

INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y NEUROLOGIA

(III Parte)

Doctor Mario Camacho Pinto
Académico de Número

De acuerdo con mi anuncio esta III Parte estaría constituida por los mecanismos cerebrales susceptibles de extrapolación tal como fueron enumerados por mí: control de *input-output* para realizar conductas, y de inteligencia y aprendizaje, de los cuales por razón de espacio sólo se publica la mitad en esta edición de *Medicina*. Se trata de una presentación esquemática, auncuando ahora encuentro quizás más atractivo el enfoque de Jurgen Ruech expuesto en el Capítulo Comunicación y Psiquiatría de la obra extensa de Freedman (1) así: *Input* = percepción; análisis de datos = reconocimiento; procesamiento de datos = pensamiento; almacenamiento de datos = memoria; *output* = expresión y acción. A mi modo de ver se completaría este encuadre funcional con el tópico aprendizaje, proceso contiguo al de la memoria. Antes de entrar en materia hago unas consideraciones preliminares. En la primera me refiero a otro enfoque del concepto de I.A. no incluido anteriormente. Se trata de Schank Roger y Hunter Larry (2) para quienes las indagaciones a que conduce el trasegar acerca de IA son las más atrevidas de nuestra existencia: ¿cuál es la naturaleza de la mente, qué pasa cuando estamos pensando, sintiendo, viendo o entendiendo? ¿Es posible comprender cómo trabaja nuestra mente realmente? Preguntas milenarias en cuyas respuestas no se ha registrado progreso. La IA ofrece una nueva herramienta para avanzar en este sentido: el computador. Las teorías sobre la mente han consistido en procesos descriptivos. Y los planteamientos iniciales hechos sobre IA por los investigadores han sido enfocados hacia lo que ellos mismos consideraron como manifestaciones de alta inteligencia: problemas matemáticos, ajedrez, rompecabezas complejos, etc.; gran cantidad de energía fue dedicada y se encontraron técnicas computacionales exitosas. Pero se comprendió que las técnicas desarrolladas no eran las mismas que emplea el cerebro, por lo cual se ha comenzado a concentrar esfuerzos en tareas que se consideran triviales para cualquier adulto normal: lenguaje, sentido común, aprendizaje por experiencias pasadas.

En cuanto al lenguaje se refiere, el mayor problema reside en que la gente entiende mucho más de lo que el léxico literalmente expresa; en lo atinente al sentido común, no basta el conocimiento de una gran cantidad

de cosas sino se requiere su aplicación a una variedad de situaciones. En cambio el aprendizaje de experiencias pasadas tiene como base la memoria que facilita la aplicación de ese conocimiento en situaciones relevantes, lo que sí representaría un avance hacia verdadera inteligencia. Entonces se repite la pregunta: ¿para qué sirve la IA? Los autores mencionados responden que el concepto popular de IA se ha enfocado erróneamente hacia lo artificial o sea hacia los computadores. En realidad estos ejecutan tareas nunca antes imaginadas. Científicos e ingenieros constantemente están aumentando su utilidad y poder; pero esto no es IA; su concepto se debe enfocar por el aspecto inteligencia. Ponen como ejemplo el popular programa "Expertos" rotulado como "rule-based" en donde no hay razonamiento en la forma como lo hace un experto humano (hecho anotado en la 1a. parte); pues si bien es cierto que realizan tareas interesantes, no son modelos de inteligencia porque no pueden decir qué hay que hacer cuando algo no cuadra en sus reglas basadas en éxito o fracaso. Agregan que la IA es una ciencia mucho más básica de lo que generalmente se cree. Un producto hecho posible por una idea de IA tiene mérito si funciona con éxito útil, no simplemente porque sea fruto de una idea de IA.

¿Entonces cuáles serían las aplicaciones de la IA? Según Schank y Hunter si ganamos en conocimiento profundo (insight) o entendimiento de cómo piensa el ser humano, esos hallazgos ayudarían a la misma gente a pensar mejor y constituirían la más importante aplicación. Me explico: si descubrimos más sobre cómo la gente lee, entiende y crea, podemos ayudar para que se haga mejor. En este caso la aplicación más interesante sería para fines educacionales: cómo leer, memorizar, pensar y extender la creatividad. La IA vendría a ser una parte en el gran intento de entender el pensamiento y ésta debe ser su meta. Su interés reside en el factor inteligencia, no en el de producir artefactos, por lo demás parte incomparable e insustituible en la vida actual. El resultado real debe ser una nueva forma de entendernos a nosotros mismos, lo que sería mucho más valioso que cualquier otro programa.

Bernard Glueck y Charles Stroebel en "Ordenadores y Psiquiatría" (3) han escrito que el cerebro es un sistema

que puede organizar la información que recibe en un modelo multidimensional y multifuncional elaborado del mundo exterior y utilizar este modelo para llegar a decisiones inteligentes. En el computador el problema como hemos visto es poder dotarlo de este modelo al que se le pueda impartir comprensión (27) global para lograr el desarrollo de una verdadera IA. Actualmente Newquist Harvey afirma (14) que la siguiente generación de computadores será modelada sobre la estructura física del cerebro humano. Comentamos: la función cerebral completa es un conjunto tan integrado que sólo se puede fragmentar con fines didácticos y descriptivos porque es la única forma de entender su mecanismo que va progresivamente de lo simple a lo complejo llevando en cada una de sus etapas todo el sentido de unificación que concluye en un comportamiento inteligente. Esta autonomía no quiere decir independencia pues el medio ambiente puede —y lo hace— modificar o no tanto su flujo como su contenido.

Cuando el investigador trata aspectos parciales acude a diferentes procedimientos adecuables a la jerarquía funcional; cuando se quiere hablar de inteligencia en el sentido biológico se requiere un criterio obtenible por la información básica de los mecanismos biológicos de la integración funcional cerebral. Y si se aspira a simular estas funciones para IA nunca puede ser en plan diferente de la aplicación parcial de los mecanismos cerebrales para lograr objetivos también parciales, pues de lo contrario apareceríamos pretendiendo lo absurdo que sería querer igualar lo antagónico: con lo parcial obtener lo total.

Artificial Neural Networks, ANN.

Está demostrado que estos artificios albergan una capacidad increíble de memoria en un muy pequeño sistema de bajo poder como lo hace el cerebro (4) (13). Y como un avance informativo comento que las redes neurales artificiales ya empiezan a ingresar en la práctica aplicada con dos artificios que modelan el comportamiento de las neuronas empleando la tecnología de muy amplia escala de integración (VLSI) que comenté en la Ia. Parte cuando anoté cómo se conforma un "chip" con miles de microprocesadores y que ahora explico diciendo que se trata de varios diseños electrónicos amplificadores y de resistencias para imitar la operancia de las neuronas en el cerebro: son redes análogas que representan la información en resistores constantes, *entre* ellas y no *dentro* de ellas (5) (4). Los técnicos anotan que les ha resultado notoriamente difícil dotar un "chip" con resistores (6). El primer modelo es el de Hopfield (7) que consiste en un dispositivo relativamente sencillo en que el *output* de cada amplificador de circuito es retrotraído a *input* con conexiones de resistencias alternantes. Ha sido desarrollado en Caltech. Está compuesto por diseños de carga acoplados CCDs que representan el cuerpo de la neurona y semiconductores en metal nitrooxidado MNOs o compuertas flotantes que almacenan carga y sirven como sinapsis entre las "neuronas". Este artificioso se está ya empleando en sistemas de visión computada y de reconocimiento de lenguaje.

El segundo modelo es el del M.I.T. representado por una matriz de neuronas integradas por elementos tipo "n" y tipo "p" que conforman el cuerpo y CCDs que simulan la transferencia sináptica con conexiones-interconexiones, *feedback* de circuitos complejos y arquitectura neural

sofisticada consistente en diseños CCDs acoplados que simulan el mecanismo de transferencia neuronal o conducción empleando un método químico para transformar la carga de *output* de la neurona a voltaje efector de la célula receptora terminal. El tamaño de los paquetes de carga transportados por el CCD es arregiado por una compuerta flotante aislada con un film de nitrito. La carga puede ser cambiada por aumento en el voltaje que obliga a los electrones a traspasar el film, y variando la carga en la compuerta varía la fuerza de las interconexiones. Estudios teóricos y simulaciones han mostrado que estos modelos pueden ser implementados con mecanismos de aprendizaje obtenidos variando la fuerza de las conexiones, hecho considerado como un gran logro para el cual las técnicas de silicón son insuficientes y por ello están siendo remplazadas.

Un sistema neural difiere de otras formas de IA en que puede actuar bajo una evidencia incompleta suministrada por interconexiones, efectos de compuerta y umbral. Las redes neurales tienen otras características que las distinguen de los computadores digitales: a) pueden procesar información análoga en lugar de digital; b) el circuito completo —no una fracción— es encajado en la computación, por tanto mayor rapidez; c) un circuito neural puede retribuir y procesar información mejorando las respuestas ante una pregunta mal hecha; la información es tolerada globalmente, con la tolerancia de los sistemas biológicos (15) (22) (24) (25).

Se anuncia que en tiempo real, ambiente ruidoso e información parcial, los ANNs pueden llegar a ser los que en el día de mañana tomen ciertas decisiones en aplicaciones militares (9). Varias agencias gubernamentales como la ASFOR (Air Forces Office of Scientific Research); la DARDA (Defence Advanced Research Projects Agency) y la Office of Naval Research, están financiando la investigación y desarrollo en redes neurales. De otra fuente, Electronic Engineering Time en escrito de Brown Chapel (5) informa sobre la producción de las primeras redes neurales artificiales. Relata cómo investigadores de universidades y compañías electrónicas describen circuitos inspirados en nuevos conocimientos profundos de la forma como el cerebro trabaja y los están incorporando en sus computadores digitales mediante "chips" y sistemas digitales que remedan muchas de las propiedades de las neuronas. El resultado parece ser el de haber obtenido sistemas de IA, fundamentalmente diferentes del sistema de "Expertos" ahora tan en boga.

La TRW ha introducido el "Mark III Artificial Neural System Processor" que puede simular 8.100 neuronas con 417.000 interconexiones variables y 1.2 millones de interconexiones fijas: su función principal es reconocimiento del lenguaje.

Ahora entro a analizar mis tan anunciados *ítems* en su planteamiento original con miras a sacar conclusiones en cuanto a extrapolación se refiere. No presumo de original en este esquivo tema, tomo de los otros lo que considero necesario para exponer mis ideas (¿o errores?). Requiere guiones permanentes para el desarrollo de este tema pues como lo planteara Marvin Minsky en su concepto citado ya y ahora lo dice Somjen en su Neurofisiología 1986, hay discrepancia de opiniones que expresa así: "las disciplinas que se ocupan de los aspectos físicos y químicos de la función cerebral están separadas de aquellas que se ocupan de sus manifestaciones con-

ductuales y mentales. Espero que con los progresos de la neurofisiología en un futuro haya fusión". "No es mucho lo que se sabe sobre los mecanismos fisiológicos de los que dependen las llamadas funciones cerebrales superiores" (10). Opinión muy respetable pero con la cual no están en acuerdo del todo otros autores como Luria en sus obras "El Cerebro Humano y los Procesos Psíquicos" (11) y "Las Funciones Corticales Superiores del Hombre" (12) de la escuela soviética, fundador de la neuropsicología o "lenguaje del cerebro normal o lesionado" como resultado del asiduo estudio investigativo continuado de su impresionante casuística de toda clase de heridas cerebrales en la 2a. guerra mundial. Y también leemos en Kent: "las dos tareas que requieren el mayor procesamiento del cerebro como son el análisis de la información que inunda incansablemente los órganos de los sentidos (*input*) y el diseño y ejecución de los movimientos en el espacio (*output*), han encontrado la solución que facilita su extrapolación en la noción de procesamiento paralelo que se está poniendo en práctica con éxito".

Conciente estoy de que piso un terreno más especulativo que real porque en la actualidad el prototipo de IA es el robot inteligente, meta del proyecto japonés "V generación"; mas mi interés está principalmente orientado hacia el modelo neural norteamericano VI generación, basado en la interpretación de los mecanismos del cerebro humano cuyo conocimiento constituye y compromete en la actualidad toda mi ilusión. Recién ha dicho Stephen Grossberg (13) "la literatura sobre redes neurales artificiales está mucho más desarrollada y sofisticada de lo que en la actualidad se está informando, hecho verdadero que constituye la mejor esperanza de que se está realizando un rápido progreso en el campo de la ingeniería neural".

El neurofisiólogo Somjen dice: "una buena parte de nuestro sistema nervioso central parece estar dedicado al control del movimiento, que en teoría podemos separar en dos aspectos así: a) programación del movimiento y b) guía del mismo". A su turno Kent en enfoque heterodoxo expresa que "el control cerebral que organiza la generación y la ejecución de movimientos en espacio y tiempo es obviamente muy complejo en su organización, pero se puede simplificar, resumir y reducir en última instancia a dos nociones: a) terminales de placas efectoras en músculos, y b) terminales de las mismas en órganos". "Los receptores sensoriales recogen información convirtiendo pequeños cambios de energía en señales nerviosas eléctricas, siendo transductores de una forma de energía a otra: bien por células receptoras especializadas, bien por membranas de terminales periféricas de una fibra nerviosa sensitiva; potencial receptor en el primer caso, y potencial generador o efector en el segundo. Hay mecano, termo, químic, fotorreceptores. Los distintos estímulos de estos órganos receptores evocan diferentes tipos de sensaciones subjetivas". Y advierte que no somos siempre conscientes de todas las entradas de las aferencias nerviosas, en parte por cuestión de atención, en parte por competencia de estímulos.

Control de Input—Output

Consideraciones neurofisiológicas: en el enfoque neurofisiológico de los mecanismos de la función cortical cerebral me aparto de la tradicional descripción de síndromes frontal, temporal, etc., o de lóbulos cerebrales y sus funciones, etc., y sigo el concepto neuropsicológico de

comportamiento y función en relación con la anatomía, de la cual como lo expresó Kent, no se requieren detalles finos sino funcionales, de arquitectura global. Así el concepto de que las neuronas en el córtex motor prerolándico controlan los movimientos voluntarios se considera hoy en día ingenuo. Técnicas por microelectrodos han mostrado que hay neuronas del haz piramidal que proyectan monosinápticamente a las motoneuronas espinales y que una sola de estas motoneuronas puede recibir proyecciones de áreas corticales de 2.5 y 8 mm² por superposición. Aparte de la noción anterior Patton y Amassian (15) repudian el clásico "mosaico anatómico cortical", remplazando esta noción por la de agrupaciones funcionales diseminadas e intermezcladas con otras que deben ser eliminadas en su momento, (excitatorias, inhibitorias). Se admite ahora que el control básico del movimiento es ejecutado por las estructuras ventromediales basales cerebrales. Y en conclusión se puede decir que las vías subcorticales son las que guían los movimientos independientes de los miembros y del cuerpo y que las vías cortico-espinales superponen velocidad y agilidad. Lo cual reafirma la teoría de Jackson de las jerarquías o "niveles".

Penfield demostró la existencia (16) de una área motora suplementaria. Hablando en términos de simplicidad, una de las mayores funciones del cerebro es procesar información proveniente de los órganos receptores sensoriales y ajustar el comportamiento del organismo a corto y largo plazo: en este sentido actúa como un sistema de *feed-back* estabilizador para las proyecciones corticales somestésicas, kinestésicas, vestibulo-cerebelosas, de visión, oído, gusto y olfato. Tanto la noción de corteza sensorio-motora como la existencia del área somatosensorial secundaria situada en el borde superior silviano están aceptadas (16).

En cuanto a visión, comenzamos por recordar los conceptos de percepción y reconocimiento; la falta de la primera conduce a la ceguera y la ausencia del segundo a la agnosia. Luego anotamos que Mishkin citado por Daly (16) propone 3 regiones corticales distintas para el procesamiento visual, a saber: el área estriada, la preestriada y la inferotemporal; ésta última adicionalmente recibe proyecciones del córtex inferotemporal contralateral, el córtex frontal lateral y el pulvínar. En este punto Gross concluye que el déficit causado por lesiones infero-temporales produce detrimento de la discriminación, del aporte de los factores asociativos y falla en el reconocimiento en ausencia de perturbación sensorial elemental; mientras que el déficit por lesiones estriadas es más sensorial: es decir afecta básicamente percepción y atención. Varios estudios han demostrado que el hemisferio derecho identifica mejor las figuras cuyo contorno falta, en juzgar el tamaño de un círculo por la imagen de un fragmento, y en caso de lesión se produce marcado déficit en visión estereoscópica, lo que se interpreta como que hay procesamiento diferente para los mismos estímulos entre los dos hemisferios cerebrales, predominando en el derecho la configuración espacial.

El hemisferio izquierdo lo hace mejor en las respuestas verbales, en el recuerdo del código lingüístico. Consideraciones similares se pueden hacer para la audición. Estos datos muestran la complejidad para la investigación de cómo simular estas funciones. Sin embargo esto no es óbice para continuar estudiando e ir considerando esa por ahora utópica posibilidad.

Con estas salvedades anotadas y otras obvias, continuamos con las consideraciones extrapolables que presentamos a continuación.

Estudiando ahora los mecanismos fisiológicos de entradas y salidas susceptibles a la supuesta extrapolación, consideramos —apartándonos de Kent— algunos de los factores relevantes en el siguiente orden: 1o.) El sistema sensorial primario o receptor (*input*) conformado por la información proveniente de los órganos de los sentidos, y además la piel (somatoestesia); y 2o.). El efector o de acción constituido por la organización motora periférica y su adecuado control central superior mediante el monitoreo ejecutado por la corteza motora, el cerebelo, los ganglios basales, la función kinestésica (o cinestésica). Señalo que anunciando he consultado varios estudios de intención sobre el tema, jamás pretendo un *desideratum*, sólo un vistazo para indagar posibilidades, propiciar criterio informado y estimular inquietudes que poco a poco han de ir enriqueciéndose con nuevos aportes proporcionados por las múltiples investigaciones internacionales.

Marc Jeannerod en su libro "The Brain Machine" (17) demuestra con argumentos elegantes que "el problema cerebro-movimiento es el paradigma esencial del problema mente-cerebro, al enunciar una organización neural del movimiento con implicaciones para la neurofisiología y las neurociencias".

El Sistema Sensorial Primario

El cerebro adquiere experiencia, al robot hay que suministrarla. El problema de codificación: quizás el más notable hecho ejecutado por el cerebro es la creación de una organización útil, resultado del cúmulo de datos proporcionados por los estímulos sensoriales. Es también una de las más difíciles tareas para el bioingeniero diseñar un sistema robot inteligente. En cuanto a lo primero, pensemos no más en la infinita información recibida por el sentido de la vista para darle significado y convertir en elementos comportamentales el aporte de estímulos y sensaciones. Empezaremos por definir estos vocablos. El primero se refiere al evento actual físico que activa un receptor que para el caso de la visión como ejemplo es un grupo de fotones absorbidos por la retina. La intensidad y longitud de onda de la luz están determinadas por las propiedades de los objetos físicos que la proyectan. Cuando hablamos de estímulos luminosos entendemos que su acción depende de las propiedades de la luz que recibe la retina. Sensación se refiere a una experiencia mental que resulta de una forma de activación de nuestros receptores: un estímulo es una ocurrencia objetiva, una sensación es subjetiva. ¿Podemos decir que lo rojo es una propiedad de la luz? No, porque solamente la propiedad física de la luz es su longitud de onda. Lo mismo pasa con el sonido. En el computador se puede encontrar una analogía con el código ASCII, que emplea patrones bit para representar letras y números como vimos en la 1a. parte, pero que pueden significar también algo distinto. La sensación luminosa no es el resultado de activar la retina porque si se corta el nervio óptico y se estimula la corteza visual se obtienen sensaciones luminosas (fosfenos). Entonces las sensaciones dependen de las neuronas del córtex. La información sobre longitud de onda específica en la retina es llevada por los correspondientes axones del nervio óptico. Este sistema puede ser catalogado como un "place code".

Si aceptamos la noción de que las sensaciones mentales son producidas o determinadas por el cerebro como resultado de estímulos decodificados que producen activación de los receptores, acordes con determinadas convenciones, entonces la sensación viene a ser básicamente un ejemplo de procesamiento de información. La naturaleza de la experiencia conciente se tratará adelante. Por ahora el objetivo es examinar las clases de transformaciones que el cerebro impone a sus *inputs* y preguntar por qué una transformación particular y no otra es la útil ante el ambiente. En un sistema artificial el detallado examen de los objetos distantes se podría tener usando sistemas de formación de imágenes sobre una red de transductores sensitivos. En el sistema cerebral visual se procesa la información así: hay alrededor de 10.000.000 de elementos receptores de luz en la retina; y el cerebro puede cumplir un completo análisis de los patrones de iluminación aproximadamente 100 veces cada segundo. Si esto fuera hecho en una forma directa mediante el examen de todas las percepciones posibles de 10.000.000 de bits, no más de un décimo de segundo de visión sería demasiado para el cerebro. Pero este órgano se defiende reduciendo y sus trucos le son de utilidad. El primer paso es el proceso de decidir qué no hay que mirar recurriendo a fijarse sólo en los límites sin tener que escrutar el conjunto. El segundo es mirar solamente a las cosas que se mueven en espacio y tiempo. El ojo es sensible a dos estímulos dimensionales de luz a saber: intensidad y longitud de onda, que percibimos como sensaciones de brillo y de color. Detectar límites temporales o cambios de iluminación en tiempo se puede simular artificialmente. En efecto, un AC acoplado a un convertidor análogo a digital (A/D) con apropiada constante de tiempo podría ser una forma efectiva para modelar este proceso en un robot. Pero el problema serio es pasar de lo simple a lo complejo, función que realiza el córtex sencillamente como una propiedad de la neurona receptora. El elemento receptor del ojo actúa como un terminal inteligente que transmite al córtex información sobre límites y cambios hacia los altos niveles (20). Hace poco Carver Head (20) ha logrado construir un "chip" versión de un receptor visual similar a los encontrados en las células de la visión periférica del ojo.

Se pueden imaginar implicaciones para definir la naturaleza de la experiencia mental, el carácter distintivo de los procesos de extracción de imágenes para codificar, las características distintivas de esos extractores; codificación de la intensidad con el equivalente cerebral del "temporal byte" relacionado con cuáles células deben ser activadas por un estímulo y graduar su intensidad; identificar rasgos, para lo cual se requiere información sobre espacio, en el curso del proceso que se considera ejemplo de cómo el cerebro combina los sistemas digital y análogo en un sencillo mecanismo decisivo al que se llega por niveles. Hay más: en materia conceptual este campo es ilimitado y sujeto a innovación permanente como la del *feedforward* (corrección de lo que ya fue actuado). E investigar soluciones artificiales se busca prioritariamente en el proyecto japonés como se ha dicho (26). Otro tipo de análisis inicial de *inputs* al cerebro se refiere a la frecuencia espacial, un aspecto de extracción de caracteres distintivos diferente del anterior que es de tipo geométrico. Por frecuencia espacial se entiende no la frecuencia en tiempo de "ciclos por segundo", sino en términos de frecuencia acústica o eléctrica de

dimensión espacial: "ciclos por centímetro lineal". Ahora será posible especular con frecuencias espaciales en la misma forma que estamos acostumbrados a tratar con frecuencias temporales, y con la aplicación de los postulados de Fourier.

El sistema visual de análisis de movimiento tiene como uno de sus objetivos mayores la habilidad para detectar un patrón de reconocimiento independiente de la localización espacial. De otra manera un objeto dado sería definido de acuerdo a la posición y los objetos colocados en diferentes sitios parecerían ser la única entidad en cada localización. El cerebro ha desarrollado hasta cierto punto extractores de localización independientes. Por otra parte el conocimiento de la localización de un objeto puede ser suministrado también por los escalones inferiores o unidades específicas de lugar que contribuyen a la independencia de los altos niveles. El registro del movimiento es un aspecto fundamental de la habilidad del sistema visual para proporcionar información ambiental, computar trayectorias y aún distinguir cualidades importantes. En muchos casos el movimiento es uno de los rasgos esenciales con la forma y el tamaño para el reconocimiento del estímulo visual. Se espera encontrar detectores de movimiento a nivel retiniano.

Otra función es la que concierne a la visión tridimensional, con la cual todos estamos familiarizados; la noción de profundidad está dominada por la visión binocular (18) aun cuando hay otros factores como textura de la superficie, iluminación, tamaño de los objetos, interposiciones a diferentes distancias, movimiento aparente de objetos, relaciones con el fondo, etc. Hay dos posibles sistemas (ambos relacionados con la convergencia ocular) para obtener la noción de profundidad. El primero es el que se realice el registro de la imagen del objeto en partes equivalentes de las dos retinas; el otro es el grado de disparidad en las posiciones de la retina de una imagen que obliga en cierta forma a la convergencia ocular. Probablemente el cerebro emplea ambos mecanismos (18). Además debe tener "medidor" en el *output* del mesencéfalo en donde están los núcleos de los nervios oculomotores. El truco está en detectar cuándo las dos imágenes están siendo recibidas por sus partes equivalentes de las dos retinas.

Conocemos el trayecto de las vías visuales al cerebro, en cuya corteza visual estriada están representadas todas las orientaciones tangentes y todas las direcciones posibles de movimiento para todos los puntos dentro del espacio visual; cualquier objeto en el campo visual activará una única combinación de columnas corticales (10). En neurofisiología se acepta que la visión de profundidad se explica porque los dos ojos están colocados frontalmente para ver los objetos desde ángulos ligeramente diferentes; el cerebro fusiona las dos imágenes bidimensionalmente aunque un poco disparejas en una única experiencia visual tridimensional, hecho demostrado por el estereoscopio. Sabemos que estas vías se cruzan parcialmente en el quiasma, hacen estación en el cuerpo geniculado lateral y en el tubérculo cuadrigémino anterior para la acción refleja y la organización visual del córtex estriado occipital en columnas verticales cada una de las cuales analiza un área del campo visual estableciendo una "dominante" (10). Los ojos pueden generar también una visión de profundidad con base en discrepancias, pero en cada columna del córtex estriado debe haber células especializadas en evaluar profundi-

dad porque para conseguir este objetivo no es indispensable la visión binocular. En la práctica existe ya un robot que puede manejar un carro a 30 kilómetros por hora de velocidad evitando obstáculos interpuestos. Infortunadamente la oftalmología no nos proporciona mayor ayuda porque como lo confiesa J.G. Pashley en "Fundamentos Científicos de Oftalmología" (19), el oftalmólogo está más interesado en la fisiología del ojo que en el sistema ojo-cerebro.

La audición. Es interesante la comparación entre visión y audición. El dato fundamental en el sistema auditivo son los patrones básicos de frecuencia y amplitud de onda mediante los cuales se diferencian sonidos y se determinan localizaciones espaciales. En muchos aspectos la tarea básica es diferente de la del sistema visual a niveles inferiores, pero a niveles superiores es reminiscente. Sobre esto volveremos. El mecanismo de transducción consiste en un *pick-up* que es el tímpano, convertidor de las ondas aéreas a vibraciones mecánicas en una cámara líquida, la cóclea, que contiene el órgano de Corti. Ahí dentro unas membranas perforadas (de Reissner y basilar) se ponen en movimiento por las vibraciones del tímpano que con el máximo desplazamiento y su cualidad resonante llega a los diferentes puntos según su frecuencia. Cuando la membrana es desplazada (cilias) produce descargas eléctricas en las neuronas o células ciliares del nervio auditivo o coclear, que van al cuerpo geniculado interno en el tálamo y de ahí a la corteza temporal, áreas 41 y 42 de Heschl. Esto puede ser simulado artificialmente. Es importante anotar aquí que un componente del sonido, el tono o frecuencia, queda reducido a un "place code". Así el tono queda representado por un grupo de células y la intensidad por la frecuencia con que estos grupos descargan. La interacción es importante, así como las proyecciones a centros o núcleos subcorticales auxiliares excitadores o inhibidores unos, y otros como el colículo inferior que son relativamente sensitivos para aquellos estímulos que determinan la localización espacial o la fuente del sonido. En la corteza auditiva el espectro de frecuencia a la respuesta es comparable al de la corteza visual, cuya significación es la conveniencia para establecer conexiones. Sin embargo la mayoría de neuronas auditivas no responden igual que las visuales a la estimulación, parece que sólo extrajeran rasgos específicos de frecuencia espacial codificada que confronta con las relaciones suministradas por las neuronas de bajos niveles y conexiones colaterales. Aquí la transformación del complejo de ondas a espectro de frecuencia temporal es otro ejemplo de análisis análogo de Fourier (complejo de la forma de las ondas de los sonidos naturales).

Los otros dos órganos de los sentidos que alimentan la información del sistema nervioso central, gusto y olfato, no han sido muy estudiados neurológicamente bajo nuestro punto de vista, aunque sí experimentalmente en biología comportamental, neurobiología y modelaje neural por Gelpering, J. Hopfield, Tank, (21) en el molusco *Limax*, herbívoro que vive entre plantas venenosas y hongos tóxicos que no come por rechazo de olfato y gusto.

Para el tacto valen las consideraciones hechas anteriormente a propósito de los sistemas visual y auditivo.

Considérese ahora la Kinestesia o sentido que define el movimiento del ángulo articular. Para esta función ci-

nestésica debe haber neuronas que descarguen a ratas progresivamente crecientes según el grado de apertura de dicho ángulo y así la discriminación fina correspondería a "detectores de ángulo", para que no ocurra que el cerebro tenga que codificar percepciones del mundo en la forma de una línea singular activa para cada percepción. La alternativa sería codificar patrones de actividad de un conjunto de neuronas, con la posibilidad de permutaciones entre un gran número de elementos neuronales, lo que impediría aglomeración y redundancia. La distinción es exactamente la misma entre codificar un número por una posición en "núcleo" de un *bit* o codificar por el arreglo o permutaciones de *bits* en un pequeño *byte* (conjunto de *bits*). El cerebro emplea códigos de permutación por la misma razón que un ingeniero lo hace en un computador. Las ventajas obtenidas por el cerebro en el procesamiento paralelo simultáneo y operación no sincronizada cuadran bien para este esquema. Cualquier unidad funcional del cerebro debe tener acceso a cualquier "bit" de cualquier parte en cualquier tiempo. La casualidad se evita en el cerebro posiblemente con una neurona habida genéticamente o adquirida por aprendizaje. Se puede suponer que la maquinaria central preferirá conservar unidades generalizadas y permitir que surja la especificidad a través de momentáneos patrones generados en amplios *bytes* por la interacción de varios tipos de elementos relativamente no específicos. Comparable a lo que pasa en el sonido, en que cualidades simples como localización y tono puede ser extraídos a niveles bajos en un sistema de *input* de "buses" donde los niveles altos puedan hacer uso de ellos. Rasgos más complejos pueden ser extraídos de niveles de *inputs* más altos, a los cuales tienen acceso estos "bits" marchando en paralelo (23). La ventaja de este añadido al código perceptual es que el "byte" entero es hallable en cualquier instante. La representación final de los datos de los procesamientos de *input* ocurren en el código interno de la maquinaria central que Erickson ha llamado "codificador paralelo de población". Las implicaciones de este sistema para el diseño de inteligencia artificial es grande.

Principios Generales de Pre-Procesamiento Sensorial Primario

He tratado de plantear sucintamente un entendimiento de los recursos aceptables que emplea el cerebro humano para el análisis inicial de sus *inputs* primarios determinados por adquisiciones genéticas o de desarrollo, a nivel que está basado en la activación de los receptores corrientes y confinado a una sola modalidad sensorial. Este análisis resulta un poco arbitrario como dice Kent, quien a su turno lo toma de otros como Erickson (22). Se puede pensar que el cerebro guarda la misma relación hacia los procesos perceptuales de más alto orden, que un procesador tiene con un computador central. Aun cuando la arquitectura es diferente, principios similares pueden aplicarse: la máquina central confía en sus preprocesadores para que la provean de un digerible sumario de aspectos relevantes de información, desechando lo que no es esencial. Terminales inteligentes previenen la sobrecarga de información del proveedor central. Este queda descansado porque su maquinaria conoce los algoritmos generales que deben ser aplicados.

Kent presenta dos principios de codificación. El primero es el de que estímulos cualitativos estén representa-

dos por un "place code", mientras que los de intensidad lo sean por un código de frecuencia. Localización visual y color son codificados por neuronas de identidad, mientras que la intensidad de la luz es codificada por rata de descargas. Similarmente para el sonido, la frecuencia está modulada por una neurona y la intensidad por cuán rápidamente haya descargas.

Procesos Perceptuales Superiores

La corteza sensorial secundaria. Antes hemos visto algunas ideas básicas que parecen subrayar el procesamiento de *input*. Cada uno de los sistemas sensoriales puede transformar su información proveniente de diferentes clases de estímulos físicos con muy distintos receptores, en un código perceptual común. Las cualidades perceptuales son derivadas de la estimulación y están representadas como actividad en líneas neurales; en conjunto su actividad está constituida por permutaciones o intercambios. Sin embargo hay una enorme distancia entre la información sensorial primaria y nuestra usual experiencia subjetiva perceptual del mundo sensorial que empezaremos a analizar.

El primer nivel de la organización cerebral visual codifica rasgos simples como líneas y colores pero no explica cómo se puede discriminar un objeto u otra entidad perceptual unificada. Esta operación requiere procesamiento adicional que incluye además del visual otros sentidos y memoria, de lo que resulta el reconocimiento de una serie de patrones dentro de los estímulos definidos en un concepto de identificación del objeto como miembro de una clase. Las áreas principales del cerebro estarían rodeadas por una serie de *sensores corticales secundarios* para mayor procesamiento de *inputs* sensoriales. Se puede aceptar que contornean la corteza parietal, que aparentemente es donde la información de muchas modalidades es combinada con la memoria y los procesos verbales (encrucijada parieto-temporo-occipital). Este arreglo de las áreas sugiere también la progresiva inmersión de lo sensorial en lo conceptual con estructuras multimodales. Este discurrir puede razonablemente encontrarse como una simplificación, burda si se quiere, pero útil como ayuda para comprender lo que puede estar ocurriendo en el cerebro. Las neuronas de estas áreas corticales secundarias tendrían una sintonía estrecha para varios aspectos de forma espacial y muy amplia para cualidades como localización. En muchos casos la orientación también viene a ser modulada, otras células hipercomplejas serían dejadas en libertad y las de los contornos, situadas entre áreas de actividad diferente u opuesta, reguladas por detectores y extractores. Estas singularidades son importantes en percepción y se sumarían a las ya vistas de convergencia selectiva y de inhibición. La existencia de estos hipercomplejos receptivos no interviene en cambios sutiles observados en caso de daño sufrido por trauma o experimentalmente en el córtex primario. La destrucción de las áreas visuales secundarias ocasionaría pérdida parcial de percepción.

Esto sugeriría que la percepción no es una simple serie de procesos que van de los bajos a los altos niveles de abstracción en un sistema lineal, sino en paralelos relacionados espacialmente y en síntesis inconciente visual, táctil, etc.

Estudios realizados a propósito del córtex visual secundario revelan al menos dos tipos de procesos: activos y

pasivos. Los primeros son los que acabamos de considerar, es decir el análisis de los *inputs*; en los segundos se utiliza información adicional que puede ser obtenida relacionando los cambios en orientación importantes en el análisis de nuevos patrones. Resumiendo, neurofisiológicamente, diremos que existen dos rutas de la retina al córtex: la principal descrita anteriormente, y la accesoria que hace escalas subcorticales en los detectores oculomotores para orientación refleja y en el córtex occipital visual secundario para llegar al temporal. Hay evidencia de que a la principal concierne el análisis y categorización del contenido del espacio visual, mientras que la segunda es responsable del análisis de la localización global en el espacio. Las lesiones de estas dos áreas indican que cada una es funcionalmente diferente: la principal elimina la habilidad para percibir relaciones espaciales entre objetos, pero no la discriminación; la accesoria dificulta seriamente el reconocimiento de patrones y objetos. Esto se desprende tanto de la experimentación en animales como de la neuropsicología. En la actualidad lo más aceptado es que la porción posterior del córtex temporal inferior genera modelos del contenido visual; mientras que la porción anterior clasifica estos objetos en categorías por su respuesta racional o emocional o por memoria (procesos lógicos y emocionales según Kent). Ninguna de estas funciones impide el reconocimiento de los objetos, por lo que podría codificarse en un *byte* corto. Sería prolijo para este trabajo penetrar en el terreno de las hipótesis, pero según los expertos, estas numerosas lucubraciones atinentes a los innumerables detalles funcionales parecen tener la posibilidad de simulación por IA y ya muchos de ellos han sido ensayados experimentalmente, en especial la suplencia de la debilidad de un sistema con la fuerza de otro. La posibilidad de simular en *software* es muy compleja, pero en principio no imposible. Con excepción de partes activas del proceso, el mecanismo es esencialmente el de un número de pasos seriados en paralelos de grandes arreglos de datos.

Para simular el proceso perceptual total en un computador tradicional se necesitaría un número enorme de pasos seriados y sobre todo para el aspecto tridimensional visual sería gigantesco. Pero la situación está cambiando con los microprocesadores de conjunto que son ya hoy corrientes y baterías de ellos podrían simular los requerimientos mínimos de la función cerebral. Sin embargo se necesitan avances en *hardware* de tipo procesamiento paralelo masivo, y conexionismo ya descritos.

Parece que no se ha encontrado todavía la forma de simular una función perceptual mediante un *byte* temporal de sistema digital, sino solamente codificando magnitud sobre un pequeño "bus" que represente cada axon, por tanto es impracticable. Posiblemente se llegue a la conclusión de que haya que hacer como el cerebro lo hace, mezclar técnicas digitales y análogas a nivel de componentes.

Sistema Motor

De las áreas del cerebro involucradas en el control motor encontramos pertinentemente importantes la corteza motora, los ganglios basales o núcleos grises y el cerebelo. Los núcleos grises operan en un supersistema que incluye también sistemas cognoscitivos y emocionales.

En ese complejo nivel de organización motora la distinción entre concepto, deseo y acción comienza a borrarse y así puede verse orientada hacia actividades que conciernen a otras áreas funcionales como la somatomotora. Esto se comentará con más detalle a propósito del comportamiento racional. Las áreas motoras piramidales y somatomotoras o sensomotoras, a pesar de ser el último desarrollo evolutivo del cerebro (telencéfalo), no representan el más alto nivel de integración motora como se ha pensado; pueden más bien considerarse como un procesador paralelo especializado en refinar y aumentar la resolución y la velocidad procesal de funciones dirigidas desde otras estructuras más antiguas. Su proyección al sistema MNI (motoneurona inferior) es masiva y de colaterales subcorticales a protuberancia, bulbo, médula, etc., lo que permite gobernar la jerarquía motora automática por intervención directa en el sistema MNI. Aunque sistemas tales como los ganglios basales y el cerebelo tienen *output* directo al control jerárquico del sistema motor piramidal-extrapiramidal, también conectan con el sistema del córtex sensomotor y aparentemente proveen la mayor parte de su dirección y control, apareciendo como un extenso decodificador.

Hay una situación destacable en que se origina función motora y es la de control de acción basada en información *feedback* a partir de los receptores sensitivos de la piel (tacto). La relación especial estriba en que una gran cantidad de control motor fino se efectúa por *feedback* de varios transductores de presión y sensibilidad. Baste decir que la información de *input* codificada puede actuar directamente en el *output* motor e iniciar actividad motora en aquellos casos en que la información de piel es el apropiado control de *input*. La información derivada de éstos últimos receptores es la base del sentido del tacto o somestesis. La relación del sentido del tacto con el sistema motor reside en que una cantidad de control motor fino es realizado por *feedback* desde varios transductores de presión y sensaciones táctiles. La corteza sensomotora recibe su principal control de *output* desde un grupo de núcleos talámicos que a su vez recibe la mayor parte de su *input* de otros ganglios basales y del cerebelo, viniendo a servir aquellos como preprocesadores.

Si pensáramos en cómo se podría extrapolar el sistema motor cortical de *output* a sistemas artificiales más o menos equivalentes, necesitaríamos dos controles técnicos fundamentales que son los que aparentemente emplea nuestro organismo a saber: 1º). Equipar cada nivel de toma de decisiones con subprocesadores que acepten órdenes enviadas desde otros niveles, teniendo en cuenta *inputs* que contengan *feedback* local e información ambiental, subsistemas que organicen pautas apropiadas de actividad para ejecución. El cerebro emplea toda una serie de pasos: el *output* de cada paso define el siguiente en forma secuencial refleja de acuerdo con el objetivo, aunque varíen cargas, esfuerzos u otras perturbaciones. Este sistema de organización por sí mismo sería apropiado también para controlar procesos multimodales musculares, como mantener el equilibrio mientras se camina un piso desigual, por ejemplo. Sin embargo no parece suficiente para realizar más altas metas.

2º). Principio de control, se refiere a la operación de los sistemas de más alto nivel que generan estrategias de *output* en relación con metas de comportamiento, porque esto envuelve categorización de tareas de *output* de

acuerdo con el empleo de la información de los *inputs*. Ejemplo: piénsese en la ejecución en ortostatismo de la prueba talón-rodilla que empleamos en un examen neurológico de rutina: en posición erecta con los ojos cerrados levantar el pie, flejar la rodilla, colocar el talón sobre la opuesta y deslizarlo por la cresta tibial. Se necesita la presencia de sistemas sensores especiales de los cuales no nos damos cuenta, del orden kinestésico y vestibular, que informen al cerebro para que este órgano dé la orden de las posiciones, tensiones musculares, aceleración o al contrario, freno en diversas direcciones: es lo que constituye el contingente de *feedback* suministrado por los órganos kinestésicos que los transducen a impulsos neurales. Este mecanismo puede ser simulado por dispositivos mecánicos análogos como calibradores de fuerza o transductores de presión (place-coding, frequency coding).

El sistema muscular casi siempre trabaja en parejas de agonistas y antagonistas porque su acción es en un solo sentido y su principal elemento es la motoneurona inferior o periférica MNI situada en la médula espinal o su equivalente en el tronco cerebral; es pues neuromuscular. Cada músculo está compuesto por miles de millones de fibras y los muy especializados tienen un sistema organizado para cada unidad muscular. Piénsese en los oculomotores. Hay una gran cantidad de sistemas MNI, que básicamente deben aceptar, reconciliar y modificar órdenes de otros sistemas de acuerdo con su prioridad y con los *inputs* kinestésico-vestibulares; con el resultado de un *output* apropiado al músculo al tiempo que suministrador de información a otros sistemas. Kent apunta que no ve por qué un solo servomecanismo actuador y procesador para cada articulación no sea suficiente. Conexiones inhibitorias cruzadas entre los sistemas MNI descartarían el antagonismo. En cambio un reflejo nociceptivo de la piel es menos complicado de simular con un sensor. *Outputs* ascendentes informaría a los centros superiores de acción refleja para correcciones ponderales y acción antigravitaria, modificando posiciones corporales o velocidad.

Kent habla de la existencia de las fibras "S" que dibuja en uno de sus esquemas (husos) (18) que se dejan alargar o encoger para la transducción kinestésica. Es decir habría *feedback* negativos y positivos en esta situación que darían al sistema receptor indicación de la posición en el espacio. En teoría al menos no importa si estos mecanismos presentados en abstracto son neurales o electrónicos. Como en cualquiera de los otros sistemas controlados por *feedback* puede resultar inestabilidad y oscilación que serían neutralizadas por la pequeña neurona R ("Renshaw cell") de acción inhibitoria sobre las MNI (18).

La MNI mirada en el contexto del conjunto jerárquico motor aparece como si el cerebro estuviese usando un "temporal byte" de frecuencia codificada e información análoga de los receptores de estiramiento para dar el grado o cantidad de acción. Porque el set de fibras descendentes constituyen un "Spatial byte" o "place code" que es esencialmente digital en el cual las líneas seleccionadas (bits) eligen el grupo de motoneuronas a que deben dirigirse para determinar la calidad o naturaleza del movimiento.

De las anteriores nociones podemos siguiendo las pautas trazadas por Kent considerar algunos aspectos de simulación para un dispositivo tipo robot. A primera vista

parece razonable remedar el comportamiento del sistema MNI con un diseño "análogo" como un "op amp" controlado por circuito de *feedback*. Pero esto en la práctica resultaría muy complejo porque se necesita integrar alrededor de 10.000 *inputs* sinápticos de diferentes prioridades, así como codificar información análoga sináptica de otros sistemas. Entonces el procesador digital de gran memoria puede ser la solución para controlar las numerosas interacciones. Se necesitarían múltiples microprocesadores de trabajo en paralelas. La mejor solución está por demostrar. Pero un sistema jerárquico de unidades paralelas en los niveles inferiores, liberaría los superiores para el control conjunto, y dejaría libre las inferiores para los detalles. Aquellos elementos superiores recibirían órdenes y reportarían respuesta a unidades procesadoras de coordinación del cuerpo para postura y equilibrio. Con información lateral de distintos niveles habría transferencia de procesamiento.

Así se constituiría un sistema jerárquico reflejo capaz de recibir y ejecutar órdenes como correr. Sería en realidad un complejo autómatas. Hay dos sistemas en los robots para lograr esto: el primero denominado "dead-reckoning" es aquel en el cual los detalles de la acción requerida son computados de antemano y ejecutados no importa los resultados. El otro es el de monitoreo continuo del movimiento aplicando las correcciones según se vayan requiriendo. Ambos sistemas tienen sus usos, ventajas y debilidades: sólo que el cerebro puede emplearlos ambos sinérgicamente o por separado en forma perfecta. En cuanto a organización de *output* se refiere, a más del control ya visto en la corteza motora consideraremos a continuación los ganglios basales y el cerebelo.

Ganglios Basales

(Amígdala, pallidus, candado y putámen)

Así como al cerebelo conciernen las operaciones de "feedforward" y "dead-reckoning" como vamos a ver, los ganglios basales están envueltos en graduales movimientos *feedback* controlados, principalmente los aprendidos o aquellos bajo directo control de la conciencia. A nivel neuronal la estructura es totalmente diferente de aquella del cerebelo. Los elementos locales tienen acción inhibitoria siendo mucho más numerosos que los de *output*. Algunas de sus conexiones son recurrentes; en el cerebelo es al contrario. La respuesta de los ganglios basales al *input* es denominada "self-quenching", lo que quiere decir que cuando un *input* inicia una serie de actividades, a menos que el *input* se aumente o se refuerce, él se inhibirá por sí mismo. Esto es verdadero no sólo para las neuronas locales inhibitorias, sino por el *feedback*, para los *inputs* que tienden a bloquear su actividad inicial. Es de anotar la similitud de los ganglios basales activos con un diferenciador. Si uno pudiera considerar el *byte* de código espacial con elementos de *input* activos para estos ganglios, como codificando algún sistema estático de *output* para el comportamiento motor, el *output* de *byte* temporal que posee propiedades semejantes en tiempo, se tornaría dinámico y apropiado para el comportamiento especificado. Para comandos de *output* que decaen con el tiempo, la acción no continúa a menos que se sostenga por otros medios o que un nuevo comando aparezca. Los ganglios basales disponen de *input* para estas contingencias. Los principales *outputs*

de los GB corren a través del tálamo hacia el córtex motor, pasando por los núcleos motores del mesencéfalo y por tanto a los subsistemas del aparato reflejo motor, a los núcleos pontinos y de allí al cerebelo.

Los *inputs* de los ganglios basales son la clave para entender sus funciones. Hay tres componentes: 1o. Proyecciones del córtex. 2o. Fibras de los núcleos talámicos; pero si los impulsos son continuos pueden ser codificados por las estructuras inferiores; con todo los *inputs* corticales y talámicos son insuficientes si se tiene en cuenta la fuerte inhibición aludida antes. El tercer componente de *input* llega de un grupo de núcleos del mesencéfalo procedente de otras estructuras como el sistema límbico, que detecta la cualidad de premio o castigo. Su distribución es diferente, porque dentro de los ganglios basales cada uno de estos axones hace sinapsis con millones de neuronas. Este *input* espacial difuso es codificado temporalmente más bien que espacialmente. Por otra parte puede ejercer una acción de compuerta. Así que este *input* mesencéfalo supuestamente relacionado con emoción es capaz de sostener o inhibir la próxima fase. Este esquema crea un estímulo progresivo que permite por ejemplo seguir un olor a comida hasta su fuente. Una serie de conductas puede desarrollarse por evolución y aprendizaje ayudados por el inmenso poder procesador del córtex. Esto es inferido en su naturaleza por la evidencia derivada de los estímulos excitadores o inhibidores. Parece que se puede establecer la conclusión que los G.B. son esenciales para la orientación hacia el estímulo y para la iniciación de una conducta voluntaria y compleja que envuelva acciones anticipadas en una especial información *feedback*, que puede influenciar y modificar planes básicos generados por el córtex. El daño a los ganglios basales produce una pérdida de habilidad para modificar acciones complejas y juicios, acción distinta de la del mesencéfalo. También hay una creciente evidencia de que el tipo de aprendizaje llamado "condicionamiento operante" puede depender en parte de los ganglios basales. Según Kent este componente sería posible añadirlo en un robot.

¿Cómo simular los G.B.? Un set de compuertas para codificar los impulsos simultáneos de muchas regiones corticales que contribuyan al diseño de la conducta; un circuito que desconecte el *input* codificado y un "bus" habilitador que represente el *input* del sistema de premio (condicionamiento operante que inhiba la inhibición de las compuertas). En *software* se podría simular mejor con un microprocesador rápido que tuviese en cuenta los siguientes datos: la relación *input-output* que es muy alta (*inputs* de muchas áreas del córtex); *outputs* limitados a un bajo porcentaje de los complementos neurales de los G.B., por tanto necesidad de una codificación enorme. Es consecuente admitir que los *inputs* se constituyan en "cuello de botella" y requieran gran decodificación. Igualmente el sistema de premio que modela el *input* representa la última destilación de todo el mundo sensorial relacionado con la recompensa. Esto será revisado adelante. Si queremos proveer robots con la habilidad de condicionamiento operante, será necesario modificar cantidades masivas de información. Los generadores de conducta ensayarán por algoritmos de prueba-error y *feedback* la evolución, incluyendo estos datos en la corriente de *input* que puedan ser manejados por un sistema de compuertas de *software*; la función evaluadora puede ser digitalmente codificada y aplicada por *software*.

El Cerebelo

Este órgano desempeña un papel importante en la expresión motora tanto refleja como voluntaria que se inicia en otra parte, ya que no es instigador ni su acción es conciente. Entre las acciones que ejecuta está el traslado de *output* en paralelo a seriado y el control de la corrección de "feedforward" hacia circuitos abiertos. Este órgano como es sabido consta de corteza y núcleos y sus neuronas corticales están colocadas en forma regular ininterrumpida, que esquemáticamente se puede dividir en neuronas G (granulares) de axones paralelos que en su trayecto hacen contacto con las unidades P (Purkinje). Al ser disparado un *input* selecciona un "set" de *outputs* y como estos impulsos son lentos en los axones de diámetro pequeño, durante su recorrido puede seleccionar secuencialmente sucesivos elementos de *output*, actuando así a la vez como línea marcada de retraso (*tapped delay line*) y como decodificador. Estos procesos por agregación secuencial constituyen cascadas como patrones. Hay elementos auxiliares asociados para otras funciones, como inhibiciones selectivas y control de interacciones para imponer modificación en las secuencias de *output* o apelar a los sistemas adyacentes para refuerzo. Algunas de estas funciones ya han sido simuladas en las grandes máquinas digitales, en experimentos de sistemas de control.

Los *outputs* de corteza caen sobre los núcleos que a su vez retransmiten al cerebro. Hay evidencia de que diferentes sistemas de acciones motoras comparten su actividad, pero las principales funciones son las de facilitar la interacción entre diferentes sistemas de comando, y el proceso llamado *coordinación* cuya calidad depende del cerebelo. Sucede lo siguiente: las secuencias de acciones motoras generadas a cualquier nivel de jerarquía refleja del sistema automático (*automaton*) son enviadas al cerebelo como *inputs* de sistemas de fibras decodificadoras paralelas o como *inputs* a los otros elementos que controlan interacciones a través de sistemas paralelos para regular elementos individuales de *output*. Entonces las ondas de actividad de las fibras paralelas generadas por diferentes sistemas de comandos pueden interactuar en el cerebelo y modificar una u otra en forma predeterminada. El comando modificado resultante es enviado adelante como un "set" de correcciones del comando básico, y los dos interactúan a escalas más bajas para producir una acción corregida. Una clara ventaja de este sistema es la provisión de un sitio común de interacción para sistemas que están funcionalmente relacionados pero que no poseen elementos físicos en común. ¿Pero cómo manejar el cómputo muerto (*deadreckoning*) de los parámetros de movimiento? Este proceso cuenta con una conversión paralelo a seriado que emplea tiempo como un "análogo" de posición. Una función básica de los núcleos cerebelosos es sostener o mantener posiciones (tono) por *outputs* apropiados que dirijan los elementos en el sistema de motoneuronas inferiores. Sin embargo los elementos de *output* de la corteza del cerebelo actúan inhibiendo los núcleos. Entonces mientras que el daño a dichos núcleos da por resultado temblor, oscilación y signos similares de exceso de actividad motora el daño a su corteza resulta en déficit de tal actividad y los movimientos pueden quedarse cortos o no realizarse. Un buen ejemplo de "deadreckoning" es el de los movimientos sacádicos de los ojos, en que los músculos oculomotores son dirigidos por un

input constante, pero el ojo mismo puede acelerar y desacelerar instantáneamente. Porque los movimientos que generan los circuitos "automaton" son detenidos por la actividad de los núcleos; cualquier acción de la corteza que los inhiba, desinhibe el movimiento de los generadores. La duración de la actividad cortical cerebelosa determina la extensión de cualquier movimiento. Las células de los núcleos actúan como una compuerta OR para la secuencia en tiempo de la corteza. Hay muchos movimientos que dependen de la regulación cerebelosa de la actividad motora, como los de habilidad; por ejemplo para tocar el piano, una vez aprendido, la acción es muy rápida para ser guiada por *feedback* desde el oído a los ojos o a los dedos. Se piensa que el aprendizaje de tales secuencias motoras puede depender de la formación de conexiones funcionales nuevas en el cerebelo, así que los elementos finales de una secuencia vienen a ser *inputs* seleccionados para la próxima secuencia.

En cuanto a simular en un mecanismo de IA las funciones del cerebelo de las cuales hemos hecho sólo una superficial e incompleta presentación, habría que pensar en un proceso "análogo" por medio de un procesador rápido y un atavio de palabras digitales para representar los *outputs*. Existe un fenómeno electrónico que funciona en forma parecida a aquella del cerebelo; es la "onda acústica de superficie" (SAW). Este SAW transforma las señales eléctricas en ondas de superficie con un "medium piezo-eléctrico" que las manipula y transforma regenerándolas en señales eléctricas de *output*.

Un resultado similar puede ser realizado con diseños de transferencia por medio de las "cintas de retardo marcadas". Muchas de estas líneas en paralelos han sido usadas en otras tareas como sistemas electrónicos para enfocar imágenes.

Combinadas estas tecnologías se lograría una buena forma para desarrollar "cerebellar chips" según Kent.

Una vez llegados a este nivel de análisis parcial dirigido —obviamente incompleto— del sistema *input-output* del cerebro, pienso siguiendo a Kent que se puede empezar a especular sobre el paso siguiente, el más difícil en la ruta de las sensopercepciones, que es la definición y realización de conductas por inteligencia y aprendizaje, punto que constituye la IV parte con que finaliza esta serie por ahora.

Puedo avanzar que los variados niveles de *output* van a diferentes sistemas cerebrales que funcionan autónomamente en paralelos, siendo de especial importancia en este caso en primer término la motivación que nos lleva al empleo de las funciones cognoscitivas que según Thompson y Tribble (24) son: memoria, atención, entendimiento y capacidad de decisión.

Doy por terminada esta III parte con una frase de Einstein en 1933: "La mayoría de nosotros prefiere mirar hacia afuera más bien que hacia dentro de nosotros mismos; porque en éste último caso no vemos sino un agujero oscuro, lo que quiere decir nada".

BIBLIOGRAFIA

- (1) Jurgen Ruech: *Comunicación y Psiquiatría. Tratado de Psiquiatría*. Freedman y Colbs. I. 4.6. Págs. 383-96. 1982.
- (2) Schank Roger and Hunter Larry. *The Quest of understanding Thinking*. Byte. Págs. 143-55. X. 1985.
- (3) Bernard Glueck y Charles Stroebel. *Ordenadores y Psiquiatría Clínica. Tratado de Psiquiatría*. Freedman y Colbs. I. 6.2. Págs. 473-89. Salvat. 1982.
- (4) Brown Chapel. *VLSI Memory Designers Consider Neural Nets Models*. Electronic Engineering Times. Pág. 53. X. 1986.
- (5) Brown Chapel. *CCD's Minus Team to build Neural Net Models*. E.E. Times. Pág. 33. IX. 1986.
- (6) Richard W. Lay. *Resistor Network Defects Appear*. E.E. Times. Págs. 1-2. IV. 1986.
- (7) Hopfield J.J. and Tank David. *Computing With Neural Circuits. A Model*. Science. Vol. 233. Pág. 625. VIII. 1986.
- (8) AT & T Labs. "Neural Networks Computer Chips". Business Editors. Computer & Science Writers. Murray Hill, N.J. IX. 1986.
- (9) Chester Michael. *The Military Reconnoiters Neural Systems*. Artificial Intelligence. Pág. 77. X. 1986.
- (10) Somjen George G. *Neurofisiología*. L. 450. Ed. Médica. B. Aires. 1986.
- (11) Luria Alexandr Romanovich. *El Cerebro Humano y los Procesos Psíquicos*. Alfonso Impresores. S.A. Barcelona. 1979.
- (12) Luria A.R. *Las Funciones Corticales Superiores del Hombre*. Ed. Orbe. La Habana. 1977.
- (13) Grosberg Stephen. *National Science Foundation Neural Network Conference*. Woburn, Mass. XI. 1986.
- (14) Newquist Harvey P. *Chips for Brains; Computer Built With Neural Networks*. Computer World. V. 20 No. 33. Pág. 17. VIII. 1986.
- (15) Patton and Amassian. *Baker's Clinical Neurology. Cerebral Localization*. I.8. Págs. 1-39. 1985.
- (16) Penfield W. and Welch K. *The Supplementary Motor Area in the Cerebral Cortex of Man*. Trans. Amer. Neurolog. Assoc. 74:179. 1949.
- (17) Jeannerod Marc. *The Brain Machine*. Págs. 34-50. Harvard Un Press. 1985.
- (18) Kent Ernest W. *The Brain of Mens and Machines. Vision in Three Dimensions*. Pág. 80. McGraw Hill. Peterborough. N.H. 1981.
- (19) Pashley J.C., Perkins y Hill. *Fundamentos Científicos de Oftalmología*. Pág. 269. Salvat 1981.
- (20) Mead Carver. *Neural Chips*. Spider. Pág. 169. XII. 1986.
- (21) Gelpering A., Hopfield J. and Tank W. *Model Neural Networks and Behavior*. Plenum Press. N. York. 1986.
- (22) Colin R. Johnson. *Neural Networks Chips are Proving to be Viable Challengers to A.I. Systems*. E.E. Times. XII. 1986.
- (23) Hinton Geoffrey E. *Learning in Parallel Networks. Artificial Intelligence*. Byte. Págs. 265-73. IV. 1985.
- (24) Jesse Victor, Howard Richard E. *Bell Labs. Models Parallel Processor on Neural Networks. Mini-Micro Systems*. Vol. 19 No. 10. Págs. 43-51. VIII. 1986.
- (25) Jackel L.D., Howard R.E., Graf, etc. *Artificial Neural Networks for Computing*. J. Vac. Sci. & Technol. Vol. 4. No. 1. II. 1986.
- (26) Buturi Oyo. Japan. *Neuron Network and Information Processing in the Visual System*. NHK Sci. & Technology Research Labs. Tokio. Vol. 54. No. 4. IV. 1985.
- (27) Camacho Mario. *I.A. y Neurología*. Medicina No. 14. Pág. 20. Bogotá. 1986.