

Cibernética y sistemas dinámicos en biología

Por José NEGRETE MARTÍNEZ

Es posible considerar un sistema biológico, en el sentido de la cibernética, como una caja con una entrada y una salida, esto es: un sistema dinámico del que sólo conocemos la salida que puede producirse para una determinada entrada. Un ejemplo ilustrativo es del arco reflejo medular, en el que la entrada es el estímulo aplicado al receptor (ejemplo, un estímulo doloroso en piel) y la salida, la contracción muscular desencadenada (Fig. 1). Si ignoramos la presencia, en este ejemplo, de subsistemas tales como el del receptor mismo, el del centro nervioso medular y el del músculo, cada uno de ellos con su entrada y salida correspondiente (Fig. 1b), el sistema biológico así definido, puede considerarse en conjunto, como una caja negra que funciona como un operador que actúa sobre la entrada, produciendo un resultado: la salida (Fig. 1c).

Los sistemas dinámicos se pueden clasificar en cerrados y abiertos, dependiendo de que aparezca o no en ellos una realimentación de la salida hacia la entrada a manera de circuito cerrado.

SISTEMAS DE CIRCUITO ABIERTO

A continuación describiremos, con cierto detalle, el estudio de un sistema de circuito abierto, el de nervio-membrana nictitante,¹ que nos ha parecido un buen ejemplo biológico para familiarizar al lector con este tipo de sistemas.

La membrana nictitante, en el gato, es un tercer párpado que cubre la córnea del ojo por debajo de los párpados comunes. El músculo liso que mueve dicha membrana permite cubrir la córnea cuando está relajado y descubrirla cuando se contrae.

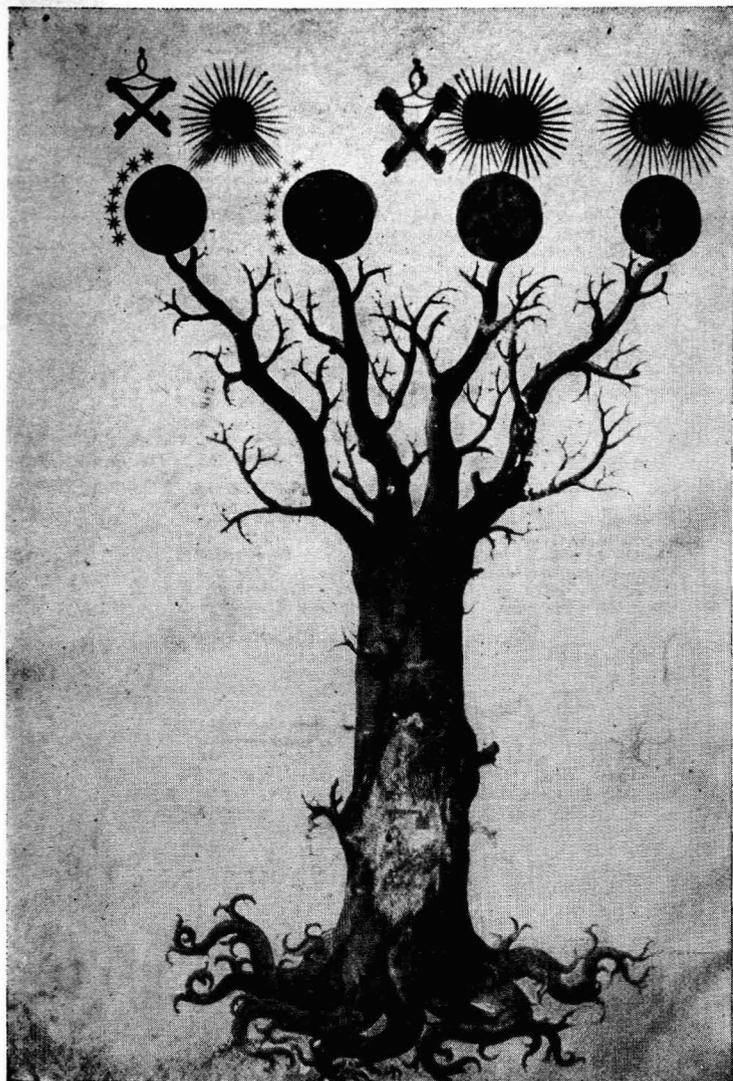
Los nervios que activan este músculo provienen de células nerviosas que se encuentran en un ganglio en la base del cráneo: el ganglio simpático cervical superior. Estas células nerviosas se activan a su vez por nervios que hacen contacto con ellas (sinapsis) y que transcurren por el cuello siguiendo a la arteria más importante de él: la carótida primitiva.

Esquemáticamente, el sistema bajo estudio es un nervio separado del resto del sistema nervioso, que va a terminar a un ganglio, el que a su vez envía fibras nerviosas a la membrana nictitante (Fig. 2).

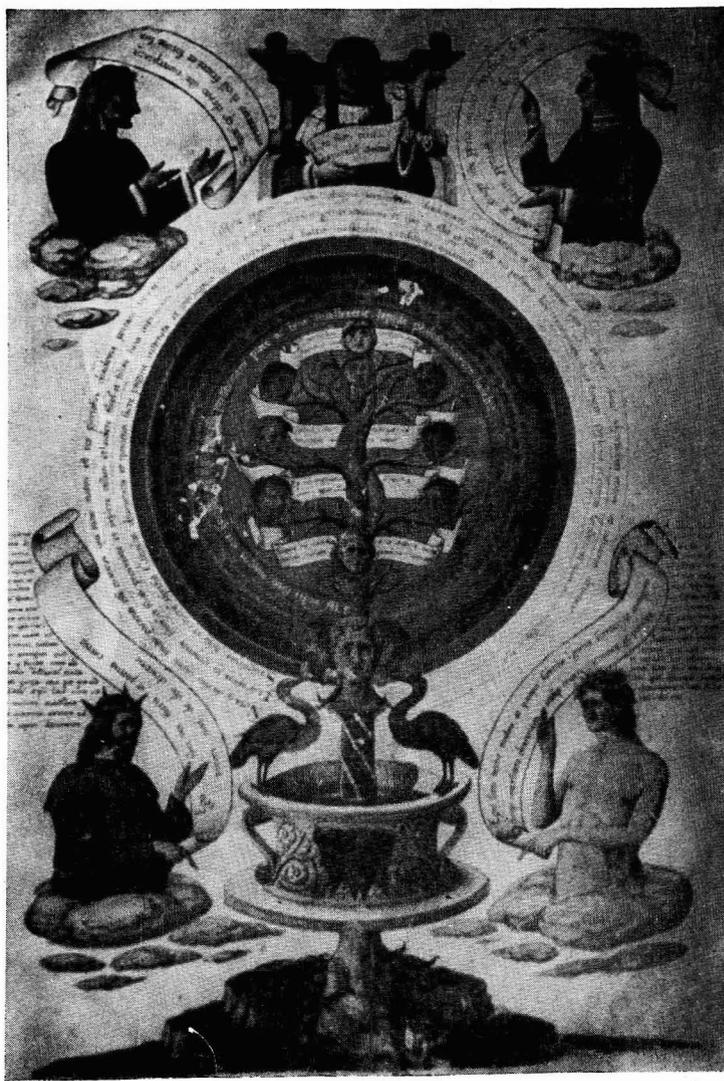
El cabo del nervio cortado se estimula mediante trenes de pulsos eléctricos, obteniéndose contracciones de la membrana que se registran usando un dispositivo electrónico. El registro simultáneo de la frecuencia de los pulsos de entrada y el efecto mecánico producido se ilustran en la figura 3, para un tren súbito de pulsos (función escalón) en el que la frecuencia pasa de cero estímulos por segundo a una frecuencia fija, y para un tren modulado senoidalmente (frecuencia modulada).

Los sistemas biológicos presentan muy a menudo retardo en su respuesta. En nuestro ejemplo esto se debe a que los procesos eléctricos y químicos que tienen lugar desde el momento en el que aplicamos un estímulo al nervio hasta el momento en el que se activan las fibras musculares, toman algún tiempo en su desarrollo. Nótese que transcurre un tiempo sin respuesta desde el momento en el que se inicia el tren de pulsos y el momento en el que se contrae la membrana nictitante (A de la Fig. 3).

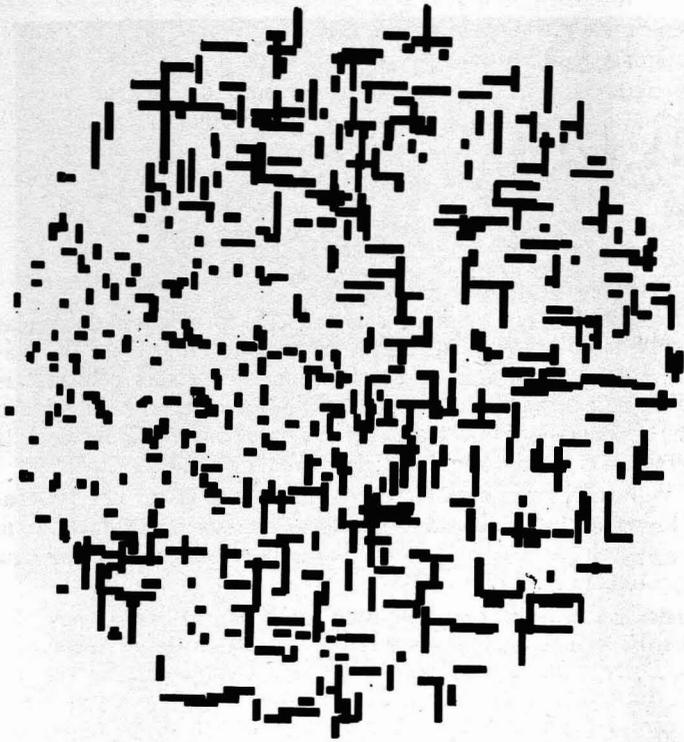
La mayoría de los sistemas biológicos no responden "copiando" la forma de la estimulación, más bien la salida del



—Raimundo Lulio: "Opera chemica"
Transmutación de la materia



—Raimundo Lulio, s. xiii
Tabla de los cuatro elementos



“al seguir los ojos un objeto que se mueve”

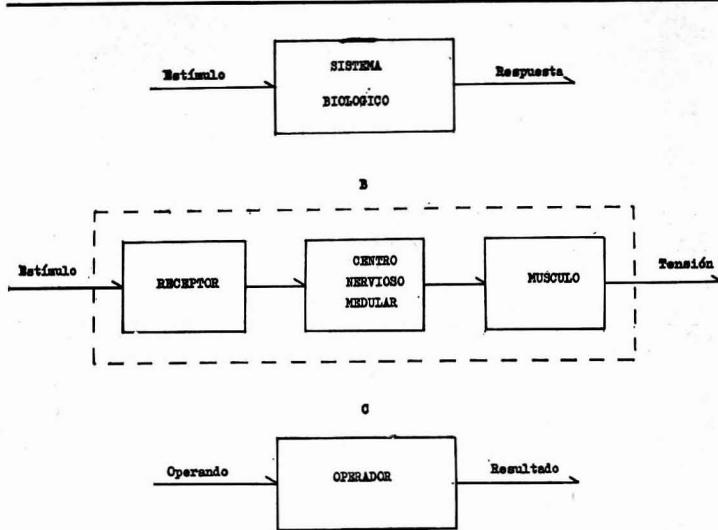


Fig. 1

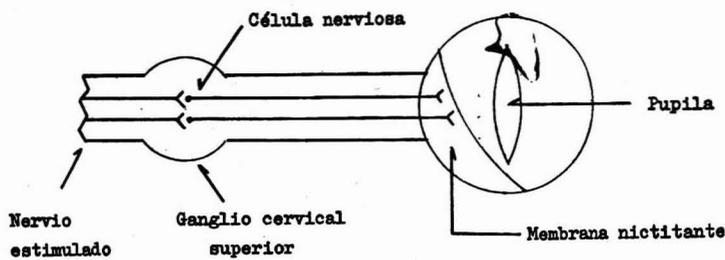


Fig. 2 Sistema biológico de circuito abierto. Membrana nictitante de gato y su innervación

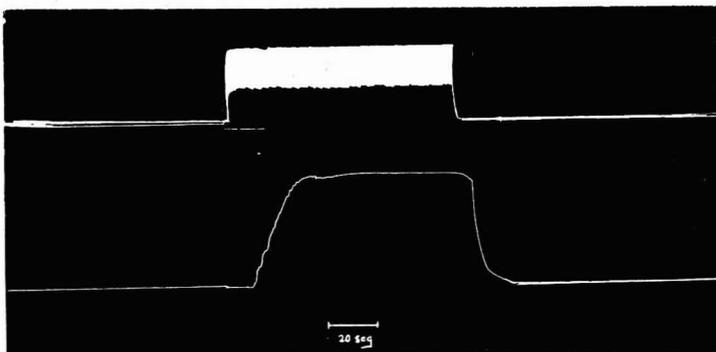


Fig. 3 (A). Respuesta de la membrana nictitante (trazo inferior) a un tren súbito de estímulos que constituyen una frecuencia función escalón (trazo superior). Nótese que la respuesta de la membrana nictitante no es una reproducción del contorno de la señal superior y que además existe un intervalo en que la respuesta está ausente a pesar de que ya se han iniciado los estímulos

sistema puede verse como una versión deformada de la entrada (A de la Fig. 3). Tanto más deformada se verá la salida cuanto más rápido sea el desarrollo de la entrada. En ocasiones no hay propiamente deformación, tal es el caso de la respuesta a los trenes de pulsos senoidalmente modulados, donde la salida es también senoidal, pero en este caso está “atrasada” respecto a la entrada: El pico de las respuestas aparece atrasado respecto al de los estímulos (diferencia de fase) (B de la Fig. 3).

Otra característica importante que estos estudios nos dan a conocer es el de ganancia, esto es: el sistema “amplifica” o “atenúa”. En nuestro ejemplo, el sistema atenúa, ya que la magnitud de la señal de salida a frecuencias lentamente moduladas es menor que la señal de entrada.

SISTEMAS DE CIRCUITO CERRADO

Los sistemas de circuito cerrado tienen una enorme importancia en biología, ya que constituyen el esquema básico de un sistema de control en el que la salida tiende a mantenerse constante para una entrada constante, a pesar de las perturbaciones exteriores que puedan existir.

Los sistemas de circuito cerrado se pueden clasificar en tres tipos:

i) Sistemas de tipo cero. En éstos, los subsistemas que los integran son básicamente amplificadores. La diferencia entre la entrada y la salida es necesaria para mantener una salida. La mayor parte de los mecanismos homeostáticos (mecanismos que tienden a mantener niveles constantes de presión arterial, glucosa sanguínea, etcétera) en los seres vivos son de este tipo:

ii) Sistemas de tipo uno. Son también llamados servomecanismos y tienen un buen ejemplo biológico en los sistemas de control motor.²

iii) Sistemas de tipo dos. Son aquellos que permiten seguir velocidades constantes sin error de posición y se ejemplifican convenientemente con los mecanismos que se ponen en juego cuando los ojos siguen un objeto que se mueve.³

Tomaremos, como en el caso de los sistemas abiertos, un ejemplo de análisis que permita discutir paralelamente los conceptos generales que se pueden obtener del estudio de los sistemas biológicos de control.

Ya se mencionó que un buen ejemplo de sistemas de tipo 2 es el que se pone en juego al seguir los ojos un objeto que se mueve. Esquemáticamente, el sistema consiste en una señal de referencia (la imagen de un objeto) que debe ser llevada a una zona de la retina, la fovea, donde la especialización funcional permite una visión detallada.

La distancia que va de la imagen del objeto en la retina a la fovea, genera una “señal error”, señal que entrá por los elementos nerviosos de la retina y las vías ópticas hasta el sistema nervioso central involucrado en la función. Los nervios motores del ojo y finalmente sus músculos motores, son una vía de regreso que cierra el circuito al actuar sobre la posición del ojo y reducir la señal error (Fig. 4).

Los cambios de posición del ojo se han estudiado mediante una lente de contacto que porta un espejo que proyecta un haz de luz sobre un grupo de celdas fotoeléctricas.⁴

Los resultados, a los que ha llevado este tipo de análisis son los siguientes:

El sistema presenta dos tipos de respuestas a una función escalón de un objeto que se mueve, esto es, a un movimiento súbito de un objeto que después permanece estacionario en la nueva posición: después de un retardo similar al ya discutido en el ejemplo anterior, se instala un movimiento lento que tiende a seguir al objeto (respuesta de seguimiento) seguido en ocasiones de otro rápido (de corrección) cuyo resultado final, en conjunto, es que la fovea alcanza la imagen. Aquí aparece, a diferencia del caso del sistema abierto que se analizó con anterioridad, un tipo de respuesta no continua de corrección. (Fig. 4). Más aún este tipo de respuesta aparece aún sin estímulo de movimiento de objetos por lo que se dice que el sistema presenta ruido interno. Muchos sistemas biológicos exhiben este fenómeno de ruido cuya significación es objeto de grandes controversias y estudios.

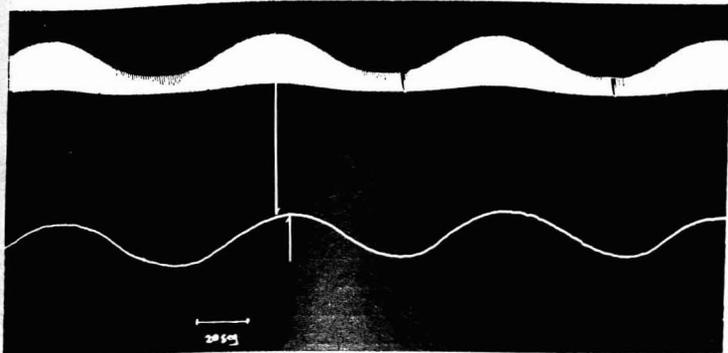


Fig. 3 (B). Respuesta de la membrana nictitante (trazo inferior) a una frecuencia de estimulación senoidalmente modulada (contorno de la señal superior). Nótese que la respuesta de la membrana nictitante es también senoidal, pero los puntos máximos en ella aparecen retrazados respecto a los correspondientes de la señal de estimulación

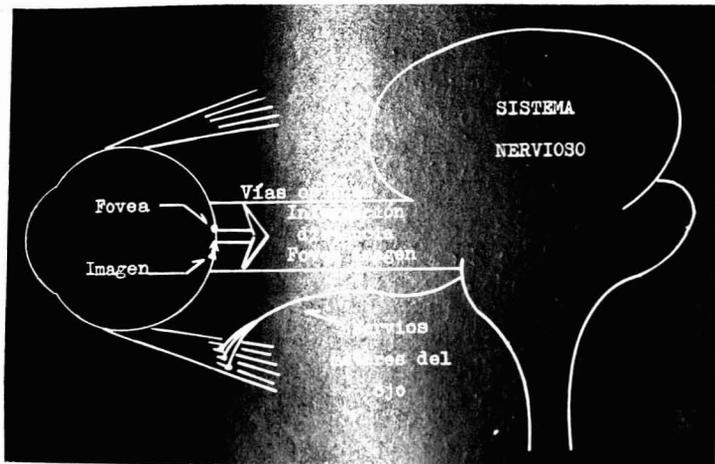


Fig. 4. Sistema biológico de circuito cerrado. Mecanismo que permite al ojo humano seguir un objeto que se mueve

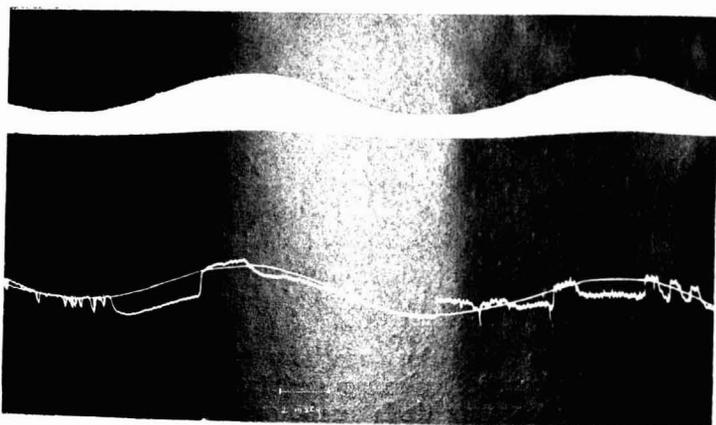


Fig. 5. Respuesta motora del ojo humano (trazo inferior) a un objeto que se mueve horizontalmente en el campo visual siguiendo una función senoidal (contorno del trazo superior). Nótese que en general el ojo tiende a moverse también senoidalmente siguiendo el trazo continuo superpuesto en la figura (respuesta de seguimiento). Aparecen además saltos en la respuesta que tienden a corregir los errores de la reacción de seguimiento (reacción de corrección)

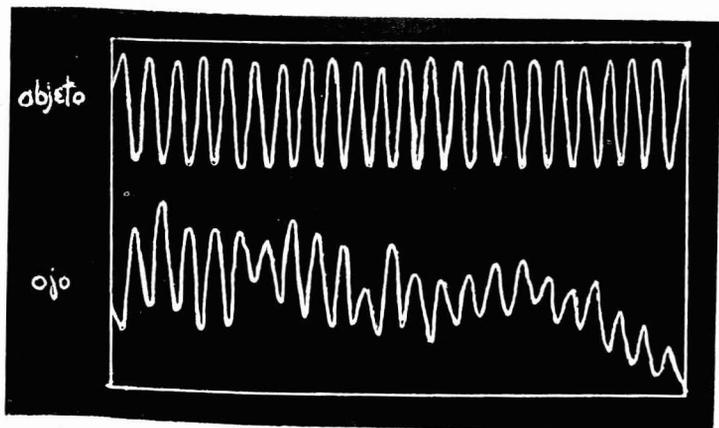


Fig. 6. Respuesta de seguimiento del ojo humano cuando se ha suprimido la información de distancia fovea-imagen. Nótese que el ojo a pesar de que sigue las variaciones del objeto se desvía de la trayectoria horizontal que el objeto sigue

La respuesta de seguimiento a semejanza de la analizada en membrana nictitante presenta: A) un retardo, B) a señales senoidales (un péndulo oscila en el campo de la visión) presenta un desfase respecto al movimiento del objeto, y C) a medida que aumenta la frecuencia del péndulo, la excursión del ojo se hace más pequeña, esto es: el sistema actúa como lo que se conoce en ingeniería como un filtro que pasa bajas frecuencias.

El dispositivo del espejo adherido a una lente de contacto ha permitido diseñar un sistema óptico en el que el ojo puede perder la información de diferencia de distancia entre fovea e imagen, haciendo que la imagen caiga siempre en el mismo punto de la retina.⁴ Esto ejemplifica cómo es posible "disecar el sistema desde afuera" esto es, antagonizar un mecanismo de control de tal suerte que trabaje como si anatómicamente hubiéramos desconectado alguna porción de su circuito, transformándolo en un sistema abierto.

La respuesta de seguimiento, en condiciones de supresión de la información distancia fovea-imagen, se comporta de una manera similar a la anteriormente descrita, pero el trazo se torna irregular con desviaciones del ojo muy fuera de la trayectoria esperada (Fig. 5). Un hecho cuya interpretación es muy interesante es que el sistema (con realimentación) no modificado: atenúa, pero "abierto" según el procedimiento explicado: amplifica, lo que indica que la realimentación suprimida es negativa, es decir tiende a estabilizar al sistema. Que esto es cierto se pone en evidencia cuando el sistema óptico que se agrega para suprimir la información distancia fovea-imagen es tal que la imagen parece moverse en sentido opuesto al movimiento del ojo. En estas condiciones, el ojo oscila espontáneamente aun sin movimiento de imagen. Queda, pues, con el ejemplo, clara evidencia de la importancia que tienen los mecanismos de realimentación para lograr la estabilidad en los sistemas biológicos.

Finalmente, un aspecto interesante, que exhibe este sistema, respecto a las que aquí llamamos respuestas de corrección es el siguiente:

Si el objeto en el campo visual se mueve al azar, la correspondencia de la posición del ojo con la del objeto es la que se puede esperar de un sistema de control de tipo dos, pero si el objeto se comienza a mover de una manera rítmica (no necesariamente senoidal) el ojo se mueve de tal manera que se puede decir que predice el movimiento del objeto, esto es: ¡espera que la imagen del objeto pase en una cierta posición a la que se mueve el ojo con anticipación!

Son en sí extraordinariamente interesantes los conocimientos que se han obtenido del análisis cibernético de los sistemas dinámicos en Biología y muy fructífero, a no dudarlo, el estímulo que han producido para promover investigación fisiológica, pero, ¿no será también cierto que estos mecanismos diseñados a través de cientos de miles de años de experiencia de la naturaleza puedan ser usados para mejorar el conocimiento y la tecnología de la raza humana?

¿No será posible que estos mecanismos se apliquen a la construcción de mejores predictores de señales estocásticas, al diseño de mejores computadoras o de nuevas álgebras? Parte de estos conocimientos biológicos han sido ya utilizados, otros están propuestos para su utilización, pero otros, quizá los más trascendentes, esperan del trabajo coordinado de investigadores que sin el prejuicio generado por su formación básica laboren en la tierra de nadie de la ciencia: la cibernética.

NOTAS

¹ Negrete Martínez, J., Yankelevich G. y Theodoridis G., "La función de transferencia frecuencia-oposición del sistema neuromuscular de la membrana nictitante." Octavo Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Fisiológicas. p. 93. 1965.

² Clynes, E. M.: Biology: "Application of Control System Theory." En: *Medical Physics* III ed. Otto Glasser. The Year Book Publishers, Illinois. 1960.

³ Young L. R. y Stark L. A.: "Sampled-data Model for Eyetracking Movements." Quarterly Progress Report, N° 66 Research Laboratory of Electronics M. I. T. N° 66, pp. 379-384. 1962.

⁴ Fender, D. H.: "Control Mechanisms of the Eye", Sc. Am. 211: N° 1., pp. 24-33. 1964.