, la importancia del elemento estadístico se evidencia rápidamente. La transmisión de información es imposible salvo en forma de transmisión de alternativas. Si sólo hay una contingencia a transmitir, el método más eficaz y el menos problemático es no enviar ningún mensaje. El telégrafo y el teléfono cumplen su cometido únicamente si los mensajes que transmiten varían continuamente de un modo no totalmente determinado por su pasado, y pueden diseñarse eficazmente sólo si la variación de tales mensajes se amolda a cierta clase de regularidad estadística.

Para cubrir esta faceta de la ingeniería de comunicación tuvimos que desarrollar una teoría estadística sobre la *cantidad de información*, en la que la cantidad unitaria de información era la transmitida a modo de decisión simple entre alternativas igualmente probables. Esta idea se les ocurrió casi simultáneamente a varios autores, entre ellos al estadístico R.A. Fisher, al Dr. Shannon de los laboratorios de Bell Telephone y al autor. La

motivación de Fisher en el estudio del tema fue la teoría estadística clásica; la de Shannon fue el problema de la codificación de la información, y la del autor el problema del ruido y el mensaje en los filtros eléctricos. Señalemos entre paréntesis que algunas de mis especulaciones a este respecto se relacionan con los trabajos anteriores de Kolmogoroff³ en Rusia, si bien mi trabajo estaba notablemente avanzado antes de que llamaran mi atención los trabajos de la escuela rusa.

El concepto de cantidad de información se vincula de modo totalmente natural a un concepto clásico de la mecánica estadística: el de *entropía*. Del mismo modo que la cantidad de información en un sistema es la medida de su grado de organización, la entropía de un sistema es la medida de su grado de desorganización, y una no es más que lo opuesto de la otra. Este punto de vista nos lleva a diversas consideraciones relativas a la segunda ley de la termodinámica y al estudio de la posibilidad de los denominados diablos de Maxwell. Estas cuestiones se producen de forma independiente en el estudio de las enzimas y otros catalizadores, y su estudio es esencial para entender bien fenómenos tan fundamentales de la materia viva como el metabolismo y la reproducción. El tercer fenómeno fundamental de la vida, el de la irritabilidad, pertenece al ámbito de la teoría de la comunicación y entra en el grupo de ideas que acabamos de tratar⁴.

De este modo, hace cuatro años, el grupo científico que formábamos el Dr. Rosenblueth y yo, era consciente de la unidad esencial del conjunto de problemas que constituían la médula de la comunicación, el control y la mecánica estadística, fuera en la máquina o en tejido vivo. Por otra parte, entorpecía enormemente nuestra labor la falta de unidad de la literatura relativa a estos problemas y la ausencia de una terminología común, e incluso la ausencia de un nombre para este campo concreto de investigaciones. Tras prolongadas consideraciones, llegamos a la conclusión de que la terminología existente era un condicionante de peso, en un sentido u otro, para la utilidad del futuro desarrollo de la especialidad y, como sucede con frecuencia a los científicos, nos vimos obligados a acuñar cuando menos un neolo-

3. Kolmogoroff, A.N., «Interpolation und Extrapolation von stationären Zufälligen Folgen», «Bull. Acad. Sci. U.S.S.R.», Ser. Math. 5, 3-14 (1941).

4. Schrödinger, Erwin, *¿Qué es la vida?*, Serie Metatemas 1, Tusquets Editores, Barcelona, 1983.

gismo griego para llenar la laguna, y, así, decidimos denominar al campo de la teoría del control y la comunicación en máquinas y animales, *cibernética*, vocablo formado a partir del término griego κυβερνήτης o timonel. Quisimos, al elegir esta palabra, reconocer que el primer trabajo importante relativo a los servomecanismos es un artículo sobre *governalles* publicado por Clerk Maxwell en 1868⁵, y que *governalle* se deriva de una corrupción latina de κυβερνήτης. También quisimos tener en cuenta el hecho de que los dispositivos de dirección de un barco son una de las primeras y mejor desarrolladas modalidades de servomecanismo.

Aunque el término *cibernética* data tan sólo del verano de 1947, lo emplearemos para referirnos a fechas anteriores en el desarrollo de este campo. Aproximadamente desde 1942 la evolución del tema siguió distintas direcciones. En primer lugar, las ideas del trabajo conjunto de Bigelow, Rosenblueth y Wiener fueron divulgadas por el Dr. Rosenblueth en una reunión celebrada en Nueva York en 1942, patrocinada por la Fundación Josiah Macy, en la que se trataron los problemas de la inhibición central del sistema nervioso. Entre los asistentes a aquella reunión estaba el Dr. Warren McCulloch de la Escuela de Medicina de la Universidad de Illinois, quien ya se había puesto en contacto con el Dr. Rosenblueth y conmigo, a causa de su interés por el estudio de la organización del córtex cerebral.

En aquel momento entró en juego un factor que se produce repetidas veces en la historia de la cibernética: la influencia de la lógica matemática. Si me pidieran elegir un santo patrón para la cibernética extraído de la historia de la ciencia, tendría que optar por Leibniz. La filosofía de Leibniz gira en torno a dos conceptos estrechamente relacionados: el de un simbolismo universal y el de un cálculo del razonamiento. De ellos se derivan la notación matemática y la lógica simbólica actuales. Pero del mismo modo que el cálculo aritmético se adapta a una mecanización que va desde el ábaco, pasando por la calculadora de despacho, hasta las computadoras ultrarrápidas de la última generación, el *calculus ratiocinator* de Leibniz contiene el germen de la *machina ratiocinatrix*, la máquina razonadora. Efectivamente, el propio Leibniz, al igual que su antecesor Pascal, se interesaba

5. Maxwell, J.C., «Proc. Roy. Soc.», Londres, 16, 270-283 (1868).

por la construcción de máquinas computadoras metálicas. Por lo tanto, no es nada sorprendente que el mismo impulso intelectual que originó el desarrollo de la lógica matemática, originara al mismo tiempo la mecanización ideal o real del proceso del pensamiento.

Una prueba matemática que puede seguirse es aquella que podemos representar por un número finito de símbolos. Estos símbolos pueden en realidad recurrir al concepto de infinito, pero es un recurso que puede resumirse en un número finito de fases, como sucede en la inducción matemática en la que demostramos un teorema en función de un parámetro n para $n = 0$, a la vez que demostramos que la notación $n + 1$ deriva de n , con lo que establecemos el teorema para todos los valores positivos de n . Además, las reglas de operación de nuestro mecanismo deductivo deben ser un número finito, aunque parezca lo contrario por una referencia al concepto de infinito, que puede enunciarse en términos finitos. En resumen, ha resultado evidente, tanto a los nominalistas como Hilbert, como a los intuicionistas como Weyl, que el desarrollo de una teoría matemático-lógica está sujeto al mismo tipo de limitaciones que las que afectan al funcionamiento de una computadora. Como veremos más adelante, incluso pueden interpretarse de esta manera las paradojas de Cantor y Russell.

Por ser discípulo de Russell, es notable en mí su influencia. El Dr. Shannon eligió para su tesis doctoral en el Massachusetts Institute of Technology la aplicación de las técnicas del álgebra clásica de clases de Boole al estudio de los sistemas conectores en ingeniería eléctrica. Turing*, que es quizás el primero de los que estudiaron las posibilidades lógicas de la máquina como experimento intelectual, estuvo al servicio del Gobierno inglés durante la guerra en el campo de la electrónica, y actualmente dirige el programa que lleva a cabo el Laboratorio Nacional de Física en Teddington para el desarrollo de computadoras modernas.

Otro tráfuga del campo de la lógica matemática al de la cibernética es Walter Pitts, que fue discípulo de Carnap en Chicago y estuvo en contacto con el profesor Rashevsky y su escuela

* Véase Turing, A.M., «Maquinaria computadora e inteligencia» en *Control sobre mentes y máquinas*, ed. Alan Ross Anderson, Serie Metatemas 7, Tusquets Editores, Barcelona, 1984. (N. del E.)

de biofísicos. Señalemos de pasada que este grupo ha contribuido enormemente a dirigir la atención de los matemáticamente dotados hacia las posibilidades de las ciencias biológicas, si bien algunos consideramos que están excesivamente supeditados a problemas de energía y potencial y a métodos de física clásica, para llevar a cabo un trabajo idóneo en el estudio de sistemas que, como el sistema nervioso, distan tanto de estar cerrados energéticamente.

El Sr. Pitts tuvo la buena fortuna de caer bajo la influencia de McCulloch, y ambos empezaron a trabajar muy pronto en problemas relativos a la unión de fibras nerviosas a través de sinapsis con sistemas con propiedades generales. Independientemente de Shannon, utilizaron la técnica de la lógica matemática para la discusión de lo que después de todo eran problemas de conexión, pero añadieron elementos que no eran sobresalientes en los anteriores trabajos de Shannon, aunque se hallan contenidos en las ideas de Turing: el empleo de tiempo como parámetro, la consideración de redes que contienen ciclos y el retraso sináptico y de otras clases⁶.

En el verano de 1943 conocí al Dr. J. Lettvin del Hospital Municipal de Boston, quien mostraba gran interés por la cuestión de los mecanismos nerviosos. Era gran amigo del Sr. Pitts y me puso al corriente de su trabajo⁷, convenciéndole para que viniera a Boston para presentárnoslo al Dr. Rosenblueth y a mí. Pitts fue bien acogido en nuestro grupo y se incorporó al M.I.T. en otoño de 1943 para trabajar conmigo y reforzar los fundamentos matemáticos del estudio de la nueva ciencia cibernética que, por entonces, ya había nacido pero estaba sin bautizar.

Pitts conocía ya bastante bien la lógica matemática y la neurofisiología, pero no había tenido muchos contactos con la ingeniería y no estaba al corriente de los trabajos del Dr. Shannon ni tenía gran experiencia respecto a las posibilidades de la electrónica. Se interesó enormemente cuando le enseñé ejemplos de tubos de vacío modernos y le expliqué que eran los medios ideales para realizar en metal el equivalente de los circuitos y sistemas neurónicos que él conocía. A partir de ese momento compren-

6. Turing, A.M., «On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem», *Proceedings of the London Mathematical Society*, Ser. 2, 42, 230-265 (1936).

7. McCulloch, W.S., y W. Pitts, «A logical Calculus of the Ideas immanent in Nervous Activity», *Bull. Math. Biophys.*, 5, 115-133 (1943).

dimos claramente que la computación ultrarrápida, al depender de consecutivos dispositivos conectores, debe representar un modelo casi ideal de los problemas que se plantean en el sistema nervioso. El carácter todo-o-nada de la descarga neuronal es justamente análogo a la elección simple en la determinación de un dígito en la escala binaria, la cual más de uno entre nosotros había considerado la base más satisfactoria para el diseño de la computadora. La sinapsis no es más que un mecanismo para determinar si una combinación concreta de impulsos de salida procedentes de otro elemento van o no a actuar de estímulo adecuado para la descarga del siguiente elemento, y deben contar con un análogo exacto en la computadora. El problema de la interpretación de la naturaleza y variedades de memoria en el animal es análogo al de construir memorias artificiales para una máquina.

Por entonces quedó demostrado que la construcción de computadoras era más esencial para el potencial bélico de lo que parecía indicar la primera opinión del Dr. Bush, y ya en varios centros se estaban emprendiendo estudios con arreglo a unas directrices no muy distintas a las expuestas en mi primer informe. Harvard, Aberdeen Proving Ground y la Universidad de Pennsylvania estaban ya construyendo máquinas, y el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton y el propio M.I.T. pronto seguirían el mismo camino. En el programa se proponía un avance gradual del conjunto mecánico al conjunto eléctrico, de la escala diez a la escala binaria, del relé mecánico al relé eléctrico, de la operación dirigida por el ser humano a la operación dirigida automáticamente; y, en definitiva, cada nueva máquina construida estaba más en consonancia que la anterior con la memoria que yo había enviado al Dr. Bush. Empezaba a producirse un continuo trasiego de información entre los que estaban interesados en este campo, con lo cual se nos presentó la oportunidad de compartir nuestras ideas con otros colegas, en particular con el Dr. Aiken de Harvard, el Dr. von Neumann del Instituto de Estudios Avanzados y el Dr. Goldstine de Eniac y Edvac Machines de la Universidad de Pennsylvania. En todas partes nos escuchaban con interés y pronto el léxico de ingeniería se contaminó con términos de neurofisiología y de psicología.

En esta fase, el Dr. Neumann y yo pensamos que era conveniente celebrar una reunión conjunta de todos los interesados en lo que denominábamos cibernética. La reunión tuvo lugar en

Princeton a finales del invierno de 1943-1944. A ella acudieron ingenieros, fisiólogos y matemáticos. No fue posible la presencia del Dr. Rosenbluth porque acababa de aceptar el cargo de jefe de los laboratorios de Fisiología del Instituto Nacional de Cardiología en México, pero los fisiólogos estuvieron representados por el Dr. McCulloch y el Dr. Lorente de Nó, del Instituto Rockefeller. Tampoco pudo asistir el Dr. Aiken; sin embargo el Dr. Goldstine formó parte del grupo de diseñadores de computadoras que acudió a la reunión. La representación matemática la ostentábamos el Dr. von Neumann, el Sr. Pitts y yo. Los fisiólogos hicieron una introducción conjunta sobre los problemas cibernéticos desde su punto de vista y los diseñadores de computadoras expusieron sus métodos y objetivos. Al final de la reunión quedó claro que existía una sustancial base común de ideas entre los investigadores de los diversos campos, que los miembros de cada grupo podían utilizar conceptos mejor desarrollados por otros y que había que intentar establecer un vocabulario común.

Mucho antes de todo esto, el grupo de investigación bélica dirigido por el Dr. Warren Weaver había publicado un documento, que en principio fue secreto y restringido, relativo al trabajo del Sr. Bigelow y mío sobre predictores y filtros de ondas. En él se decía que las condiciones de la artillería antiaérea no justificaban el diseño de aparatos especiales para la predicción curvilínea, pero que los principios eran correctos y prácticos y que el Gobierno los había utilizado en pulidos de ánimas y en algunos campos afines. En particular se había demostrado que el tipo de ecuación integral a que se reduce el cálculo del problema de las variaciones se planteaba en los problemas de dirección ondul y en otros muchos de interés matemático práctico. Así, de una forma u otra, al acabar la guerra, estaban introducidas las ideas de la teoría de predicción y del enfoque estadístico de la ingeniería de comunicación, ya comunes a gran parte de los estadísticos e ingenieros de comunicaciones de Estados Unidos e Inglaterra; el Gobierno publicó también una memoria, hoy agotada, y se publicaron numerosos trabajos expositivos de Levinson⁸, Wallman, Daniell, Philips y otros, que llenaron la laguna existente. Yo mismo estuve preparando un extenso trabajo matemático expositivo durante varios años para mantener un

8. Levinson, N., «J. Math. and Physics, 25», 261-278; 26, 110-119 (1947).

registro al día del trabajo que había ido realizando, pero, por circunstancias ajenas a mi voluntad, no se pudo publicar en su momento y, finalmente, tras una reunión conjunta en la American Mathematical Society y en el Institute of Mathematical Statistics en Nueva York, en la primavera de 1947, y al dedicarme al estudio de los procesos estocásticos desde una perspectiva muy vinculada a la cibernética, trasladé las notas de mi manuscrito al profesor Doob de la Universidad de Illinois para que, según su notación y con arreglo a sus ideas, las desarrollara en forma de libro para la colección de Estudios Matemáticos de la American Mathematical Society. Yo ya había desarrollado parte del trabajo durante una serie de conferencias en el departamento de matemáticas del M.I.T. en el verano de 1945. Desde entonces mi antiguo alumno y colaborador⁹ Dr. Y.W. Lee, al regresar de China, dio en el otoño de 1947 un cursillo sobre los nuevos métodos de diseño de filtros de onda y aparatos similares, en el departamento de ingeniería eléctrica del M.I.T., pensando en convertir en libro el material de esas conferencias. Además, el documento gubernamental agotado va a ser reeditado¹⁰.

Como he dicho, el Dr. Rosenblueth regresó a México a principios de 1944. En la primavera de 1945 recibí una invitación de la Asociación Matemática Mexicana para participar en una reunión a celebrarse en junio de aquel año en Guadalajara. Confirmaba la invitación la Comisión Instigadora y Coordinadora de la Investigación Científica dirigida por el Dr. Manuel Sandoval Vallarta de quien ya he hablado. El Dr. Rosenblueth me invitaba a compartir con él una investigación científica y el Instituto Nacional de Cardiología, dirigido por el Dr. Ignacio Chávez, me ofrecía su hospitalidad.

En aquella ocasión estuve varias semanas en México, y de común acuerdo con el Dr. Rosenblueth, decidimos proseguir una línea de trabajo de la que habíamos hablado ya con el Dr. Walter B. Cannon, quien, por entonces, también efectuaba una visita al Dr. Rosenblueth, desgraciadamente la última. Este trabajo versaba sobre la relación entre contracciones tónicas, clónicas y fáscicas en la epilepsia, por una parte, y entre el espasmo tónico, el ritmo y la fibrilación cardíaca por otra. Pensábamos que el músculo cardíaco representaba un tejido irritable tan útil para la in-

9. Lee, Y.W., «J. Math. and Physics, 11», 261-278 (1932).

10. Wiener, N., *Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series*, Technology Press and Wiley, Nueva York, 1949.

vestigación de los mecanismos de conducción como el tejido nervioso y que, además, las anastomosis y las decusaciones de las fibras musculares cardíacas presentaban un fenómeno más sencillo que el problema de las sinapsis nerviosas. Tenemos que agradecer profundamente al Dr. Chávez su amable hospitalidad y al Instituto, que, contrariamente a su política de investigación, permitió que el Dr. Rosenblueth se dedicara exclusivamente al estudio del corazón, por la oportunidad que nos dieron con ello de contribuir a su principal propósito.

La investigación siguió tres direcciones: el estudio de los fenómenos de conductividad y latencia en medios conductores uniformes de dos o más dimensiones y el estudio estadístico de las propiedades de conductividad de redes aleatorias de fibras conductoras. La primera directriz nos llevó a la elaboración de los rudimentos de una teoría del *flutter* (aleteo) cardíaco, y la segunda a una posible comprensión de la fibrilación. Las dos líneas de trabajo las expusimos en un escrito¹¹ que publicamos nosotros mismos, y, aunque en ambos casos hemos visto que nuestros anteriores resultados requieren notable revisión y suplementación, el trabajo sobre el aleteo lo está revisando Oliver G. Selfridge del M.I.T.; y la técnica estadística empleada en el estudio de las redes de músculo cardíaco la ha ampliado Walter Pitts —actualmente becario de la John Simon Guggenheim Foundation— al tratamiento de las redes neuronales. El trabajo experimental lo está realizando el Dr. Rosenblueth con ayuda del Dr. F. García Ramos del Instituto Nacional de Cardiología y la Escuela Médica del Ejército mexicano.

En la reunión de Guadalajara, convocada por la Asociación Matemática Mexicana, el Dr. Rosenblueth y yo presentamos algunos de nuestros resultados. Habíamos llegado ya a la conclusión de que nuestros anteriores planes de colaboración eran viables, y con esta circunstancia se nos presentó la ocasión de exponerlos ante una audiencia de mayor envergadura. En la primavera de 1946, el Dr. McCulloch había concertado con la Josiah Macy Foundation la primera de una serie de reuniones a celebrar en Nueva York sobre la problemática del *feedback*. Las reuniones realizadas al modo tradicional de Macy fueron eficazmente

11. Wiener, N., y A. Rosenblueth, «The Mathematical Formulation of the Problem of Conduction of Impulses in a Network of Connected Excitable Elements, Specifically in Cardiac Muscle», *Arch. Inst. Cardiol. Méx.*, 16, 205-265 (1946).

organizadas por el Dr. Frank Fremont-Smith por cuenta de la fundación. Se trataba de reunir en ellas a un grupo no muy numeroso, unos veinte investigadores de las especialidades relacionadas, para que durante dos días consecutivos dieran lectura a trabajos informales, discutieran y almorzaran juntos, hasta llegar a limar sus diferencias y establecer unas líneas de reflexión paralelas. El núcleo de nuestras reuniones había sido el grupo que acudió a Princeton en 1944, pero los doctores McCulloch y Fremont-Smith, viendo acertadamente las implicaciones psicológicas y sociológicas, incorporaron a la convocatoria a varios psicólogos, sociólogos y antropólogos relevantes. Ya desde el principio se había considerado indispensable incluir a psicólogos. El que estudia la mente no puede prescindir del sistema nervioso. Gran parte de la psicología del pasado ha resultado ser la simple fisiología de los órganos de los sentidos especializados, y todo el *corpus* de ideas que la cibernética introduce en la psicología se refiere a la fisiología y anatomía de áreas corticales altamente especializadas que conectan a los distintos órganos sensoriales especializados. Desde un principio habíamos previsto que el problema de la percepción de la *Gestalt*, o de la formación perceptual de universales, giraría en torno a estas premisas. ¿Cuál es el mecanismo por el que reconocemos un cuadrado como tal, independientemente de su posición, tamaño y orientación? Para asesorarnos en temas de esta índole y al mismo tiempo informarles del empleo que pudiera hacerse de nuestros conceptos en su propio beneficio, contábamos con la presencia de psicólogos Dr. Kurt Lewin del M.I.T. y el Dr. M. Ericsson de Nueva York.

En lo que atañe a la sociología y a la antropología, es evidente que la importancia de la información y la comunicación como mecanismos de organización rebasa el marco individual para proyectarse sobre la comunidad; por una parte, es totalmente imposible comprender a comunidades sociales como las de las hormigas sin una profunda investigación sobre sus medios de comunicación, y afortunadamente pudimos contar con la presencia del Dr. Schneirla. Para el problema equivalente de la presencia humana contamos con el asesoramiento de la organización como Bateson y Margaret Mead, y el Dr. Morgenstern del Instituto de Estudios Avanzados nos asesoró en el importante campo de la organización social vista desde la perspectiva de la teoría económica. Por cierto que su importante libro conjunto

con el Dr. von Neumann constituye un estudio sumamente interesante sobre organización social desde el punto de vista de métodos muy estrechamente relacionados, aunque muy distintos, con el tema principal de la cibernética. El Dr. Lewin y otros figuraron como representantes de los nuevos trabajos sobre la teoría del muestreo de opinión y la práctica de la inducción de la opinión. El Dr. F.C.S. Northrup se ocupó de evaluar la importancia filosófica de nuestro trabajo.

Con los citados no he pretendido hacer una lista exhaustiva de nuestro grupo, ya que éste experimentó una ampliación para incluir a otros ingenieros y matemáticos, aparte de Bigelow y Savage, y de neuroanatomistas y neurofisiólogos, tales como von Bonin, Lloyd y otros. La primera reunión se celebró en la primavera de 1946 y estuvo fundamentalmente dedicada a los trabajos didácticos de aquellos de nosotros que habían asistido a la reunión de Princeton, y a una evaluación general sobre la importancia de la cibernética. El espíritu de la reunión fue el de que las ideas que sirven de soporte a la cibernética eran suficientemente importantes e interesantes para todos los asistentes y justificaban una reunión cada seis meses y que, por consiguiente, antes de la próxima había que celebrar una reunión previa para los menos expertos en matemáticas, al objeto de explicarles, en un lenguaje lo más sencillo posible, la naturaleza de los conceptos matemáticos correspondientes.

En el verano de 1946 regresé a México, gracias a la Fundación Rockefeller y a la hospitalidad del Instituto Nacional de Cardiología, para continuar la colaboración con el Dr. Rosenblueth. En esta ocasión decidimos abordar directamente un problema nervioso relativo al *feedback* y ver lo que podía hacerse experimentalmente. Elegimos el gato como animal de laboratorio y el cuádriceps femoral extensor como músculo de estudio. Cortamos el ligamento del músculo y lo fijamos a una palanca sometida a una tensión fijada de antemano; registramos las contracciones isométrica e isotónicamente. Utilizamos también un oscilógrafo para registrar los cambios eléctricos simultáneos sobre el propio músculo. Fundamentalmente trabajamos con gatos, primero descerebrados con anestesia de éter y, después, actuando sobre la médula mediante una transección torácica. En muchos casos recurrimos a la estricnina para potenciar las respuestas reflejas. Cargábamos el músculo al punto de que un leve golpe estimulaba en él un patrón periódico de contracción llamado *clonus* en jerga

fisiológica. Observamos ese patrón de contracción, prestando atención al estado fisiológico del gato, la carga en el músculo, la frecuencia de oscilación, el nivel básico de oscilación y su amplitud. Nuestro propósito era valernos de esos parámetros para analizarlos como se hace con un sistema mecánico o eléctrico que presente el mismo registro. Recurrimos, por ejemplo, a los métodos del libro de McColl sobre servomecanismos. No es éste el lugar propicio para discutir la trascendencia de nuestros resultados, ya que los estamos repitiendo y preparamos su publicación. Sin embargo, podemos efectuar con certeza, o gran probabilidad, las siguientes afirmaciones: la frecuencia de la oscilación clónica es mucho menos sensible de lo que esperábamos a los cambios de las condiciones de carga y está mucho más cuasideterminada por las constantes del arco cerrado (nervio eferente)-músculo-(cuerpo terminal cinestésico)-(nervio aferente)-(sinapsis central)-(nervio eferente) que por otra cosa. Este circuito no es ni siquiera aproximadamente un circuito de operadores lineales si tomamos como base de linealidad el número de impulsos transmitidos por segundo por el nervio eferente, pero parece aproximarse mucho más a ello si sustituimos el número de impulsos por su logaritmo. Esto coincide con el hecho de que la forma de envoltura de la estimulación del nervio eferente no es del todo sinusoidal, pero el logaritmo de esta curva es mucho más casi sinusoidal, mientras que en un sistema oscilante lineal con nivel constante de energía, la forma de la curva de estimulación tiene que ser sinusoidal en todos los casos salvo en un conjunto de casos de probabilidad cero. También aquí los conceptos de facilitación e inhibición son mucho más casi de carácter multiplicativo que aditivo. Por ejemplo, una inhibición completa equivale a una multiplicación por una pequeña cantidad. Son estos conceptos de inhibición y facilitación los empleados¹² en la discusión del arco reflejo. Además, la sinapsis es un registrador de coincidencias, y la fibra de salida sólo se estimula si el número de los impulsos de entrada en una pequeña adición rebasa un determinado umbral. Si este umbral es lo bastante bajo con respecto al número total de sinapsis de entrada, el mecanismo sináptico sirve para multiplicar probabilidades, y que pueda llegar a ser un vínculo lineal aproximado sólo es posible en un sistema

12. Artículos médicos sobre el fenómeno del clonus, del Instituto de Cardiología de México.

logarítmico: la logaritmicidad aproximada de la ley de Weber-Fechne de intensidad de sensación, aunque esta ley no sea más que una primera aproximación.

Lo más sorprendente es que, con esta base logarítmica y con los datos obtenidos a partir de la conducción de impulsos simples a través de los distintos elementos del arco neuromuscular, pudimos llegar a aproximaciones bastante aceptables de los períodos reales de vibración clónica, empleando la técnica ya desarrollada por los ingenieros de servomecanismos para la determinación de las frecuencias de las oscilaciones incontroladas en los sistemas de retroalimentación que se han descompuesto. Obtuvimos oscilaciones teóricas de unos 13,9 por segundo, en casos en que las oscilaciones observadas variaban entre frecuencias de 7 y 30, pero generalmente se mantuvieron dentro de una gama aproximada de 12 a 17. Dadas las circunstancias, la coincidencia es excelente.

La frecuencia del clonus no es el único fenómeno importante que se observa; se produce también un cambio relativamente lento en la tensión basal y un cambio aún más lento en la amplitud. No son fenómenos en absoluto lineales. Sin embargo, los cambios suficientemente bajos en las constantes de un sistema oscilante lineal pueden tratarse en una primera aproximación como si fueran infinitamente lentos y como si en cada parte de la oscilación el sistema se comportase como lo haría si sus parámetros fueran los que le correspondieran en ese momento. Es el método que en otras ramas de la física se conoce por el nombre de perturbaciones seculares. Puede utilizarse para estudiar los problemas de nivel basal y amplitud del clonus. Aunque el trabajo aún no está concluido, no cabe duda de que es viable y prometedor. Sugiere con fuerza que, aunque la secuencia temporal del arco principal en el clonus demuestra que se trata de un arco bineuronal, la amplificación de impulsos en dicho arco es variable en uno y quizás en más puntos, y que cierta parte de esta amplificación se halla afectada por procesos multineuronales lentos que discurren en una parte del sistema nervioso más alta que la cadena medular, principal responsable de la secuencia temporal del clonus. Esta amplificación variable puede resultar afectada por el nivel general de la actividad central, por efecto del empleo de estriknina o anestésicos, por descerebración y por otras muchas causas.

Estos fueron los principales resultados expuestos por el Dr.

Rosenblueth y por mí en la reunión de Macy, celebrada en el otoño de 1946, y en la reunión de la Academia de Ciencias de Nueva York celebrada simultáneamente con objeto de difundir los conceptos cibernéticos a un público más amplio. Aunque estamos satisfechos de nuestros resultados y rotundamente convencidos de la viabilidad práctica del trabajo en esa dirección, creemos que nuestra colaboración ha sido demasiado breve y hemos realizado los trabajos sujetos a una presión excesiva, por lo que no conviene publicarlos sin una ulterior confirmación experimental. Esta confirmación —que naturalmente puede resultar una refutación— vamos a intentar realizarla en el verano y el otoño de 1947.

La Fundación Rockefeller ha concedido ya al Dr. Rosenblueth una subvención para equipar un nuevo laboratorio en el Instituto Nacional de Cardiología. Pensamos que las cosas están maduras para iniciar un trabajo conjunto —es decir, con el Dr. Warren Weaver, director del departamento de Ciencias Físicas, y con el Dr. Robert Morison, director del departamento de Ciencias Médicas— estableciendo las bases de una colaboración científica a largo plazo para proseguir nuestro programa a un ritmo más tranquilo y seguro. En este sentido hemos recibido un apoyo entusiasta de nuestras respectivas instituciones. El Dr. George Harrison, decano de Ciencias, fue el representante del M.I.T. en las negociaciones, y el Dr. Ignacio Chávez actuó de portavoz del Instituto Nacional de Cardiología. En el curso de las mismas quedó claro que el laboratorio centro de la actividad conjunta se montaría en el Instituto Mexicano para evitar la duplicidad de instrumental científico y confirmar el gran interés de la Fundación Rockefeller por crear centros científicos en América Latina. Finalmente se llegó al acuerdo de un plan de cinco años, durante los cuales yo pasaré seis meses cada dos años en el Instituto y el Dr. Rosenblueth seis meses de los años intermedios en el M.I.T. El tiempo en el Instituto estará dedicado a la obtención y análisis de datos experimentales relativos a la cibernética, y en los años contrarios en el M.I.T. a investigación más teórica y, sobre todo, al intrincado problema de trazar un esquema de preparación para los que deseen dedicarse a este campo; un programa en el que se impartan los necesarios conocimientos de matemáticas, física e ingeniería, así como las técnicas adecuadas en biología, psicología y medicina.

En la primavera de 1947 el Dr. McCulloch y el Sr. Pitts rea-

lizaron un trabajo de notable importancia cibernética. El Dr. McCulloch había recibido el encargo de diseñar un aparato para que los ciegos pudieran leer acústicamente un texto impreso. La producción de tonos variables a partir de tipos impresos, mediante una célula fotoeléctrica no es nada nuevo y puede efectuarse por diversos métodos; la dificultad estriba en obtener un patrón de sonido fundamentalmente uniforme una vez previsto el tipo de letra, independientemente de su tamaño. Es un problema decididamente análogo al de la percepción de la forma, *Gestalt*, por el que reconocemos un cuadrado como tal a través de numerosos cambios de tamaño y orientación. El dispositivo del Dr. McCulloch consta de una lectura selectiva del tipo de imprenta para un conjunto de distintos tamaños. Esta lectura selectiva se realiza automáticamente como en un proceso de barrido. Este barrido, para establecer una comparación entre una figura y una determinada figura estándar de tamaño fijo pero distinto, era un dispositivo que yo ya había sugerido en una de las reuniones de Macy. Un esquema del aparato que efectuaba la lectura selectiva fue a parar a manos del Dr. von Bonin y éste inmediatamente exclamó: «¿Es un esquema de la cuarta capa del área visual del córtex cerebral?». Siguiendo esta sugerencia, el Dr. McCulloch, ayudado por el Sr. Pitts, elaboró una teoría que vinculaba la anatomía y la fisiología del córtex visual, y en ella la operación de barrido de una serie de transformaciones desempeña un importante papel. El trabajo fue presentado en la primavera de 1947, en la reunión de Macy y en la de la Academia de Ciencias de Nueva York. El proceso implica además un determinado tiempo periódico que corresponde a lo que en televisión se llama «tiempo de barrido». Hay varias claves anatómicas de este tiempo a lo largo de la cadena de sinapsis consecutivas necesarias para completar un ciclo de actividad. Estas dan un tiempo del orden de una décima de segundo para la realización completa de un ciclo de operaciones que es el período aproximado del denominado «ritmo alfa» del cerebro. Finalmente, basándose en evidencia muy distinta, se ha conjeturado que el ritmo alfa es de origen visual y muy importante en el proceso de la percepción de la forma.

En la primavera de 1947 me invitaron a participar en una conferencia matemática en Nancy sobre problemas originados en el análisis armónico. Acepté la invitación y, durante el viaje de ida y vuelta, pasé tres semanas en Inglaterra como huésped de mi

viejo amigo el profesor J.B.S. Haldane. Allí tuve la oportunidad de conocer a la mayoría de los que trabajan en el campo de las computadoras ultrarrápidas, en particular en Manchester y en los Laboratorios Nacionales de Física de Teddington, y sobre todo tuve ocasión de discutir sobre los conceptos fundamentales de la cibernética con el Sr. Turing en Teddington; hice también una visita al Laboratorio Psicológico de Cambridge y tuve la fortuna de hablar con el profesor F.C. Bartlett y sus ayudantes de los trabajos que realizan sobre el elemento humano en los procesos de control en que interviene dicho elemento. Comprobé que el interés por la cibernética está tan difundido y documentado en Inglaterra como en Estados Unidos y vi que los trabajos de ingeniería son excelentes, aunque naturalmente limitados por unos recursos financieros más reducidos. Comprobé el enorme interés y atención que suscita la cibernética a diversos niveles, y cómo para los profesores Haldane, H. Levy y Bernal es decididamente uno de los problemas prioritarios en el dietario de la ciencia y la filosofía científica. Sin embargo, no creo que se hayan realizado muchos progresos en unificar el tema ni en armonizar las distintas corrientes de investigación como hemos hecho nosotros en Estados Unidos.

En Francia, en la reunión de Nancy sobre análisis armónico, se leyeron varios trabajos unificando ideas estadísticas e ideas de ingeniería de comunicación de un modo totalmente en concordancia con el punto de vista cibernético. Tengo que mencionar en particular a los Sres. Blanc-Lapierre y Loève. También observé un notable interés por el tema por parte de matemáticos, fisiólogos y quimiofísicos, especialmente en relación con sus aspectos termodinámicos en el sentido en que afectan al problema más general de la naturaleza de la propia vida. Yo había hablado de este tema en Boston, antes de mi partida, con el bioquímico húngaro profesor Szent-Györgyi, y coincidíamos en nuestras ideas.

Debo hacer especial mención de un acontecimiento ocurrido durante mi visita a Francia. Mi colega el profesor G. de Santillana del M.I.T. me presentó al Sr. Freymann, de la casa Hermann et Cie., quien me pidió que escribiera este libro. Quedo particularmente agradecido por esta invitación, ya que el Sr. Freymann es mexicano y la redacción de este libro, así como gran parte de la investigación que lo ha originado, se realizaron en México.

Como ya he insinuado, una de las líneas de trabajo sugerida por las ideas expuestas en las reuniones de Macy, es la de la importancia del concepto y la técnica de la comunicación en el sistema social. Qué duda cabe de que el sistema social es una organización que, como el individuo, mantiene su coherencia por un sistema de comunicaciones, y que posee una dinámica en la que los procesos circulares de naturaleza *feedback* desempeñan un importante papel. Esto es cierto tanto en el terreno general de la antropología y de la sociología como en el campo más específico de la economía. El importante trabajo, ya mencionado, de von Neumann y Morgenstern sobre la teoría de los juegos, pertenece a este ámbito de ideas. Sobre esta base, los doctores Gregory Bateson y Margaret Mead me han requerido para que, dada la naturaleza acuciante de los problemas sociológicos y económicos de nuestra era de confusión, dedique una gran parte de mis energías a la exposición de este aspecto de la cibernética.

Por mucho que simpatice con su actitud de urgencia ante la situación y por mucho que espere que ellos y otros competentes investigadores traten este tipo de problemas, que discutiré en otro capítulo, no puedo compartir ni su opinión de que ese aspecto haya de ser para mí prioritario, ni su esperanza de que sea posible lograr un progreso determinante en esa dirección capaz de ejercer un efecto terapéutico en las actuales enfermedades de nuestra sociedad. Para empezar, las grandes cifras que se barajan al estudiar la sociedad, no sólo son estadísticas, sino que las series estadísticas en que se basan son excesivamente limitadas. No sirve de mucho situar bajo un mismo epígrafe la economía de la industria del acero antes y después de la introducción del convertidor Bessemer, ni comparar las estadísticas de la producción de recauchutados antes y después de la expansión de la industria del automóvil y del cultivo de la *Havea* en Malasia. Tampoco nos lleva a ninguna parte registrar las estadísticas de la incidencia de enfermedades venéreas en una tabla sencilla que incluya el período anterior y posterior a la introducción del Salvarsan, a excepción del propósito concreto de estudiar la eficacia de esta droga. Para una buena estadística social son necesarios amplios muestreos realizados en *condiciones esencialmente estables*, del mismo modo que para una buena resolución lumínica es necesaria una lente con gran apertura. La apertura efectiva de una lente no aumenta apreciablemente incrementando su apertura nominal, *a no ser que la lente esté hecha de un material tan homo-*

géneo que el retraso de la luz en sus distintas partes coincida con la cantidad adecuada prevista en menos de una pequeña porción de la onda luminosa. De igual modo la utilidad de amplios muestreos estadísticos en condiciones de amplia variabilidad es engañosa y espúrea. Por lo tanto, las ciencias humanas constituyen un mal campo de verificación de la técnica matemática; tan malo como lo sería la mecánica estadística de un gas para una entidad de un tamaño del orden de la molécula para la cual las fluctuaciones que despreciamos desde un punto de vista más amplio serían precisamente asunto de sumo interés. Además, a falta de técnicas numéricas rutinarias razonablemente fiables, el elemento de juicio del experto que establece la evaluación de las entidades sociológicas, antropológicas y económicas es tan predominante, que no hay campo para el novel que haya quedado incólume a la experiencia del experto. Tengo que señalar, de pasada, que el aparato moderno de la teoría de pequeños muestreos, cuando rebasa los límites de sus propios parámetros concretos y se convierte en un método de inferencia estadística positiva en nuevos casos, no me inspira ninguna confianza a menos que lo aplique un estadístico que conozca explícitamente los principales elementos de la dinámica de la nueva situación o los intuya.

He hablado de un campo en el que mis expectativas de la cibernética quedan francamente entibiadas al tener en cuenta las limitaciones de los datos que puedan obtenerse. Hay otros dos campos en los que en último extremo espero que pueda lograrse algo práctico con ayuda de los conceptos cibernéticos, pero es una esperanza supeditada a futuros progresos. Uno de ellos es el de las prótesis sustitutorias de extremidades mutiladas o paralizadas. Como hemos visto al hablar de la *Gestalt*, las ideas de la ingeniería de comunicación han sido ya aplicadas por McCulloch para resolver el problema de la sustitución de un sentido mutilado, construyendo un instrumento con el que los ciegos pueden leer acústicamente un texto impreso. El instrumento presentado por McCulloch asume con bastante claridad algunas de las funciones, no sólo del ojo, sino del área cortical visual. Existe una clara posibilidad de lograr algo parecido en el caso de miembros artificiales. La pérdida de un segmento de un miembro conlleva no sólo la pérdida del apoyo puramente pasivo del segmento perdido o su utilidad como prolongación mecánica del muñón, pero la consiguiente pérdida del poder contráctil de sus músculos, con también la pérdida de todas las sensaciones cutáneas y cinesté-

sicas que en él se originan. Las dos primeras pérdidas son las que actualmente el artífice de prótesis trata de suplir artificialmente, pero la tercera escapa de momento a su competencia. En el caso de una simple pierna enclavijada, esto no tiene importancia: la barra que sustituye al miembro que falta no posee grados de libertad propia, y el mecanismo cinestésico del muñón basta para controlar su posición y velocidad. Pero no sucede lo mismo en el caso de la pierna articulada con rodilla y tobillo móviles que el disminuido hace avanzar con ayuda de la musculatura remanente, porque no posee un registro adecuado de su posición y movimiento y esto entorpece su seguridad de paso en terreno irregular. No parece existir dificultad insuperable para equipar las articulaciones artificiales y la planta del pie artificial con calibradores de tensión o presión que registren eléctricamente, o de otra manera —con vibradores, por ejemplo— sobre áreas de piel intacta. Los miembros artificiales que actualmente se fabrican contrarrestan fácilmente la parálisis causada por la amputación, pero no modifican la ataxia. Utilizando receptores adecuados desaparecería también notablemente la ataxia, y el minusválido podría aprender reflejos como los que utilizamos al conducir un coche, y éstos le permitirían andar con paso más seguro. Lo que hemos expuesto a propósito de la pierna debiera aplicarse con mayor énfasis al brazo. Los lectores de libros de neurología recordarán el famoso maniquí en el que está señalado que la pérdida sensorial por efecto de la simple amputación del pulgar es mucho mayor que la resultante de una amputación de la articulación coxofemoral.

He tratado de exponer estas consideraciones a las autoridades competentes, pero hasta la fecha no he conseguido gran cosa. Ignoro si ya han surgido las mismas ideas a partir de otras fuentes, ni si se han realizado experimentos y se ha visto que eran impracticables. Si todavía no se les ha prestado la debida consideración práctica, se les prestará en un futuro inmediato.

Ahora me referiré a otro aspecto que considero digno de atención. Hace mucho tiempo que estoy firmemente convencido de que las computadoras modernas ultrarrápidas son en principio un sistema nervioso central ideal para un aparato de control automático, y que su entrada y salida no tiene que ser necesariamente números o diagramas formales, sino que podrían perfectamente ser, o bien lecturas de órganos sensoriales artificiales como células fotoeléctricas o termómetros, o bien prestaciones

de motores o solenoides. Con la ayuda de calibradores de tensión o dispositivos similares que lean las prestaciones de esos órganos motores e informen, alimentando en *feedback* al sistema de control central a modo de un sentido cinestésico artificial, podríamos construir máquinas artificiales de prácticamente cualquier grado de complejidad y eficacia. Mucho antes de la explosión de Nagasaki y que el público conociera la bomba atómica, había ya pensado que nos hallábamos ante una posibilidad social de increíble importancia para bien o para mal. La distancia que nos separa de la factoría automática con su cadena de montaje sin intervención humana depende tan sólo de que realmente realicemos un esfuerzo para llevarla a la práctica, similar al que se llevó a cabo en la II guerra mundial¹³ para desarrollar la técnica del radar, por ejemplo.

He dicho que la nueva tecnología ha desbordado las posibilidades humanas para bien o para mal. Para empezar convierte el dominio metafórico de las máquinas, tal como lo vio Samuel Butler, en un problema inmediato y nada metafórico. Para la raza humana supone un conjunto de esclavos mecánicos nuevos y de suma eficacia que trabajen para ella. Este trabajo mecánico presenta la mayor parte de las ventajas económicas del trabajo esclavista, pero, a diferencia de éste, no conlleva los desmoralizadores efectos directos de la crueldad humana. Sin embargo, cualquier trabajo que acepte las condiciones de competitividad con el trabajo esclavista acepta las condiciones del mismo y es fundamentalmente trabajo de esclavos. La palabra clave de mi aserto es *competitividad*. Puede que sea bueno para la humanidad que la máquina la exima de la necesidad de efectuar tareas serviles y desagradables, o puede que no. No lo sé. No creo que sea bueno evaluar estas posibilidades en función del mercado, del dinero que se ahorra; pero es precisamente en función de la libertad de mercado —la «quinta libertad»— que se han convertido en el lema del sector de la opinión estadounidense, representado por la Asociación Nacional de Fabricantes y el «Saturday Evening Post». Me he referido a la opinión estadounidense que es la que mejor conozco por ser la de mis compatriotas, pero los mercachifles no conocen fronteras.

Quizá valga la pena que aclare los antecedentes históricos de la situación actual diciendo que la primera revolución industrial,

13. «Fortune», 32, 139-147 (octubre); 163-169 (noviembre, 1945).

la revolución de las «satánicas y siniestras fábricas», fue la devaluación del brazo humano en competición con la máquina. No hay salario o paga con que un trabajador de pico y pala de Estados Unidos pueda vivir lo bastante bajo como para competir con el trabajo de una pala excavadora. La revolución industrial moderna seguramente devaluará el cerebro humano, al menos en sus decisiones más simples y rutinarias. Desde luego, igual que el buen carpintero, el buen mecánico, el buen sastre, han sobrevivido en cierto modo a la primera revolución industrial, es de prever que el buen científico y el buen administrador sobrevivan a la segunda. Sin embargo, dando por hecha la segunda revolución industrial, el ser humano medio de formación mediocre o inferior no tiene nada que vender que valga la pena comprar.

Naturalmente, la respuesta es vivir en una sociedad basada en los valores humanos y no en la compra y venta. Para llegar a tal modelo de sociedad necesitamos mucha planificación y mucha lucha, la cual —supongamos el mejor de los casos— se dará en el plano de las ideas, y si no ¿quién sabe? Por ello considero un deber pasar mis datos y mis ideas sobre la situación a los que están activamente interesados en las condiciones de trabajo del futuro, es decir los sindicatos. Conseguí ponerme en contacto con una o dos personalidades del C.I.O.* y me escucharon sensatos y comprensivos, pero, más allá de esos individuos, ni yo ni ellos fuimos capaces de llegar. Ellos opinaban, en consonancia con mis anteriores observaciones e informaciones, tanto en Estados Unidos como en Inglaterra, que los sindicatos y el movimiento obrero se hallan en manos de un personal muy limitado que, aunque muy bien entrenado en problemas especializados de contratación laboral y normativa sobre sueldos y condiciones de trabajo, es totalmente incapaz de asumir las cuestiones políticas, técnicas, sociológicas y económicas que condicionan la propia existencia del trabajo. No es difícil comprender por qué: el representante de un sindicato suele pasar de la vida agobiante de trabajador a la vida agobiante de administrador sin ninguna alternativa de entrenamiento más amplio; y para los que acceden a dicho entrenamiento, hacer carrera en un sindicato no es una perspectiva halagüeña, y además los sindicatos, con toda lógica, no suelen ver con buenos ojos a esta clase de personas.

Por eso los que hemos contribuido a la nueva ciencia de la

* Committee of Industrial Organizations. (N. del T.)

cibernética nos hallamos en una posición moral no muy cómoda, por decirlo de algún modo. Hemos contribuido al arranque de una nueva ciencia que, como he dicho, abarca progresos técnicos con grandes posibilidades para bien o para mal. Lo único que podemos hacer es entregarla al mundo que nos rodea, sabiendo que es el mundo de Belsen e Hiroshima. Ni siquiera nos queda la opción de suprimir estos adelantos técnicos. Son propiedad de nuestro tiempo y lo más que cualquiera de nosotros puede conseguir suprimiéndolos es poner su desarrollo en manos del más irresponsable y venal de nuestros ingenieros. Lo mejor que podemos hacer es que el gran público comprenda la perspectiva y la importancia de este trabajo y dedicar nuestros esfuerzos personales a campos como la fisiología y la psicología, más alejados de la guerra y de la explotación. Como hemos visto, hay muchos que esperan que lo bueno de una mejor comprensión del hombre y la sociedad que ofrece este nuevo campo de trabajo prevalezca y desborde a la contribución accidental que estamos aportando a la concentración de poder (que siempre está concentrado, por sus propias condiciones de existencia, en manos de los menos escrupulosos). Escribo estas líneas en 1947, y me veo obligado a decir que no abrigo muchas esperanzas.

El autor quiere expresar su agradecimiento a los Sres. Walter Pitts, Oliver Selfridge, Georges Dubé y Frederic Webster por su ayuda en la corrección del manuscrito y en la preparación del texto para su edición.

Instituto Nacional de Cardiología
Ciudad de México, noviembre de 1947