

TRABAJOS ORIGINALES

FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN LOS SISTEMAS BIOLOGICOS*

DR. JOSÉ NEGRETE MARTÍNEZ

ES POSIBLE considerar un sistema biológico, en el sentido de la ingeniería de control, como una caja negra con una entrada y una salida, esto es: un mecanismo del que sólo conocemos la salida que puede producirse para una determi-

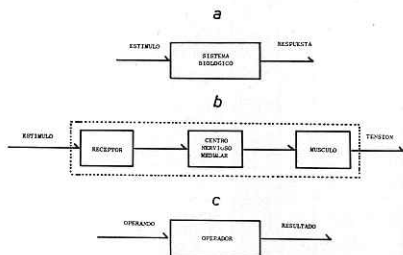


FIGURA 1

nada entrada. Un ejemplo ilustrativo es el del arco reflejo medular, en el que la entrada es el estímulo aplicado al receptor y la salida la tensión muscular desarrollada como consecuencia del estímulo (Fig. 1a). Si ignoramos la presencia, en este ejemplo de subsistemas tales como el del receptor, el del centro nervioso

* Trabajo de Sección (Biofísica) leído por su autor en la sesión del 10 de marzo de 1965.

medular y el del músculo, cada uno de ellos con su entrada y salida correspondientes (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, un operando, produciendo un resultado: la salida (Fig. 1c).

Un sistema matemático adecuado nos permite obtener el operador, dividiendo el resultado entre el operando. Esto es lo que se conoce con el nombre de fun-

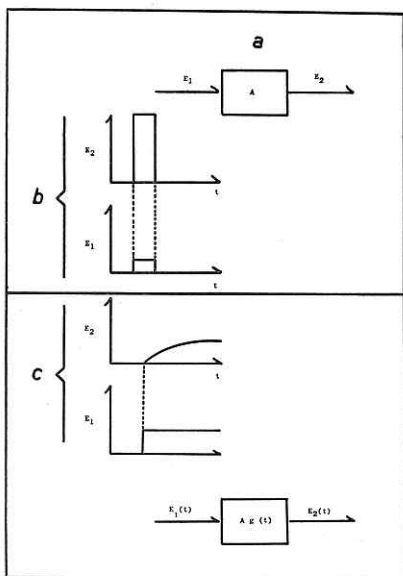


FIGURA 2

ción de transferencia del sistema. Un ejemplo simple de esto es el caso de un amplificador en el que la señal de salida E_2 es igual al producto de una constante A por la magnitud de la entrada E_1 . En este caso la función de transferencia es la constante A ya que E_2 dividido entre E_1 es igual a A . En la figura 2b se ha graficado, para el amplificador simple, la salida de E_2 dada una entrada arbitraria E_1 . Se acostumbra escribir la función de transferencia del sistema dentro de un rectángulo que representa la caja negra en cuestión (Fig. 2a).

En general la función de transferencia no es simplemente una constante. En

la figura 2c, se representa un sistema en el que la entrada es una "señal escalón" y la salida una señal que crece progresivamente hasta alcanzar su valor máximo. Para representar la función de transferencia de este sistema, necesitamos utilizar una función $g(t)$ que modifique convenientemente un valor "A", en el intervalo que ya desde la iniciación de la señal de entrada hasta el desarrollo completo de la señal de salida (Fig. 2d). Las funciones de tiempo, como la antes mencionada, son frecuentemente operadores de la derivación, integración, etc., que se acostumbra representar también en la forma que aparece en la figura 3a; sin embargo, es conveniente para la determinación de la función de transferencia,

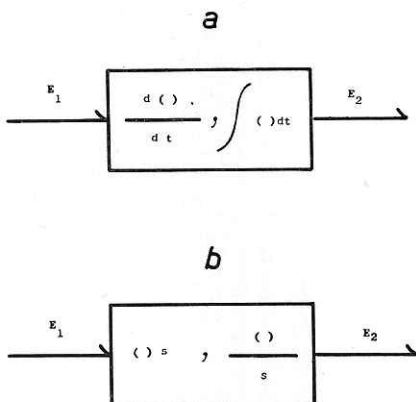


FIGURA 3

cambiar la variable tiempo por la variable compleja "s" mediante la llamada transformada de Laplace. Esto convierte operaciones relativamente complejas de derivación e integración en productos y cocientes de la variable compleja "s" simplificando las expresiones de la función de transferencia y permitiendo una manipulación matemática más simple (Fig. 3b).

Los sistemas hasta ahora mencionados son los conocidos como sistemas de circuito abierto en los que para una entrada señal escalón, podemos obtener uno de los siguientes tipos de respuesta:

- i) Respuestas en las que el valor máximo de salida se "retarda" con respecto al de entrada (Fig. 4a).
- ii) Respuestas en las que el valor máximo se "adelanta" con respecto al de entrada (Fig. 4b).

- iii) Respuestas idénticas a la señal de entrada, pero desplazadas temporalmente respecto a aquella (Fig. 4c).

Un ejemplo del tipo mencionado en el inciso i) es el estudiado por Negrete, Yankelevich y Theodoridis³ en la membrana nictitante del gato. Se consideró como entrada la frecuencia promedio de los impulsos nerviosos de las fibras postganglionares y como salida la posición de la membrana nictitante. La función

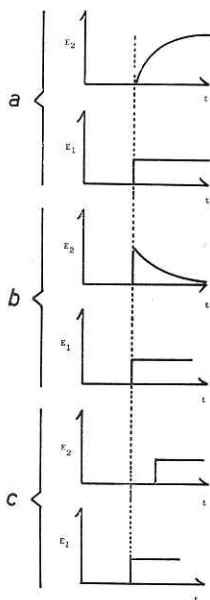


FIGURA 4

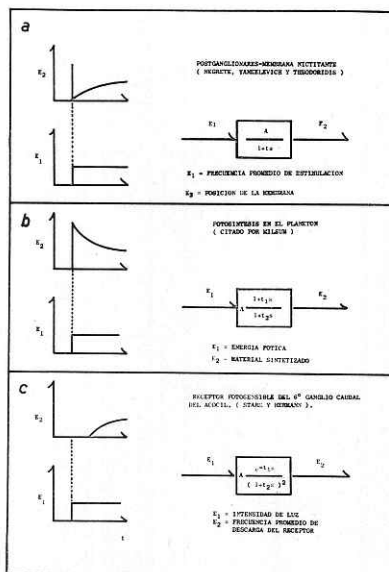


FIGURA 5

de transferencia determinada en este sistema es la que se presenta en la figura 5a.

Frecuentemente los tipos de respuesta aparecen combinados.

Un ejemplo biológico, es el que se combinan los tipos mencionados en los incisos i) e ii) es el modelo lineal de fotosíntesis del plankton, citado por Milsum,² en el que la entrada del sistema es la energía solar y la salida, los productos de fotosíntesis. La función de transferencia propuesta se presenta en la figura 5b.

Finalmente, un ejemplo es el que se combinan los tipos mencionados en los incisos i) e ii), es el de la función de transferencia del ganglio caudal fotosensible del acocil, determinada por Stark y Hermann,⁴ cuya representación aparece en la figura 5c.

Los sistemas de circuito abierto, pueden asociarse como subsistemas en serie, formando a su vez sistemas abiertos en lo que la función de transferencia es igual

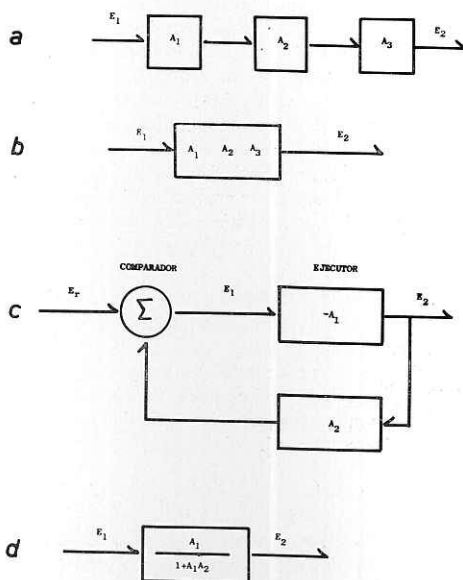


FIGURA 6

a la operación sucesiva de las funciones de transferencia de los subsistemas sobre la entrada (Fig. 6a).

Los subsistemas también pueden asociarse en paralelo, dando origen a los mecanismos fundamentales de control o sistemas de circuito cerrado, también llamados sistemas con retroalimentación. La asociación más simple sería la de dos amplificadores del tipo presentados en la figura 2 a y b. En estos casos hay que distinguir, como se presenta en la figura 6b, la señal de referencia E , o señal de entrada, la "señal error" E_1 y la función de transferencia del llamado ejecutor,

que en la figura lleva un signo negativo, indicando con ello que la señal E_1 es amplificada e invertida en su polaridad, dando lugar a la señal de salida E_2 . La señal de salida E_2 se hace pasar por un subsistema, cuya función de transferencia es A_2 y la salida se lleva a un sitio del circuito, el comparador, donde se suma algebraicamente con la señal de entrada, dando origen así a la señal error. Este sistema, que es la asociación en paralelo más simple, presenta en conjunto la función de transferencia A dividida entre 1 más A_1 por A_2 (Fig. 6b).

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 E_2 tiende a mantenerse constante para una entrada constante E_r , 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, la función de transferencia de 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 en los seres vivos son de este tipo.¹
- ii) Sistemas tipo uno. En estos hay un integrador en el sistema ejecutor, son también llamados servomecanismos y tienen un buen ejemplo biológico en los sistemas de control motor.¹
- iii) Sistemas tipo dos. Son aquellos en los que presentan dos integradores en el subsistema ejecutor. Pueden seguir velocidades constantes sin error de posición y son convenientes ejemplificados con los mecanismos que se ponen en juego cuando los ojos siguen un objeto que se mueve.⁵

La función de transferencia es un método que puede describir matemáticamente un mecanismo biológico de una manera aproximada, tanto más aproximada cuanto más se acerque el sistema al concepto de sistema lineal; esto es, a un sistema en el cual la señal de salida, sus derivadas o sus integrales sean proporcionales a una señal de entrada, durante la respuesta forzada del sistema. Las máquinas en general y los sistemas biológicos no son sistemas lineales, pero frecuentemente se pueden considerar como tales, dentro de determinado orden de valores de magnitud de la señal de entrada. La amplitud de este orden de valores en las condiciones de trabajo de las máquinas y en las condiciones fisiológicas de los sistemas biológicos determina la utilidad del método.

Para concluir, creemos necesario señalar, que la importancia de la función de transferencia radica en que es capaz de predecir la salida de un sistema biológico, para cualquier patrón temporal de la señal de entrada, una vez definido éste.

REFERENCIAS

1. Clynes, E. M.: *Biology: Application of Control System Theory*. En: Medical Physics III. Ed. Otto Glasser. The Year Book Publishers, Chicago. Illinois, 1960.
2. Milsum, J. H.: *Biological Dynamics and Control*. Texto de las Conferencias dictadas en Mc Gill University, Montreal, Canadá, 1963.
3. Negrete Martínez, J., Yankelevich, G. y Theodoridis, G.: Datos no publicados.
4. Stark, L. y Hermann, H. T.: *The Transfer Function of a Photoreceptor Organ*, Kybernetik, 1: 124-129, 1961.
5. Young, L. R. y Stark, L. A.: *Sampled-data Model for Eyetracking Movements*. Quarterly Progress Report, No. 66, Research Laboratory of Electronics, M. I. T. No. 66:379-384, 1962.