

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

AUTOMÁTICA, CIBERNÉTICA
Y AUTOMATIZACIÓN

DISCURSO

LEIDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN

POR EL

EXCMO. SR. D. JOSÉ GARCÍA SANTESMASES

Y

CONTESTACIÓN

DEL

EXCMO. SR. D. JOSÉ BALTA ELÍAS

EL DÍA 13 DE DICIEMBRE DE 1961



M A D R I D

DOMICILIO DE LA ACADEMIA: VALVERDE, 22

TELEFONO 221-25-29

1 9 6 1

Depósito Legal M. 13.585 -1961

C. BERMEJO, IMPRESOR.—J. GARCÍA MORATO, 122.—TELÉF. 233-06-19.—MADRID

DISCURSO

DEL

EXCMO. SR. D. JOSÉ GARCÍA SANTESMASES

TEMA:

AUTOMÁTICA, CIBERNÉTICA Y AUTOMATIZACIÓN

Excmos. Sres. Académicos:
Señoras y Señores:

En estos instantes solemnes y tan emotivos para mí, deseo, ante todo, expresaros mi gratitud por el alto honor que me habéis concedido al elegirme para ocupar un sillón entre vosotros. Pero todo honor lleva consigo una responsabilidad, y si aquél es desproporcionado a mis humildes méritos, ésta gravita sobre mí de forma inexorable, haciéndome ver cuán limitada es mi capacidad para compartir con vosotros las tareas de esta ilustre Corporación. Bien desearía yo estar en situación de corresponder con algo más que mi voluntad a la que habéis mostrado hacia mí al llamarme a vuestro lado, pero desgraciadamente traigo un bagaje *harto modesto y poco* puedo ofrecer. Sólo con mi entusiasmo y decidido propósito de trabajo y con vuestras enseñanzas y ejemplo, acaso algún día pueda hacerme digno de la confianza que me habéis otorgado. A Dios ruego me ilumine para que así sea.

He sido elegido para ocupar el sitial que dejó vacante el Excelentísimo Sr. D. José M.^a Fernández-Ladreda y Menéndez-Valdés, al que tuve el privilegio de tratar durante algunos años y al que aprendí a querer y admirar. A este sentimiento doloroso por la pérdida de tan destacada personalidad, se suman otros no menos tristes al evocar la de los ilustres compañeros Catalán y Duperier, que elegidos sucesivamente para ocupar aquella vacante, dejaron esta vida antes de que pudieran tomar posesión de su merecido cargo de Académico.

Me permitiréis que además de cumplir con la tradición (en este caso tan de acuerdo con mis propios sentimientos) de referirme a mi antecesor, dedique también un recuerdo emocionado a los que por designio de la Providencia no pudieron llevar la medalla que les correspondía.

El General Fernández-Ladreda procedía del prestigioso Cuerpo de Artillería, el cual, como él mismo señala con sentidas palabras en su discurso de ingreso, había dado anteriormente miembros destaca-

cados a esta Academia. Durante sus estudios, Fernández-Ladreda se interesa desde el primer momento por la Química, descollando de forma tal, que cuando termina aquéllos se le encarga de la citada asignatura.

Su pasión por esta ciencia debía ser el eje fundamental de su vida; cursa en la Universidad los estudios de la licenciatura en Ciencias Químicas y obtiene también el título de Doctor en Ciencias. La antigua Junta de Ampliación de Estudios le pensiona para seguirlos en la Universidad de Columbia (Nueva York), y para trabajar en Metalurgia y Análisis Químico en el Bureau of Standards de Washington. El Ministerio del Ejército le envía, también, a estudiar en el National Physical Laboratory en Teddington (Inglaterra).

Su vocación docente, que ya se había manifestado al ser promovido a Oficial de Artillería, le impulsó más adelante a la Cátedra Universitaria, ganando, sucesivamente, por oposición, la de Química Técnica de la Universidad de Sevilla y la de Química Orgánica de la Universidad de Oviedo, pasando más tarde a la de Química Industrial de la Universidad de Madrid, donde, al propio tiempo que explicaba esta asignatura, desarrolló cursillos sobre temas económicos y legales relativos a la Industria Química.

Fue también jefe del Taller de Precisión de Artillería, director de la Escuela Politécnica del Ejército, y ya siendo General de División del Cuerpo de Ingenieros de Armamento y Construcción, desempeñó la Dirección General del Cuerpo en el Ministerio del Ejército.

Era Académico numerario de la Real Academia de Farmacia, miembro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y estaba condecorado con las Grandes Cruces de San Hermenegildo, Mérito Militar y Naval, Encomienda de número de la Orden de Alfonso X el Sabio, Medalla de Oro al Mérito en el Trabajo, etc.

Parte de su extraordinaria actividad la dedicó durante algún tiempo al desempeño de cargos públicos, ejerciendo el de Ministro de Obras Públicas, y más adelante la primera Vicepresidencia de las Cortes.

Mi primer contacto personal con Fernández-Ladreda fue a raíz de mi incorporación a la Universidad de Madrid y siguió después a través de los años, como compañero suyo del doctorado en Química Industrial, del cual él fué creador, juntamente con mi querido y respetado amigo, el ilustre Académico de esta Corporación, D. Anto-

nio Rius Miró. La diferencia de categoría y de edad no fué óbice para que se estableciera una relación cordial y amistosa entre nosotros, dentro de los límites que imponía mi respeto hacia él, pero que continuamente ampliaba su benevolencia.

A su brillante personalidad científica hay que añadir, al recordar a Fernández-Ladreda, su recia personalidad humana. Los que hemos tenido la fortuna de conocerle, sabemos de su capacidad de trabajo y de su inquietud, que le llevó a múltiples actividades en las que gastaba generosamente el caudal de su energía. Desde mi ángulo visual, que abarcaba solamente una muy pequeña parte de aquéllas, soy testigo de mayor excepción. Durante el tiempo que desempeñó el Ministerio de Obras Públicas, no por eso dejó la Universidad que tanto amaba, asistiendo normalmente a sus clases, y como anécdota sencilla, pero que demuestra su carácter, me permito citar que durante la misma época y solicitado por el Patronato «Juan de la Cierva» para impulsar el Instituto Nacional de Electrónica, de reciente creación, no aceptó la presidencia de su Consejo Técnico-Administrativo, poniendo como condición ser nombrado simple Consejero del mismo: ¡ejemplo de humildad y al propio tiempo de servicio a España en todas sus manifestaciones! Muchas anécdotas como ésta se podrían señalar.

Por eso me permitiréis en estos momentos, al evocar a Fernández-Ladreda, que junto a su labor científica destaque sus cualidades de hombre recto, bueno y patriota, siempre dispuesto a defender toda empresa noble y justa, sacrificando su tiempo, acortando su descanso diario con jornadas agotadoras de trabajo, para ayudar y proteger, poniendo el peso de su influencia y personalidad a toda iniciativa que pudiera repercutir en honra o progreso para nuestro país.

A una gran figura de la Ciencia española, también Catedrático de la Universidad de Madrid, D. Miguel Catalán Sañudo, llamasteis, señores académicos, para llenar el vacío dejado por Fernández-Ladreda. De todos es conocida su gran labor realizada en el campo de la Espectroscopía, a la que consagró toda su vida científica. En los comienzos de su trayectoria investigadora, tuvo lugar su célebre descubrimiento sobre los «multipletes», que hizo saltar su nombre al primer plano internacional. Esta trayectoria, tan brillantemente iniciada, fue seguida por Catalán a través de los años y su labor está representada por más de sesenta trabajos publicados en revistas españolas y extranjeras. Como complemento a su faceta de

investigador hay que destacar su labor docente y formativa realizada en la Universidad de Madrid, y sucesivamente en los Institutos de Física y Química, y «Daza de Valdés». Su labor dió por resultado la creación de una Escuela española de Espectroscopía, que goza de bien merecida fama en todo el mundo. Esta triple función, investigadora, docente y de creador de escuela, nos define la personalidad científica de Catalán, que puede considerarse como una de las más destacadas de la Ciencia española actual.

A un físico eminente, D. Arturo Duperier Vallesa, llorado y admirado compañero de la Facultad de Ciencias, eligió la Academia para suceder a Catalán, pero como si la Parca mostrara una especial predilección por los científicos españoles, también Duperier abandonó el mundo de los vivos antes de que se le impusiera la medalla académica. Duperier sucumbió en una mañana aciaga en su puesto de trabajo, cuando acababa de explicar su lección en la Universidad.

La labor investigadora de este hombre sabio y sencillo que fué Duperier, se inició en Madrid, pero se llevó a cabo, en gran parte, en Inglaterra, estando consagrada casi exclusivamente a los rayos cósmicos, campo en el que adquirió reputación internacional.

En los últimos años de su vida, incorporado a la Universidad de Madrid, estuvo trabajando sobre un nuevo e interesante método para el cálculo de los fenómenos de interacción entre las partículas dotadas de altísima energía, así como de sus trayectorias.

Este método, en el que tenía puestas todas sus esperanzas y cuyas primicias expuso en el Congreso Internacional de rayos cósmicos de Edimburgo en 1958, pensaba ofrecerlo, en forma completamente resuelta, al Congreso de Moscú en 1959, cuando le sorprendió la muerte.

Comprenderéis, señores académicos, que mi sentido de responsabilidad se acrecienta al ser llamado a suceder por designios inscrutables de la Providencia a los tres ilustres científicos que acabo de evocar, rindiéndoles el homenaje de mi recuerdo.

¡Descansen en paz estos queridos compañeros!

AUTOMÁTICA, CIBERNÉTICA Y AUTOMATIZACIÓN

INTRODUCCION

Mucho he meditado sobre el tema más adecuado para mi discurso. Al principio pensé que trataría sobre uno de los modestos trabajos de investigación que estoy desarrollando, pero en seguida desistí de ello, pues a la dificultad de exponer un tema de tal naturaleza sin fórmulas ni figuras, se añade el peligro de envolver, paulatinamente, al auditorio en una atmósfera de tedio y cansancio que la cortesía disimula. Por ello decidí que fuera un tema de carácter más general, y tras madura reflexión escogí hablaros sobre «Automática, Cibernética y Automatización», campo en el que, si bien están comprendidas las pequeñas parcelas que amorosamente cultivo desde hace años, su amplitud es tan grande que espero no caer en la tentación de lo particular, del detalle, que solamente interesa al especialista, en detrimento de la visión general y panorámica que yo desearía ofrecer. Con ello, sin embargo, mucho me temo no quedéis inmunizados contra los males de que os he hablado, pero entonces habrá que achacarlos no al tema, sino al expositor.

Es bien conocido el impacto de la Automática en todos los sectores de la actividad humana. Sin embargo, estamos nada más que en el prólogo de una nueva era, en la que este impacto, esta influencia, se manifestará de forma cada vez más sensible, modificando sustancialmente nuestra manera de vivir.

Si bien comprendemos intuitivamente el significado del vocablo Automática, es difícil expresar en pocas palabras todo su contenido. Sin pretender, pues, dar una definición libre de objeciones, creemos que la Automática puede considerarse como la ciencia que trata de los métodos y procedimientos cuya finalidad es la sustitución del operador humano por un operador artificial en la ejecución de una

tarea física o mental. Partiendo de este concepto de Automática, podemos definir la Automatización como la aplicación de aquélla a los procesos industriales. Este mismo significado se debe dar al vocablo «Automation» (1), aparecido hace algunos años en Norteamérica, y sobre cuya traducción española «Automación» todavía no se ha pronunciado la Real Academia de la Lengua.

Pero antes de seguir adelante me permitiréis que evoque el nombre de un español insigne, gloria de nuestra Patria, e indiscutible precursor de la Automática actual, cuya denominación introdujo hace medio siglo con el mismo significado que ahora tiene. Me refiero al que fué Presidente de esta Academia, D. Leonardo Torres Quevedo.

Sobre su figura como precursor, dice el Prof. Raymond, autoridad francesa en estas materias: «Si Farcot y Watt pueden considerarse como los inventores de los servomecanismos, Torres Quevedo es quien ha tocado con el dedo el verdadero problema de la Automática. Es singular que sus trabajos, por tantos conceptos precursores, hayan podido pasar inadvertidos para tantos ingenieros.»

En efecto, Torres Quevedo es más conocido por su labor en el campo de las máquinas calculadoras (por ejemplo, las construidas para resolver ecuaciones algebraicas y para resolver ecuaciones diferenciales de primer orden), por sus inventos, como el jugador de ajedrez, el telekino, el balón dirigible usado por los ejércitos franceses e inglés durante la primera guerra mundial, el transbordador aéreo sobre el río Niágara, etc. Más adelante me referiré a ellos.

Lo que deseo destacar ahora son sus ideas vertidas en un admirable trabajo titulado «Ensayos sobre Automática. Su definición. Extensión teórica de sus aplicaciones», que se publicó en la Revista de esta Academia en 1914, y un año después en la «Revue Générale des Sciences» de París. En esta memoria expone los principios generales sobre el Automatismo, y con una visión profética inicia caminos que hoy, después de tantos años, se están convirtiendo en realidad.

Refiriéndose a los autómatas (lo que hoy llamaríamos sistemas automáticos), dice: «Estos autómatas tendrán *sentidos*: los término-

(1) Esta palabra fue utilizada primeramente por Harder, Vicepresidente de la Ford Motor Co., e independientemente por John Diebold y parece que procede de una simple contracción del vocablo «Automatisation», si bien algunos buscan su origen en la de otros dos, «Automatics» y «Production».

metros, los dinamómetros, las brújulas..., aparatos sensibles a las circunstancias que puedan influir su marcha. Poseerán *miembros*: las máquinas, aparatos capaces de ejecutar las operaciones de que estarán encargados, y que dispondrán de la energía necesaria». Y continúa textualmente: «Además (y éste es el principal objeto de la Automática) es preciso que los autómatas sean capaces de *discernimiento*, que puedan en todo momento, teniendo en cuenta las impresiones que reciben o incluso las que han recibido antes, ordenar la operación deseada.» Y más adelante: «Es siempre posible construir un autómata, cuyos actos dependan de ciertas circunstancias más o menos numerosas, según reglas que se pueden imponer arbitrariamente en el momento de la construcción.» ¿No da la impresión de que todo esto se ha escrito ahora, y no hace cerca de cincuenta años?

Es sorprendente observar que en el sistema preconizado por Torres Quevedo se introduce la idea de los circuitos de conmutación, que obtiene mediante relés, logrando realizar operaciones lógicas a partir de la información recibida. «El número de conmutadores —dice— se puede aumentar a voluntad y asimismo el número de posiciones de cada uno. Es decir, se puede incrementar indefinidamente el número de casos particulares que el autómata deberá considerar para regular sus acciones, o bien se puede complicar su vida de relación tanto como uno desee.» Muestra, pues, la posibilidad de elaborar o manejar automáticamente la información recibida, lo cual constituye, sin duda, una de las características esenciales de la Automática actual.

Este aspecto importante de la obra de Torres Quevedo, que acaba de esbozar, va siendo conocido ya en los medios extranjeros; basta recordar el éxito que tuvieron el ajedrecista y otros ingenios presentados por su propio hijo durante el Coloquio sobre «Les Machines à Calculer et la Pensée humaine», celebrado en París hace unos diez años. Pero ello no es suficiente, hay que divulgar su obra, precisamente su primacía en los fundamentos de una ciencia que está sirviendo de base a las maravillosas realizaciones actuales: como dijo el ilustre y llorado Académico D. Pedro Puig Adam en su bella conferencia con ocasión del centenario de Torres Quevedo: «... ni los artículos aparecidos aquí y allá en la prensa llorando su pérdida, tienen a mi entender el valor que adquiere una nueva y espontánea curiosidad en conocer su obra, venga esta curiosidad de París o de donde venga. Porque si de agradecer son todos los llan-

tos por una muerte, más consolador resulta un solo interés que infunda nueva vida» (2).

Para corroborar estas palabras de Puig Adam, me permitiréis que recuerde la placentera emoción que hube de experimentar hace unos años, cuando en ocasión de una conferencia que di en un Congreso Internacional celebrado en Harvard (3), pude hablar de Torres Quevedo ante un auditorio de especialistas. La emoción placentera se trocó en felicidad cuando pude observar la reacción admirativa de mis oyentes, muchos de los cuales acaso no habían oído hablar de nuestro ilustre compatriota y que entonces deseaban más datos sobre sus trabajos ¡y es que conocer la obra de Torres Quevedo, es admirarla!

Volviendo al desarrollo actual de la Automática y de la Automatización, y consecuentes con las ideas antes expuestas, podremos enunciar como característica esencial y meta de esta última, la eliminación del operador humano en el proceso de producción, no solamente en lo que se refiere al trabajo físico, suprimido ya en parte por la mecanización, sino también a la labor inteligente del operador que dirige las diferentes fases del proceso de producción. Se trata de suprimir el eslabón «hombre» en la cadena de producción, y de llegar a la fábrica «automática» (existen ya algunos ejemplos en el mundo) en la cual las máquinas regulan su propio comportamiento, realizando el proceso de fabricación, sin intervención humana, desde el principio hasta el fin. La única misión que le queda al hombre es supervisar el buen funcionamiento de las máquinas. La automatización, por otra parte, trata de sustituir la inteligencia del hombre aplicada a tareas rutinarias, no solamente en los procesos industriales, sino también en los procesos administrativos o comerciales. En este sentido se puede hablar, realmente, de una segunda revolución industrial.

Llegados a este punto, cabe preguntar cuáles son los métodos que emplea la Automática para llegar a estos resultados. Si su huella se ha dejado sentir hace sólo unos años, podría pensarse que

(2) PEDRO PUIG ADAM: *Torres Quevedo. El cálculo mecánico y la Automática*. «Revista de la Real Academia de Ciencias», Madrid, tomo XLVII, cuaderno 1º

(3) JOSÉ GARCÍA SANTESMASES: *Switching research in Spain*. Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching. Universidad de Harvard, Cambridge, Mass. (EE. UU.).

ello es debido a la aparición de algún principio fundamental nuevo, del cual dimanaría todo el progreso realizado. No es así, sin embargo.

El proceso de realimentación (feedback), que se considera por muchos como fundamental en Automática, es no solamente conocido, sino también aplicado desde hace muchos años. Basta recordar el regulador de fuerza centrífuga inventado por Watt en 1788. Ahora bien, el hecho importante ocurrido en los últimos años ha sido edificar una ciencia coherente basada en este fenómeno de la realimentación, universalizándolo y unificando los métodos de investigación y estudio, sea cual fuere su aplicación. El fenómeno de realimentación se había utilizado en la regulación de motores, en reguladores de tensión, en amplificadores electrónicos, etc., pero los estudios llevados a cabo en cada uno de estos campos se realizaron independientemente, ignorándose mutuamente, y por consiguiente desconociendo los principios comunes a todos ellos. El conocimiento de esta base común permitió el estudio e investigación matemática, de forma general, de los problemas que resultan de la aplicación del principio de realimentación.

Los primeros trabajos, donde se inicia el estudio analítico de estos sistemas (concretamente de los servomecanismos, que podemos considerar como sistemas de realimentación donde la variable regulada es una posición mecánica), fueron publicados por Hazen e Ivanoff en 1934 (4). Durante la segunda guerra mundial estos estudios se desarrollaron extraordinariamente, publicándose en la postguerra la información obtenida en forma de libros y artículos en revistas (5).

Según es sabido, en los sistemas de realimentación la diferencia entre el valor real de la variable regulada y el valor deseado de la misma (es decir, el error) se utiliza para regular el propio sistema.

(4) HAZEN, H. L.: *Theory of Servomechanisms*. «J. Franklin Inst.», 1934, 218; 3, 279. IVANOFF, A.: *Theoretical Foundations of the Automatic Regulation of Temperature*. «J. of Institute of Fuel.», 7, 117, 1934.

(5) Entre las aportaciones españolas en este campo hay que destacar la interesante comunicación presentada por D. Pedro Puig Adam en el Coloquio sobre «Les Machines à Calculer et la Pensée humaine», París, 1951, titulada *Les systèmes retroactifs en chaîne et les fractions continues*.

También hay que destacar la excelente monografía sobre estos temas, primera escrita en lengua española, debida, al también Académico de esta Corporación, D. Antonio Colino, que lleva por título: *Teoría de los servomecanismos*. Publicaciones del Instituto Nacional de Electrónica, 1950.

Esta diferencia se mide en el órgano detector de error y una vez amplificada actúa sobre los mecanismos de gobierno.

Es interesante observar que el proceso de realimentación se cumple, también, en cierto modo, en los sistemas de regulación a bucle abierto (*open loop*), que por principio mismo no son sistemas de realimentación desde el punto de vista automático. En efecto, en estos sistemas, el punto de realimentación se cierra a través del operador humano, el cual observa las desviaciones del comportamiento real del sistema respecto del deseado y aplica las correcciones convenientes, es decir, el hombre actúa de detector de error y de órgano regulador.

Ahora bien, el progreso de la tecnología ha puesto en evidencia, que en muchas ocasiones, cuando se trata de procesos complejos, el operador humano se adapta mal a esta función reguladora. En estos casos, ha sido preciso sustituir el eslabón humano en el bucle de realimentación, por aparatos sensibles que cumplen mejor su tarea. Esta observación es importante. Llega un momento en que el hombre no está a la altura de las máquinas, no puede competir con ellas, hay que eliminarlo porque al lado de éstas es torpe, sus sentidos no están perfeccionados, sus reflejos no son tan rápidos, tiene imaginación... y, en fin, porque es un hombre.

Esto nos muestra las dos vertientes de la Automatización. Por un lado lleva consigo la liberación del operador humano de los trabajos rutinarios (aspecto muy importante desde el punto de vista social), pero, por otro, las máquinas también quedan liberadas de las restricciones impuestas por la limitación de las facultades del hombre.

Incidentalmente hay que hacer notar que el fenómeno de la realimentación, así como las posibles oscilaciones que le acompañan, tienen lugar en campos muy diversos, y alejados de los problemas de regulación automática que estamos tratando. Así, se presenta en los sistemas económicos: las fluctuaciones periódicas de la actividad económica, con épocas de prosperidad y de depresión, estudiadas hace años por Keynes, son un ejemplo de oscilaciones producidas en un sistema de realimentación.

Podríamos citar otros ejemplos, en este sentido, pero acaso el más interesante es el que se refiere al hombre y a los animales, analizado por Wiener. La coordinación de los movimientos en el hombre es debido a un fenómeno de realimentación. El hecho simple de mover la mano para coger un objeto que está en la mesa, se realiza

por un proceso de realimentación visual, observando la posición de la mano y corrigiéndola continuamente hasta alcanzar su objetivo. Los ojos envían la información al cerebro, indicando la forma cómo se está realizando la operación, y el cerebro, de acuerdo con esta información, transmite las instrucciones precisas para modificar convenientemente la acción de los músculos, hasta que la mano logra coger el objeto. Wiener analiza algunas enfermedades, como la *ataxia locomotriz*, en la que las sensaciones que experimentan las piernas del paciente no se transmiten al cerebro, es decir, se ha roto este circuito de realimentación. En estas condiciones, el enfermo debe mirar siempre a las piernas cuando anda, con objeto de vigilar sus movimientos, lo cual no es necesario a las personas normales.

Si bien en el proceso de la Automática ha intervenido, como uno de los factores esenciales, el desarrollo de los sistemas de realimentación, hay que considerar, también, otros no menos importantes, como son la teoría de la información (6) y las calculadoras electrónicas (en realidad podríamos denominarlas, de una forma más general, máquinas elaboradoras de información) que en estos últimos años han evolucionado de forma impresionante.

Otras causas han contribuido, también, al florecimiento actual de la Automática; así, hay que considerar el avance tecnológico producido durante la última guerra mundial y después de ella. En efecto, las necesidades militares hicieron avanzar en forma insospechada las técnicas de la electrónica y de la regulación automática, y en la postguerra han sido las aplicaciones militares las que se han acogido más abiertamente y sin reservas a los procesos de automatización. Así, por ejemplo, el problema de los proyectiles dirigidos exige un cerebro electrónico que tenga memoria, posibilidad de realizar cálculos y de tomar decisiones con gran rapidez, al propio tiempo que regula el movimiento del proyectil partiendo de estas decisiones. Esta aplicación incesante de la Automática a los problemas militares, ha hecho decir al ingeniero Ramo, de la Ramo-Wooldridge Co., «que el ingrediente más importante de la tecnología militar moderna no es, como se supone corrientemente, alcanzar la potencia explosiva

(6) En la literatura española sobre esta materia hay que señalar los interesantes trabajos de D. Antonio Colino: *Una introducción a la teoría del filtrado y de la predicción*. «Rev. Ciencia Aplicada», enero-febrero 1952. *Una introducción a la teoría de la información*. «Rev. Instituto Nac. Electrónica», enero 1958 y abril 1959.

máxima contenida en una sola bomba, sino la tendencia operativa hacia sistemas cada vez más automáticos».

Simultáneamente, las aplicaciones militares impulsan el avance tecnológico en otras direcciones. Al propio tiempo que se lucha por obtener aparatos cada vez más complejos, se tiende a la reducción de las dimensiones y peso del material y a incrementar su seguridad; y se comprende la dificultad de compaginar estos objetivos, muchas veces contradictorios. Esto ha tenido como consecuencia afinar en las componentes y técnicas empleadas, utilizando cada vez más transistores, ferritas y aparatos de tipo magnético.

En fin, para terminar con esta enumeración de las causas que explican el estado actual de la Automática, debemos señalar, también, el proceso de mecanización, cada vez más intenso, llevado a cabo durante los últimos años en las grandes industrias, particularmente americanas, como la de automóviles, alimentos, etc.

EVOLUCION, ESTADO ACTUAL Y FUTURO DE LAS CALCULADORAS

El desarrollo prodigioso de las máquinas calculadoras ha sido, según hemos indicado, un factor importante en el desarrollo de la Automática.

No voy a hacer aquí una descripción de tales máquinas, sobre las cuales hay abundante bibliografía, pero sí creo interesante señalar sus características esenciales y recordar brevemente la aleccionadora historia de su evolución, con el fin de obtener una visión general de este campo de la Ciencia y de la Técnica en la actualidad, lo que nos permitirá explicar su importante papel como poderoso auxiliar de la Automática.

Según es sabido, las máquinas calculadoras pueden clasificarse en dos grandes grupos perfectamente diferenciados en su estructura misma y en la forma que realizan los cálculos: Máquinas analógicas y máquinas digitales.

MÁQUINAS ANALÓGICAS

En las *analógicas* los números están representados por magnitudes físicas (potenciales o corrientes eléctricas, rotaciones de determinados ejes, etc.); las relaciones entre los primeros se sustituyen por las correspondientes relaciones entre los segundos y, por consiguiente, un proceso matemático se transforma en un proceso operativo sobre ciertas magnitudes físicas, conducente a un resultado físico que corresponde, precisamente, a la solución matemática buscada. Por tanto, una máquina de este tipo crea, por analogía, un modelo físico del problema matemático que se trata de resolver. De ahí el calificativo dado a estas máquinas. Hay que destacar que en ellas se opera sobre variables continuas, en contraste con las digitales, que lo hacen sobre cantidades discretas. Su exactitud viene limitada por los errores en las medidas de las magnitudes físicas que intervienen y, además, por los errores propios del proceso analógico utilizado.

Las primeras calculadoras de este tipo fueron mecánicas, y en ellas las variables están representadas, en general, por desplazamientos angulares de ejes. Lord Kelvin, en 1876, introdujo el principio de funcionamiento de una máquina capaz de resolver ecuaciones diferenciales. Si bien su elemento básico, el integrador mecánico, llegó a construirse, la escasa potencia disponible a su salida impedía la interconexión de varios integradores, y, por consiguiente, la resolución mecánica de ecuaciones diferenciales no pudo lograrse.

Cronológicamente, y en lugar de honor, hay que citar a Torres Quevedo, que en 1893 presentó a esta Academia una memoria sobre calculadoras, que fué favorablemente informada y publicada en 1895, después de un estudio crítico exhaustivo de D. Eduardo Saavedra, en el que expone la labor de Lord Kelvin y otros investigadores anteriores, y precisa los puntos de contacto con los trabajos de Torres Quevedo, señalando las concepciones originales de éste. Siguiendo en su labor investigadora, en 1900 presenta una Memoria a la Academia de Ciencias de París, que fué favorablemente informada por Appel y Poincaré.

De la gama de ingenios y dispositivos analógicos debidos a la feliz inventiva de Torres Quevedo, hay que destacar sus interesantes máquinas para resolver ecuaciones algebraicas. Asimismo, construyó calculadoras para integrar ecuaciones diferenciales de tipo particular, si bien sus concepciones teóricas fueron más lejas, ideando dispositivos para integrar tipos muy generales de ecuaciones o sistemas de ecuaciones diferenciales (7).

Hubieron de pasar cerca de treinta años para que la máquina de tipo general, para resolver ecuaciones diferenciales, preconizada por Torres Quevedo, se convirtiera en realidad. Se trata del Analizador Diferencial construido por Busch en el Instituto Tecnológico de Massachussets (8). Más tarde, en 1945, Busch y Caldwell presentan un nuevo Analizador Diferencial, construido durante la guerra, en el que si bien los integradores siguen siendo mecánicos, las in-

(7) A esta brillante aportación española a las calculadoras mecánicas, podemos añadir la realizada por P. Castells, Profesor de la Escuela de Ingenieros Industriales de Barcelona, inventor de la *balanza algebraica* (1908), mediante la cual se pueden obtener raíces reales de ecuaciones algebraicas con una sola incógnita, y del *polipasto algebraico* (1932), cuya finalidad es resolver sistemas de ecuaciones de primer grado.

(8) V. BUSH: «Journal of the Franklin Institute», 212, 447, 1931.

terconexiones entre ellos son eléctricas, con lo cual se eliminan los puntos débiles de la máquina anterior (9).

Con este Analizador y otros similares construidos en diferentes países, se termina una etapa importante de las calculadoras analógicas. Aquéllos han sido y siguen siendo de gran utilidad, pero ya no se construyen nuevos modelos; han cedido el paso a las calculadoras analógicas electrónicas.

Sin duda alguna, el nacimiento de éstas fué favorecido notablemente por el clima creado en torno a las calculadoras mecánicas.

El extraordinario desarrollo de las técnicas electrónicas permitió sustituir los elementos mecánicos fundamentales, sumadores, multiplicadores e integradores, por unidades basadas en circuitos electrónicos. Comenzaron a construirse calculadoras con objetivos limitados, dedicándose preferente atención a los analizadores diferenciales.

Las operaciones de inversión de signo, suma, multiplicación por una constante e integración, se verifican mediante los *amplificadores operativos*, que consisten en principio, en amplificadores de corriente continua de ganancia elevada, con realimentación de tensión a través de una impedancia y con otra impedancia conectada a la entrada de aquéllos. Estos elementos constituyen la *parte lineal* de la calculadora, mientras que la *parte no lineal* comprende los multiplicadores de funciones y generadores de funciones. Mediante la conexión adecuada de estos elementos, se puede lograr la resolución de ecuaciones y sistemas de ecuaciones algébricas, ecuaciones y sistemas de ecuaciones diferenciales, etc.

En 1952, cuando estas máquinas se hallaban en su fase evolutiva, se inició en el Instituto de Electricidad del C. S. I. C. el estudio e investigación de las mismas, emprendiéndose más tarde la construcción de un Analizador Diferencial, que se terminó en 1954 y que fué presentado al Primer Congreso Internacional de Cálculo Analógico celebrado en Bruselas en 1955. Esta máquina permite la resolución de ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes y variables y ecuaciones diferenciales no lineales. No voy a hacer una descripción de esta calculadora, pues no creo sea ocasión oportuna para ello, y además caería en pecado de reiteración, dado que ha sido

(9) V. BUSCH y S. H. CALDWELL: «Journal of the Franklin Institute», 240 255, 1945.

objeto de publicaciones especiales (10). Solamente indicaré que está constituida por 16 amplificadores operativos, un multiplicador-divisor a integraciones periódicas, otro basado en la diferencia de cuadrados y un generador de funciones que emplea diodos para generar curvas por sucesión de tramos rectos. No quiero terminar, sin señalar la destacada aportación en la construcción de esta máquina de mis colaboradores Dres. Civit Breu y González Ibeas.

Para completar estos comentarios sobre las calculadoras analógicas, deseo referirme al interés que presentan ciertos métodos o procedimientos analógicos de estudio de determinados problemas como, por ejemplo, la transmisión del calor mediante sistemas físicos, diferentes en su estructura, pero directamente análogos en su comportamiento. Puede establecerse una correspondencia unívoca entre los elementos de uno y otro sistema, entre las magnitudes físicas que intervienen y entre las excitaciones y respuestas obtenidas en ambos. Estos procedimientos muestran todo su interés, cuando se trata de estudiar campos en los que las medidas resultan difíciles. Así, en el problema antes citado, de la transmisión de calor, las medidas de temperatura pueden ser sustituidas por medidas de potenciales eléctricos, mucho más sencillas, si se emplea una analogía eléctrica. Si bien estos métodos no pueden incluirse, estrictamente, dentro de las máquinas calculadoras analógicas, es indudable que en ellos se hace uso del principio de analogía en una primera etapa directamente física, muchas veces sin intentar un planteamiento matemático del problema, que podría resultar lleno de dificultades, y exigiría, precisamente, utilizar una calculadora para su solución.

Nos limitamos a mencionar las analogías eléctricas más usadas: la cuba electrolítica, las láminas conductoras y las redes de resistencias.

MÁQUINAS DIGITALES MECÁNICAS Y DE RELÉS

En las *calculadoras digitales* o aritméticas los números se introducen en la máquina en forma discreta, según un determinado código, y las operaciones se verifican, simplemente, contando.

(10) J. GARCÍA SANTESMASES: *Analyseur différentiel électronique* I. E.-C. S. I. C. Actas de las «Journées Internationales du Calcul Analogique», pág. 82 (1956).

Se ha publicado una descripción detallada de esta calculadora: «Analizador diferencial electrónico (Investigación, proyecto y realización)». Premio «Juan de la Cierva» 1954. Madrid, 1955.

do. Los dígitos están representados, según el tipo de máquina, por impulsos eléctricos, por los dientes de una rueda dentada, etc. Un ejemplo de máquina digital es la calculadora ordinaria de pupitre, usada normalmente en oficinas, Bancos, etc. Sin embargo, existe una diferencia esencial entre estas máquinas y las grandes calculadoras automáticas. En las primeras, cada una de las operaciones aritméticas que constituyen un problema matemático se realizan separadamente, paso a paso; para cada operación es preciso poner la máquina a punto, introducir los datos y obtener el resultado, y así sucesivamente. En las segundas, se introducen inicialmente todas las instrucciones necesarias para la resolución del problema, así como los datos numéricos, y entonces la máquina realiza todas las operaciones aritméticas sucesivamente, registrando los resultados intermedios y, en fin, dando el resultado final. Todo problema matemático, por complicado que sea, y que pueda reducirse a un proceso aritmético, es susceptible de ser resuelto por ellas. En algunos casos esta reducción del problema a métodos aritméticos se hace difícil, y en este sentido la utilización de estas máquinas exige en ocasiones una labor ardua por parte del operador que debe confeccionar las instrucciones o programas. Esto parece a primera vista una objeción seria a estas máquinas, pero no es así si se tiene en cuenta que el tiempo empleado en la realización del programa queda de sobra compensado por la rapidez extraordinaria de cálculo de la máquina.

Las primeras ideas sobre una calculadora automática digital no son nuevas, se remontan al siglo pasado. En 1835, Babbage expuso el principio de funcionamiento de su *máquina analítica* (que así de nominó a la calculadora), cuyo proyecto desarrolló en años sucesivos, basándose, naturalmente, en elementos mecánicos, lo cual complicaba extraordinariamente algunos aspectos de la máquina. Constaba de tres partes: la memoria, donde se almacenaría la información numérica en una serie de contadores; la unidad aritmética, encargada de hacer las operaciones con los números obtenidos de la memoria y la unidad de control o gobierno de las distintas operaciones, que establecería el orden de ejecución, utilizando tarjetas perforadas como las empleadas en algunos telares (11). Sin embargo, esta concepción genial de Babbage se estrelló con los medios puramente mecánicos de que se disponía en aquella época y no pudo

(11) C. BABBAGE: *Passages from the life of a Philosopher*. Longmans, Londres, 1864.

ver realizado el sueño de su vida. Babbage vivió la tragedia y luego ha tenido la gloria de adelantarse a su tiempo en casi un siglo. Únicamente una parte de la unidad aritmética llegó a construirse y no por el mismo Babbage sino, ya después de su muerte, por su hijo.

Es sumamente curioso observar cuánto se aproximó Babbage al concepto que hoy se tiene de una calculadora digital automática. Para ello recordemos, brevemente, que ésta consta, esencialmente, de los siguientes órganos: El de entrada, donde se introducen en la máquina los datos del problema, las constantes que intervienen en su solución y el programa o conjunto de instrucciones para realizar las operaciones según un orden determinado. La unidad aritmética, única parte de la máquina que realiza cálculos, es decir, capaz de generar nuevos números. La memoria, órgano donde se almacena toda la información introducida en la máquina, esto es, los datos iniciales y las instrucciones necesarias, así como los resultados intermedios que surgen en el proceso del cálculo. La unidad de salida, órgano por el que la máquina comunica al exterior los resultados deseados. Y, en fin, el control o gobierno que recibe el programa de instrucciones de la memoria y se encarga de que sean ejecutadas en el orden previsto. También hay que señalar uno de los aspectos más interesantes de estas máquinas: su facultad discriminativa o de decisión, mediante la cual, el orden en que se realizan los cálculos puede ser modificado automáticamente como consecuencia de los resultados intermedios que se obtienen.

Si para muchos quedó olvidada la obra de Babbage, no fué así para nuestro gran compatriota Torres Quevedo, que la conocía bien, e intuyó, certeramente, la causa fundamental de su fracaso. Así, al propio tiempo que rinde tributo a su genio, dice: «A pesar de su gran mérito, respecto al cual nadie puede dudar, a pesar de su inteligencia, espíritu de sacrificio y tenacidad, no tuvo éxito... y sería imprudente seguir su línea de trabajo, mientras no se hallen nuevos principios mecánicos»; de ahí su idea de sustituir los artificios mecánicos por electromecánicos, la única posibilidad en su tiempo, lo que llevó a cabo felizmente en su aritmómetro electromecánico. Este aparato permitía realizar sumas, restas, multiplicaciones y divisiones automáticamente. Estaba el aritmómetro conectado directamente a una máquina de escribir; en ésta se tecleaban los números y la operación deseada, y la máquina inscribía el resultado. Si bien Torres Quevedo no llegó a la meta ambicionada por Babbage y lograda por las máquinas modernas, es decir, desarrollar automáticamente un programa

complejo de cálculo, demostró, sin duda alguna, que se podían construir aparatos que poseyeran la facultad de decisión, que, como hemos visto, es uno de los aspectos esenciales de las calculadoras actuales. En este sentido, Torres Quevedo merece un lugar destacado en la historia del Cálculo Automático.

Al Prof. Aiken cabe el honor de haber creado la primera gran calculadora digital completamente automática (Mark I) (12). Fué construida durante la pasada guerra mundial y terminada en 1944, instalándose en el Computation Laboratory de la Universidad de Harvard.

El progreso técnico de aquella época, en lo que se refiere al campo que nos ocupa, con sus calculadoras comerciales (manuales y eléctricas) y sus máquinas de tarjetas perforadas, había creado un clima maduro para esta gran empresa; pero hacía falta el hombre de gran visión que la llevara a cabo, partiendo de las técnicas existentes, y este hombre fué Aiken. La tarea, sin embargo, no era fácil y hubieron de pasar siete años desde las primeras ideas y proyectos a su completa realización. Si bien el principio operativo de esta máquina es mecánico, utiliza también componentes eléctricas. En su funcionamiento es similar a la de Babbage, pero en su estructura es totalmente diferente. Los números se almacenan en contadores constituidos por ruedas, cada una de las cuales puede adoptar diez posiciones distintas, y pueden, al propio tiempo, trabajar como sumadores. La memoria está constituida por 72 registros o acumuladores capaces de almacenar cada uno un número de 23 cifras decimales. El principio operativo consiste en lo siguiente: un eje se mueve continuamente a una velocidad angular constante y su movimiento de rotación puede transmitirse a los contadores mecánicos mediante embragues electromagnéticos accionados por relés; éstos a su vez pueden controlarse a través de otros contadores, de las tarjetas perforadas, que constituyen la entrada y salida de la máquina, etc.

No voy a entrar en detalle sobre esta calculadora, ya que no creo sea la ocasión oportuna para ello, pero sí creo interesante señalar que desde su construcción ha estado funcionando normalmente durante veinticuatro horas diarias. Sin duda alguna, a pesar de que posteriormente las calculadoras se han desarrollado en forma impre-

(12) H. H. AIKEN y G. H. HOPPER: «Electronic Engineering», 65, 384, 449, 552, 1946.

sionante con ayuda de la electrónica, esta primera máquina quedará para siempre incorporada a la historia de los progresos científicos.

Si la Mark I utilizaba relés únicamente para gobernar la operación de los elementos mecánicos, las máquinas inmediatamente posteriores los emplearon incluso para realizar la memoria y la unidad aritmética. Estas calculadoras de relés (que por esta denominación son conocidas) constituyen el eslabón entre las mecánicas y las electrónicas. Entre las más importantes cabe enumerar la Mark II de Harvard, con unos 1.500 relés; las construidas en la Bell Telephone; la dirigida por el Dr. Zuse (otro de los «pioneros» en el campo de las calculadoras), y la BARIS, realizada en Suecia.

Si en las calculadoras mecánicas es adecuado el uso del sistema decimal de numeración, no ocurre lo mismo en las de relés y electrónicas. En éstas es más sencillo utilizar el sistema binario, en el que los dos únicos dígitos a representar, el 0 y el 1, se relacionan directamente con las dos posiciones que presenta un relé, esto es, abierto o cerrado, o los dos estados, de conducción o no conducción, de una válvula electrónica. Análogamente la presencia o ausencia de un impulso eléctrico en los diferentes puntos de la máquina, puede ser una representación binaria.

Aunque las máquinas de relés siguen aún funcionando, ya no se construyen nuevos modelos, dadas las ventajas de las electrónicas; en efecto, los elementos utilizados en éstas son más económicos y seguros que los relés y, sobre todo, su velocidad operativa es incomparablemente mayor. Así, mientras que la constante de tiempo de un relé es del orden de 10 a 15 milisegundos, la de los circuitos utilizados en las calculadoras electrónicas, puede reducirse al microsegundo.

MÁQUINAS DIGITALES ELECTRÓNICAS

La primera máquina electrónica, la ENIAC, fue construida en la Universidad de Pennsylvania por Mauchly y Eckert, e inaugurada en 1946. En líneas generales puede considerarse como la versión electrónica de la Mark I de Harvard.

A esta máquina siguieron otras, también electrónicas, entre las que hay que destacar la construida por la IBM y la Mark III de Harvard. Es la primera etapa, lo que podríamos llamar la infancia de las calculadoras electrónicas.

Fué en esta época, en los años 1951-52, cuando mi buena fortuna

me llevó al célebre Laboratorio de Cálculo de la Universidad de Harvard. Pensionado por el C. S. I. C., que desde el primer momento intuyó certeramente la importantísima función que estas máquinas tendrían en el futuro, permanecí más de un año en Harvard, durante la construcción de la Mark IV, que había de ser la última de las calculadoras construidas en aquel Laboratorio y primera electrónica con características completamente nuevas para aquel tiempo, incorporando elementos magnéticos para los circuitos de memoria: el cilindro para la memoria lenta y los núcleos de ciclo de histéresis rectangular para la rápida. Mi estancia en aquel Laboratorio me proporcionó ocasión incomparable para descubrir poco a poco las atrayentes facetas del mundo maravilloso que se presentaba ante mi vista; fué una lección directa y viva, que si traté de aprenderla con ahínco, su misma grandeza me llevó a la humildad. La benevolencia del Prof. Aiken, y el espíritu de equipo que reinaba en aquel Laboratorio, me permitió colaborar activamente en sus trabajos y dejar una modesta huella en la Mark IV (13).

Por aquella época, Europa, con algún retraso sobre América, comenzaba a desarrollar sus propias máquinas, particularmente en Inglaterra; la escuela de Harvard, representada por científicos que habían trabajado con Aiken, se extendía por nuestro continente, y se estaban construyendo máquinas en Francia, Bélgica, Suiza y otros países. Todos ellos deseaban poseer *su máquina*, grande o pequeña, la proyectada y realizada por ellos mismos, asimilando las técnicas americanas y desarrollando las propias.

De regreso a España creí llegado el momento oportuno para iniciar las investigaciones conducentes a la construcción de una calculadora digital en nuestro país, proyecto que tuvo cálida aceptación en los medios responsables del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Los estudios se iniciaron en el Instituto de Electricidad, pero, a pesar del decidido apoyo del C. S. I. C., los medios económicos de que disponíamos eran escasos frente a la magnitud de la empresa; así pues, decidimos llevarla a cabo en etapas sucesivas, esperando que el futuro nos ofreciera, acaso, circunstancias más propicias. La primera de estas etapas se cumplió al terminarse en 1956 la cons-

(13) J. GARCÍA SANTESMASES: *The Shift Circuit*. «Progress Report», núm. 21. The Computation Laboratory, Universidad de Harvard (Cambridge, EE. UU.), 10 nov. 1951-10 feb. 1952.

trucción del Acumulador Electrónico Digital (Unidad aritmética de la máquina), que permite sumar dos números de ocho cifras decimales en un tiempo inferior al milisegundo, es decir, realizar más de mil sumas por segundo (14).

Es para mí muy grato destacar, en estos momentos, la importante contribución del Dr. J. J. Sánchez Rodríguez en la construcción de este Acumulador Digital, así como las aportaciones de los señores Mellado, Miró y Solé.

Desgraciadamente, a causa de las dificultades económicas crecientes al iniciar la segunda etapa, y muy a pesar mio, sintiéndolo sobre todo por mis colaboradores que tanto entusiasmo e ilusiones habían puesto en terminar la calculadora, hube de desistir de su continuación, que sólo sacrificios nos había costado a todos.

Ruego perdonéis este inciso y excuséis estas referencias a la máquina no terminada. Acaso por esto mismo, la tengo más cariño que a otros trabajos en que la fortuna me fué más propicia, como ocurre a los padres con los hijos a los que acompaña la desgracia.

Entre las aportaciones españolas actuales al cálculo digital, hay que subrayar las muy valiosas de Puig Adam, que se refieren particularmente a los circuitos y funciones de conmutación (15).

(14) Este Acumulador digital se comenzó en 1952 partiendo de las técnicas conocidas en aquella época. Casi todas las funciones lógicas se realizaron mediante circuitos de conmutación con diodos, eligiéndose los de selenio por ser más económicos que los de germanio. El Acumulador Digital consta de los siguientes órganos: a) *Un generador de números*, cuya misión es introducir en la máquina los sumandos que previamente se marcan manualmente. Este generador está constituido por dos elementos fundamentales: el contador de intervalos dígitos y el registro de entrada. b) *El semisumador y sumador de la cifra transportada*, que es la parte del Acumulador donde se realizan las operaciones aritméticas de suma o multiplicación (sumas repetidas). c) *Registro del Acumulador y Sub-registro*, cuya misión conjunta es recibir y almacenar el resultado de cada operación del semi-sumador, al propio tiempo que libera su contenido sobre el sumador de la cifra transportada. d) *Control o gobierno*, que tiene por objeto coordinar las diferentes operaciones.

Una descripción de este Acumulador digital se halla en la última parte del trabajo: J. GARCÍA SANTESMAS: *Contribución al desarrollo e investigación de las máquinas calculadoras electrónicas y sus elementos básicos*. Premio «Francisco Franco» de Investigación Técnica (1957).

(15) P. PUIG ADAM: *Método gráfico y algebraico para el proyecto de circuitos electrónicos de cálculo*. «Rev. Ciencia Apl.», julio 1952. *Un ingenio eléctrico para resolver problemas de lógica formal*. «Rev. Real Academia Ciencias», tomo LIII, cuad. prim., 1959.

La infancia de las calculadoras duró poco. Su crecimiento ha sido rápido. La demanda cada vez mayor de estas máquinas hizo nacer una potente industria que, paralelamente a las investigaciones llevadas a cabo en las Universidades y centros estatales, permitió desarrollar una nueva tecnología, que las ha ido perfeccionando cada vez más, lográndose calculadoras más complejas, mayores, y con objetivos más ambiciosos.

La mayoría de las máquinas actuales se construyen utilizando transistores y diodos para los circuitos lógicos y de cálculo, y núcleos magnéticos para los sistemas de memoria. La eliminación de las válvulas ha permitido una mayor flexibilidad en el proyecto de los circuitos de cálculo y, además, ha evitado la redundancia de muchos de éstos que, si necesaria cuando se usan aquéllas, no lo es con las componentes de estado sólido, dada su seguridad de funcionamiento.

Antes se establecía una clara diferencia entre máquinas grandes, de tipo medio y pequeñas, refiriéndose al tamaño y capacidad de las mismas. Hoy, esta distinción se desvanece gradualmente; en efecto, el uso de componentes de estado sólido permite lo que se denomina la construcción *modular*, es decir, sistemas que pueden acoplarse entre sí, para lograr la configuración deseada desde una máquina pequeña hasta una muy grande.

También hace algunos años se consideraba que las calculadoras destinadas a la resolución de problemas científicos y de ingeniería, debían ser esencialmente distintas de las dedicadas a problemas administrativos. Esta distinción era debida a que las primeras exigen la realización de gran número de cálculos, con un número de datos relativamente pequeño; por consiguiente, si bien se necesitaba gran capacidad en el órgano aritmético, los de entrada y salida podían ser reducidos. En los problemas administrativos, por el contrario, se deben manipular gran número de datos, siendo, en general, sencillos los cálculos a realizar sobre ellos; esto implicaba órganos de entrada y salida amplios, que se obtenían, en ocasiones, con varios de éstos, trabajando en paralelo, para que pudieran compensar la pequeña velocidad de los mismos. Sin embargo, se ha llegado posteriormente a la conclusión, de que, si bien es cierto que el número de datos requeridos en los problemas científicos y de ingeniería es pequeño, su introducción representa una parte importante del tiempo empleado en la realización de los cálculos y, por consiguiente, bajo este punto de vista, conviene disponer de órganos de entrada y salida de gran velocidad, exactamente lo mismo que inte-

resa en las máquinas destinadas a usos administrativos. Por otro lado, tanto en un caso como en otro, resulta ventajoso disponer de memorias rápidas. En definitiva, las máquinas que se construyen actualmente son de propósito universal, es decir, para que puedan utilizarse tanto para fines científicos como administrativos. Esto no quiere decir, sin embargo, que no existan máquinas dedicadas a objetivos muy especiales, que se construyen adaptadas directamente a la misión deseada. Por ejemplo, existen calculadoras para Bancos, para oficinas de reservas de billetes de ferrocarril y líneas aéreas, para control de tráfico aéreo, etc.

Dentro de este grupo de calculadoras de tipo especial, merece destacarse el complejo denominado SAGE (Semi-Automatic Ground Environment), desarrollado bajo el patrocinio de las Fuerzas Aéreas Americanas. Los datos procedentes de centenares de estaciones de radar situadas a lo largo de las fronteras de los Estados Unidos son enviados automáticamente y analizados por esta calculadora, proporcionando una representación visual de la situación estratégica del país. Al propio tiempo, en caso de alarma general, automáticamente, da órdenes para la dirección y control de los aviones de defensa, intercepción y teleguía de los proyectiles tierra-aire. Otro proyecto, en desarrollo, consiste en un sistema de comunicaciones y calculadoras que permitirá conocer en cada momento la situación de hombres y material, indicando, al propio tiempo, la forma óptima de utilizarlos en caso de emergencia.

Las investigaciones actuales están dirigidas a obtener mayor rapidez aún, mayor capacidad de almacenamiento y dimensiones más reducidas. Para ello, se trata de mejorar, por un lado, la estructura lógica de las mismas, simplificando los circuitos, los programas, lo cual por sí mismo conduce a una mayor velocidad de operación y, por otro lado, aplicar nuevas técnicas que, con elementos intrínsecamente más rápidos, permitan aumentar el ritmo de funcionamiento de la calculadora y reducir su volumen.

NUEVAS TÉCNICAS EN CALCULADORAS

En el campo de las nuevas técnicas hay que destacar el empleo de películas magnéticas muy delgadas, en sustitución de los núcleos de ciclo de histéresis rectangular. Estas películas, cuyo espesor es del orden de la diezmilésima de milímetro, se obtienen por evapo-

ración, en alto vacío, de una aleación magnética que se deposita sobre un soporte de vidrio u otro material no magnético. Bien haciendo que los átomos evaporados incidan oblicuamente sobre el soporte o aplicando un campo magnético durante el proceso de evaporación, se consigue el desarrollo de una dirección de magnetización preferente, es decir, que la película presente anisotropía uniaxial.

Esta propiedad, unida a la geometría plana del sistema, modifica esencialmente el comportamiento de las películas, respecto al del mismo material en capas más gruesas.

La película puede presentar un solo dominio magnético, aun en ausencia de campo magnetizante, en contraste con la estructura de multidominios, clásica del material en capas gruesas. Además, el vector imanación queda obligado a permanecer en el plano de la película, para evitar el fuerte campo desmagnetizante que aparecería en otro caso, todo lo cual hace que el material presente un ciclo de histéresis rectangular casi perfecto para campos aplicados en la dirección de fácil imanación. Si el campo aplicado es opuesto a la dirección inicial de magnetización, el único efecto posible, si aquél es de intensidad suficiente, es provocar un giro de 180° en el vector imanación, que de este modo queda alineado con el campo. El interés del proceso de inversión, análogo en principio al de los núcleos toroidales antes descrito, reside en que tiene lugar de modo rapidísimo, por producirse el giro brusco del vector imanación en unos pocos milimicrosegundos, mientras que en los núcleos toroidales la inversión de la magnetización tiene lugar mediante la nucleación y posterior crecimiento de dominios, magnetizados en sentido opuesto al inicial.

Potencialmente, pues, las películas magnéticas constituyen elementos de velocidad intrínseca de operación muy elevada, lo que permitirá en el futuro lograr máquinas unas mil veces más rápidas que las actuales. Con las películas delgadas se puede obtener, al mismo tiempo, un aumento considerable de la densidad de inscripción de la información, esto es, del número de dígitos almacenables por unidad de superficie, lo que lleva consigo una reducción notable del volumen utilizado.

Estas cualidades de las películas magnéticas delgadas han tenido la virtud de hacer converger hacia ellas la atención de gran número de investigadores. Así, se han hecho ensayos para lograr elementos de conmutación y se han obtenido modelos experimentales de memo-

rias estáticas, sustituyendo los núcleos por películas magnéticas (16).

También en esta dirección están dirigidos nuestros trabajos actuales sobre circuitos ferromagnéticos de cálculo y control. El grupo español que trabaja en este campo desde hace bastantes años, entre cuyos componentes hay que destacar la labor de los Dres. Rodríguez Vidal, Alique y Lloret (17), ha conseguido últimamente desarrollar un sistema completo de circuitos lógicos ferromagnéticos aplicable a calculadoras digitales. En este sistema, aparte de los circuitos biestables y los registros de corrimiento, se obtienen los circuitos de decisión, que realizan las operaciones lógicas fundamentales («Y», «O», «inhibición»), mediante circuitos ferromagnéticos exclusivamente (18). La velocidad operativa queda, sin embargo, limitada por el incremento que experimentan las pérdidas en el núcleo al aumentar la frecuencia. Esperamos que con el uso de estas películas magnéticas, cuyos primeros ensayos experimentales hemos comenzado, con la generosa ayuda del Organismo Americano de Investigaciones Aeroespaciales, podremos aumentar la velocidad operativa de los sistemas ferromagnéticos. En efecto, hemos visto teóricamente que las películas magnéticas delgadas tienen un comportamiento análogo al de los núcleos magnéticos en lo que se refiere a no linealidades, pero que sus pérdidas pueden reducirse notablemente no sólo como consecuencia de utilizar mucho menor volumen de material, sino porque las pérdidas por histéresis pueden disminuir extraordinariamente, si se eligen convenientemente, el valor del campo magnético de polarización, y las direcciones de este campo y del de señal con respecto al eje de fácil magnetización.

El empleo de elementos criogénicos, es decir, que hacen uso del fenómeno de superconductividad, constituye otra de las innovaciones que prometen resultados excepcionales. El *criotróon*, es un elemento de conmutación, basado en la propiedad de que el estado superconductor desaparece bruscamente cuando se le aplica un campo

(16) J. I. RAFFEL, T. S. CROWTHER, A. H. ANDERSON y T. O. HERNDON: *Magnetic Film Memory Design*. «Proc. IRE», vol. 49, pp. 155-164, enero 1961.

(17) J. GARCÍA SANTESMASES y M. RODRÍGUEZ VIDAL: *Circuit déclencheur ferromagnétique parallèle à réaction*. «L'Onde Electrique», 35, 165, 1955. M. ALIQUÉ PAGE y J. L. LLORET SEBASTIÁN: *Circuitos ferromagnéticos de Cálculo*. «Actas del Congreso Internacional de Automática». Madrid, 1958.

(18) J. GARCÍA SANTESMASES, M. ALIQUÉ y J. L. LLORET: *Ferromagnetic Systems of Circuit Logic*. «The Proceedings of the Institution of Electrical Engineers» vol. 107, part B. no. 32, marzo 1960.

magnético suficiente (19). Esto sugiere la posibilidad de una lógica de circuitos basada en los dos estados (1 y 0) que corresponderían al de resistencia del conductor y al de anulación de esta resistencia. Ello se puede conseguir produciendo el campo magnético necesario por medio de una corriente que circula por otro conductor próximo, con lo cual el sistema se comporta exactamente igual que un relé. En los experimentos realizados se han sumergido los elementos en helio líquido; al circular la corriente por aquéllos, como se hallan en estado superconductor, no hay desprendimiento de calor por efecto Joule, y por otro lado el consumo de helio por evaporación, supone un gasto que resulta perfectamente comparable al de ventilación de las máquinas actuales.

El tiempo de conmutación de los criotrones parece ser del orden del milisegundo, con lo que su interés se reduciría notablemente. Las investigaciones sobre elementos superconductores se dirigen, pues, a conseguir una velocidad de operación mayor. En este sentido, la posibilidad más atractiva consiste en utilizar como elementos superconductores, películas muy delgadas, depositadas por evaporación en alto vacío, de modo análogo al indicado para las películas magnéticas. De esta forma, las velocidades de operación pasarían a la zona del milimicrosegundo, que es la que se pretende alcanzar con las investigaciones actuales (20).

Entre los elementos basados en principios lógicos nuevos hay que destacar el *parametrón*, inventado por los japoneses (21). Está basado en la aparición de oscilaciones paramétricas en un circuito resonante, uno de cuyos parámetros, la autoinducción o la capacidad, se hace variar sinusoidalmente siguiendo una excitación de frecuencia doble ($2f$) de la resonancia (f) del circuito. Como consecuencia del tipo de excitación utilizado, las oscilaciones a la frecuencia de resonancia pueden presentarse en dos fases posibles que difieren entre sí 180° y que se utilizan para representar los dígitos binarios 1 y 0. La utilidad

(19) D. A. BUCK: *The Cryotron, A Superconductive Computer Component*. «Proceedings of the IRE», vol. 44, pp. 482-893, 1956.

(20) L. L. BURNS, G. A. ALPHONSE, G. W. LECK: *Coincident-current Superconductive Memory*. «IRE Trans. on Electronic Computers», vol. EC-10, núm. 3, pp. 348, 1961.

(21) E. GORO: *On the application of Parametrically Excited Nonlinear Resonator*. «Denki Tssuhin Gakkai-shi», oct. 1955. J. VON NEUMANN: *Nonlinear Capacitance or Inductance Switching, Amplifying and Memory Organs*. U. S. Patent 2.815, 488, dic. 3, 1957.

del dispositivo reside principalmente en que basta introducir una señal muy pequeña de la frecuencia de resonancia, para que la oscilación se desarrolle en la misma fase que dicha señal y no en la opuesta. Se consigue así transmitir información de unos elementos a otros, y puesto que la señal necesaria es muy pequeña, no se introducen perturbaciones y pueden acoplarse muchos elementos en circuitos lógicos complejos.

Los primeros parametrones se realizaron con una autoinducción con núcleo de ferrita, que se excitaba a la frecuencia doble mediante un segundo devanado, de modo que se evitase la influencia directa de esta excitación en el circuito resonante por efecto transformador. Sin embargo, el empleo de diodos de capacidad variable con la polarización cuando trabajan en corte, parece ser el camino más prometedor. Se han construido circuitos experimentales que pueden operar con frecuencias de excitación de 450 Mc/seg., y adoptando el sistema una estructura especial, propia del trabajo a muy altas frecuencias, incluso hasta 4.000 Mc/seg. (22).

Estas nuevas directrices de la investigación en calculadoras permitirán, en un futuro no lejano, construir máquinas con velocidades de cálculo mucho mayores que las actuales. Bajo este punto de vista el proceso evolutivo de las calculadoras es impresionante; la primera construida con relés, la Mark I de Harvard, necesitaba algunos segundos para llevar a cabo una operación, mientras que actualmente se han construido máquinas que multiplican números de 15 dígitos a razón de 500.000 por segundo y realizan dos millones de sumas en el mismo tiempo.

Si nos referimos exclusivamente a las máquinas construidas por casas comerciales, dedicadas especialmente a usos científicos, el progreso también ha sido manifiesto. En la actualidad, algunas de estas máquinas, que han salido al mercado, han reducido el tiempo de adición a un valor del orden de 5 microsegundos (o sea 200.000 sumas por segundo). Esta velocidad operativa irá aumentando en los próximos años, y se predice que para 1970 se llegará a velocidades próximas a los 100 millones de sumas por segundo (10 milimicrosegundos) (23).

(22) H. E. BILLING y A. O. RUDIGER: *The Possibility of Speeding up Computers Using Parametrons*. «Proceedings of the International Conference on Information Processing». UNESCO, París, 1960.

(23) WILLIAM E. VANNAH: *Control Enters a New Decade*. «Control Engineering», enero 1960.

Con las técnicas actualmente conocidas no se puede aumentar la velocidad de operación indefinidamente, entre otras causas, debido a que el tiempo de transmisión de las señales entre los diferentes órganos de la máquina no es despreciable y puede ser comparable al tiempo necesario para la operación. A ello es debido el que actualmente se esté investigando en la posible aplicación de técnicas de microondas a calculadoras, de la que ya hemos citado un caso al hablar de los circuitos paramétricos.

Respecto a las calculadoras digitales utilizadas en Automatización, las velocidades usadas son menores. Actualmente se emplea una gama muy variada de máquinas, desde velocidades de operación de 100 sumas/seg., hasta cerca de 1.000 sumas/seg. Varían, pues, entre grandes límites según el tipo de aplicación. El empleo de estas máquinas en automatización es relativamente reciente (desde hace unos cinco o seis años), pero puede esperarse, según veremos más adelante, que en los próximos años se generalizará y asimismo aumentarán las velocidades operativas, no sólo porque así lo exigirán las necesidades de la automatización, sino porque se emplearán conjuntamente para resolver los problemas administrativos y comerciales de las propias fábricas.

Al mismo tiempo que aumenta la velocidad, la potencia necesaria para el funcionamiento de las calculadoras se irá reduciendo, y asimismo sus dimensiones. Todo hace suponer, pues, que las máquinas del futuro no se parecerán en nada a las actuales. No necesitarán albergarse en grandes habitaciones; se podrán instalar en los propios despachos de los científicos o ingenieros que las utilicen.

¿Se logrará todo esto en un futuro inmediato? Creemos que se tardará aún algunos años para que las nuevas técnicas, que acabamos de mencionar, tengan plena utilización, por lo menos, en máquinas construidas en serie. Existen varias razones para pensar esto; una de ellas, el lapso de tiempo que siempre existe entre la puesta a punto de un invento en el laboratorio y su aplicación industrial, y por otro lado, sería antieconómico para las grandes casas constructoras, que utilizan actualmente procedimientos automáticos o semi-automáticos en la fabricación de componentes de las calculadoras, cambiar radicalmente el proceso de fabricación. Es decir, nos hallamos con las dificultades inherentes a todo cambio en los métodos de fabricación, fundamentalmente de tipo económico, ajenas totalmente al problema estrictamente técnico.

SISTEMAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Uno de los campos más interesantes de la Cibernética, y también de la Automática, y que ocupa la atención de gran número de investigadores, se refiere a los denominados *sistemas de inteligencia artificial* como, por ejemplo, reconocimiento de formas, aprendizaje en las máquinas, etc. He dicho que su estudio constituye parte interesante de la Automática y de la Cibernética, y podría añadir, ahora, que también es un aspecto del *Tratamiento numérico de la información*. Si hago esta observación no es con el fin, ni mucho menos, de discriminar los objetivos y alcance de las materias que se definen bajo estas denominaciones, sino por el contrario, para mostrar que sus límites no están estrictamente definidos y que hay un solapamiento entre las materias implícitas en aquellas denominaciones.

Según es sabido, el nombre de Cibernética es debido al matemático Wiener y deriva de la palabra griega *κυβερνήτης* que significa *timonel*. Wiener define la ciencia de la Cibernética como «la teoría del control y de las comunicaciones en las máquinas y en los animales». Si recordamos la definición que indicamos para Automática, vemos que existen materias comunes a estas dos denominaciones. Los congresos internacionales sobre estas materias, que se celebran regularmente, no hacen más que aumentar la confusión; así en los de Cibernética, al lado de comunicaciones sobre modelos biológicos, aprendizaje en máquinas, etc., se exponen gran número sobre automatización, mientras que en los de Automática, al lado de trabajos sobre calculadoras, se presentan otros sobre sistemas de inteligencia artificial. Situación análoga tiene lugar en los congresos de *Tratamiento de la información*.

Sin entrar, pues, en una discusión sobre la filiación que se deba dar a estos sistemas de inteligencia artificial, que no creemos útil ni adecuada en esta ocasión, sí, en cambio, nos parece interesante y sugestivo dar unas ideas sobre los mismos.

El estudio de estos sistemas constituye el nexo de unión de investigaciones procedentes de campos distintos: Física, Matemática,

Biología, Fisiología, Psicología, Lingüística, lo cual ha motivado un acercamiento entre especialistas que cultivan parcelas científicas muy distintas, que hasta hace pocos años se desconocían y que ahora trabajan e investigan en equipo. Esta labor en común está dando óptimos frutos, ya que los progresos realizados en un campo, permiten un conocimiento más profundo de los problemas planteados en otros.

La denominación dada a estas máquinas conduce a las siguientes preguntas: ¿Las máquinas pueden pensar? ¿Poseen inteligencia? La contestación depende de lo que se entienda por inteligencia. Si consideramos como actos inteligentes la realización de ciertos cálculos o bien determinados razonamientos lógicos elementales que puede hacer una persona, pero que también los puede realizar una máquina, parece que a ésta debemos atribuirle un cierto grado de inteligencia, limitándonos estrictamente al aspecto señalado.

Si subimos en la escala de actos inteligentes que puede hacer la mente humana, sin necesidad de llegar a los que realiza un científico al descubrir nuevas leyes o a los ensayos de un filósofo, no hay duda alguna, por lo menos en el estado actual de la Cibernética, de que no hay máquina que los pueda hacer.

Esto nos dice, pues, que podríamos considerar dos calidades de inteligencia, una elemental o grosera que la mente humana comparte con la máquina, y otra más elevada, privativa del hombre; o bien dar a la inteligencia un sentido más restringido, de tipo creador, con lo cual los procesos que pertenecen al primer grupo no podemos considerarlos como inteligentes. Es una cuestión de palabras, que acaso en el futuro dará lugar a una discriminación más concreta. En todo caso, esta discriminación no tendrá fronteras permanentes, ya que los progresos en este campo de la Cibernética irán reduciendo el segundo grupo, el de la inteligencia estrictamente creadora, inherente a la personalidad humana.

Desde hace varios años diferentes grupos de investigadores se dedican a establecer programas para calculadoras, e incluso a la construcción de máquinas especiales, que introducen un nuevo aspecto en aquéllas: la facultad de aprender. Los trabajos publicados en este campo, son, en general, independientes unos de otros, con métodos y puntos de vista distintos, y es difícil establecer un resumen coherente de los mismos. Trataremos, sin embargo, de indicar a continuación, las líneas generales sobre que discurren estas investigaciones.

Sabido es que una calculadora no hace más que seguir el programa que se le ha impuesto; no obstante, podemos imaginar un programa para la resolución de un problema, cuya forma de resolver no conocemos, pero, en cambio, poseemos medios para averiguar si la solución propuesta es aceptable. Esto ocurre con cierta clase de juegos o bien con la demostración de teoremas. Evidentemente, para hallar la solución bastaría ir probando de una manera exhaustiva todas las posibles respuestas al problema. En general, programar este proceso de exploración no es difícil. Ahora bien, este procedimiento no es asequible para problemas complejos (precisamente los verdaderamente interesantes), pues el examen de todas las posibles soluciones, exigiría demasiado tiempo. Por otro lado, en algunos casos, un análisis completo se hace difícil, como ocurre, por ejemplo, en el juego de ajedrez. Según Shannon, considerar todos los caminos posibles en este último juego representa 10^{120} movimientos elegibles. Esto nos indica la imposibilidad de que pueda existir una máquina que realice estos cálculos. Hay, pues, que lograr procedimientos que permitan reducir la búsqueda de la solución. Esto se puede lograr con las técnicas de reconocimiento de estructuras o de conjuntos, que, en realidad, son técnicas de clasificación, mediante las cuales se puede conseguir que la máquina utilice los métodos más apropiados para cada caso, reduciendo, por consiguiente, el número de posibilidades ensayadas (24).

Los sistemas de aprendizaje (Learning Systems) permiten resolver determinados problemas aprovechando la experiencia adquirida en la resolución de casos similares. Como no hay que esperar que las situaciones nuevas sean iguales a las pasadas, hay que proceder a una generalización de la experiencia lograda y para ello se puede aplicar el llamado proceso de *refuerzo* (reinforcement). Mediante este sistema de aprendizaje, algunos aspectos del comportamiento de un sistema adquieren en el futuro una mayor o menor importancia, se destacan más o menos, como consecuencia de la aplicación del denominado «operador de refuerzo». Estos operadores han sido estudiados por Skinner (25) y Busch y Mosteller (26).

(24) M. MINSKY: *Steps Towards Artificial Intelligence*. «Proc. IRE», vol. 49, pp. 8-30, enero 1961.

(25) B. F. SKINNER: *Science and Human Behavior*, Macmillan Co., 1953.

(26) R. R. BUSCH and F. MOSTELLER: *Stochastic Models for Learning*, John Wiley and Sons Inc. 1955.

Estos últimos proponen un modelo estocástico de aprendizaje, y mencionan un ejemplo que da una idea general del proceso seguido: una rata hambrienta se sitúa en un laberinto en forma de T. La comida se halla al extremo de una de las ramas del brazo horizontal, siempre la misma. La rata corre a lo largo del brazo vertical de la T hasta el punto de unión con el horizontal; entonces debe seguir a la derecha o a la izquierda. Si el camino seguido no es correcto, se la quita del laberinto y se la coloca nuevamente en la entrada. A medida que la rata «aprende», los errores disminuyen cada vez más; es decir, que la probabilidad de que se mueva correctamente es tanto mayor, cuanto mayor es el número de ensayos realizados. Esto sugiere un modelo de aprendizaje, en el que aquella probabilidad dependería solamente del número de ensayos en su forma más simple; o bien, para lograr un mayor acuerdo entre la teoría y los hechos experimentales, la citada probabilidad de un movimiento correcto se podría hacer depender de dos constantes, una asociada a los ensayos previos realizados con éxito y otra a los fracasos. Evidentemente, el modelo estocástico propuesto por Busch y Mosteller es mucho más complicado, pero sigue los mismos principios.

Los primeros programas establecidos en las calculadoras digitales para mostrar la posibilidad de aprendizaje fueron dirigidos a representar en aquéllas, procesos análogos al reflejo condicionado de los animales.

A este propósito ruego me permitáis una pequeña digresión. Conocidos son universalmente los trabajos del fisiólogo ruso Paulov sobre los reflejos condicionados (27). Sin embargo, como ha hecho observar acertadamente una revista norteamericana, hay que reivindicar para Lope de Vega la primacía en la exposición del principio de los citados reflejos. El hecho es sumamente curioso e interesante y creo digno de recordarlo en breves palabras.

En la comedia «E! Capellán de la Virgen», que Lope de Vega escribió en 1615, trata de la historia de S. Ildefonso. En una sabrosa escena del tercer acto, *Mendo*, criado de S. Ildefonso, explica a su madre *Ana* los castigos que ha sufrido por su mal comportamiento y dice textualmente (28):

(27) I. PAULOV: *Conditional reflexes*. «Oxford University Press», 1927.

(28) LOPE DE VEGA: *Obras escogidas*. Tomo III. «Teatro», 297. Editorial Aguilar: 1955.

Mendo: «.....

.....
Ildefonso me reñía,
mil penitencias me daba,
en el suelo me sentaba
y con los gatos comía.
Mas eran tan socarrones
que en viéndome en penitencia
me quitaban la paciencia
comiéndome las porciones,
porque allí no hay que tratar
de decirles: «¡Zape aquí!»

Ana: ¡Ay, Mendo, Mendo, que allí
no te supiste enmendar!

Mendo: ¿Cómo piensas, madre mía,
que a los gatos castigué
y mis comidas gocé
cuando en el suelo comía?

Ana: Déjate de esas locuras.

Mendo: Metílos en un costal
por engaño, y a un portal
los llevé una noche a oscuras
No hacía más que toser
y a palos los deshacía;
gruñían, que parecía
órgano de Lucifer.
Dejábalos descansar,
y luego otra vez tosía,
con que a pegarlos volvía,
hasta que vi que, sin dar,
sólo con verme toser
gruñían como cochinos:
soltélos.

Ana: ¡Qué desatinos!

Mendo: Y en mandándome comer
en el suelo, estaba alerta.

Acercábanseme al plato,
y en tosiendo, no había gato
que no tomase la puerta.

.....
.....»

No creo sea preciso añadir comentario alguno. No podía exponerse el principio de los reflejos condicionados de forma más clara y tajante, y al propio tiempo más concisa, que en estos versos de Lope de Vega. No hay duda de que la *tos* de *Mendo* tiene una marcada prioridad sobre la *campanilla* de Paulov, lo cual no resta méritos, evidentemente, a las célebres experiencias de este sabio.

Volviendo a los programas de aprendizaje en las Calculadoras, es interesante mencionar el proyectado por Oettinger (29), en el que por la acción de un estímulo que puede variar en intensidad, entre ciertos límites, la respuesta de la máquina es una cifra comprendida entre dos valores extremos. Una vez que la máquina ha dado la respuesta al estímulo, se puede introducir una señal que indique la aprobación o reprobación a la citada respuesta. Si se desea que la máquina haga aparecer en la salida una determinada cifra, por ejemplo, A_n , sea cual fuere el estímulo introducido en la entrada, mientras no aparezca la citada cifra el operador debe manifestar desacuerdo mediante la señal apropiada y la máquina en sus respuestas se aproxima cada vez más a A_n , hasta que aparece esta cifra en la salida. A partir de este momento, el operador introducirá la señal aprobatoria, y la máquina responderá siempre con la cifra A_n en la salida, aunque los estímulos correspondientes sean muy pequeños.

El reflejo condicionado se establece, pues, por el hecho de que la aprobación del operador respecto a la cifra escogida por la máquina aumenta las probabilidades de que esta cifra salga posteriormente.

Para una mayor analogía con el reflejo condicionado de los animales, si el operador no manifiesta a la máquina su agrado o desagrado, las respuestas de aquéllas son completamente arbitrarias: puede salir una cifra cualquiera de las comprendidas entre los límites previamente fijados. Por otro lado, se puede destruir el reflejo condicionado, dando lugar a otro nuevo, si se expresa desagrado para

(29) OETTINGER, A.: *Philosophical Magazine*, 43, 1243, 1952.

una respuesta que hasta entonces se había considerado como buena, hasta que se llega a la deseada.

Ultimamente se han establecido programas más ambiciosos, como, por ejemplo, para demostrar teoremas lógicos fundamentales; se han construido máquinas que generan su propio programa, y otra que demuestra teoremas de Geometría. Esta última está constituida, en principio, por una calculadora heurística que propone secuencias demostrativas, una calculadora subordinada que hace deducciones, y otra complementaria, cuya misión es construir figuras geométricas (en realidad no las dibuja, sino que calcula sus coordenadas). La máquina subordinada comprueba los procesos demostrativos que propone la primera, con objeto de averiguar si son correctos. La calculadora heurística contiene una serie de reglas que permiten decidir el nuevo camino a seguir después de cada tentativa infructuosa de demostrar el teorema propuesto. Estas reglas se escogen de forma que se restringen las secuencias demostrativas que *a priori* no tienen gran probabilidad de éxito (30).

Estos ejemplos u otros análogos, nos indican que se ha obtenido éxito en casos relativamente sencillos de aprendizaje (31). Cuando se trata de procesos más complejos, las dificultades aparecen no sólo en la programación propiamente dicha, sino también y acaso en mayor grado, al tratar de llevar a la práctica el programa proyectado, que, en ocasiones, exige capacidades de memoria muy grandes, excesivo número de elementos en la máquina, o bien, tiempo de resolución prohibitivo.

Estos obstáculos han inducido a algunos investigadores a dirigir su atención al estudio del sistema nervioso animal, con la esperanza de descubrir nuevos cauces, directrices distintas, que permitan llegar a resultados más halagüeños que hasta ahora, es decir, buscar en la naturaleza lo que el hombre no encuentra por sí mismo.

En este sentido se ha logrado cierto tipo de máquinas que son,

(30) H. GELERTER: *Realization of a geometry theorem proving machine*. «Proc. of the International Conference on Information Processing». UNESCO, París, 1960.

(31) T. KILBUN, R. L. GRIMSDALE y F. H. SUMNER: *Experiments in machine learning and thinking*. «Proc. of the International Conference on Information Processing». UNESCO, París, 1960. M. E. STEVENS: *A machine model of recall*. «Proc. of the International Conference on Information Processing». UNESCO, París, 1960.

en realidad, redes con parámetros variables, capaces de realizar ciertas funciones, como aprendizaje, reconocimiento de forma, etc., y en cuya construcción se ha tratado de captar, con más o menos fidelidad, las características esenciales del tejido nervioso (32).

Desgraciadamente, a pesar de los innegables progresos de la neuro-fisiología, poco se conoce sobre la interconexión de las neuronas y el funcionamiento lógico del cerebro. Los primeros investigadores cibernéticos comenzaron, pues, por simplificar, proyectando modelos lógicos, estudiando sus propiedades y deduciendo consecuencias. Con este criterio se han establecido modelos de neuronas y se han propuesto sistemas de interconexión entre las mismas. Posiblemente estos modelos no responden a una realidad biológica; más aún, acaso disten mucho de ella, pero incluso así, la investigación en este sentido tal vez pueda ayudar algún día a desentrañar el misterio de cómo el cerebro realiza las funciones de aprendizaje y otras similares. En todo caso, aun en el más desfavorable, en que los citados trabajos no fueran de utilidad para el futuro de la neurofisiología, siempre se habrían conseguido artificios de tipo lógico de gran interés en el mundo de la Automática.

Al estudiar el sistema nervioso se observa que la información se transmite de forma análoga a como se verifica en las calculadoras digitales. Según es sabido, los mensajes se transmiten, en aquél, de una neurona a otra por medio de las *uniones sinápticas* o *sinapses*. Estos mensajes consisten en impulsos; cuando una fibra nerviosa recibe un estímulo, se produce en ella una perturbación de naturaleza electroquímica. La propagación de esta perturbación constituye el impulso. Si el estímulo es débil, inferior a un cierto valor umbral, entonces no se produce aquél; pero si, por el contrario, es superior a este límite mínimo, tiene lugar un impulso, cuya intensidad es constante, es decir, no depende de la del estímulo. Se sigue la ley de *todo o nada*, o existen impulsos y en este caso todos ellos son iguales, o bien no existen. Es curioso observar que esta misma ley se da en las calculadoras digitales; la transmisión se verifica por medio de impulsos, los cuales son todos iguales. Hay, sin embargo, una diferencia: en las calculadoras la frecuencia de la transmisión es constante; en general, está fijada de antemano y depende de cada máquina, mientras que en el sistema nervioso de-

(32) J. K. HAWKINS: *Self Organizing Systems*, «Proc. IRE», vol. 49, pp. 31-48, enero 1961.

pende de la intensidad de los estímulos; cuanto más fuertes son éstos, la frecuencia de los impulsos producidos es mayor.

Un modelo biológico simplificado de neurona, resumiendo solamente sus características esenciales desde el punto de vista lógico e indicando sus analogías en el lenguaje digital, podríamos considerar que reúne las siguientes propiedades:

a) La transmisión de la información se verifica en forma de impulsos (transmisión digital), tratándose de una transmisión sincrónica. Es decir, que se admite que la velocidad de los impulsos es constante. Esto es una simplificación justificada por el hecho de que las fibras nerviosas largas transmiten a mayor velocidad que las cortas, dando lugar a un retardo sináptico en cada neurona, del orden del milisegundo.

b) La neurona opera en forma de *todo o nada*; es, pues, un órgano de conmutación (sistema biestable, operación binaria).

c) La frecuencia de los impulsos transmitidos varía con la intensidad de los estímulos. En este sentido ciertas neuronas actúan de forma análoga a sistemas moduladores de frecuencia.

Entre los modelos de neuronas hasta ahora propuestos, el de McCulloch y Pitts (1943) y últimamente el de Willis (1959), representan la contribución más valiosa en este campo. En el primero las propiedades lógicas se mantienen constantes con el tiempo. El mismo tipo de excitación da siempre la misma respuesta. Alimentando la entrada con una de las salidas, se logra que una vez excitada la neurona, continúe en este estado, desexcitándose mediante una señal inhibitoria. Opera, pues, en principio, como un circuito biestable (flip-flop), y en este sentido representa un elemento de memoria, ya que puede almacenar una señal por tiempo indefinido. Estos investigadores demostraron que teóricamente se puede lograr con estos elementos una máquina que tenga un comportamiento determinado (33).

Este modelo de neurona, sin embargo, no explica algunas características de la memoria humana. En efecto, según hemos indicado, el almacenamiento de la información exige que las neuronas estén excitadas durante largos períodos de tiempo. Como parece demostrado que durante el sueño cesa la actividad neurónica de gran parte del cerebro humano, ya se comprende que el modelo de McCu-

(33) MC CULLOCH, W. S. y W. PITTS: «Bull. Math. Biophys.», 5, 1947, páginas 115-133.

lloch no permite explicar esta propiedad. Si el cerebro humano estuviera constituido por neuronas de McCulloch, al despertarnos habríamos olvidado gran parte de lo que sabíamos antes de dormir. Aparte de este hecho fundamental, con este modelo sólo se puede almacenar un «bit» por neurona, y esto tampoco está de acuerdo con lo que ocurre en el cerebro humano.

Mucho se ha discutido sobre la capacidad de la memoria humana. Así, Miller considera un límite inferior del orden de 10^6 bits (señales binarias) y un límite superior del orden de 10^{10} bits, mientras que von Neumann supone un límite superior de 10^{20} bits.

El propio McCulloch sugiere que la capacidad de la memoria varía de 10^{13} a 10^{15} bits. Por otro lado, se ha establecido con bastante seguridad que el número de neuronas del ser humano es del orden de 10^{10} . Esto nos indica que la información almacenada en el cerebro es superior a una señal binaria por neurona. Por consiguiente, todo modelo que sólo permita almacenar una señal binaria por neurona, como ocurre con el propuesto por McCulloch, no explica la capacidad de la memoria humana.

Es curioso comparar las características de ésta con la de una máquina calculadora digital. De ello resulta que la memoria humana tiene, por lo menos, una capacidad 10^5 veces superior a la de cualquier calculadora; por otro lado, en éstas el número de dígitos binarios almacenados es igual al número de elementos lógicos que posee. Siguiendo en este orden de operaciones, podríamos también decir que si bien el hombre recibe la información en forma visual o acústica, a razón de unos 50 bits/seg, la máquina la recibe en forma de señales codificadas en cinta perforada, cinta magnética, etc., con una velocidad que puede llegar hasta 10^5 bits/seg.

Volviendo a los modelos de neuronas, el propuesto por D. G. Willis, denominado *neurona plástica*, tendrá probablemente gran interés, tanto en el reconocimiento de estructuras como en los procesos de aprendizaje (34).

Es curioso observar cómo la idea fundamental de este modelo se basa en ideas expuestas por Cajal y otros fisiólogos sobre la posibilidad de que existan ciertos tipos de neuronas cuyas propiedades lógicas varían con su actividad. Estas variaciones se conocen con el

(34) D. G. WILLIS: *Plastic neurons as memory elements*. «Proceedings of the International Conference on Information Processing». UNESCO. Paris, 15-20 junio 1959.

nombre general de *plasticidad*, y si bien su existencia no se ha demostrado, algunos neurofisiólogos, entre ellos Eccles, Hebb y Shimbel, han propuesto posibles modelos de neuronas plásticas.

Así, en el descrito por Hebb (35), si una neurona A actúa disparando otra neurona B, de forma insistente y reiterativa, se produce una modificación en una o ambas neuronas, que tiene por efecto aumentar la eficacia con que la neurona A dispara la B. Eccles (36) modifica este modelo suponiendo que la variación se produce solamente en la neurona A y da lugar también a un incremento en la eficacia con que esta neurona dispara la B. En fin, Shimbel (37), siempre abundando en el mismo criterio de modificación de las características de las neuronas con su actividad, supone que el umbral de excitación de las mismas disminuye cada vez que se disparan.

El modelo propuesto por Willis guarda una cierta relación con los de estos neurofisiólogos. Tiene n entradas arbitrarias y una salida. Cada entrada lleva asociada un valor *sináptico* s_i que es una variable continua, y por otro lado, es portadora de una señal discreta e_i , que puede valer 0 ó 1. La salida es también una señal binaria, estando representado el disparo de la neurona por el dígito 1. Para que se produzca este disparo en un instante determinado, es preciso que en el instante precedente, la suma de los productos $e_i s_i$ sea superior o igual a un cierto valor umbral T , es decir:

$$\sum_n e_i s_i \geq T$$

Ahora bien, el valor sináptico s_i es función de la actividad de la propia neurona, y aumentará, disminuirá o permanecerá constante, según el valor actual de la salida de la neurona (0 ó 1) y la señal e_i transmitida por la entrada correspondiente en el instante anterior.

Este modelo plástico de neurona puede adoptar diferentes estados estables, correspondientes a los diferentes conjuntos posibles de valores sinápticos s_i .

Dentro de este mismo campo hay que considerar los sistemas probabilísticos de aprendizaje de Uttley, Fasley-Clark y Rosenblatt.

(35) D. O. HEBB: *The organisation of Behavior*. Nueva York, John Wiley and Sons, 1949.

(36) J. C. ECCLES: *The Neurophysiological Basis of Mind*. Londres, Oxford University Press, 1956.

(37) A. SHIMBEL: «Bull. Math. Biophys.», 12, 1950, pp. 241-275.

En líneas generales están constituidos por grandes conjuntos de componentes interconectados. Las variaciones en el comportamiento del sistema se logran partiendo de modificaciones en las propiedades de los elementos o en las interconexiones entre los mismos. El principio de todos estos sistemas se basa en los trabajos de Paulov; sus célebres experiencias con los perros pueden representarse esquemáticamente mediante un modelo de neurona con dos entradas A y B y una salida C. La entrada A representa el alimento que se presenta al perro, y la B el sonido de la campanilla, mientras que C significa la segregación de saliva por parte de aquél. Según es sabido, la acción simultánea de ambos estímulos repetidas veces, da lugar a que se produzca la segregación de saliva del perro solamente con el sonido de la campanilla. Esto puede lograrse en el modelo antes citado, suponiendo que la unión sináptica de la entrada A con la neurona tenga un valor fijo y suficiente para que la aparición del estímulo (alimento) dé lugar a la respuesta deseada (segregación de saliva). Siguiendo el proceso de este modelo analógico, al actuar simultáneamente ambos estímulos el valor de la unión sináptica de la entrada B aumenta progresivamente, hasta que es suficientemente elevado para que actuando solamente el estímulo en B, el sistema dé la respuesta deseada. *El problema estriba, pues, en la forma como se realiza este aumento progresivo del valor sináptico de B.* En el modelo preconizado por Uttley (38) ello se verifica por medio de un calculador de probabilidades condicionadas, y en el *perceptrón*, propuesto por Rosenblatt, mediante ciertos elementos de memoria.

El perceptrón está constituido por «unidades sensoriales», «unidades asociativas» y «unidades de respuesta». Las primeras, en el modelo hasta ahora construido, son de tipo visual (39).

Los estímulos que actúan sobre estas unidades sensoriales se transforman en señales eléctricas que se transmiten a las unidades asociativas. Estas unidades, que denominaremos unidades A, se activan si la señal recibida es suficientemente grande, y a su vez transmite señales a las unidades de respuesta. Estas últimas son sistemas

(38) A. M. UTLEY: *Conditional probability machines and conditional reflexes*, «Automata Studies», Princeton University Press, pp. 253-275. 1956.

(39) F. ROSENBLATT: *The Perceptron A Theory of Statistical Separability in Cognitive Systems*, Cornell Aeronautical Lab., Buffalo, N. Y. Rept. No. VI-1196 61; febrero 1958.

biestables. Cada una de ellas recibe señales de las unidades A, a las que está conectada, y la suma de estas señales constituye la entrada de aquella unidad de respuesta. Esta da lugar a una indicación visual de su estado y transmite al mismo tiempo una señal de «refuerzo» a las unidades A, activas. Esta señal se almacena en la memoria que posee cada unidad asociada y actúa sobre la señal de salida de ésta, alterando su amplitud. Como hemos dicho, estos elementos de memoria realizan una función similar a la unión sináptica variable que hemos indicado en el modelo de reflejo condicionado. Si la respuesta es correcta, no existe señal de «refuerzo», los elementos de memoria no varían su contenido, y las señales de salida de las unidades asociadas tampoco. Pero si hay un error las señales que se almacenan en los elementos de memoria hacen variar la amplitud de las señales de salida de las unidades asociadas hasta corregirlo.

Hay que hacer observar que las diferentes unidades sensoriales están unidas por conexiones arbitrarias con las unidades asociadas. La respuesta deseada está definida por una determinada configuración de la salida de las unidades de respuesta.

Mucho más se podría decir sobre la labor realizada en este campo sugestivo de la investigación, pero ello nos llevaría demasiado lejos. Si bien se está en los comienzos, tanto en lo que se refiere al uso de las grandes calculadoras, como a los ingenios constituidos por redes de parámetros variables, el número e importancia de los trabajos publicados en los últimos años, tanto en uno como en otro grupo de investigaciones, permite esperar que se obtengan resultados más fructíferos en el futuro.

Otro campo de investigación interesante, si bien con objetivos distintos de los que acabamos de exponer, es el que se está llevando a cabo en la traducción automática de lenguas. Cabe preguntar cómo una calculadora concebida para manejar datos numéricos, puede utilizarse para manejar palabras. Hay que tener en cuenta que el problema no ofrece dificultades, ya que basta codificar numéricamente las letras del alfabeto de forma que a cada letra le corresponda un número, con lo cual una palabra estará representada por un conjunto de números. Ahora bien, dado el progreso extraordinario en materia constructiva, las grandes calculadoras actuales tienen memoria y velocidad operativa suficientes, y en todo caso podrían construirse máquinas que poseyeran mayor memoria y fueran mucho más rápidas. Pero el problema no reside exclusivamente en la máquina. El nudo de la

cuestión estriba en llegar a un conocimiento adecuado de la organización y estructura del lenguaje, con objeto de explicar a la máquina el proceso de traducción que debe verificar. Y ahí se encuentra la dificultad precisamente. Pues no basta, evidentemente, la traducción palabra por palabra (lo cual constituiría un diccionario automático), sino que hay que establecer equivalencias entre las estructuras lingüísticas de los dos idiomas.

Se trata, pues, de analizar las estructuras gramaticales de los diferentes idiomas, de tal forma que puedan lograrse las citadas equivalencias. Las dificultades, sin embargo, son tan grandes, que es preciso una estrecha colaboración entre lingüistas y programadores de las máquinas.

Estas investigaciones se llevan a cabo principalmente en Estados Unidos, Rusia y Japón (40). Los resultados obtenidos hasta ahora son esperanzadores. Se han realizado ensayos de traducción automática del idioma inglés al ruso y del inglés al japonés. Estos ensayos y los estudios que se están llevando a cabo demuestran la posibilidad de lograr máquinas traductoras, por lo menos en la primera fase, es decir, que reproduzcan más o menos fielmente las ideas del idioma original sin la pretensión de captar su estilo. En este sentido, pues, una obra literaria presenta más dificultades para su traducción que un texto que trate de un tema perfectamente definido, como, por ejemplo, Física.

Creemos, sin embargo, que la realización de una máquina que traduzca fielmente la intención y el estilo del autor del texto original, como podría hacerlo un buen traductor, está muy por encima de las actuales posibilidades y pertenece a un futuro lejano.

(40) V. E. GIULIANO y A. C. OETTINGER: *Recherches sur la traduction automatique au Laboratoire de Calcul de Harvard*. I. K. BELSKAJA: *Méthodes de traduction mécanique. Leur application a un programme anglo-russe*; S. TAKAHASHI, H. WADA, R. TADENUMA y S. WATANABE: *Traduction mécanique de l'anglais en japonais*. Conference internationale sur le traitement numérique de l'information. Paris, 1959.

AUTOMATIZACION

APLICACIÓN DE LAS CALCULADORAS

La aplicación de las calculadoras (tanto analógicas como digitales) en los procesos industriales se va extendiendo cada vez más. En realidad, su uso tiene una gama enorme de posibilidades, desde las pequeñas calculadoras analógicas utilizadas en fases parciales de un proceso industrial, hasta la gran máquina digital que dirige y regula la marcha general de una fábrica. Bajo este aspecto, las calculadoras son máquinas manipuladoras o elaboradoras de información, ya que si bien realizan cálculos, y algunas veces muy complejos, su misión no es el cálculo en sí mismo, sino la elaboración de la información recibida, que debe ser transmitida en forma conveniente para la regulación de la máquina o proceso.

En efecto, en todo proceso automático el programa o instrucciones en que se especifican las operaciones que se deben realizar y la forma en que se deben verificar, constituyen la información que se transmite a la calculadora. Esta información se suministra según un determinado código que aquélla pueda comprender y constituye el lenguaje propio de la máquina. La información recibida se elabora mediante una secuencia de operaciones matemáticas, dando lugar a una información transformada, que constituye realmente el programa que debe seguir el sistema. El lenguaje de este programa, derivado del inicial, que sale de la calculadora, es, en general, un lenguaje que pueden comprender (en algunos casos después de algunas transformaciones) los diferentes órganos o máquinas del sistema, pero no puede actuar directamente sobre ellos, ya que la potencia de salida de una calculadora es muy pequeña. En efecto, el escaso desarrollo de energía es la característica general de los sistemas elaboradores de información, que los distingue de las máquinas transformadoras de energía, de las que realizan el trabajo en una fábrica. El objeto de aquéllos no es verificar un trabajo sino ordenar y supervisar la forma cómo las máquinas lo hacen. Debido,

pues, a esta pequeña potencia, la información de salida de la calculadora actúa sobre amplificadores de potencia, que son los que realmente rigen los diferentes órganos del sistema. Hay que hacer notar que en el caso de una calculadora digital, tanto la entrada como la salida de la información tienen forma discreta, numérica. Por consiguiente, necesita para comunicarse con el sistema unos órganos complementarios, los *conversores*, que transforman magnitudes físicas: una velocidad, una presión, una tensión, etc., en magnitudes discretas (conversores analógico-digitales), que según determinado código, tendrán acceso y serán comprendidas por la calculadora, o bien transforman magnitudes discretas en magnitudes físicas (conversores digital-analógicos), órganos adecuados para ser adaptados a la salida de la calculadora digital. Más adelante hablaremos de ellos.

Tanto las calculadoras analógicas como las digitales deben cumplir una condición muy importante cuando se utilizan en la automatización: deben funcionar en el tiempo real. Esto es fácil de comprender en las calculadoras analógicas, por el principio mismo en que están fundadas. En cambio en las digitales, que operan con números, aquella condición se transforma en otra: que el tiempo de duración de los cálculos para hallar una solución, partiendo de una determinada configuración de las variables de entrada, sea pequeño respecto al intervalo de tiempo en que se puedan producir variaciones de interés en el sistema regulado.

La función de la calculadora en los sistemas automáticos puede tener distintos grados de complejidad. La forma más sencilla consiste en operar, como hemos dicho, partiendo de un programa perfectamente definido en la entrada. La información obtenida en la salida de la calculadora constituye el programa seguido por el sistema de realimentación. Pero puede también ejercer funciones más flexibles, como ocurre, por ejemplo, si se trata de obtener un producto de calidad determinada. Para ello se introducen en la calculadora los resultados del análisis del producto inicial y las condiciones de funcionamiento del proceso de producción; entonces la información de la salida indica las variaciones necesarias en el comportamiento del sistema para lograr el producto deseado.

En fin, acaso la aplicación más interesante, y en la cual se puede utilizar toda la riqueza de posibilidades de las calculadoras digitales, se halla en los llamados *sistemas de optimización*. Se trata de lograr las condiciones óptimas de funcionamiento de un proceso de

producción, desde un punto de vista determinado, por ejemplo el que se refiere a la utilización del material, precio de coste, productividad, etc. Lo que caracteriza a estos sistemas de automatización es que la propia calculadora, partiendo del criterio de optimización que se desea, elabora el programa que debe seguir el sistema. Según los resultados obtenidos en el proceso, se modifican las variables de entrada de la calculadora, observándose nuevamente el comportamiento del proceso, y así sucesivamente. Es decir, que no existe programa impuesto por el hombre, sino que la calculadora lo va elaborando durante el proceso de producción. Más adelante volveremos a tratar de estos sistemas.

EMPLEO DE TÉCNICAS DIGITALES

Las técnicas y circuitos utilizados en las calculadoras digitales tienen otras muchas aplicaciones y su uso se extiende cada vez más en los sistemas de control automático.

En éstos, las magnitudes físicas, tales como la presión, la velocidad, la temperatura, etc., se representan por medio de señales eléctricas (una tensión variable, cuyas variaciones corresponden a las de aquellas magnitudes). Dentro del lenguaje de la automatización, los aparatos que convierten una magnitud física de una cierta clase en otra clase distinta, se denominan *transductores*. En definitiva, estos aparatos son transmisores de información.

Esta transformación se realiza en forma analógica, es decir, que tanto la entrada del transductor (una temperatura, por ejemplo) como la salida (la tensión eléctrica correspondiente), son magnitudes variables en forma continua. Ahora bien, en muchas ocasiones interesa transformar una señal analógica en una señal discreta y transmitirla en esta forma, aunque no se use una calculadora digital en la cadena automática (en cuyo caso, según hemos visto, la citada conversión es necesaria). ¿Cuál es la razón de esta conversión analógico-digital? Varias son las que se pueden aducir en defensa del uso de señales discretas, en lugar de las señales analógicas en los sistemas automáticos. Acaso la más importante es que la información digital puede almacenarse por tiempo indefinido, transmitirse a cualquier distancia, y leerse todas las veces que sea necesario sin perder nada de su contenido. No ocurre lo mismo con las señales analógicas, en las que se produce una distorsión, per-

diéndose parte de aquél. La transmisión de las señales analógicas está influida por la relación señal-ruido, cosa que no ocurre en las digitales. Por otro lado, el empleo de los medios digitales es también más seguro que el de los analógicos cuando se trata de medir magnitudes físicas, como el tiempo, la velocidad, etc.

La conversión analógico-digital se puede realizar por medios electromecánicos o electrónicos. Sea cual fuere el procedimiento utilizado, lo que se trata es de pasar de la forma continua de la curva que representa la función de entrada (tensión variable en función del tiempo), a la forma discreta de la salida. Para ello imaginemos dibujada la curva de entrada, dividamos el eje de abscisas en partes iguales (que representarán intervalos iguales de tiempo), y suponemos que la función es constante para cada uno de estos intervalos. Evidentemente, podremos representar esta curva en forma discreta por los valores numéricos de las ordenadas correspondientes a aquellos intervalos. Sin duda alguna, cometemos un error con esta representación numérica de la curva de entrada, pero este error es tanto menor cuanto mayor es el número de intervalos en que se considera dividido el eje de abscisas o, en otros términos, expresándonos en lenguaje técnico, cuanto mayor es el número de conversiones por unidad de tiempo. Así, en los convertidores electromecánicos, este número de conversiones es solamente de unos diez por segundo, mientras que en el caso de convertidores electrónicos se eleva a un millón o más por segundo (41).

Naturalmente, no basta con aumentar mucho la velocidad de conversión; el error cometido depende también de otras circunstancias, particularmente del que se introduce en cada uno de los valores numéricos que representan las ordenadas de la curva de entrada. Ahora bien, estos valores están representados por números en un determinado código, es decir, que cada ordenada estará representada por un conjunto de impulsos (dígitos) en serie o en paralelo. Cuanto mayor sea el número de dígitos utilizados en cada conversión (dado un determinado código), mayor será la precisión alcanzada, a igualdad de número de conversiones por segundo. Desde este punto de vista, la precisión puede fijarse *a priori* al construir el convertidor.

En los sistemas de control automático interesa también el proce-

(41) A. SUSSKIND: *Analog Digital Conversion Techniques*, John Wiley & Sons Inc. N. Y., 1958.

so inverso, es decir, la conversión digital-analógica. Según hemos visto, cada una de las ordenadas de la curva analógica que se trata de reconstruir está definida por un grupo de impulsos, que en el código escogido representará un número. La altura de cada uno de estos impulsos no es preciso que sea la misma (según es sabido ésta es una de las ventajas de las técnicas digitales), ya que sólo interesa la existencia del impulso o la ausencia de él. Pero si la altura no interesa en la forma discreta, sí interesa en la forma analógica; esto nos lleva a la necesidad de transformar impulsos de altura variable en impulsos de altura constante, lo cual se verifica mediante circuitos de coincidencia. Ausencia de impulsos en la entrada da lugar a ausencia de impulsos a la salida. Un impulso en la entrada da lugar a un impulso en la salida, cuya altura depende de la posición de aquél en el conjunto de impulsos que definen el número y que siempre es un múltiplo de una determinada altura escogida como unidad. Así, por ejemplo, si una de las ordenadas de la curva está definida por el número 11 y el código escogido es el binario (1011), la salida del circuito de coincidencia correspondiente al primer dígito tendrá una altura igual a la unidad; la del segundo su altura será doble, la del tercero será cero y, en fin, la del cuarto dígito tendrá una altura igual a ocho veces la tomada por unidad. Evidentemente, sumando estas tensiones en forma analógica se obtiene una tensión que a la escala escogida será igual a 11, es decir, igual a la ordenada correspondiente a la curva analógica que se reconstruye.

Un problema análogo al que se presenta en las comunicaciones telefónicas, cuando se trata de transmitir varias conversaciones simultáneas por el mismo canal, ocurre en los sistemas de control automático cuando se trata de transmitir simultáneamente diferentes clases de información. También en este caso interesa utilizar un solo canal.

En los sistemas automáticos se trata de digitalizar, es decir, transformar en magnitudes discretas simultáneamente las analógicas procedentes de diferentes puntos del mismo. Esto, evidentemente, se puede verificar utilizando un conversor analógico digital para cada una de las variables continuas, aunque no es el procedimiento más económico. Con objeto de evitar esta multiplicidad de conversores, es posible adoptar un sistema que permita emplear el mismo equipo para transmitir la información procedente de las diferentes fuentes analógicas. Los diferentes canales de información ocupan el siste-

ma transmisor periódicamente y durante intervalos de tiempo muy pequeños. Solamente en estos intervalos se transmite información de un canal, mientras que la procedente de los restantes está bloqueada. Existe, pues, una pérdida de información tanto menor cuanto más rápida sea la conmutación de un canal a otro. Si llamamos n al número de canales y T al tiempo de conversión analógico-digital, el intervalo de tiempo entre dos apariciones sucesivas de un canal en el conversor será nT . Si T es muy pequeño, por ejemplo 10 microsegundos y $n = 10$, el intervalo de tiempo entre dos apariciones sucesivas de cada canal será de 0,1 milisegundos.

Las observaciones de la temperatura, presión u otras magnitudes físicas registradas en forma de curvas, en el transcurso de un proceso, pueden interpretarse automáticamente utilizando las técnicas digitales. Esto es particularmente interesante en aquellos casos en que se trate de llegar a conclusiones respecto al comportamiento general del proceso, haciendo un estudio experimental del mismo. Si no se utilizan las técnicas digitales, esto lleva consigo un conjunto de operaciones rutinarias, como son traducir en forma numérica las lecturas de los diferentes registradores, correspondientes a diferentes instantes del proceso, reducción de escalas, etc. Con los datos obtenidos de esta suerte, se aplican las fórmulas adecuadas para calcular la función de las variables registradas que se desea obtener, lo cual se acostumbra a realizar con regla de cálculo o calculadora de pupitre. Hay que tener en cuenta que las citadas fórmulas se deben aplicar para el conjunto de valores correspondientes a un instante dado, y repetir su aplicación para los otros instantes que se consideren necesarios, de forma que se pueda obtener una representación gráfica en función del tiempo. Ya se comprende que todas estas operaciones, realizadas por el operador humano, no sólo exigen mucho tiempo, sino que también están sujetas a errores.

Si bien este procedimiento y los semiautomáticos se utilizan aún con frecuencia en los procesos industriales, el mejor método es, sin duda alguna, utilizar las técnicas digitales, con lo cual se elimina totalmente el operador humano. Para ello, a medida que se van inscribiendo los datos en los registros analógicos, se hace su conversión digital, mediante varios conversores analógico-digitales, o bien con un solo equipo conversor de varios canales de información. Los datos en forma numérica se obtienen, pues, al mismo tiempo que se registran analógicamente, y en aquella forma pasan a una máquina digital,

donde se calculan automáticamente las fórmulas correspondientes, para cada uno de los instantes del proceso que se juzguen necesarios.

MÁQUINAS HERRAMIENTAS

Como ejemplo de aplicación de las técnicas digitales a los sistemas automáticos, citaremos a las máquinas herramientas. El llamado control numérico de las máquinas herramientas está adquiriendo de día en día mayor difusión, debido a sus grandes ventajas sobre los métodos hasta ahora empleados.

Las instrucciones se suministran a la máquina en forma discreta (digital) mediante una cinta perforada, en la que sus orificios representan aquéllas, según un determinado código. Estas instrucciones, en el orden debido, se transfieren al control de la máquina.

Una de las primeras máquinas de este tipo fué construida en el Massachusetts Institute of Technology (EE. UU.). Se trata de una fresadora cuya herramienta de corte se puede mover según tres ejes coordenados. El contorno que debe seguir la herramienta se sustituye por una serie de segmentos rectilíneos. Estos quedan determinados por los incrementos correspondientes de las tres coordenadas que determinan cada punto de la trayectoria. A su vez los incrementos están representados por números que, según el código escogido, se insertan en la cinta perforada.

Las instrucciones de la cinta pasan al aparato lector, que las transforma en señales eléctricas y son almacenadas en registros apropiados, desde los cuales se transmiten en forma de impulsos a los servomecanismos de control. Existen tres servomecanismos correspondientes a los tres movimientos que puede tener el sistema. En realidad para cada servomecanismo existen dos registros, de forma que mientras uno de ellos controla a aquél, el otro recibe instrucciones de la cinta perforada.

Estos servomecanismos actúan de conversores digital-analógicos. Los impulsos procedentes de cada registro se convierten en la rotación de un determinado eje (una rotación de un grado corresponde a un impulso). Con objeto de asegurar que esta conversión digital-analógica se realice correctamente, existe un sistema de realimentación de forma que una posible discrepancia entre los impulsos procedentes del registro y el ángulo que debería girar el eje se corrige inmediatamente.

Mediante sincros apropiados, la rotación de estos ejes se transmite a los servomecanismos que realmente actúan sobre la máquina

Existen circuitos de realimentación para asegurar que cada uno de los elementos que verifican el trabajo mecánico de la máquina cumplen las instrucciones, que en forma de señales eléctricas, envían los sincros transmisores.

Ultimamente se ha progresado mucho en el control numérico de las máquinas herramientas en Europa, América y particularmente en el Japón, donde se está llevando a cabo un programa intenso de investigación en el Laboratorio Mecánico de la Universidad de Tokyo (42).

SISTEMAS DE OPTIMIZACIÓN

Actualmente existe una tendencia a dotar de facultades de adaptación a los sistemas de regulación automática, con objeto de lograr una regulación óptima. Con ello se pretende que el proceso industrial se desarrolle en las mejores condiciones posibles, siguiendo un criterio previamente fijado como, por ejemplo, obtener un coste mínimo, o una producción máxima. Con este fin se ajustan las variables de entrada, observando su efecto en el comportamiento del proceso, de acuerdo con el criterio escogido. Del efecto producido se decide la modificación que deben sufrir las variables de entrada, observando nuevamente sus consecuencias sobre el desarrollo global del proceso. Este método de ajuste de las variables de entrada se repite hasta que se logra la mejora deseada.

Evidentemente, este sistema de optimización de un proceso puede ser llevado a cabo por el operador humano, que posee gran flexibilidad y que, por consiguiente, además de modificar adecuadamente las variables de entrada, de acuerdo con el objetivo propuesto, reacciona y se adapta perfectamente a un comportamiento imprevisto o anormal del sistema que está regulando. Sin embargo, a pesar de estas innegables cualidades del operador humano, los sistemas de optimización automática permiten lograr, en muchos casos, mejores resultados, ya que se pueden insertar reglas de conducta que por su detalle y complejidad serían difíciles de seguir por un operador, aun suponiendo que prestara toda su atención y no estuviera afectado por el cansancio. Sin duda alguna, en éste como en otros campos de la automatización,

(42) TOSHIMASA, KAIWA, SETUEMON e INABA: *Latest Japanese Numerical Control. Features*, «Control Engineering», vol. 8, núm. 10, p. 88, octubre 1961.

que ya hemos señalado, tienen perfecta aplicación las técnicas digitales. En efecto, el empleo de una calculadora digital permite, partiendo de las ecuaciones que relacionan las variables de entrada y de salida, determinar los valores que deben darse al conjunto de las variables de entrada, después de cada operación de optimización. La calculadora se halla, en general, en el circuito de realimentación, y en los casos en que sólo se conoce una parte de la información necesaria, la calculadora compensa esta falta de información.

En líneas generales, el problema de la optimización puede plantearse de la forma siguiente: en el proceso de fabricación intervienen un cierto número de magnitudes, tales como presiones, temperaturas, gastos, etc., que pueden medirse y regularse y que proporcionan, por tanto, un medio para modificar la marcha de aquél. A este tipo de magnitudes las designaremos con el nombre de *variables regulables*. Por otra parte encontramos, también, en el proceso, variables que no podemos modificar a voluntad y que también afectan al mismo: *variables no regulables o perturbadoras*. En algunos casos estas variables también pueden medirse como, por ejemplo, ocurre con las características del ambiente, composición de las materias primas, etc., pero en otros ni siquiera son medibles. Además, intervienen también factores económicos que es necesario tener en cuenta, y en muchos casos algunas de las variables estarán acotadas por ciertas condiciones limitativas del propio proceso como, por ejemplo, temperaturas o presiones excesivas.

La optimización se logra variando convenientemente las variables regulables, X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) de forma que compense en todo momento los efectos producidos por las fluctuaciones de las variables perturbadoras, Y_j ($j = 1, 2, \dots, p$) de acuerdo con el proceso de optimización empleado. Sea cual fuere este criterio será posible, en principio, expresarlo matemáticamente en función de las variables regulables, X_i , y de las perturbadoras Y_j :

$$C = f(X_i, Y_j) \quad (I)$$

donde C representa el coste, rendimiento, producción, etc.

Evidentemente, la condición de optimización se obtendrá derivando la ecuación (I) respecto a cada una de las n variables regulables X_i , e igualando a cero las derivadas parciales resultantes:

$$\frac{\partial C}{\partial X_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (II)$$

Sistema de ecuaciones implícitas que, despejando las X_i , se puede expresar:

$$X_i = F_i(Y_j) \quad \begin{matrix} (i = 1, 2, \dots, n) \\ (j = 1, 2, \dots, p) \end{matrix} \quad (III)$$

El empleo de la calculadora digital permite resolver este sistema de ecuaciones automáticamente, para cada grupo de valores de las variables perturbadoras Y_j , obteniendo los correspondientes de las variables regulables X_i que hacen óptimo el proceso; la misma calculadora se informa si los valores obtenidos caen dentro de las condiciones restrictivas de aquél. Las variables perturbadoras se introducen en la calculadora a intervalos de tiempo regulares, que dependen de la naturaleza del proceso; para ello se transforman previamente en tensiones eléctricas, que mediante conversores analógico-digitales, pasan a forma discreta y así son introducidos en la máquina y utilizadas para calcular los valores de las variables regulables. Estos valores mediante una transformación inversa (empleando conversores digital-analógicos), pasan de la forma discreta a la continua, transformándose en tensiones eléctricas, que actúan sobre los dispositivos de gobierno, dando lugar a que las variables regulables se modifiquen de acuerdo con los valores calculados, y a que el proceso siga el programa óptimo establecido.

En muchas ocasiones la ecuación (I) puede obtenerse a partir de las características físicas del proceso. Sin embargo, en otras la dificultad principal del problema reside, precisamente, en establecer este modelo matemático sobre el que ha de actuar la calculadora (43). Es necesario recurrir, entonces, a métodos estadísticos que permitan determinar puntos experimentales, para establecer un modelo matemático aproximado. Aun en el primer caso, debe realizarse una comprobación experimental del modelo matemático establecido, con lo que se pueden obtener, también, algunos parámetros difíciles de prever de otro modo.

Una vez establecida la ecuación (I) no siempre es fácil pasar a la (II), sobre todo si se hacen intervenir las condiciones limitativas del proceso. Se han propuesto métodos especiales como el del gra-

(43) J. F. SANDELIEN: *An Approach to Dynamic Optimizing Control of the Continuous Process*, «Communication and Electronics», núm. 49, pp. 291-299 1960

diente y el factorial para esta fase del cálculo (44). En general, cuanto mejor conocido sea el proceso mismo, con más facilidad podrá encontrarse un programa de optimización automática.

Por otro lado, es precisamente en los procesos complejos donde mayor interés presenta la optimización automática, dada la dificultad de ser regulados por el operador humano.

La calculadora tiende, pues, a sustituir al hombre en la supervisión del proceso global de la producción. Con esto se logra una mayor eficacia en los sistemas actuales y permitirá, en el futuro, realizar procesos de producción que hasta ahora estaban fuera de nuestras posibilidades, ya que existía una limitación en la posible complejidad de la fábrica, o en la velocidad de operación, a causa de la propia limitación del operador humano, que debía supervisarla. La calculadora no tiene estas restricciones, con lo que se llega al hecho que puede parecer sorprendente, de que el hombre no puede competir con las propias máquinas que ha creado. Digo que puede parecer sorprendente, pero que no lo es, ya que antes de crear las máquinas elaboradoras de información, había creado las transformadoras de energía, y estamos acostumbrados a observar que éstas realizan un trabajo físico, del que el hombre es incapaz

DESARROLLO ACTUAL DE LA AUTOMATIZACIÓN

Hasta ahora la automatización se ha desarrollado principalmente en las industrias donde la producción es continua como, por ejemplo, la industria química, la industria del petróleo, la producción de energía, la siderúrgica, etc. Las industrias que producen en serie también son susceptibles de ser automatizadas, como por ejemplo, la industria del automóvil, la fabricación de material eléctrico, etc. La automatización ha tenido un clima propicio para su crecimiento en los países más industrializados, ya que en ellos, precisamente, están muy desarrolladas las industrias susceptibles de ser automatizadas.

Aunque se ha indicado el interés creciente del uso de calculadoras en automatización, existen, sin embargo, procesos industriales que por su índole no exigen su presencia. Así ocurre en los procesos de

(44) O. L. DAVIES: *Design and analysis of industrial experiments*. Oliver and Boyd, Londres, 1957. O. L. DAVIES: *Statistical methods in research and production*. Oliver and Boyd, Londres, 1957. J. AURICOSTE et G. GAU: *Automatisme*, tomo 5, mayo junio 1960.

fabricación simples, que siguen un programa fijo, donde el ciclo operativo es siempre el mismo. En estos procesos basta con asegurarse que las diversas operaciones se verifican en el orden y con la duración previamente establecidos. Son procesos de bucle abierto, en los cuales no existe realimentación, y se usan, por ejemplo, en la industria de la alimentación, en embalajes, etc.

Sin embargo, la automatización de los procesos mecánicos, químicos, eléctricos, etc., utiliza, en la mayoría de los casos, el sistema de realimentación, con o sin calculadoras electrónicas, si bien el uso de éstas se extiende cada vez más.

El progreso en la automatización no se realiza, en general, en la industria bruscamente, sino por etapas sucesivas. Ello es debido a varias circunstancias, no siendo las menos importantes las económicas. Se procede, pues, a automatizar parcialmente, cerrando, sucesivamente, sistemas de realimentación, que, en definitiva, serán todos ellos gobernados por una calculadora. Así ocurre con la industria productora y distribuidora de la electricidad en Estados Unidos, donde el proceso de automatización se lleva a cabo según este criterio, y se espera que para 1970 estará en operación el primer sistema productor y distribuidor de energía eléctrica completamente automático (45).

Una de las características de la automatización que conviene destacar, ya que se está empleando cada vez más, y probablemente tendrá gran importancia en el futuro, es la que podríamos denominar tele-automática, y que consiste en transmitir a distancia las señales procedentes de los órganos de gobierno del sistema (46). Esta transmisión de señales tiene, evidentemente, gran interés en aquellas industrias donde intervienen gran número de instalaciones diseminadas, a grandes distancias unas de otras, y que de esta forma pueden ser gobernadas y reguladas desde un organismo centralizado.

El objetivo de la automatización es cada vez más ambicioso y amplía sus límites más allá del campo de los procesos de producción, extendiéndose a la organización completa de las empresas. Según estas perspectivas, el proceso de producción estaría gobernado por un sistema de realimentación, que a su vez formaría parte de un sistema

(45) WILLIAM E. VANNAH: *Control Enters a New Decade*. «Control Engineering», enero 1960.

(46) BROTHMAN: *Digital telemetering Techniques*. «Communication and Electronics», núm. 54, p. 81, 1961. BAYER: *Information System Controls Plant over 500-Mile Data link*. «Control Engineering», vol. 8, núm. 7, 1961.

más complejo, constituido por varios bucles de realimentación. El correspondiente al proceso de producción tendría por variable de entrada órdenes de la dirección, de las investigaciones sobre mercados, del departamento de ingeniería, etc., que indicarían la cantidad de productos a fabricar.

ASPECTOS ECONÓMICOS

Son muchas y diferentes las causas del progreso de la automatización. En algunos casos se automatiza porque es el único procedimiento para la fabricación del producto deseado. En este sentido se han logrado, y se lograrán en el futuro, muchos productos nuevos que no hubieran podido obtenerse sin automatizar. En otros casos, la razón fundamental estriba en obtener productos de mejor calidad y de vida más larga. En algunas fábricas es la protección de los obreros la causa fundamental; así ocurre en los trabajos en las minas, en las centrales térmicas, en algunas fábricas de productos químicos, etc. Una mayor seguridad en las operaciones a efectuar puede ser motivo de automatización; en la URSS, la automatización de las centrales hidro-eléctricas ha tenido como consecuencia una disminución apreciable de las averías en las centrales. En otros casos la automatización disminuye el consumo específico de materia prima, así como el material de desperdicio.

En general, el capital invertido en automatizar una fábrica es superior al necesario para equipar la misma fábrica con los sistemas clásicos de producción. Si lo que se trata es de sustituir la maquinaria de una fábrica que ya está funcionando, por otra automática, el problema del capital se presenta aún más desfavorable. Sin embargo, no siempre ocurre así; en algunos casos, automatizar representa ahorrar capital invertido. En otros, la economía se obtiene al reducir la superficie necesaria para la maquinaria, ya que como ésta es automática, en general, ocupa menos espacio.

De todas maneras, en muchos casos, se automatiza con objeto de obtener un mayor rendimiento económico en la fabricación, debido a la liberación de parte de la mano de obra, y del incremento en la eficacia del personal que queda. Este es el principal objetivo que incita a las empresas a automatizar. Es decir, que si bien aumenta el capital inmovilizado, ello está compensado por una disminución en la mano de obra.

El temor a que esta liberación de la mano de obra dé lugar a paro obrero, es uno de los factores que ensombrecen el panorama de la automatización. Sin embargo, no hay que ser pesimistas a este respecto; basta recordar que este temor también existió en la primera revolución industrial y, no obstante, son innegables los beneficios aportados por ella a la humanidad.

Todo hace suponer que, si bien la automatización sigue un ritmo acelerado, no se implantará de forma brusca y global, ya que existen una serie de factores, muchos de ellos económicos, que en la mayoría de los países tienden a retrasar su implantación. Este proceso evolutivo de la automatización aliviará el posible paro obrero. De hecho, actualmente, en los países más adelantados industrialmente, donde el proceso de automatización tiene un campo más propicio para desarrollarse, con una economía en proceso de expansión, existe falta de mano de obra, así como de personal técnico y científico.

Pero aunque el proceso de automatización dé lugar a un cierto paro temporal (y ello dependerá del ritmo de implantación del automatismo), se han preconizado muchas soluciones para aminorarlo. Una de ellas consistiría en elevar el nivel técnico de los obreros afectados por la automatización, de forma que pudieran ejercer las funciones de supervisión y mantenimiento de las propias máquinas que los desplazan en las fábricas. Esto no sería más que una solución parcial, ya que el número total de los obreros de la empresa quedaría reducido, normalmente, al automatizar. Por otro lado, no todos los obreros están en condiciones de sufrir este cambio en su trabajo.

Posiblemente sería una mejor solución crear escuelas profesionales, donde los obreros pudieran adquirir otra profesión más adecuada a las necesidades de la automatización. Sin duda, esta solución no se adapta a aquellos obreros cuya deficiente formación les excluye de la posibilidad de aprender un nuevo oficio; en el período de transmisión habrá dificultades en este sentido, pero son las propias empresas las que deben tratar de resolverlas, posiblemente con ayuda estatal (47).

El papel de los Gobiernos puede dirigirse a la realización de obras públicas en gran escala que, beneficiando al país, absorban a los obreros desplazados temporalmente por la automatización.

Este problema se verá también suavizado por otra consecuencia

(47) LORD HALSBURY: *L'Automation, fiction verbale, réalité psychologique*. «Impact», vol. VII, núm. 4, diciembre 1956.

importante de la automatización, la reducción de la jornada de trabajo, que exigirá un incremento en la mano de obra. Por otro lado, parte de la mano de obra liberada podrá ser absorbida por las industrias aún no automatizadas y por las nuevas industrias que aparecerán como consecuencia de la automatización.

Otro problema económico que se plantea es la necesidad cada vez mayor, de nuevas inversiones de capital para seguir el ritmo creciente de la automatización. Ello dependerá, sin duda alguna, de la situación económica e industrial de cada país, lo cual se traducirá en una política distinta para cada uno.

Si bien son evidentes los beneficios que reportará a la humanidad el uso progresivo de la automatización, no es posible aún concretar las consecuencias que pueden derivarse desde el punto de vista de la economía general de cada nación, debido principalmente a que los datos que se poseen hasta ahora son insuficientes.

Sería preciso una cooperación internacional con objeto de obtener datos precisos sobre los resultados de la automatización en los diferentes países, estimulando el estudio de las relaciones entre la automatización y el aumento de la productividad, así como la política general de inversiones de capital, implantación de industrias, etc.

Esto ha sido iniciado ya por la *Organización Europea de Cooperación Económica*, y es de esperar que estos estudios permitirán encauzar el desarrollo de la automatización en su aspecto económico.

ASPECTOS SOCIALES

Un aspecto muy importante de la automatización desde el punto de vista social, es la sustitución del obrero en sus trabajos rutinarios, satirizados por Chaplin en una de sus películas. La automatización llevará al *uso humano de los seres humanos*, según frase de Wiener, eliminando tanto el trabajo en cadena de las fábricas, como el monótono y reiterativo de las oficinas, en las cuales el hombre utiliza una parte mínima de su inteligencia. El hombre desligado de esta servidumbre podrá dedicar sus actividades a una labor creadora y que exija iniciativa. Se necesitarán, de todas maneras, en las fábricas, incluso completamente automatizadas, personal, pero su trabajo será de otro tipo. Trabajo de supervisión y mantenimiento por un lado, y de programación de la labor a realizar por otro. Con

esta clase de trabajo se aumenta la categoría del obrero, adquiriendo mayor importancia y dignidad.

Sin duda alguna, hay tareas que, por su idiosincrasia misma, no se prestan a la automatización, como, por ejemplo, la construcción de edificios, de puentes, de presas, el trabajo en el campo, etc. Pero también es cierto que si bien en ellos se exige esfuerzo muscular, no pueden compararse, bajo el punto de vista psicológico, con la monotonía de la repetición inacabable de las mismas operaciones en la labor en cadena.

Este mayor número de horas libres, este incremento del ocio, es de esperar que producirá un mayor nivel educativo de las gentes, mayor cultura, así como también aumentará el tiempo dedicado a deportes, viajes, espectáculos, etc. Esto tendrá una consecuencia secundaria: el florecimiento de las empresas dedicadas a satisfacer estas necesidades de las gentes en las horas libres, lo cual dará lugar a la creación de nuevas industrias, y a un desarrollo de las actuales. Estas industrias, denominadas en América «leisure industries», han adquirido en el mundo actual un volumen que sorprende. Así, según se desprende de un estudio estadístico, el pueblo americano gasta anualmente cerca de 32 mil millones de dólares en productos y servicios del mercado del ocio, es decir, el doble que para el automóvil y la mitad que para la alimentación. Con el aumento de horas libres a que la automatización conducirá forzosamente, estas industrias del ocio se desarrollarán en mayor proporción, creando necesidades, muchas de ellas artificiales (48).

Una de las tareas de más responsabilidad para las clases dirigentes será encauzar estas actividades fuera de las horas de trabajo, con objeto de aumentar la cultura del hombre en un sentido preferentemente humanista, que contrarreste la mentalidad materialista que puede surgir en un mundo dominado por el automatismo.

Esto nos lleva a otro punto importante. La necesidad de nuevos métodos de enseñanza y de formación adaptados a esta nueva civilización, a cuyo nacimiento estamos asistiendo.

La era del automatismo exigirá un número creciente de especialistas, pero, al propio tiempo, también necesitará científicos e ingenieros de espíritu creador, con una base científica y técnica muy amplia, que les permita el diálogo con los especialistas, con objeto de

(48) FREDERIK POLLOCK: *L'Automation*. Les éditions du Minuit. París, 1957. pág. 134.

hallar caminos nuevos, dentro de la complejidad creciente de los problemas que presentará la Automática en el futuro.

Para formar esta «élite», estos cuadros técnicos superiores, será preciso darles una formación profesional amplia, que se extienda a diferentes especialidades. Al lado de estos dirigentes científicos de la Automática, con una visión global de la misma y que irán creando una nueva tecnología, deberán existir gran número de especialistas que se encarguen de llevar a cabo, de plasmar en realidades, los nuevos senderos abiertos por aquéllos.

También se deberá renovar, siguiendo nuevos cauces, la formación profesional de los obreros, adaptándola a los nuevos derroteros tecnológicos.

Por otro lado, el desarrollo de la automatización con su secuela de problemas económicos, exigirá, también, la formación de cuadros dirigentes de las empresas industriales. Hasta hace poco se consideraba que los buenos administradores nacían, no se hacían; la administración de los negocios se consideraba más un arte que una ciencia. Sin embargo, hace unos años se han descubierto teorías de tipo cuantitativo, que harán evolucionar a la administración de las empresas (*gestion des affaires*) en forma cada vez más científica (49).

Diremos sólo unas palabras sobre la automatización en los países poco desarrollados. Desde este punto de vista existen opiniones dispares. Por un lado algunos autores, entre ellos Leontief, opinan que precisamente es en los países subdesarrollados en donde la automatización puede tener más éxito, ya que permite quemar etapas en el progreso técnico. En efecto, opinan que no existiendo mano de obra calificada, más fácil que preparar ésta para la producción no automatizada, es formar el personal técnico reducido que exige la automatización. Al mismo tiempo, el problema económico que se presenta en los países desarrollados, al sustituir o modificar los sistemas de producción existentes por los nuevos, no aparece en los países subdesarrollados, dada la escasez de equipos industriales instalados.

Por otro lado, existen teorías completamente opuestas a las anteriores, que defienden que en los países poco industrializados, los progresos técnicos en los métodos de producción no pueden reali-

(49) ALEXANDER KING: *La gestion des affaires. Une technologie*. «Impact Science et Société», vol. VIII (1957), núm. 2.

zarse quemando etapas, sino que se deben pasar por fases sucesivas hasta llegar a los métodos de producción en los países más desarrollados. Esto, con más motivo se aplicaría a la automatización. Se parte de la base, para preconizar esta teoría, de que dada una cierta relación de capital invertido-coste mano de obra, no se puede desarrollar la industria produciendo una variación brusca en esta relación, como ocurriría aumentando mucho el capital invertido como consecuencia de la automatización. Es decir, que en los países poco desarrollados en que el coste de la mano de obra es pequeño, el capital invertido tiene que estar en consonancia con aquél, y por consiguiente, no debe ser muy grande. Se arguye también, a mayor abundamiento, que no existen en estos países grandes capitales para invertir.

Entre estas dos posiciones, una optimista y otra pesimista, existe, posiblemente, un término medio que hay que considerar.

De los dos factores, capital y trabajo, hemos visto que en la mayoría de los casos, el proceso de automatización, ahorra el segundo factor e incrementa el primero, es decir, que desde este punto de vista, no parece apropiada su implantación en los países poco desarrollados; pero esto no siempre es verdad: existen casos en los cuales las técnicas del Automatismo suponen una disminución del capital empleado. En otros la implantación de la automatización lleva consigo un ahorro de capital y trabajo, lo cual es también conveniente a los países poco desarrollados, y aun ello permite la iniciación de industrias nuevas, al producirse una reducción simultánea de ambos factores de la producción (50).

Por otro lado, incluso aquellos procesos de automatización que llevan exclusivamente a un ahorro de la mano de obra, pueden ser interesantes para los países atrasados, escogiendo convenientemente industrias nuevas en el país y que, por consiguiente, no exijan sustitución del material existente, y que, además, no necesiten un gran capital. Ya hemos visto que una de las ventajas de la automatización estaba, precisamente, en producir mejor y más barato que en los procedimientos clásicos, y por consiguiente, siempre que ello no sea demasiado oneroso para el país, a la larga redundará en beneficio del mismo como fuente de divisas.

(50) F. ESTAPÉ: *Automática y Economía*. Actas del Congreso Internacional de Automática, 1958.

Habrá que estudiar, con gran detenimiento, y teniendo en cuenta el conjunto de factores económicos e industriales de cada país, la forma de aplicar la automatización con mayor o menor rapidez. Pero es de esperar que el impacto social de la automatización será tan grande para la humanidad, su beneficio será tan considerable, el nuevo sistema de vida que nos ofrece es tan esperanzador, que nos cuesta trabajo creer que ello pueda ser sólo disfrutado por determinados países, por muchos argumentos económicos que se puedan presentar en defensa de esta tesis.

* * *

Sólo unas palabras antes de terminar. Este mundo maravilloso, tan lleno de vida y de promesas, que con mano torpe he tratado de bosquejar, cuenta solamente unos quince años de vida. En este corto tiempo ; cuántas realidades fecundas se han logrado y cuántos caminos se han abierto a la investigación! Algunos de ellos se están descubriendo con el esfuerzo y la estrecha colaboración de investigadores de distintas procedencias: matemáticos, ingenieros, físicos, fisiólogos, lingüistas, economistas, etc.

Este espíritu de colaboración no solamente es imprescindible en ciertos aspectos del campo de la automática, sino también en otras ramas de la Ciencia. Me atrevería a decir que es una de las características de nuestro tiempo, del mundo científico en que vivimos. Se ha dado un paso más ; no sólo es necesaria la labor de equipo entre especialistas de una misma disciplina, sino también la colaboración entre los que cultivan materias diferentes.

Tengo la esperanza de que también en España, se logrará esta colaboración y de que al gran ejército de investigadores que dedican su vida a ensanchar las fronteras de la Automática se sumarán, también, muchos de los que integran la juventud investigadora de nuestro país, que está demostrando, tanto en nuestra Patria, como fuera de ella, que no es cierta la tan extendida teoría sobre la incapacidad de los españoles para la investigación científica.

DISCURSO DE CONTESTACION

POR EL ACADEMICO NUMERARIO

EXCMO. SR. D. JOSÉ BALTÁ ELÍAS

Excmos. Sres. Académicos. Señoras, Señores:

Sean mis primeras palabras expresión de mi profundo agradecimiento a la Directiva de esta docta Casa por haberme otorgado el alto honor de representarla dando la bienvenida al nuevo Académico en su solemne recepción.

Actos como el que estamos celebrando constituyen plausible manifestación de la ineludible ley de vida, con la que cumple nuestra Academia llamando a su seno a prestigiosos miembros que al aportar nueva savia, aseguren la continuidad de funciones de la Corporación al sufrir ésta la dolorosa desaparición de alguno de nuestros compañeros. Tal ocurrió al fallecer el ilustre general y exministro D. José M.^a Fernández Ladreda (q. e. p. d.), a quien debe gratitud perenne el que tiene el honor de dirigiros la palabra, por haberse gentilmente ofrecido a apadrinarnos en el acto de nuestra recepción académica.

Pero la sucesión de aquel distinguido compañero ha constituido un caso especial, quizá único en la historia de la Academia, pues el duelo que experimentamos hubo de repetirse desgraciadamente por dos veces, sin llegar a proveerse la plaza vacante, como si por inescrutables designios del Destino, un maléfico hado se complaciera en asestar sus fatales golpes a los dos sucesores del benemérito General, los queridos y eminentes compañeros en el profesorado, don Miguel Catalán Sañudo y D. Arturo Duperier Vallesa, quienes electos sucesivamente, no pudieron llegar a sentarse en el sillón que hoy va a ocupar otro dilecto colega de la Facultad de Ciencias, D. José García Santesmases.

Holgariame en esbozar aquí su semblanza científica, pero ello exigiría dar a mis palabras una extensión desacostumbrada en estos actos; sin embargo, con la venia de este ilustre auditorio, voy a permitirme describir a grandes rasgos lo que podríamos considerar como trayectoria intelectual del neófito. Rehuendo el elogio diti-rámico, «procuraré alabarle menos a fin de que le conozcáis más», según frase feliz de Montaigne.

Allá por los comienzos del año 1943, en nuestros laboratorios del Instituto de Física «Alonso de Santa Cruz», recibíamos la visita del joven licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Barcelona, García Santesmases (que ya estaba en posesión desde 1930 del título de Ingeniero Electricista de la renombrada «Ecole Supérieure d'Electricité» de París), quien junto con la amable presentación de nuestro común e inolvidable maestro en aquella Universidad, Doctor D. Isidro Polif (q. e. p. d.), traía ya muy avanzado un trabajo sobre «Contribución al estudio de la ferorrresonancia y la autoinducción», que constituyó el núcleo de su tesis doctoral, la que obtuvo la máxima calificación y que aquel mismo año fue galardonada con el Premio «Juan de la Cierva» en el concurso convocado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Este trabajo constituye una importante aportación original al fenómeno de la ferorrresonancia, pues en él se aborda no sólo desde el punto de vista teórico si que también experimental la *ferorrresonancia en paralelo*, que hasta aquella época sólo había sido tratada de modo incompleto y accidentalmente.

Hasta entonces, los fenómenos de ferorrresonancia se habían observado más o menos esporádicamente en las redes de distribución eléctrica: séanos permitido recordar a este respecto los graves accidentes por la misma provocados, al parecer, al iniciarse la explotación de suministro de energía eléctrica en Cataluña por la primera Compañía (vulgarmente conocida por «La Canadiense») en nuestros años mozos y sobre los cuales nos había dado doctas explicaciones nuestro venerado maestro, gloria de la Universidad española y eminente miembro de esta Academia, D. Esteban Terradas (q. e. p. d.).

Llevado de la vocación pedagógica, nuestro apadrinado supo compaginar su labor de investigación con la preparación de oposiciones a cátedra, ganando brillantemente en la primavera de 1944 la de Física teórica y experimental de la Universidad de Granada. Dos años más tarde, finalizado el curso de 1945-46, obtenía nuevamente, por oposición, la cátedra de Física industrial de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid, cargo que desempeña actualmente.

Al tomar posesión de la misma, su gran preocupación fue dotarla de los imprescindibles laboratorios que no existían, por ser cátedra de nueva creación; hasta lograr este propósito, dedicó gran

parte de sus esfuerzos, fruto de los cuales es el moderno instrumental y maquinaria seleccionado cuidadosamente, atendiendo a su multiplicidad de aplicaciones. Desde entonces, la labor de García Santesmases ha sido, y sigue siendo, de dedicación completa a la cátedra y a la investigación; esta doble misión ha tratado de cumplirla con entrega absoluta, sin concesión alguna a otras actividades o dispersiones accidentales.

Pero a pesar de las múltiples actividades desplegadas por nuestro apadrinado, se evidencia inmediatamente al echar un vistazo a su abundante producción científica, que el *leit-motiv* de la misma, lo que permanece latente en su subconsciente, su tema favorito en una palabra, es la ferromresonancia y su aplicación a las máquinas calculadoras analógicas y digitales, fecundo germen que tan óptimos frutos ha dado entre sus manos; hasta las cuatro patentes de invención que lleva registradas en nuestro país, versan exclusivamente sobre aquel tema.

Los sistemas ferromresonantes de cálculo y control iniciados y desarrollados por García Santesmases han señalado nuevos caminos a la investigación, que han logrado difusión internacional y que actualmente son seguidos por investigadores de diferentes países. Puede decirse que hasta 1952 no aparecen los primeros atisbos para el empleo de la ferromresonancia en el cálculo automático. En este año García Santesmases (que entonces trabajaba en el «Computation Laboratory» de la Universidad de Harvard) (1), e independientemente Isborn (2) en California, descubrieron la posibilidad de aplicarla a los circuitos de cálculo y control de una calculadora digital, este último en forma de circuito biestable *serie* y el primero *en paralelo* con polarización de corriente continua en el núcleo (circuitos conocidos en inglés con el nombre de *flip-flop*).

A su regreso a España, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas encarga a García Santesmases de la dirección del Instituto de Electricidad recién creado, en donde rodeado de valiosos colaboradores, continúa los trabajos sobre circuitos ferromresonantes iniciados en la Universidad de Harvard.

Se aumentó la frecuencia portadora hasta 1.5 megaciclos/s., con

(1) J. GARCÍA SANTESMASSES: *Progress Report* núm. 22. The Computation Laboratory. Univ. Harvard. 10 feb.-10 mayo 1952.

(2) ISBORN: *Electronics*, 25-4, pp. 121-123. Abril 1952.

una frecuencia de impulsos de 150 kilociclos/s., empleando por primera vez núcleos de ferritas y estableciendo nuevos circuitos. Estos resultados del grupo español fueron objeto de una comunicación presentada al Congreso Internacional sobre «Calculadoras electrónicas» celebrado en el National Physical Laboratory (Inglaterra) en 1953 (3).

Los circuitos ferromagnéticos de cálculo presentan ciertas ventajas sobre otros circuitos que emplean válvulas, tales como mayor seguridad, vida más larga, menor consumo de potencia, lográndose que ésta sea la suficiente en la salida de un elemento para que la información se transmita a otro, o simultáneamente a varios. Su estudio presentaba, pues, gran interés, y ello motivó que las nuevas técnicas ferromagnéticas se abriesen camino en el mundo de las calculadoras y que se publicaran trabajos sobre este tema en diferentes países. Entre los autores de aquéllos hay que destacar a Duinker (4), que también emplea la polarización con corriente continua, pero utilizando el circuito serie, Cutler (5), que aplica la ferromagnética a circuitos de decisión, utilizando para ello circuitos de coincidencia, a base de diodos, en combinación con el circuito biestable ferromagnético. Arbon y Jones (6), que también estudian estos circuitos, indicando la posibilidad de utilizar núcleos con polarización; y, en fin, Proebster (7), que lleva a cabo interconexiones entre circuitos biestables y consigue operaciones lógicas, utilizando como eslabones intermedios núcleos magnéticos estáticos.

Entre tanto, las investigaciones del grupo español progresaban lentamente, ya que era necesario contar con aparatos de medida muy precisos y con nuevos materiales magnéticos. Por fortuna, a partir de 1957, y gracias a la generosa ayuda, que aún continúa, del Organismo para Investigación de las Fuerzas Aéreas Americanas en Europa, se pudo desarrollar a fondo un plan de trabajo sistemático.

(3) J. GARCÍA SANTESMAS: *Parallel ferromagnetic triggers*. «Automatic Digital Computation». Nat. Phys. Lab. Londres, 1954.

(4) S. DUINKER: *A shifting Register using Ferromagnetic Flip-Flops*. «Applied Sciences Research», 1955, B-4, p. 317.

(5) P. H. CUTLER: *Ferromagnetic Trigger Circuits*. «S. R. D. E. Report», núm. 1.083, 1955.

(6) R. S. ARBON and P. H. JONES: *Ferromagnetic Computing Circuits*. *Wireless World*, 62, p. 324, 1956.

(7) W. E. PROEBSTER: *Ferromagnetic Switching Circuits*. Congreso Internacional de Automática. Madrid, 1958.

En los ensayos realizados sobre núcleos magnéticos, reduciendo las dimensiones de éstos y modificando su forma, se busca principalmente aumentar la frecuencia de la portadora utilizada. El estudio de nuevos circuitos ferromagnéticos tiene por finalidad desarrollar un sistema completo de lógica de circuitos, es decir, todos los necesarios en una calculadora digital. Aparte de los circuitos biestables y los registros de corrimiento, se obtienen circuitos de decisión, realizando las operaciones lógicas fundamentales («Y», «O», «inhibición») mediante circuitos ferromagnéticos exclusivamente, es decir, sin necesidad de usar elementos auxiliares (núcleos estables o diodos), como ocurre en los trabajos de los investigadores mencionados. Como elemento fundamental se emplea una autoinducción compleja, constituida por varios núcleos conectados en serie o en paralelo a través de su arrollamiento de alterna. Por este método de la autoinducción compleja pueden obtenerse incluso operaciones lógicas más complicadas que exigen la interconexión de varios circuitos «Y» y «O». Aplicando estos circuitos fundamentales se obtienen, entre otros circuitos, un semisumador y un sumador serie. La comprobación experimental se ha realizado con una frecuencia de portadora de 2 Mc/seg y una frecuencia de impulsos de 200.000 a 300.000 por segundo (8).

Pasemos ahora a la labor realizada por García Santesmases en el vastísimo campo de las modernas calculadoras electrónicas, tanto analógicas como aritméticas o digitales. En lo concerniente a estas últimas, la labor de García Santesmases puede dividirse cronológicamente en dos etapas. La primera tuvo lugar en el «Computation Laboratory» de la Universidad de Harvard (EE. UU.), donde nuestro neófito estuvo trabajando entre 1951 y 1952 con el profesor Aiken, adquiriendo las técnicas sobre aquellas máquinas. Específicamente, allí realizó el diseño y ejecución del *shift-circuit* (circuito de corrimiento), uno de los órganos de la máquina «Mark IV», que entonces estaba en construcción. Este trabajo fue publicado por dicho laboratorio norteamericano.

La segunda etapa a que antes nos referimos se ha realizado en España, aplicando la experiencia adquirida por García Santesmases

(8) J. GARCÍA SANTESMASSES: *Research on ferromagnetic Computer and Control devices*. Contrato No. Air Force 61 (514) 1234. «Technical Note», núm. 1: abril 1957-marzo 1958; núm. 2: abril 1958-marzo 1959; núm. 3: abril 1959-julio 1960

en Harvard a la realización, conjuntamente con sus colaboradores, de una máquina digital en nuestro país.

Limitaciones de orden económico y de personal obligaron a llevar a cabo la labor en fases sucesivas, la primera de las cuales se cumplió al terminarse la construcción del Acumulador Electrónico Digital (unidad aritmética).

En 1953, con la colaboración del personal investigador del Instituto de Electricidad, inicia las investigaciones con vistas a la realización de un Analizador Diferencial Electrónico, que condujeron a su proyecto y construcción, quedando terminado completamente en 1954. Esta calculadora electrónica ha sido la primera, y hasta ahora única, construida en España, y obtuvo el primer Premio «Juan de la Cierva» 1954 para equipos. García Santesmases presentó una comunicación sobre este analizador en las «Journées Internationales du Calcul Analogique» que se celebraron en septiembre de 1955 en Bruselas, donde además expuso los fundamentos de un multiplicador-divisor a integraciones periódicas, así como los principios básicos del generador de funciones con diodos. Ulteriores investigaciones sobre estos elementos no lineales han dado lugar a la publicación de otros trabajos del nuevo Académico, en colaboración con algunos investigadores de su escuela, casi exclusivamente única en nuestro país; a este respecto, entre los escasos cultivadores españoles de aquellas disciplinas, nos complace citar aquí como homenaje póstumo al eminente y llorado compañero de profesorado y de esta Academia, D. Pedro Puig Adam (q. e. p. d.).

En 1957, García Santesmases fue invitado a tomar parte, a expensas del Comité organizador, en el Simposio Internacional sobre «Theory of Switching», celebrado en la Universidad de Harvard, en donde presentó una comunicación sobre «Switching Research in Spain».

Ya habéis oído cómo el recipiendario, aparte de sus propios trabajos, tuvo a gala, en un arranque patriótico, dar a conocer los de aquel gran iniciador en nuestra Patria, Torres Quevedo. Aprovecharé la ocasión para recalcar que en tan solemne acto no dejé de mencionar asimismo la meritoria labor de Puig Adam, a quien acabo de referirme en emocionado recuerdo.

En el otoño de 1958, García Santesmases fue Presidente de la Comisión organizadora del Congreso Internacional de Automática celebrado en Madrid, al que concurrieron unos 400 delegados de 19 naciones, representando a 30 Universidades, y más de medio cen-

tenar de organizaciones industriales; entre las 57 comunicaciones científicas y técnicas presentadas, 10 eran originales de investigadores españoles. La labor científica de García Santesmases y sus colaboradores sobre la aplicación de la ferromagnetización a los elementos lógicos de las calculadoras, así como su prioridad en este campo, se destaca en un artículo dedicado al Congreso en cuestión y publicado en el número de enero 1959 de la revista francesa «Automatisme».

Fue Vicepresidente del Congreso Internacional sobre «Elaboración numérica de la Información», celebrado en París en junio de 1959 bajo los auspicios de la UNESCO y que congregó a unos dos mil especialistas procedentes de unos 37 países. Esta distinción concedida a García Santesmases fue acordada por unanimidad por el grupo de consultores de la Conferencia, considerándose al mismo tiempo que «un reconocimiento de su prestigio científico, una pública estimación de los resultados obtenidos en el Congreso Internacional de Automática que por su iniciativa tuvo lugar en Madrid en 1958».

Actualmente es miembro del «Council» de la Federación Internacional del Tratamiento de la Información (IFIPS), nuevo organismo que constituye uno de los más importantes cimientos para el futuro de la tecnología y de la humanidad.

Finalmente, una faceta (a mi juicio la más excelsa) de las actividades de García Santesmases, que da la medida de su capacidad de trabajo, es la creación de una brillante escuela de especialistas a la que antes ya me he referido, algunos de ellos ya catedráticos de nuestras Universidades, otros, investigadores del C. S. I. C. u ocupando puestos clave en la industria nacional.

¡¡A Dios gracias, se mantiene el abolengo de España en Automática, iniciado por nuestro glorioso Torres Quevedo y continuado por aquellos dignos seguidores *de la escondida senda por la que pocos han ido...!!*

A este propósito, es un grato deber mencionar, como *compañeros de similar itinerario*, al prestigioso Académico D. Antonio Colino, que ha contribuido a enriquecer la bibliografía patria sobre la materia; D. Angel González del Valle, catedrático y jefe del Departamento de Cálculo Electrónico, del Patronado «Alfonso el Sabio» del C. S. I. C., y al malogrado catedrático D. Angel Vegas Pérez (q. e. p. d.), todos ellos de la recia estirpe de la ingeniería española.

Perdonadme si ahora me permito alguna apostilla concerniente al momento culminante de terminarse la construcción del Acumulador electrónico. Simplemente voy a referirme a un reciente artículo aparecido en la revista norteamericana «Communications of the Association for Computing Machinery» (9), y que luego ha reproducido el «Boletín del Centro Internacional de Cálculo». En él se hace un balance de los progresos realizados durante estos últimos años en 30 naciones europeas en el campo de las calculadoras digitales, y se indica que solamente España, Grecia, Hungría, Irlanda, Portugal y Turquía, carecen de aquel tipo de máquina propia, es decir, *construida en el propio país*.

Ahora bien, con este motivo, conviene hacer hincapié sobre el hecho paradójico de que entre aquellos seis países, es España el único que allí se menciona por su labor investigadora en esta materia y por las notables realizaciones conseguidas; y ello por obra y gracia de García Santesmases y sus colaboradores, forjadores de la escuela española, que ha conquistado merecido prestigio internacional.

Sírvales de consuelo pensar que posiblemente una decena de años atrás, acaso el clima espiritual de nuestro país no fuera propicio para captar la necesidad de una calculadora digital ni la trascendencia para el futuro de estas maravillosas máquinas. Sin embargo, bien se ve que poco a poco se ha ido introduciendo en nuestro ambiente la necesidad de las calculadoras electrónicas, y debemos felicitarnos de que las altas esferas directrices de la nación, viviendo el momento presente y sintiendo las inquietudes de nuestra época, hayan decidido la importación de máquinas calculadoras... que podían haber sido construidas en España por españoles.

* * *

Cumplida ya la obligada presentación del neófito, acaso con no todo el acierto que yo desearía, quisiera también poseerlo para glosar, aunque sólo sea superficialmente, los principales tópicos contenidos en la enjundiosa oración que acabamos de oír tan complaci-

(9) N. M. BLACHMAN: *The state of digital computer technology in Europe*. «Comm. Ass. Comp. Mach.», 4, núm. 6, junio 1961.

dos; voy a intentarlo aun a sabiendas de las graves dificultades de mi empeño.

El discurso del nuevo académico constituye, a nuestro modo de ver, lo que se ha llamado *signo de nuestro tiempo*, caracterizado por un deslumbrante y arrollador progreso técnico, junto a un confusionismo y subversión tales, que los que peinamos canas no recordamos haber vivido anteriormente; con ello, no pretendemos admitir, ni mucho menos, ¡librenos Dios!, que nuestra atormentada Humanidad no haya pasado por pretéritos períodos análogos y aun probablemente mucho peores.

Del celebrado libro debido al eminente filósofo e historiador profesor Karl Jaspers, «Vom Ursprung und Ziel des Geschichte» (Del origen y objeto de la Historia), entresacamos el siguiente párrafo: «Nuestra época y nosotros pertenecemos a las grandes corrientes de la Historia. El tiempo que vivimos nada sería si se concretara al solo horizonte de los tiempos presentes.» Y en un artículo del propio autor, titulado «Arbeit und Technik» (10), desarrolla sus puntos de vista ante el advenimiento de la técnica en función del destino del mundo. Sus principales epígrafes tratan de los siguientes puntos: Valoración del trabajo y de la técnica moderna; Apartamiento de la Naturaleza y nueva aproximación; Reconocimiento de los límites de la técnica.

No vamos a seguir a este autor en sus atinados juicios, pero las conclusiones a que llega no difieren de las que se forja el hombre de la calle, verdadero galeote de nuestra tan decantada época; vivimos en una civilización mecanicista sujeta a leyes inexorables y frente a la deshumanización que ello acarrea, es preciso que el hombre supere su propia contradicción.

A este propósito, nos complacemos en traducir los siguientes párrafos, profundamente humanos, escritos hace ya un lustro por nuestro buen amigo H. B. G. Casimir, distinguido profesor de la Universidad de Leiden y director de los laboratorios de investigación de las casa «Philips» en Eindhoven:

«Formamos parte del mundo actual como todo hombre y los científicos acaso más. Uno de los graves problemas de nuestra época es la falta de contacto espiritual entre la estructura material de nuestra civilización técnica y los que vivimos en ella, una falta de com

(10) «Schweizerische Technische Zeitschrift», 54, núms. 16/17, 25 abril 1957.

comprensión en los que determinan el destino del hombre, de la naturaleza de los factores materiales que constituyen la estructura o andamiaje dentro de la cual deben tomarse sus decisiones. Nosotros y sólo nosotros, científicos, somos capaces de rellenar este bache, y aunque la comprensión de las leyes básicas de la Naturaleza no conduzca por sí misma a la sabiduría humana, en nuestro mundo actual, sabiduría sin comprensión es totalmente estéril. y creo que debemos hacer mucho más. Al enfrentarnos con intrincados problemas o ideas difíciles, hemos encontrado puntos de confluencia entre pueblos de distintas nacionalidades, una aceptación común de la verdad abstracta, una común admiración de la belleza de los elementos de prosperidad, así como de la grandiosidad de los conceptos unificadores. Estas son cuestiones que, aunque insuficientes en sí mismas, contienen indudablemente ciertos elementos para conseguir un mundo mejor. Aceptando nuestras responsabilidades como físicos y como hombres, tenemos el deber de incluir esta herencia como parte integrante de nuestra lucha contra el desastre que nos amenaza y para el bien de la humanidad.»

Los anteriores párrafos invitan a profunda reflexión sobre el papel que le incumbe al científico en estas horas cruciales que vive la sociedad actual.

Por otra parte, la voz augusta del Sumo Pontífice Juan XXIII, con su clara visión de los problemas sociales, acaba de resonar hondamente difundiendo su superior opinión con la profunda Encíclica «Mater et Magistra».

Automatización.—El exceso de la demanda sobre la disponibilidad de la mano de obra, conduce al empleo, cada vez en mayor escala, de los sistemas de mando automático en fábricas, talleres y oficinas. El técnico dispone actualmente de reguladores, servomecanismos, cerebros electrónicos, memorias artificiales, etc., que nos incitan a dar rienda suelta a nuestra imaginación sobre la proximidad de la automatización total del mundo industrial.

El vocablo encierra un significado más profundo del que fácilmente nos damos cuenta al examinar atentamente la simple operación de montar una pieza en una máquina útil que debe trabajarla. El obrero ha de fijar dicha pieza en posición correcta, centrarla o descentrarla con la máxima precisión, ajustar la carrera de los accesorios (cambiarlos si están desgastados), las velocidades de avance de corte, etc., etc.

Todas estas operaciones requieren un tiempo considerable que debe reducirse al mínimo si la automatización ha de ser completa. Ahora bien, tales operaciones llevan inherentes fatalmente errores que, por pequeños que sean, pueden originar consecuencias desagradables y a veces irreparables, acarreado incluso la devolución de «stocks» enteros.

El operario no pone en marcha su máquina sino después de realizar numerosas comprobaciones para asegurarse de que cumple las tolerancias requeridas; en cambio, la verdadera automatización realiza automáticamente aquellas comprobaciones mediante dispositivos de retroalimentación que corrigen la posición de la pieza.

Ello implica una retroacción del efecto sobre la causa *sin la intervención del operario*, quien antiguamente, gracias a sus ojos, su cerebro, sus músculos, etc., aseguraba aquella reacción en el trabajo de las máquinas clásicas.

Precisamente en la puesta a punto de este principio tan general de la realimentación (bucle cerrado) que, como muy acertadamente dice García Santesmases, sujeta la causa al efecto producido, es en donde reside lo que la automática posee de profundamente renovador o revolucionario.

Tal principio es de tan profunda raigambre, que ha permitido poner en evidencia la existencia de uno o varios bucles cerrados en numerosos fenómenos, a veces sin conexión aparente, y como consecuencia se ha tratado de introducir la realimentación en los más diversos procesos de producción, ya sean de bienes materiales (máquinas-herramientas, derivados del petróleo, productos alimenticios, etcétera), ya sean de *servicios* (contabilidad, clasificación, trabajos de oficina, etc.).

Puede decirse que la mecanización tendió a sustituir el esfuerzo muscular del hombre por la máquina, y que la automatización (prolongación de aquélla) tiende a sustituir el trabajo no muscular (no decimos cerebral) por la máquina.

La automatización de las cadenas de producción exige un profundo estudio previo a causa de la importancia de los capitales invertidos; ello obliga a echar mano de un verdadero arsenal de métodos teóricos, de una parte, y del cálculo analógico, de otra. En electrónica, el estudio de los sistemas eléctricos con realimentación ha dado origen al ingente desarrollo de un conjunto de métodos matemáticos y de física aplicada que se han extendido a todos los

dominios del control automático ; es de notar a este respecto la frecuencia relativamente baja de los fenómenos en comparación con la de los radioeléctricos. Sin embargo, las técnicas de cálculo son exactamente iguales para los circuitos lineales, pero no lo son las dificultades que, como es bien sabido, suben de punto a pesar de las tentativas de sistematización (Poincaré, van der Pol, Andronov y Chaikin, Rocard, Hayashi) en esta frondosa rama de las matemáticas. En el primer caso, es posible analizar el comportamiento de los servomecanismos por los métodos de la transformación de Laplace o de respuestas frecuenciales o indiciales hoy día perfectamente asentadas.

Como precisamente las aplicaciones de regulación y de control automático tienen por objeto compensar los efectos debidos a las variaciones fortuitas en los procesos de producción, los fenómenos esenciales que deben estudiarse son de naturaleza transitoria de una parte y al mismo tiempo de carácter estático.

Los problemas de síntesis, de primera importancia para el ingeniero, son más complejos ; una técnica que podríamos denominar de *paso a paso* por adición de circuitos de compensación previamente analizados, permite obtener los resultados apetecidos. Es digno de notar que los métodos de síntesis conducen a resultados óptimos si se ha adquirido previamente una idea más o menos exacta del comportamiento estadístico de las perturbaciones eventuales. En efecto, el conocimiento, entre otros, de las funciones de correlación de las perturbaciones (*ruido de fondo*), permite construir *a priori* la función de transferencia que hace mínimo el error cuadrático medio del sistema de regulación que debe construirse.

Desde luego, este último método de síntesis es más refinado y requiere mayor acopio de conocimientos teóricos, pero vale la pena de ser utilizado porque, en general, permite realizar los servomecanismos propuestos con un mínimo de componentes.

Desgraciadamente, todas estas técnicas sólo permiten estudiar de modo muy aproximado los circuitos que comprenden elementos no lineales (y éstos son numerosos) ; así, todo elemento mecánico presenta cierto *juego* inevitable, los elementos de detección poseen determinados umbrales de sensibilidad, otros están sujetos a una cierta saturación, etc. El cálculo puramente numérico permite conocer las características de un sistema determinado, pero cada caso debe ser tratado separadamente ; ello es fastidioso e introduce aplazamientos

en la evaluación *grosso modo* de los problemas, conviniendo solamente para el análisis de un sistema definido.

En cambio, para la síntesis, la influencia de los valores de los parámetros se obtendrá más fácilmente mediante una *calculadora analógica* capaz de simular los fenómenos no lineales, ya que el cometido de la misma consiste esencialmente en transformar todas las magnitudes físicas de distinta naturaleza en una sola, generalmente eléctrica. Tales máquinas permiten además modificar a voluntad la escala del tiempo, lo que posibilita, ya sea el análisis detallado de ciertos procesos demasiado rápidos para su experimentación directa o, al contrario, de los excesivamente lentos (por ej., fenómenos térmicos o hidráulicos). El cálculo analógico no requiere necesariamente (como el análisis matemático) el conocimiento de las ecuaciones; las que obedecen los elementos no lineales introducidos con determinados fines, ya que es siempre posible simularlos a partir de sus características determinadas experimentalmente. Resulta, pues, superfluo insistir en que las calculadoras analógicas facilitan grandemente el estudio de sistemas sometidos a determinados servomecanismos, inclusive lineales.

En el estado actual de la ciencia no es exagerado afirmar que muchas de sus ramas serían incapaces de progresar sin el auxilio de las calculadoras electrónicas. Por no citar más que un caso prominente en su haber, recordemos que los más asombrosos descubrimientos relacionados con la estructura de las proteínas y de los ácidos nucleicos dependientes del desentrañamiento de la complicadísima *molécula de proteína*, hubieran requerido probablemente siglos enteros de arduo trabajo sin el recurso de las calculadoras en cuestión.

Aunque las calculadoras en cuestión están ordinariamente relacionadas con ciertas ramas de nuestra cultura, sobre todo las ciencias, aquéllas ya han penetrado con éxito en la literatura y las artes, a veces incluso con importancia comercial. Citemos las digitales empleadas para preparar las concordancias poéticas entre la Biblia y determinados trabajos literarios, p. ej. los pergaminos más o menos incompletos del Mar Muerto. En las artes musicales, la máquina puede analizar una partitura, cambiar de escala e incluso componer piezas originales: se han empleado igualmente para aprendizaje de pilotos, en la previsión del tiempo, diagnosis médica (11), etc.

(11) Véase la copiosa bibliografía sobre tan múltiples aplicaciones, al final del completo trabajo de W. F. BAUER: P. I. R. E., 49, 296, enero 1961.

Por otro lado, el rápido incremento que la producción científica ha adquirido en nuestros días (se ha dicho que se duplica cada siete años) y la creciente incorporación a este progreso de pueblos antes atrasados, ha agudizado el problema de la traducción a extremos desconocidos hasta ahora. Y, en efecto, las máquinas traductoras van convirtiéndose en una verdadera necesidad, y con el perfeccionamiento de las mismas se adquiere un más profundo conocimiento del lenguaje y de su estructura.

Pueden considerarse tres grandes etapas en la traducción automática, a saber: el *reconocimiento del léxico* (problema de diccionario), *sintáctica* (problema gramatical) y *semántica* (problema de significación). Las tres no pueden ser tratadas por separado, sino analizadas por vía secuencial y reiterativa en un cierto número de ciclos operacionales. Por tanto, el reconocimiento del lenguaje suministra primero un determinado número de clasificaciones de significados y partes del discurso (categorías *sintácticas*); entonces el análisis sintáctico de las terminaciones inflexionales y el orden de los vocablos, reduce el número de posibilidades (12). Aunque en su estado actual la traducción a máquina no es perfecta ni mucho menos (13), a menudo alcanza extremos verdaderamente sorprendentes y si bien este procedimiento todavía no puede competir por su coste por palabra con la traducción humana, la rapidez de la primera hace que aumente su demanda, sobre todo tratándose de textos científicos rusos.

Al entrar en caja nuestro original acabamos de enterarnos de la existencia de un sistema para traducir del ruso al inglés a razón de 60.000 palabras por hora (14). La «Unified Transfer System» (U. S. A.), utilizando calculadoras-diccionarios, asegura encontrarse en condiciones de traducir cualesquiera de las lenguas de raíz indoeuropea. Se espera que la producción en escala industrial de este tipo de calculadora electrónica comenzará antes de un año; el ingenio es fruto de los trabajos de la «Machine Translation Ltd.».

(12) J. L. CRAFT, E. H. GOLDMAN and W. B. STROHM: *A table look-up machine for Processing of Natural Languages* («I. B. M. Journal», 5, 192, julio 1961).

(13) A este propósito, como anécdota jocosa, se cita la traducción automática del proverbio inglés *out of sight... out of mind* (equivalente al nuestro, *ojos que no ven, corazón que no siente*), bajo la sorprendente forma *invisible fool!! (loco invisible)*.

(14) De la traducción del libro de D. M. Berkowitch e I. E. Welkine, publicado en 1960 en Moscú por la Gosplanisdat. N. G. NEUWEILER: «Schweiz. Tech. Zeit», 58, 657, 10 agosto 1961.

Una curiosa variante de las técnicas de gobierno y decisión la constituyen los mecanismos susceptibles de *aprender* (como lo hacen los animales llamados *sabios*) o ejecutar funciones equivalentes a los de la visión, audición, etc., materia sobre la cual se ha extendido García Santesmases en su discurso.

Con el tan poco agradable barbarismo *robot* se acostumbra a designar todo montaje o instalación sensible a ciertas influencias exteriores, capaz de adaptar sus reacciones a las modificaciones de aquellas influencias, ya provengan de excitaciones exteriores o provocadas por las propias acciones del *robot*. Los tipos de influencia son numerosísimos y variados; unos de origen físico (calor, humedad, luz, presión, etc.) son revelados por aparatos adecuados, conteniendo en principio un órgano móvil, cuya acción gobierna la reacción del robot. En otros casos (calculadoras electrónicas, p. e.) un problema propuesto a aquél en forma asimilable por el mismo, le obliga a ejecutar una serie de operaciones que concluyen en el resultado apetecido.

Tal ocurre con los problemas planteados por las redes eléctricas de transporte *en régimen permanente* (redes *pasivas* en malla). Es bien sabido que la resolución *manual* de las ecuaciones que suministran las clásicas reglas de Kirchoff y de la superposición de estados de equilibrio resulta francamente tediosa y ardua cuando el número incógnito rebasa la decena. Aunque desde hace años se simplificó el problema mediante el empleo de *modelos reducidos* (dipolos o cuadrupolos equivalente, transformaciones estrella-triángulo o viceversa, etc.) estos a su vez van siendo sustituidos en nuestra época por calculadoras aritméticas que, además de su gran rapidez, pueden preparar por sí mismas las hipótesis necesarias, permitiendo el paso final a los cálculos técnico-económicos.

El aprendizaje de un determinado juego o estrategia constituye otro aspecto de estos ingenios, como el *jugador de ajedrez*, construido hace casi medio siglo sin disponer de los medios actuales, por el venerable Patriarca procurador español Torres Quevedo.

En la Universidad de Illinois (EE. UU.) existe un calculador biológico (dirigido por el profesor Heinz von Foerster), constituido por sistemas electrónicos, no sólo para imitar los biológicos, sino también dispuestos para exhibir la adaptabilidad y la auto-organización propia de los animales.

Del mismo modo que los organismos vivientes saben adaptarse

al medio que constituye su *habitat*, es asimismo posible construir calculadores biológicos capaces de comportarse como aquéllos. Y así como el organismo viviente por medio de sus órganos sensoriales y de su sistema nervioso es capaz de seleccionar sensaciones ordenadas entre una masa caótica de informaciones captadas en su propio ambiente (15), también el calculador biológico gracias a su conformación estructural, puede contener unidades sensoriales y circuitos contadores que únicamente respondan a determinada intensidad o frecuencia sonora o presión única. Los montajes que gobiernan tales funciones de selección son los llamados *filtros selectivos*, concebidos por Kolmogoroff en 1942 y resueltos poco después por Wiener (16).

Uno de estos filtros, denominado «Numa Rete», desempeña una función análoga a la del ojo de un organismo viviente. Consiste en una serie de fotocélulas, conectadas a un conjunto de circuitos adecuados que permiten *ver* instantáneamente el número de objetos separados entre sí en el campo visual de la retina; este filtro puede distinguir el número 7 del 15, del mismo modo que nosotros distinguimos el color verde del rojo.

Parece ser que el *plastinauta* lanzado últimamente al espacio por los norteamericanos en la cápsula de un cohete y recuperado en el Atlántico (cerca de las Bermudas), tras un vuelo de una hora y cuarenta y seis minutos de duración, tuvo reacciones de ser humano y no sufrió ninguna gran disfunción durante toda la experiencia. Una brusca variación interna creó un aumento de humedad en las *vías respiratorias* del robot, provocándole una especie de resfriado electrónico. Por otra parte, la sístole y diástole de su *corazón* automático reprodujo ciertas reacciones emotivas análogas a las humanas, es decir, aquello que en un organismo animal constituirían reflejos nerviosos.

Recomendamos a los aficionados a estas cuestiones la obra *Vom Wesen der Nachricht* de G. Megla (17), recientísimo ensayo filosófico sobre la ciencia de la información en un sentido más amplio (medio con el que se adquiere el conocimiento del exterior utili-

(15) W. A. ROSENBLITH (editor): *Sensory Communication* (M. I. T. Press y J. Wiley 1961).

(16) N. WIENER: *The Extrapolation. Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series* (Wiley 1949).

(17) G. MEGLA: *Vom Wesen der Nachricht*. S. Hirzel, Stuttgart, 1961.

zando uno cualquiera de los cinco sentidos del hombre), de original concepción, en el que el elemento *persona humana* figura como el esencial punto de partida y de llegada de la información.

Al redactar estas líneas, acabamos de recibir el último número de julio de los acreditados «Proceedings of the Institution of Electrical Engineers», en el que D. Gabor, Wilby y Woodcock (18) describen un *filtro* universal no lineal, predictor y simulador que *optimiza* por sí mismo mediante un proceso de *aprendizaje*.

Esencialmente consiste en un calculador analógico con alto grado de adaptabilidad, acoplado con un conjunto docente-maestro; en el primero pueden entrar 18 cantidades, con las cuales pueden calcular en 0,0025 segs. 94 términos de un polinomio (conteniendo cada uno de ellos productos y potencias de aquellas cantidades con coeficientes ajustables), cuya suma final puede asimismo realizar. Las primitivas cantidades pueden ser a su vez los 18 anteriores valores de una variable estocástica, y el resultado de los cálculos es una función final conteniendo 94 variables. El conjunto *docente* optimiza esta última mediante ajustes sucesivos de los coeficientes variables, hasta aproximarse todo lo posible a una función determinada (*blanco* en lenguaje balístico), mediante el polinomio de 94 términos siguiendo el criterio de cuadrados mínimos. Todo ello se consigue inyectando repetidamente en la máquina un registro del proceso estocástico, lo suficientemente prolongado para que represente lo más fielmente posible el proceso investigado y ajustando los coeficientes variables, uno a cada vuelta de la secuencia, mediante una *estrategia* que asegure un decrecimiento monótono del error al avanzar los cálculos.

A fin de conseguir que la máquina actúe como un filtro óptimo, se la entrena o *enseña* mediante el registro de un proceso perturbado por el ruido de fondo, simultáneamente con el del blanco ya indicado que contiene solamente la señal. Se la enseña a predecir tomando como *función-blanco* un valor del proceso estocástico avanzado en un cierto intervalo de tiempo respecto del último valor que entra en la máquina. De otra parte, se la *educa* como simuladora, por ejemplo, de un mecanismo desconocido, alimentando la máquina por uno de sus extremos con la entrada del mecanismo que ha de simularse y presentándolo al otro extremo con su salida como función *blanco*.

(18) D. GABOR, W. P. L. WILBY and R. WOODCOCK: «P. I. E. E.», 108 B, 422, julio 1961.

En estas condiciones la máquina se convierte por sí misma en un modelo del dispositivo que debe simularse, y la función de transferencia no lineal de aquél puede leerse a través de los valores finales de los coeficientes todo lo mejor que puedan ser representados por el consabido polinomio de los 94 términos.

Como novedad, esta máquina tiene incorporados 80 multiplicadores analógicos del nuevo tipo *piezomagnético*, inventado por uno de los autores (Wilby), que en su forma actual pueden realizar unas 1.000 multiplicaciones por segundo, con un error de 0,5 por 100 y aún menor.

Para terminar estos leves comentarios sobre la automatización cabe preguntarse ¿cuándo es aconsejable o debe procederse a la automatización de un proceso industrial? Ya hemos visto la prudente actitud que adopta el recipiendario sobre tan discutido punto y cuán divergentes son las autorizadas opiniones emitidas sobre el particular. Líbrenos Dios de la petulancia de pretender zanjar tan espinosa cuestión, haciendo un estudio a fondo de las consecuencias económicas y sociales que ello reporta (para el cual reconocemos nuestra plena incapacidad). Sin embargo, parece puede definirse con bastante precisión el momento a partir del cual cesa de ser utilizable el ser humano para intervenir la máquina automática. *Cuando las condiciones de tratamiento de las informaciones exceden de la capacidad del hombre, cuando la rapidez de sus reflejos musculares es rebasada, encontrándose en la incapacidad física de realizar ciertos actos, es llegado el momento de convertir en totalmente automatizados, no sólo las operaciones de producción, sino los trabajos de oficina.* Estos últimos son posiblemente los que en primer lugar deban ser automatizados, por ser los más rápidamente rentables, ya que en todo momento permitirán a las empresas apreciar mejor los beneficios y resultados de sus iniciativas. Pero antes de ocuparnos de los *ingenios electrónicos de gestión* (en que han acabado transformándose las primitivas calculadoras para realizar aquellos menesteres) quisiéramos todavía hacer hincapié sobre el interesante aspecto que ofrece la implantación del automatismo en las centrales eléctricas alimentadas por energía nuclear, fascinadora cuestión que como todos sabéis, es de palpitante actualidad.

García Santesmases nos ha hablado de que en la URSS y en los EE. UU. uno de los beneficios de la automatización de las centrales hidroeléctricas ha sido una disminución apreciable de las averías.

Sin embargo, no siempre la automatización es racional y se conocen casos en la URSS, en los que el coste de la producción se ha incrementado después de procederse a la automatización; tal ocurre por ejemplo con la cadena automática para la fabricación de limas (19). Ello indica que la apreciación de la eficacia económica por introducción del automatismo exige, desde luego, un análisis económico profundo, pero de todas maneras hay que convenir en que la automatización en términos generales constituye el mejor medio de aumentar la productividad en todos los dominios de la actividad industrial.

De otra parte, la evolución de las centrales térmicas se caracteriza desde hace años por el empleo de presiones crecientes y altas temperaturas de vapor acudiendo a métodos que proporcionan notables reducciones, dentro de un margen sustancial en el consumo de calor por unidad de energía eléctrica producida.

Desde luego, el complicado conjunto de operaciones maniobras de mando, vigilancia, etc., presupone un considerable número de medidas cada vez más difíciles de realizar por el encargado de la supervisión y control de los registradores clásicos. Se impone, pues, una centralización automatizada de aquellas maniobras.

La necesidad de ello queda bien de manifiesto con la instalación en las centrales térmicas más recientes de los EE. UU. de América, así como en Francia, Inglaterra, etc., de las calculadoras numéricas industriales capaces de recibir y de explotar racionalmente las informaciones que constituyen los datos de funcionamiento de una central. Estas informaciones son de dos clases, distinguiéndose, en primer lugar, las señales de medida o *analógicas*, constituidas generalmente por tensiones o corrientes continuas que traducen el estado de diversas *magnitudes* de la central (presiones, gastos, temperaturas, etc.). Existen además las señales de *todo o nada* que llevan las informaciones llamadas *numéricas*; estas señales son esencialmente contactos de relevadores (*relés*), que forman parte de los automatismos de la central (de seguridad, señalizaciones, automatismos secuenciales, etc.).

Veamos rápidamente los principales aspectos de la explotación de una central nuclear a base de las diferencias entre las características de la misma y las de una central térmica clásica. Por de pronto, es muy manifiesta la referente al *volante* térmico de los intercambiadores del calor del reactor, volante que es mucho mayor respecto al

(19) N. G. NEUWEILER, «Schweiz Tech. Zeitsch», loc. cit.

de los hogares de las calderas de combustible ordinario (hulla o carbón); de otra parte, el enfriamiento de los elementos activos de un reactor es generalmente muy lento, puesto que los productos de la fisión continúan desprendiendo calor después de interrumpirse el flujo neutrónico.

Las ecuaciones completas (cinética y térmica con la de reactividad y la de regulación) pueden resolverse con una calculadora analógica (o analíticamente en forma simplificada), para obtener la respuesta del sistema completo a las múltiples perturbaciones a que está sujeto. Generalmente estos cálculos son para temperatura constante, pero conviene incluir las ecuaciones que representan los intercambiadores de calor, sistema de vapor, turbinas, sistemas de control de insufladores, etc.

En la explotación de una central nuclear es de primordial importancia la cuestión de la seguridad absoluta de funcionamiento, y en particular la velocidad de descenso de las barras reguladoras de la actividad, no debe ser muy rápida, lo cual cumple perfectamente la automatización. Ciertos defectos inherentes a toda central nuclear se compensan correctamente por el hecho de que los fenómenos de la reacción nuclear y de su termodinámica correspondiente son mejor conocidos que los de las llamas, lo que permite prever la reacción térmica de los reactores. De otra parte, si bien los ingenios nucleares comprenden un gran número de constituyentes, suministran en cambio los elementos de cálculo mejor dispuestos que los de las centrales térmicas clásicas; entre estos resultados metrológicos, unos se refieren al reactor propiamente dicho (medidas de detección de la ruptura de las envolturas de los elementos de combustible, medidas de la temperatura del gas o líquido refrigerante y de las diversas partes del reactor) y otros concernientes a toda central térmica del tipo clásico.

Estos elementos de medida constituyen informaciones cuya centralización rápida importa asegurar; éstas son las que sirven para el automatismo y la regulación, pero no para ser útiles inmediatamente al jefe de vigilancia.

Es imposible entrar aquí en el análisis de las fases del arranque automático de los dispositivos que impulsan el medio refrigerante y de las precauciones tomadas, sobre todo para evitar una brusca parada del reactor, mediante los ya citados detectores de radiación; pero teniendo en cuenta el gran número de canales que comporta un

reactor, se recurre a la *exportación* de los mismos por medio de un conmutador. Los resultados se envían a un calculador numérico de las actividades y evoluciones del porcentaje del gas de fisión difundido en el de enfriamiento que pueden producirse a consecuencia de la ruptura accidental de una envoltura.

Los resultados se registran mediante una máquina de escribir que redacta el parte correspondiente, y si los valores rebasan los umbrales admisibles provocan el funcionamiento de las señales de alarma.

No podemos entrar en pormenores acerca de la organización del cálculo electrónico en determinadas entidades, por ejemplo el EURATON, el «Centre d'Etudes Nucléaires» de Saclay (20).

Ingenios electrónicos de gestión.—Uno de los puntos tocados por García Santesmases con el tino y circunspección que el tema requiere, es el de los sistemas de *inteligencia artificial*; realmente para el profano, su asombro y estupefacción deben exceder de todo límite al oír hablar de máquinas capaces de demostrar teoremas de geometría, calculadoras heurísticas con memoria que retiene y aplica determinadas reglas, traducción automática de lenguas las más dispares, etc. Y nada digamos sobre la pretendida existencia del *oráculo* de la Casa Blanca norteamericana, al cual consultaría el Presidente del Estado antes de tomar decisiones graves, resucitándose así la costumbre de los generales y estadistas de la antigua Hélade, que más o menos crédulamente acudían a recibir los casi siempre enigmáticos consejos de la pitonisa de Delfos sentada en el trípode...

Evidentemente, nada de superchería encierran, sino todo lo contrario, los sistemas electrónicos llamados *de gestión*, que han ido apareciendo gradualmente durante la última década a consecuencia de la introducción de la automatización en los trabajos de oficina y administrativos en general. Gracias a los nuevos materiales apropiados al *tratamiento* de las informaciones, se han ido transformando progresivamente las primeras calculadoras electrónicas en *sistemas gestores* para diversos fines, tales como la regulación del tráfico ferroviario o marítimo, seguimiento o *rastreado* de vehículos espaciales, etc.

Como notable organismo electrónico de gestión citaremos el inaugurado el día 22 de junio p. p. por la «Société Nationale des Chemins de Fer français» (S. N. C. F.), que desde 1926 venían empleando la

(20) P. BRAFFORT et A. GAZZANO: *L'Onde Electrique*, 41, 54, enero 1961. C. CAILLET (57 en el mismo número de esta revista).

mecanografía clásica basada en el empleo de tarjetas perforadas como soporte de informaciones codificadas; bastará indicar que dicha empresa explota todavía doce talleres de mecanografía, en los que se tratan anualmente unos 200 millones de aquéllas.

El conjunto electrónico en cuestión, denominado «Gamma 60» y realizado por la Compañía de Máquinas Bull, consta de los siguientes órganos principales:

1.º Una memoria rápida de capacidad relativamente restringida, pero con un tiempo de acceso muy corto (del orden de los 10 microsegundos), constituida esencialmente por matrices de ferritas toroidales.

2.º Elementos de tratamiento cuyas funciones se ejercen sobre los datos o los resultados intermedios, según las órdenes sucesivas del programa registrado previamente; estos elementos comprenden principalmente órganos de traducción internos y de cálculos aritmético y lógico.

3.º Los elementos de entrada, de salida y de almacenaje se reparten en: lectores, perforadores de tarjetas, lectores-perforadores de bandas impresas, tambores magnéticos y enrolladores de cintas magnéticas. Además, por intermedio de un pupitre de mando existe un enlace directo en los dos sentidos entre el operador y la máquina.

En cuanto a la organización nos ceñiremos a indicar que el organismo de gestión (enlazado con la red de teleimpresores) puede recibir y enviar rápidamente las informaciones relativas a las aplicaciones que envuelven mayor celeridad (p. e. problemas de tráfico).

La sala del «Gamma 60», situada en el centro del edificio *ad hoc*, ocupa en la planta baja una superficie de 300 m², estando en comunicación directa con el depósito de cintas magnéticas capaz de almacenar 15.000 carretes de las mismas.

Memorias artificiales.—Acabamos de recalcar la importancia de este órgano de toda calculadora y sobre cuyos fundamentos y su necesaria gran rapidez de acción nos ha ilustrado nuestro electo compañero, describiendo sus tres más recientes modalidades; las *películas magnéticas ultradelgadas*, los *criotones* y los *parametrones* (inevitable cortejo de neologismos) fundados en modernísimas aplicaciones de fenómenos ya conocidos desde hace años, pero cuya interpretación teórica no sólo es difícil, sino que incluso no se ha conseguido todavía de modo satisfactorio. Tal ocurre con la todavía algo enigmática *superconductividad* de ciertas sustancias, y en la que están fundados los criotones. Con ello se repite una vez más el caso (que

en estos últimos tiempos tantas veces se ha dado) del avance que puede llevar la técnica sobre la teoría. Otro tanto puede decirse sobre el nuevo y ya famoso *diodo-túnel* utilizado como memoria, y aplicaciones a los circuitos lógicos (21); su porvenir se ha puesto de manifiesto en el importante «Coloquio sobre dispositivos con semiconductores», celebrado en París (22), en febrero p. p.

A pesar de la complejidad y de la diversidad de metales que presentan la superconducción, se avizora, sin embargo, una notable simplicidad en el modo de aparecer tal fenómeno en los metales susceptibles del mismo. En esto se funda la posibilidad de encontrar una explicación de la superconductividad (por lo menos en su aspecto cualitativo), sin entrar en consideraciones sobre la estructura metálica; feliz posibilidad, dada la gran complicación estructural de los metales que pueden convertirse en superconductores.

Partiendo de la existencia de una fase *superconductora* entre los electrones de valencia que como es sabido constituyen el denso y grandemente *degenerado* gas electrónico retenido en el seno de los metales, a la temperatura ordinaria, no presenta graves complicaciones su tratamiento físico-matemático. En efecto, las soluciones de la ecuación de Schrödinger que en general sólo pueden obtenerse por aproximaciones sucesivas en presencia del potencial triplemente periódico debido a los iones fijos de la red cristalina, suministra la estructura en *bandas* de energía de los electrones, así como las funciones de onda de la partícula simple de Bloch (23). Esta se propaga o avanza a través del metal, a pesar de su dispersión (*scattering*) ejercida por átomos de impurezas y las vibraciones (fonones) del monocristal, aplicándose con éxito las teorías de perturbaciones a dichas funciones de onda. Sin embargo, a bajas temperaturas este tratamiento parece fallar completamente. En efecto, a partir de determinada temperatura crítica, se presenta un cambio de fase, en virtud del cual las propiedades eléctricas y térmicas de dichos metales cambian radicalmente; aunque de seguro la red cristalina desempeña cierto papel sobre la temperatura de transición, aquélla no parece variar en la correspondiente al estado superconductor. Después de la notable

(21) R. C. SIMS: «P. I. R. E.», 49, 136, enero 1961.

(22) G. B. HERZOG: *Utilization de la diode-tunnel comme element de calcul*. «L'Onde Electrique», 41, 370, abril 1961.

(23) F. BLOCH: «Zeit. für Physik», 52, 555, 1928.

contribución teórica de London (24), hasta las más recientes aportaciones de la escuela rusa (25), los numerosos experimentos llevados a cabo para estudiar la fase superconductor en cuestión demuestran una estrecha correlación, entre las funciones de ondas electrónicas y, por tanto, las funciones de Bloch para una sola partícula dejan de ser aplicables. Además, se ha averiguado que la energía de condensación y la necesaria para que el metal retroceda del estado superconductor al normal, son extraordinariamente pequeñas comparadas con la de Fermi, de los electrones más energéticos. La relación entre la primera y la segunda viene a ser del orden de 10^{-8} .

El cálculo detallado de las propiedades electrodinámicas de un superconductor, verdaderamente intrincadas, prevé el efecto Meissner (uno de los primeramente observados), deduciéndose asimismo la profundidad de penetración del campo magnético, así como la variación de ésta con la temperatura.

Afortunadamente, la interpretación cualitativa de la anulación de la resistencia a muy bajas temperaturas es casi intuitiva; en el cero absoluto, todo metal no debe presentar otra resistencia que la debida a las impurezas, ya que no existen fonones (ondas de variación de presión longitudinales). Toda desviación de la red cristalina perfecta, supuesta al deducir los estados de Bloch, es causa de una perturbación, la cual causará la dispersión de las ondas de Bloch. Tales desviaciones pueden ser de dos categorías: estática y dinámica. Las primeras son producidas por las impurezas o *defectos* de la red cristalina, mientras que las segundas se deben a las vibraciones de la red iónica alrededor de su posición de equilibrio.

El número de impurezas o defectos es independiente de la temperatura y, por tanto, también lo será su contribución a la resistencia eléctrica del metal; de otra parte, las vibraciones de la red cristalina sí que dependen de aquélla y, por tanto, lo será asimismo el término con que contribuyan a la resistencia. Al cuantificar (o expresar en *modos normales*) las vibraciones de la red cristalina, representan ondas sonoras o fonones que se propagan a través del metal; la llamada *interacción electrón-fonón* expresa la mutua dependencia entre ambos entes fundamentales en la conducción metálica.

(24) F. LONDON: *Une nouvelle conception de la supraconductivité*. (Herman, Paris, 1937).

(25) N. N. BOGOLIUBOV, V. V. TOLMACHEV, D. V. SHIRKOV: *A new method in the Theory of Superconductivity* (Consultants Bureau, New York, 1959).

Uno u otro de aquellos mecanismos dispersores provoca la resistencia, siendo tal interacción la causa del proceso, en virtud del cual los electrones pueden pasar desde un valor del impulso (o *ímpetu*) a otro; de consiguiente, cualquier causa productora de corriente, en ausencia del campo que la provoca, rápidamente acaba en caótica (al azar). Una de las expresiones matemáticas de estos fenómenos de transporte y la influencia ejercida sobre ellos por campos de diversa índole (p. e. magnético), es la clásica *ecuación del transporte de Boltzman*.

Destacan entre los trabajos teóricos de más envergadura llevados a cabo en la última década, los de Bohm y Pines en Norteamérica (26), en los cuales se ha tenido en cuenta la interacción mutua que entre sí se ejercen todos los electrones, repulsión coulombiana de corto alcance, lo que en definitiva equivale a una variante del famoso *problema de los n cuerpos (many body problem)*. Una de las más recientes teorías sobre la superconductividad es la propuesta en 1957 por Bardeen, Schrieffer y Cooper (27), en la cual juega un decisivo papel el *espín* electrónico, pero que sería impropio comentar aquí dada la índole elevada de aquel trabajo. Tampoco entraremos en la discusión de los problemas concernientes a la *invariancia de aforo* y al de las *excitaciones colectivas* en estas teorías extensamente tratados en un reciente trabajo de P. W. Anderson (28).

Aportaciones de la Electrónica cuántica.—Con estas digresiones sobre tan fascinante tema estoy abusando de la atención que tan benévolutamente me prestáis, pero con vuestro beneplácito quisiera todavía dedicar algunos párrafos al curioso elemento nuevo en calculadoras: el *parametron*, perteneciente a esta numerosa familia de los llamados *amplificadores paramétricos*, uno de los más prometedores frutos de la denominada *Nueva electrónica* o electrónica cuántica, tan adecuada para las técnicas de las hiperfrecuencias. *Nihil novum sub sole*, pues lo curioso del caso es que el fundamento de estos dispositivos se encuentra ya en los trabajos del genial y fecundo físico inglés de fines del siglo pasado, Lord Rayleigh; a escala macroscópica lo estamos aplicando en el columpio cuando se aumenta la amplitud de sus oscilaciones al imprimirle impulsos rítmicos con

(26) D. BOHM and D. PINES: «Phys. Rev.», 92, 609, 1953.

(27) J. BARDEEN, L. N. COOPER and J. R. SCHRIEFFER: «Phys. Rev.», 108, 1175, 1957; L. N. COOPER: «Amer. Jour. Phys.», 28, 91, febrero 1960.

(28) P. W. ANDERSON: «Phys. Rev.», 112, 1900, 1958

cadencia doble de la de su período propio. La relación señal/ruido de este tipo de amplificadores, es enormemente mayor que la conseguida con los de tubos electrónicos o transistores mejor diseñados para reducir todo lo posible el *ruido de fondo* (*anything wich is not wanted*, según frase ocurrente de Parker), implacable enemigo de toda telecomunicación eléctrica, contra el que es tan difícil luchar, dado su carácter *aleatorio*, provocado por *fluctuaciones espontáneas*, es decir, regidas por las leyes de la termodinámica estadística.

Aparte de la gran utilidad y su creciente empleo en radiolocalización y radioastronomía, una de las más espectaculares aplicaciones de estos amplificadores ha sido la recepción desde el arsenal de Redstone, U. S. A., de las radioemisiones del cohete lunar norteamericano «Pioneer IV», hasta la máxima distancia de unos 350.000 kms.!! , mientras los mejores radiorreceptores de tubos electrónicos dejaron de captar las señales a menos de 80.000 km.

En un artículo de J. Weber, aparecido en el número de julio de 1959 de la revista «Reviews of Modern Physics», recuerda su autor una frase del famoso físico alemán A. Sommerfeld, quien en su «Electrodinámica» (1948) (29) estampa esta aguda observación: «Es extraño que la Electrónica práctica haya permanecido tanto tiempo sin sacar partido de hechos tan fundamentales como el espín del electrón, arreglándoselas solamente con la noción de masa puntiforme cargada». Sorprende efectivamente que se haya tardado tanto en advertir que los estados de *espín* y los estados *ligados* de los electrones en los átomos, iones o moléculas, presentan posibilidades sumamente interesantes para la amplificación, y que el gigantesco desarrollo hasta 1950 esté únicamente cimentado sobre la energía de *traslación* de los electrones *libres*.

Los fundamentos y principios físicos, así como las técnicas experimentales que hoy día se están aplicando en los amplificadores moleculares y paramagnéticos, fueron estudiados y desarrollados desde que finalizó la pasada guerra mundial; la posibilidad de lograr un *nivel de ruido* lo más bajo posible en los nuevos amplificadores (en cuyo funcionamiento no intervienen electrones emitidos al azar), fue uno de los principales incentivos de aquellos trabajos, íntimamente ligados con investigaciones sobre espectroscopia en microondas (30).

(29) A. SOMMERFELD: *Electrodynamics* (trad by. E. G. Ramberg, Academic Press New York, 1952).

(30) C. H. TOWNES: *Quantum Electronics* (Columbia Univ. Press, 1960).

De ahí nacieron los osciladores *masers* o *lasers* (anagrama formado con las iniciales de *microwave amplification by stimulated emission of radiation*) y amplificadores por *transiciones* cuánticas moleculares o atómicas (*maser*).

Toda señal en microondas puede ser amplificada, creando una resistencia negativa en el circuito receptor de tal señal. En el maser de estado sólido ello se consigue mediante un cristal (p. e. rubí), impurificado con iones paramagnéticos (Bloembergen (31)), mientras que en un amplificador paramétrico del tipo diodo de juntura semiconductor, éste debe ser polarizado convenientemente en el sentido no conductor (*varactor*). A pesar de las profundas diferencias existentes entre uno y otro método de crear resistencias negativas, existen grandes analogías entre ambos, especialmente en lo que se refiere al bajo ruido de fondo que engendran; la casi única diferencia existente es que el maser sólido generalmente debe funcionar a la temperatura del helio líquido, requisito que no requiere el amplificador paramétrico.

Este último consiste esencialmente en un dispositivo cuyo efecto amplificador se consigue mediante la tan conocida conversión de frecuencia, o sea la superposición en una reactancia *no lineal* (generalmente la del diodo ya indicado, que actúa como una capacidad variable con la tensión aplicada, pero que puede ser de otro tipo, incluso haces electrónicos) de las tensiones de la señal-información y de otra auxiliar de *bombeo* de mayores amplitud y frecuencia que la primera. La mezcla de ambas se traduce en la consabida producción de armónicos, así como combinaciones lineales de aquéllas (*tonos suma y diferencia* de ambas frecuencias, bien conocidos en Acústica y estudiados a fondo por el gran Helmholtz en su imperecedera obra «Die Lehre von Tonempfindungen», publicada hace cosa de un siglo), que evidentemente también se producen en todo mezclador de *resistencia no lineal*. Pero así como ésta es disipativa, absorbe potencia, y por tanto, introduce ruido sin suministrar amplificación; la reactancia no lineal actúa como un volante o depósito de energía capaz de tal amplificación, pero con la inapreciable cualidad de engendrar mínimo ruido.

Consideraciones energéticas en las que aquí no podemos entrar y que pueden verse en los exhaustivos trabajos de Manley y Rowe (32)

(31) N. BLOEMBERGEN: «Phys. Rev.» 101, 324, 1946.

(32) J. M. MANLEY and H. E. ROWE: «P. I. R. E.», 44, 904, julio 1956.

y Salzberg referentes a las propiedades generales de reactancias no lineales, demuestran una diferencia básica en su función amplificadora, dependiente de las impedancias terminales necesarias para las distintas frecuencias producidas en el proceso mezclador.

Matemáticamente, no sólo los amplificadores paramétricos, sino un numeroso grupo de fenómenos de dificultoso tratamiento (tales como la detección sincrona, detección y discriminación de fase, desmultiplicación de frecuencia, etc.), se rigen por ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes variables, cuya teoría, según se sabe, es complicada, y desde luego todavía poco desarrollada; la más estudiada es la de Hill, siendo un caso particular de aquélla la de Mathieu, cuyas soluciones pueden expresarse mediante series trigonométricas. He aquí otro caso en que las aplicaciones técnicas han adelantado a las consideraciones teóricas. Pero lo verdaderamente interesante es el problema que plantea la *estabilidad* de aquellas soluciones, pues es bien sabido que los criterios ordinarios de estabilidad fundados en la aproximación lineal (Routh, Hurwitz, Nyquist) son aplicables tan sólo a casos relativamente simples, en los que el sistema estudiado no esté muy próximo al límite de estabilidad. Pero cuando esto ocurre (y este es el caso que se presenta en muchos problemas técnicos) es necesario recurrir a la teoría general de la estabilidad de Ljapunov (33).

* * *

Con los desgarrados comentarios que anteceden, termina nuestra modesta intervención en este solemne acto, cuyo fin todos ansiais presenciar con la imposición de la medalla por nuestro ilustre Presidente al nuevo compañero.

Al desearle que el éxito más completo le acompañe en sus iniciativas y funciones académicas, me despido con el espiritual consejo del gran Ampere, el genial precursor de la Cibernética (que la incluyó en su «Clasificación de las Ciencias»): «Escucha a los sabios, pero no más que con un oído; ten puesto el otro para recibir los dulces acentos de la voz de tu amigo Celeste», del Creador que hizo el hombre a su semejanza, que le dio intelecto, voluntad y libertad.

(33) LJAPUNOV: «Ann. de la Faculté. des Sciences de Toulouse», 9, 203, 1907.
T. J. HIGGINS: *A resume of the basic literature on non linear system theory* (with particular reference to Lyapunov's methods). (Joint Automatic Control Conference. Mass. Inst. of Tech, 6 septiembre 1960).

Por eso el hombre puede crear esas maravillosas máquinas en que sois especialista, y que si bien llegan hasta el umbral de la inteligencia, no están dotadas del *libre albedrío*, no pueden perfeccionarse a sí mismas, en lo que se distinguen de su terrenal creador, y éste a su vez del Supremo Hacedor *que puede crear de la nada!!*

Bienvenido sea el nuevo Académico a esta mansión de la Ciencia, cuyas puertas se le abren de par en par, iniciando el simbólico abrazo con que le recibe el último de sus compañeros.

RELACION DE PUBLICACIONES DE DON JOSE GARCIA SANTESMASES

- Conceptos modernos sobre ondas y corpúsculos.* «Anales de la Universidad de Barcelona», 1942.
- Sobre ciertos aspectos de la Ferrorresonancia de un circuito.* «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 38, 21, 1942.
- Contribución al estudio de la Ferrorresonancia y de la Autoinducción.* Premio «Juan de la Cierva» 1943. Publicado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Estudio de la onda de corriente que circula por una bobina con núcleo de hierro.* En colaboración con F. Sanvisens. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 39, 227, 1943.
- Aplicación de una expresión analítica de la curva de magnetismo.* «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 39, 410, 1943.
- Contribución al estudio de algunos semiconductores. 1. Carborundum y sulfuro estannoso.* En colaboración con D. José Baltá. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 40, 133, 1944.
- Sobre la posibilidad de un espectroscopio electrónico.* En colaboración con D. Justo Mañas. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 44-A, 53, 1948.
- El microscopio electrónico y sus aplicaciones en Biología.* Memorias del primer Congreso Hispano-Portugués de Farmacia, 169, 1948.
- Circuitos para derivación e integración.* En colaboración con don Justo Mañas. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 44-A, 329, 1949.
- The Shift Circuit.* «Progress Report», n.º 21. The Computation Laboratory-Universidad de Harvard (Cambridge, EE. UU.), 10 nov. 1951-10 feb. 1952.
- «Circuito Trigger» ferromagnético aplicable a máquinas calculadoras electrónicas.* «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 48-A, 171 (Recibido en febrero de 1952).
- Fundamental principles of parallel ferromagnetic resonance.* «Progress Report», n.º 22. The Computation Laboratory. Universidad de Harvard (Cambridge, EE. UU.), 10 feb. a 10 may 1952.

- Cuadripolos para derivación e integración: deformación.* En Colaboración con D. Justo Mañas. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 48-A, 349, 1952.
- Circuito disparador basado en la ferromresonancia en paralelo.* «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 48-A, 355, 1952.
- Parallel ferromresonant triggers.* Comunicación presentada al Congreso sobre «Máquinas Calculadoras Electrónicas». National Physical Laboratory. Teddington (Inglaterra), 1953. Publicado en 1954.
- Circuito disparador basado en la ferromresonancia en paralelo II.* En colaboración con M. Rodríguez Vidal y J. Sánchez Rodríguez. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 50-A, 47, 1954.
- Las máquinas calculadoras modernas y la nueva automática.* «Arbor», núm. 102, 1954.
- Circuit déclencheur ferromresonant parallel a réaction.* En colaboración con M. Rodríguez Vidal. «L'Onde Electrique», 35, 165, 1955.
- Nuevo método para determinar el ciclo de imanación de un cuerpo ferromagnético sometido a un campo magnético alterno. I. Parte teórica.* En colaboración con M. Alique. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 50-A, 67, 1955.
- Analizador diferencial electrónico* (Investigación, proyecto y realización). Premio «Juan de la Cierva», 1954. (Equipo.) Publicado por el Patronato «Juan de la Cierva», 1955.
- Nuevo método para determinar el ciclo de imanación de un cuerpo ferromagnético sometido a un campo magnético alterno. II. Parte Experimental.* En colaboración con M. Alique Page. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 51-A, 107, 1955.
- Contribución al estudio de los circuitos de conmutación con rectificadores de selenio.* En colaboración con J. Sánchez Rodríguez y J. Miró Nicolau. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 52-A, 105, 1956.
- Analyseur différentiel électronique IE-CSIC.* Comunicación presentada a las «Journées Internationales du Calcul Analogique», celebradas en Bruselas en septiembre de 1955 y publicada en las Actas del Congreso, pág. 82, 1956.
- Ha aparecido una traducción en la revista de «Ciencia Aplicada», núm. 52, pág. 194, 1956.
- Calculadoras electrónicas analógicas.* Comunicación presentada al Congreso Luso-Español para el «Progreso de las Ciencias», número 4, 3, 1957.
- Switching research in Spain.* Comunicación presentada en el Congreso Internacional sobre «Theory of Switching», celebrado en abril de 1957 en la Universidad de Harvard (EE. UU.).
- Multiplicador y divisor analógico a integraciones periódicas.* En colaboración con A. Civit Breu. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 54-A, 127, 1958.

- Un generador de funciones diodos con modulación de señal.* En colaboración con J. González Ibeas. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 54-A, 263, 1958.
- Contribución al desarrollo e investigación de las máquinas calculadoras electrónicas y sus elementos básicos.* Premio «Francisco Franco» de Investigación Técnica (individual), 1957.
- Research on ferroresonant computer and control devices.* «Technical Note», núm. 1. Contrato No. Air Force 61 (514) 1234 1 de abril de 1957 a 31 de marzo de 1958.
- Un índice de mérito para ferromonancia.* En colaboración con M. Alique Page y J. L. Lloret. Comunicación presentada al XXXIV Congreso Luso-Español para el Progreso de las Ciencias. Madrid, noviembre de 1958. Revista «Las Ciencias», año XXIV, núm. 4, 1959.
- Impedancia del acoplo para lograr inhibición en los circuitos ferromonantes.* En colaboración con M. Alique y F. Vidondo. Comunicación presentada al XXXIV Congreso Luso-Español para el Progreso de las Ciencias. Madrid, noviembre de 1958. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 55-A, 331, 1959.
- Research on ferroresonant computer and control devices.* «Technical Note», núm. 2. Contrato No. Air Force 61 (514) 1234, 1 de abril de 1958 a 31 de marzo de 1959.
- Ferroresonant Systems of Circuit Logic.* En colaboración con M. Alique y J. L. Lloret. «Proceedings of the Institution of Electrical Engineers», Inglaterra. Vol. 107, Part B, No. 32, 1960.
- Sistema lógico ferromonante sin emplear demodulación.* En colaboración con M. Alique y J. L. Lloret. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 56-A, 97, 1960.
- Research on ferroresonant computer and Control devices.* «Technical Note», núm. 3. Contrato No. Air Force 61 (514) 1234 1 de abril de 1959 a 31 de julio de 1960.
- Quelques aspects des incidences de l'automation.* «Impact», vol. XI, 1961, núm. 2.
- Circuitos resonantes de cálculo con diodos de capacidad variable.* En colaboración con M. Alique y J. L. Lloret. «An. Real Soc. Esp. Fís. y Quím.», 57-A, 105, 1961.
- Física General.* 4.ª edición. 1961.